



LEITFADEN PLANUNG, GENEHMIGUNG UND BETRIEB VON WASSERSTOFF- KAVERNENSPEICHERN



Zwanzig20 – HYPOS – Verbundvorhaben: H2-UGS

Begleitforschung zur Eignung von Salzkavernen-
Untergrundgasspeichern zur geologischen Speicherung von Wasser-
stoff aus fluktuierenden, regenerativen Quellen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



H Y P O S



IMPRESSUM

Dieser Leitfaden wurde innerhalb des Projektes „H2-UGS - Begleitforschung zur Eignung von Salzkavernen Untergrundgasspeichern zur geologischen Speicherung von Wasserstoff aus fluktuierenden, regenerativen Quellen“ im Rahmen des Programmes „Zwanzig20“ in der HYPOS-Initiative angefertigt und stellt gleichzeitig den Abschlussbericht des Projektes dar.

Projektträger: Projektträger Jülich

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen (FKZ): 03ZZ0721 A-I

Projektpartner: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (DBI, Koordination)

Karl-Heine-Straße 109/111, D-04229 Leipzig

ESK GmbH (ESK)

Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM)

Wöhlerstr. 11, D-79108 Freiburg

IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG)

Friederikenstraße 60, D-04279 Leipzig

Isodetect GmbH (Isodetect)

Deutscher Platz 5b, D-04103 Leipzig

MicroPro GmbH (Micropro)

Magdeburger Str. 26 b, D-39245 Gommern

TU Bergakademie Freiberg,

Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau (TUBAF)

Agricolastraße 22, D-09599 Freiberg

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ)

Department für Isotopenbiogeochemie, Department Umweltinformatik, Permoserstraße 15, D-04318 Leipzig

Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH (UGS GmbH)

Berliner Chaussee 2, D-15749 Mittenwalde

Assoziierte Partner: PSE Engineering GmbH (PSE)

Ahrensburger Straße 1, D-30659 Hannover

VNG Gasspeicher GmbH (VGS)

Maximilianallee 2, D-04129 Leipzig

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SMFZ)

Ehinger Straße 200, D-47259 Duisburg

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden. Für die Ergebnisdarstellung mit Schlussfolgerungen, Konzepten und fachlichen Empfehlungen sowie die Beachtung etwaiger Autorenrechte sind ausschließlich die Verfasser zuständig.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0721A-I gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autorinnen und Autoren

DBI Gas- und Umweltechnik GmbH, Leipzig

Dr. Rico Rockmann, Dr. Benjamin Keßler, Cindy Kleinickel, Marco Henel, Atefeh Maghaminik, Cruz Marrune, Prof. Dr. Hartmut Krause

ESK GmbH, Freiberg

Dr. Maurice Schlichtenmayer, Jörg Fröbel, Dr. Mario Gruhne, Dr. Michael Glöckner, Monika Rockenschaub

Fraunhofer IWM, Freiburg

Frank Schweizer

IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

Tobias Fabig

Isodetect GmbH, Leipzig

Dr Petra Bombach

MicroPro GmbH, Gommern

Guido Nowack

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau, Freiberg

Martin Kirch, Prof. Dr. Moh'd Amro

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Department für Isotopenbiogeochemie, Leipzig

Laura Schwab, Dr. Carsten Vogt

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Department Umweltinformatik, Leipzig

Florian Zill, Uwe-Jens Görke

Untergroundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH, Mittenwalde

Claudia Abdel Haq, Dr. Thomas Faber, Detlef Miersch, Dr. Klaus-Peter Rehmer, Claudia Seckel, Clemens Fröde, Konrad Pfeifer, Lina Zelter, Dr. Jochen Zemke

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg

Elke Wanzenberg

Inhalt

KURZFASSUNG	11
1 EINLEITUNG	17
1.1 Einführung zum Verbundvorhaben H2-UGS.....	17
1.2 Ziel des Leitfadens	18
1.3 Wegweiser durch den Leitfaden.....	18
2 DATENMANAGEMENT UND PROBENAHME	20
2.1 Einleitung.....	20
2.2 Ausgangssituation und mögliche Einflussfaktoren für die Wasserstoffspeicherung...	20
2.3 Standortspezifische Datenerhebung, Beprobung, Test und Prüfungen	25
2.3.1 Umfang Untertageanlagen (UTA).....	25
2.3.2 Umfang Obertageanlagen (OTA)	30
2.3.3 Allgemeine Vorprüfungen für die Erweiterung eines Speichers bzw. Neuerrichtung	35
2.3.4 Zusätzliche Datenerhebung	36
3 DEGRADATIONSSICHERHEIT VON STAHLWERKSTOFFEN.....	37
3.1 Einleitung.....	37
3.2 Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf Degradationssicherheit	37
3.3 Probenrohr und Grundcharakterisierung des Werkstoffes.....	38
3.4 Herstellung und Grundbeprobung der Rundschweißnaht	42
3.5 Untersuchungsmethoden zur Ermittlung der Degradationssicherheit.....	45
3.6 Ergebnisse zu Untersuchungsmethoden	58
3.7 Bewertung von Materialien (insbesondere im Hinblick auf die in Kavernen vorhandenen Medien inklusive Salz und Feuchte)	83
3.8 Handlungsempfehlungen	84
3.9 Literaturverzeichnis	86

4	GEOMECHANIK	87
4.1	Einleitung.....	87
4.2	Geomechanische Grundlagen als Bedingung für die Wasserstoffspeicherung.....	87
4.3	Dimensionierungsvorgaben für die Errichtung einer Wasserstoffkaverne.....	89
4.4	Geomechanische Voruntersuchungen	92
4.4.1	Laboruntersuchungen	94
4.4.2	In-situ-Messungen	99
4.5	Modelltechnischer Eignungsnachweis der Wasserstoffspeicherung	104
4.5.1	Modellentwicklung, Verifizierung, Validierung (In-situ-Versuch)	104
4.5.2	Kavernenmodell und Simulation der Wasserstoffspeicherung.....	111
4.6	Bewertung und Handlungsempfehlungen.....	131
4.7	Literaturverzeichnis	132
5	MIKROBIOLOGIE	134
5.1	Einleitung.....	134
5.2	Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf mikrobiologische Aspekte	134
5.3	Untersuchungsmethoden	136
5.3.1	Auswahlkriterien der Kavernenproben	137
5.3.2	Entnahme der Soleproben	138
5.3.3	Entnahme von Gasproben	140
5.3.4	Hydrochemische Analysen der Soleproben	141
5.3.5	Stimulationsexperimente.....	142
5.3.6	Molekularbiologische Analysen.....	148
5.3.7	Isotopenchemische Analysen	149
5.3.8	Mikroskopische Analysen	150
5.4	Ergebnisse.....	151
5.4.1	Mikrobiologisch relevante Standortparameter	151
5.4.2	Charakterisierung mikrobieller Kavernengemeinschaften	153
5.4.3	Auswirkungen einer Wasserstoffexposition auf mikrobielle Prozesse	162

5.4.4	Mikrobielle Begleiterscheinungen während einer Wasserstoffexposition – Untersuchungen zur Eisenkorrosion durch halophile Mikroorganismen.....	179
5.4.5	Maßnahmen zur Hemmung mikrobieller Aktivitäten	183
5.4.6	Erfassung mikrobieller Prozesse während einer Wasserstoffeinspeicherung.....	186
5.5	Bewertung und Handlungsempfehlungen.....	193
5.6	Ausblick – Risiken und Chancen	203
5.7	Literaturverzeichnis	203
6	GASVERMISCHUNG/THERMODYNAMIK.....	207
6.1	Einleitung.....	207
6.2	Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf Gasvermischung und Thermodynamik.....	208
6.3	Stadtgasspeicherung.....	208
6.3.1	Gasqualität und Gasqualitätsveränderungen während der Medienumstellung von Stadtgas auf Erdgas.....	209
6.3.2	Theoretische Betrachtungen der Stadtgas-Erdgas-Umstellung.....	210
6.3.3	Monitoring Umstellung der Kaverne K.....	211
6.3.4	Umstellung weiterer Kavernen und die Entwicklung der Gasqualität in den Jahren 1997 bis 1998	213
6.3.5	Anwendbarkeit der Ergebnisse auf die Medienumstellung mit Wasserstoff.....	213
6.4	Feuchteentwicklung bei der Gasspeicherung in Salzkavernen	214
6.5	Geochemische Reaktionen Wasserstoff/Salz/Kavernensumpf.....	214
6.6	Gaslöslichkeiten in Wasser/Sole.....	216
6.7	Wassergehalt und Taupunkt von Wasserstoff	221
6.8	Entwicklung eines thermodynamischen Gasmischungsmodell für Kavernen	229
6.8.1	Geometrie.....	231
6.8.2	Randbedingungen	232
6.8.3	Vernetzungsmethodik	233
6.8.4	Beschreibung und Auswahl der verfügbaren Turbulenzmodule	236
6.8.5	Mathematische Beschreibung des Turbulenzmoduls	241

6.9	Simulation der Medienumstellung	246
6.9.1	Umstellungsstrategien	246
6.9.2	Simulation der Injektionsphase für unterschiedliche Randbedingungen.....	247
6.9.3	Simulation der Ruhephase.....	250
6.9.4	Simulation der Ausspeicherphase.....	254
6.9.5	Prognose der zu erwartenden Gasqualitäten	255
6.9.6	Zusammenfassung	256
6.10	Berechnung der Bohrungsbelastung	257
6.10.1	Modell für Spannungsberechnung im Tubing	258
6.10.2	Ergebnisse	263
6.11	Bewertung und Handlungsempfehlungen	264
6.11.1	Bewertung Kavernenumstellung.....	264
6.11.2	Bewertung Bohrungsbelastung.....	264
6.12	Literaturverzeichnis	266
7	UNTERTÄGIGES SPEICHERDESIGN UND AUSRÜSTUNGEN	268
7.1	Einleitung	268
7.2	Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf das untertägige Speicherdesign und Ausrüstungen	268
7.3	Spezifikation der Untertageausrüstung	270
7.3.1	Technische Ausrüstungen, Materialien und Einbautechniken	270
7.3.2	Untertägiges Komplettierungsdesign	291
7.3.3	Experimentelle Untersuchungen zu Casing/Zement/Gebirge.....	306
7.4	Gaserstbefüllungskonzepte	311
7.4.1	Fahrweisen	311
7.4.2	Anforderungen bei Wasserstoffbefüllungen	312
7.4.3	Entleerungsregime Forschungskaverne, diskontinuierliche Fahrweise	314
7.4.4	Entleerungsregime Typkaverne, diskontinuierliche Fahrweise	316
7.5	Bewertung und Handlungsempfehlungen	320
7.6	Ausblick – Risiken und Chancen	323

7.7	Literaturverzeichnis	324
8	GESAMTANLAGENDESIGN	325
8.1	Einleitung.....	325
8.2	Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf das Gesamtanlagendesign	325
8.3	Betriebsführungskonzept	327
8.3.1	Speicherfahrweisen auf Basis realistischer Marktmodelle	327
8.3.2	Betriebssimulation für den Speichergesamtprozess (OT/UT).....	343
8.3.3	Designspezifikationen der Prozesshauptkomponenten	368
8.3.4	Modellierung der obertägigen Gesamtanlagenkonzepte	380
8.3.5	Sicherheitsbetrachtungen zum Anlagenbetrieb (Normalbetrieb, Dennoch-Störfälle)	393
8.3.6	Wasserstoff-Verdichtertechnik unter Berücksichtigung von Betriebserfahrungen mit Wasserstoff-Untergroundspeicherung	403
8.4	Bewertung und Handlungsempfehlungen.....	413
8.5	Ausblick – Risiken und Chancen	415
8.6	Literaturverzeichnis	418
9	BEWERTUNGSMETHODEN UND GENEHMIGUNGSVERFAHREN.....	426
9.1	Einleitung.....	426
9.2	Grundlagen für den Bau und die Betriebsführung einer Kavernenspeicheranlage für Wasserstoff.....	426
9.2.1	Nachweis- und Monitoringverfahren.....	426
9.2.2	Logging.....	427
9.2.3	Teste	449
9.2.4	Monitoringverfahren.....	477
9.2.5	Bewertungsmethodik	490
9.2.6	Methodik zur Eignungsprüfung: Beispielhafte Betriebsführungs-, Kontroll- und Überwachungsregime der UT- und OT-Anlagen eines Wasserstoff-Kavernenspeichers	520
9.3	Wesentliche Bestandteile des Genehmigungsverfahrens.....	529
9.3.1	Beschreibung des Genehmigungsverfahrens	529

9.3.2	Leitlinien für die Erstellung der notwendigen Antragsunterlagen für die Wasserstoffspeicherung	539
9.3.3	Einbeziehung von Sachverständigen	550
9.4	Bewertung und Handlungsempfehlungen	556
9.5	Literaturverzeichnis	558
10	ANLAGEN	559
10.1	Anlage 1: Variantenmatrix zur Modellierung der Obertageanlage	560
10.2	Anlage 2: Übersicht der sicherheitstechnisch besonders relevanten Normen und Regelwerke	567
10.3	Anlage 3: Varianten zur Modellierung der Obertageanlage.....	569
10.4	Anlage 4: Matrix Risikobewertung	572
10.5	Anlage 5: Phasenkontrast-Mikroskopie der Kavernensolen aus Tiefenprobenahme .	573
10.6	Abbildungsverzeichnis	575
10.7	Tabellenverzeichnis	590
10.8	Abkürzungsverzeichnis	595

Kurzfassung

Eckpfeiler einer versorgungssicheren Energie- und Stoffinfrastruktur mit überwiegend regenerativen Quellen ist die Speicherung von fluktuierender überschüssiger Wind- und Sonnenenergie. Nur mit ausreichenden Speicheroptionen ist die angestrebte Transformation des Energiesystems hin zur stärkeren Nutzung erneuerbarer Energien (EE) bei gleichzeitiger stabiler und sicherer Energieversorgung und der Reduzierung des Ausstoßes klimaschädlicher Gase möglich. Ein möglicher Ansatz ist, die fluktuierenden EE über Elektrolyse in Form von grünem Wasserstoff zu speichern. Eine Möglichkeit, die bisher wenig erforscht ist und für die weltweit nur vereinzelte Pilotprojekte existieren, ist die großskalige Wasserstoffspeicherung in Kavernen-Untergroundspeichern (UGS), da Salzkavernen derzeit die besten Voraussetzungen für eine großvolumige, sichere und effiziente Speicherung grünen Wasserstoffs bieten.

Projektziel

Ziel des Verbundhabens H₂-UGS ist die noch offenen Fragen zur Wasserstoffspeicherung in Kavernen zu klären, die Voraussetzungen für einen sicheren Speicherbetrieb zu schaffen und eine Methodologie für die genehmigungsrechtlichen Fragestellungen der Speicherintegrität von Wasserstoffkavernen (Bestands- und Neukavernen) zu entwickeln. Mit dem Leitfaden sollen für Pilotprojekte und großtechnische Industrieprojekte zur Umnutzung und zum Neubau von Wasserstoff-Kavernenspeichern die relevanten Randbedingungen dargelegt werden.

Forschungsschwerpunkte

- Bestimmung thermodynamischer und fluiddynamischer Grundlagen zu Wasserstoff-Erdgas-Mischung bei Wechsel des Speichergases, des Taupunkts bei hohen Drücken sowie Wasserstoff-Löslichkeit in der Sole,
- Ermittlung der Infiltration von Wasserstoff in die Wände von Salzkavernen und dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Salzes,
- Mikrobiologische Bewertung zur Untergroundspeicherung von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen im Hinblick auf die Wasserstoffzehrungen sowie Entwicklung von Spurenstoffen und Ausfällungen,
- Entwicklung von Modellen für den Betrieb von Kavernenspeichern unter Berücksichtigung der vorgenannten veränderten Bedingungen innerhalb der Kaverne,
- Entwicklung von Materialmodellen für die Identifikation und Lebensdauerbewertung geeigneter Materialien und Schweißtechnologien für Rohrleitungen (Tubing) und Ausrüstungen, welche den besonderen Bedingungen der Wasserstoffumgebung oder Wasserstoff-Erdgas-Mischgasen mit Kontamination aus Feuchte und gelöstem Salz dauerhaft widerstehen,
- Bewertung der Auswirkungen der veränderten Fahrweise (schnelle Wechsel zwischen Speicher- und Produktionsbetrieb) von EE-Gasspeichern auf das Speichergestein und den Verbund Casing/Zement/Gebirge.

Mit dem Verbundvorhaben werden standardisierte, gesamtheitliche Verfahren zur Umrüstung von bestehenden Kavernen-UGS für Erdgas und zur Eignungsprüfung von neuen Speicherlokationen für die

Wasserstoffspeicherung entwickelt. Diese Verfahren beinhalten auch Nachweis- und Monitoringverfahren für Ausführungs- und Speicherdesign sowie technische Ausrüstungen und Einbautechniken. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für ein kostengünstiges Anlagendesign sowie eine optimale Betriebsführung. Mittels wissenschaftlicher, standortunabhängiger Untersuchungen von Untertage- und Obertage-Speicheranlagen wird die geologische, technisch/technologische und sicherheitstechnische Eignung zur sicheren und effizienten Wasserstoffspeicherung am Beispiel eines mitteldeutschen Kavernenspeichers detailliert dargestellt. Die Ausführungen umfassen auch die thermodynamischen, gebirgsmechanischen und mikrobiologischen Grundlagen.

Für den Leitfaden wurden drei Speichervarianten unterschiedlicher Größe definiert und im Detail untersucht, die als Musterbeispiele für eine Umsetzung der Wasserstoff-Kavernenspeicherung in Deutschland in den nächsten Jahrzehnten dienen können.

Wesentliche Ergebnisse (Auswahl)

Degradationssicherheit von Stahlwerkstoffen

- Mit dem Verbundvorhaben H₂-UGS wurden geeignete Untersuchungskonzepte zur Korrosionsbeständigkeit von Werkstoffen für den Einsatz in Wasserstoff und unter Sauer gasbedingungen entwickelt.
- Je nach Betriebsbedingungen können für Sauer gasanwendungen geeignete Stähle sogenannte Sauer gasgüten, die für den Einsatz in H₂S-haltigen Medien ausgelegt sind, auch zur Wasserstoffspeicherung genutzt werden.
- Reiner Wasserstoff diffundiert vergleichsweise langsam in Zugspannungsbereiche der Schweißnähte.
- Bei einer Eignung des Werkstoffs für Erdgaskavernen mit gleichem H₂S-Gehalt ist der Werkstoff vermutlich ebenso für Anwendungen der H₂-Speicherung bei quasi-statischen Bedingungen geeignet.
- Ausblick:
 - Zum sicheren Einsatz des untersuchten Rohrwerkstoffs müssen die Betriebsbedingungen hinsichtlich des Auftretens und der Konzentration von Schwefelwasserstoff (H₂S) aus Umsetzungsvorhaben präzisiert werden.
 - Die Ergebnisse aus dem Projekt sollten mit Langzeituntersuchungen abgesichert werden. Dabei ist zu prüfen, wie die Werkstoffe sich bei Ermüdungsbelastung verhalten. Für den Einzelfall besteht derzeit nur die Möglichkeit, die gut schweißbaren Stähle auf ihre Sauer gasbeständigkeit unter angenommenen Betriebsbedingungen (HIC- und SSC-Tests unter sogenannten Fit-For-Purpose-Prüfbedingungen) zu prüfen.
 - Zusätzliche mechanische Untersuchungen der Schweißnahtbereiche nach längerer Liegezeit oder längerer Auslagerung in Wasserstoff und/oder Schwefelwasserstoff sind sinnvoll. Insbesondere die Prüfung der Wurzellage in Kontakt mit verschiedenen H₂- und H₂S-Gehalten sind zweckmäßig.

Geomechanik

- Die Wasserstoffspeicherung in behälterlosen Untergrundgasspeichern ist – bezogen auf die gebirgsmechanischen Aspekte der Integrität und Stabilität – ebenso möglich wie die Erdgasspeicherung.
- Richtlinien zur Anlage eines Untergrundgasspeichers (Dimensionierungsvorgaben) und Bewertungsmaßstäbe können dabei aus der Erdgasspeicherung übernommen und angewendet werden.
- Ausblick:
- Im Fokus weiterer Untersuchungen sollte der technische Aspekt der Bohrlochkomplettierung liegen. Hier gilt es, bei der zukünftigen Anlage einer Wasserstoffkaverne Bewertungskriterien aus der Erdgasspeicherung auf ihre Anwendbarkeit in einem Realversuch zu überprüfen.

Mikrobiologie

- Die Laboruntersuchungen unter Simulation der Speicherbedingungen zeigen, dass die vorhandenen mikrobiellen Kavernengemeinschaften Wasserstoff umsetzen können. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, sowohl bei der Planung wie auch der Durchführung der untertägigen Wasserstoffspeicherung hydrogeochemische, mikrobiologische, molekulargenetische und isotopenchemische Untersuchungen zu integrieren.
- Für eine zukünftige großvolumige und effiziente Wasserstoffspeicherung bedarf es vor und während der Wasserstoffspeicherung mikrobiologische Begleituntersuchungen, um mikrobielle Risiken zu erfassen und ggf. zu minimieren.
- Mikrobiologisch relevante Parameter und geeignete Untersuchungskonzepte zur Beurteilung mikrobieller Risiken liegen mit dem Verbundvorhaben H2-UGS vor.

Gasvermischung/Thermodynamik

- Die Simulation unterschiedlicher thermodynamischer Zustände und Szenarien für die Umstellung von Erdgaskavernen beantwortet die Frage, ob und wie Wasserstoff ausgespeichert und das Erdgas als Kissengas in der Kaverne belassen werden kann. Durch eine Mitförderung eines Teils des Kissengases bzw. durch Rückstände des Blanketmediums kommt es zu Verunreinigung des Wasserstoffs. Sind hohe Reinheitsanforderungen gegeben bzw. soll die volle Speicherkapazität der Kaverne genutzt werden, sollte auf ein Kissengas abweichend von Wasserstoff verzichtet werden bzw. sind zusätzliche Reinigungsmaßnahmen für das geförderte Gas erforderlich.
- Bei der Umstellung einer Kaverne von Erdgas auf Wasserstoff sollte die Kaverne mit vollgesättigter Sole geflutet werden, um das Erdgas vollständig fördern zu können. Anschließend kann Wasserstoff in die mit Sole gefüllte Kaverne injiziert werden. Diese Variante bringt den Vorteil, dass eine reine Wasserstoffkaverne zur Verfügung steht und geringere Anforderungen an die Gasaufbereitung gestellt werden müssen.
- Als alternative Umstellungsvariante könnte der Druck möglichst weit, bis zum minimalen Kavernendruck oder optimaler Weise kurzzeitig unter den minimalen Kavernendruck abgesenkt werden. Dies lässt sich nur mit einem geomechanischen Gutachten und in Abstimmung mit

der Bergbehörde realisieren. So kann erreicht werden, dass sich ein möglichst hoher Anteil an Wasserstoff in der Kaverne befindet.

Untertägiges Speicherdesign und Ausrüstungen

- Vor jedem Gasinjektionsprojekt, unabhängig von der Art des Gases oder den geologischen Gegebenheiten, ist eine eingehende Risikobewertung jeder einzelnen Komponente als Barriere im Bohrloch erforderlich. Chemische und physikalische Wechselwirkung während der Gasinjektion können Formationsschäden auslösen und letztlich die Integrität des Bohrlochs gefährden. Anders als bei der Wechselwirkung des Wasserstoffs mit einigen metallischen Werkstoffen ist das Migrationsverhalten des Wasserstoffs in geologischen Formationen und Zementationen trotz seines hohen Mobilitätspotenzials mit anderen Gasen, z. B. Stickstoff oder Methan vergleichbar.
- Wie bei der Speicherung von Erdgas im geologischen Untergrund gilt eine besondere Aufmerksamkeit dem Verbund Zement/Gebirge/Casing. Die für die Überwachung der Erdgasspeicherung geltenden Festlegungen, wie Wartungsprogramme, Monitoring und Überwachungsanforderungen, sind grundsätzlich auf die Wasserstoffspeicherung übertragbar.

Gesamtanlagendesign

- Aus den Ergebnissen der Literaturanalyse und der Stakeholder-Befragung lässt sich ein kontinuierlicher Hochlauf des H₂-Marktvolumen ablesen. Bis spätestens 2050 wird ein H₂-Speicherbedarf erwartet, der mit den heutigen Erdgasspeichern vergleichbar ist – wenn es auch erhebliche Unsicherheiten zum zeitlichen Verlauf der Entwicklung gibt. Es erscheint plausibel, dass in den ersten Wasserstoff-Verbrauchszentren bereits in den nächsten Jahren der Bedarf für H₂-Speicher bestehen wird.
- Es kann davon ausgegangen werden, dass kleinere Kavernen in eher kürzeren Zyklen betrieben werden können (z. B. Wochenzyklen), während bei größeren Kavernen eher mit jährlichen oder halbjährlichen Zyklen zu rechnen ist, welche durch kurzfristige Fluktuationen überlagert werden. Dieser Überlagerungsanteil wird voraussichtlich stärker ausgeprägt sein, als dies bei den aktuellen Erdgasspeichern der Fall ist.
- Je nach der Ausgangssituation einer Bohrung sind geeignete Komplettierungskonzepte unter Einhaltung des Zwei-Barrien-Konzepts zu entwickeln. Für Bestandsbohrungen ist im Vorfeld zu prüfen, ob die Anforderungen nach BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ eingehalten werden bzw. durch entsprechende Rekomplettierung erreicht werden können. Die Eignung der eingesetzten Rohrwerkstoffe für die geplante H₂-Anwendung ist vor Einsatz zu erbringen. Unter Berücksichtigung des thermodynamischen Verhaltens von Wasserstoff ist die axiale Spannungssituation von Förderrohrtouren zu minimieren. Auf Grund der derzeit geringen Erfahrungen zum Werkstoffeinsatz bei der untertägigen H₂-Speicherung sollte die Spannungsauslastung der verwendeten Werkstoffe auf 30 % der Mindeststreckgrenze bzw. 20 % der Mindestzugfestigkeit begrenzt werden, wobei der kleinere der beiden Werte maßgeblich ist. Die Sicherheitsbeiwerte gemäß BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“ sind ggf. anzupassen. Hinsichtlich einzusetzender Untertageausrüstungen sind für Wasserstoff geeignete Materialien zu verwenden. Sollten diese auf dem Markt nicht verfügbar sein, sollte u. U. eine

Auslegung nach Sauer gasstandard erfolgen. Die Festlegung dazu ist auf Basis der Ergebnisse aus mikrobiologischen Untersuchungen zu treffen, z. B. sollte im entsprechenden Anwendungsfall ein erhöhtes Potenzial zur H₂S-Bildung vorhanden sein. Mögliche mikrobiologische Untersuchungen werden im Verbundvorhaben H₂-UGS für verschiedenen Betriebsphasen benannt.

- Das Design der Obertageanlage erfolgt weitgehend in Anlehnung an übliche Erd-gasspeicherdesigns. Die jeweiligen Einzelkomponenten sind mit Blick auf die H₂-spezifischen Betriebsanforderungen auszulegen und müssen für den Kontakt mit Wasserstoff geeignet sein. Im Bereich der obertägigen Installationen sind diese Komponenten grundsätzlich am Markt verfügbar. Mit Kapazitätsengpässen bei Anlagenbauern und angrenzenden Gewerken ist jedoch zu rechnen und entsprechende Vorlaufzeiten für eine Speicherrealisierung einzuplanen.
- Die Sicherheitsbetrachtungen wurden in Analogie zum etablierten HAZOP-Verfahren durchgeführt. Hierbei wurden vereinzelt geringfügige Unterschiede in möglichen Ursache-Wirkungs-Ketten zur Erdgasspeicherung festgestellt. Diese Änderungen ergeben sich direkt aus den spezifischen Stoffeigenschaften des Wasserstoffs. Grundsätzlich hat sich die Anwendbarkeit des Verfahrens bestätigt, weshalb das HAZOP-Verfahren auch für die H₂-Speicherung weiterhin empfohlen wird.

Bewertungsmethoden und Genehmigungsverfahren

- Grundsätzlich können die Messverfahren aus der Erdgasspeicherung für die H₂-Anwendung übertragen werden. Für die Messverfahren, die bisher keine Anwendung in Wasserstoff hatten, sind zusammen mit der jeweiligen Servicefirma das Handling während der Messung, etwaige Messeinflüsse, die Messanforderungen und erzielbaren Genauigkeiten zu betrachten.
- Generell können bei der Anlage des Unterspeichers die Richtlinien bzw. Bewertungsmaßstäbe für Dichtheitsteste aus der Erdgasspeicherung angewendet werden. Für Standorte, an denen erstmalig eine H₂-Speicherung vorgesehen ist, empfiehlt es sich, vergleichende Dichtheitsteste (zunächst mit Stickstoff und danach mit Wasserstoff) durchzuführen. Der parallele Einsatz von einem inerten Gas (Stickstoff) und dem späteren Speichergas Wasserstoff ist zukünftig tiefergehend zu untersuchen, um weitere Erfahrungen zur Übertragbarkeit der Methoden und der Ergebnisse der Testprozeduren zu gewinnen. In diesem Rahmen wird auch eine ständige Überprüfung der angenommenen Akzeptanzkriterien erfolgen müssen, um für einen späteren regulären Betrieb verlässliche Grenzparameter für einen langfristig sicheren Betrieb festlegen zu können.
- Im Verbundvorhaben H₂-UGS wird der Bohrungsstandard für H₂-Speicherbohrungen, unter Berücksichtigung der für die Erdgasspeicherung geltenden Normen, Standards, Regeln und gesetzlichen Verfügungen, gegeben. Er stellt die Bewertungsgrundlage zur Feststellung der Integrität der untertägigen Betriebsanlagen dar. Es gilt die Integritätsbewertung unter dem Gesichtspunkt des Barrieren-Systems. Es wird empfohlen, die in der Neufassung der Tiefbohrverordnung (BVOT) Niedersachsen (05/2022) enthaltenen Neuregelungen hinsichtlich der Anwendung bei der Neuauslegung bzw. Umwidmung von Kavernenbohrungen für die Wasserstoffspeicherung zu prüfen. Auch bei Speicherlokationen, die bisher nicht gemäß der

neuen BVOT behandelt werden mussten, sollten geplanten Vorhaben zur Wasserstoffspeicherung frühzeitig mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden.

Das Projektkonsortium geht davon aus, dass der überwiegende Teil der Anforderungen der bisherigen Genehmigungsverfahren und Regelwerke anwendbar ist, wenn Wasserstoff-spezifische Ergänzungen beachtet werden. Somit wird auch der Umfang der notwendigen Prüfungen weiterhin Bestand haben. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt sind in das Genehmigungsverfahren eingeflossen und fließen in die Umsetzung des ersten deutschen Wasserstoff-Kavernenspeichers in Bad Lauchstädt ein. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse in der Überarbeitung des technischen Regelwerkes Gas des DVGW e.V. und des BVEG e.V. genutzt.

1 Einleitung

1.1 Einführung zum Verbundvorhaben H2-UGS

Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany, kurz „HYPOS“, steht für eines von zehn ost-deutschen Projekten, welches im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Zentrales Thema für HYPOS ist die umfassende Nutzung von insbesondere temporärem Stromüberschuss aus Wind und Sonne zur wirtschaftlichen Wasserstoffelektrolyse, -transport/-speicherung und -verwertung. Forschung- und Entwicklung sind auf eine markt- und einsetzgerechte Umwandlung bzw. Speicherung dieser Strommengen in den Energieträger Wasserstoff ausgerichtet.

Die im Bundes-Klimaschutzgesetz von Juni 2021 vorgegebenen Ziele für die Verringerung der Treibhausgasemissionen¹ lassen sich nur durch den massiven Ausbau erneuerbarer Energien (EE) realisieren². Eine zentrale Herausforderung ist dabei die Speicherung dieser Energie. Es muss zu jeder Zeit möglich sein den Energiebedarf zu decken, unabhängig davon, ob Wind- und Solaranlagen Strom liefern. Ein möglicher Ansatz ist, aus überschüssiger Wind- und Sonnenenergie über eine Elektrolyse grünen Wasserstoff zu erzeugen und diesen dann in unterirdischen Strukturen, wie z. B. Salzkavernen, Aquiferstrukturen oder ausgeförderte Öl- oder Gaslagerstätten, zu speichern. Um die fluktuierende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen zu puffern, wäre es notwendig, Energie in großvolumigen Wasserstoff-Untergrundgasspeichern (H2-UGS) zu speichern. Herausfordernd sind dabei vor allem die Nutzung der Speichertechnologie und die Übertragbarkeit, insbesondere auf großmaßstäbliche Energiespeicher, sowohl für den kurzfristigen Ausgleich der Fluktuationen als auch für die saisonale Langzeitspeicherung. Außer den großvolumigen Untergrundgasspeichern zur Speicherung von Erdgas besitzen keine derzeit genutzten und in der Entwicklung befindlichen Speichertechnologien eine annähernd ausreichende Kapazität und Langzeitverfügbarkeit zur Sicherung der Grundlastfähigkeit von EE, zur Netzstabilisierung und zur Energieversorgungssicherheit bei wachsendem EE-Anteil. Im Ergebnis des Vorhabens wird dadurch das technisch-wirtschaftliche Risiko des Betriebs von Wasserstoffspeichern identifiziert und reduziert. Zusätzlich werden Investitions- und Genehmigungshemmnisse abgebaut.

Eckpfeiler einer versorgungssicheren Energie- und Stoffinfrastruktur mit überwiegend regenerativen Quellen ist die großvolumige, sichere und effiziente Speicherung grünen Wasserstoffs in Untergrundgasspeichern. Derzeit bieten Salzkavernen die besten Voraussetzungen, um die Anforderungen für den Betrieb von Wasserstoffspeichern aus stark fluktuierenden Prozessen wie Power-to-Gas mit Überschussstrom zu erfüllen. Ziel des grundlagenorientierten Verbundforschungsvorhabens „H2-UGS: Begleitforschung zur Eignung von Salzkavernen Untergrundgasspeichern zur geologischen Speicherung von Wasserstoff aus fluktuierenden, regenerativen Quellen“ – kurz: „Verbundvorhaben

¹ Ziel: Klimaneutralität bis 2045; Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG) bis 2030 um mindestens 65 % gegenüber 1990. Für 2040 gilt ein neues Zwischenziel von 88 % THG-Minderung (2020: 40 %).

² Ziel: Bis 2030 Ausbau der erneuerbaren Energien auf einen Anteil von 60 % am Bruttoendenergieverbrauch bzw. 80 % am Bruttostromverbrauch (2020: 18 % bzw. 35 %).

H2-UGS“ – innerhalb der HYPOS-Initiative ist die Klärung der noch offenen Fragen zur Wasserstoffspeicherung in Kavernen. Auf der Basis der Erkenntnisse wurde eine Methodologie für die genehmigungsrechtlichen Fragestellungen der Speicherintegrität von Wasserstoff-Kavernen (Bestands- und Neukavernen) entwickelt, welche als Leitfaden für Speicherbetreiber, Genehmigungsbehörden und potenzielle Investoren dienen soll. Nicht zuletzt ist es die Vorbereitung für den Neubau oder die Umrüstung einer Kaverne auf den Betrieb mit Wasserstoff.

1.2 Ziel des Leitfadens

Ziel dieses Leitfadens ist es, praxisnahe Handlungsempfehlungen und bebilderte Beispiele zur Erfassung standortspezifischer Analysen für die Umwidmung oder den Neubau von Kavernen für die Wasserstoffspeicherung für Zustandserfassungen und -bewertungen bereit zu stellen. Alle aufgeführten Beispiele entstammen sehr umfangreichen Analysen. Die fachlichen Beschreibungen und Empfehlungen basieren im Wesentlichen auf Erfahrungen und Empfehlungen der mit der Erfassung beteiligten Unternehmen. Der Leitfaden ist kein Regelwerk und versteht sich als Erweiterung und Zusammenfassung der aktuellen Forschungsarbeiten rund um die Wasserstoff-Untergroundspeicherung in Kavernen. Er ersetzt in keiner Weise offizielle Richtlinien, wie sie sich in Gesetzen, Verordnungen oder Regelwerken finden.

Dieser Leitfaden richtet sich vorrangig an Speicherbetreiber oder an diejenigen, die an einer zukünftigen Wasserstoffspeicherung beteiligt sind. Darüber hinaus sind Fachkräfte angesprochen, die Projekte und Maßnahmen in diesem Zusammenhang entwickeln, bewilligen, umsetzen oder evaluieren. Der Leitfaden soll Hilfestellung bei der Umsetzung von Wasserstoff-Speicherprojekten geben, um klare Ziele zu erreichen.

Die Arbeitsinhalte und durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des Verbundvorhabens H2-UGS erfolgten im Bearbeitungszeitraum zwischen 09/2018 und 02/2022. Der Inhalt des Leitfadens umfasst einen Kenntnisstand und erzielte Ergebnisse bis zum Publikationsdatum.

1.3 Wegweiser durch den Leitfaden

Kernziel des Leitfadens ist, für Pilotprojekte und großtechnische Industrieprojekte zur Umnutzung und zum Neubau von Wasserstoff-Kavernenspeichern die Voraussetzungen für einen sicheren Betrieb zu schaffen und die relevanten Randbedingungen darzulegen. Mittels wissenschaftlicher, standortunabhängiger Untersuchungen von Untertage- und Obertage-Speicheranlagen wird die geologische, technisch/technologische und sicherheitstechnische Eignung zur sicheren und effizienten Wasserstoffspeicherung am Beispiel eines mitteldeutschen Kavernenspeichers detailliert dargestellt. Die Ausführungen umfassen auch die thermodynamischen, gebirgsmechanischen und mikrobiologischen Grundlagen sowie Handlungsempfehlungen für die Praxis.

Der Leitfaden umfasst folgende wissenschaftlich-technische Inhalte, die teils aufeinander aufbauen und miteinander verknüpft sind:

- Bestimmung der Transport- und thermodynamischen Eigenschaften von Wasserstoff unter Betriebsbedingungen bei der Wasserstoffspeicherung in Kavernen,
- Untersuchung der Wasserstoff-Durchlässigkeit des Gesamtsystems Casing/Zement/Gebirge,

- Sicherheitstechnisch begründete Festlegungen der Betriebsbedingungen (z. B. maximaler Speicherdruck, Speicherraten) auf der Basis des Nachweises der mechanischen Langzeit-Stabilität und der Barrierewirksamkeit des Speichergesteins,
- Qualifizierung von Werkstoffen und Bauteilen für den sicheren Betrieb von Kavernen als Wasserstoffspeicher,
- Entwicklung eines geeigneten Betriebsführungskonzepts für den realitätsnahen Speichereinsatz einschließlich des Gesamtanlagendesigns, inklusive der Obertage-Verdichteranlage für einen Wasserstoff-Kavernenspeicher,
- Bewertung des Einflusses mikrobieller Aktivitäten auf die Wasserstoffspeicherung in einem Kavernenspeicher.

Weitere Inhalte sind:

- Geologie und Geotechnik
 - Analyse und Prognose der potenziellen Infiltration von Speichergut an der Hohlraumkontur von Kavernen im Salzgestein bei zyklischer Wasserstoffspeicherung,
 - Untersuchungen zur Infiltrationsschwelle von Wasserstoff an Korngrenzen im polykristallinen Salzgestein unter realen Spannungsbedingungen,
 - Entwicklung geeigneter gekoppelter, numerischer Algorithmen für die Simulation relevanter geomechanischer Prozesse bei zyklischen Be- und Entladevorgängen von Salzkavernen,
 - Prognosen zum Verhalten von Speicherkavernen unter realistischen Betriebsbedingungen, u. a. bei Betrachtung realer 3D-Konturen vorhandener Kavernen,
 - In-situ-Erfassung der biogeochemischen Prozesse mittels isotochenchemischer Analysen der Speichergase und -fluide,
 - Erfassung des Stimulationspotenziales mikrobieller Prozesse und Entwicklung von Maßnahmen zur Eindämmung mikrobieller Aktivitäten.
- Materialtechnik
 - Degradationssicherheit von Grundwerkstoff/HFI-Naht und Rundnaht auf Ermüdungsbelastungen durch wiederholte Druckwechsel bei Ein- und Ausspeicherung,
 - Entwicklung eines mechanismenbasierten FE-Modells zur rechnerischen Abschätzung der orts aufgelösten und wasserstoffunterstützten Rissbildung aufgrund externer mechanischer Beanspruchungen in den Rundnähten der Steigleitungen.

Für die Untersuchungen im Rahmen des Verbundvorhabens H2-UGS wurde beispielhaft eine „Typkaverne“ auf der Basis eines mitteldeutschen Kavernenspeichers in einer Salzformation definiert. Diese dient als Grundlage für die zu untersuchenden Betriebsszenarien und technischen Konzepte. Die Randbedingungen der Typkaverne sind in Kapitel 2 sowie an Ort und Stelle in den jeweiligen Kapiteln ausgeführt. Betrachtet werden die Neuanlage eines Gaskavernenspeichers zur Nutzung als Wasserstoffspeicher und die Möglichkeit der Umwidmung einer bestehenden Erdgas- oder Soleproduktionskaverne in eine Wasserstoffkaverne.

2 Datenmanagement und Probenahme

2.1 Einleitung

Um grundlegende Fragestellungen zur Standorteignung beantworten zu können, muss mit Untersuchungen, Tests und Prüfungen eine Datenbasis geschaffen werden. Primärdaten sind dabei die Basis für die Erfassung und Anwendung von Kriterien für die Wahl geeigneter Kavernen, die vorwiegend auf Bohrungen und geophysikalischen Untersuchungen beruhen. Diese Daten – mit spezifischen Angaben zu Lithologie, chemischen, mineralogischen und physikalischen Eigenschaften als auch die rechnerischen Nachweise – bilden die erforderliche Grundlage für detaillierte Kenntnisse des strukturellen Baus des Standortes. Im Planungsprozess sind zudem standortgebundene Informationen des geochemischen Stoffbestandes sowie die stoffgesetzgebenden geomechanischen, mikrobiologischen und betriebliche Parameter zu erheben. Darauf aufbauend werden geomechanische Modelle generiert, mit denen Standsicherheitsberechnungen der Kavernen durchgeführt werden können. Weitere geomechanische Untersuchungen umfassen dabei die Ermittlung und Prognose von Senkungen an der Tagesoberfläche oberhalb von Kavernenfeldern.

Für das Betriebsszenario ist eine Bewertung der Spannungszustände in der Umgebung der Salzkaverne erforderlich. Der Spannungszustand in der Umgebung der Kaverne wird dabei wesentlich von der Fahrweise beeinflusst. Der Lastfall ist daher standortspezifisch entsprechend Teufe, Größe, Geometrie, thermischer Wirksamkeit sowie unter Berücksichtigung der individuellen Anforderungen der Kavernenbetreiber zu ermitteln. Essenziell dafür ist die lokationsspezifische Ermittlung der thermodynamischen Parameter. Von entscheidender Bedeutung sind hierbei die Stillstandsphasen, in denen weder Ein- und Auspeisung des Speichermediums Wasserstoff stattfindet.

Zur Erfassung des Stimulationspotenziales mikrobieller Prozesse infolge einer Wasserstoff-Erdgas-Exposition sollten Proben aus Kavernensumpf, obertägigen Anlagen und Brunnen gewonnen werden, die für mikrobiologische und chemische Analysen zur Verfügung stehen.

2.2 Ausgangssituation und mögliche Einflussfaktoren für die Wasserstoffspeicherung

Zur generellen Eignungseinschätzung von Kavernenstandorten für die untertägige H₂-Speicherung bzw. für den Eignungsnachweis vorhandener oder für die Auslegung neuer unter- und obertägiger Anlagen sowie für die Festlegungen zum späteren Speicherbetrieb sind neben geologischen Aspekten vor allem die jeweiligen Bohrungs- und Kavernenhistorien und die Informationen zum Kavernenfeld von großer Bedeutung.

Für die Untersuchungen und Betrachtungen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurde eine solegefüllte Bohrung/Kaverne ohne flexiblen Bohrungsausbau als Ausgangssituation festgelegt; in der Folge im Leitfaden als „Typkaverne“ bezeichnet. Hinsichtlich der Kavernentypen wird in die folgenden Kategorien unterschieden:

- Typ I: bestehende Kaverne, Bohrung mit letzter zementierter Rohrtour (Bestandsbohrungen im allgemeinen Sinne mit Kavernenhistorie),
 - Typ I.A keine Speicherhistorie (Sole gefüllt),
 - Typ I.B Kavernenhistorie mit Stadtgasspeicherung,
 - Typ I.C Kavernenhistorie ausschließlich Erdgasspeicherung,
 - Typ I.D Kavernenhistorie mit anderen Speichermedien,
- Typ II: Neubohrung (Kaverne noch nicht gesolt) mit planbarer Bohrlochkonstruktion,
- Typ III: bestehende Kaverne, Bohrung ohne letzte zementierte Rohrtour (Bestandsbohrungen, Kaverne solegefüllt), *Spezialfall*.

Die Bohrungstypen I.A und I.C werden anhand der Abbildung „Typkaverne“ exemplarisch dargestellt (Abbildung 1).

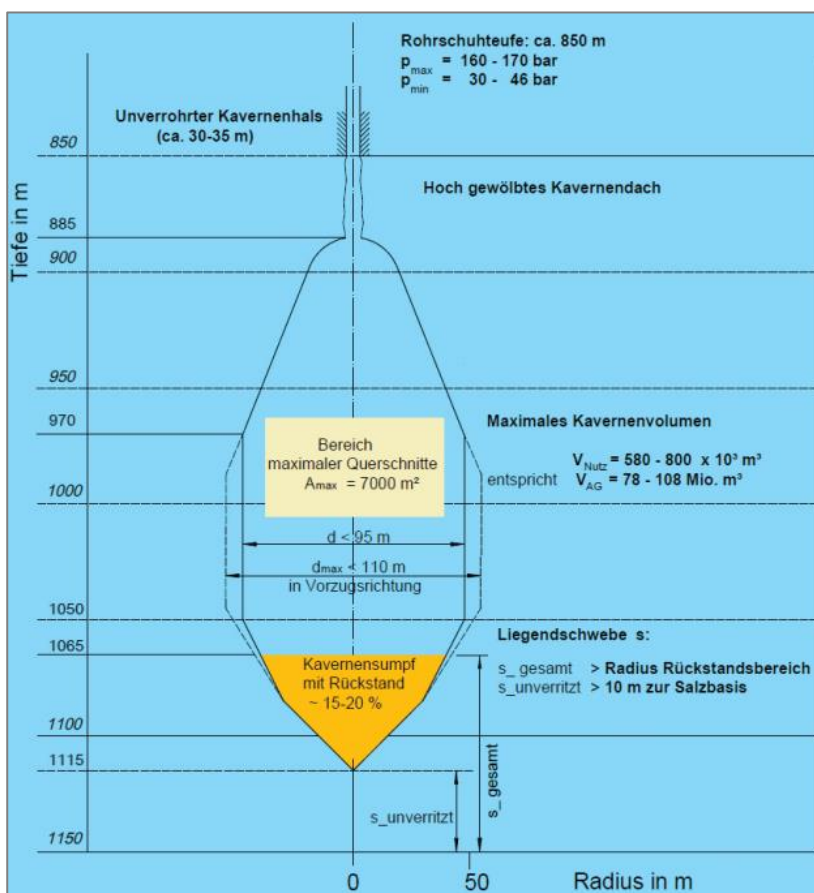


Abbildung 1: Entwurfskonzept für eine Typkaverne zur H_2 -Speicherung (Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig)

Die Dimensionierung und gebirgsmechanischen Vorgaben zur Typkaverne wurden dabei basierend auf der Salzstruktur am Standort Energiepark Bad Lauchstädt definiert. Einige Untersuchungen und Analysen beziehen sich auf Proben, die aus bestimmten Kavernen dieses Kavernenfeldes genommen wurden. Diese Kavernen sind im Leitfaden mit den Buchstaben von A bis N bezeichnet.

Mit Bezug auf die Bohrungs- und Kavernenhistorien werden dabei die nachfolgenden Stadien unterschieden:

- I. Bohrung, Test vor Solbeginn (Nachweis für den Solbetrieb),
- II. Kavernensolung, Dichtheitstest (Nachweis für den späteren Speicherbetrieb),
- III. Gas(erst)befüllung/Soleentleerung,
- IV. Speicherbetrieb.

Für eine H₂-Speicherung werden die folgenden standortbezogenen Faktoren als wesentlich für die Bewertung vorhandener bzw. Auslegung neuer ober- und untertägiger Anlagen eingeschätzt. Diese können je nach Standort stark variieren und sind daher stets vor und während den Planungsarbeiten zu erörtern. Ferner bilden die standortbezogenen Faktoren eine Grundlage für die Festlegungen zum späteren Speicherbetrieb.

Geologie

Die spezifischen Eigenschaften der Salzformation, insbesondere das Vorhandensein kaliführender Bereiche, wodurch sich während der Kavernenerrichtung aufgrund selektiver Lösungsvorgänge Hintersolungs- bzw. Fingerbereiche bilden können, die sowohl gebirgsmechanisch (z. B. irreguläre Kavernenkonturen, Pfeilerabstände zu benachbarten Kavernen) als auch betrieblich (z. B. Fallenbildung – Verunreinigung des späteren Speichergases) einen negativen Impact haben können.

Existierende Bohrung

Je nach Bohrungslage, Bohrungsverlauf (seiger, S-Shape) und vorhandener Installation können sich Einschränkungen für die geplante H₂-Speicherung ergeben. Etwaige Schwachstellen sind hinsichtlich bestehender Integritätsanforderungen einzelfallbezogen zu untersuchen und zu bewerten.

Kaverne/Kavernenhals

Unter Umständen kann eine Kaverne aufgrund ihrer Lage, der Geometrie und Kavernenkontur (regulär, irregulär) für die H₂-Speicherung nur bedingt bzw. gar nicht geeignet sein. Kavernenhälsen, die nicht dem Standard entsprechen (z. B. < 15 m, große Durchmesser, ungünstige Geometrie, irreguläre Kontur) können zudem die Arbeiten zur Umrüstung der Kaverne einschränken.

Betriebshistorie

Neben dem aktuellen Bohrungs- und Kavernenzustand beeinflussen die eingesetzten Blanket-, Sol-, Flut- und Speichermedien die Bohrungsumrüstung bzw. den späteren H₂-Speicherbetrieb. Beispielsweise kann durch vorhandenes Restöl (z. B. Blanket aus der Solphase oder ehemaliges Speichermedium) an der Bohrungskontur (ölbenetzte Wand mit einer Eindringtiefe im cm-Bereich) die Rekomplettierung der Bohrung erschwert (z. B. beim Zementieren) bzw. die spätere H₂-Qualität gemindert werden. Durch die verschiedenen Sol- bzw. Flutmedien, wie untersättigte Solen aus geschlossenen Kreisläufen, Oberflächengewässer, Brunnenwasser, Brauchwasser aus Klärwerksanlagen ergeben sich unterschiedliche Bildungspotenziale mikrobiologischer Aktivitäten. Beides hätte Auswirkungen auf die Auslegung der obertägigen Anlagen sowie in Abhängigkeiten der Reinheitsanforderungen auf die Verwertungsmöglichkeiten des Wasserstoffs. Detaillierte Ausführungen zur Mikrobiologie sind in Kapitel 5 dargestellt.

Standzeit der Bohrungen

Bei Altbohrungen kann aufgrund von langjährigen Standzeiten ohne betriebliche Nutzung das Kriechvermögen des die Bohrung umgebenden Salzgesteins, insbesondere im Bereich der letzten zementierten Rohrtour (IzRT), vermindert sein, sodass der rechnerische maximale Speicherdruck nicht erreicht wird bzw. es zu Undichtheiten kommen kann. Diesem Fakt ist bei der Auslegung und Umsetzung der Rekomplettierung (Fokus: Zementation) sowie der Durchführung des Integritätstestes Rechnung zu tragen. Langjährige Erfahrungen aus der Gasspeicherung zeigen, dass es unter Umständen erforderlich sein kann, zwischen dem Abschluss der Rekomplettierung/Zementation und dem Integritätstest mit dem vollen, späteren Speicherdruck, situationsbedingt eine gebirgsmechanische Wartezeit von bis zu sechs Monate einzuhalten. Weitere Ausführungen zur Geomechanik sind in Kapitel 4 detailliert dargestellt.

Für eine sichere H₂-Speicherung in einer Kaverne sind Daten zu erheben bzw. Proben zu entnehmen und zu analysieren, um zuverlässige Aussagen über Qualität, Beschaffenheit oder Zusammensetzung machen zu können. Mit den folgenden Untersuchungsparametern, Tests und Prüfungen soll dabei eine ausreichende Datenbasis geschaffen werden, um grundlegende Fragestellungen zur Standort-eignung beantworten zu können.

Zusammenfassend sind allgemeine Einflussfaktoren bei der Umwidmung und deren mögliche Einflussfaktoren mit unterschiedlicher Kavernenhistorie in den folgenden Tabelle 1 bis Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 1: Allgemeine Einflussfaktoren bei der Umwidmung von Kavernen zur Wasserstoffspeicherung

Faktoren	Solkaverne	Gaskaverne	andere Speichermedien (z. B. Öl, Diesel, Rohöl)
Solmedium	x		
Solstatus	x		
Solchemie	x		
Blanketmedium	x		
Kavernenform/-größe	x	x	x
Geologie	x		x
Kavernenhistorie		x	x
Gaszusammensetzung		x	
Druckverhältnisse		x	
Mikrobiologie	x	x	x

Tabelle 2: Einflussfaktoren

Faktoren	Einfluss	Bemerkung
Sol-/Flutmedium	Herkunft: <ul style="list-style-type: none"> • Brunnenwasser, • Oberflächenwasser, • Meerwasser, • Abwässer (Klärwerk, Haldenwässer), • Prozesssole (un-/konditioniert), • Dünnssole. 	Standortspezifische Bestimmung der Zusammensetzung
Solstatus	Einwirkzeit (Ansolphase, Hauptsolphase, Dachsolphase, Stillstandszeit)	Standortspezifische Analyse
Solchemie	Zusammensetzung, Temperatur, pH-Wert, Prüfung auf Kohlenwasserstoffe	Standortspezifische chemische Analyse
Blanketmedium	z. B. Stickstoff, Öl mit Bestimmung der Menge	Standortspezifische Analyse
Kavernenform/-größe	Hochbrüche, Hintersolungen, Fallen, Kaverensumpf, Restsolvolumen, Feuchte Andere Speichermedien (z. B. Öl) <ul style="list-style-type: none"> • Ausgabe von Mantelflächen auf Grundlage der letzten Holraumvermessung, • Verunreinigung durch Kohlenwasserstoffe hoch. 	Standortspezifische Analyse
Geologie	Solkaverne: Bestimmung von Schichtgrenzen und Eindringtiefe Blanket Andere Speichermedien (z. B. Öl): Bestimmung von Schichtgrenzen und Eindringtiefe Speichermedium	Standortspezifische Analyse
Kavernenhistorie	Bestandskaverne: <ul style="list-style-type: none"> • Einwirkzeit des Speichermediums, • Betriebszeit, • Etwaige Blanketrückstände nach Gaserstbefüllung und Verteilung dieser durch Befüll- und Entleerungsvorgänge. 	Standortspezifische Analyse
Gaszusammensetzung	Analyse vor allem auf höhere Kohlenwasserstoffe	Standortspezifische Analyse
Druckverhältnisse	Prüfung von Perkolation und Mikrorissen	Standortspezifische Analyse
Mikrobiologie	siehe Kapitel 5.5	Standortspezifische Analyse

Tabelle 3: *Allgemeine Auswirkungen der Einflussfaktoren bei der Umwidmung von Kavernen auf die Wasserstoffspeicherung*

Auswirkungen	
Allgemeine Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Reinheit des Wasserstoffs und mögliche Einschränkung der Verwertungsmöglichkeiten, • stoffliche Nutzung des Wasserstoffs (z. B. Brennstoffzellen), • Auslegung der Obertageanlagen (OTA) mit höheren Anforderungen an die nachgeschalteten Gasbetriebseinrichtungen, wie Gastrocknung und Gasreinigung), • Abnahme der Reinigungseffektivität von Adsorbentien (verstopfte Schüttungen, verkürzte Regenerationsintervalle), • Höhere Investitions- und Betriebskosten, • Restgasstromnutzung.
Verunreinigungen	<p>Öl-Blanket /Restkohlenwasserstoffe des nicht vollständig entfernbaren Speichermedium (z. B. Diesel)</p> <ul style="list-style-type: none"> • C-Verbindungen, Kohlenwasserstoffe, • erhöhtes Lösungsvermögen Gaskondensat, Öl, Glykol, • Änderung der Gaszusammensetzung bei der Ausspeisung, • Flash-Rechnung zur Ermittlung der Menge an Kohlenwasserstoffen, die vollständig in Wasserstoff gelöst sind, • Veränderung der Gaszusammensetzung. <p>Restfeuchte</p> <ul style="list-style-type: none"> • führt in Kombination mit den H₂-Eigenschaften zur schnelleren Aufnahme von Wasserdampf aus dem Kavernensumpf, • Auslegung der Gastrocknung. <p>Mikroorganismen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Risiko der H₂-Umsetzung durch H₂-verwertende Mikroorganismen, • Risiko der H₂S-Bildung durch mikrobielle Prozesse (Sulfatreduktion, Schwefelreduktion) mit Auswirkung auf die Gasqualität, • Risiko mikrobieller Korrosion und Biofilmbildung an Anlagenteilen.

2.3 Standortspezifische Datenerhebung, Beprobung, Test und Prüfungen

2.3.1 Umfang Untertageanlagen (UTA)

2.3.1.1 Geologische Basisparameter

Wichtige geologische Kriterien für die Nutzung in einer Salzformation sind die Teufenlage, Verbreitung, Mächtigkeit und Qualität des Salzes. Darüber hinaus ist die interne Struktur (Faltenbau und Faltungsgrad), insbesondere im Hinblick auf die räumliche Verteilung von löslichem Steinsalz zu leicht löslichen Kalisalzen bzw. schwer löslichen oder unlöslichen Komponenten (Anhydrit, Salzton, etc.)

von Bedeutung, da diese u. a. starken Einfluss auf das Solverhalten und auf das gebirgsmechanische Verhalten haben können. Bei der Auslegung von Hohlräumen bzw. Kavernen sind die Zusammensetzung der Salinargesteine, die Temperaturen, Gebirgsdrücke bzw. die Druckvariationen besonders im Speicherbetrieb zu beachten. Bei mehreren Kavernen (Mehrfachkavernen-Standorte, Kavernenfelder) dürfen gebirgsmechanisch begründete Mindestabstände zwischen den Einzelkavernen nicht unterschritten werden. Generell ist im Zweifelsfall immer die detaillierte Einzelfallprüfung am konkreten Standort nötig, bevor eine Eignungsaussage getroffen werden kann. Mit den geologischen Kriterien wird die großräumige geometrische und strukturgeologische Konfiguration des Standorts beschrieben, die als Rahmenbedingung für die H₂-Speicherung dienen, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Geologische Basisparameter

Parameter	Einheit	Bemerkung
Teufe Top Salz	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Salzmächtigkeit	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Dichte Steinsalz	[kg/m ³]	Standortspezifisch zu bestimmen
Überlagerungsdruck	[bar/m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Druckgradient Salinar	[bar/m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Druckgradient Deckgebirge	[bar/m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Geothermischer Gradient	[K/m]	Standortspezifisch zu bestimmen, mittlerer Orientierungswert 0,03
Steinsalz	[%]	Standortspezifisch zu bestimmen
Mineralzusammensetzung		
pH		Standortspezifisch zu bestimmen
Dichte	[kg/m ³]	Standortspezifisch zu bestimmen
Anionen	[mg/kg]	Standortspezifisch zu bestimmen
Kationen	[mg/kg]	Standortspezifisch zu bestimmen
Schwefelverbindungen (gesamt, anorganisch, organisch)	[mg/kg]	Standortspezifisch zu bestimmen
Kohlenstoff (gesamt, anorganisch, organisch, z. B. Fettsäuren, Kohlenwasserstoffe)	[mg/kg]	Standortspezifisch zu bestimmen

2.3.1.2 Kenndaten Kaverne und gebirgsmechanische Parameter

Bei der Berechnung der Volumenkonvergenzrate des Kavernenhohlraums und den daraus resultierenden Senkungen müssen im Vorfeld Speicherbetriebsregime (minimal und maximal zulässige Kaverneninnendrucke, zulässige Ein- und Ausspeicherraten sowie die Standzeiten im Bereich geringer Kaverneninnendrucke) berücksichtigt werden. Bezugsgröße für den minimalen bzw. maximalen Kaverneninnendruck ist der Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour. Die Bewertung von gebirgsmechanischen Grenzsituationen bezüglich der Standsicherheit und Dichtheit der H₂-Kaverne erfolgte mit Hilfe von Bewertungskriterien, welche auf der Basis langjähriger Erfahrungen bei der Beurteilung hydrogeologischer Gefährdungen bzw. der Funktionssicherheit hydrologischer Schutzschichten beim Salzbergbau Mittel- und Norddeutschlands sowie bei der Kavernendimensionierung für Untergrundgasspeicher (UGS) entwickelt wurden. Für die Gewährleistung der Standsicherheit einer Kaverne im langfristigen Speicher- bzw. Produktionsbetrieb mit Wasserstoff ist die Stabilität der umgebenden Tragelemente (Pfeiler, Hohlraumkontur, Hangendschwebe) von entscheidender Bedeutung und sind im Vorfeld zu erheben oder zu aktualisieren, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: *Kenndaten Kaverne und gebirgsmechanische Parameter*

Parameter	Einheit	Bemerkung
Hohlraumvolumen (V_{geo})	[m ³]	Standortspezifisch zu bestimmen
Kavernenhals	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Kavernenhöhe	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Liegendschwebe	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Teufe Kavernenfirste	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Oberkante Kavernensumpf in Bohrlochachse	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Kavernenkonvergenz	[‰/a]	Standortspezifisch zu bestimmen
Übertage Senkungen	[mm]	Standortspezifisch zu bestimmen
Standsicherheit		Standortspezifisch zu bestimmen (gebirgsmechanischer Nachweis)
Integrität		Standortspezifisch zu bestimmen (gebirgsmechanischer Nachweis)

2.3.1.3 Bohrlochkomplettierung/Solausrüstung

Bohrlochkomplettierungen sind Stand der Technik, insbesondere für Öl- und Gasbohrungen, und in verschiedensten Ausführungen bekannt, siehe Tabelle 6. Die einzelnen Bestandteile der Rohrtour werden mit zunehmender Teufe und abnehmenden Rohrdurchmessern eingebracht. Das obere Ende aller Rohrtouren erreicht dabei bis an die Erdoberfläche. Die Bohrlochkomplettierung einer Speicherbohrung umfasst eine Standrohtour, Ankerrohtour und Produktionsrohtour/letzte zementierte Rohrtour. Je nach Endteufe der Bohrung können ggf. mehrere Zwischenrohtouren und eine Produktionsrohtour, mit einer Futterrohtour (Liner) und eine Förderrohtour oder Steigrohtour (Tubing) eingebaut sein. Zwischen der Ankerrohtour und Produktionsrohtour können weitere Zwischenrohtouren/technische Rohrtouren angeordnet sein. Nach Abschluss der Solung erfolgt der Einbau einer Förderkomplettierung.

Bei der Materialauswahl ist darauf zu achten, dass der eingesetzte Rohrwerkstoff, der im Kontakt mit dem Speichermedium steht, den Anforderungen für Stabilität und Integrität der Bohrung entspricht und einen sicheren Einsatz im Speicherbetrieb gewährleistet. Detaillierte Ausführungen zur Degradationssicherheit von Stahlwerkstoffen sind in Kapitel 3 dargestellt.

Die Dimensionierung der Bohrlochkomplettierung hängt dabei im Wesentlichen von der Speicherfahrweise und dem Betriebsszenario ab. Das Gesamtanlagendesign ist ausführlich in Kapitel 8 beschrieben.

Tabelle 6: Grundlegende technische Bohrlochsituation/Bohrlochkomplettierung

Parameter		Einheit	Bemerkung
Rohrtour	Dimension	[mm WD]	Standortspezifisch zu bestimmen
	Einbauart/Verbinder	[m MD]	
	Rohrschuhteufe Länge	[m]	
Standrohtour	Dimension	[mm WD]	Standortspezifisch zu bestimmen
	Einbauart/Verbinder	[m MD]	
	Rohrschuhteufe Länge	[m]	
Ankerrohtour	Dimension	[mm WD]	Standortspezifisch zu bestimmen
	Einbauart/Verbinder	[m MD]	
	Rohrschuhteufe Länge	[m]	
Produktionsrohr- tour	Dimension	[mm WD]	Standortspezifisch zu bestimmen
	Einbauart/Verbinder	[m MD]	
	Rohrschuhteufe Länge	[m]	

Für den Kavernentyp II ist die Solaurüstung im Vorfeld zu planen (Tabelle 7). Es ist darauf zu achten, dass beim Aussolen von Kavernen nur solche Aussolverfahren angewendet werden dürfen, die eine sichere Beherrschung des Aussolvorganges gewährleisten. Zur Regelung und Begrenzung der Aussolhöhe ist ein Schutzmedium anzuwenden, das das anstehende Salz nicht löst und im Wasser praktisch unlöslich ist. Die Lage der Grenzfläche zwischen Schutzmedium und Sole ist nach festzusetzenden Fristen mit einem geeigneten Verfahren zu überwachen und falls erforderlich zu korrigieren. Vor Solbeginn und nach Beendigung des Solprozesses ist jeweils ein Integritätstest zum Nachweis der Dichtigkeit im Bereich des Übergangs Rohrschuh zur letzten zementierten Rohrtour zum Gebirge durchzuführen. Das untertägiges Speicherdesign und Ausrüstungen sind in Kapitel 7 detailliert beschrieben.

Tabelle 7: Solaurüstung für Kavernentyp II

Parameter		Einheit	Bemerkung
Äußerer Solstrang	Dimension	[mm WD]	Standortspezifisch zu bestimmen
	Einbauart/Verbinder	[m MD]	
	Rohrschuhteufe Länge	[m]	
Innerer Solstrang	Dimension	[mm WD]	Standortspezifisch zu bestimmen
	Einbauart/Verbinder	[m MD]	
	Rohrschuhteufe Länge	[m]	

2.3.1.4 Prüfungen, Messungen, Tests

Durch die Anwendung technischer, operativer und organisatorischer Maßnahmen ist das Risiko eines unkontrollierten Austritts des Speichermediums über den Lebenszyklus einer Bohrung hinweg zu reduzieren. Dazu gehören Maßnahmen für die Herstellung der Bohrung mit physikalischen/mechanischen Bohrungsbarrieren als auch Überwachungssysteme und Prozeduren für die betriebliche Sicherheit. Je nach Kavernentyp sind Tests und Eignungsnachweise, wie in Tabelle 8 dargestellt, zu erbringen. Die entsprechenden Nachweis- und Monitoringverfahren sind in Kapitel 9.2.1 ausgeführt.

Tabelle 8: Prüfungen für Untertageanlagen

Prüfung/Messung/Test	Bemerkung
Hohlraumvermessung	Soleendvermessung (Kaverne unter Sole), Vermessung unter Gas nach Gaserstbefüllung
Zementmessung mit Zementbindung	
Korrosion und Zementierung	Ultra Sonic Imager Tool (USIT)-Messungen zur Bewertung
Dichtheitstest letzte zementierte Rohrtour (IzRT)	Testdruck ergibt sich aus Soleendvermessung bzw. geomechanischer Nachweis, siehe Kapitel 9.2.1
Förderrohrtour	Multifinger (mechanisch) auf Korrosion, elektromagnetische Messung auf Korrosion
Untertagesicherheitsventil (UTSAV)	Werkseitig vor Einsatz zu prüfen
Packer	Werkseitig vor Einsatz zu prüfen
Gasförderkopf	Werkseitig vor Einsatz zu prüfen

2.3.2 Umfang Obertageanlagen (OTA)

Für die Obertageanlagen ist ausgehend vom Zustand der Kaverne eine Anlagenkonfiguration zu ermitteln, die hinsichtlich Kapazität und Leistung der Speicheranlage zu dimensionieren ist. Darüber hinaus können die betrieblichen Druck- und Temperaturbereiche abgeleitet bzw. verifiziert werden. Dafür sind die in Tabelle 9 genannten Speicherparameter zu erheben. Ausführlich ist dies in der Geomechanik in Kapitel 4 und im Gesamtanlagendesign in Kapitel 8 dargestellt.

Tabelle 9: Erhebung von Speicherparametern für den Betrieb

Parameter	Einheit	Bemerkung
Maximal zulässiger Druck am Rohrschuh der IzRT	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen (gebirgsmechanische Bewertung)
Minimaler zulässiger Druck am Rohrschuh der IzRT	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen (gebirgsmechanische Bewertung)
Maximaler erwarteter Druck am Bohrlochkopf	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen (gebirgsmechanische Bewertung)
Minimaler erwarteter Druck am Bohrlochkopf	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen, gebirgsmechanische Bewertung erforderlich
Maximale Druckänderungsrate (saisonale Fahrweise)	[bar/d]	< 10 bar pro Tag
Erwartete Einspeisetemperatur am Bohrlochkopf	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Erwartete Ausspeisetemperatur am Bohrlochkopf	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Arbeitsgasvolumen	[m ³ i. N.]	Standortspezifisch zu bestimmen
Zyklen Arbeitsgasumschläge (Regelbetrieb)	[1/a]	Standortspezifisch zu bestimmen
Zyklen Arbeitsgasumschläge (Gaserstbefüllung)	[1/a]	Standortspezifisch zu bestimmen
Ruhezeiten zwischen den Zyklen	[d]	Standortspezifisch zu bestimmen
Gasspezifikation Einspeichergas und Ausspeichergas nach Gasreinigung		
H ₂	[Vol.-%]	Standortspezifisch zu bestimmen
H ₂ O	[ppmv]	Standortspezifisch zu bestimmen
O ₂	[ppmv]	Standortspezifisch zu bestimmen; Bei der Einspeisung kontinuierlich zu überwachen (maximaler Tagesmittelwert: 10 ppm – DVGW G260 und DVGW Merkblatt G267)
CO ₂	[ppmv]	Standortspezifisch zu bestimmen
CO	[ppmv]	Standortspezifisch zu bestimmen
N ₂	[ppmv]	Standortspezifisch zu bestimmen
KW (Kohlenwasserstoffe)	[ppmv]	Standortspezifisch zu bestimmen

Die Anbindung der Kaverne an die Obertageanlage (OTA) als auch der Anschluss an ein künftiges H₂-Transportnetz erfolgen durch Rohr-/Feldleitungen. Die Verlegung der Feldleitung erfolgt gemäß den technischen Daten (DN, PN und weitere) sowie der Ausführung (Verlegungstiefe, Schutzstreifen, etc.). Die Feldleitung wird auf Seiten der H₂-OTA bzw. Kavernenplatz mit Sicherheitsabsperren- und Arbeitsarmaturen (auch zur Unterbrechung des Gasflusses) ausgestattet. Die geltenden technischen Anforderungen und Regeln für die Planung und die Errichtung der Feldleitung sowie des Kavernenplatzes sind einzuhalten. Für den Betrieb der Feldleitung sowie der obertägigen Rohrleitungen auf dem Kavernenplatz müssen im Vorfeld die in Tabelle 10 genannten Parameter ausgelegt bzw. erhoben werden.

Tabelle 10: *Allgemeine Auslegungsparameter Feldleitung*

Parameter	Einheit	Bemerkung
Durchsatz der Feldleitung	[m ³ /h i. N.]	Standortspezifisch zu bestimmen
Auslegungsdruck	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Auslegungstemperatur	[°C]	Standortspezifisch zu bestimmen
Betriebsdruckbereich	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Betriebstemperatur Verdichterausgang	[°C]	Standortspezifisch zu bestimmen
Betriebstemperatur Kavernenausgang	[°C]	Standortspezifisch zu bestimmen
Medium		Die Anforderungen sind für den Anwendungsfall zu bestimmen
Nennweite Feldleitung	[mm]	Standortspezifisch zu bestimmen
Außendurchmesser Feldleitung	[mm]	Standortspezifisch zu bestimmen, abhängig vom Werkstoff und Sicherheitswert
Werkstoff		Standortspezifisch zu bestimmen (H ₂ -Beständigkeit und Korrosionsschutz nach Regelwerken)
Rohrisolierung		Standortspezifisch zu bestimmen gemäß DVGW-Arbeitsblatt 463
Leitungslänge gesamt	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Nennweiten Kavernenplatzverrohrung		Standortspezifisch zu bestimmen
Nennweiten Lehrrohre		Standortspezifisch zu bestimmen

2.3.2.1 Gasaufbereitung/Gasreinigung

In Abhängigkeit des Kavernentypes können bei der Speicherung von Wasserstoff Verunreinigungen auftreten. Die potenziellen Komponenten (Tabelle 11), die zu einer Verunreinigung des Wasserstoffs führen, sind langfristig bei der Bewertung eventuell notwendiger Aufbreitungsschritte zu berücksichtigen. Für die Auslegung der Gasreinigung/-aufbereitung sind die in Tabelle 11 genannten Punkte zu beachten, standortspezifisch zu bestimmen und für die Anwendungsprozesse zu bewerten.

Tabelle 11: Art der möglichen Verunreinigung

Komponente	Bemerkung
Blanketmedium (ggf. KW-Entfernung)	Standortspezifisch zu bestimmen
Schwefelwasserstoff (H₂S)-Bildung	Standortspezifisch zu bestimmen
Feuchtegehalt des Ein- und Ausspeisegases	Standortspezifisch zu bestimmen
Spurenstoffe/Spurenstoffanalytik	Die Anforderungen sind für den Anwendungsfall zu bestimmen
Analyse Ausspeichergas	Die Anforderungen sind für den Anwendungsfall zu bestimmen

Das gespeicherte Gas nimmt in jedem Fall Wasser bis zur Sättigung auf. In Abhängigkeit von der Verweilzeit des Wasserstoffs und der fließenden Gasvolumina kann die Sättigung mit Wasserdampf zwar verzögert erfolgen, auf eine Gastrocknung kann aber in keinem Fall verzichtet werden.

Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen (KW) als Verdichteröl in den Kompressoren und als Blanket kann zu Spuren dieser Komponenten im Wasserstoff führen. Das Auftreten einer erhöhten Konzentration von Kohlenwasserstoffen im Wasserstoff ist analog zur mikrobiologischen Aktivität als speicher-spezifisch einzustufen.

Erfolgt die Umstellung einer Kaverne von Erdgas auf reinen Wasserstoff (Gasfamilie Gruppe D) durch Einsatz von Sole – d. h. das Erdgas wird mittels Sole verdrängt – sind im Wasserstoff anschließend weniger Reste des Erdgases oder Blankets enthalten. Es kann allerdings „Taschen“ in den Kavernenwänden geben, in denen Erdgas oder Blanket „gefangen“ ist und nicht durch Sole entfernt werden kann. Im Dachbereich könnten ebenfalls Reste des Blankets oder Gasreste verbleiben. Bei der Umstellung von ölgefüllten Kavernen auf Wasserstoff ist ebenfalls von Ölresten an den Kavernenwänden auszugehen, was eine Entfernung dieser in der Obertageanlage zu Erreichung der Qualität Gruppe D erfordert.

Je nach Kavernentyp und Anwendungsfall können besondere Anforderungen durch H₂-Verbraucher bestehen und sich damit der Analysenumfang erweitern.

2.3.2.2 Prüfungen für neu zu errichtende Rohrleitungen vor Inbetriebnahme

Tabelle 12: Rohrleitungsprüfungen

Parameter		Bemerkung
Schweißnähte	100 % Prüfung aller Schweißnähte an Rohrleitungen und Formteilen 200 % Prüfung bei Garantienähten	Zerstörungsfrei
Metallische Rohrleitungssysteme	Schweißnahtprüfungen Druckprüfungen	Zerstörungsfreie Prüfung Basis DVGW Regelwerk (GW 350/G469)

Die Anlagen werden nach erfolgreichem Abschluss der Prüfungen durch den Sachverständigen abgenommen und zum Betrieb freigegeben.

2.3.2.3 Prozessüberwachung Soleentleerung und Gaserstbefüllung

Die Prozessführung umfasst die Prozessüberwachung und die Anlagenbedienung für die Soleentleerung unter Einhaltung des Entleerungsprogrammes. Bei der Gaserstbefüllung der Kaverne werden im Rahmen der Prozessüberwachung die in Tabelle 13 genannten Prozessdaten kontinuierlich überwacht.

Tabelle 13: Parameter Prozessüberwachung Soleentleerung und Gaserstbefüllung

Parameter	Einheit	Bemerkung
Injektionsdruck Spülmedium	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Produktionsdruck Sole	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Injektionsdruck Gas	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Injektionsrate Gas	[m ³ /h i. N.]	Standortspezifisch zu bestimmen
Injektionsdruck Spülmedium	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Fließrate Spülmedium	[m ³ /h]	Standortspezifisch zu bestimmen
Temperatur Gas	[°C]	Standortspezifisch zu bestimmen
Temperatur Sole	[°C]	Standortspezifisch zu bestimmen
Pegel Entgasungstank	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Pegel Speichertank	[m]	Standortspezifisch zu bestimmen
Injektionsdruck Sole	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen

Parameter	Einheit	Bemerkung
Fließrate Soleinjektion	[bar]	Standortspezifisch zu bestimmen
Ventil Position	[%]	Standortspezifisch zu bestimmen
Gas-Sole-Grenzfläche		Kontinuierliche Überwachung Ermittlung über die Analyse der kumulierten Volumina von injiziertem Gas und abgegebener Sole unter Berücksichtigung des Bohrlochkopf- und Kavernendruckes (optional Spiegelmessungen)

Die Prozessdaten werden mit definierten Grenzwerten im System versehen, damit bei Wert- oder Zustandsänderungen der Anlage jederzeit eine Alarmierung durch das Überwachungssystem erfolgt.

2.3.3 Allgemeine Vorprüfungen für die Erweiterung eines Speichers bzw. Neuerrichtung

Die Errichtung und Führung von Untergrundgasspeichern wird nur auf Basis von Betriebsplanverfahren gestattet. Die Art des Betriebsplanverfahrens entscheidet maßgeblich über den Aufwand und die Dauer des Genehmigungsprozesses. Mögliche Einstufungen und Erfordernisse als auch die zu beachtenden gesetzlichen Grundlagen werden in Kapitel 9.3 aufgeführt. Vor der Antragstellung im Rahmen des Betriebsplanes sind in der Regel die in Tabelle 14 genannten umweltrelevanten Fragestellungen abzuklären bzw. die genannten Gutachten zu erstellen.

Tabelle 14: Allgemeine Vorprüfungen für Erweiterung eines Speichers bzw. Neuerrichtung

Parameter	Bemerkung
Standortauswahl	Verfahrensschritte zur Auswahl eines Standortes (StandAG)
Natur- und artenschutzrechtliche Maßnahmen	Bewertung des Vorhabengebietes Ggf. Eingriffsgenehmigung beantragen
Fauna-Flora-Habitat (FFH)	Standortspezifische, umweltrelevante Fragestellungen abklären bzw. Gutachten erstellen
Landschaftspflegerischer Fachbeitrag	
Artenschutzfachbeitrag	
Emissionsgutachten	
Lärmgutachten	
Hydrogeologische Gutachten	
Bodengutachten	
Kampfmittelfreiheit	Standortspezifisch zu bestimmen

Parameter	Bemerkung
Denkmalrechtliche Genehmigung	Bei der unteren Denkmalschutzbehörde des entsprechenden Landkreises einzuholen

Die Bewertungsmethoden und Genehmigungsverfahren sind in Kapitel 9 konkret beschrieben.

2.3.4 Zusätzliche Datenerhebung

Zusätzlich wird empfohlen, Untersuchungen der mikrobiellen Prozesse und deren Effekte auf das Salzgebirge und die technischen Ausrüstungen durchzuführen.

Die Einspeisung von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoff-Gemischen kann mikrobielle Prozesse in UGS begünstigen und dadurch erhebliche technische Schäden mit ökonomischen Folgen verursachen. Es wird empfohlen, die Zusammensetzung der mikrobiologischen Gemeinschaften und das metabolische Potenzial im Vorfeld einer H₂-Untergrundspeicherung in der standortspezifischen Kaverne zu untersuchen (siehe Kapitel 5). Deshalb sollte bei den Kavernentypen I.A und III beim Prozess der Gaserstbefüllung auf eine kontinuierliche Wasseranalytik geachtet werden (Tabelle 15). Bei den Kavernentypen I.B, I.C und I.D empfiehlt sich die Analytik des Kavernensumpfes, um mikrobiologische Gemeinschaften und deren Einfluss zu bewerten zu können. Deshalb ist die Analyse zur Zusammensetzung der Sole empfehlenswert.

Tabelle 15: Parameter Sole Analytik

Parameter	Einheit	Bemerkungen
pH		Standortspezifisch zu bestimmen
Redoxpotenzial	[mV]	Standortspezifisch zu bestimmen
Dichte	[kg/m³]	Salzgehalt (NaCl) kann rechnerisch ermittelt werden
Gesamtsalzgehalt/Salinität	[mg/l]	Kann über Dichte rechnerisch ermittelt werden
Anionen	[mg/l]	Standortspezifisch zu bestimmen
Kationen	[mg/l]	Standortspezifisch zu bestimmen
Schwefelverbindungen (gesamt, anorganisch, organisch)	[mg/l]	Standortspezifisch zu bestimmen
Kohlenstoff (gesamt, anorganisch, organisch, z. B. Fettsäuren, Kohlenwasserstoffe)	[mg/l]	Standortspezifisch zu bestimmen

Bei Abgabe der Sole sind entsprechende Vorgaben für Entsorgung und Verwendung zu beachten. Detaillierte Ausführungen zu mikrobiellen Aktivitäten in Kavernenspeichern sind in Kapitel 5 dargestellt.

3 Degradationssicherheit von Stahlwerkstoffen

Frank Schweizer³, Elke Wanzenberg⁴

3.1 Einleitung

Werkstoffeigenschaften für die Speicherung von Kohlenwasserstoffen und anderen Medien wie Luft, Stickstoff, Helium o. a. sind bekannt und wurden erfolgreich über Jahrzehnte hinweg in Untergrundgasspeichern angewendet. Sie sind in Normen und Richtlinien niedergelegt und schaffen die Basis für die Gewährleistung der öffentlichen wie der Bergsicherheit.

Wasserstoff kann jedoch die Eigenschaften der üblicherweise verwendeten Stahlwerkstoffe ändern. Stähle können einer Wasserstoffversprödung unterliegen, die sich in einer Minderung der Werkstoffzähigkeit äußern kann. Daher kommt der Auswahl eines geeigneten Stahlwerkstoffes für den Einsatz in untertägigen H₂-Speichern eine besondere Bedeutung zu. Normen und Regeln für die Auswahl von Werkstoffen bei der Untergrundspeicherung von Wasserstoff existieren derzeit nicht.

Für die Anwendung in der untertägigen Speicherung von Wasserstoff wird nachfolgend ein Stahlwerkstoff inklusive seiner Schweißnähte hinsichtlich möglicher H₂-bedingter Eigenschaftsänderungen sowie hinsichtlich einer möglichen Sauerstoffkorrosion untersucht und für den sicheren Betrieb bewertet. Sauerstoffkorrosion beschreibt Korrosionserscheinungen, die bei Anwesenheit eines H₂S-haltigen Mediums auftreten können. Ein Auftreten von Schwefelwasserstoff muss in Untergrundgasspeichern berücksichtigt werden.

3.2 Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf Degradationssicherheit

Im Folgenden wurde ein ausgesuchter Rohrleitungsstahl für den Einsatz in den Steigleitungen charakterisiert und für den sicheren Betrieb bewertet. Dabei wurde zum einen der Grundwerkstoff (GW) der Rohrleitungen untersucht und zum anderen die mittels Hochfrequenz-Induktions-Verfahren geschweißten Längsnähte (HFI-Nähte) sowie im Labor hergestellte Rundnähte des Werkstoffes.

Beginnend mit der Durchführung üblicher, zerstörender Werkstoffprüfungen zur Klassifikation des Werkstoffes wie Zugversuch und Kerbschlagbiegeprüfung wurden einerseits die Kennwerte im Zertifikat und andererseits die Zulässigkeit der angewendeten Schweißtechnologien zur Herstellung von Verbindungen belegt.

Anschließend wurden Prüfungen zur Beurteilung einer möglichen Wasserstoffversprödung in Wasserstoffdruckgas durchgeführt sowie sogenannte Sauerstofftests zur Untersuchung des Werkstoffes auf seine Beständigkeit gegenüber H₂S-bedingter Sauerstoffkorrosion. Weitere Prüfungen wurden unter dem Einfluss von Feuchte, Salz und Schwefelwasserstoff (H₂S) durchgeführt, um die zu erwartenden Betriebsbedingungen abzubilden.

³ Fraunhofer IWM, Wöhlerstraße 11, D-79108 Freiburg

⁴ Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Ehinger Straße 200, D-47259 Duisburg

Für die Bewertung der Schweißnähte wurde ein Simulationsmodell entwickelt, mit welchem begleitend zum experimentellen Versuch die im Bereich der Schweißnähte vorliegenden Gefüge, Spannungen, Dehnungen und Wasserstoffgehalte bei unterschiedlichen Randbedingungen berechnet werden können.

3.3 Probenrohr und Grundcharakterisierung des Werkstoffes

Für die Untersuchungen im Rahmen des Verbundvorhabens H2-UGS wurde ein Werkstoff der Güte X56M gemäß API 5L „Seamless and Welded Pipe“ PSL2 (45th Edition, Product Specification Level) für die Anwendung in Gaskavernen ausgewählt. Für die experimentellen Untersuchungen wurde von der Firma Mannesmann Line Pipe (MLP) ein Proberohr zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um einen warmgewalzten C-Mn-Stahl mit bainitischem Grundgefüge, der mittels des HFI-Verfahrens zu einem Leitungsrohr längsnahtverschweißt ist. Das Rohr hat die Abmessungen 508 mm x 12,7 mm. Die Probenbezeichnung für das Rohr war 714.

Die ermittelten mechanischen Kennwerte des verwendeten Materials entsprechen einem J55 gemäß API 5CT und erfüllen sowohl die in der API 5L als auch die in der API 5CT geforderten Vorgaben. Dabei muss die spezifizierte Streckgrenze zwischen 390 MPa und 545 MPa für die API 5L, und zwischen 379 MPa und 552 MPa für die API 5CT liegen. In der API 5L wird für die Zugfestigkeit der Bereich zwischen 490 MPa und 760 MPa vorgegeben, wohingegen in der API 5CT nur 517 MPa als Mindestwert für den J55 angegeben wird, der zu erreichen ist. Als Mindestwert für die Bruchdehnung gilt laut API 5L 20 %. Das Kohlenstoffäquivalent (CEV; Carbon Equivalent Value) wird aus der Bestimmung der Legierungselementgehalte an der Schmelzanalyse zu 0,39 errechnet.

Die chemische Analyse des Werkstoffes ist in Tabelle 16 dargestellt, mechanisch-technologische Kennwerte in Tabelle 17 und in Abbildung 2.

Tabelle 16: Chemische Analyse des Werkstoffes, alle Werte in Massenanteil-%

Probe	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb
714	0,055	0,214	1,347	0,01	0,0011	0,039	0,015	0,033	0,028	0,003	0,003	0,018	0,045

Tabelle 17: Mechanische Eigenschaften des Werkstoffes ermittelt in Zugversuchen

Probe	R _{p0,2}	R _{t0,5}	R _{p2,0}	R _m	R _{t0,5} /R _m	A	Z	Spezifizierte Streckgrenze API 5CT	Spezifizierte Zugfestigkeit API 5CT	Spezifizierte Streckgrenze API 5L	Spezifizierte Zugfestigkeit API 5L
	[MPa]				[%]						
714 GW längs	538	543	575	597	91	24	79	379–552	> 517	390–545	490–760
714 GW quer	458	477	557	590	81	25,3	79,5				
714 HFI	456	459	496	521	88	24,8	83				> 490

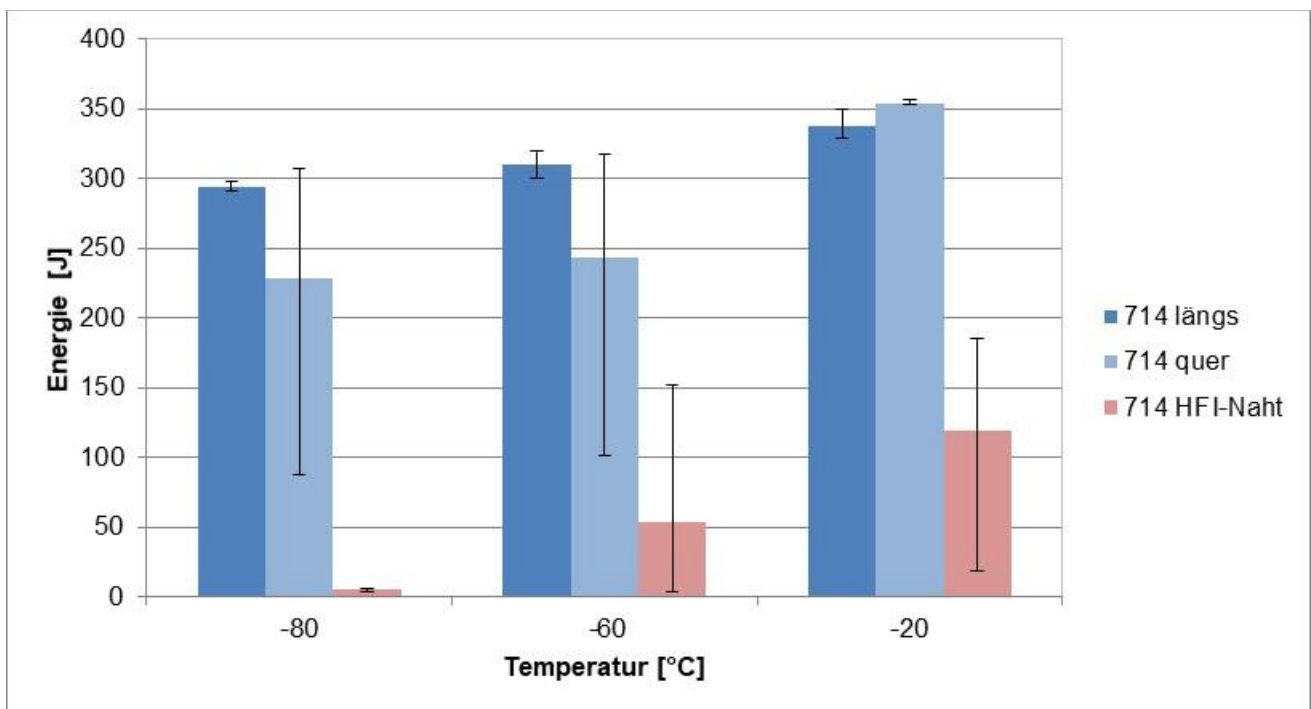


Abbildung 2: Mechanische Eigenschaften des Werkstoffes ermittelt in Kerbschlagbiegetests

In Abbildung 3 bis Abbildung 6 sind Gefügebilder von Grundwerkstoff und HFI-Naht des Proberohrs dargestellt. Es handelt sich um ein bainitisches Grundgefüge mit geringen Anteilen von Ferrit und Perlit.

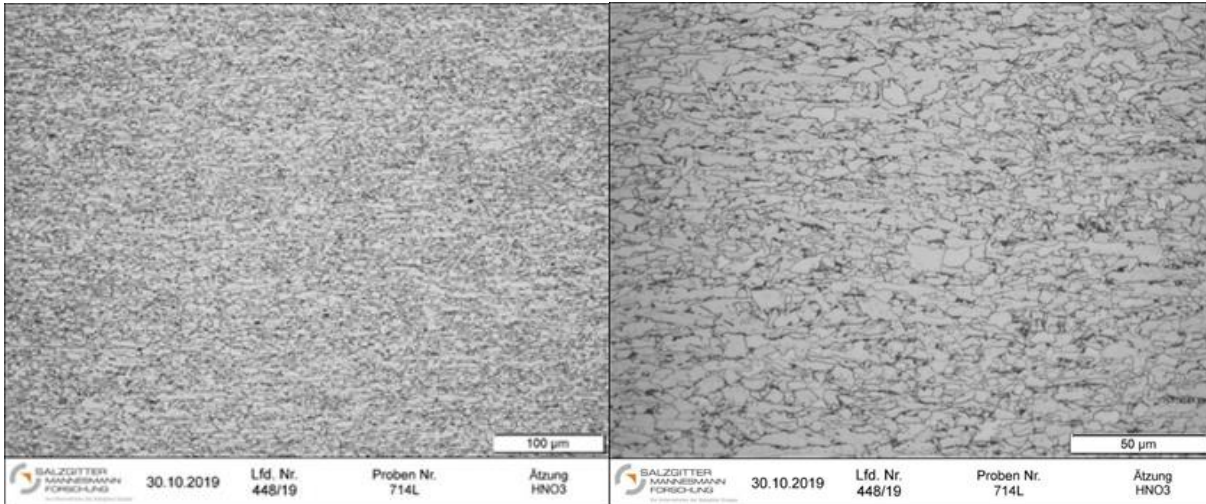


Abbildung 3: Längsschliff des Grundwerkstoffes, bainitisches Grundgefüge mit geringen Anteilen an Ferrit und Perlit

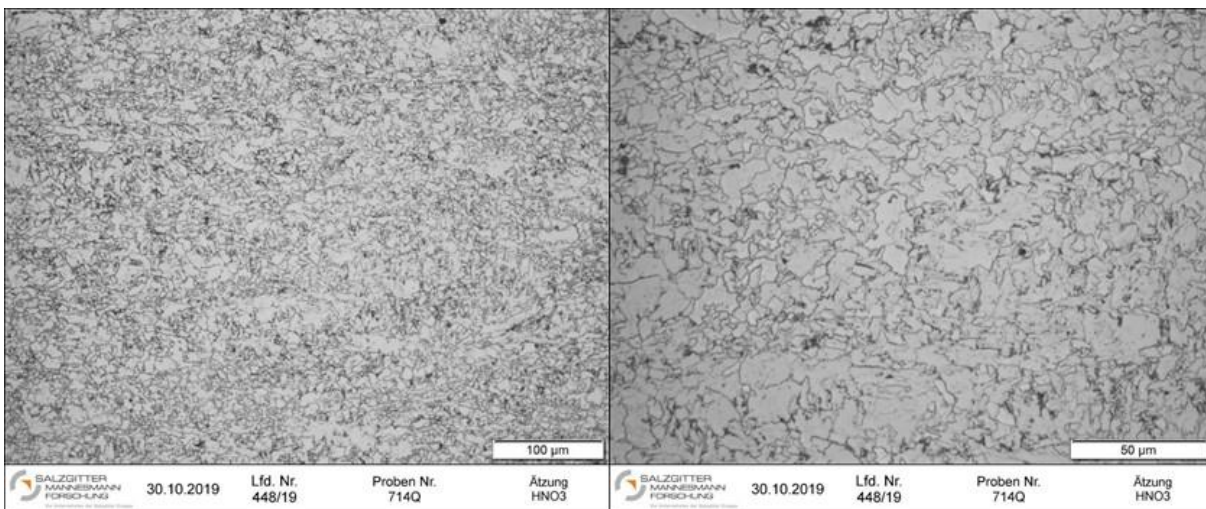


Abbildung 4: Querschliff des Grundwerkstoffes

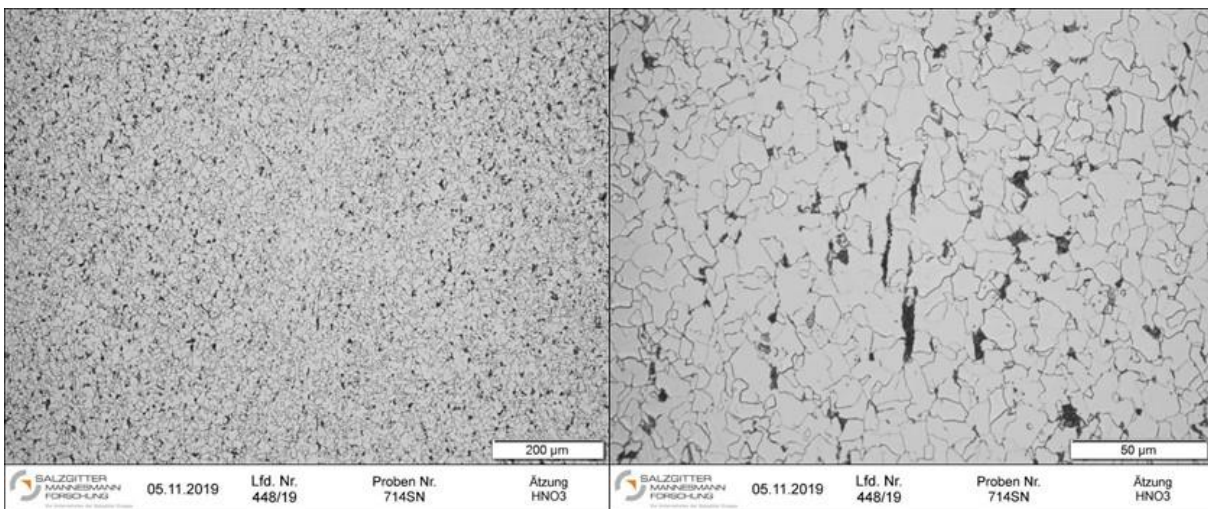
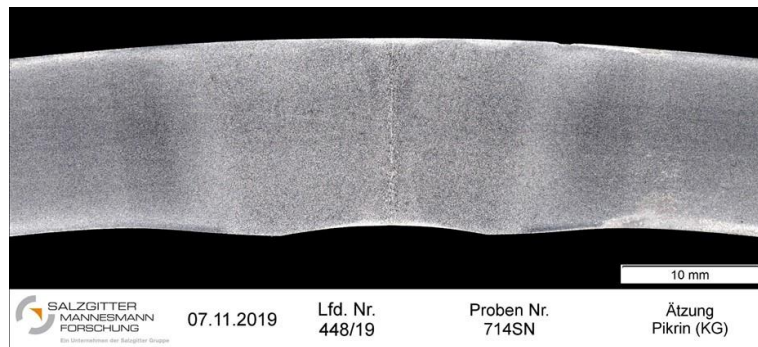


Abbildung 5: HFI-Naht Übersicht und Detailbilder

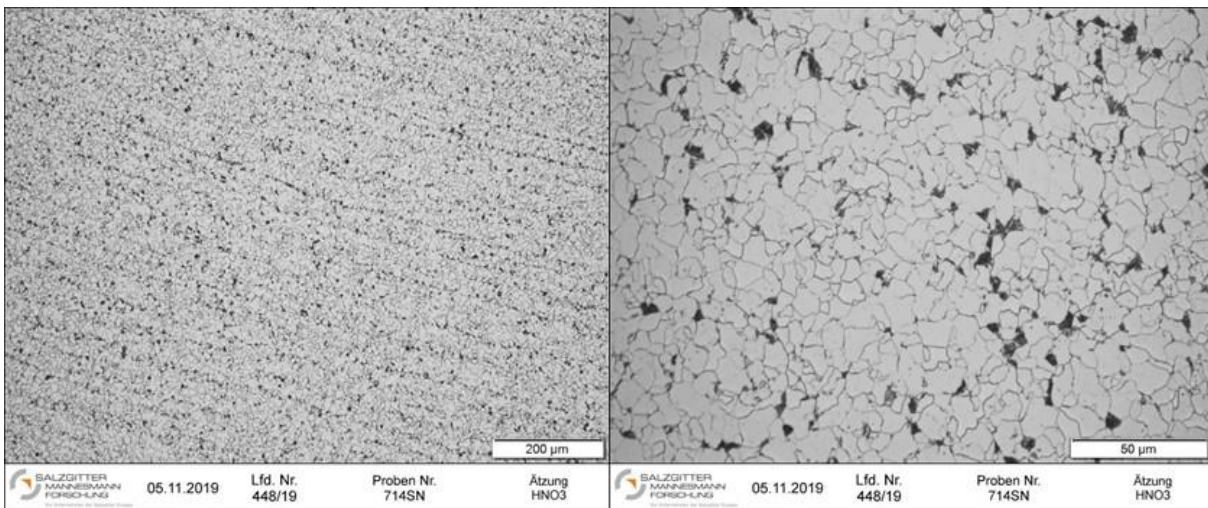


Abbildung 6: Wärmeeinflusszone der HFI-Naht

Bei einigen Untersuchungen wurden Proben eines Sauergaswerkstoffes zum Vergleich herangezogen. Es handelte sich hierbei um ein thermomechanisch gewalztes HFI-längsnahtgeschweißtes Leitungsrohr der Güte X52 mit den Abmessungen 219 mm x 8,2 mm. Die Streckgrenze des Werkstoffes betrug 465 MPa, die Zugfestigkeit 524 MPa.

3.4 Herstellung und Grundbeprobung der Rundschweißnaht

Das Proberohr wurde mit zwei Rundschweißnähten versehen und diese beprobt. Die Schweißung wurde nach Vorgaben der Firma UGS im Schweißlabor der SZMF durchgeführt. Während des Schweißprozesses wurden die Temperaturdaten dokumentiert.

Bei einer Durchstrahlungsprüfung nach DIN EN ISO 17636-1 wurde die Zulässigkeitsgrenze 1 erfüllt. Schlißbilder sind in Abbildung 7 bis Abbildung 10 dargestellt.

Die mechanischen Eigenschaften der Rundschweißnaht wurden mit Härtemessungen und Schweißverbindungsprüfungen bestimmt. Die Probe ist mit einer Zugfestigkeit von 584 MPa im Grundwerkstoff gerissen.

Die Härtewerte der Schweißnaht und Wärmeeinflusszone (WEZ) befanden sich zwischen 180 und 226 HV10 gegenüber dem Grundwerkstoff von ca. 200 HV10 und entsprechen den Richtlinien der EIGA, die Härtewerte unter 248 HV10 empfiehlt. Die genaue Verteilung der Härte über die Schweißnaht und die Wärmeeinflusszone kann Abbildung 11 entnommen werden.

Zugversuche an „all weld tensile“ Rundzugproben ergaben eine Zugfestigkeit von 652 MPa und eine Streckgrenze von 560 MPa. Die Proben werden quer zur Rohrachse entlang der Schweißnaht entnommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 aufgelistet.

Zusätzlich wurden Kerbschlagbiegetests an dem Schweißnahtmaterial bei -40 °C und -20 °C durchgeführt. Die Lage der Kerbschlagbiegeproben und die Ergebnisse sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt.

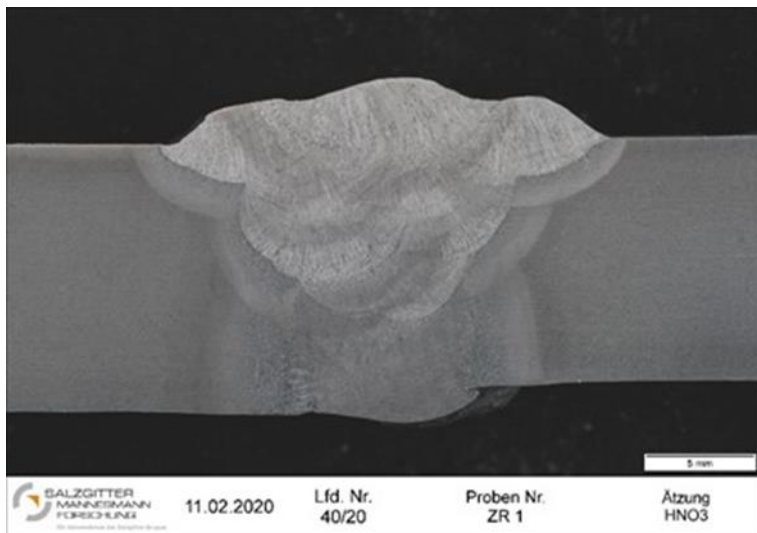


Abbildung 7: Rundschweißnaht Übersichtsbild

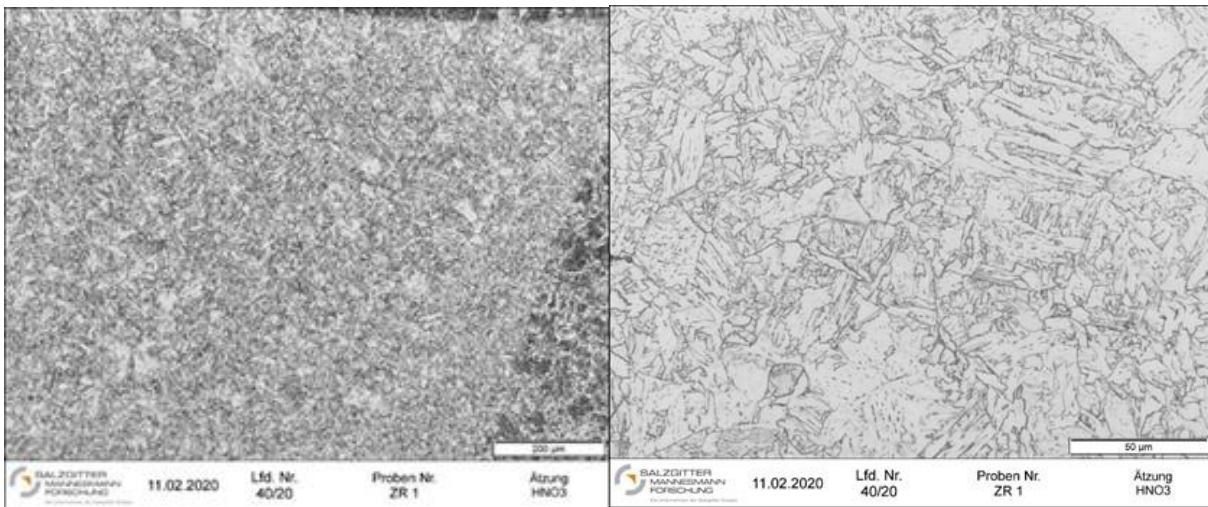


Abbildung 8: Rundschweißnaht Grobkornzone

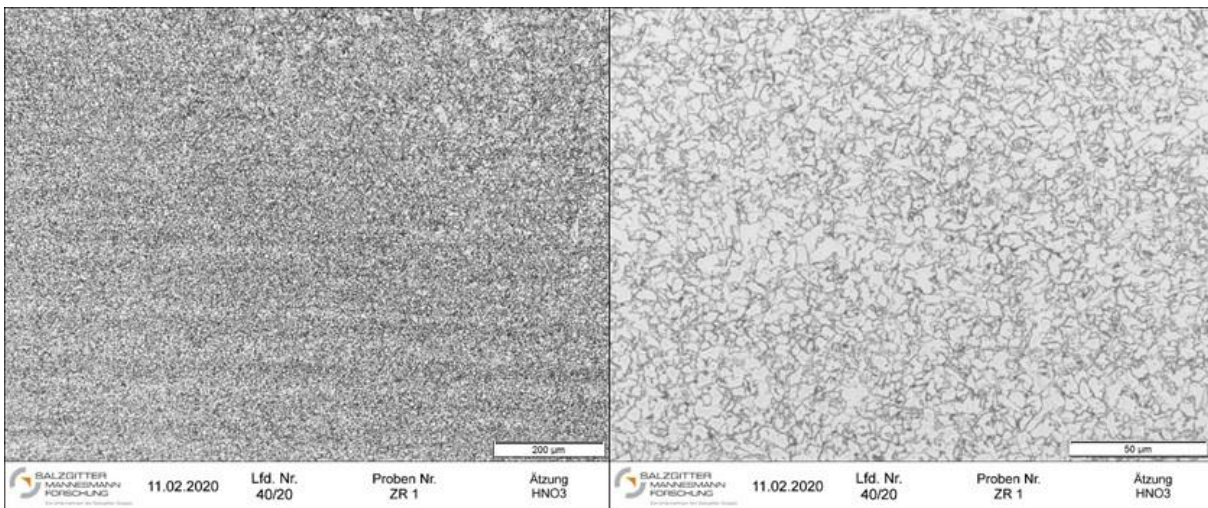


Abbildung 9: Rundschweißnaht Feinkornzone

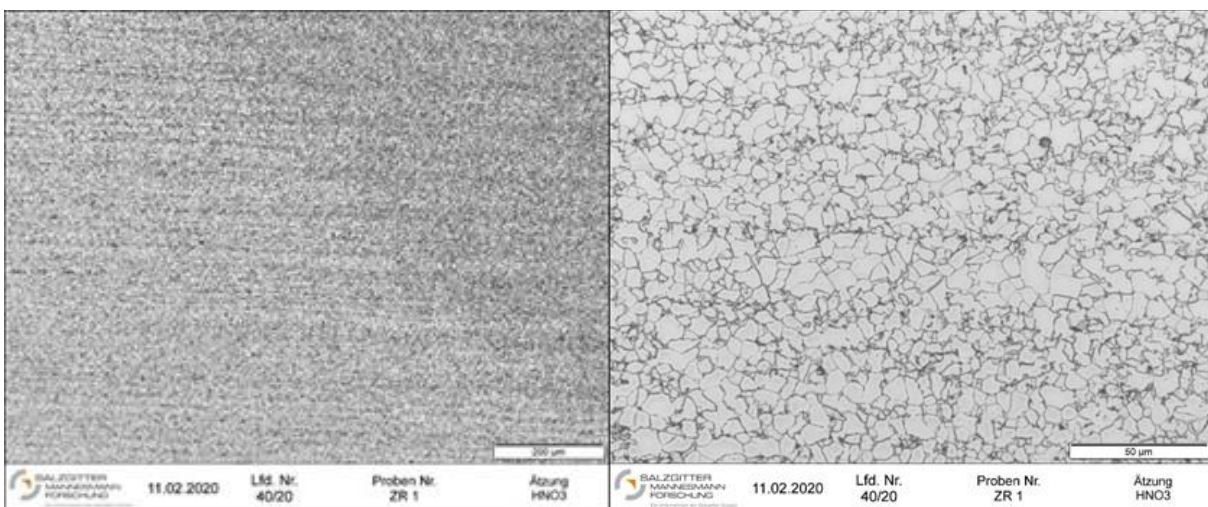
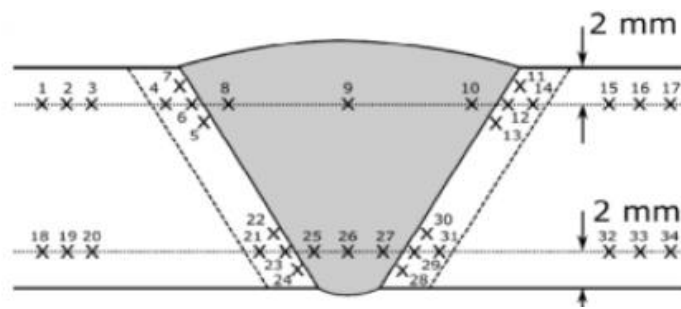


Abbildung 10: Rundschweißnaht Übergangzone



ZR1																
BM			HAZ				WM			HAZ				BM		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
183	183	186	215	193	203	212	225	225	210	226	221	201	201	201	203	201
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
179	178	180	218	221	208	203	192	193	184	196	192	200	210	207	207	207

ZR2																
BM			HAZ				WM			HAZ				BM		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
199	195	200	202	202	192	208	211	224	202	210	193	192	193	194	200	199
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
202	207	209	209	193	199	209	198	180	206	192	189	193	199	203	205	205

Abbildung 11: Härtemessungen an der Rundschweißnaht

Tabelle 18: Zugversuchsergebnisse an „all weld tensile“ Rundzugproben

Probe	R _{p0,2} [MPa]	R _{t0,5} [MPa]	R _{p2,0} [MPa]	R _m [MPa]	R _{t0,5} /R _m [%]	A [%]	Z [%]
714 ZR23	560	560	581	657	85	28	69
714 ZR24	559	562	569	646	87	29	70
714 ZR Mittelwert	560	561	575	652	86	29	70

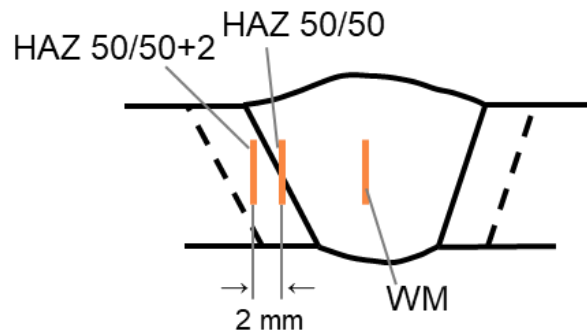


Abbildung 12: Lage der Kerbschlagbiegeproben in der Rundschweißnaht

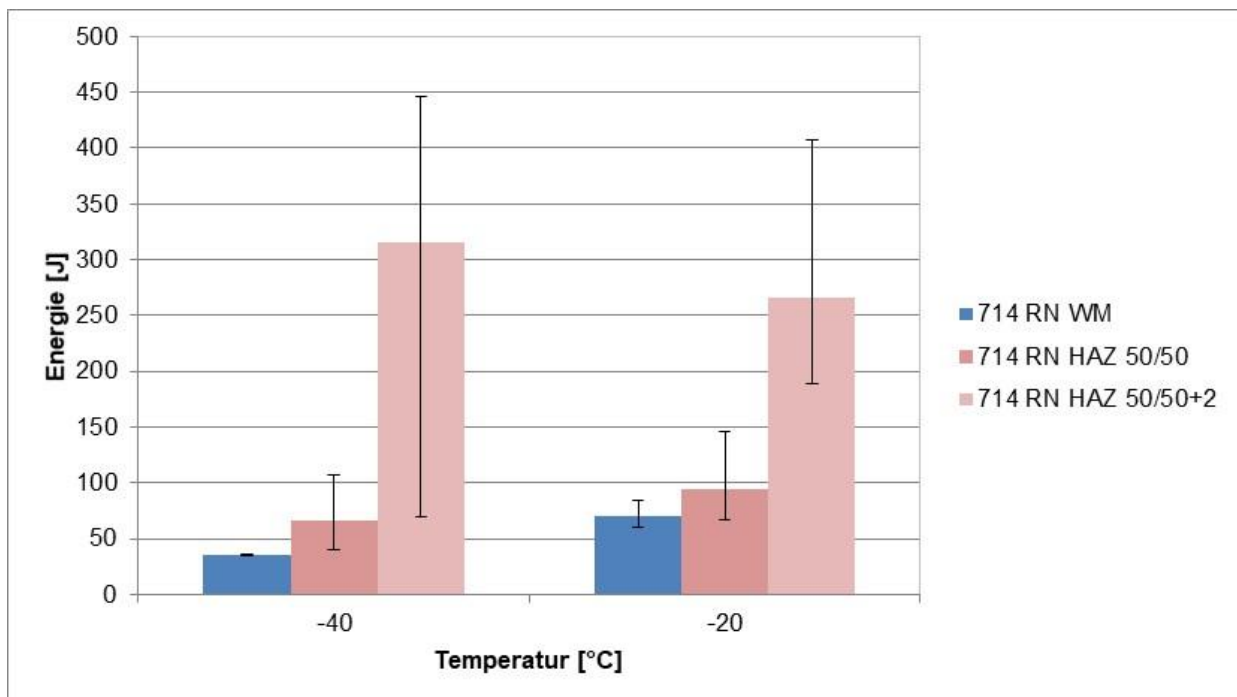


Abbildung 13: Ergebnisse der Kerbschlagbiegetests an der Rundschweißnaht

3.5 Untersuchungsmethoden zur Ermittlung der Degradationssicherheit

Methode 1: Sauerplastests

Da das Auftreten von Schwefelwasserstoff (H_2S) in der Kaverne nicht ausgeschlossen werden kann, wurde die Beständigkeit des Werkstoffes gegenüber Sauerplastkorrosion in Hydrogen-Induced-Cracking-Tests (HIC-Tests) nach NACE TM0284 und Sulfide-Stress-Cracking-Tests (SSC-Tests) nach NACE TM0316, TM0284 und ASTM G39 untersucht. Sauerplast ist H_2S -haltiges Erdgas, Sauerplastkorrosion beschreibt die im Zusammenhang mit Schwefelwasserstoff auftretenden Korrosionserscheinungen.

Für die HIC-Tests wurden jeweils drei Proben aus Grundwerkstoff, HFI-Naht und Rundnaht geprüft. Die Proben wurden für 96 Stunden in H_2S -gesättigter NACE-Testlösung A ausgelagert (Abbildung 14). Prüfgas war 1 bar Schwefelwasserstoff. Nach der Auslagerung wurden die Proben mittels Ultraschall und visuell auf HIC-Risse und Blistering (Blasenbildung an der Probenoberfläche) geprüft. Als Auswertung des Tests wurde der Crack-Area-Ratio-Wert (CAR-Wert) herangezogen, der den mit Ultraschall bestimmten Flächenanteil der HIC-Risse bezogen auf die gesamte Prüffläche angibt.



Abbildung 14: HIC-Prüfgefäß mit Proben

Auch für die SSC-Tests wurden jeweils drei Proben aus Grundwerkstoff, HFI-Naht und Rundnaht geprüft.

Die Proben wurden in Vierpunktbiegegespannen auf eine Belastung von 72 % der spezifizierten Mindeststreckgrenze vorgespannt und für 96 Stunden in H_2S -gesättigter NACE-Testlösung A ausgelagert (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Prüfgas war 1 bar Schwefelwasserstoff. Die Auswertung auf SSC-Risse erfolgte visuell.

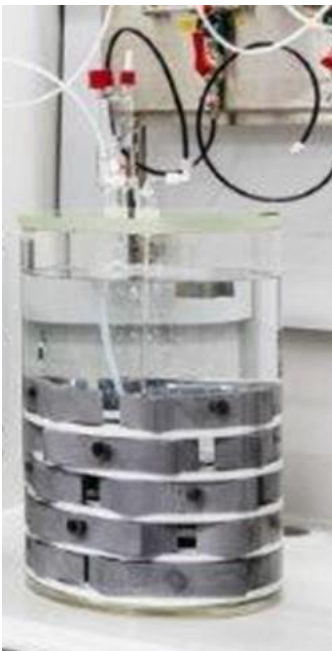


Abbildung 15: SSC-Prüfgefäß mit vorgespannten Vierpunktbiegeproben

Methode 2: Kerbschlagbiegetests nach Vorbelastung

Um einen Einfluss des Wasserstoffes auf die Zähigkeit des Werkstoffes zu prüfen, wurden Kerbschlagbiegetests am Grundwerkstoff nach einer Vorbelastung der Proben durchgeführt. Dazu wurden Kerbschlagbiegeproben in Querlage aus dem Rohr gefertigt und im Autoklav bei 100 bar Wasserstoff und Raumtemperatur ausgelagert. Die Oberfläche der Proben wurde direkt vor der Auslagerung angeschliffen, um mögliche Oxidschichten oder adsorbierten Sauerstoff von der Probenoberfläche zu entfernen, eine blanke Metalloberfläche zu erzeugen und so die Dissoziation der Wasserstoffmoleküle zu atomarem Wasserstoff und die Absorption im Metallgitter zu ermöglichen. Um einen möglichst geringen Sauerstoffgehalt im Autoklav zu gewährleisten, wurde eine definierte Prozedur zum Spülen des Autoklavs etabliert. Es wurde Wasserstoffgas der Qualität 6.0 verwendet.

Nach der Vorbelastung wurden die Kerbschlagbiegeproben bis zur Prüfung in flüssigen Stickstoff gelagert. Vor dem Schlagen wurden die Proben im Kältebad auf die Prüftemperatur gebracht. Parallel zu den Kerbschlagbiegetests wurde an jeweils einer der Proben der Wasserstoffgehalt bestimmt. Die für die Messung des Wasserstoffgehaltes bestimmten Proben durchliefen dieselben Prüfabläufe wie die Proben für die Kerbschlagbiegetests, statt des Kerbschlagbiegetests wurde aber nach dem Kältebad der von den Stahlproben aufgenommene Wasserstoffgehalt mittels Trägergasheißextraktion an dem Gerät G4 Phoenix der Firma Bruker gemessen.

Methode 3: Slow-Strain-Rate-Tensile-Tests (SSRT-Tests)

Der Einfluss von Druckwasserstoff bei ausgewählten Betriebsbedingungen auf die Duktilitätskennwerte der Rohrleitungswerkstoffe und der Schweißnähte wurde in SSRT-Tests nach ASTM G129 und NACE TM0198 untersucht. Es handelt sich hierbei um Zugversuche mit geringer Dehnrage, die in einem mit Testmedium gefüllten Autoklav durchgeführt werden. Diese Tests erlauben Aussagen zur Auswirkung des gewählten Mediums auf die Duktilität der Werkstoffe bzw. der Schweißnähte im Vergleich zu Tests im inerten Medium. Als inertes Medium wurde Stickstoff (N_2) gewählt. Testmedium war zum einen reiner Druckwasserstoff und zum anderen ein Testmedium mit salzhaltiger Testlösung und einem Wasserstoff-Schwefelwasserstoff-Gasgemisch (H_2 - H_2S -Gasgemisch), welches mögliche Betriebsbedingungen mit Sole und Anwesenheit von Schwefelwasserstoff simulieren sollte. Es wurden sowohl Grundwerkstoff als auch Längs- und Rundschweißnaht in beiden Testmedien untersucht.

Für die SSRT-Tests wurden Rundzugproben mit einer Prüflänge von 25 mm und einem Durchmesser von 6,5 mm verwendet.

Die Proben zur Testung des Grundwerkstoffes und der Rundnaht wurden in Längsrichtung aus dem Rohr entnommen. Für die SSRT-Tests an der HFI-Längsnaht wurden die Proben in Querlage (quer über die Schweißnaht) entnommen. Die Nahtlage der Schweißproben (Rund- und Längsnaht) wurde so gewählt, dass innerhalb der Prüflänge die Bereiche der Schweißnaht, Wärmeeinflusszone und Grundwerkstoff gleichzeitig belastet und geprüft wurden.

Vor dem Teststart wurden die Rundzugproben geschliffen und entfettet. Um einen möglichst geringen Sauerstoffgehalt im Autoklav zu gewährleisten, wurde eine definierte Prozedur zum Spülen des Autoklavs etabliert. Es wurde Wasserstoffgas der Qualität 6.0 genutzt.

Die SSRT-Tests wurden unter einsinniger Belastung mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit durchgeführt. Es wurde eine Abzugsgeschwindigkeit gewählt, die nach Umrechnung auf die Prüflänge rechnerisch zu einer Dehnrates von $2,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ führt. Die Belastung der Proben erfolgte nach dem Druckaufschlag mit 80 bar Stickstoff als inertes Medium bzw. nach Druckaufschlag mit 80 bar Wasserstoff.

Für das betriebsnahe Testmedium wurde eine NaCl-gesättigte Prüflösung angelehnt an Prüflösung C der NACE TM0177 gewählt, die 70 mg/l Natriumacetat enthielt und deren pH-Wert auf 6 eingestellt wurde. Es wurde so viel Testlösung in den Autoklav eingefüllt, dass sich die Grenzfläche zwischen flüssigem und gasförmigen Testmedium in der Mitte des Prüfbereichs der Rundzugprobe befand. Damit sollten Grenzflächen des Kondensats bzw. unter Kontakt mit der Sole im Betriebsfall abgebildet werden. Prüfgas war ein Gasgemisch mit einem Partialdruck von 75 bar Wasserstoff und 5 bar Schwefelwasserstoff sowie ein weiteres Referenzgasgemisch mit 75 bar Stickstoff und 5 bar Schwefelwasserstoff. Damit wurde ein Worst-Case-Szenario abgebildet.

Die Proben wurden vor Aufbringen der Zugspannung eine Stunde im Autoklav ausgelagert. Während des Versuchs wurde die Spannungs-Dehnungs-Kurve mittels eines Kraftaufnehmers und eines Funktionsverstärkers aufgezeichnet.

Zur Auswertung der SSRT-Tests dienen die maximal erreichte Zugspannung, Duktilitätskennwerte sowie die Beurteilung des Rissbefundes. Die Duktilitätskennwerte der Brucheinschnürung und plastischen Dehnung sind in dem Standard NACE TM0198 definiert. Die relative Brucheinschnürung RAR wird aus dem Verhältnis der Brucheinschnürungen der Proben nach dem Zerreißen im Prüfmedium RA_{H_2} und im inertem Medium (Stickstoff) RA_{N_2} nach Formel 1 bestimmt:

$$RAR = \frac{RA_{H_2}}{RA_{N_2}} \cdot 100\% \quad \text{Formel 1}$$

Als weiterer Parameter zur Versuchsauswertung wird das Verhältnis der plastischen Dehnung herangezogen. Die plastische Dehnung E_P wird direkt aus Werten der Spannungs-Dehnungs-Kurve nach Formel 2 bestimmt, mit dem Vorteil, dass die beim Ausmessen der Proben auftretende Ungenauigkeit deutlich reduziert wird:

$$E_P = \left(\frac{v_A \cdot t_B}{L_0} - \left[\frac{\sigma_B}{\sigma_P} \right] \cdot \frac{v_A \cdot t_P}{L_0} \right) \cdot 100\% \quad \text{Formel 2}$$

mit:

E_P	plastische Dehnung
v_A	Abzugsgeschwindigkeit [mm/s]
t_B	Zeit bis zum Bruch [s]
t_P	Zeit bis zur Proportionalitätsgrenze [s]
L_0	Probenlänge vor dem Versuch [mm]
σ_B	Spannung bei Bruch
σ_P	Spannung bei Proportionalitätsgrenze

Die relative plastische Dehnung E_{PR} wird aus dem Verhältnis der plastischen Dehnung der Proben nach dem Zerreißen im Prüfmedium E_{PH_2} und in Stickstoff E_{PN_2} nach Formel 3 bestimmt:

$$E_{PR} = \frac{E_{PH_2}}{E_{PN_2}} \cdot 100 \% \quad \text{Formel 3}$$

Methode 4: Ermüdung, bruchmechanische Lebensdauerbewertung

Die Kennwerte für eine bruchmechanische Lebensdauerbewertung wurden anhand von Rissfortschrittsuntersuchungen im National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA bestimmt. Die Rissfortschrittsuntersuchungen fanden in 100 bar Wasserstoff bei einer Frequenz von 1 Hz und einem Verhältnis von Ober- zu Unterspannung von $R = 0,215$ statt. Mit den Versuchen wurde eine tangentielle Zugbelastung abgebildet. Dies entspricht der Situation direkt unterhalb der Verflanschung, an der nur der Rohrinneindruck und kein hydrostatischer Druck durch die Spülflüssigkeit vorliegt, siehe Abbildung 16.

Für die Lebensdauerberechnungen wurden Maximal- und Minimaldruck von 140 bar und 30 bar, ein Rohraußendurchmesser von 244,475 mm und Wanddicken von 10 bzw. 13 mm aus der für das Verbundvorhaben H₂-UGS erstellten Parameterliste entnommen. Als Initialfehler wurde eine Fehlertiefe von 0,5 mm und eine Fehlerbreite von 50 mm angenommen. Die Lebensdauerberechnung wurde nach ASME B31.12 und ASME BPVC vorgenommen.

Die angenommenen Parameter sind als konservativ anzusehen, da – wie für bruchmechanische Betrachtungen üblich – ein Initialfehler vorausgesetzt wurde und keine Riss-schließeffekte durch Druckbelastungen in die Betrachtungen einbezogen wurden.

Es wurde nur die Betriebsbedingung unter reinem Wasserstoff betrachtet. Ein mögliches Vorliegen von Schwefelwasserstoff und Feuchtigkeit wurde nicht berücksichtigt.

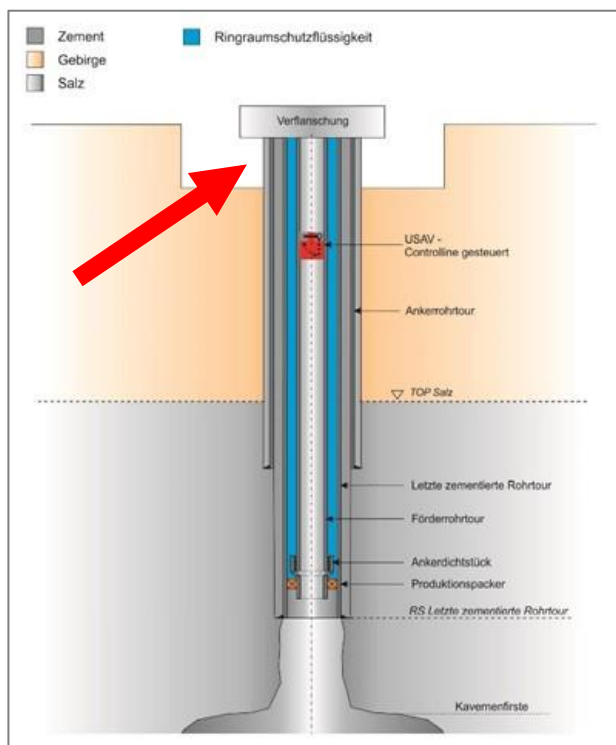


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Kavernenverrohrung (Darstellung: UGS GmbH)

Methode 5: Messung des Wasserstoffs im Stahl mittels Trägergasheißextraktion (TGH)

Der Wasserstoffgehalt in Grund- und Schweißzusatzwerkstoffen wurde mittels Trägergasheißextraktion im Ausgangszustand und nach Beladung mit Druckwasserstoff bei 200 bar gemessen. Bei diesem Messverfahren werden die Proben komplett aufgeschmolzen und der Gesamtwasserstoff in einer Messzelle ermittelt. Um das Ausgasen von Wasserstoff zu bestimmen, wurden die Werkstoffe zusätzlich bei unterschiedlichen Auslagerungszeiten an Luft gemessen. Die Wasserstoffbeladung erfolgte in Form von kleinen Proben der Größe 5 mm x 5 mm x 5 mm in einem konstruiertem Mini-Autoklaven wie in Abbildung 17 gezeigt, der zusätzlich mittels induktiver Beheizung bei konstanter Temperatur mit Wasserstoff beaufschlagt werden kann.

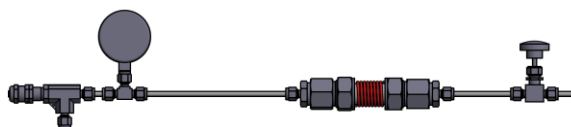


Abbildung 17: Darstellung eines Miniatur-Autoklaven in Form eines Rohrs zur Beladung von kleinen Stahlproben mit Druckwasserstoff

Methode 6: Messung von Wasserstoff-Bindungsenergien

Die Bindungsenergien von Wasserstoff im Grund- und den Schweißzusatzwerkstoffen wurde mittels thermischer Desorptionsspektroskopie (TDS) gemessen. Der effundierte Wasserstoff bei Temperaturerhöhung wird hierbei mittels Massenspektrometer ermittelt. Die Entnahmestelle von Flachproben

aus dem Schweißnahtbereich ist in Abbildung 18 mittels roter Linien gezeigt. Die untere Probe enthält Material des Schweißzusatzwerkstoffs für die Wurzellage, die obere Probe Material des Fülllagenmaterials. Mehrere Proben wurden bei unterschiedlichen Heizraten zwischen 40 °C und 800 °C ausgeheizt und die Spitzentemperatur des sich ergebenden Wasserstoff-Peaks im Massenspektrometer ausgewertet.

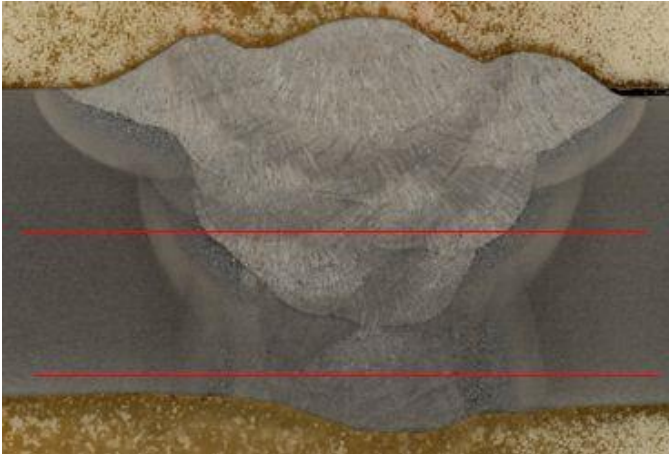


Abbildung 18: *Entnahmestellen der Proben aus der Schweißnaht in Rot*

Methode 7: Messung der Diffusionsgeschwindigkeit

Die effektive Diffusionsgeschwindigkeit von Wasserstoff im Grundwerkstoff bei Raumtemperatur wurde mittels der elektrochemischen Permeationsmethode ermittelt. Hierzu wurde eine dünne Flachprobe mit einer Dicke von 0,5 mm aus dem Grundmaterial mittels Drahterosion herausgetrennt und wie in Abbildung 19 (rechts) dargestellt zwischen eine Beladungszelle und eine Analysezelle geklemmt, siehe Abbildung 19 (links). Die Erzeugung von Wasserstoff in der Beladungszelle erfolgte in 0,1n Natriumhydroxid (NaOH) bei einer mittleren Beladungsstromdichte von 5 mA/cm^2 . Als Gegenelektrode wurde in beiden Zellen eine platiniierte Titanelektrode verwendet. In der Analysezelle wurde ebenfalls 0,1n NaOH und ein Drei-Elektroden-System mit einem Ruhepotenzial von $+255 \text{ mV}$ gegenüber einer Ag/AgCl-Elektrode verwendet. Die Beladung der Probe erfolgte nach Einstellung eines Ruhestroms in der Analysezelle von $< 1 \mu\text{A}$.

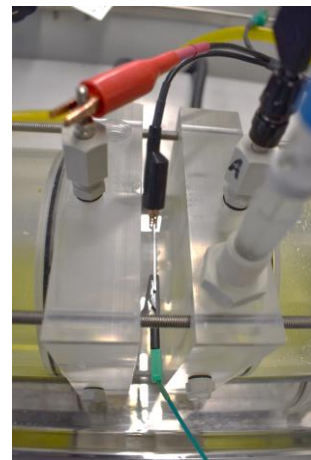
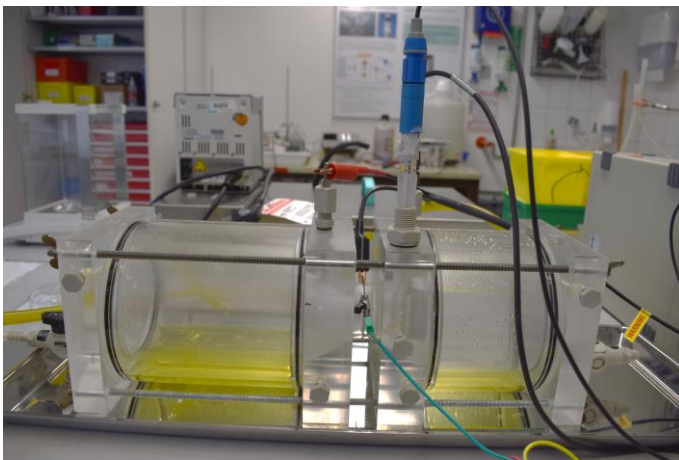


Abbildung 19: *Elektrochemische Permeations-Doppelzelle mit Gegen- und Referenzelektroden (links), elektrisch kontaktierte Probe zwischen zwei Elektrolytbehältern zur elektrochemischen Permeationsmessung (rechts)*

Methode 8: Messung von Temperaturfeldern im Schweißprozess

Die Aufnahme von Temperatur-Zeit-Feldern in unterschiedlichem Abstand zur Fügezone wurde während der Schweißprozesse von zwei Proberohren, siehe Abbildung 20 (links), mittels aufgepunktetem Thermoelement realisiert, wie in Abbildung 20 (rechts) gezeigt.

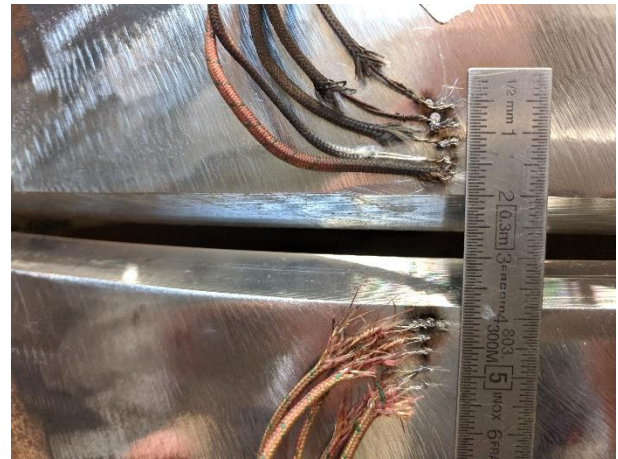


Abbildung 20: Zu verschweißende Proberohre (links), aufgepunktete Thermoelemente an den Schweißnahtkanten vor dem Schweißen (rechts)

Methode 9: Untersuchung des Schweißnahtgefüges

Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und Schweißgut wurden metallografisch untersucht. Zur Bestimmung der Härte über der Schweißnaht wurden im Bereich der Wurzel- und der Fülllage Härteverläufe aufgenommen.

Methode 10: Messung von Schweiß-Eigenspannungen mittels röntgenografischer und mechanischer Methoden

Die sich beim Schweißprozess ergebenden Schweiß eigenspannungen wurden oberflächennah im Grundwerkstoff und der Wärmeeinflusszone ermittelt. Zur Aufnahme von Spannungsverläufen mittels röntgenografischer Methoden wurde ein mobiles Röntgendiffraktometer an eine Lineareinrichtung und diese an ein Galgenstativ angebracht, siehe Abbildung 21. Die Eindringtiefe der Röntgenstrahlung beträgt bei Verwendung von Chrom-Strahlung ca. 10 µm. Für Eigenspannungstiefenverläufe bis zu 1 mm wurde die inkrementelle Bohrlochmethode nach ASTM E837 angewandt. Hierbei wurde ein

mobiles Bohrlochgerät an der Oberfläche der Probe angebracht und im Bereich des Grundwerkstoffs sowie der Wärmeeinflusszone die Eigenspannungen ermittelt. In Abbildung 22 (links) ist das Bohrlochgerät mit Hochgeschwindigkeitsfräs-Spindel und applizierter Dehnmessstreifenrosette gezeigt. Aufgrund der geringen Größe des Bohrlochgeräts konnten auch Eigenspannungstiefenverläufe an der Innenseite des Rohrs im Bereich des Grundwerkstoffs ermittelt werden, wie in Abbildung 22 (rechts) gezeigt.

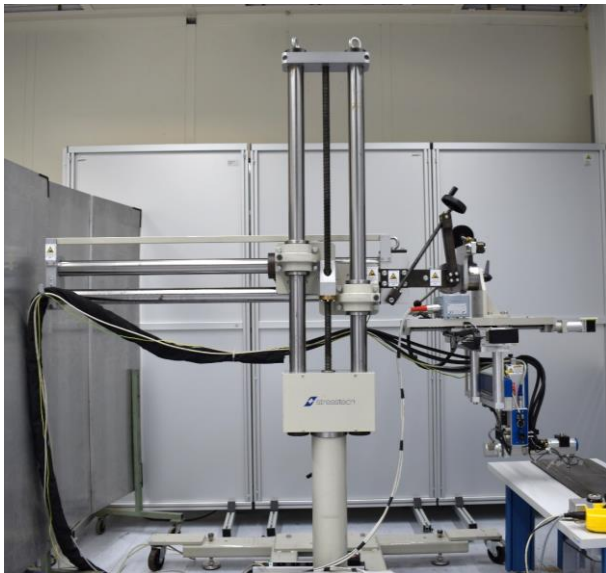


Abbildung 21: An Stativ montiertes Röntgendiffraktometer

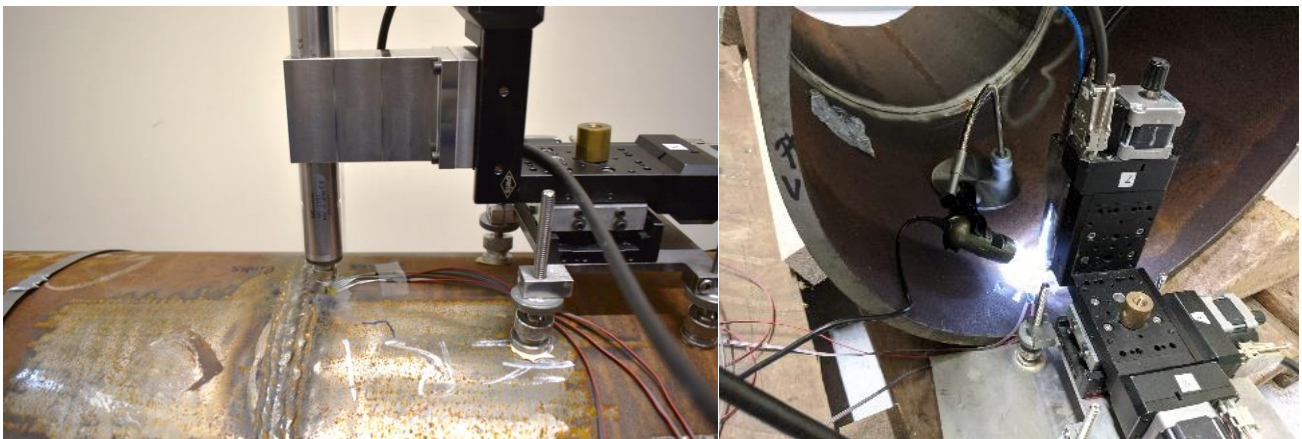


Abbildung 22: Im Bereich der Wärmeeinflusszone angebrachte Bohrspindel und Dehnmessstreifen (links), Messung von Eigenspannungen an der Innenseite des Rohrs (rechts)

Methode 11: Messung der wasserstoffabhängigen kritischen Spannungsintensität

Die kritische Spannungsintensität in Umgebung von Wasserstoff wurde mittels eines kombinierten H₂-Autoklavs mit Zugprüfeinrichtung (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) bei Luft, 100 bar H₂-Partialdruck und 200 bar H₂-Partialdruck ermittelt. Die Untersuchungen an Luft wurden nach ASTM E399 durchgeführt. Die Untersuchungen in H₂-Atmosphäre in Anlehnung an ASTM E1681, mit einer Modifikation für statische Lasten wie in (Matsumoto, et al., 2017) Beschrieben. Als Proben wurden einseitig gekerbte Biegeproben (Single Edge Notched Bending-) SENB-Proben) mit erodiertem Kerb, siehe Abbildung 24 (links), im angeschwungenen Zustand geprüft. Der gezeigte Kerb wurde an unterschiedlichen Proben im Bereich des Grundwerkstoffs, im Bereich der Wurzellage der Schweißnaht und im Bereich der Wärmeeinflusszone eingebracht, wie schematisch in Abbildung 24 (rechts) gezeigt.



Abbildung 23: 1.000 bar Autoklav zur mechanischen Probenbelastung in Wasserstoffatmosphäre

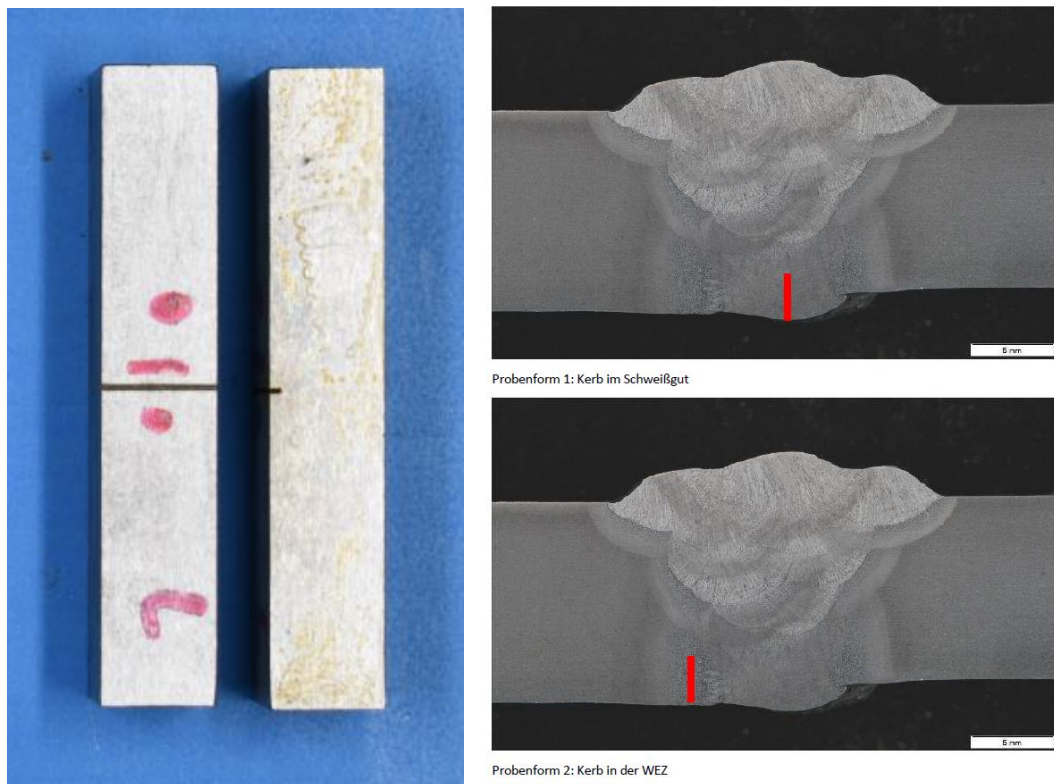


Abbildung 24: Probekörper mit erodiertem Kerb in Grundwerkstoff (links), schematische Darstellung der Kerbeinbringung in Wurzellage und Wärmeinflusszone (WEZ) (rechts)

Zur grundlegenden Analyse des Einflusses der Gasreinheit, von Oberflächeneinflüssen, des Einflusses von Spannungen und der Dehnrates wurden in erweiterten Untersuchungen die Hohlprobentechnik eingesetzt. Hierbei werden Zugproben mit Innenbohrung von Innen mit Wasserstoff beaufschlagt. Die Proben wurden dem Rohrwerkstoff mittels Drahterodieren entnommen und mittels Langlochbohren, wie in Abbildung 25 gezeigt, endgefertigt.

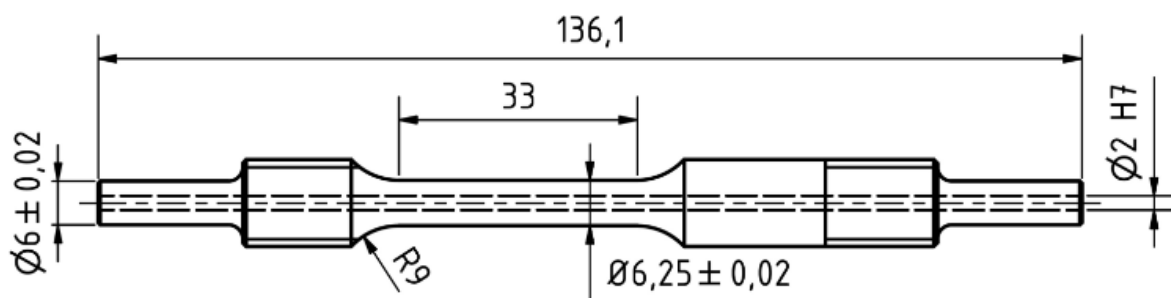


Abbildung 25: Skizze einer typischen Hohlprobe

Methode 12: Numerische Simulation von Wärmeeintrag, Gefüge, Eigenspannungen und Wasserstoffdiffusion

Die numerische Simulation des Schweißprozesses erfolgte mittels der Finite-Elemente-Methode. Die Geometrie der Schweißnaht wurde an einen Querschliff für eine Stelle im stationären Bereich der Schweißnaht angepasst, siehe Abbildung 26. Für die Berechnung des Wärmeeintrags wurden die thermophysikalischen Werkstoffkennwerte (spezifische Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit) für Grundwerkstoff und die Schweißzusatzwerkstoffe aus der Berechnung mit Datenbankwerten für den Bereich zwischen Raumtemperatur und Schmelztemperatur ermittelt und erweitert. Die Anpassung der Ersatzwärmequellen für jede Schweißlage erfolgte aus den Querschliffen und den im realen Prozess gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufen des Schweißprozesses. Die berechneten Temperaturfelder sind Eingangsgröße für die Spannungsberechnung. Unter Verwendung thermomechanischer Werkstoffkennwerte der Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe wurden die sich ergebenden thermischen, elastischen und plastischen Dehnungen berechnet, aus denen sich nach Abkühlung die Schweiß eigenspannungen in der Schweißnaht ergeben. Die Berechnung der lokalen Anreicherung von Wasserstoff in unterschiedlichen Schweißnahtbereichen wurde aus der Zusammenführung und Berücksichtigung der Spannungs- und Dehnungsfelder und den Randbedingungen wie Temperatur und H_2 -Partialdruck für den Fall der Beaufschlagung des Rohrs mit Wasserstoff berechnet. Grundlage der Berechnung sind die messtechnisch ermittelten H_2 -Eigenschaften und deren Ergänzung durch Datenbankwerte.

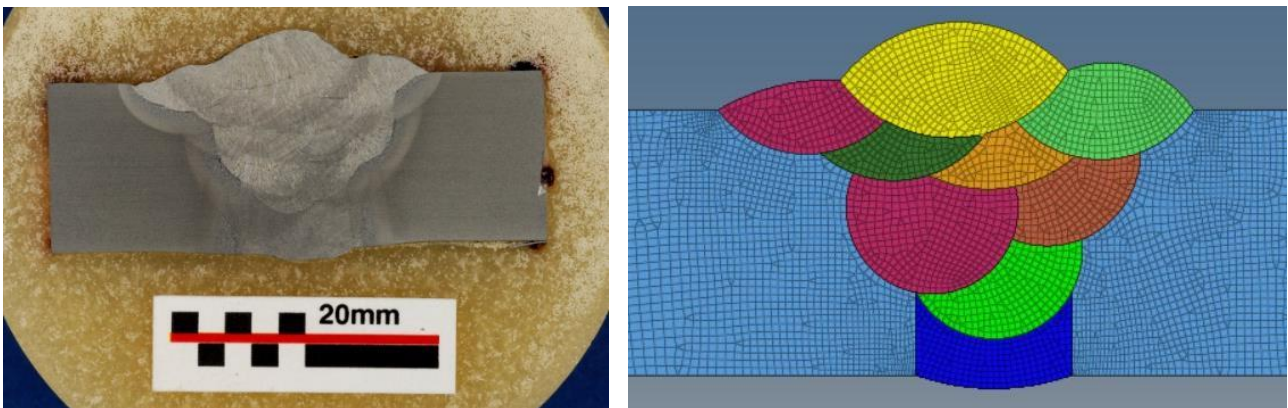


Abbildung 26: Querschliff der Schweißnaht (links) im Vergleich mit der Modellierung (rechts)

3.6 Ergebnisse zu Untersuchungsmethoden

Ergebnisse Methode 1 (Sauerplastests)

HIC-Tests

Der hier getestete Werkstoff zeigte keine HIC-Anfälligkeit. Die Ultraschallauswertung der HIC-Proben ergab für den Grundwerkstoff nur eine Anzeige an der Probe 714-1 mit einem CAR-Wert von 0,8 % bei einer Bildschirmhöhe von 15 %, siehe Abbildung 27. Die Anzeige resultiert aus einer Blasenbildung (Blistering) an der Probenoberfläche, siehe Abbildung 28. Die Proben der HFI-Schweißnaht zeigten weder Ultraschallanzeigen noch Blistering. An zwei Proben der Rundnaht wurde vereinzelte Blasenbildung festgestellt. Die Ultraschallauswertung ist in Abbildung 29 dargestellt und zeigte CAR-Werte von 0,5 % bei 25 % Bildschirmhöhe bzw. 0,8 % bei 15 % Bildschirmhöhe. Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen Fotos der Proben mit Blasenbildung.

Typische Akzeptanzkriterien für Werkstoffe in Sauerplastanwendungen liegen bei CAR-Werten von < 5 %. Die erhaltenen CAR-Werte des geprüften Werkstoffs lagen weit unterhalb der Akzeptanzkriterien, zeigten also keine Anfälligkeit gegenüber Sauerplastkorrosion.

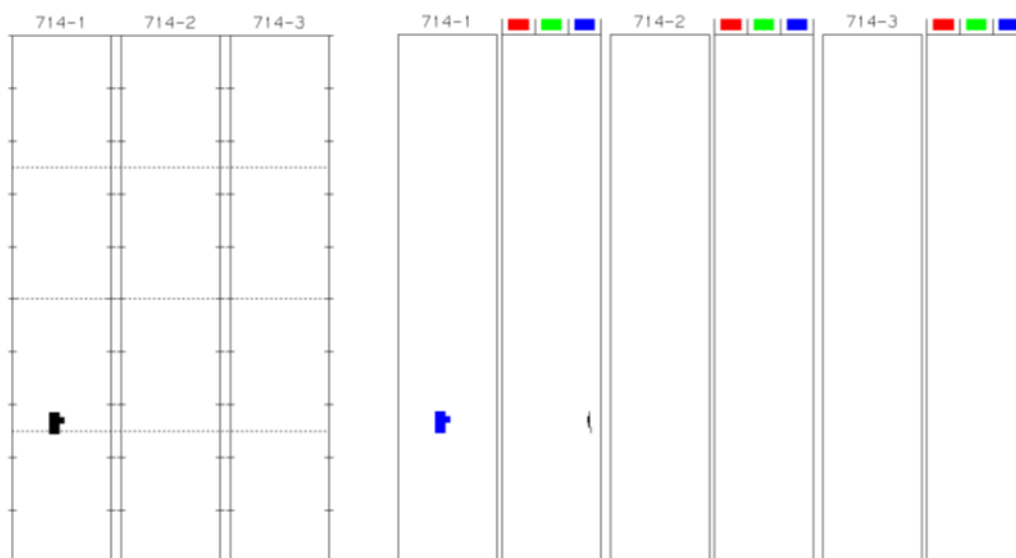


Abbildung 27: Ultraschallauswertung der HIC-Tests am Grundwerkstoff



Abbildung 28: Blistering an Probe 714-1 (Grundwerkstoff)

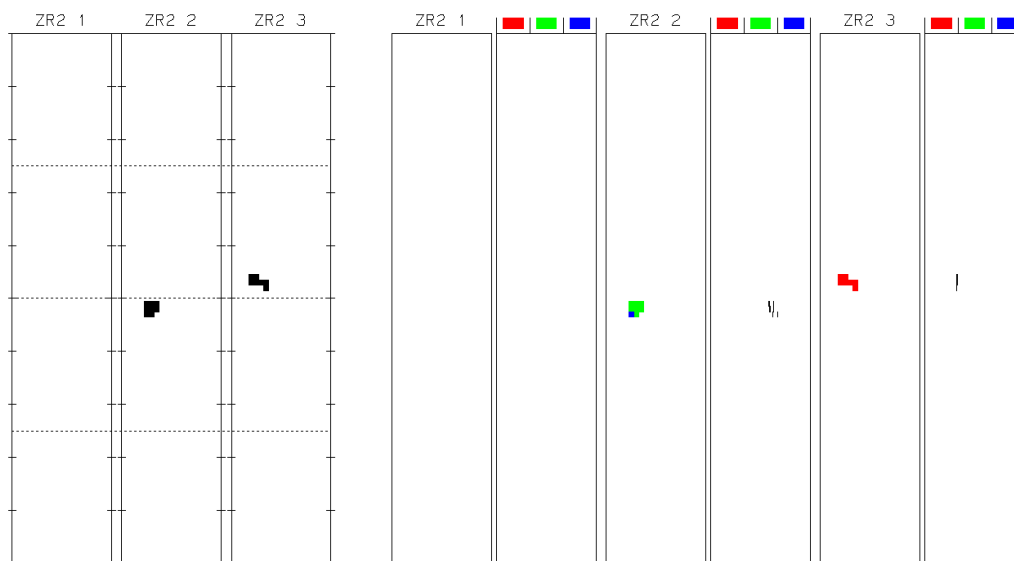


Abbildung 29: Ultraschallauswertung der HIC-Tests an der Rundschweißnaht

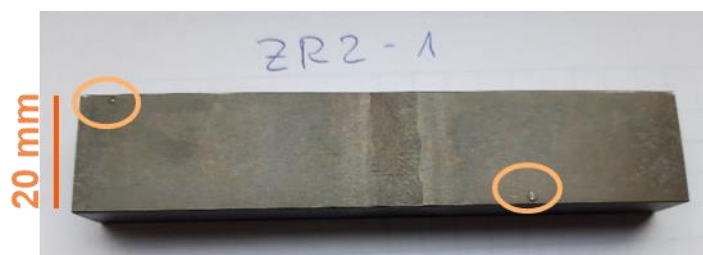


Abbildung 30: Blistering an Probe ZR2-1 (Rundschweißnaht)

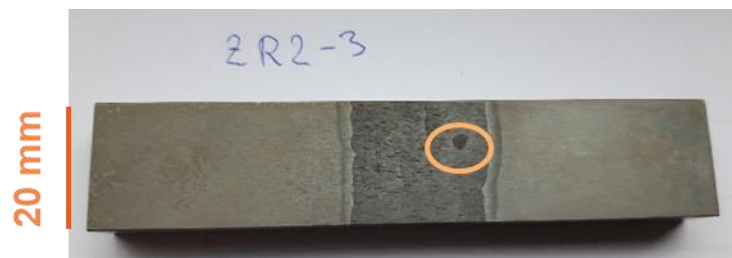


Abbildung 31: Blistering an Probe ZR2-3 (Rundschweißnaht)

SSC-Tests

Sowohl an Grundwerkstoff, als auch an HFI- und Rundschweißnaht sind keine Risse aufgetreten. Damit zeigte der geprüfte Werkstoff auch in den SSC-Tests keine Sauer gasanfälligkeit. Das SSC-Testprotokoll ist in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

SSCC - Test (4-Punkt-Biege-Test)		Stichwort : HYPOS-UGS	
Probeneingang		Bearb. - Nr.	EDWK 2019-095
Testbeginn	24.05.2019	Study - Nr.	
Testende	28.05.2019	Auftrag-Nr.	2019-012-2
		Auftraggeber	Dr. Wanzenberg
		Prüfer :	Makhynya
		Probenanzahl :	6

Prüflösung	NACE TM0177 A	NACE TM0284 B	Sonstige
	X pH 3 X	pH 5	pH 3,5
pH - Wert (vor H ₂ S-Sättigung)	2,7		
pH - Wert (Start)	3,2		
pH - Wert (Ende)	3,9		
H ₂ S-Konzentration (Start)	2435 ppm	ppm	ppm
H ₂ S-Konzentration (Ende)	2486 ppm	ppm	ppm
Verhältnis Lösung / Oberfläche	> 3,0 ml/cm ²	ml/cm ²	ml/cm ²

Testdauer:	96h
------------	-----

1 bar H2S	
-----------	--

Rohr - Nr.	Bezeichnung	Lage		Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Material	AYS MPa	H (mm)	A (mm)	Belastung %	Auslenkung (mm)	Befund		
													visuell (10x)	MP-Prüfung	Metalle
714	1	GW	L	140	15	5,0		390	127	38	72	0,97	o.B.		
	2	GW	L	140	15	5,0		390	127	38	72	0,97	o.B.		
	3	GW	L	140	15	5,0		390	127	38	72	0,97	o.B.		
714	4	SN	Q	60	15	5,0		390	50	15	72	0,15	o.B.		
	5	SN	Q	60	15	5,0		390	50	15	72	0,15	o.B.		
	6	SN	Q	60	15	5,0		390	50	15	72	0,15	o.B.		

Abbildung 32: SSC-Testprotokoll für Grundwerkstoff und HFI-Naht


Tube no.		Specimen no.		Specimen size [mm]			Work no.							
ZR2		ZR2 1-3		Width	Thickness	Length	EDWK 2020-054							
Specification		NACE-Standard TM0177-2016 ASTM G 39 - 99												
	Specimen location in pipe circumference	Specimen 1	1	Longitudinal specimens	Specimen 1	Transverse specimens	Specimen 1	X						
		Specimen 2	1		Specimen 2		Specimen 2	X						
		Specimen 3	1		Specimen 3		Specimen 3	X						
Hydrogen charging conditions														
NACE-Standard TM0177-2016, test solution A														
Test conditions		Temperature, 24 °C				Test period, 96 [h]								
H ₂ S concentration ppm (mg/L)					Test start	2333	Test end	2572						
pH of test solution		Before H ₂ S saturation 2,7			Test start	3,1	Test end	3,9						
Remarks														
4 - point bend beam specimen : ASTM G 39														
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Yield strength (MPa)</th> </tr> <tr> <th>Specified minimum</th> <th>Actual</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">390</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>									Yield strength (MPa)		Specified minimum	Actual	390	
Yield strength (MPa)														
Specified minimum	Actual													
390														
Applied stress : 72 % SMYS														
Test results														
		Results of Inspection												
		visual		magnetic particle										
Specimen	No cracks	Cracks	No cracks	Cracks										
1	X													
2	X													
3	X													

Abbildung 33: SSC-Testprotokoll für Rundnaht

Die getesteten Proben zeigten weder in HIC- noch in SSC-Tests Anfälligkeit für Sauerstoffkorrosion. Dies ist bei möglichem Auftreten von Schwefelwasserstoff Voraussetzung für das Einsetzen des Stahlwerkstoffes. In dieser Hinsicht scheint der Stahlwerkstoff für den Einsatz geeignet.

Ergebnisse Methode 2 (Kerbschlagbiegetests nach Vorbelastung)

Die gemessenen Kerbschlagenergien mit und ohne Vorbelastung sind in Abbildung 34 dargestellt. Die Vorbelastung der Proben führte zu einer Reduktion der Kerbschlagenergien im Vergleich zu den nicht vorbelasteten Proben. Der Effekt verstärkte sich mit abnehmender Prüftemperatur. Bei Betriebstemperaturen von bis zu -20 °C war der Effekt noch gering ausgeprägt, die Kerbschlagenergien übertreffen die Vorgaben der API bei Weitem und zeigen noch keine ausgeprägte Streuung. Der Wasserstoffgehalt der vorbelasteten Proben nach der Temperierung im Kältebad ist in Tabelle 19 aufgelistet.

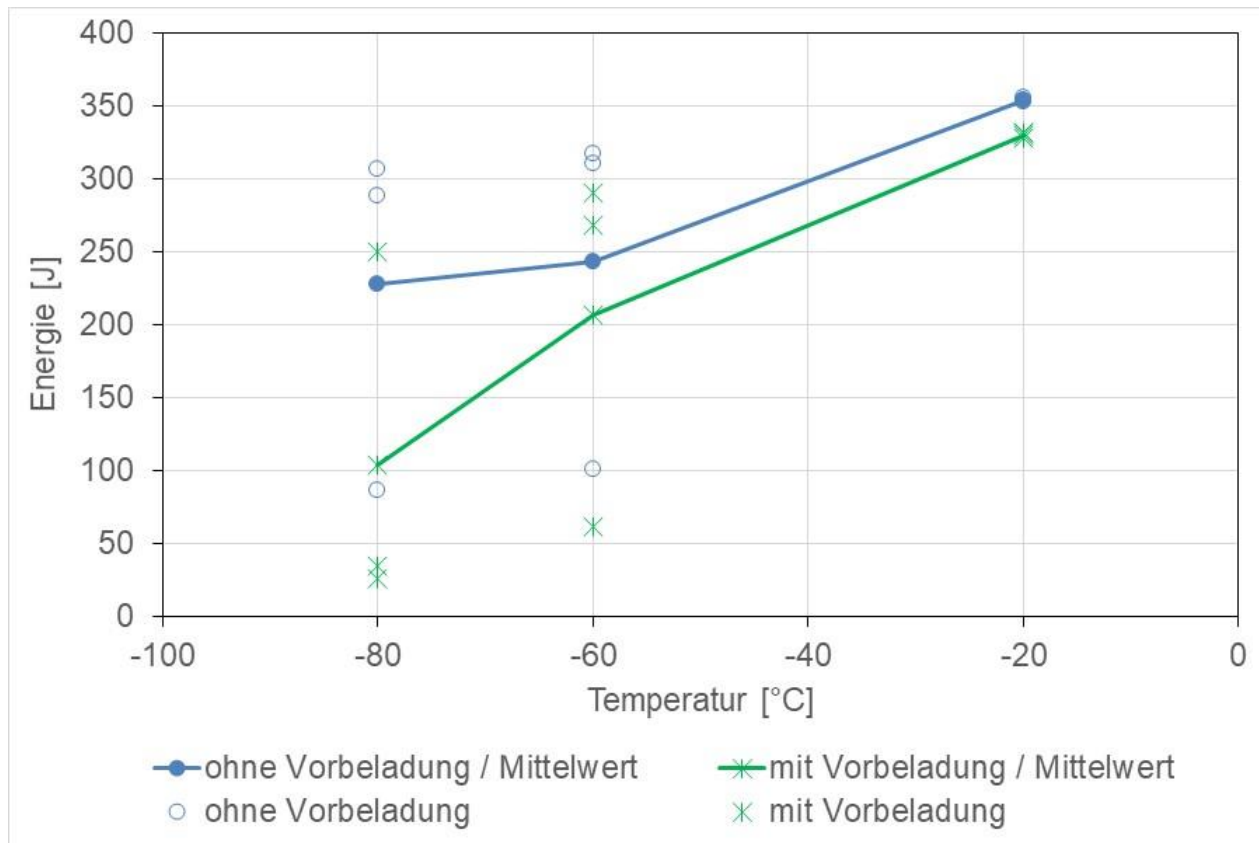


Abbildung 34: Kerbschlagenergien gemessen am Grundwerkstoff im Vergleich mit und ohne Wasserstoffvorbelastung.

Tabelle 19: Gemessener Wasserstoffgehalt der Kerbschlagbiegeproben nach Temperierung im Kältebad

Temperatur [°C]	Wasserstoffgehalt [wppm]
-20	0,17
-60	0,20
-80	0,22

Ergebnisse Methode 3 (SSRT-Tests)

Die ermittelten Zugkurven sind in Abbildung 35 bis Tabelle 38 dargestellt, Duktilitätskennwerte und Zugfestigkeit in Abbildung 39, Abbildung 40 sowie in Tabelle 20.

Alle Spannungs-Dehnungs-Kurven der in 80 bar Druckwasserstoff geprüften Proben zeigen bis zum Erreichen der Zugfestigkeit einen Verlauf analog der im inerten Medium gemessenen Proben. Erst im Bereich von hohen Dehnungen trat ein Effekt des Wasserstoffes auf das Bruchverhalten auf.

Die Duktilitätskennwerte des X56-Werkstoffes weisen in Wasserstoff reduzierte Werte gegenüber inertem Medium auf. Sowohl in Brucheinschnürung als auch in Bruchdehnung zeigt die Rundnaht den höchsten Einfluss des Wasserstoffes. In Grundwerkstoff und HFI-Schweißnaht verringerte sich die Bruchdehnung E_p um ca. 25 % und die Brucheinschnürung RA um ca. 40 %. In der Rundschweißnaht verringerten sich Bruchdehnung und Brucheinschnürung um ca. 40 %. Zugfestigkeit und Gleichmaßdehnung wurden nicht beeinflusst. Der Einfluss des Wasserstoffes auf das Bruchverhalten der Proben ist ebenfalls in den Bildern von Bruchflächen sowie Seitenansicht der geprüften Proben erkennbar, siehe Tabelle 21.

Die zum Vergleich gemessenen Proben des Sauerstoffwerkstoffes zeigen mit einer relativen Brucheinschnürung RAR von 68 % und einer relativen Bruchdehnung E_pR von 92 % einen geringeren Einfluss des Wasserstoffes auf die Duktilitätskennwerte.

Die Ergebnisse der SSRT-Tests im H_2 - H_2S -Gasgemisch mit Testlösung zeigen einen wesentlich verstärkten Effekt der Wasserstoffversprödung. Bruchdehnung und Brucheinschnürung in Grundwerkstoff, HFI-Naht und Rundnaht wurden erheblich verringert, die Zugfestigkeit nur knapp oder nicht erreicht. Dies galt sowohl für den X56-Werkstoff, als auch für den zum Vergleich geprüften Sauerstoffwerkstoff. Die relative Brucheinschnürung wies Werte zwischen ca. 19 und 30 % auf, die relative Bruchdehnung 26 bis 43 %. Derselbe Effekt wird sowohl in H_2 - H_2S -Atmosphäre als auch in N_2 - H_2S -Atmosphäre beobachtet, sodass davon ausgegangen werden kann, dass für die stark verringerten Duktilitätswerte nicht der Wasserstoff, sondern der Schwefelwasserstoff in Zusammenhang mit der Feuchtigkeit ursächlich waren. Besonders auf der Bruchfläche der Grundwerkstoffproben des X56 sind deutlich die SSC-Anrisse zu erkennen, wie sie üblicherweise im SSC-Test nach NACE TM0177 Methode A (Zugversuch unter konstanter Last) auftreten.

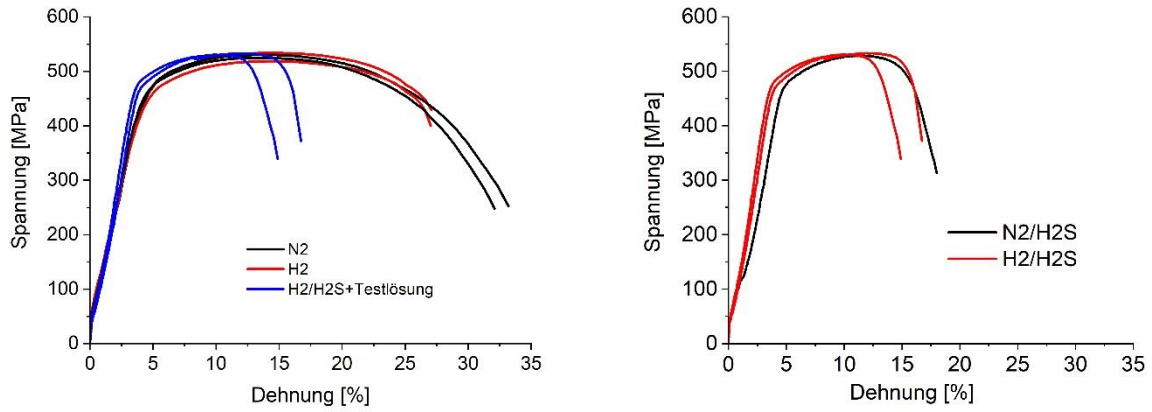


Abbildung 35: Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests gemessen am Grundwerkstoff

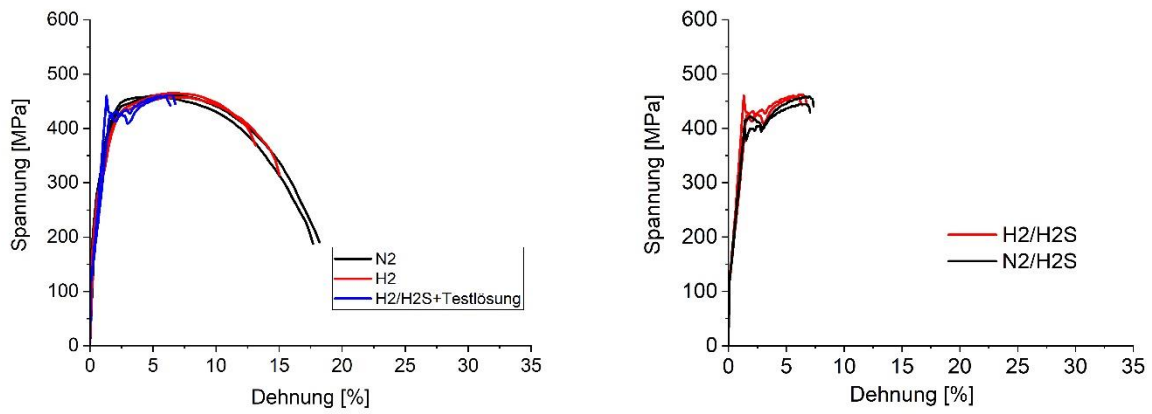


Abbildung 36: Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests gemessen an der HFI-Naht

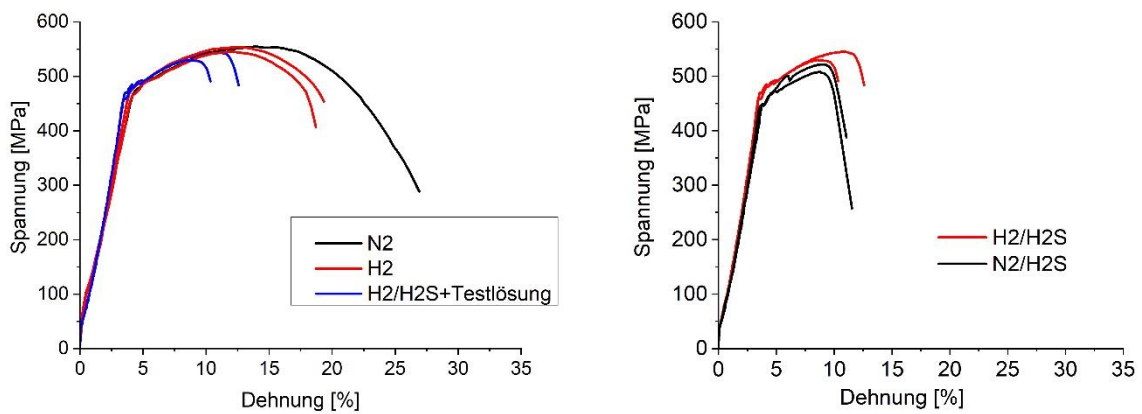


Abbildung 37: Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests gemessen an der Rundnaht

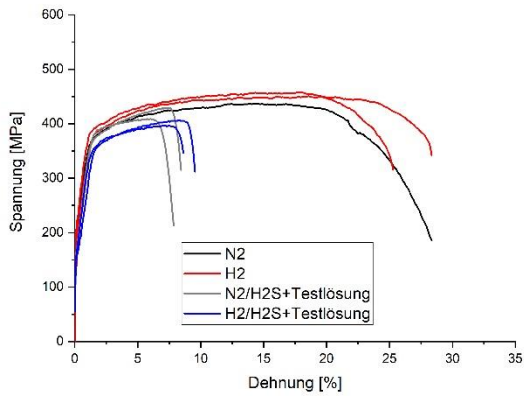


Abbildung 38: Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests am Grundwerkstoff des X52 Sauerstoffwerkstoffs

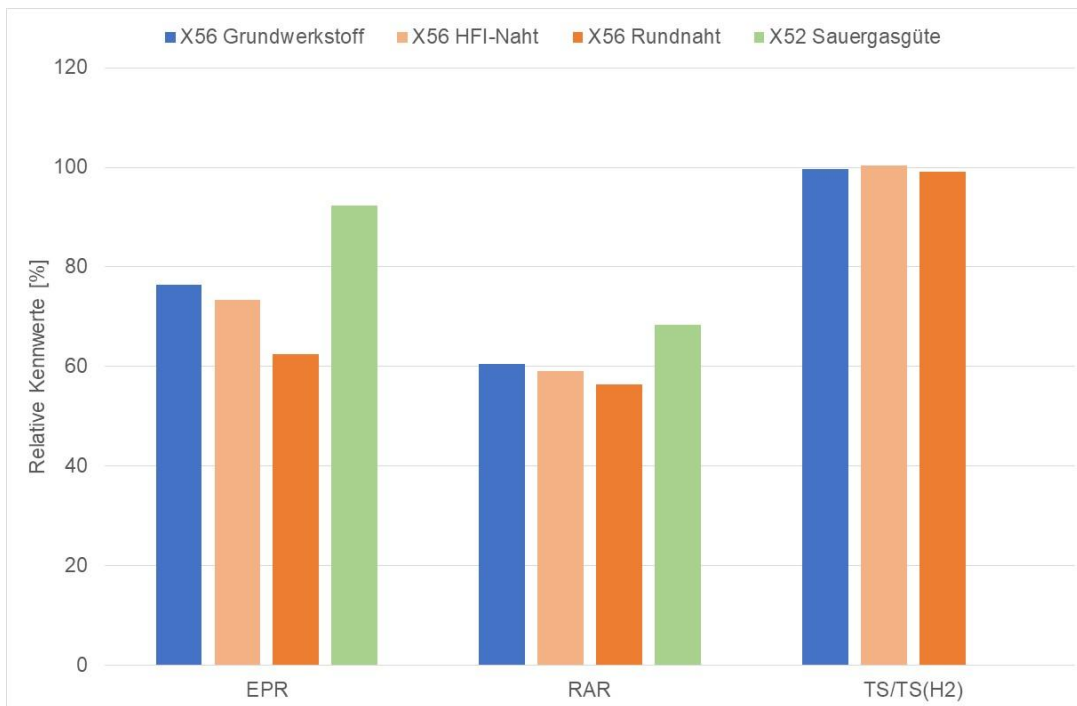


Abbildung 39: Relative Duktilitätskennwerte und Verhältnis der Zugfestigkeiten gemessen in Wasserstoff gegenüber inertem Medium (Stickstoff), E_pR : relative Bruchdehnung, RAR : relative Brucheinschnürung, $TS/TS(H_2)$: Verhältnis der Zugfestigkeiten

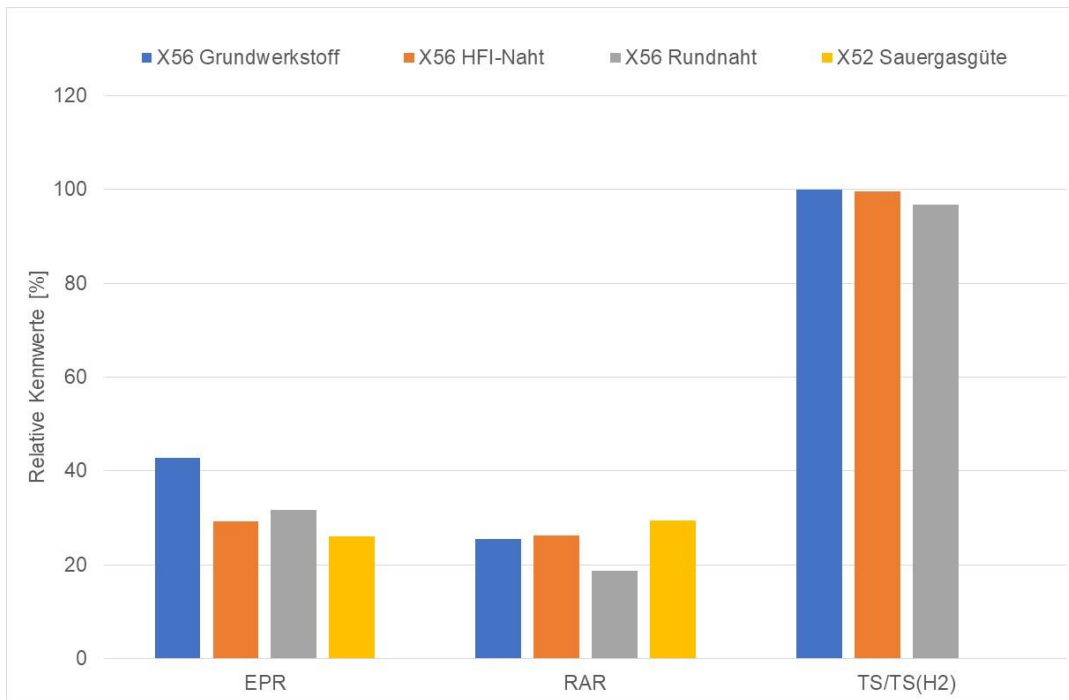
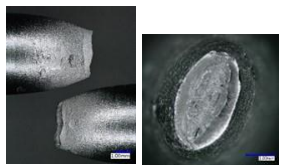
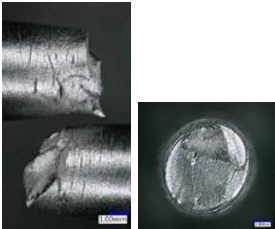
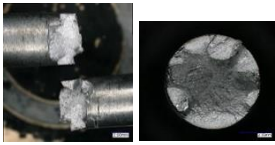

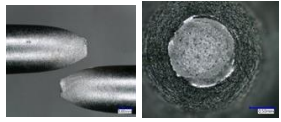
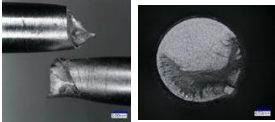
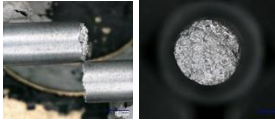
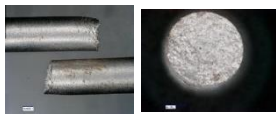
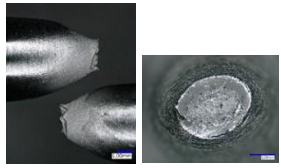
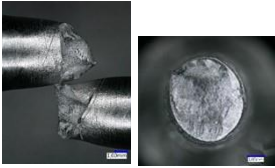


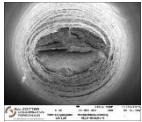
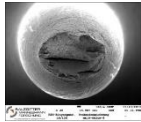

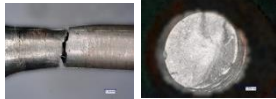


Abbildung 40: Relative Duktilitätskennwerte und Verhältnis der Zugfestigkeiten gemessen in Wasserstoff-Schwefelwasserstoff-Gasgemisch mit Testlösung gegenüber inertem Medium (Stickstoff), E_pR : relative Bruchdehnung, RAR : relative Brucheinschnürung, $TS/TS(H_2)$: Verhältnis der Zugfestigkeiten

Tabelle 20: Bruchdehnung, Brucheinschnürung und Verhältnis der maximalen Festigkeiten aller SSRT-Tests, E_pR : relative Bruchdehnung, RAR: relative Brucheinschnürung, $TS/TS(H_2)$: Verhältnis der Zugfestigkeiten

Werkstoff	Medium	Bruchdehnung			Brucheinschnürung			Verhältnis der maximalen Festigkeiten [%]
		E_p [%]	Mittelwert E_p [%]	E_pR [%]	RA [%]	Mittelwert RA [%]	RAR [%]	
X56 Grundwerkstoff	N2 80 bar	29,8	30,4		82,5	83,0		99,6
	N2 80 bar	30,9			83,5			
	H2 80 bar	23,2	23,2	76,4	52,3	50,2	60,5	
	H2 80 bar	23,2			48,1			
	H2/H2S+Testlösung	13,7	13,0	42,8	20,9	21,2	25,5	
	H2/H2S+Testlösung	12,3			21,4			
	N2/H2S+Testlösung	14,8			14,8			
X56 HFI-Naht	N2 80 bar	17,1	17,3		87,6	86,5		100,3
	N2 80 bar	17,5			85,4			
	H2 80 bar	13,8	12,7	73,4	56,7	51,1	59,0	
	H2 80 bar	11,6			45,4			
	H2/H2S+Testlösung	5,0	5,1	29,2	23,4	22,8	26,3	
	H2/H2S+Testlösung	5,1			22,1			
	N2/H2S+Testlösung	5,8			20,0			
N2/H2S+Testlösung	5,6	5,7	32,9	23,9				
X56 Rundnaht	N2 80 bar	24,3	24,3		82,7	82,7		99,2
	H2 80 bar	14,8	15,2	62,6	45,2	46,6	56,3	
	H2 80 bar	15,6			48,0			
	H2/H2S+Testlösung	8,9	7,7	31,7	15,1	15,5	18,7	
	H2/H2S+Testlösung	6,5			15,9			
	N2/H2S+Testlösung	9,5	8,7	35,6	22,3	22,8	27,6	
	N2/H2S+Testlösung	7,8			23,3			
X52 Sour Service Grundwerkstoff	N2 80 bar	27,8	27,8		81,2	81,2		Nicht bestimmt
	H2 80 bar	26,9	25,7	92,3	56,6	55,6	68,4	
	H2 80 bar	24,4			54,5			
	H2/H2S+Testlösung	7,4	7,3	26,1	14,9	24,0	29,5	
	H2/H2S+Testlösung	7,1			33			
	N2/H2S+Testlösung	8,2	7,8	27,9	20,1	25,6	31,5	
	N2/H2S+Testlösung	7,3			31,1			

Tabelle 21: Seitenansicht sowie Bruchflächen der im SSRT-Test gezogenen Proben

	N ₂	H ₂	H ₂ /H ₂ S + Testlösung	N ₂ /H ₂ S + Testlösung
X56 Grundwerkstoff				
X56 HFI-Naht				
X56 Rundnaht				
X52 Sauer gasgüte				

Ergebnisse Methode 4 (Ermüdung, bruchmechanische Lebensdauerberechnung)

Die Ergebnisse der Lebensdauerberechnungen sind in Tabelle 22 dargestellt. Dabei stellt N_{crit} die kritische Zyklenzahl bis zum Versagen des Werkstoffes dar, während N_{design} die maximal zulässige Zyklenzahl bei Berücksichtigung der Abbruchkriterien der ASME BPVC ist. Die Lebensdauer wurde für drei Szenarien berechnet:

- a) Übernahme der Rissfortschrittsparameter aus der ASME B31.12,
- b) Berechnung anhand der am Werkstoff bestimmten Rissfortschrittsparameter,
- c) wie b) mit erhöhter Wanddicke.

Der X56-Werkstoff zeigte ein sehr gutes Verhalten mit einer um das 2,5-fache erhöhten Lebensdauer gegenüber der Lebensdauer, die anhand der Parameter berechnet wurden, die aus der Masterkurve der ASME B31.12 stammen. Bei einer Wanddicke von 10 mm ergab sich eine zulässige Zyklenzahl von 67.680. Eine Erhöhung der Wanddicke um 30 % (Fall c) führte zu einer weit erhöhten Lebensdauer von 163.840 Zyklen.

Bei einer Erhöhung der Wanddicke bleibt die mit der Gewichtszunahme einhergehende Zunahme der axialen Spannungen zu berücksichtigen.

Tabelle 22: Lebensdauerberechnungen nach ASME B31.12 und ASME BPVC

OD [mm]	WD [mm]	N_{crit}	N_{design}	Bemerkung
244,475	10,0	52.880	26.400	Rissfortschrittsparameter aus der Masterkurve der ASME B31.12 übernommen
244,475	10,0	135.400	67.680	Rissfortschrittsparameter gemessen
244,475	13,0	327.760	163.840	Erhöhte Wanddicke

Ergebnisse Methode 5, 6 und 7 (Wasserstoffanalytik)

Der gemessene Wasserstoffgehalt im Ausgangszustand des Grundwerkstoffs ist sehr gering. Eine Probenbeladung mit Druckwasserstoff bei 100 bar führt ebenfalls nur zu einer geringfügigen Erhöhung des Gesamtwasserstoffgehalts in den Proben, wie aus Abbildung 41 ersichtlich. Erhöhte Temperaturen, die z. B. beim Schweißen auftreten können und mit einer Erhöhung der Wasserstofflöslichkeit einhergehen, haben ebenfalls keinen großen Einfluss auf den Wasserstoffgehalt. Für den Schweißzusatzwerkstoff, der für die Wurzellage verwendet wird, führt eine Erhöhung von Partialdruck und Temperatur zu einer im Vergleich deutlichen Erhöhung des Wasserstoffgehalts, welcher für die gleichen Bedingungen des Zusatzwerkstoffs für die Füll- und Decklagen noch einmal erhöht ist.

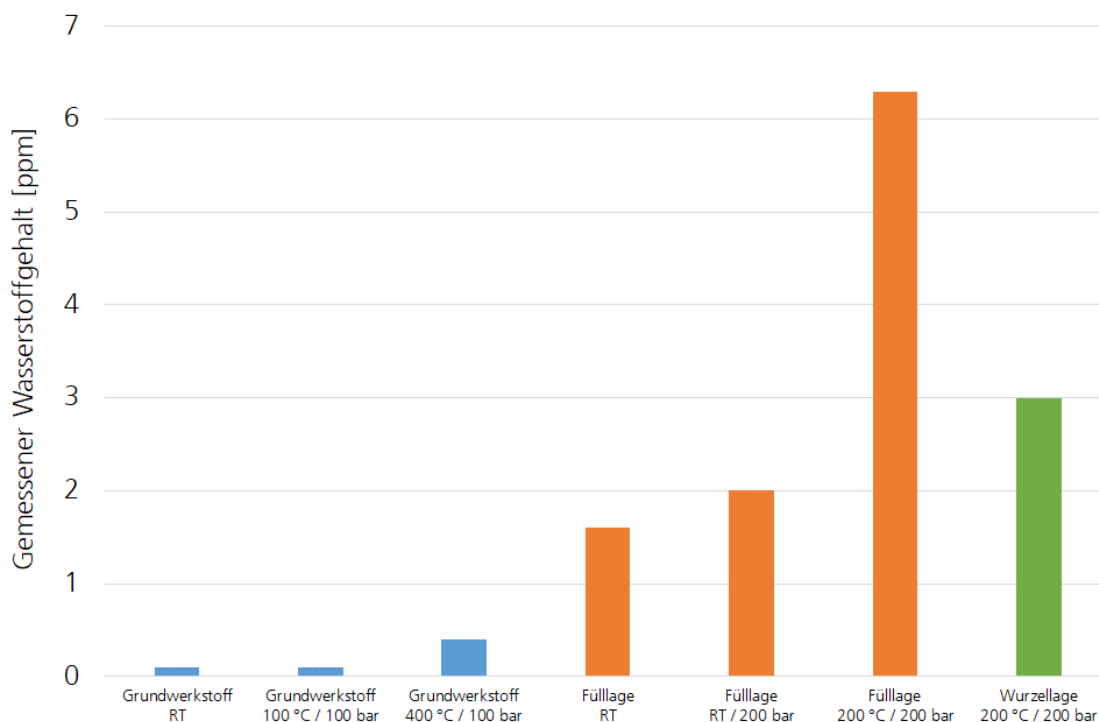


Abbildung 41: *Gemessene Wasserstoffgehalte im Grundwerkstoff, der Wurzellage und der Fülllage nach Wasserstoffbeladung bei unterschiedlichen Temperaturen und Partialdrücken*

Bei der thermischen Desorptionsspektroskopie wurden für den Grundwerkstoff des Stahls bei verschiedenen Aufheizraten nur Wasserstoff bei höheren Bindungsenergien im Grundwerkstoff gemessen, wie in Abbildung 42 gezeigt. Die Menge des gemessenen Wasserstoffs ist gering, was bedeutet, dass Stellen mit höherer Bindungsenergie keine großen Mengen an Wasserstoff im Grundmaterial gebunden haben.

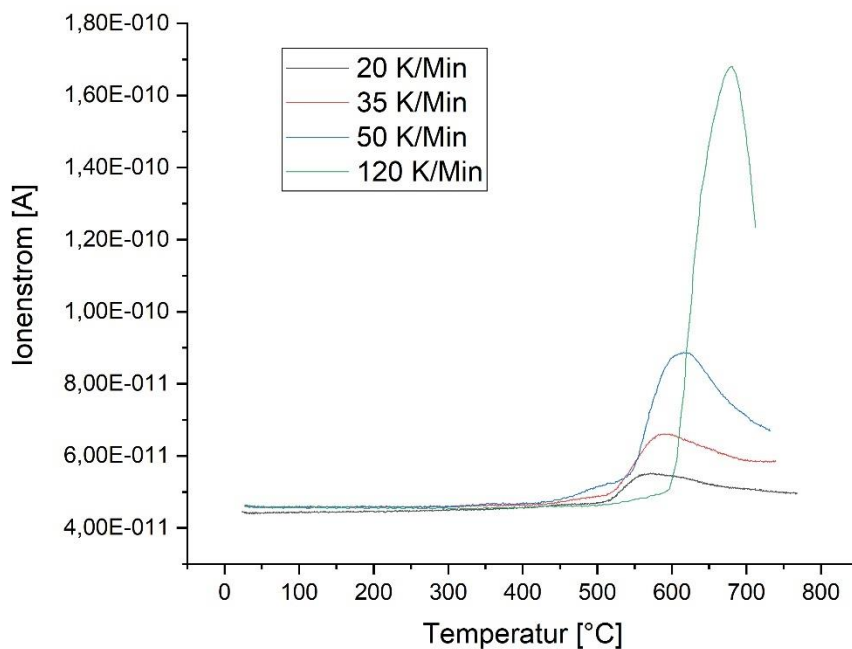


Abbildung 42: Gemessene Desorptionspeaks bei Variation der Aufheizrate

Aus der Peakverschiebung bei Änderung der Heizrate lassen sich über die Geradensteigung bei Arrhenius-Auftragung die Desorptions- und damit die Bindungsenergien des Wasserstoffes im Metall berechnen. Grundwerkstoff und Schweißnahtmaterial unterscheiden sich hierbei. Der Unterschied zwischen Wurzellage und Fülllage ist nicht sehr ausgeprägt. In der Analyse zeigen sich für den Grundwerkstoff Bindungsenergien von ca. 36 kJ/mol, was den Korngrenzen im Material entsprechen sollte. In den Schweißnähten zeigt sich ein weiterer Peak bei geringeren Temperaturen. Für die Wurzellage ergeben sich ca. 26 kJ/mol, was auf einen Einfluss von Versetzungen hindeutet. Bei der Untersuchung der Fülllagen ergeben sich ca. 12 kJ/mol, was ebenfalls mit Versetzungen korreliert. Die bei höheren Temperaturen gemessenen Bindungsenergien betragen für die Wurzellage ca. 65 kJ/mol, was auf Grenzflächen von Ausscheidungen schließen lässt und ca. 94 kJ/mol für die Fülllagen, was ebenfalls der Bindung von Wasserstoff an Grenzflächen entspricht.

Im Permeationsexperiment wurde ein Wasserstoff-Diffusionsverhalten im Stahl X56 ermittelt, das mit den Fick'schen Gesetzen gut beschrieben werden kann. Das bedeutet, dass Wasserstoff-Trapping durch Korngrenzen, Ausscheidungen, etc. von untergeordneter Rolle ist. Der effektive Diffusionskoeffizient wurde mit $4,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$ bestimmt, was einen vergleichbaren Wert für ferritische Stähle darstellt.

Ergebnisse Methode 8 (Thermoelementmessungen)

Die Thermoelementmessungen an einer Decklage zeigen übliche Temperaturgradienten für das Schweißverfahren. Im Abkühlverlauf ergeben sich keine Anzeichen für ausgeprägte Phasenumwandlungen. Der Verlauf der gemessenen Spitzentemperaturen mit steigendem Abstand zur Schweißnaht deuten auf eine ungestörte Wärmeleitung im Inneren der geschweißten Rohre hin. Abbildung 43 bis Abbildung 45 zeigen Temperatur-Zeit-Verläufe der einzelnen Thermo-Elemente (Th.El.), bei verschiedenen Schweißlagen. Die dargestellten Thermoelemente und deren Abstände zur Mitte der Schweißnaht sind für alle Versuche gleich.

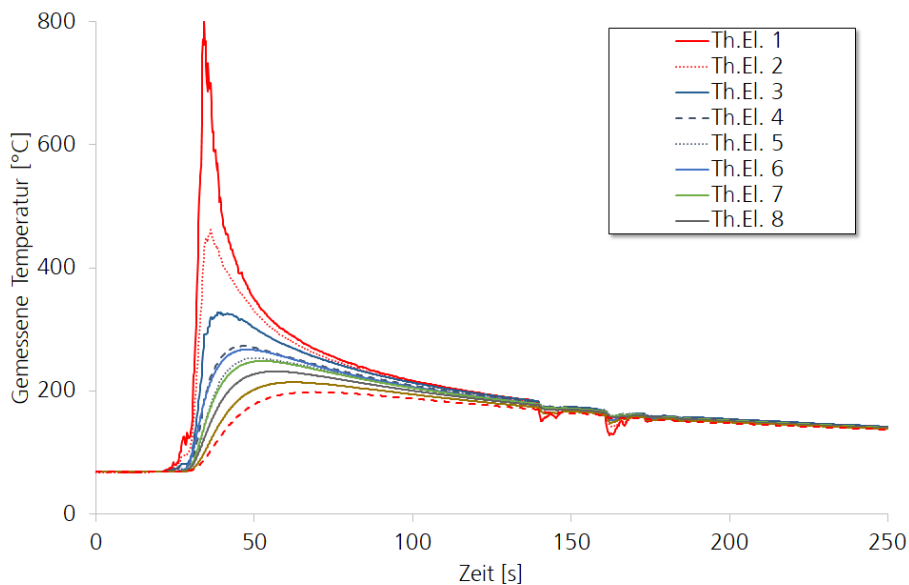


Abbildung 43: Gemessener Temperatur-Zeit-Verlauf für einen Durchgang der Wärmequelle

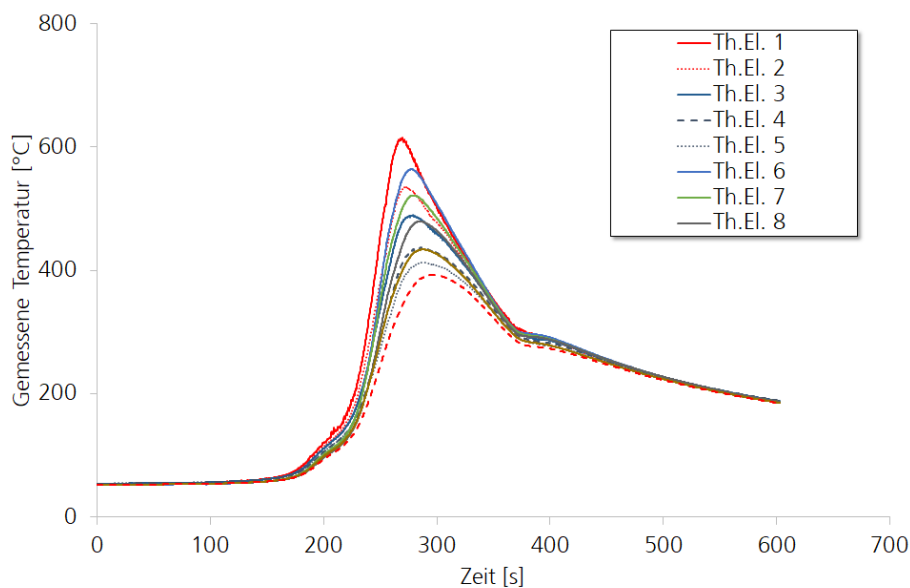


Abbildung 44: Temperatur-Zeit-Verläufe beim Schweißen der Wurzelnaht

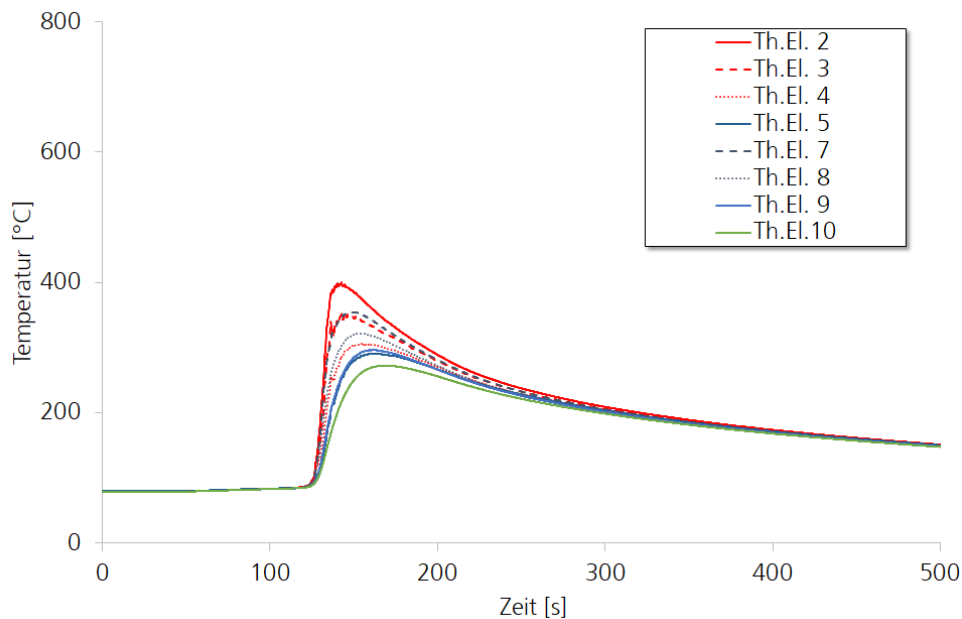


Abbildung 45: Temperatur-Zeit-Verläufe beim Schweißen der letzten Decklage

Ergebnisse Methode 9 (Schweißnahtuntersuchungen)

Die Querschliffe der Schweißnähte der Handschweißungen zeigen im Vergleich von zwei Entnahmepositionen (siehe Abbildung 46) einen Unterschied in der Ausprägung der einzelnen Schweißnahtzonen, sowie der Ausprägung der Fülllage. In der Bewertung der Ergebnisse muss deshalb berücksichtigt werden, dass Kerbfaktoren und geometrische Änderungen in einem gewissen Maße zu Abweichungen von den gemessenen Kennwerten führen können.

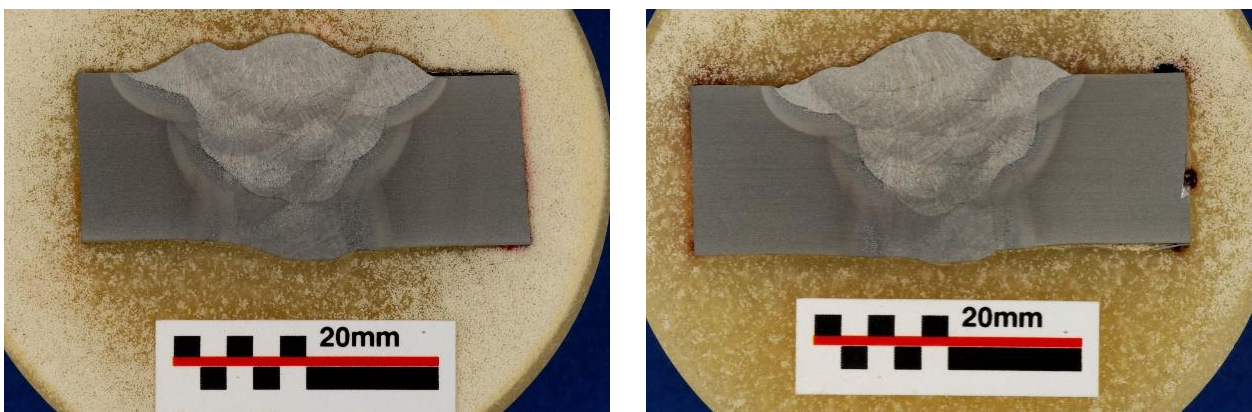


Abbildung 46: An zwei Positionen entnommene Querschliffe der Schweißnaht

In Abbildung 47 und Abbildung 48 sind metallografische Schlitte für den Grundwerkstoff dargestellt. Die Schlitte zeigen nicht metallische Einschlüsse mit einem Anteil von ca. 0,3 % in ferritischem Gefüge mit geringem Anteil von Perlit. Bei höheren Vergrößerungen zeigen sich auch vereinzelte Eisenkarbide in den Ferritkörnern.

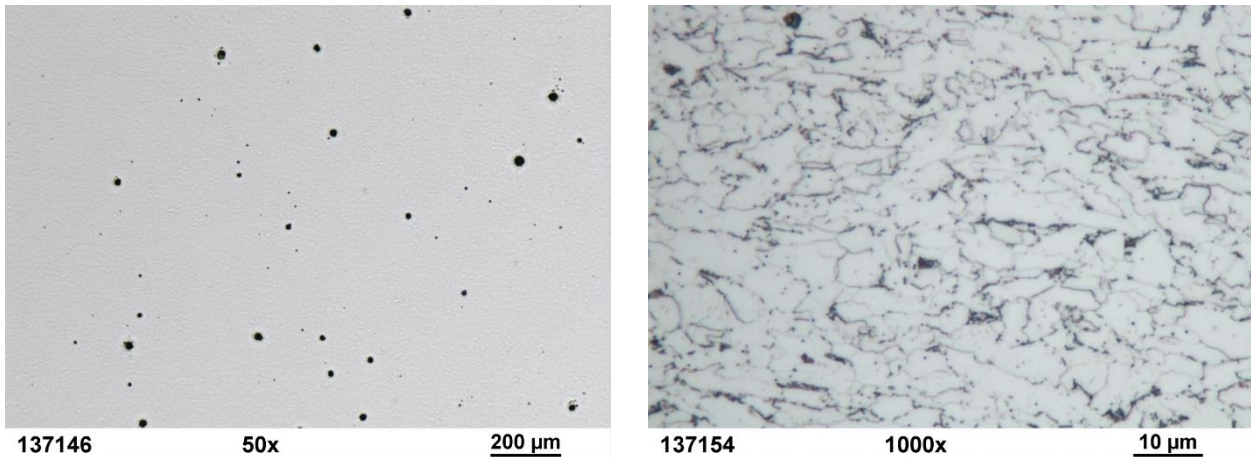


Abbildung 47: Metallische Einschlüsse (links) und vereinzelte Eisenkarbide (rechts) im Grundwerkstoff

Bei noch höheren Vergrößerungen zeigen sich Titankarbonitride. Die Körner sind durch den Walzprozess gestreckt.

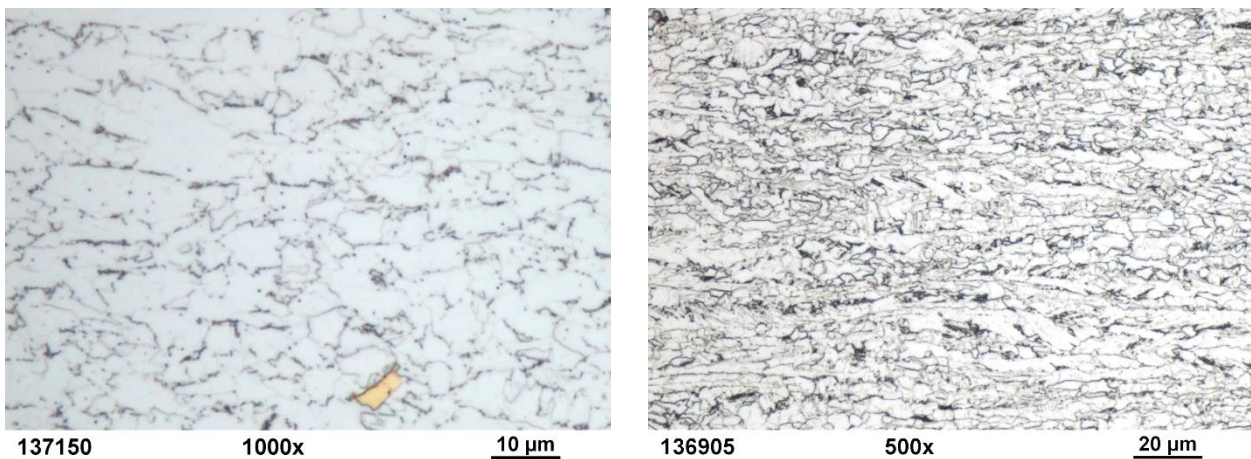


Abbildung 48: Einzelne Titankarbonitride (links) und gestreckte Körner durch den Walzprozess (rechts)

Aufgenommene Härteverteilungen an den beiden Schweißnahtpositionen, siehe Abbildung 49, zeigen keine ausgeprägte Aufhärtung des Materials in der Wurzel- und in der Fülllage im Vergleich zum Grundwerkstoff. In der Wurzellage ist die Härte über Schweißgut und Wärmeeinflusszone sogar leicht reduziert, wobei sich in der Fülllage das übliche Absinken der Härte in der Wärmeeinflusszone und eine geringfügige Aufhärtung im Schweißgut zeigt.

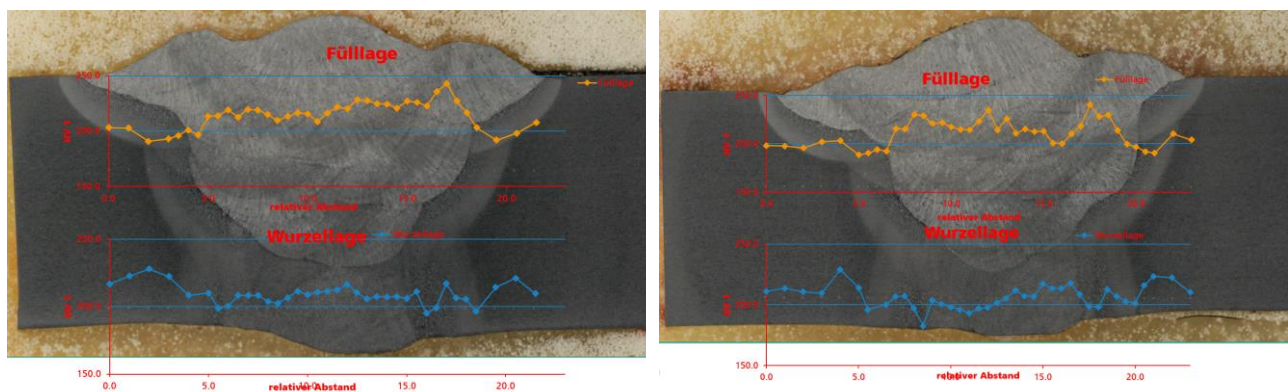


Abbildung 49: Härteverläufe an Wurzel- und Fülllage an den zwei entnommenen Positionen der Probeschweißung

Ergebnisse Methode 10 (Eigenspannungen)

Die Eigenspannungsmessungen der beiden eingesetzten Methoden (Bohrlochmethode für Tiefenverlauf, XRD für Oberflächenmessung) zeigen für den Grundwerkstoff einen geringen Unterschied zwischen Längs- und Querspannung, siehe Abbildung 50. Die Eigenspannungen steigen im Vergleich zur Oberfläche in den ersten Zehntel-Millimetern etwas an. Die Schweiß eigenspannungen in der Wärmeeinflusszone zeigen sich im Außenbereich des Rohrs als Druckspannungen, die schnell in Zugspannungen in der Höhe des Grundmaterials übergehen. Der Unterschied zwischen Längs- und Querspannungen ist hierbei stark, wobei sich in Axialrichtung die höheren Spannungen zeigen. Aufgrund der geometrischen Eigenschaften wurden die Randbedingungen für die Annahme eines ebenen Spannungszustands bei der Messung verletzt, wodurch sich etwas höhere oder geringere Spannungen in den Messergebnissen der WEZ ergeben können.

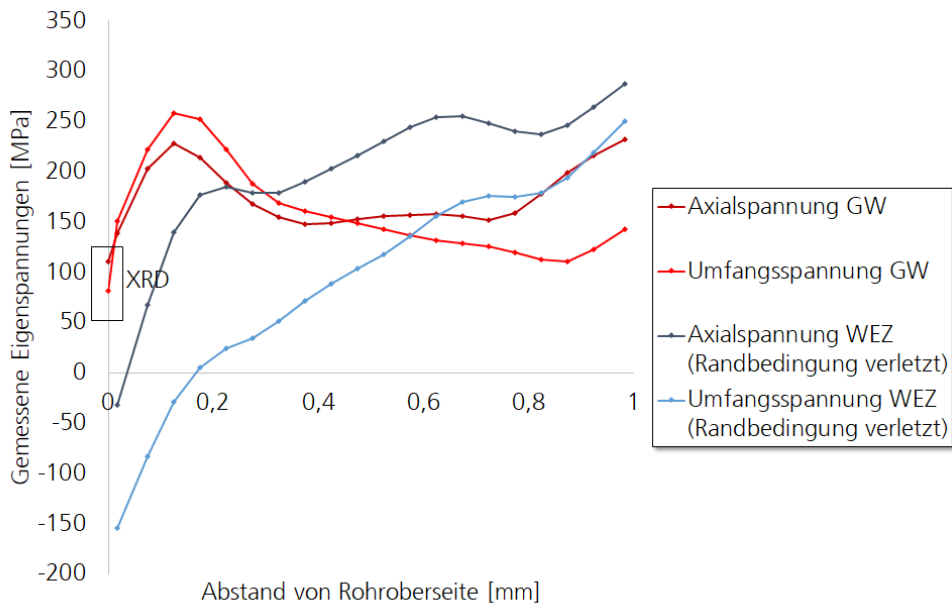


Abbildung 50: Gemessene Eigenspannungsverläufe im ersten Millimeter des Rohrs für Grundwerkstoff und Wärmeinflusszone mittels XRD-Verfahren an der Oberfläche und Bohrlochmethode in der Tiefe

Die Umrechnung in Hauptspannungen zeigt an der Oberfläche des Rohrs bis in 1 mm Tiefe Zugspannungen und einen kleinen Anteil an Schubspannungen, die vermutlich aus dem Walz- und Rohrein- formprozess resultieren, wie in Abbildung 51, gezeigt.

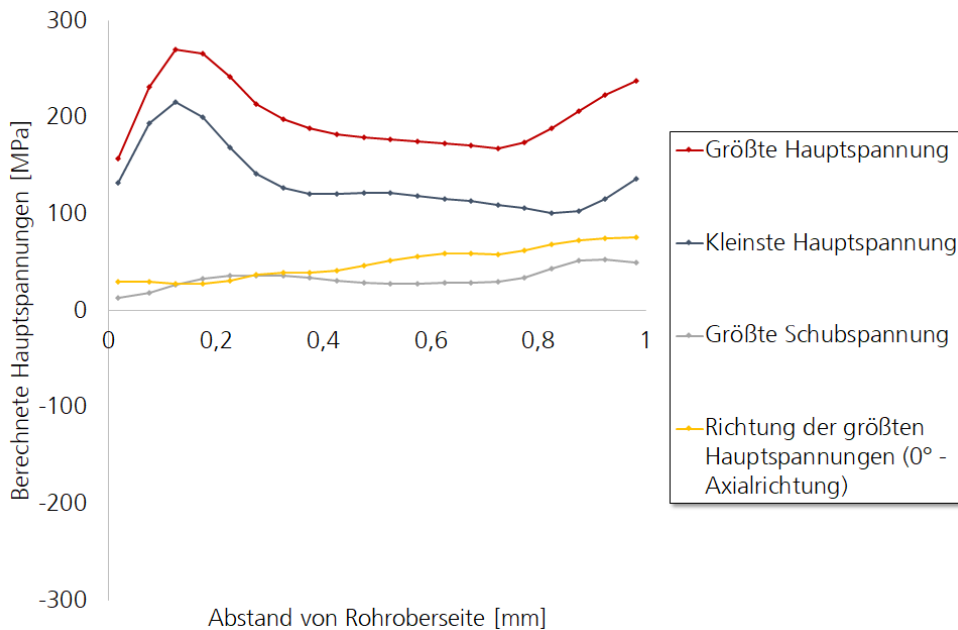


Abbildung 51: Hauptspannungen im ersten Millimeter der Rohraußenseite

Die Innenseite des Rohrs ist gleichbleibend druckspannungsbehaftet, was sich für die mechanische Belastbarkeit auch unter Wasserstoff positiv auswirken sollte, siehe Abbildung 52. Die Höhe der Schubspannungen ist ebenfalls vernachlässigbar.

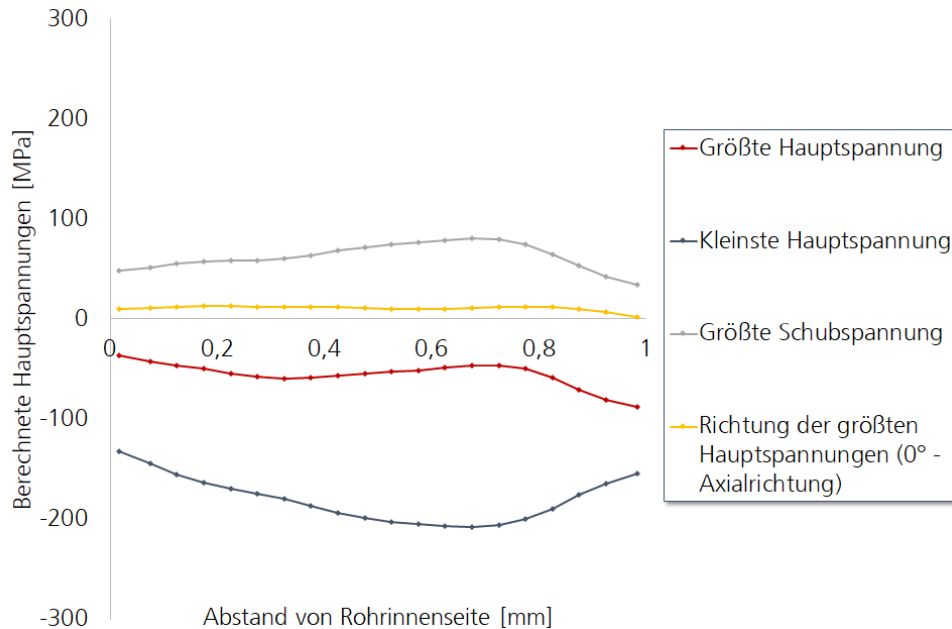


Abbildung 52: Hauptspannungen im ersten Millimeter der Rohrinneite

Röntgenografische Eigenspannungsmessungen im Abstand zur Fusionslinie zeigen starke Bearbeitungs-Eigenspannungen durch den mechanischen Abtrag der Zunderschicht nach den einzelnen Lagen, wie in Abbildung 53 für beide Seiten der Schweißnaht (linke und rechte Seite) und zwei Spannungsrichtungen gezeigt. Die Bearbeitungsspannungen sind hierbei für das mechanische Verhalten als positiv zu bewertende Druckspannungen ausgeprägt. In Axialspannung sind hierbei höhere Druckspannungen als in Umfangsrichtung zu erkennen.

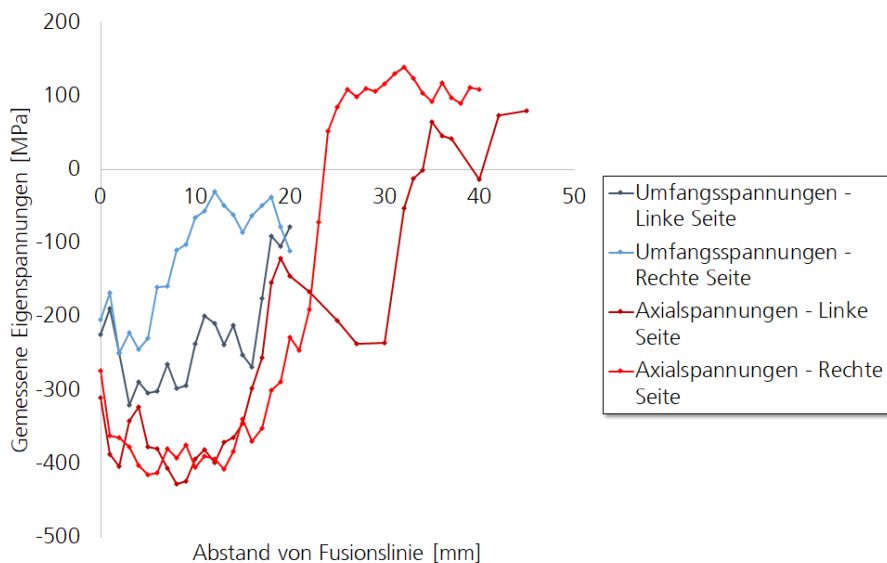


Abbildung 53: Gemessene Bearbeitungsspannungen durch mechanische Bearbeitung während des Schweißens

Ergebnisse Methode 11 (Kritische Spannungsintensität)

Die mittels Hohlprobe gemessene Änderung der Proben an Luft und unter dem Einfluss von 100 bar Wasserstoff 6.0 ist in Abbildung 54 dargestellt. Es ergibt sich ein geringfügiger Einfluss des Wasserstoffes auf die Streckgrenze und eine Verringerung der Bruchdehnung um ca. 8 %. Die Untersuchungsergebnisse und weitere Untersuchungen zum Einfluss von Gasreinheit, Abzugsrate etc. wurden in den Proceedings der PVP 2021 veröffentlicht.

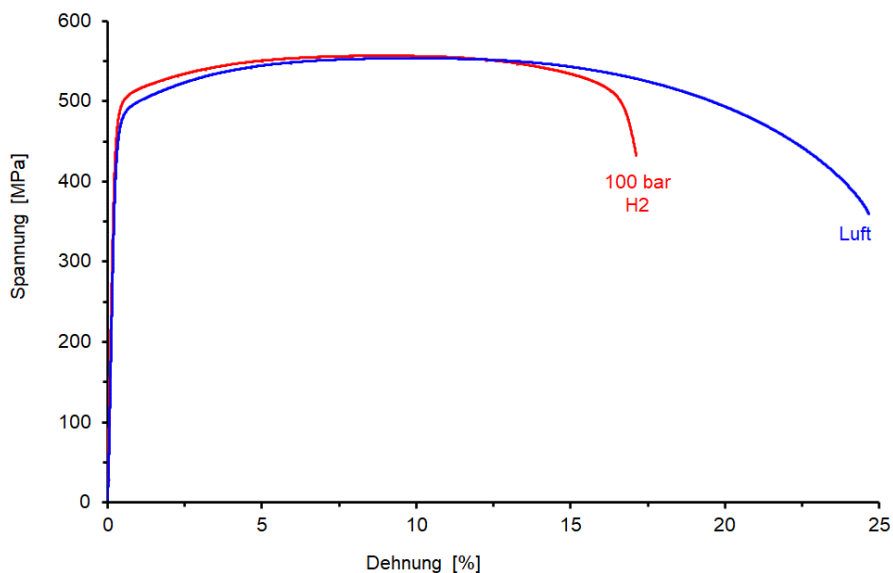


Abbildung 54: Mittels Hohlprobentechnik ermittelte Unterschiede im Spannungs-Dehnungsdiagramm am untersuchten Stahl (Luft/100 bar Wasserstoff) (eigene Veröffentlichung in (Michler, et al., 2021))

In Abbildung 55 sind die unterschiedlichen Bruchflächen der entsprechenden Hohlprobe im Raster-Elektronen-Mikroskop gezeigt. Bild a) zeigt die Bruchfläche der an Luft geprüften Proben, Bild b) die Bruchfläche der in Wasserstoffatmosphäre geprüften Proben. Für den Werkstoff an Luft ergibt sich ein duktiler Bruchbild, für den Werkstoffbereich, der direkt mit Wasserstoff in Kontakt gekommen ist ein spröderes Bruchbild.

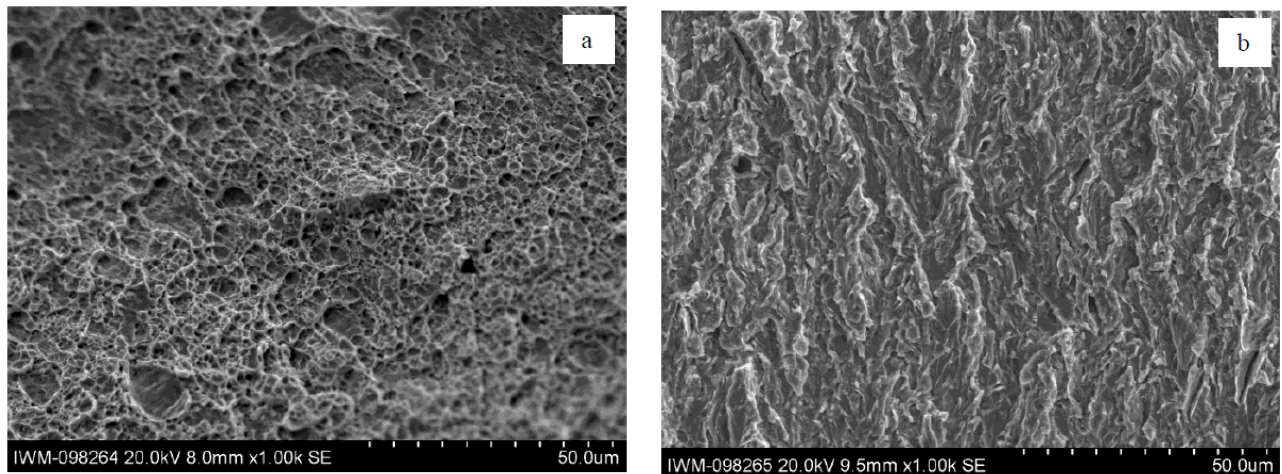


Abbildung 55: Bruchflächen des untersuchten Stahls: a) an Luft, b) bei 100 bar Wasserstoff; eigene Veröffentlichung in (Michler, et al., 2021)

Im Wasserstoffautoklav wurden an Luft, bei 100 bar und bei 200 bar Wasserstoff die kritischen Spannungsintensitäten für die Proben Grundwerkstoff Längsrichtung, Grundwerkstoff Querrichtung, Wärmeinflusszone und Schweißnahtmaterial gemessen. Abbildung 56 zeigt eine geprüfte Probe aus dem Grundwerkstoff in Querrichtung.



Abbildung 56: Bei 200 bar getestete Single Edge Notched Bending- (SENB-)Probe

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Leitfadens standen noch nicht alle Versuchsergebnisse zur Verfügung. Aufgrund der starken Verformbarkeit des Werkstoffs unter Wasserstoffatmosphäre müssen alle untersuchten Proben auf deren Gültigkeit bezüglich der angewandten Normen geprüft

werden. Die Versuchsergebnisse zum untersuchten Stahl X56 werden in einer separaten Veröffentlichung zur Verfügung gestellt. In der Literatur wurden von (San Marchi, et al., 2010) kritische Spannungsintensitäten unter Wasserstoffatmosphäre für den Rohr Stahl X60 veröffentlicht.

Ergebnisse Methode 12 (Numerische Berechnungen)

Die numerischen Simulationen wurden anhand experimenteller Untersuchungen an den realen Schweißnähten, wie oben beschrieben, angepasst. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen vereinfacht die unterschiedlichen Ergebnisse für die Wurzellage.

Abbildung 57 (links) zeigt die berechneten Temperaturen direkt beim Durchlauf der Wärmequelle an einer Stelle im stationären Bereich der Schweißnaht. Abbildung 57 (rechts) zeigt den Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Temperatur beim Durchlauf der Wärmequelle zwischen Thermoelement und dem entsprechenden Ort in der Simulation.

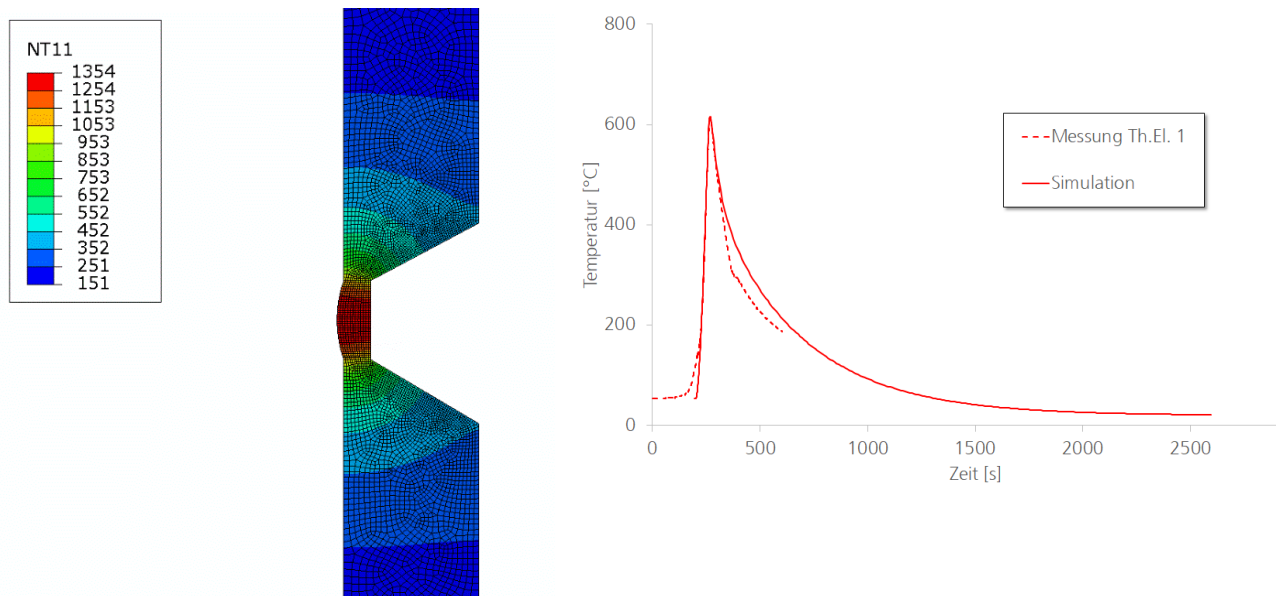


Abbildung 57: Berechnete Wärmeverteilung in einem Rohrabschnitt beim Schweißen der Wurzellage (links), Vergleich von Thermoelementmessung mit Simulation (rechts)

In Abbildung 58 (links) ist exemplarisch die Ausdehnung der berechneten Wärmeeinflusszone (Temperaturen über 720 °C) im Vergleich zu Ausprägung der realen Schweißnaht in Abbildung 58 (rechts) dargestellt.

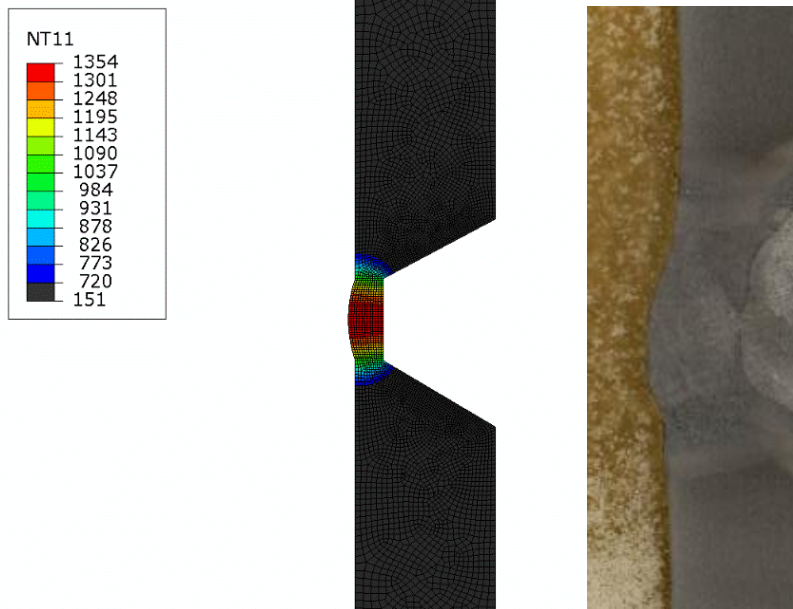


Abbildung 58: Ausdehnung der Wärmeeinflusszone beim Schweißen (links) im Vergleich mit dem Querschliff der realen Naht (rechts)

Aus den Berechnungsergebnissen ergeben sich keine Abkühlgeschwindigkeiten, die zu einer Erzeugung von Härtegefügen führen.

Die sich nach Abkühlung ergebenden Schweißzugspannungen und plastischen Dehnungen sind in Abbildung 59 exemplarisch für die Wurzellage dargestellt. Zugeigenspannungen (rote Bereiche) führen zu einer Erhöhung des Wasserstoffgehalts, plastische Verformungen zu einer Erzeugung von Versetzungen, die als Wasserstoff-Fallen niedriger Bindungsenergie dienen. Diese können den Wasserstoffgehalt deutlich erhöhen, aber auch den diffusiblen schädlichen Wasserstoff reduzieren.

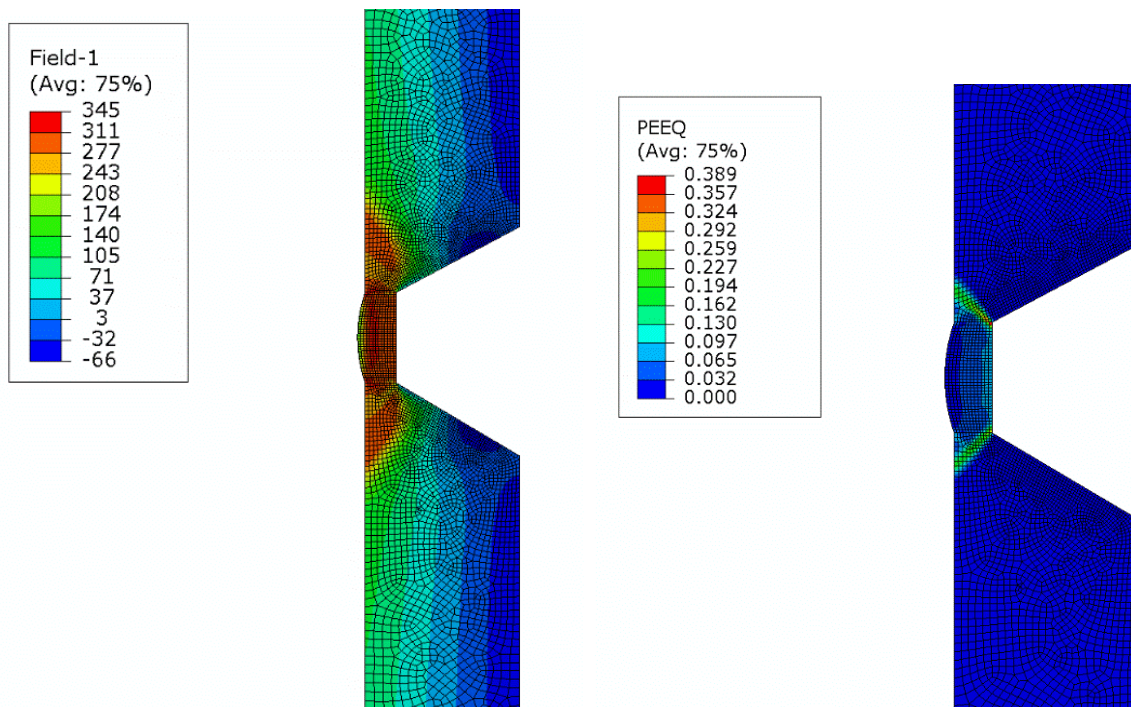


Abbildung 59: Hydrostatische Spannungen nach dem Schweißen (links) und berechnete plastische Vergleichsdehnungen nach dem Schweißen (rechts)

Die Modelle werden für die Berechnung der Wasserstoffverteilung während des Betriebs zusammengeführt. Die oben dargestellten Einflussfaktoren Temperatur, Spannung und Dehnung haben direkten Einfluss auf die Verteilung des Wasserstoffs während dieser von Innen (Kontakt des Förderrohrs mit Wasserstoff) beaufschlagt wird. In Abbildung 60 (links) ist die Wasserstoffverteilung (beispielhaft nur für die Wurzellage) zu Beginn des Kontakts dargestellt. Der Wasserstoff diffundiert an die Rohraußenwand. Rechnerisch ergeben sich bei Raumtemperatur erhöhte Wasserstoffgehalte in der Wurzellage, siehe Abbildung 60 (rechts) und in den angrenzenden Bereichen der Wärmeeinflusszone.

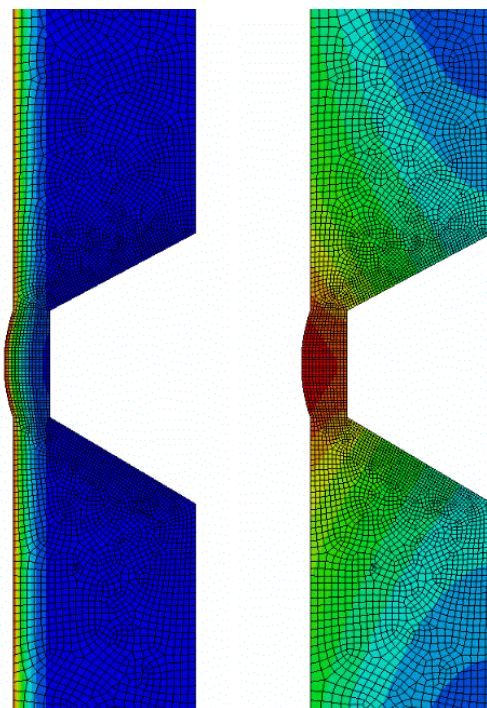


Abbildung 60: Wasserstoffverteilung zu Beginn einer Wasserstoffspeicherung (links) und spannungsbeeinflusste Wasserstoffverteilung 1 Stunde nach Beginn der Wasserstoffspeicherung (rechts)

Die rechnerischen Ergebnisse von zu erwartendem Gefüge, Eigen- und Lastspannungen, Dehnungen und Wasserstoffgehalt in den Schweißnähten sollen die lokalen Bedingungen in Bezug zu den Ergebnissen der experimentell ermittelten Spannungsintensitäten setzen. Diese liegen, wie oben beschrieben, zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Leitfadens noch nicht vollständig vor und werden separat veröffentlicht.

3.7 Bewertung von Materialien (insbesondere im Hinblick auf die in Kavernen vorhandenen Medien inklusive Salz und Feuchte)

Haupteinfluss für den sicheren Betrieb des untersuchten Werkstoffs für das Förderrohr scheinen nach den vorliegenden Ergebnissen Schwefelwasserstoffe (H_2S) zu sein. Für reinen Wasserstoff wird nur ein geringfügiger Effekt erwartet, wenn das Förderrohr unterhalb der Streckgrenze betrieben wird.

Der Einfluss von Schwefelwasserstoff (H_2S) wird sowohl bei Mischgasen mit Stickstoff (N_2/H_2S) als auch bei Mischgasen mit Wasserstoff (H_2/H_2S) beobachtet. Ursache ist somit nicht das Wasserstoffgas, sondern Schwefelwasserstoff zusammen mit im Gas vorhandener Feuchtigkeit. Für konservative Prüfbedingungen wurden hohe H_2S -Gehalte angenommen. Der in der Kaverne auftretende Gesamtgehalt an H_2S -Gehalt kann berechnet werden und entspricht sicher nicht den hier angewendeten Prüfparametern. Da aber die Gasvermischung in der Kaverne nicht homogen ist, können lokale Anreicherungen von Schwefelwasserstoff möglich sein. Vor Betrieb der Kaverne sollten die Gasvermischung und maximale lokale H_2S -Partialdrücke geklärt werden.

In den SSRT-Tests zeigt sich ein deutlich stärkerer Einfluss von Schwefelwasserstoff als im SSC-Vierpunktbiegetest und im HIC-Test.

Experimentell konnten im quasi-statischen Versuch an Voll- und Hohlproben des Grundwerkstoffes eine Verringerung der Bruchdehnung ermittelt werden. Dies ist in der Auslegung zu berücksichtigen.

Grundwerkstoff und Schweißnahtwerkstoff, insbesondere aus der Wurzellage der Rundnaht, zeigen unterschiedliche physikalische Eigenschaften in Wechselwirkung mit Wasserstoff. Die Schweißzusatzwerkstoffe wurden nicht mechanisch geprüft. Insbesondere die Wasserstofflöslichkeit ist deutlich höher als beim Grundwerkstoff.

Der Grundwerkstoff des Förderrohrs zeigt aus dem Herstellungsprozess positiv wirkende Eigenspannungen an der Innenseite, die mit Wasserstoff in Kontakt steht. An der Außenseite wurden ausgleichende Zugeigenspannungen gemessen. Die vergleichsweise robuste Nahtnachbearbeitung der Rundnaht führt zu positiv wirkenden Druckspannungen an der Oberfläche im Bereich der Schweißnaht.

Wurzel- und Fülllagen der Rundnaht zeigen keine signifikanten Änderungen in Härteverläufen über entsprechende Schweißnahtbereiche. Auch die numerische Berechnung zeigt keine Abkühlgeschwindigkeiten, die zur Bildung von spröden Schweißnahtgefügen führt.

Die Berechnungen zeigen überlagerte Spannungs-Dehnungs-Felder im Bereich der Wurzellage, die mit einer Erhöhung des Wasserstoffgehalts einhergehen.

Feuchtigkeit und die Gasreinheit hat Einfluss auf nahezu alle Versuchsergebnisse. Dies ist insbesondere für die Bewertung im realen Einsatz in der Kaverne zu berücksichtigen. Aus der Erfahrung stellt jede Kaverne einen Sonderfall mit besonderen Eigenschaften dar.

3.8 Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage der Ergebnisse sollten die Designs des Förderrohrs in Bezug zur Wanddicke überprüft werden. Aus dem Design und der Vorspannung des Rohrs dürfen keine plastischen Dehnungen erreicht werden. Für unklare Situationen hinsichtlich der Auslastung beanspruchter Querschnitte bzw. der Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung sollten 30 % der Streckgrenze bzw. 20 % der Mindeststreckgrenze des eingesetzten Werkstoffes nicht überschritten werden, wobei der kleinere Wert maßgeblich ist.

Zum sicheren Einsatz des untersuchten Rohrwerkstoffes müssen die Betriebsbedingungen hinsichtlich des Auftretens und der Verteilung von Schwefelwasserstoff (H_2S) geklärt werden. Je nach zu erwartenden Betriebsbedingungen (speziell Auftreten von Schwefelwasserstoff, Feuchtigkeit und pH-Wert der flüssigen Phasen) können für Sauergasanwendungen geeignete Stähle – sogenannte Sauer gasgüten – genutzt werden, die für den Einsatz in H_2S -haltigen Medien ausgelegt sind. Hier ist zu prüfen, wie diese sich bei Ermüdungsbelastung verhalten. Sauer gasgüten gemäß API 5 CT, die für Untertageanwendungen konzipiert sind, sind allerdings vornehmlich für den verschraubten Einsatz vorgesehen und nur aufwendig schweißbar. Demgegenüber sind sauer gasbeständige Leitungsrohre der API 5L, wie bspw. X56MS, meist gut schweißbar, für Untertageanwendungen aber nicht genormt. Für den Einzelfall besteht somit derzeit nur die Möglichkeit, die für Untertageanwendungen vorgesehenen, gut schweißbaren Stähle auf ihre Sauer gasbeständigkeit unter angenommenen Betriebsbedingungen (HIC und SSC-Tests unter sogenannten Fit-For-Purpose-Prüfbedingungen) zu prüfen.

Bei einer Eignung des Werkstoffs für Erdgaskavernen mit gleichem H_2S -Gehalt ist der Werkstoff vermutlich ebenso für Anwendungen der H_2 -Speicherung bei quasi-statischen Bedingungen geeignet. Dies muss mit zusätzlichen Versuchen abgesichert werden. Geeignete Versuche, um die Korrosionsbeständigkeit gegenüber H_2S -haltigen Medien zu prüfen, sind die in Kapitel 3.5 beschriebenen HIC- und SSC-Tests.

Für Kavernen, in denen der Einfluss des gespeicherten Druckwasserstoffs maßgeblich für eine mögliche Degradation des Werkstoffes ist, kann eine Lebensdauerbetrachtung, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, durchgeführt werden. Es ist allerdings zu beachten, dass die Lebensdauerbetrachtung nach ASME B31.12 nicht speziell für Kavernensteigrohre ausgelegt wurde. Wenn möglich, empfiehlt es sich, die eingesetzten Bauteile nach längerer Betriebszeit, spätestens aber gegen Ende der berechneten Lebensdauer, auf auftretende Risse und Kerben zu untersuchen und die Lebensdauer entsprechend anzupassen bzw. neu zu berechnen.

Reiner Wasserstoff diffundiert vergleichsweise langsam in Zugspannungsbereiche der Schweißnähte. Zusätzliche mechanische Untersuchungen der Schweißnahtbereiche nach längerer Liegezeit oder längerer Auslagerung in Wasserstoff und/oder Schwefelwasserstoff sind sinnvoll. Insbesondere die Prüfung der Wurzellage in Kontakt mit verschiedenen H_2 - und H_2S -Gehalten wäre für unterschiedliche Randbedingungen zweckmäßig.

Die eingesetzten Schweißverfahren, der Schweißplan, die eingesetzten Schweißzusatzwerkstoffe, Vorwärmtemperaturen und Nahtnachbearbeitung müssen bei der Realisierung von Rohrtouren mit geschweißten Verbindern an die verwendeten Werkstoffe angepasst sein. Insbesondere müssen durch die Wärmeleitung überhöhte Schweißspannungen und die Bildung von Härtegefügen ausgeschlossen werden. Eine Rücktrocknung bei Verwendung basischer Elektroden sollte auch bei der realen Schweißung berücksichtigt werden. Neben der Werkstoffqualifizierung sollte auch die Abnahme der geschweißten Rohre nach entsprechenden Vorgaben erfolgen.

3.9 Literaturverzeichnis

- API SPEC 5L 46th Edition, „Line Pipe“, 05/2018.
- API SPEC 5CT 10th Edition, „Casing and Tubing“, 01/2021.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section VIII, Division 3 2019, „Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels“.
- ASME Code for Pressure Piping B31, „Hydrogen Piping and Pipelines“, 12/2019.
- ASTM E1681, „Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials“, 2013.
- ASTM E399, „Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials“, 2012.
- ASTM E837, „Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method“, 2013.
- ASTM G39, „Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens“, 2016.
- ASTM G 129, „Prüfung von metallischen Werkstoffen mit geringer Formänderungsgeschwindigkeit zur Bewertung ihrer Anfälligkeit gegenüber umgebungsbeeinflusster Rißbildung“, 2021.
- DIN EN ISO 17636-1, „Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Durchstrahlungsprüfung – Teil 1: Röntgen- und Gammastrahlungstechniken mit Filmen“, 05/2013.
- EIGA Richtlinie IGC Doc 121/14, „HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS“, European Industrial Gases Association.
- Matsumoto T., et al., (2017). Threshold stress intensity factor for hydrogen-assisted cracking of CR-MO steel using a stationary storage buffer of a hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, S. 7422-7428.
- Michler T. et al., (2021). Comparison of tensile test results in high pressure gaseous hydrogen using conventional and tubular specimens” (PVP2021-61138). *Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels & Piping Conference*, Virtual, Online, July 12-16, 2021.
- NACE TM0284-2016, „Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking“, 2016.
- NACE TM0316-2016, „Four-Point Bend Testing of Materials for Oil and Gas Applications“, 2016.
- NACE TM0198-2020, „Slow Strain Rate Test Method for Screening Corrosion-Resistant Alloys for Stress Corrosion Cracking in Sour Oilfield Service“, 2016.
- San Marchi C. et al. (2010). Fracture and fatigue of commercial grade pipeline steels in gaseous hydrogen (PVP2010-25825). *Proceedings of PVP-2010: ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Bellevue WA, July 18-22, 2010.

4 Geomechanik

Tobias Fabig⁵, Dr. rer.nat. Matthias Brandt⁵, Dr.-Ing. Markus Knauth⁵, Florian Zill⁶, Uwe-Jens Görke⁶, Martin Kirch⁷, Moh'd Amro⁷

4.1 Einleitung

Die Ziele der geomechanischen Betrachtungen sind die sicherheitstechnisch begründete Festlegung der Betriebsbedingungen (z. B. maximaler Speicherdruck, Betriebsregime) auf der Basis des Nachweises der mechanischen Langzeit-Stabilität und der Barrierewirksamkeit der Salzkaverne bei zyklischer H₂-Speicherung. Für den Langzeitstandsicherheitsnachweis ist es notwendig, Vorhersagen zur H₂-Infiltration (Perkolation) in die Kavernenwände treffen zu können. Denn eine Schwächung der Auflockerungszone in der Kavernenwand durch Eindringen des Speichermediums kann zu Konturabbrüchen und einer Verringerung der geomechanischen Integrität einer Speicherkaverne führen. Zu diesem Zweck ist eine Messung der Permeabilität vom Wirtsgestein unerlässlich.

Da es die Längen- und Zeitskalen (Großkavernen, Zeiträume im Bereich von Monaten bis Jahren) und die dabei ablaufenden komplexen physikalischen Prozesse nicht erlauben, diese in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen in realistischen Großversuchen zu analysieren, sind Modellierung und numerische Simulation die einzig zweckmäßigen Alternativen zur Vorhersage der geomechanischen Vorgänge. Prognostizierende Simulationen werden mittlerweile auch regelmäßig von überwachenden Behörden (z. B. Bergämter) als Teil von Auslegungs- und Planungsprozessen für geotechnische Nutzungen gefordert. Die Modelle sind dabei zwingend mit den Ergebnissen von Labor- und kleinskaligen Feldversuchen zu kalibrieren und zu validieren. Die Potenziale und Limitierungen unterschiedlicher numerischer Ansätze (FEM, Finite Element Method; DEM, Distinct Element Method; etc.) sind dabei ebenso zu beachten, wie der grundsätzlich approximative Charakter von physikalischen Modellen.

4.2 Geomechanische Grundlagen als Bedingung für die Wasserstoffspeicherung

Kavernenspeicher werden weltweit im Steinsalz angelegt. Die geologische Barriere-Integrität des Steinsalzes gegenüber Fluiden und Gasen ist dabei von elementarer Bedeutung. Unter ungestörten Bedingungen im Gebirge sind Salzgesteine flüssigkeits- und gasdicht. Da übliche Definitionen zur technischen Dichtheit bei Steinsalz nicht angewendet werden können, wurde von (Bérest, 2007) auf der Basis praktischer Erfahrungen aus der Gasspeicherung in Salzformationen eine Permeabilität $k \leq 10^{-22} \text{ m}^2$ als dicht definiert.

Aufgrund der viskoplastischen Eigenschaften von Salzgesteinen ist der ungestörte Zustand in situ durch einen nahezu isotropen Einspannungszustand gekennzeichnet. Dies bedeutet gemäß der MOHR'schen Beziehungen, dass die Scherspannungen an den Korngrenzen der polykristallinen Salzgesteine nahe Null sind und die Normalspannungen der minimalen Hauptspannung entsprechen.

⁵ Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstraße 60, D-04279 Leipzig

⁶ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Department Umweltinformatik, Permoserstraße 15, D-04318 Leipzig

⁷ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau, Agricolastraße 22, D-09599 Freiberg

Unter diesen Zustandsbedingungen existiert kein vernetzter Porenraum in Salzgesteinen. Das Porenvolumen von Steinsalz besteht hauptsächlich aus interkristallinen Einzelhohlräumen und intrakristallinen Einschlüssen, die mit Gas bzw. Lösung gefüllt sind.

Mit der Anlage einer Gasspeicherkaverne ändern sich während der Betriebs- und Nachbetriebsphase die geomechanischen Zustandsbedingungen, wobei für eine Langzeitbetrachtung schematisch vier Phasen unterschieden werden können:

- 1) **Solung**: Hohlraumerstellung durch Auslaugung;
- 2) **Gasspeicherbetrieb**: Gasbefüllung in die und Auslagerung aus der Kaverne. Je nach Intensität in der Speicherfahrweise und auftretenden Einspannungsbedingungen können **dilatanzinduzierte Prozesse** auftreten, die zu einer mechanisch bedingten Abnahme der Dichtheit im konturnahen Bereich der Kaverne führen. Des Weiteren können **fluiddruckinduzierte Prozesse** hydraulische Fließwege schaffen, sodass es zu einer begrenzten Infiltration/Perkolation des Speichermediums in das Anstehende kommt.
- 3) **Flutung („Überwachungsbetrieb“) Medienwechsel**: Injektion (Einstapelung) von Wasser oder Sole in die Kaverne. Überführen hin zu einem konstanten Druckniveau. Keine mechanisch oder hydraulisch bedingten Prozesse, die die Integrität herabsetzen. Je nach Flutmedium zusätzliche Lösungsprozesse.
- 4) **Verwahrung**: Dichter Verschluss der Bohrung, was langfristig zu einem konvergenzinduzierten Druckaufbau in der Kaverne führt. Bei Überschreitung des Kaverneninnendruckes über die wirkende minimale Hauptspannung kann es zur **fluiddruckgetriebenen Perkolation** kommen.

Die Integrität der die Kaverne umgebende Salzbarriere ist in den Phasen vom Gasspeicherbetrieb bis zur Stilllegung und Verwahrung zu überprüfen. Ein Verlust der Dichtheit der Salzgesteine kann, durch Schaffung von Konnektivität über miteinander verbundenen Rissöffnungen, in den interkristallinen Strukturen der Salzgesteinsbarriere hervorgerufen werden. Dieser Prozess kann durch zwei mechanisch unabhängige Prozesse bewirkt werden:

- deviatorische Beanspruchung mit induziertem Risswachstum und Vernetzung interkristalliner Risse,
- fluiddruckinduzierte Öffnung von Korngrenzen und Vernetzung interkristalliner Fließwege.

Bei Salzkavernen handelt es sich de facto um einen offenen Hohlraum in einer praktisch undurchlässigen Gesteinsmatrix des umgebenden Salzgesteins. Die oben beschriebenen Prozesse, welche zu einem Verlust der Dichtheit des Salzgesteins führen können, sind bei der Dimensionierung der Kavernen zu berücksichtigen, sodass sie während der Betriebsphasen der H₂-Speicherung und der späteren Verwahrung auf ein Minimum begrenzt bleiben und somit die Integrität der Kaverne gewahrt bleibt.

4.3 Dimensionierungsvorgaben für die Errichtung einer Wasserstoffkaverne

Wesentlich für die Anlage und den langfristigen sicheren Betrieb von Kavernenspeichern ist die Beachtung der folgenden gebirgsmechanischen Sicherheitsaspekte (Minkley, Lindert, & Schreiner, 2005):

1. Gewährleistung der Standsicherheit der Kavernen im langfristigen Speicher- bzw. Produktionsbetrieb. Dazu gehören:
 - die Tragfähigkeit der die Kavernen überspannenden Steinsalzscheibe unter Beachtung der wirkenden Deckgebirgslast;
 - die Stabilität der Pfeiler zwischen benachbart gelegenen Kavernen unter Beachtung der herrschenden Gebirgsdruckbelastung;
 - die Standfestigkeit der Kavernenkontur unter der Wirkung der speicherdruckbedingten Beanspruchungen, insbesondere die Vermeidung fortschreitender Bruchprozesse bis hin zum Kollaps.
2. Gewährleistung der Dichtheit der Kavernen. Dazu gehören:
 - die geologische Dichtheit der die Kaverne in ausreichender Mächtigkeit umschließenden Steinsalzzone in Abhängigkeit von der Druckbelastbarkeit des Salzgesteins und der wirkenden Gebirgsdruckeinspannung;
 - die technische Dichtheit des Verbundes Rohrtour/Zement/Steinsalz in der Kavernenbohrung unter Wirkung der Gebirgsspannung im Kavernendach sowie der konvergenzbedingten vertikalen Dehnungsbeanspruchungen.

Des Weiteren sollten unzulässige Beanspruchungen der Tagesoberfläche durch Senkungen vermieden werden. Die Bewertung von Grenzsituationen bezüglich der Standsicherheit der Kaverne erfolgt mit Hilfe von Bewertungskriterien, die auf der Basis langjähriger Erfahrungen bei der Beurteilung hydrogeologischer Gefährdungen bzw. der Funktionssicherheit hydrologischer Schutzschichten beim Salzbergbau Mittel- und Norddeutschlands sowie bei der Kavernendimensionierung für Untergroundgasspeicher (UGS) entwickelt wurden (Minkley, Lindert, & Brückner, 2011).

Für die Gewährleistung der Standsicherheit einer Kaverne im langfristigen Speicher- bzw. Produktionsbetrieb ist die Stabilität der umgebenden Tragelemente (Pfeiler, Hohlraumkontur, Hangendscheibe) von entscheidender Bedeutung. Die Standsicherheit einer Kaverne ist gewährleistet, wenn die sich über die gesamte Betriebs- bzw. Produktionsphase im Anstehenden um die Kaverne akkumulierenden Schädigungen begrenzt bleiben und nicht zu Entfestigungserscheinungen führen, die die Standsicherheit des Systems Kaverne/Pfeiler beeinträchtigen.

Entsprechend gängiger Verfahrensweisen bei der Zulassung und Genehmigung von neu anzulegenden Kavernen zur Speicherung von Gas ist es im Zuge der Beantragung einer Aussolerlaubnis erforderlich, das Kavernendesign hinsichtlich der oben aufgeführten Sicherheitsaspekte vorab zu definieren, um so einen gebirgsmechanisch zulässigen Rahmen für die Errichtung der Kaverne bereitzustellen. In den meisten Fällen werden Rahmendaten bereits durch den zukünftigen Betreiber vorgegeben. Auf der Basis vorliegender langjähriger Erfahrungen zum saisonalen Speicherbetrieb von Kavernen unter Berücksichtigung der Teufenlage, der Kavernenform und der geologischen Struktur bzw. des

Gebirgsspannungszustandes in der Lagerstätte ist im Ergebnis gebirgsmechanischer Berechnungen und Abschätzungen auf empirischer Grundlage die Vorfeldplanung mit Kavernenlayout und Kavernenform zu untersetzen und die Spannbreite möglicher Betriebsparameter abzuleiten. Im Laufe der Bearbeitung eines Projektes ist gegebenenfalls eine Anpassung und Optimierung des Kavernendesigns vorzunehmen.

Als Beleg für die Möglichkeit der Errichtung einer H₂-Kaverne unter Gewährleistung

- der Standsicherheit des auszusolenden und als Speicher zu nutzenden Hohlraumsystems,
- dessen Dichtheit bei den erforderlichen hohen Gasspeicherdrücken,
- der Begrenztheit von zu erwartenden, langfristig eintretenden Absenkungen der Tagesoberfläche mit den entsprechenden Beanspruchungen durch induzierte Schieflagen, Zerrungen und Pressungen infolge der Aussolung und des Speicherbetriebes,
- der nachhaltigen Verwahrung der Kavernen nach Stilllegung des Speichers,

ist eine gebirgsmechanische Konzeptstudie zu erstellen, welche mindestens folgenden Inhalt aufweist:

- Abschätzung gebirgsmechanisch zulässiger Formen und Größen für die Speicherkavernen in der Lagerstätte und der vorgesehenen Teufenlage,
- gebirgsmechanisch erforderliche Mindestabstände zwischen benachbart gelegenen Speicherkavernen im Kavernenfeld und Rasterabstände der Kavernenbohrungen,
- gebirgsmechanisch zulässige maximale Speicherbetriebsdrücke,
- gebirgsmechanisch zulässige Speicherregimes im Jahreszyklus mit minimalem Speicherbetriebsdruck und zulässigen Standzeiten im Bereich minimaler Speicherdrücke; im Jahreszyklus einzuhaltenden mittleren Speicherdrücken; maximal zulässigen Ein- und Ausspeicherraten bzw. zulässigen Raten der Druckerhöhung bzw. Druckabsenkung,
- Prognose induzierter Absenkungen der Tagesoberfläche im Kavernenfeld in ihrem zeitlichen Verlauf und Abschätzung möglicher bergschadenkundlicher Beanspruchungen (Schieflagen, Zerrungen oder Pressungen).

Außerdem gilt es, bereits Empfehlungen zur gebirgsmechanischen und geotechnischen Begleitung bei der Anlage und dem Betrieb der Kaverne zu geben:

- Art und Umfang gesteinsmechanischer Untersuchungen an Bohrkernen, die beim Niederbringen der Bohrungen zu gewinnen sind,
- geotechnische Messungen in den Bohrungen,
- gebirgsmechanische Modellierung der Anlage und des Betriebes einer Typkaverne und Standsicherheitsnachweis für das Kavernenprojekt,
- geotechnische und gebirgsmechanische Begleitung der Hohlraumentwicklung bei der Aussolung,

- geotechnische Begleitung beim langfristigen Betrieb (Ultraschallvermessung, Senkungsnivellement) Einschätzung der Verwahrbarkeit durch Flutung der Kaverne sowie nachfolgende Abdichtung und Verfüllung der Bohrung.

Für die endgültige Festlegung von zulässigen Speicherbetriebsparametern sind entsprechende gesteinsmechanische Untersuchungen an zu gewinnendem Kernmaterial aus den Kavernenbohrungen durchzuführen. Die gebirgsmechanischen Untersuchungen im Labor dienen der Bestimmung der elastischen, viskosen und plastischen Eigenschaften mit Dilatanzfestigkeit, Bruchfestigkeit und Restfestigkeit sowie der Untersuchung der Gasdichtheit des anstehenden Steinsalzes unter Beachtung wirkender Gebirgs- und Speicherdrücke.

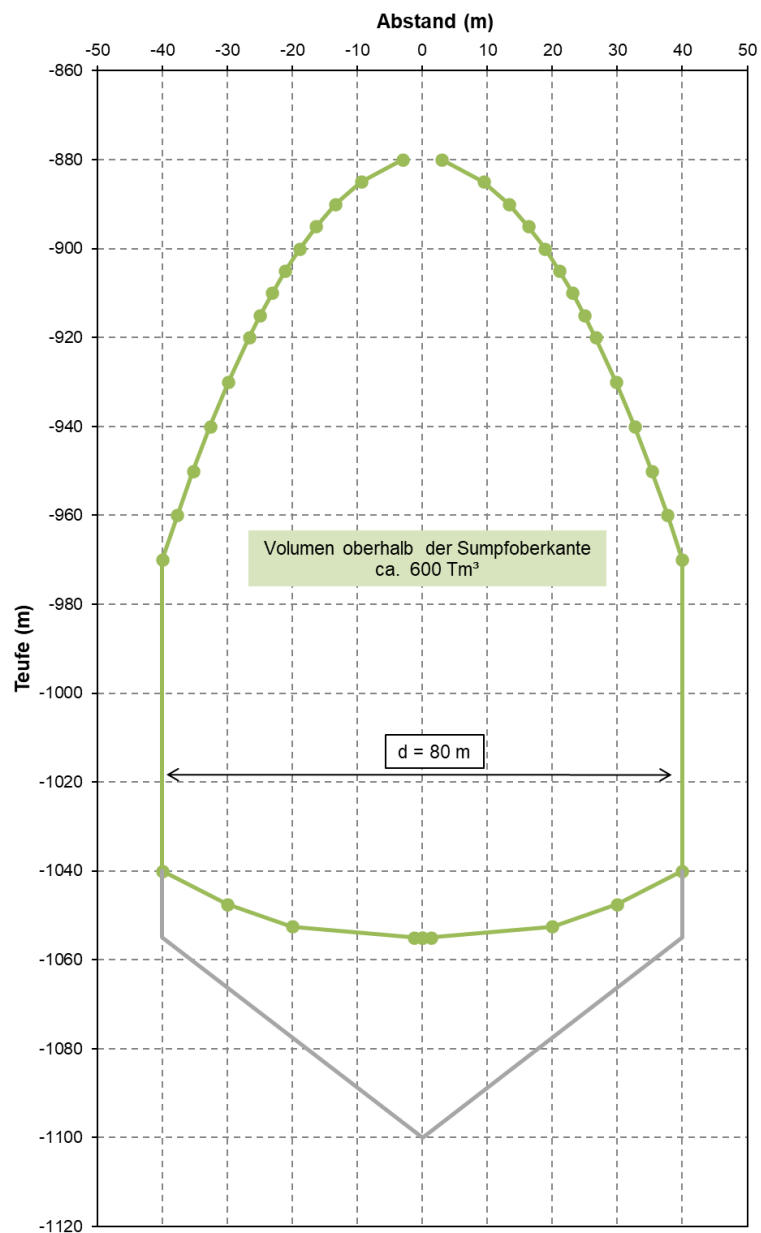


Abbildung 61: Typkaverne zur Wasserstoffspeicherung in einer Teufe zwischen 880 und 1.100 m. Die Typkaverne dient als Grundlage für die Errichtung und das Betreiben einer Wasserstoffkaverne.

Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurde anhand der oben aufgeführten Kriterien beispielhaft eine Typkaverne erstellt, welche als Grundlage für den vorliegenden Leitfaden und somit für zu untersuchende Betriebsszenarien, aber auch für die Erstellung technischer Konzepte bezüglich der Bohrlochkomplettierung diene. Die Typkaverne besitzt ein Nutzvolumen von 600 Tm³ und befindet sich in einer Teufe zwischen 880 und 1.100 m. Die Firstteufe liegt in 880 m und ist mit 85–90 m hoch gewölbt. Um einen ausreichenden Abstand zum Rohrschuh zu gewährleisten, wurde eine Kavernenhalslänge von ca. 30 m belassen. Somit wird im Bereich des Rohrschuhs eine ausreichend große Gebirgsdruckeinspannung der Bohrlochinstallation im späteren Gasspeicherbetrieb garantiert. Unterhalb des Kavernenhimmels, im zylindrischen Teil der Kaverne, wurden Querschnitte von $d = 80$ m generiert. Der Modellpfeiler um die Typkaverne entspricht in seiner Ausdehnung einem für diese Teufe typischen Bohrlochabstand und wurde mit 280 m festgelegt. Die Typkaverne ist in Abbildung 61 dargestellt.

Neben der Neuanlage einer Gasspeicherkaverne (Typ II in Kapitel 2.2) zur Nutzung als H₂-Speicher besteht natürlich auch die Möglichkeit, eine bestehende Erdgas- oder Soleproduktionskaverne in eine H₂-Kaverne (Typ I.A und I.B in Kapitel 2.2) umzuwidmen. Dabei sind für die Umwidmung dieselben Dimensionierungsregeln wie für eine Neuanlage zu verwenden und gebirgsmechanisch zu prüfen. Die Umwidmung einer Soleproduktionskaverne kann aber auch verwehrt werden, wenn z. B. die nötige Pfeilermächtigkeit zu einer bestehenden Nachbarkaverne nach der Umrüstung zur H₂-Kaverne nicht mehr gegeben wäre. Für Erdgaskavernen (Methan) kann demgegenüber festgestellt werden, dass im Grunde jede für die Speicherung von Erdgas konzipierte Kaverne auch für die Speicherung von Wasserstoff geeignet ist.

4.4 Geomechanische Voruntersuchungen

Für die Betriebssicherheit zur Hochdruckspeicherung von Wasserstoff in Kavernen im Salzgebirge ist es erforderlich, einen Nachweis der Dichtheit und Integrität der Salzgesteine unter realen Bedingungen im Labor und in situ zu erbringen. Ebenso sind Untersuchungen erforderlich, welche Aussagen über das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Salinars liefern. Die Ergebnisse dienen als Eingangsparameter für numerische Berechnungsmodelle, mit dessen Hilfe letztendlich die Dichtheit und Stabilität der Kavernen nachgewiesen werden. Im Zuge des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden experimentelle Arbeiten im Labor und in situ als Grundlagenforschung durchgeführt.

Die Laboruntersuchungen dienen der Evaluierung der Bohrungsintegrität (Kapitel 7.3.1) von Salzkaavernen gegenüber Wasserstoff. Dafür wurden Permeabilitätsmessungen an Salz- und Zementstein sowie an Verbundproben aus Casing und Zement getätigt.

Die durchgeführten In-situ-Versuche dienen ebenso zum Nachweis der Dichtheit von Salzgesteinen gegenüber Wasserstoff. Außerdem lieferten die Untersuchungen Aussagen über die Perkolationschwelle, ab der eine druckgetriebene H₂-Perkolation in das Salzgebirge einsetzt. Die Höhe der Perkolationschwelle ist von Bedeutung für die Festlegung des maximalen Speicherbetriebsdruckes der Kaverne.

4.4.1 Laboruntersuchungen

Vor der Speicherung von Wasserstoff im Untergrund muss die Dichtheit, der mit Wasserstoff in Kontakt stehenden Gesteine, im Labor nachgewiesen werden. Die Forderung nach einer absoluten Dichtheit ist dabei allein aufgrund nicht verhinderbarer Massenverluste durch Diffusionsvorgänge nicht zweckmäßig. Aus diesem Grund erfolgt die Definition der technischen Dichtheit. Als technisch dicht gelten Materialien, wenn der durch Permeation bedingte Massenstrom in der Größenordnung des Diffusionsstroms liegt. Allgemein gelten Gesteine ab einer Permeabilität von $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ als technisch dicht. Für die Langzeitspeicherung von Gasen sollten jedoch Permeabilitäten im Bereich von $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ angesetzt werden (Amro, Häfner, & Freese, 2012).

Der Nachweis der technischen Dichtheit erfordert demnach eine Messmethode deren untere Messgrenze entsprechend niedrig ist. Auch wenn jüngste Modifikationen an stationären Versuchsanlagen deren untere Messgrenze verbessern, sind für solche niedrigen Permeabilitäten instationäre Versuchsanlagen zu bevorzugen. Diese besitzen, aufgrund des Wegfalls der bei stationären Anlagen limitierenden Volumenstrommessung, in der Regel eine niedrigere Messgrenze.

Die im Rahmen der Laboruntersuchungen genutzte instationäre Messmethode ist eine Modifikation der von (Brace, et al., 1968) entwickelten Druckpuls-Methode. Das sogenannte Zwei-Kammer-Verfahren wurde in den 1990er Jahren durch (Häfner, et al., 1996) entwickelt und ermöglicht die Messung von Permeabilitäten bis zu einer unteren Messgrenze von ca. $1 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$. Abbildung 62 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage und einen charakteristischen Messverlauf.

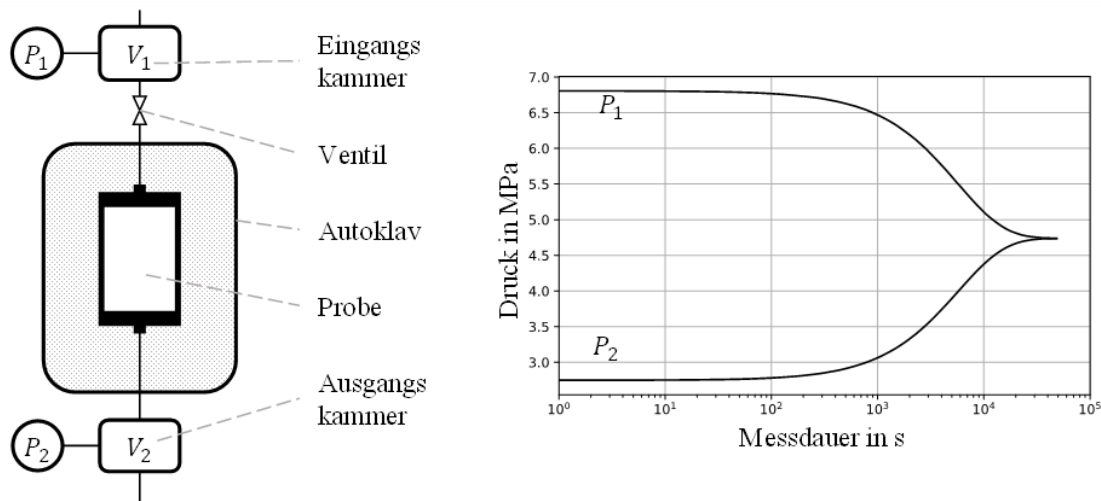


Abbildung 62: Schematische Darstellung der Zwei-Kammer-Anlage (links); typischer Messverlauf (rechts)

Die Zwei-Kammer-Anlage besteht im Wesentlichen aus den zwei namensgebenden Druckkammern und einem Autoklav, in dem sich die zylinderförmige Probe befindet. Damit die Druckkammer und die Probe einen geschlossenen Strömungsraum bilden, wird diese mit Kopfstücken und einer Gummimanschette ummantelt und so vom Hydrauliköl gefüllten Innenraum des Autoklavs getrennt. Zur Nachbildung des in situ wirkenden Gebirgsdruck kann die Probe mit einem Manteldruck bis 25 MPa

beaufschlagt werden. Vor dem Messbeginn wird die Eingangskammer mit dem gewünschten Messgas gefüllt, wobei $P_1 > P_2$ gilt. Durch Öffnung eines Ventils wird der Strömungsweg freigegeben und es findet ein Druckausgleich zwischen Eingangs- und Ausgangskammer über die Probe statt. Aus dem aufgezeichneten Druckverlauf kann mit Hilfe einer numerischen Auswertungsmethode die Permeabilität berechnet werden.

Probenmaterial

Die Versuche dienen der Bestimmung der Permeabilität von Salzstein, Zementstein und Anhydrit. Anhydrit-Vorkommen treten aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte häufig in Kombination mit Steinsalzvorkommen auf. Die Salzstein- und Anhydrit-Proben wurden aus Bohrkernen der Forschungskaverne B gewonnen. Dazu wurden die Kerne in Stücke zwischen 10 bis 20 cm geschnitten. Zur Herstellung der Zementsteinproben dient ein magnesium-resistenter Hochofenzement, der mit Fokus auf Gasdichtheit entwickelt wurde (Maikranz, 2016). Die Zementschlämme wird entsprechend der Herstellerrezeptur und mit einem von der Norm abweichenden Verfahren angemischt. Die Norm API RP 10B-2 sieht die Nutzung spezieller Standmixer mit maximalen Volumen von drei Litern vor. Da für die Verbundproben (siehe. Kapitel 7.3.3) Volumen von mindestens acht Litern benötigt werden, kommt ein zur Mischung der Schlämme ein Laborrührer (von oben angetriebener vier-flügliger Propellerrührer) zum Einsatz.

Nach der Lösung des Natriumchlorid im Anmachwasser wird der Zement schrittweise und schnellstmöglich zugegeben. Anschließend wird der Rührvorgang für 10 min bei 1.000 Umdrehungen pro Minute fortgesetzt. Die sich ausgebildete homogene Zementschlämme kann folgend in 1 m lange Kunststoffrohre mit einem Innendurchmesser von 10 cm gefüllt werden. Um die Austrocknung des Zements zu verhindern, wird dessen Oberfläche mit Anmachwasser (22 %ige NaCl-Lösung) bedeckt. Nach einer Abbindezeit von mindestens 28 Tagen können die Zementstein-Proben auf die gewünschte Länge geschnitten und bis zur Messung erneut eingelagert werden.

Versuchsbedingungen

Die Versuchsbedingungen orientieren sich an den In-situ-Bedingungen der Forschungskaverne B in Anlehnung an die Typkaverne aus Kapitel 4.3. Sie können jedoch aufgrund der allgemein gültigen Werte auch für andere Kavernen als Grundlage dienen. Im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour wird ein Überlagerungsdruck von ca. 20 MPa angenommen. Der Betriebsdruck der Kaverne liegt zwischen 3 und 14 MPa. Als Gasdruck für die Versuche wurde der mittlere Kavernendruck von 10 MPa festgelegt. Die Salzstein-Proben wurden vor Beginn der Messung sieben Tage mit Manteldruck belastet, um eventuellen Gefügelockerungen durch den Sägeprozess entgegenzuwirken. Die Messung der Salzstein- und Anhydrit-Proben erfolgte im Anlieferungszustand. Die effektive Permeabilität der (teil-)gesättigten Zementstein-Proben wurde im Rahmen von Gasdurchbruchmessungen bestimmt.

Neben den Versuchen mit konstantem Manteldruck werden Versuche in Abhängigkeit des Effektivdrucks durchgeführt. Als Effektivdruck wird die Differenz zwischen Manteldruck und Porenraum(gas)druck definiert. Je nach Teufe und aktuellem Gasdruck einer Kaverne wird das umgebende Gebirge mit unterschiedlichen Effektivdrücken belastet. Dieser kann einen bedeutenden Einfluss auf die Durchlässigkeit haben. Der Bereich aus möglichen Effektivdrücken ergibt sich aus dem Gebirgsdruck und den Betriebsdrücken der Kaverne. Für die Typkaverne ergibt sich ein Bereich zwischen 6 MPa und 17 MPa.

Ergebnisse: Anhydrit

Aufgrund der Kürze des vorhandenen Anhydrit-Bohrkerns konnten lediglich drei Anhydrit-Proben hergestellt werden. Die Proben wurden mit Wasserstoff und anschließend mit Methan gemessen. Für die H₂-Messungen ergeben sich Permeabilitäten zwischen $1,1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ und $5,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$, für die Methanmessungen zwischen $9,8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ und $5,4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$. Die Messungen mit Methan ergeben im direkten Vergleich mit den H₂-Messungen geringere Permeabilitäten. Die Durchführung der Klinkenberg Korrektur anhand einer ausgewählten Probe ergibt für beide Messgase eine identische wahre Permeabilität. Als Grund für die Abweichung der Durchlässigkeiten bei allen Proben wird aus diesem Grund der Klinkenberg Effekt angenommen.

Neben diesen Versuchen bei konstantem Effektivdruck (ca. 15 MPa) wird die Durchlässigkeit in Abhängigkeit des Effektivdrucks bestimmt. Die ermittelte Permeabilität sinkt von $9,8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bei einem Effektivdruck von 3,7 MPa auf $1,1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bei einem Druck von 15,2 MPa ab. Die Durchlässigkeit reduziert sich um den Faktor 10. Der Einfluss des Messgases ist im Vergleich dazu vernachlässigbar.

Salzstein

Es wurden sieben Salzstein-Proben aus drei Teufenbereichen der Kaverne (Dach, Mitte, Sumpf) untersucht. Die ermittelte Permeabilität liegt im Durchschnitt bei $3,7 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$ und mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im Bereich zwischen $2,3 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$ und $5,1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$. Die Herkunft der Kerne zeigt keinen Einfluss auf die Permeabilität. Mit Ausnahme einer Probe wurde, während der durchschnittlichen Messzeit von rund 19 Tagen, keine Druckantwort in der Ausgangskammer gemessen. An zwei Salzstein-Proben wurden nach den H₂-Messungen Vergleichsmessungen mit Methan durchgeführt. Im direkten Vergleich der Permeabilitäten zeigt sich kein Unterschied, der über die zufällige Messwertschwankung hinausgeht.

Bei keiner der Messungen bildete sich ein permeativer Stofftransport aus und es ist davon auszugehen, dass die gemessenen Druckänderungen auf Diffusionsprozesse zurückzuführen sind. Unter den gewählten Versuchsbedingungen sind die Salzstein-Proben als technisch dicht zu betrachten.

Die Salzstein-Proben weisen ausgeprägte Anhydrit-Schichtungen auf. Da Fremdstoffe die Durchlässigkeit von Salzstein bestimmen können, wurden gezielt Proben mit einer über die gesamte Probenlänge laufenden Anhydrit-Schicht hergestellt. Die Messung der Proben zeigt, dass bei ausreichender Schichtdicke, Anhydrit die Durchlässigkeit der Salzstein-Probe bestimmt. So wurde bei einer Probe eine Durchlässigkeit von $2,8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ermittelt. Ein Wert der deutlich oberhalb der durchschnittlich bestimmten Salzstein Permeabilität liegt.

Zementstein

Die Durchlässigkeit der Zementstein-Proben wird mit Hilfe von Gasdurchbruchmessungen bestimmt, die sich insofern von den vorhergehenden Messungen unterscheiden, als dass effektive Permeabilitäten bestimmt werden (Hildenbrand, et al., 2002). Die Messergebnisse lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Messungen bei denen es nicht zu einem Gasdurchbruch kommt weisen eff. Permeabilitäten zwischen $3,2 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$ und $3,9 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$ auf. Bei diesen Versuchen bildet sich (ähnlich wie bei Salzstein) kein permeativer Stofftransport aus. Aufgezeichnete Druckänderungen resultieren aus der Diffusion der Gasphase in den solegefüllten Porenraum. Weiterhin gibt es Messungen, bei denen es zu einem Gasdurchbruch kommt. Diese weisen eff. Permeabilitäten zwischen $6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ und $5,6 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ auf. Vergleichsmessungen mit Methan zeigen auch hier keinen Unterschied.

Wie bei den Anhydrit-Proben werden Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit des Effektivdrucks durchgeführt. Für alle gemessenen Zementstein-Proben ergibt sich eine maximale eff. Permeabilität im Bereich von $1,8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $9,4 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ bei einem Effektivdruck von 2,8 Pa bis 15,9 MPa. Neben dem Effektivdruck kann (in Abhängigkeit der Porengrößenverteilung) die initiale Gasdruckdifferenz einen Einfluss auf die ermittelte eff. Permeabilität haben. Im Rahmen der Versuche wurden initiale Druckdifferenzen von bis zu 13,2 MPa eingestellt.

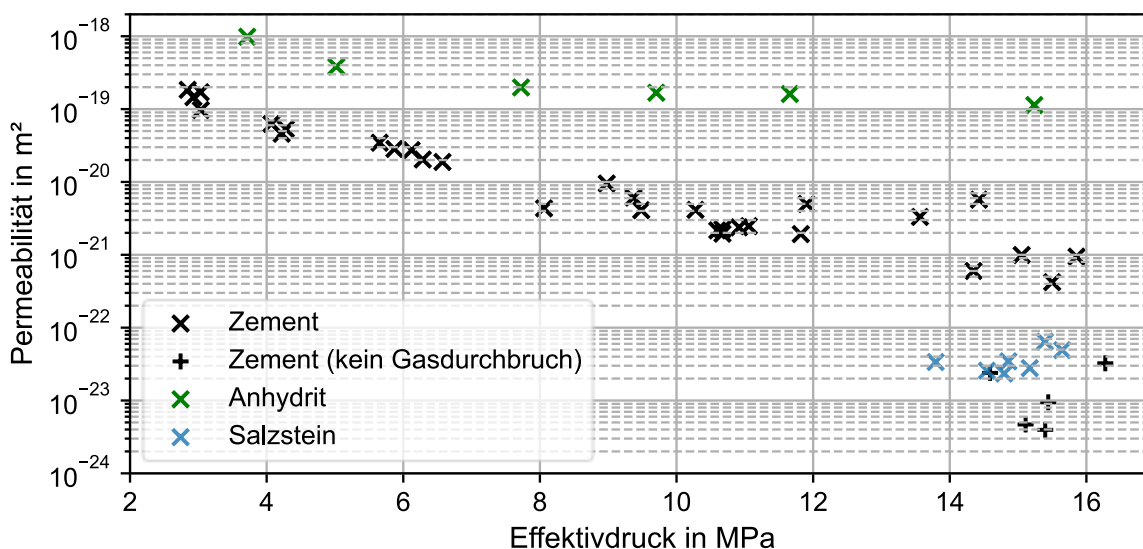


Abbildung 63: Permeabilität in Abhängigkeit des Effektivdrucks

Abbildung 63 gibt einen Überblick der Ergebnisse der gemessenen Salzstein-, Anhydrit- und Zementstein-Proben. Für Zementstein und Anhydrit zeigt sich der Zusammenhang zwischen Effektivdruck und Permeabilität. Die weitere Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 7.3.3 in Kombination mit den Erkenntnissen der Untersuchung der Verbundproben.

Neben Laboruntersuchungen zur Abschätzung des Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff gegenüber dem Speichergestein Salz sowie dem Verbund $\text{SRohrtour/Zement/Steinsalz}$ ist es bei der Anlage einer Kaverne erforderlich, Laborversuche an Steinsalz-Proben durchzuführen. Die Untersuchungen geben dabei Aufschluss über das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Salinars. Ziel solcher Untersuchungen ist es, Eingangsparameter für die gebirgsmechanische Modellierung zu erhalten, mit welcher der rechtechnische Nachweis hinsichtlich der Standsicherheit und Integrität der konzeptionell dimensionierten Kaverne erbracht wird. Ebenso dienen die Laborergebnisse als Eingangsparameter für die Simulation einer Bestandskaverne, welche in eine H_2 -Kaverne umgewidmet werden soll.

Um lokationsspezifische Kenntnisse über das Spannungs-Verformungsverhalten des Steinsalzes zu erhalten, ist es bei einer Neuanlage einer Kaverne notwendig, triaxiale Kompressions- (TC) und Extensionsversuche (TE) durchzuführen. Darüber hinaus wird empfohlen, standortspezifische Kriechversuche (TCC) durchzuführen. Das Kriechverhalten beeinflusst maßgeblich die Integrität und Langzeitsicherheit der Salinarbarriere. Zusätzliche direkte Zugversuche (DTT) an Materialübergängen oder Schwächeflächen können zur verbesserten Datenbasis beitragen und ebenfalls als Input für das Berechnungsmodell dienen. Durchgeführte Laboruntersuchungen können mit vorhandenen Daten desselben Standortes verglichen und abgeglichen werden.

Die für die Laboruntersuchungen benötigten Bohrkerne sind entsprechend relevanter Teufenbereiche unter Berücksichtigung der angedachten Kavernenteufe zu kernen. Hier wird empfohlen, Kerne aus der Referenzteufe, der Firstteufe und der Teufe der später zu installierenden letzten zementierten Rohrtour zu entnehmen. Aber auch Untersuchungen am über dem Salinar befindlichen Deckgebirge werden empfohlen.

4.4.2 In-situ-Messungen

Untertageversuch zum Nachweis der Integrität von Steinsalz gegenüber Wasserstoff

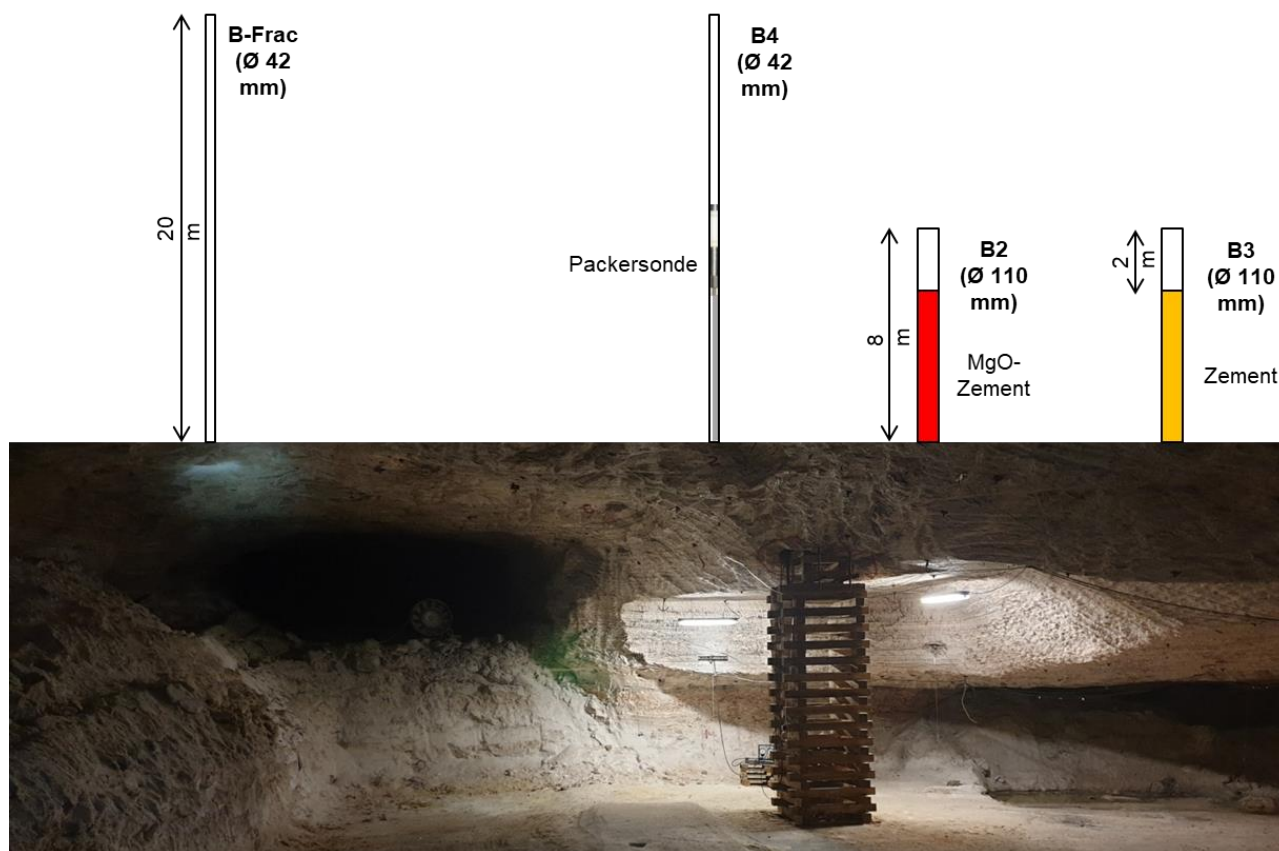


Abbildung 64: *Übersichtsbild des Versuchsstandortes im Bereich des unteren Kaliabbaus und des im Hangenden befindlichen Werra-Steinsalzes mit den in die Firste gestoßenen Bohrungen*

In einem In situ-Langzeittest an durch Zement verschlossenen Bohrungen wurde im Verbundvorhaben H2-UGS gezeigt, bis zu welchen Gasdrücken unterhalb der minimalen Hauptspannung von einer Dichtheit des Salzgebirges auszugehen ist. Dabei wurde in Großbohrlöchern die Dichtheit von Bohrlochverschlüssen Zement/Stahl und Salzgebirge mit unterschiedlichen Bohrlochzementrezepturen (Zement- und Magnesiumoxid-Baustoffe) bei Druckbeaufschlagung mit Wasserstoff unter realen Bedingungen untersucht. Dazu wurden die Bohrlochverschlüsse nach Aushärtung des Zementpfropfens mit Wasserstoff druckbeaufschlagt, analog dem letzten zementierten Rohrschuh der Bohrinstallation bei realem Speicherbetrieb in einer Salzkaverne. Der Bohrlochverschluss, als ein Dichtsystem beste-

hend aus den drei Komponenten Salzgestein/Zement/Stahl, stellt ein kritisches Element für die Dichtigkeit einer mit Wasserstoff gefüllten Kaverne dar. Am Ende der Langzeittests wurde der H₂-Druck im Bohrloch soweit erhöht, bis ein Dichtheitsverlust eintritt. Vergleichend wurden Langzeitversuche in abgepackerten Bohrlöchern durchgeführt. Der H₂-Druck wurde in beiden Versuchsanordnungen (zementiertes und abgepackertes Bohrloch) stufenweise erhöht und die Dichtigkeit in situ als Funktion der Druckdifferenz zwischen Wasserstoff und minimaler Hauptspannung im Gebirge gemessen. Das Einsetzen von druckgetriebener Perkolation (Permeation des Wasserstoffs in das Gebirge) wurde mit einem hochauflösenden mikroseismischen Array (AE-Messung) überwacht. Mit der Ortung der lokalen akustischen Emissionen, welche bei der Rissöffnung und Rissfortpflanzung im Salz einsetzt, konnte die H₂-Ausbreitung im Steinsalz nach Überschreitung der Perkolationsschwelle bzw. der minimalen Gebirgsspannung gemessen werden.

Die In-situ-Messungen wurden in einer Kaligrube, welche sich in einer Salzlagerstätte mit flacher Lagerung befinden, durchgeführt. Der Versuchsort liegt im Mittleren Werra-Steinsalz (z1NAb). Ober- und unterhalb des Steinsalzes befinden sich Kaliabbau. Die für die Versuche benötigten Bohrlöcher wurden von der unteren Sohle (Kaliabbau) in die Firste (Werra-Steinsalz) gestoßen. Die Firststeufe liegt bei ungefähr 360 m. Abbildung 64 zeigt den Versuchsort mit der ungefähren Position der Bohrungen.

Die mit Zement verfüllten Bohrungen besitzen eine Länge von ca. 10 m und einen Durchmesser von 101 mm. Der zementierte Bereich umfasst die ersten 8 m des Bohrlochs. In die Bohrung bzw. Zementation wurden Druck-, Entlüftungs- und Verpressleitungen eingebaut, sodass der offene Hohlraum (ca. 0,21 m³) mit Wasserstoff druckbeaufschlagt werden und mit Hilfe von Manometern eine Drucküberwachung erfolgen konnte.

Die abgepackerten Bohrlöcher besitzen Maße von 20 m Länge und 42 mm Durchmesser. Die Abschlusspackersonde wurde bei 10 m im Bohrloch gesetzt. Dabei wurde die Sonde mit Setzgestänge hinterfüllt und mit einer Querhaupt an der Firste gesichert. Da man die Abschlusspackersonde vorab nicht materialspezifisch auf Wasserstoff getestet hat, wurde zur zusätzlichen Abdichtung der unmittelbare Bereich oberhalb der Sonde mit NaCl-Lösung als kapillare Sperrschicht überschichtet und ein Packerdruck von 24 MPa eingestellt.

Aus hydraulischen Aufreißversuchen mit Öl im Mittleren Werra-Steinsalz am Versuchsstandort liegen Spannungsprofile über die minimale Hauptspannung im Bereich der gestoßenen Versuchsbohrungen vor, siehe Abbildung 65. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass in den Bereichen der offenen Hohlräume (8–10 m oberhalb der Firste) der mit Zement verschlossenen Bohrungen die minimale Gebirgsspannung zwischen 5 und 7 MPa liegen müsste. In den abgepackerten Bohrungen kann sie, da der offene Hohlraum weiter von der Firste entfernt liegt, höher sein. Unsicherheiten bezüglich der Übertragbarkeit auf die Versuchsbohrungen bestehen aufgrund der Untertagesituation hinsichtlich der Lage der Bohrungen (entspannte Bereiche im Übergang Firste zu Stoß). Dennoch konnten die Spannungsprofile als Anhaltspunkt für die Versuchsdurchführung dienen, bis zu welchem Druck die Bohrungen mit Wasserstoff belastet werden können.

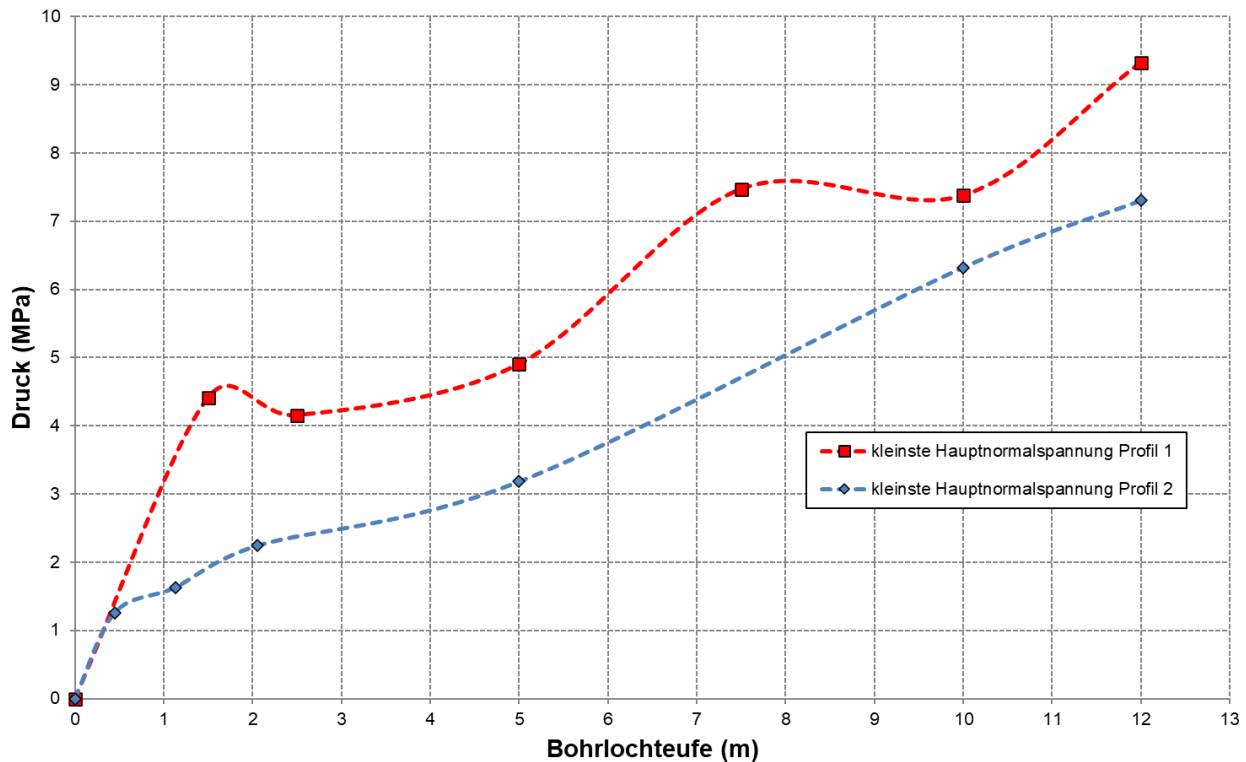


Abbildung 65: *Spannungsprofile der minimalen Hauptspannung aus hydraulischen Aufreißversuchen im Mittleren Werra-Steinsalz im Bereich der gestoßenen Versuchsbohrungen*

In beiden Bohrungen wurde in der Versuchsdurchführung der H_2 -Druck in mehreren Phasen stufenweise erhöht. Zwischen den einzelnen Druckstufen wurden die Bohrungen über einige Wochen stehengelassen, um die Druckentwicklung zu dokumentieren. In Abbildung 66 sind beispielhaft die Druckkurven einer der zementierten und einer der mit einer Abschlusspackersonde versehenen Bohrungen aufgeführt. Die zementierte Bohrung (blaue Kurve) wurde in der 4. Druckstufe bis zu einem Druck von 3,7 MPa aufgepumpt. Dies entspricht ungefähr $7,8 \text{ m}^3$ i. N. Wasserstoff, welcher in das Bohrloch verpresst wurde. Der anschließende Druckabfall mit einer Rate von durchschnittlich $0,05 \text{ bar/d}$ impliziert einen Gasverlust im Bohrloch. Die Verlustrate kann mit $0,0116 \text{ m}^3/\text{d}$ i. N. bzw. $11,6 \text{ l/d}$ angegeben werden. Die Ergebnisse der AE-Messungen zeigen jedoch keinerlei Aktivitäten, welche auf ein Eindringen des Gases in das umgebende Steinsalz hindeuten würde. Lediglich am Übergang zum Zement wurden nach Erreichen der jeweiligen Druckstufe akustische Emissionen detektiert. Im Anschluss an die 4. Druckstufe wurde die Bohrung bis zu einem Druck von 6,8 MPa überfahren (Frac, hydraulische Risserzeugung). Die AE-Messungen zeigen, dass hierbei nachweislich der Kontakt zwischen Zementation und Salz komplett durch das Gas aufgerissen wurde und sich das Gas eine Wegsamkeit in eine firstnahe horizontale Schichtung als lokale Schwächefläche suchte. Dieser Umstand bestätigt die Annahme, dass das Gebirge bei der letzten Druckstufe von 3,7 MPa, welche noch unterhalb der wirkenden minimalen Hauptspannung im Gebirge liegt, siehe Abbildung 65, dicht war. Abbildung 67 zeigt im Vergleich die gemessenen akustischen Ereignisse zum Zeitpunkt des Anfahrens der 4. Druckstufe in der Bohrung B2 und beim Überfahren der Bohrung (Frac).

Der Bohrung B4 konnten hingegen keine den Druckstufen assoziierten mikroakustische Aktivitäten zugeordnet werden, welche auf eine Schädigung von Korngrenzen und demzufolge einer Generierung von Wegsamkeiten im Steinsalz hindeuten würde. Gemessene Ereignisse liegen ausschließlich im Bereich der Bohrlochkontur. Anzeichen für eine Schädigung des Gebirges in größerer Entfernung zum Bohrloch sind nicht auszumachen. Mit 9,5 MPa in der letzten Druckstufe liegt der offene Hohlraum der Bohrung B4 (> 10 m Bohrlochteufe) etwas über der gemessenen minimalen Hauptspannung, siehe Abbildung 65. Hierbei spielt eine Rolle, dass die Bohrung B4 vermutlich weniger von der Entspannungszone der darunter aufgefahrenen Hohlräume (Kaliabbau) betroffen ist und sehr pfeilernah liegt.

Anhand der Versuche konnte gezeigt werden, dass die Dichtheit des Steinsalzes gegenüber dem Speichermedium Wasserstoff gegeben ist, wenn sich der wirkende H_2 -Druck unterhalb der minimalen Gebirgsspannung befindet. Aufgetretene Undichtheiten (Frac Bohrung B2) traten spannungsabhängig auf und wurden entlang von vorhandenen Schwächeflächen am Kontakt Zement/Salz und im Gebirge generiert. Daraus lässt sich in Übereinstimmung mit Laborversuchen und In-situ-Erfahrungen erneut belegen, dass intaktes Steinsalz in situ gegen Wasserstoff dicht ist. Vielmehr stellt bei der H_2 -Speicherung in Kavernen das Bohrloch mit seiner technischen Installation eine mögliche Gefährdung dar. Zum einen muss das eingesetzte Material (Verrohrung, Packer, etc.) materialspezifisch für die H_2 -Speicherung geeignet sein (siehe Kapitel 3 und 7). Zum anderen gilt es analog der Erdgasspeicherung, die Integrität der Kaverne und der technischen Installation mittels Integritätstest festzustellen. Hierfür sind technische Standards aus der Erdgasspeicherung zu übernehmen und zukünftig H_2 -spezifisch anzugleichen.

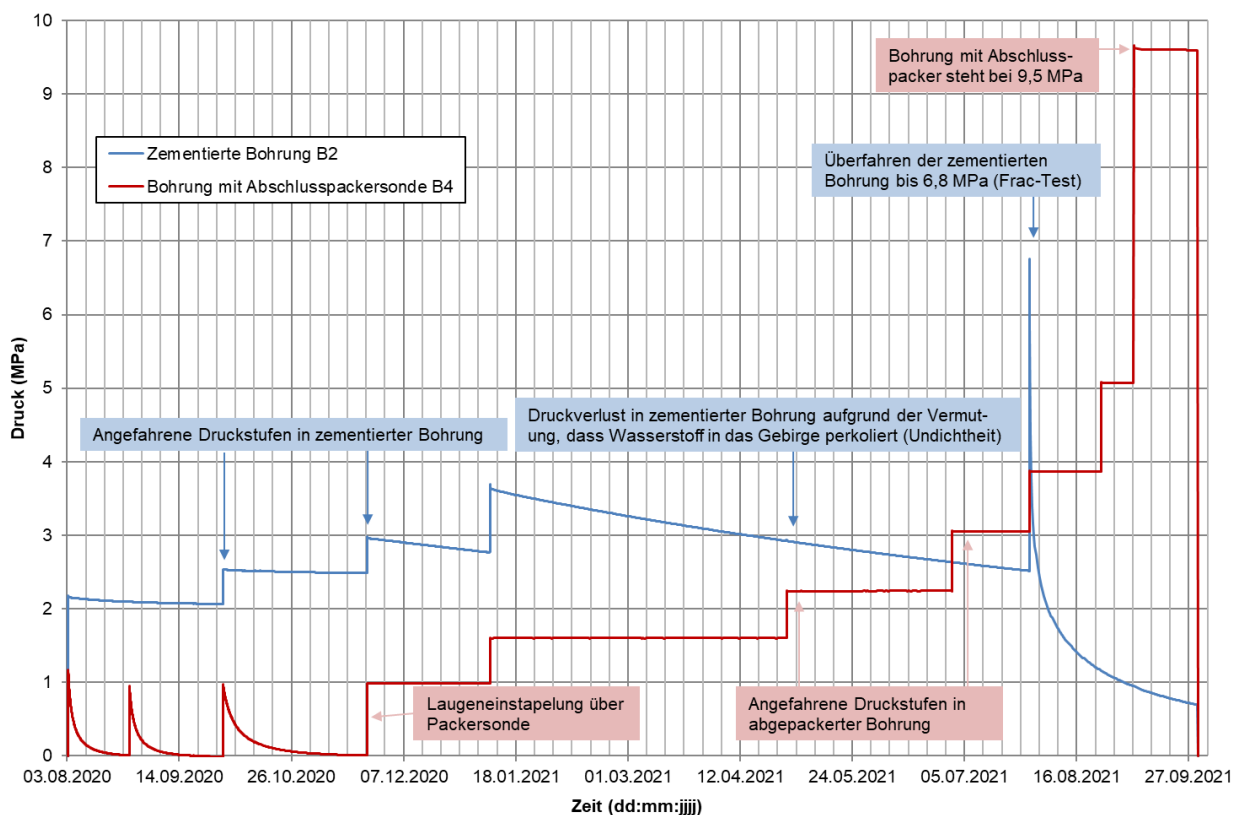


Abbildung 66: Versuchsdruckkurven der beiden Bohrungen B2 und B4 über die Zeit.

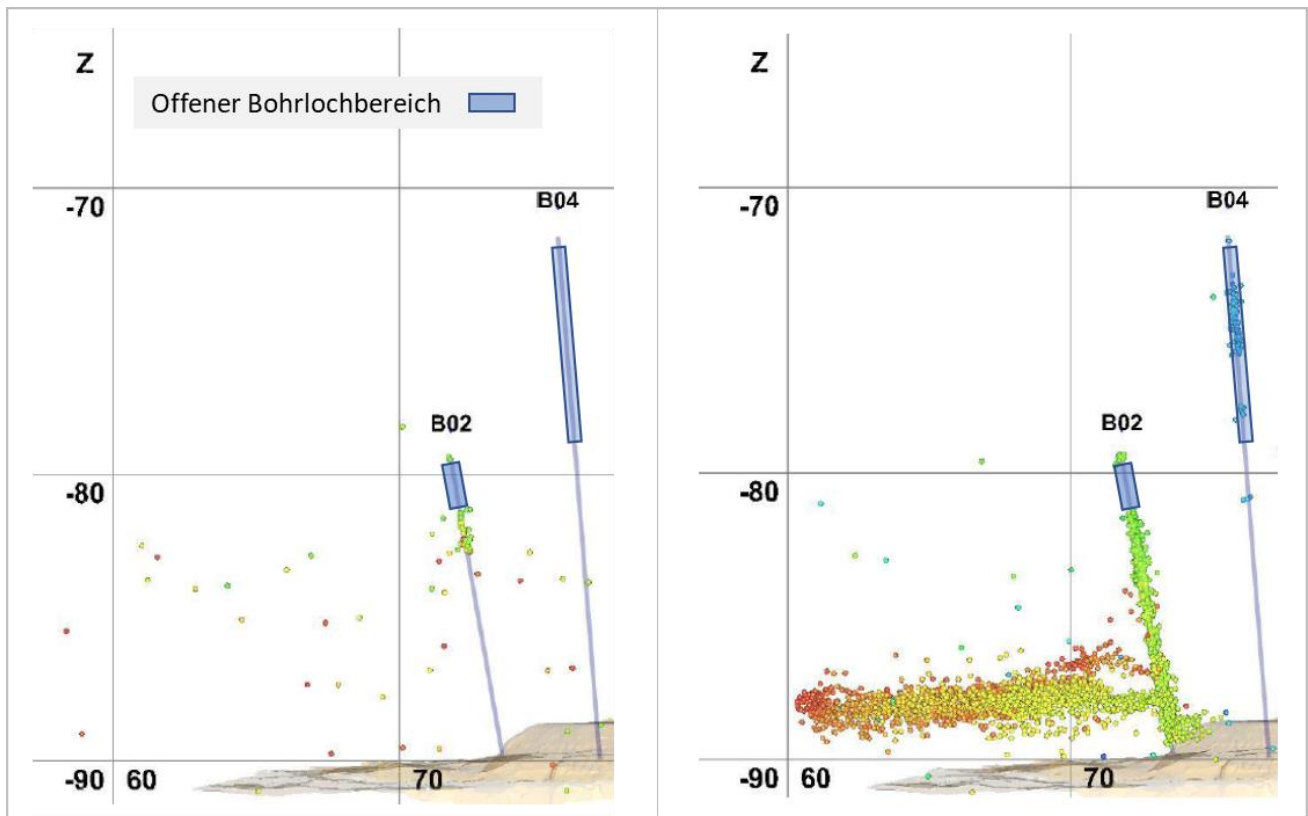


Abbildung 67: Ortungsergebnisse der AE-Messung während der Druckerhöhung – 4. Druckstufe – in Bohrung B2 (linkes Bild); Ereignisse sind lediglich am Übergang des offenen Hohlraums zur Bohrungszementation zu erkennen. Der Gasdurchschlag über den Kontakt Zement/Salz und die Wegsamkeit in eine firstnahe horizontale Schichtung nach Überfahren des Druckes sind rechts dargestellt. Ereignisse an der Bohrung B4 treten lediglich an der Bohrungskontur auf. Ein Abströmen des Wasserstoffs in der Bohrung B4 ist nicht zu erkennen.

Empfohlene Maßnahmen und In-situ-Messungen bei der Anlage einer Wasserstoffkaverne

Mit der Vorlage einer gebirgsmechanischen Konzeptstudie (Dimensionierung siehe Kapitel 4.3) liegen Empfehlungen zur möglichen Anlage einer H₂-Kaverne vor. Beim Niederbringen der Bohrungen werden aus gebirgsmechanischer Sicht folgende begleitenden Maßnahmen und Messungen empfohlen:

- bohrlochphysikalische Vermessung mit Erfassung der teufenabhängigen Gebirgstemperatur, der Dichte des Anstehenden, mögliche Kali- bzw. ton- und Anhydrit-Führung des Steinsalzes;
- pneumatische Spannungssondierungen in zwei Teufenhorizonten (Rohrschuhteufe und Referenzteufe) zur Bestimmung der Gasdruckbelastung und des herrschenden Gebirgsspannungszustandes.

Es wird empfohlen, an fertig geteufte und casinginstallierten Bohrungen, die eventuell flüssigkeitserfüllt stehen, Druckaufbautests und Kompressibilitätsbestimmungen zur Erkundung des Konvergenz- und Druckaufbauverhaltens durchzuführen. Vor Beginn der Aussolung der Kavernen wird die Instal-

lation eines Festpunktsystems an der Tagesoberfläche und dessen Erstvermessung durch Präzisionsnivellements empfohlen. Folgemessungen sind während der Aussolung und im späteren H₂-Betrieb durchzuführen.

Bei der Aussolung sind eingetragene Wassermengen sowie ausgetretene Solemengen und deren Mineralisation kontinuierlich und exakt zu erfassen. Die einzelnen Soletappen sind so zu planen, dass die vorgegebenen Solprojektwerte eingehalten und ausgeschöpft werden. Dies ist jeweils durch eine rechentechnische Solsimulation zu belegen. In festgelegten Hohlrumentwicklungsschritten ist der ausgesolte Hohlraum mittels Ultraschall zu vermessen. Die erreichte Hohlrumentwicklung ist gebirgsmechanisch und soltechnologisch zu bewerten und nachfolgende Soletappen sind entsprechend zu präzisieren. Längere Stillstandsphasen in der Aussolung, z. B. zwischen Breit- und Hochsolung, sollten zu Druckaufbau- und Kompressibilitätstest genutzt werden.

Nach Abschluss der Aussolung erfolgt die Ultraschall-Endvermessung, in deren Ergebnis die fertiggestellte Kaverne gebirgsmechanisch begutachtet und das zulässige Betriebsregime festgelegt wird. Vor Beginn der Gaserstbefüllung erfolgt die Prüfung der Gasdruckbelastbarkeit und Dichtheit des Packers der Förderrohrtour und des Bereiches des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour. Die Prüfung sollte bei einem Prüfdruck im Rohrschuhniveau entsprechend des zulässigen Gasdruckgradienten über einen Prüfzeitraum > 3 Tage erfolgen. Der Gasdruckgradient entspricht ungefähr 85 % des wirkenden Gebirgsdruckes. Hierbei gilt es analog der Erdgasspeicherung, die Integrität der Kaverne und der technischen Installation mittels Integritätstest festzustellen.

Nach der Gaserstbefüllung hat eine Ultraschall-Erstvermessung unter Gas zu erfolgen. Die Vermessung ist mit der Endvermessung unter Sole zu vergleichen, um Auswirkungen des Medienwechsels Sole – Wasserstoff festzustellen. Während des langfristigen Speicherbetriebes sind mögliche Hohlraumveränderungen durch wiederholte Ultraschallvermessungen zu erfassen. Dabei hängt der empfohlene Zeitabstand zwischen zwei Vermessungen vom Nutzungsumfang der Kaverne ab. Im Fall der saisonalen Speicherung betragen die Zeitintervalle 10 bis 15 Jahre.

4.5 Modelltechnischer Eignungsnachweis der Wasserstoffspeicherung

Der endgültige Eignungsnachweis zur H₂-Speicherung in einer Kaverne erfolgt mit numerischen Berechnungsmodellen, mit dessen Hilfe letztendlich die Dichtheit und Stabilität und somit die Zulässigkeit der Kaverne nachgewiesen wird. Die aus den Laboruntersuchungen gewonnenen Ergebnisse (siehe Kapitel 4.4.1) beschreiben lokationsspezifisch das Verhalten des Speichergesteins und dienen als Eingangsparameter für die numerischen Modelle.

Im folgenden Kapitel 4.5.1 werden Modellansätze in Hinsicht auf die durchgeführten Untertageversuche dargelegt und Ergebnisse der Versuchsnachrechnung gezeigt. Ebenso wird die Übertragbarkeit auf ein großskaliges Kavernenmodell diskutiert (siehe Kapitel 4.5.2) und es werden Bewertungskriterien bezogen auf die H₂-Speicherung zusammengefasst.

4.5.1 Modellentwicklung, Verifizierung, Validierung (In-situ-Versuch)

Methodik

Im Folgenden werden Methodik und Ergebnisse der modelltechnischen Nachrechnung der Untertageversuche (siehe Kapitel 4.4.2) aufgeführt. Dabei kam ein kontinuumsmechanischer Modellansatz

zur Anwendung, wobei der Perkulationsprozess der druckgetriebenen hydromechanischen Öffnung der Korngrenzen durch eine lokale spannungs- und fluiddruckabhängige Permeabilitätsrelation beschrieben wird. Die spannungsabhängige Permeabilität wurde aus gekoppelten Laborversuchen abgeleitet (Abbildung 68). Es ist zu beachten, dass der Laborprüfkörper auch bei Fluidrücken unterhalb der minimalen Hauptspannung bereits eine (sehr kleine) messbare Permeabilität aufweist. Es wird davon ausgegangen, dass dies eine Folge der Prüfkörperverschädigung bei Probenentnahme und der begrenzten Probenskala ist. Unter ungestörten In-situ-Bedingungen geht man – auch anhand zahlreicher natürlicher Analoga – davon aus, dass das Salinar als vollständig dicht gegenüber dem angreifenden Fluid bzw. Gas beschrieben werden kann, solange dessen Druck kleiner ist als die minimale Hauptspannung des Gesteins. Erst wenn der Fluiddruck die minimale Hauptspannung überschreitet, wird lokal an diesem Punkt eine Permeabilität berechnet.

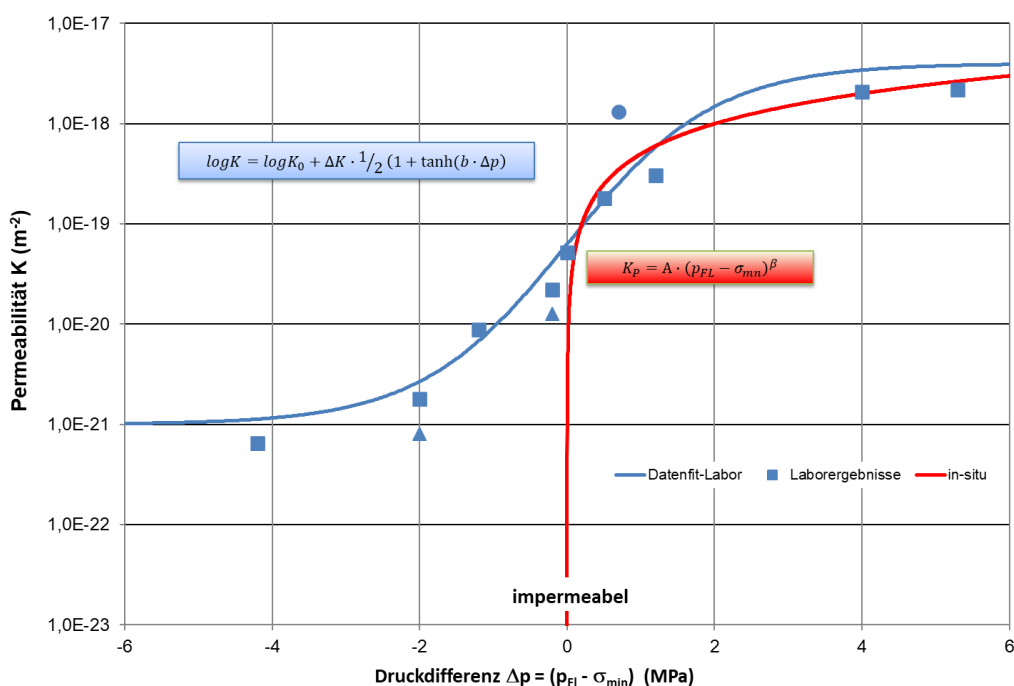


Abbildung 68: Permeabilitätsanstieg des Salzgesteins im hydromechanisch gekoppelten Laborversuch (blau) und das daraus abgeleitete In-situ-Verhalten (rot)

Im Sinne eines Control-Volume-Schemes (Munz & Westermann, 2009) für die Gasausbreitung wird in jedem Zeitschritt für jede numerische Zone überprüft, ob entweder ihr Fluidruck größer ist als die minimale Hauptspannung des Nachbarelementes oder ob der sinngemäß umgekehrte Fall eintritt. Dann wird für diesen Übergang die entsprechende lokale Permeabilität berechnet und damit dann, ganz analog zur konventionellen hydraulischen Berechnungslogik des verwendeten Berechnungstools FLAC3D (ITASCA Consulting Group Inc., 2018), die entsprechenden Volumenströme und Druckänderungen im gegebenen Zeitschritt berechnet.

Es gibt keine geschlossene mathematische Lösung gegen die der Perkulationsprozess unmittelbar validiert werden kann. Die Funktionsweise dieses Vorgehens lässt sich jedoch am nachfolgenden

einfachen quasi-eindimensionalen Beispiel darstellen: Eine Elementreihe mit vorgegebener Minimalspannung wird am linken Rand mit einem Druck beaufschlagt, der entweder oberhalb oder unterhalb der Minimalspannung liegt, siehe Abbildung 69.

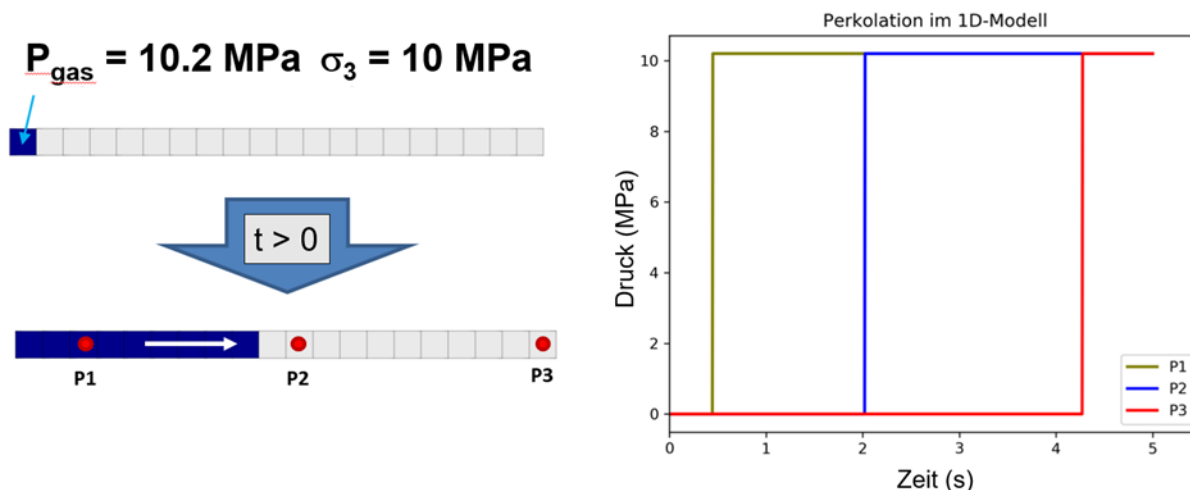


Abbildung 69: *Eindimensionaler Perkolationsstest. Druckgetriebenes Fortschreiten der Perkolationsfront wenn der Gasdruck größer ist als die minimale Hauptspannung.*

Liegt der Druck unterhalb der Minimalspannung, zeigt die Validierungsrechnung erwartungsgemäß keinerlei Ausbreitung des Gases. Sobald der angelegte Druck die Minimalspannung übersteigt, setzt ein fortschreitender Perkolationsprozess ein, bei dem zunächst das erste benachbarte Element aufgefüllt wird. Sobald dann in diesem Element der Druck ausreichend hoch ist, geht die druckgetriebene Perkolationsfront in das dritte Element über und entwickelt sich analog weiter. Dies wird auch durch die zeitlich versetzte spontane Druckentwicklung an den unterschiedlich weit von der Quelle entfernten Beobachtungspunkten P1–P3 ersichtlich, siehe Abbildung 69. Damit bildet die umgesetzte kontinuumsmechanische Ausbreitung die essenziellen Effekte der druckgetriebenen Perkolationsfront ab; bei einfacher konstanter Permeabilität würde sich im Vergleich ein qualitativ und quantitativ völlig anderes Druckprofil und Druckverhalten einstellen. Ein Nachteil dieser vereinfachten Methodik ist die Tatsache, dass die druckgetriebene Perkolationsfront in der Realität ein gerichteter Prozess ist, der sich in der Ebene senkrecht zur maximalen Hauptspannung ausbreitet, d. h., es müsste streng genommen ein hoch anisotroper druck- und spannungsabhängiger Permeabilitätstensor berücksichtigt werden. Neben immens erhöhtem Berechnungsaufwand sind die geläufigen Standardansätze – die Modellierung von Diffusionsprozessen in hoch anisotropen und unstetigen Permeabilitätsfeldern – ungeeignet und mit großen numerischen Fehlern behaftet. In der diskontinuumsmechanischen Berechnungsmethodik können derartige gerichtete Perkolationspfade jedoch bereits erfolgreich abgebildet werden, allerdings auch mit entsprechend erhöhtem Zeit- und Berechnungsaufwand. In aktuellen Forschungsvorhaben wird daher gegenwärtig noch an entsprechenden alternativen Ansätzen zur verbesserten kontinuumsmechanischen Modellierung gearbeitet.

Nachrechnung In-situ-Versuche

Aufgrund der hohen notwendigen Vernetzungsdichte um die Bohrungen herum und dem Berechnungsaufwand der hydromechanisch gekoppelten Simulationen war es nicht möglich, ein numeri-

ches Modell um den gesamten Versuchsort aufzubauen. Für die kontinuumsmechanische Nachrechnung der In-situ-Bohrlochtests wurden daher generische Einzelmodelle der Bohrungen B2 und B4 aufgebaut. In beiden Fällen wurde unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie der Bohrlöcher je ein Viertelraummodell mit den entsprechenden Längen und Durchmessern der Bohrlöcher und Berücksichtigung der Zementations- bzw. Packerbereichen aufgebaut, siehe Abbildung 70.

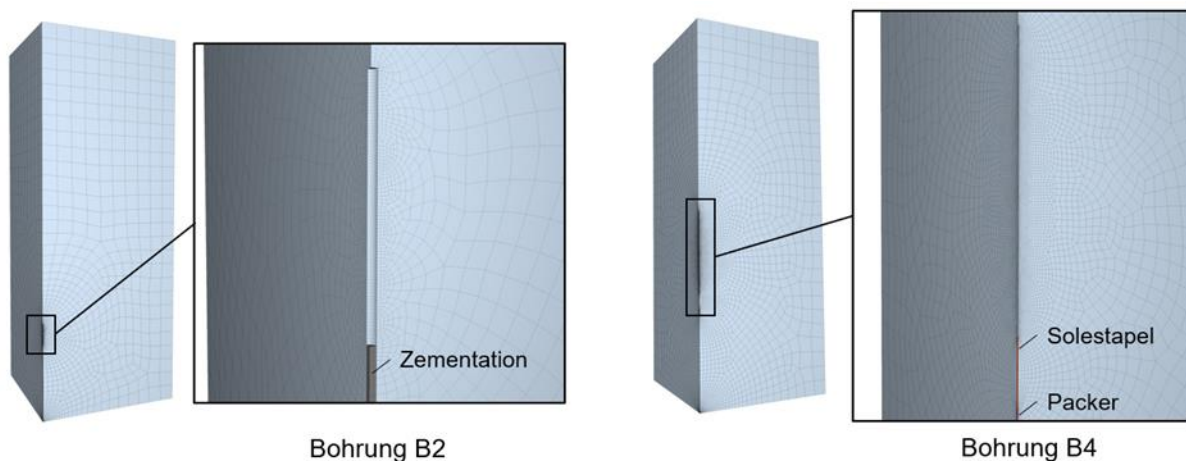


Abbildung 70: Darstellung der Viertelraummodelle der Bohrung B2 und B4

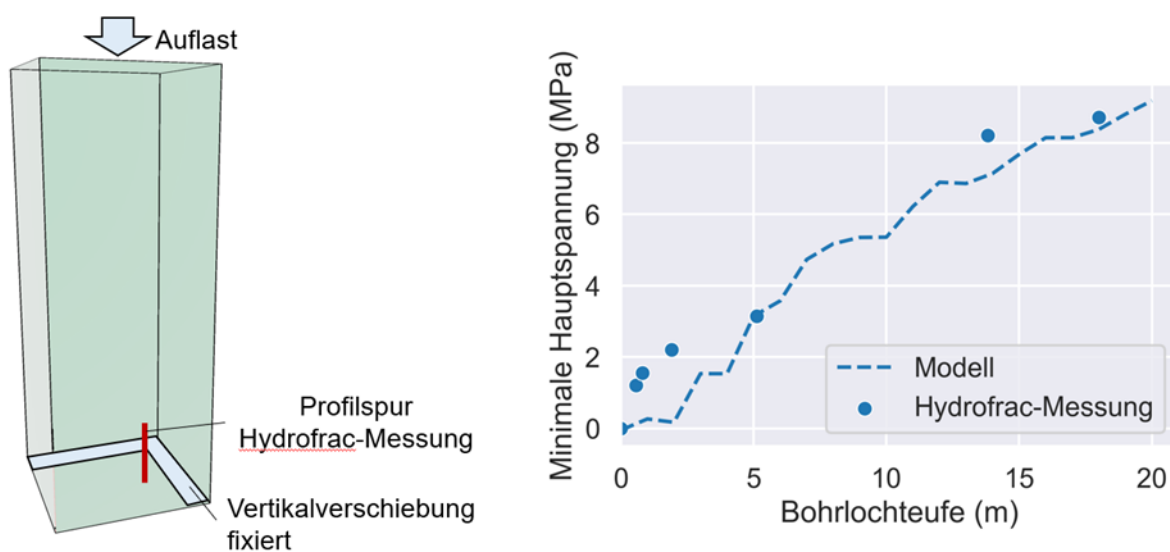


Abbildung 71: Lage der Profilsur als Anpassungsgrundlage für den Vergleich mit der in situ gemessenen Minimalspannung (links) und Ergebnis des Vergleiches nach Anpassung (rechts)

Diese Viertelraummodelle haben eine Abmessung von 15 x 15 x 40 m und wurden an der Modelloberkante mit einer Auflast von 11 MPa belastet, während die Seitenflächen in Normalenrichtung fixiert wurden (Rolling Boundaries). An der Unterseite des Modelles wurden zwei Randstreifen mit 3 m Breite in vertikaler Richtung fixiert, um die Stützwirkung der darunterliegenden Pfeiler mit effektiver Breite von 6 m zu simulieren. Der übrige untere Modellrand blieb randbedingungs frei, um die Wirkung

des unter der Firste verlaufenden Hohlraumes abzubilden. Die angegebene Modellauflast ergab sich aus der Anpassung des modellierten Spannungsfeldes an die Ergebnisse der In-situ-Spannungsmessungen, was sich am Vergleich des modellierten Minimalspannungsprofils mit den In-situ-Messwerten bestätigen lässt, siehe Abbildung 71.

Dabei ist zu beachten, dass sich die Bohrungen der Spannungsmessungen relativ nah am Stoß befinden und daher durch Überzugswirkung des benachbarten Pfeilers gegebenenfalls höhere Minimalspannungen aufweisen als dies an den Versuchsbohrlöchern selbst der Fall ist. Die stoßnahe Lage der Messbohrung wurde bei der Anpassung des Modelles durch eine entsprechend analoge Wahl der Profilsur im Modell entsprechend berücksichtigt, siehe Abbildung 71.

Nach Initialisierung und Ausgleichsrechnung des Grundspannungszustandes wurde die Generierung der Bohrlöcher durch instantane Schaffung der zylindrischen Hohlräume durchgeführt und anschließend eine weitere Standzeit von einem halben Jahr unter Berücksichtigung des kriechenden Salinars durchgeführt. Daraufhin wurde der untere Bereich der Bohrung B2 im Modell zementiert bzw. für die Bohrung B4 die Wirkung des Packers durch eine ringförmige Druckrandbedingung von 24 MPa realisiert. Im Anschluss an diese vorbereitenden Arbeiten wurden für beide Modelle die Druckstufen des in situ durchgeführten Versuches angefahren. In einer gemäß den vorangehenden Erläuterungen aufgebauten hydromechanisch gekoppelten Berechnung wurde analysiert, inwieweit die Druckabfallraten durch Verpressen des Gases in das Salinar und/oder die Zementation mit den In-situ-Beobachtungen übereinstimmen. Basierend auf den In-situ-Beobachtungen wurde für die Zementation der Bohrung B2 vereinfachend eine integrale Permeabilität von $5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und eine Porosität von 10 % angesetzt, um die offensichtlich vorhandene imperfekte Abdichtung des Bohrlochverschlusses abzubilden.

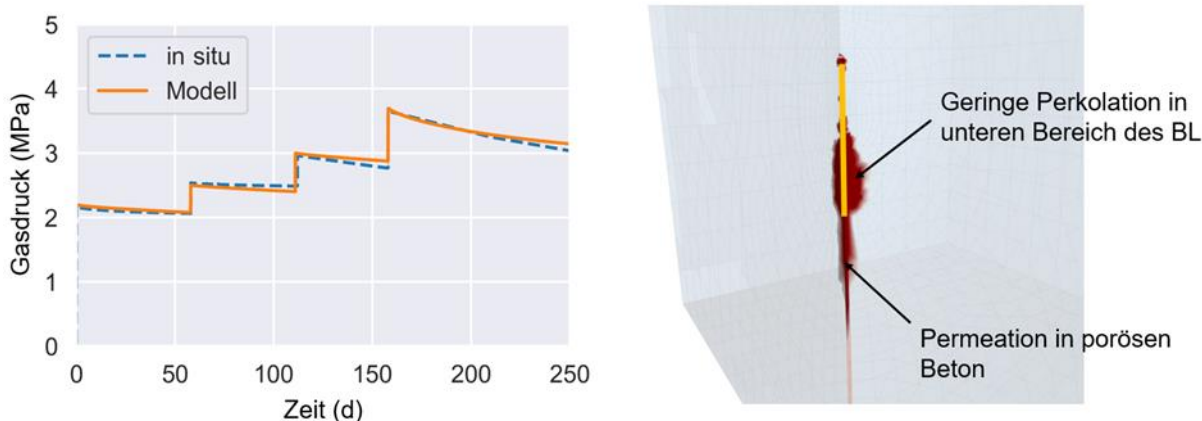


Abbildung 72: *In situ und modellierter Druckverlauf im Bohrloch B2 (links) sowie Gasausbreitung in Beton und Bohrlochkontur (rechts, rote Bereiche) nach 250 Tagen*

Die Modellierungsergebnisse der Bohrung B2 zeigen, dass bereits bei geringen Druckstufen im Modell ein leichter Druckabfall durch Auspressen in die Zementation zu beobachten ist, während keine druckgetriebene Perkolation in die Bohrlochkontur stattfindet, siehe Abbildung 72. Auch bei weiteren Druckstufen setzt sich lediglich die Permeation im porösen Beton fort. Erst bei Erreichen der Druckstufe von 37 bar lässt sich unmittelbar nach dem Anfahren dieses Druckniveaus eine erste kleinere

Perkolationsfront im unteren Bereich des Bohrlochverschlusses beobachten. Obwohl die Interpretation nicht eindeutig ist, ist dies zumindest konsistent mit den AE-Messungen, die an diesem Punkt ebenfalls nahe des Bohrlochverschlusses erhöhte Aktivität zeigten, siehe Abbildung 67, links. Es könnte hierbei allerdings auch lediglich ein weiteres Versagen des Kontaktes von Zement und Salinar aufgetreten sein, der dann wiederum zu einer erhöhten Druckabfallrate führte.

Die letzte Druckstufe (Überfahren der Bohrung bis 6,8 MPa – Frac) kann mit dem kontinuumsmechanischen Modell nicht abgebildet werden, da hierbei nachweislich die Schichtfläche zwischen Zementation und Salz komplett durch das Gas aufgerissen wurde und sich eine Wegsamkeit in eine firstnahe horizontale Schichtung als lokale Schwächefläche bildete. Für derartige Betrachtungen sind die integralen Permeabilitätsbetrachtungen nicht länger anwendbar und es wäre z. B. eine dedizierte diskontinuumsmechanische Betrachtung der Situation unter Berücksichtigung lokaler Schichtverläufe notwendig. Für den Zweck dieses Vorhabens – also u. a. der Demonstration der Dichtheit des Salinars gegenüber Wasserstoff und der Nachrechnung dieses Verhaltens bis zum Erreichen der minimalen Hauptspannung – sind diese Effekte beim Gasdurchbruch durch bewusstes Überfahren dieser Spannung allerdings weniger relevant.

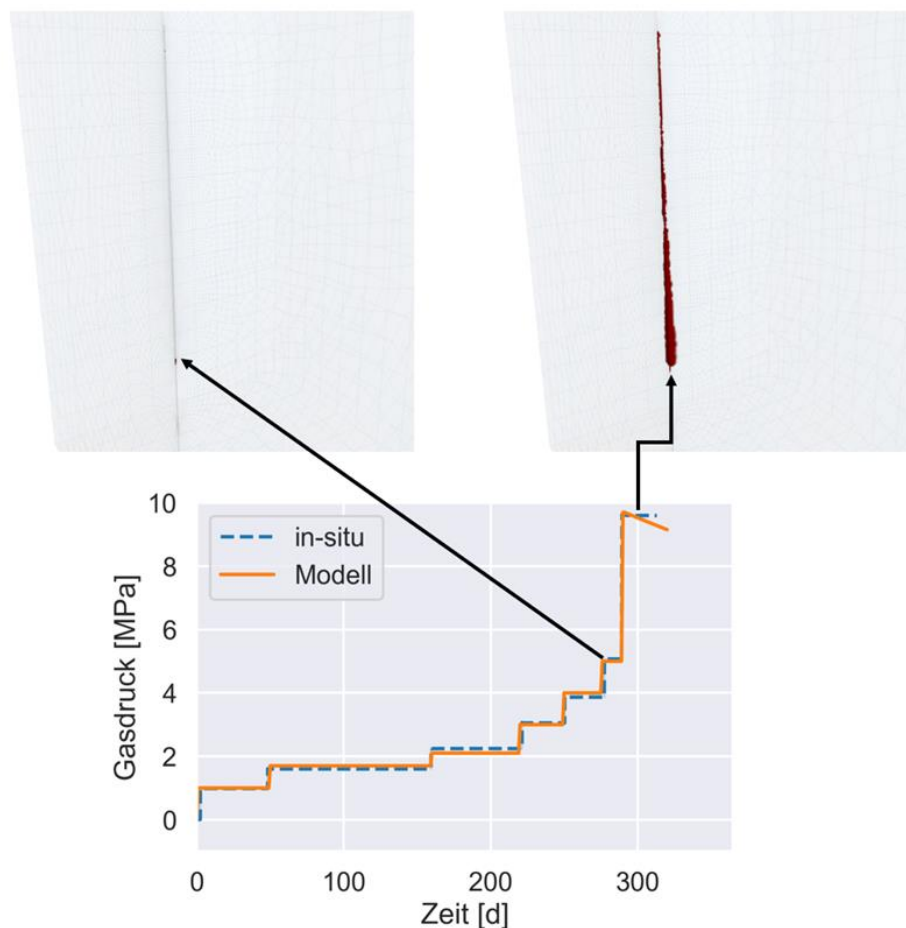


Abbildung 73: *In situ* und modellierter Druckverlauf im Bohrloch B4 (unten) sowie Gasausbreitung in Bohrlochkontur (rote Bereiche) für die Druckstufen 5,1 und 9,5 MPa.

Die am Modell der Bohrung B2 gemachten Beobachtungen bestätigen sich auch an den Berechnungen zur Bohrung B4. Bei dieser Bohrung gelang nach längerer Arbeit die Abdichtung durch einen Packer mit Laugenstapel, wodurch die angefahrenen Gasdruckstufen stets konstant gehalten wurden. Das geomechanische Modell bestätigt dies, da die entsprechenden Gasdrücke niedriger sind als die minimale Hauptspannung im Konturbereich und daher auch in den Modellierungen keine Perkolation in die Kontur ausgewiesen wird, siehe Abbildung 73.

Hierbei spielt auch eine Rolle, dass die Bohrung B4 höher liegt als die Bohrung B2 und damit insgesamt weniger von der Entspannungszone der darunter aufgefahrenen Hohlräume betroffen ist. Dementsprechend war zu erwarten, dass eine Gasperkolation in das Salinar – wenn überhaupt – erst bei höherem Druck als in der Bohrung B2 einsetzen würde. Im kontinuumsmechanischen Modell beginnt erst in der letzten Druckstufe von 9,5 MPa – abweichend zum In-situ-Versuch – ein druckgetriebener Perkulationsvorgang mit einhergehendem Druckabfall in der Bohrung. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die modellierte Bohrung B4 im idealisierten Einzelmodell zentral über der Streckenmitte angelegt ist, während sie in der Realität noch näher am Stoß platziert ist. Damit wirkt dort in situ vermutlich eine noch höhere Einspannung als im Modell, weswegen die Simulation hier die Perkolation in der letzten Druckstufe konservativ überschätzt.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die kontinuumsmechanischen Modellierungen also trotz generalisierter Modelle und isotropem Permeabilitätsmodell den Großteil der Ergebnisse der In-situ-Versuche erfolgreich replizieren konnten. Lediglich der Gasdurchbruch (bei Überfahren der B2) entlang der Zementkontur und der horizontalen Schwächeflächen kann mit diesen Modellen nicht erfasst werden. Hierfür wäre beispielsweise eine diskontinuumsmechanische Berechnung heranzuziehen. Diskontinuumsmethoden erweitern die Möglichkeiten von kontinuumsmechanischen Ansätzen, indem sie Schichtflächen und Kontakte als zusätzliche Freiheitsgrade einführen, über die diskrete Körper miteinander wechselwirken können. Für die Beschreibung des Verhaltens dieser Kontakte existieren Stoffmodelle, die Haft- und Gleitreibung beschreiben können, aber auch andere Parameter wie Porendrucke. Durch die Möglichkeit den Kontaktflächen, -kanten und Punktkontakten hydraulische Parameter zuzuweisen, wird so eine zusätzliche hydromechanische Kopplung entlang von makro- und mikroskopischen Schichtflächen möglich. Dieser Ansatz ist besonders für polykristalline Gesteine, wie z. B. Salzgesteine, geeignet.

Im nachfolgenden Kapitel wird die H₂-Speicherung in einer Kaverne mit einem diskontinuumsmechanischen Modellansatz simuliert. Dabei werden Grenzen, die bei der Handhabung und Bewertung eines derartigen Modells erreicht werden, aufgezeigt und beleuchtet. Im Vergleich werden kontinuumsmechanische Berechnungen, welche bei der Bewertung von Erdgaskavernen dem Stand der Technik entsprechen, durchgeführt und es werden Empfehlungen für die Bewertung einer H₂-Kaverne im Speicherbetrieb gegeben.

4.5.2 Kavernenmodell und Simulation der Wasserstoffspeicherung

Zur Bewertung der geomechanischen Integrität eines H₂-Kavernenspeichers werden numerische Modellberechnungen herangezogen, die den Spannungszustand in einer hinreichend großen Umgebung der Speicherkaverne bewerten. Dabei werden thermische und fluidmechanische Wechselwirkungen mit dem Gebirge berücksichtigt. Voraussetzung ist eine genaue Kenntnis der Stratigraphie, der im Speicherhorizont vorherrschenden Spannungs- und Temperaturverhältnisse sowie der geplanten

Gasumschlagsraten und in welcher Zeit ein kompletter Gasumschlag realisiert wird. Der Betriebsplan muss dabei an die lokal vorhandenen Spannungsverhältnisse angepasst werden.

Der Druck in der Gasspeicherkaverne ist nach oben durch das Minimalspannungskriterium begrenzt, da mit einer Migration des gespeicherten Gases ins Gebirge zu rechnen ist, sobald der Druck in der Kaverne die minimale Hauptspannung im Gebirge übersteigt. Hierbei ist ein Sicherheitsfaktor von 10 % zu berücksichtigen. Ebenso muss eine ausreichend hohe Gebirgseinspannung an der technischen Installation, vor allem im Bereich der letzten zementierten Rohrtour vorhanden sein, um auch hier Undichtheiten zu vermeiden.

Der Druck in der Kaverne ist bezüglich des Minimaldrucks durch das Konvergenzverhalten und der damit einhergehenden obertägigen Senkungen limitiert. Steht die Kaverne unter einem sehr niedrigen Druck oder wird auf atmosphärischen Druck abgefahren, treten sehr hohe Differenzspannungen im umgebenden Gebirge auf, welche eine sehr hohe Konvergenzrate induzieren (siehe Untersuchungen im Abschnitt „Kontinuum mit mikrorissbasiertem Permeabilitätsmodell“). Dadurch wird zum einen das nutzbare Kavernenvolumen reduziert und zum anderen besteht die Gefahr, dass irreversible Bruchprozesse im Bereich der Kavernenkontur auftreten können.

Die zur Vorhersage von möglichen Risiken und zur Bewertung der Integritätskriterien verwendeten Modelle lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen, in kontinuumsmechanische und diskontinuumsmechanische Modelle unterteilen. Bei kontinuumsmechanischen Modellen wird das gesamte untersuchte Gebirgsvolumen durch ein Netz von Volumenelementen diskretisiert, welches nicht verändert werden kann. Bei diskontinuumsmechanischen Modellen wird das untersuchte Gebirgsvolumen in einzelne Volumenblöcke zerlegt, die als Kontinuum modelliert werden, sich gegeneinander jedoch bewegen und damit veränderliche Kontakte miteinander haben können. Kontakte können während der Laufzeit des Modells sowohl verloren gehen, als auch neu entstehen, je nachdem ob die Volumenelemente sich in räumlicher Nähe befinden oder nicht. Damit kann die Öffnung von Klüften und das Ausbreiten von Fluiden (druckgetriebene Perkolation) im Gebirge sehr gut modelliert werden. Auch die Richtungsabhängigkeit dieser Ausbreitung wird explizit berücksichtigt. Allerdings sind diskontinuumsmechanische Modelle in der Regel bei gleicher Vernetzungsgröße rechentechnisch sehr aufwändig und weniger praktikabel.

Diskontinuumsmechanisches Kavernenmodell

Um ein Beispiel für eine geomechanische Bewertung einer Speicherkaverne zu geben, wurde eine geometrisch optimierte Typkaverne mit einem Volumen von 600.000 m³ und einer Rohrschuhteufe von 850 m, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, untersucht. Im Folgenden ist dargestellt, wie der Modell-aufbau in einem diskontinuumsmechanischen Modell erfolgt.

Untersucht wurde ein Viertelraummodell mit einer Abmessung von 70 x 70 x 550 m, wobei die Seitenflächen sowie die Unterseite des Modells in horizontaler bzw. vertikaler Richtung fixiert wurden. Im Normalfall werden die Kantenlängen entsprechend der real im Kavernenfeld vorliegenden Bohrlochabstände erstellt. An der Oberseite des Modells wurde eine Last entsprechend des angenommenen Deckgebirges aufgebracht. Die Anzahl der rechentechnisch sinnvoll zu behandelnden Blöcke ist im diskontinuumsmechanischen Modellansatz limitiert. In der hier dargestellten Untersuchung wurde das Modell in 4.896 Blöcke diskretisiert. Dabei ist auch der Einsatz leistungsfähigerer Rechentechnik

nur sehr begrenzt möglich, da die nicht lineare Natur der Berechnungen und der komplexe Lösungsalgorithmus auch auf zahlreichen Kernen parallel ausgeführt, nur bis zu einer gewissen Anzahl von Prozessorkernen Geschwindigkeitsvorteile bringt. Für die Berechnungen wurde das Simulationsprogramm 3DEC 7.0 (DEM; Distinct Element Method) der Firma ITASCA Consultants GmbH (ITASCA Consulting Group Inc., 2021) verwendet.

Bei der Modellerstellung der ideal symmetrischen Typkaverne wurde zuerst ein geometrisches Modell der Kaverne generiert und anhand von Symmetrieebenen geviertelt, wodurch sich die Anzahl benötigter Volumenelemente in gleicher Weise reduzierte, siehe Abbildung 74 a). Danach wurden die Bereiche, in denen ein Eindringen des Fluides zu erwarten war, mittels der in 3DEC vorhandenen Voronoi-Zerlegung (Zerlegung des Raumes in Regionen, die durch eine vorgegebene Menge an Punkten des Raumes bestimmt werden) geteilt. Die Bereiche, die keinen Fluidtransport erwarten lassen, wurden in sehr grobe Quaderblöcke zerlegt, siehe Abbildung 74 b) und c). Alle erzeugten Blöcke wurden anschließend vernetzt, um in jedem Block kontinuumsmechanische Verformungen zuzulassen. Für die Netzfeinheit entscheidet i. d. R. die kleinste Kantenlänge des jeweiligen Blocks. Ein Beispiel für die Vernetzung der sich so ergebenden Kavernenkantur ist in Abbildung 74 d) gegeben.

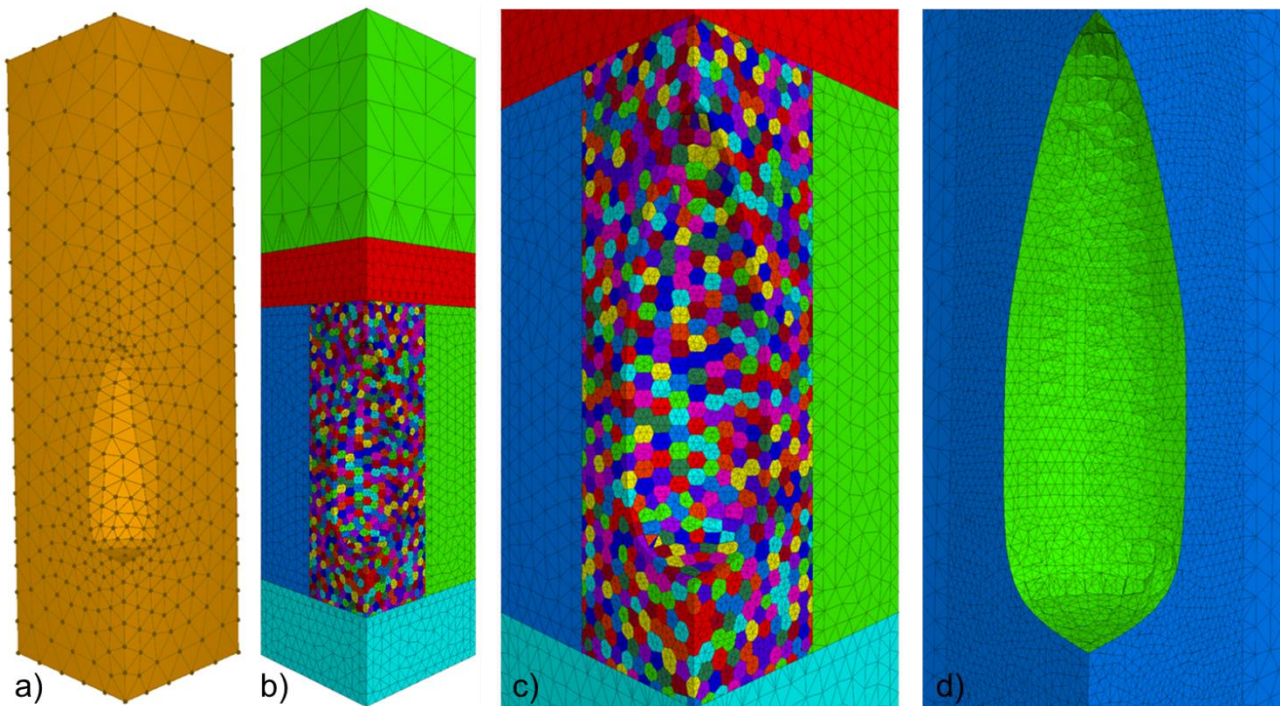


Abbildung 74: Erstellung eines Kavernenmodells: a) Kavernenkantur im Steinsalzhorizont, b) und c) Zerlegung des Modells in Blöcke, d) Vernetzung im Bereich der Kavernenkantur

Im Rahmen der geomechanischen Modellierung wurde anhand des Tiefendruckgradienten zuerst der Grundspannungszustand des Gebirges initialisiert und anschließend die Kaverne im Modell ausgesolt. Dabei wurde im vorliegenden Beispiel von einer kontinuierlichen Solung entlang der Kavernenachse ausgegangen. Anschließend wurde nach einer Standzeit unter Sole (entspricht ungefähr dem Zeitraum, der für die Installation der Bohrlochkomplettierung benötigt wird), die Gaserstbefüllung entsprechend der Angaben aus Kapitel 7 umgesetzt. Dabei wurde in die Kaverne systematisch der Wasserstoff eingebracht und die Sole verdrängt.

Tabelle 23: Betriebsparameter der Wasserstoffspeicherung, welche als Randbedingungen in das gebirgsmechanische Berechnungsmodell eingeflossen sind.

Kennwert	Einheit	Variante A (lithostatischer Teufendruck Gebirge $\gamma_{\text{Geb}} = 0,194$ bar/m)	Variante B (lithostatischer Teufendruck Gebirge $\gamma_{\text{Geb}} = 0,242$ bar/m)
Maximaler Betriebsspeicherdruck p_{MAX}	[bar]	140	174
Minimaler Betriebspeicherdruck p_{MIN}	[bar]	30	3
Einspeicherrate	[m ³ /h i. N.]	10.000/50.000	10.000/50.000
Ausspeicherrate	[m ³ /h i. N.]	100.000	100.000

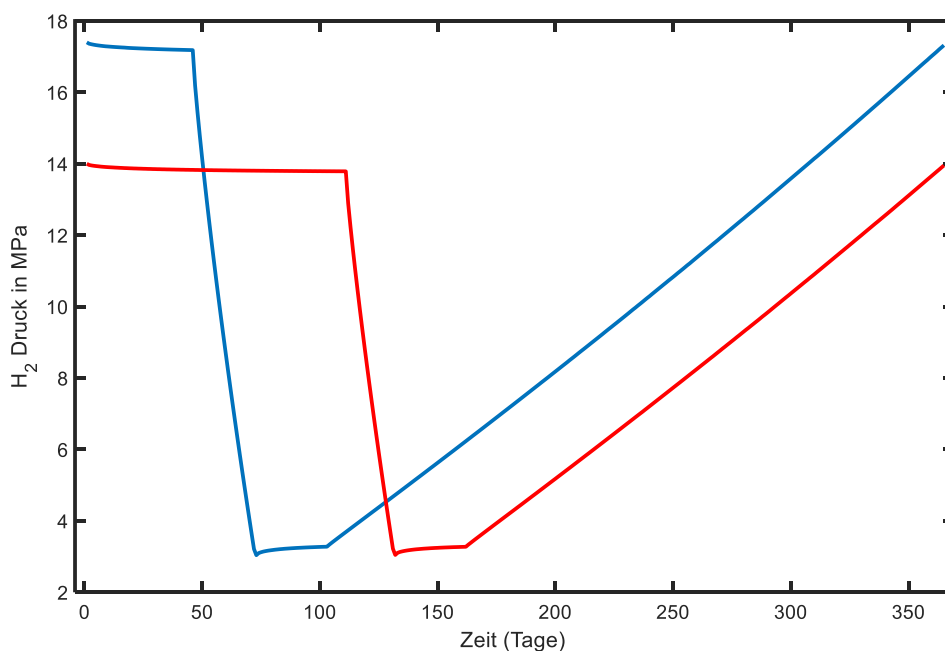


Abbildung 75: Schematische Darstellung der simulierten jährlichen Wasserstoffdruckregime. Der abgebildete volle Gasumschlag für Variante A (rot) und Variante B (blau) wurde in beiden Fällen mit einer Einspeicherrate von 10.000 m³/h i. N. gerechnet. Die maximale Standzeit bei minimalen Betriebspeicherdruck beträgt bei beiden Varianten 30 Tage.

Der Druckverlauf der Speicherzyklen wurde unter Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften des Wasserstoffs mit dem SCTS – Salt Cavern Thermal Simulator (RESPEC Company LLC., 2004) – berechnet. Verschiedene mögliche Fahrweisen wurden dabei in Betracht gezogen. Die Simulation beinhaltet thermodynamische Berechnungen aufgrund von Gaskompression und Entspannung sowie Wärmetransport vom und ins Gebirge. Dabei werden Temperaturänderungen im Gebirge durch das Einbringen der Sole näherungsweise berücksichtigt. Weiterhin wird der Temperatursgleich zwischen Wasserstoff und Gebirge während der Standzeiten bei minimalen und maximalen Speicherbetriebsdruck berechnet. Die vorläufige Druckfestlegung für den maximalen Speicherbetriebsdruck entsprechend der Erstellung einer Konzeptstudie (siehe Kapitel 4.3) resultierte dabei aus dem herrschenden lithostatischen Gebirgsdruck (siehe Tabelle 23) und sollte diesen zu 85 % nicht überschreiten. Die Festlegung hinsichtlich des minimalen Speicherdruckes stammt aus Erfahrungswerten aus der Erdgasspeicherung in ähnlicher Teufenlage. Ein- und Ausspeicherraten wurden aus Untersuchungen der Obertageanlage (siehe Kapitel 8) abgeleitet und für die geomechanischen Berechnungen übernommen. In Tabelle 23 sind die maßgebenden Kennwerte für die zu untersuchenden Speicherfahrweisen zusammengefasst und in Abbildung 75 schematisch dargestellt.

Die simulierten Gasspeicherzyklen entsprechen der saisonalen Fahrweise, d. h., einmal jährlich wird der Wasserstoff in der Kaverne komplett umgeschlagen. Beginnend bei maximalen Betriebspeicherdruck p_{MAX} wird die Kaverne mit der in Tabelle 23 genannten Rate bis zum minimalen Betriebspeicherdruck p_{MIN} leer gefahren. Anschließend steht die Kaverne 30 Tage im minimalen Druckbereich, ehe sie mit einer kontinuierlichen Rate wieder befüllt wird. Anschließend bleibt sie bis zum nächsten Gasumschlag bei Maximaldruck stehen. Die vorberechneten Betriebszyklen wurden im Folgenden als Randbedingung auf die Kavernenkontur aufgebracht.

Der Vorteil des diskontinuumsmechanischen Ansatzes besteht in der Möglichkeit, den diskontinuumsmechanischen Aufbau polykristalliner Salzgesteine auf mikromechanischer Ebene nachzuvollziehen. Die Modellgeometrie wird hierfür durch eine Zerlegung in viele unterschiedlich geformte Polyederblöcke mittels der Voronoi-Triangulation zerlegt, wodurch die diskontinuierliche Natur des Salzgesteins in den Simulationen in guter Näherung nachgebildet wird. Der diskontinuumsmechanische Ansatz ermöglicht es, die druckgetriebene Generierung von Fließwegen (druckgetriebene Perkolation) mit gekoppelten hydromechanischen Berechnungen zu simulieren (Minkley, Knauth, & Brückner, 2013). Eine mögliche H_2 -Perkolation im Zuge des Speicherbetriebes stand dabei im Fokus der hier vorliegenden diskontinuumsmechanischen Untersuchungen. Eine direkte thermische Kopplung zwischen Gas und Gebirge konnte im Modell nicht berücksichtigt werden. Aktuelle Modellansätze und Rechenleistungen lassen es noch nicht zu, thermo-hydromechanische (THM) Simulationen für die Bearbeitung größerer Modelle, wie es ein Kavernenmodell ist, in vertretbaren Zeiträumen durchzuführen. Die THM-Kopplung ist aktuell Gegenstand weiterer Untersuchungen. Die Temperatur wurde im Modell jedoch in Form des geothermischen Teufengradienten, welcher Auswirkungen auf das rheologische Verhalten (Kriecheigenschaften) des Salzgesteins hat, berücksichtigt. Ebenso wurde der Verlauf der Speicherdruckkurven, wie oben bereits erwähnt, thermodynamisch berechnet.

Zur Bewertung der Fluidausbreitung ins Gebirge wurde ein Simulationszeitraum von 30 Jahren veranschlagt, d. h., es wurden 30 volle Gasumschläge berechnet. Der gewählte Zeitraum entspricht in etwa der durchschnittlich veranschlagten Lebensdauer einer Gasspeicherkaverne. Der von der druckgetriebenen Perkolation betroffene Bereich ist in Abbildung 76 für den Druckzyklus bis 140 bar und

für den Druckzyklus bis 174 bar dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die maximalen Speicherbetriebsdrücke anhand der unterschiedlichen lithostatischen Teufendrucke (Gebirgsdruck), die einer unterschiedlichen geologischen Situation im Deckgebirge entsprechen, festgelegt wurden. Prinzipiell entsprechen beide Varianten in ihrem Maximaldruck 85 % des angesetzten Gebirgsdruckes, d. h., in der Ausnutzung des Gebirges waren ähnliche Ergebnisse zu erwarten. Dementsprechend ergab sich in beiden Fällen nach 30 Zyklen eine ähnliche Spannungsverteilung im Gebirge nach Erreichen des maximalen Speicherbetriebsdruckes. In Auswertung beider Modelle konnte eine H₂-Ausbreitung (Perkolation) von ca. 20 m in das umliegende Gebirge ausgewiesen werden. Dieser Umstand ist bei Pfeilerdimensionierung für die Anlage eines Kavernenfeldes entsprechend zu berücksichtigen und bereits in der Konzeptplanung (Dimensionierung) mit zu verankern.

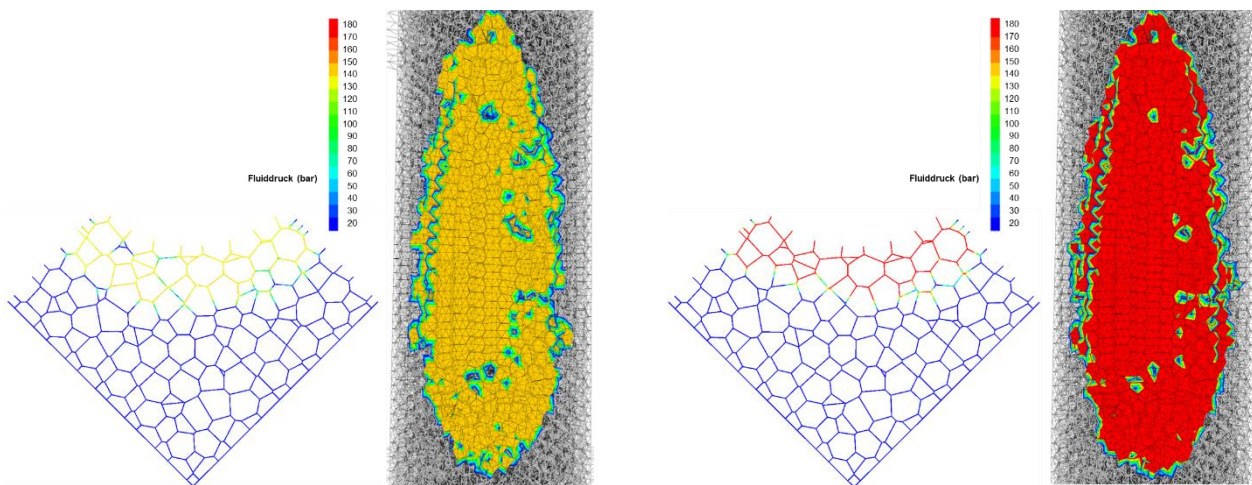


Abbildung 76: Gasdruckverteilung nach 30 Zyklen bei einem Maximaldruck von 140 bar (links) und bei einem Maximaldruck von 174 bar (rechts). Für beide Fälle sind eine halbtransparente Vertikalansicht und ein horizontaler Querschnitt in einer Teufe von 950 m abgebildet.

Kontinuumsmechanisches Kavernenmodell

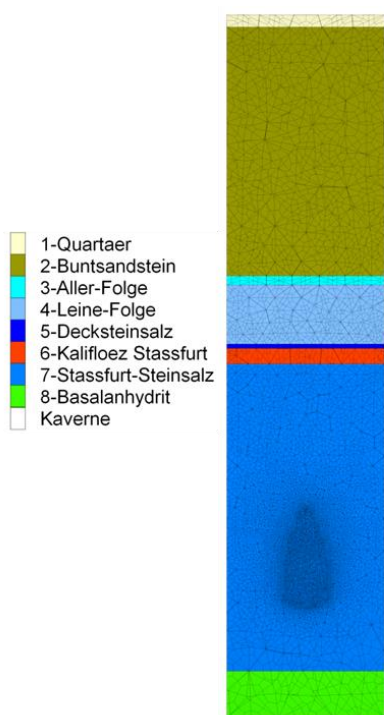


Abbildung 77: *Stratigraphische Schichtung und Modellgeometrie im kontinuumsmechanischen 3D-Modell*

Im Folgenden wird ein Vergleich zu einem kontinuumsmechanischen Modell derselben Kaverne, welches mit FLAC3D (ITASCA Consulting Group Inc., 2018) simuliert wurde, dargestellt. Hierbei konnte auf die Reduktion der Netzelemente durch Symmetrieflächen verzichtet werden. Dies erlaubt eine Berücksichtigung weniger idealer Kavernengeometrie, wie sie in realen Szenarien durchaus vorkommen kann (reale Ultraschallmessungen). Die Modellausdehnung beträgt 140 x 140 x 1.300 m. Stratigraphische Besonderheiten im Hangenden wie im Liegenden konnten explizit berücksichtigt werden. Im Gegensatz hierzu beinhaltet das diskontinuumsmechanische Modell nur den entscheidenden Steinsalzhorizont. Auch hier wurden an allen Seitenflächen und der Unterseite des Modells die Normalverschiebungen fixiert. Das Modell besteht aus ca. 700.000 Zonen. Die Modellgeometrie und die stratigraphischen Horizonte sind in Abbildung 77 dargestellt. Über dem relevanten Speicherhorizont im Staßfurt-Steinsalz (Staßfurt-Folge) finden sich im Modellbeispiel weitere stratigraphische Einheiten des Zechsteins, Buntsandsteins und des Quartärs. Diese geologische Abfolge ist repräsentativ für die flache Lagerung des Zechsteins in Mitteldeutschland. Der zeitliche Ablauf der Simulation entspricht der im diskontinuumsmechanischen Modell. Zur Vergleichbarkeit beider Modelle wurde auf eine thermo-mechanische Kopplung im kontinuumsmechanischen Modell bewusst verzichtet.

Um Aussagen für die Integrität der Speicherkaverne treffen zu können und einen Vergleich zum diskontinuumsmechanischen Modell herzustellen, werden im kontinuumsmechanischen Modell vielfach bei der Erdgasspeicherung erprobte Integritätskriterien (Minkley, Lindert, & Brückner 2011) angewandt und im Folgenden aufgeführt.

1. Bewertung der geologischen und technischen Dichtigkeit bei maximalen Speicherdruck:

Minimalspannungskriterium: Die Kaverne muss von einer ausreichend mächtigen Zone umgeben sein, in der der maximale Speicherbetriebsdruck in der Kaverne kleiner ist als die minimale Hauptspannung im Gebirge. Hierbei ist ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 10 % zu berücksichtigen. Für diese Bereiche kann eine fluiddruckinduzierte Vernetzung von Fließwegen (Perkolation) bzw. ein lokales Aufreißen des Gebirgskörpers ausgeschlossen werden.

Technisches Dichtheitskriterium: Die wirkende Druckeinspannung durch das Gebirge im Bereich der letzten zementierten Rohrtour muss größer sein als der in der Kaverne herrschende maximale Speicherbetriebsdruck. Hierbei ist ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 15 % zu berücksichtigen.

2. Bewertung der Stabilität bei minimalen Speicherbetriebsdruck:

Dilatanzkriterium: Zu jedem Zeitpunkt muss ein hinreichend mächtiger Bereich, ohne dilatant geschädigte Zonen um die Kaverne existieren. Wird die Dilatanzgrenze überschritten, setzt plastische Volumenzunahme ein. Konturnah wird bei einer realen Kavernengeometrie praktisch immer Dilatanz ausgewiesen. In diesen Bereichen kann es zu konturbereinigenden Prozessen kommen, welche zu einer idealen Kavernenform hinführen. Daraus sind in erster Linie keine Einschränkungen bezüglich des Betriebes zu besorgen. Bezogen auf eine ideale Typkaverne, wie sie im vorliegenden Leitfaden untersucht wurde, sind keine dilatanten Verformungen zu erwarten.

Die sich durch die numerische Modellierung im Kontinuum ergebenden Spannungszustände in den einzelnen Betriebsphasen der H₂-Speicherung wurden nun mit Hilfe der oben aufgeführten Kriterien bewertet.

Analysiert man die im Modell berechneten Spannungszustände, die sich im Verlauf der simulierten Betriebsphase beim Anstehen des maximalen Speicherdrucks p_{MAX} ausbilden, so war festzustellen, dass die Typkaverne von einer ausreichend bemessenen Zone umgeben ist, in der die minimale Druckeinspannung σ_{MIN} um 10 % größer als der maximale Speicherdruck p_{MAX} ist. In Abbildung 78 (links, grün bis blaue Bereiche) ist das Verhältnis des Kaverneninnendrucks zur minimalen Hauptspannung unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors für die Variante B ($p_{MAX} = 17,4$ MPa) dargestellt. Für alle Bereiche $> 0,9$ ist das geologische Dichtheitskriterium erfüllt. Für alle Zonen, in denen ein Wert $< 0,9$ ausgewiesen wird (Abbildung 78 links, gelb bis rote Bereiche), ist mit einer Perkolation entlang der Korngrenzen prinzipiell zu rechnen. Durch die Vielzahl möglicher Diskontinuitäten auf allen Skalen wird an dieser Stelle konservativ angenommen, dass alle vom Spannungszustand her gefährdeten Zonen auch betroffen sind. Der ausgewiesene Bereich befindet sich konturnah, allseitig um die Kaverne und hat eine Ausdehnung von ca. 20 m. Er entspricht dem im diskontinuumsmechanischen Modell durch druckgetriebene Perkolation beeinflussten Bereich. Somit ergibt sich eine ausgezeichnete qualitative Übereinstimmung beider Berechnungsmethoden. Demzufolge kann das kontinuumsmechanische Modell als abdeckend im Sinne der Sicherheitskriterien betrachtet werden. Der maximale Speicherdruck kann als zulässig erachtet werden und die geologische Dichtheit um die Typkaverne für die saisonale Fahrweise mit Wasserstoff ist belegt.

Die Einhaltung der Anforderung an die technische Dichtheit ist der Abbildung 78 rechts zu entnehmen und im Bereich der letzten zementierten Rohrtour erfüllt. In Abbildung 78 ist das Verhältnis des Kaverneninnendrucks p_{MAX} zur horizontal wirkenden Spannungskomponente unter der Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 15 % für Variante B dargestellt. Man erkennt, dass über dem Kavernendach ein hinreichend großer Bereich ausgebildet ist (dunkelblaue bis blaue Zonen), in dem das technische Sicherheitskriterium erfüllt ist. Demzufolge gewährleisten beim Anfahren des maximalen Speicherdruckes die horizontalen Druckspannungen im Kavernendachbereich den dichten Verschluss des Verbundes Rohrtour/Zement/Salzgestein. Die wirkende radiale Druckeinspannung ist für die saisonale Fahrweise mit Wasserstoff in ausreichendem Maße oberhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour gegeben.

Die Auswertung der Modellvariante A ($p_{\text{MAX}} = 14,0 \text{ MPa}$) ergab vergleichbare Ergebnisse wie für Variante B. Die Ergebnisse werden hier nicht separat dargestellt.

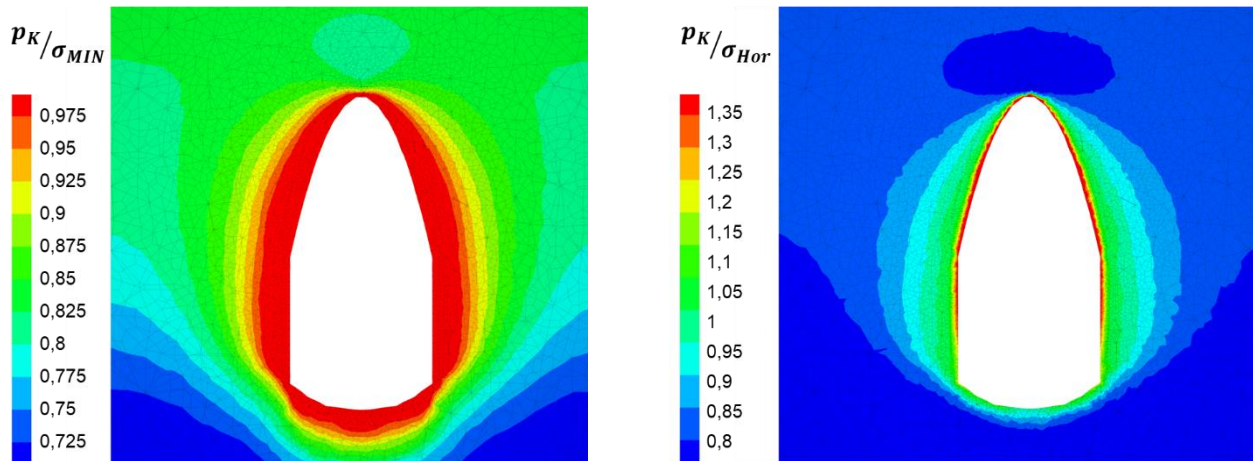


Abbildung 78: Bewertung des maximalen Speicherbetriebsdruckes. Minimalspannungskriterium zur Bewertung der geologischen Dichtigkeit (links) und horizontale Einspannung zur Bewertung der technischen Dichtigkeit (rechts)

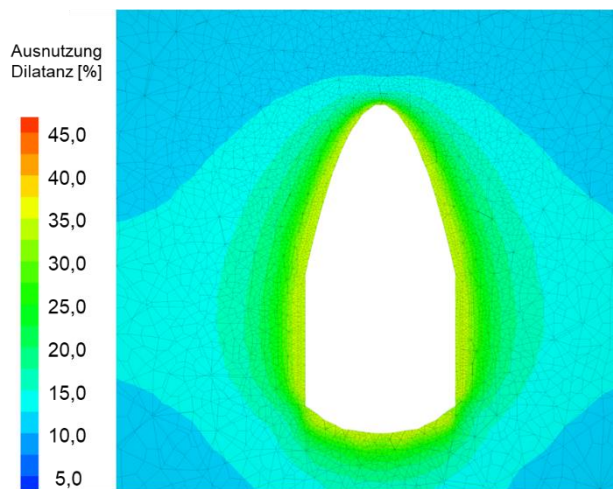


Abbildung 79: Bewertung des minimalen Speicherbetriebsdruckes. Ausnutzung der Dilatanzgrenze zur Bewertung der Standsicherheit.

Die Bewertung der Stabilität der Tragsysteme (Hangendschwebe, Pfeiler und Kontur) um die Kaverne erfolgte auf der Basis der unter Berücksichtigung der Langzeitfestigkeit des Salinargesteins prognostizierten plastischen Volumenverformungen (Dilatanz). Unterhalb der Dilatanzgrenze gibt es keinen plastischen Verformungszuwachs, d. h., für diejenigen Bereiche des Tragsystems kann jegliche Mikrorissbildung ausgeschlossen werden. Die Belastung ist dabei bei Erreichen des minimalen Speicherbetriebsdruckes an der Kavernenkantur am größten und nimmt in Richtung des Pfeilers ab.

Die Ausnutzung der Dilatanzgrenze im Kavernenmodell ist in Abbildung 79 dargestellt. Die Berechnungen zeigen, dass keine plastischen Volumenverformungen (Dilatanz) akkumuliert werden und das Gebirge durch den H_2 -Betrieb keine Schädigung erfährt.

Die Dilatanzgrenze wird im konturnahen Bereich zu maximal 40 % ausgenutzt. Die Bereiche des Pfeilers und der Kavernenkontur können für den simulierten H₂-Betrieb als langfristig stabil und sicher ausgewiesen werden.

Kontinuum mit mikrorissbasiertem Permeabilitätsmodell

Im Folgenden wird ein Proof of Concept aufgeführt, welches zeigt, wie die Sicherheitsnachweisführung gestärkt werden könnte mit kontinuumsbasierten Simulationen mit mikrorissbasiertem Permeabilitätsmodell. Dies ermöglicht theoretisch eine genauere Ausweisung der hydraulisch aktivierten Zone um die Kaverne sowie die Quantifizierung von Masseinfiltration in die Auflockerungszone.

Um dieses Verhalten nachzubilden haben (Zill, et al., 2021) auf Basis der Arbeit von (Olivella & Alonso 2008) ein Permeabilitätsmodell entwickelt, welches ein orthogonales Rissebenensystem in die finiten Elemente einbindet („embedded fracture permeability“). Eine zufällige räumliche Rotation des Rissebenensystems über alle finiten Elemente erzeugt schließlich eine quasiisotrope Permeabilität. Das Modell erfordert drei Parameter: die intrinsische Permeabilität k_m vom ungestörten Salzgestein, den mittleren Rissabstand a und eine Grenzdehnung ε_0 , die überschritten werden muss, um einen Permeabilitätsanstieg zu bewirken. Für die Kavernensimulationen wurde für k_m aus praktischen Gründen zunächst mit einem Wert von 10^{-21} m^2 gerechnet – niedrigere Permeabilitäten sind möglich, aber sorgen für eine langsamere Konvergenz bei der Simulation. Der mittlere Rissabstand a sollte mit 1 cm in guter Näherung übereinstimmen und die Grenzdehnung ε_0 wird auf 0 gesetzt, mit der Annahme, dass der elastische Anteil der Dehnung nahezu vollständig auf die Öffnung der Rissebenen zurückzuführen ist. Entsprechend dieser Annahme wurde das Modell dahingehend angepasst, dass in Kombination mit dem nachfolgend beschriebenen Kriechmodell nur der elastische Dehnungsanteil in das Permeabilitätsmodell eingeht.

„Zur Simulation des mechanischen Verhaltens von Steinsalz werden üblicherweise viskoplastische Materialmodelle wie Günther-Salzer (Günther, et al., 2015), LUBBY2 (Heusermann, et al., 1983) oder Minkley (Minkley & Mühlbauer, 2007) verwendet. Das Kriechverhalten in den genannten Modellen entspricht in hohem Maße den experimentellen Ergebnissen unter stark abweichenden Belastungsbedingungen. Das drucklösungsinduzierte Kriechen ist bekanntlich der dominierende Faktor für das Kriechen bei niedrigen deviatorischen Spannungen (Urai, et al., 1986) (Spiers, et al., 1990) und seine Bedeutung wurde seither mehrfach nachgewiesen (Spiers, et al., 1998) (Ter Heege, et al., 2005) (Urai, et al., 2007). Erst kürzlich wurde dieses lineare Kriechphänomen aufgrund der groben Korngröße auch in natürlichem Salz beobachtet, was die früheren Arbeiten bestätigt (Bérest, et al., 2019). In Anbetracht der Bedingungen in [Salzkavernen] kann dieser Effekt das Ergebnis einer numerischen Simulation des Langzeitkriechens erheblich beeinflussen. Daher sollte ein Materialmodell gewählt werden, das diesen Effekt berücksichtigt, um das in Experimenten beobachtete physikalische Verhalten zu erfassen. [...] Ein Materialmodell, welches das Drucklösungskriechen mitberücksichtigt, ist das Power-Law-Linear-Creep-Modell (PLLC-Modell). Im Gegensatz zum BGRa-Modell (Hunsche & Schulze, 1994) nutzt es einen zweiten Arrhenius-Term, um das Kriechen bei niedrigen deviatorischen Spannungen zu berücksichtigen, von dem angenommen wird, dass es von Drucklösungseffekten dominiert wird (Spiers, et al., 1990), was zu einem zusammengesetzten Kriechgesetz führt, das bereits vielfach verwendet wurde, Formel 4, (Spiers, et al., 1998) (Urai, et al., 2007):

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A \exp(-Q/RT) \left(\frac{\sigma}{\sigma_f}\right)^n + \frac{A_2}{D^3 T} \exp(-Q_2/RT) \left(\frac{\sigma}{\sigma_f}\right) \quad \text{Formel 4}$$

Dabei ist σ die von Mises-Vergleichsspannung und $A = 0,18 \text{ d}^{-1}$, $n = 5,0$ und $Q = 54 \text{ kJ/mol}$ sind Parameter, die durch Experimente bestimmt werden. $R = 8,314462 \text{ J K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ist die universelle Gaskonstante und $\sigma_f = 1 \text{ MPa}$ ist eine Referenzspannung.“ (Zill, et al., 2022) Abbildung 80 zeigt verschiedene real gemessene Kriechraten bei unterschiedlichen mechanischen Spannungen. Das beschleunigte Kriechen bei niedrigen deviatorischen Spannungen, die beispielsweise durch das PLLC-Modell gut abgebildet werden können, ist dort dargestellt.

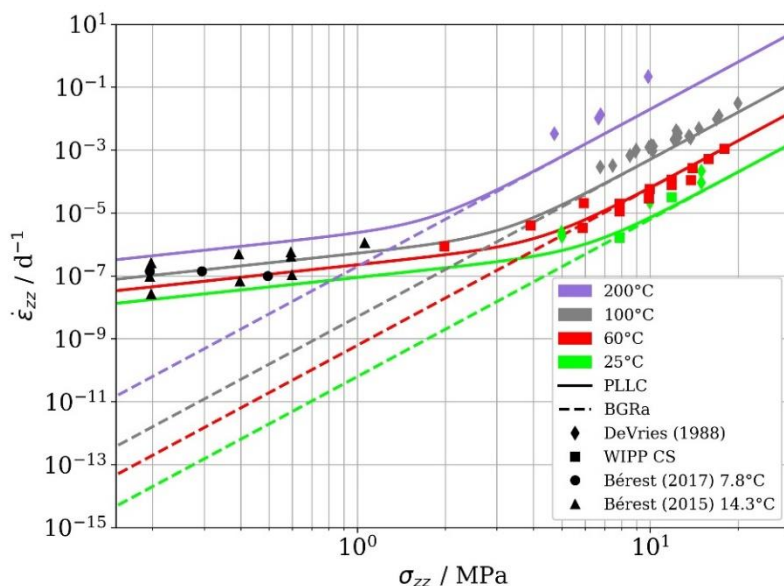


Abbildung 80: Vergleich der Kriechraten von Salzgestein in Abhängigkeit der Deviatorspannung zwischen dem BGRa- und PLLC-Materialmodell und realen Messdaten (abgewandelt von (Bérest, et al., 2019))

Um den Entstehungsprozess der Kaverne in der Simulation zu berücksichtigen, kann an der Kavernekontur eine entsprechende Normalspannungsrandbedingung angebracht werden:

1. Lithostatischer Spannungszustand an der gesamten Kavernekontur,
2. Solung: Hydrostatischer Spannungszustand stellt sich ein beginnend vom Kavernengrund,
3. Ruhephase,
4. Soleverdrängung: ein steigender Gasdruck ersetzt von dem Kavernenhimmel aus das hydrostatische Druckprofil durch einen einheitlichen Druck,
5. Kissengasablass: Der Druck wird bis zum minimalen Betriebsdruck reduziert.

Anschließend kann der Speicherbetrieb entsprechend des Betriebsregimes simuliert werden. Abbildung 81 stellt diesen Ablauf anhand von drei Messpunkten entlang der Kavernenkontur dar – mit einem vollständigen Be- und Entladezyklus pro Tag im Speicherbetrieb. Die dargestellte Vernetzung ist beispielhafter Natur. Das verwendete Modell für die nachfolgenden Ergebnisse hat eine Ausdehnung von 2 km in der Vertikalen und 1 km in der Horizontalen. Eine Konvergenzanalyse zeigte keine weitere signifikante Veränderung der betrachteten Ergebnisse bei einer Elementanzahl von etwa 200.000 Elementen.

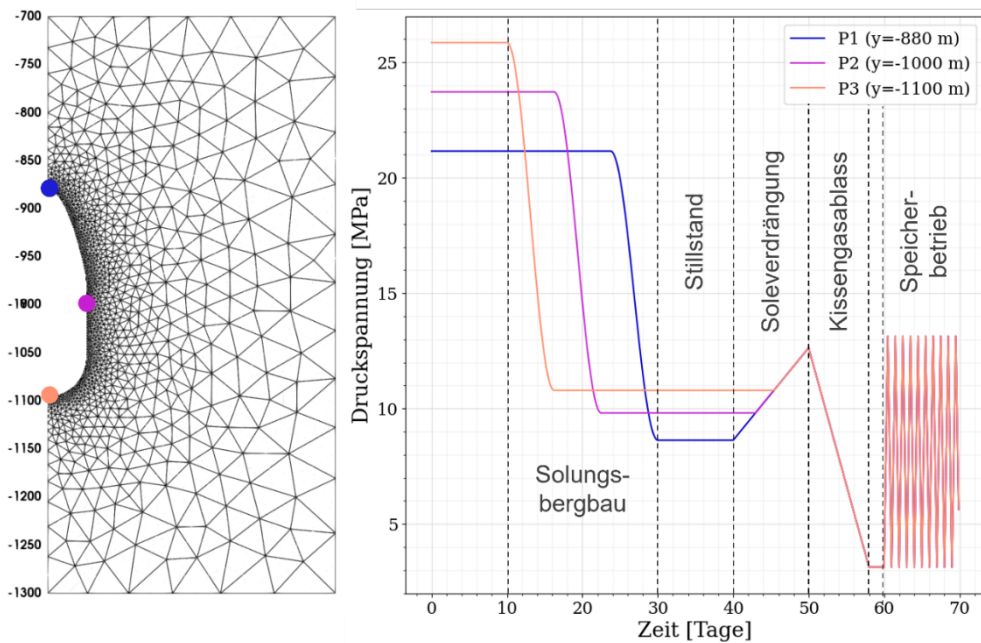


Abbildung 81: Beispiel für Kavernendruckverlauf während des Entstehungsprozesses

Um den Einfluss des Drucklösungskriechens zu verdeutlichen, wurden rein mechanische Simulationen durchgeführt, die nach der Kavernenentstehung den Kavernendruck für 30 Jahre konstant halten bei minimalem (30 bar) und maximalem (130 bar) Betriebsdruck. Ein Vergleich der Kavernenkonvergenz in Abbildung 82 über diesen Zeitraum zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den Ergebnissen mit dem BGRa- und dem PLLC-Modell.

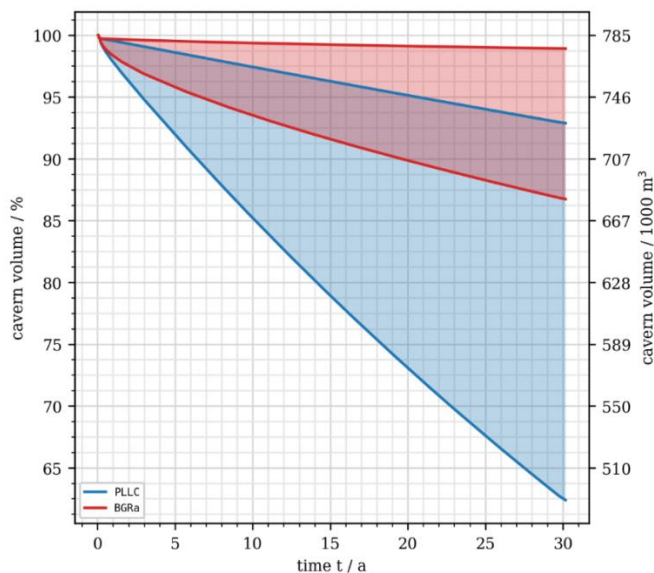


Abbildung 82: Exemplarischer Vergleich der Kavernenkonvergenz bei statischem Druck zwischen BGRa- und PLLC-Modell

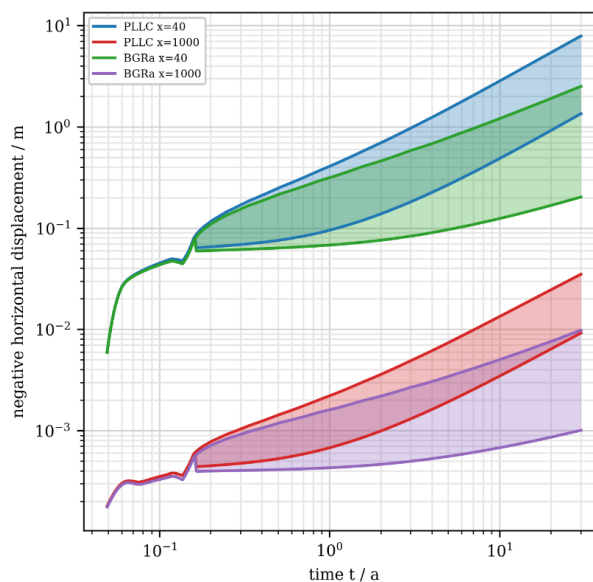


Abbildung 83: Exemplarischer Vergleich der Horizontalverschiebung an der Kavernenkontur ($x = 40\text{m}$) und in 1 km Entfernung zwischen BGRa- und PLLC-Modell

In gleicher Weise zeigt Abbildung 83 die Horizontalverschiebungen direkt an der Kavernenkontur auf mittlerer Höhe und in 1 km Entfernung. Beide Darstellungen zeigen deutlich: Je geringer der Druck in der Kaverne ist, desto stärker unterscheiden sich die Vorhersagen beider Modelle. Zudem ist der Einfluss des Drucklösungskriechens stärker in großer Entfernung zur Kaverne, da dort ein isotroperer Spannungszustand herrscht und der „Power-law“-Anteil am Kriechen geringer ist.

Anschließend wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um den Einfluss der Minimal- und Maximaldrücke, der Zyklenzahl pro Jahr und der Verweildauer bei Minimaldruck zu untersuchen. Dafür wurden Simulationen durchgeführt, bei denen im Speicherbetrieb der Kavernendruck in einem Trapezprofil zwischen Minimal- und Maximaldruck verläuft. Die Kavernenkonvergenz in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter ist in Abbildung 84 dargestellt. Die Parameter wurden wie folgt variiert: Zyklenzahl pro Jahr $n = [2, 25, 50]$, die Verweilzeit bei Minimaldruck $t = [1, 2]$ Tage, Minimaldruck $p_{min} = [30, 40]$ bar und Maximaldruck $p_{max} = [130, 140]$ bar. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Kurven in zwei Plots dargestellt (links $t = 1$, rechts $t = 2$). Die Ergebnisse deuten auf eine Proportionalität zwischen der Konvergenzrate und der insgesamt bei Minimaldruck verbrachten Zeit hin, sowie auf eine inverse Proportionalität zum Minimaldruck und Maximaldruck, wobei diese stark davon abhängt,

wie hoch der Anteil der verbrachten Zeit beim jeweiligen Druck ist. Diese Ergebnisse sind beispielhafter Natur und stark geometrie- und materialmodellabhängig.

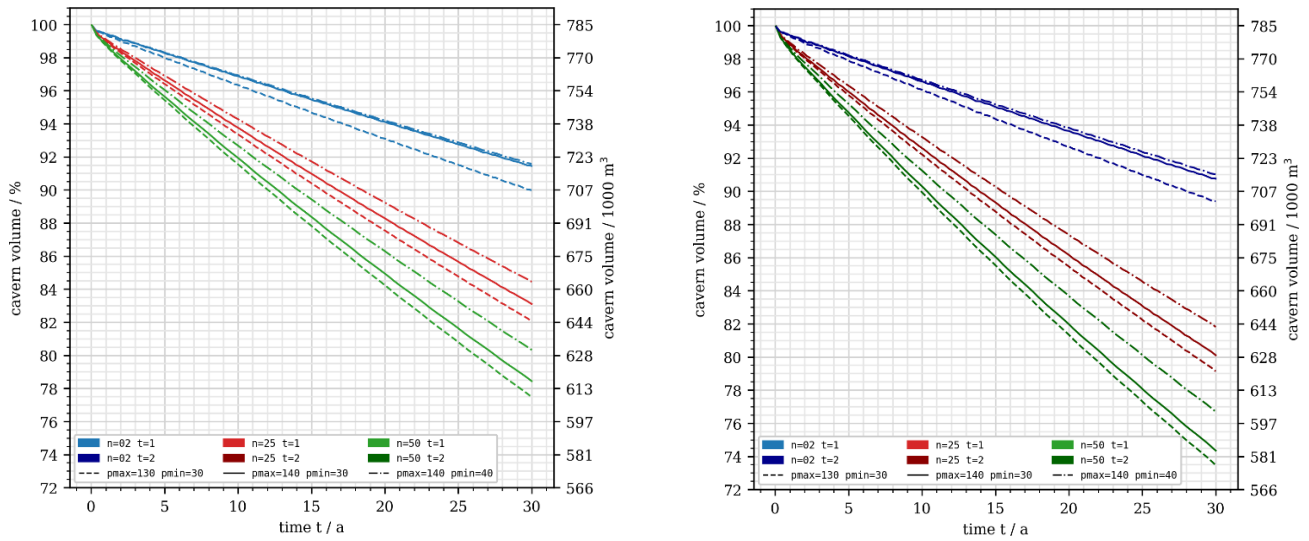


Abbildung 84: Exemplarische Kavernenkonvergenz bei verschiedenen Minimal- und Maximaldrücken, Zyklen pro Jahr und Verweildauer bei Minimaldruck

Die Simulationsergebnisse dieser Parameterstudie wurden ebenfalls genutzt, um die Absenkung über der Kaverne vorherzusagen, siehe Abbildung 85. Diese zeigen grundsätzlich dieselben Abhängigkeiten wie für die Konvergenzrate. Überraschenderweise produziert das Simulationsmodell bei den hohen Zyklenzahlen ($n = [25, 50]$) und nach etwa 15 Jahren eine Richtungsumkehr im Absenkungsvorgang über der Kaverne, sodass sich ab dann die Geländeoberkante langsam wieder anhebt. Dies ist ein deutliches Zeichen dafür, dass dieses Modell noch nicht hinreichend genau die realen Vorgänge abbildet, da dieses Verhalten bei echten Kavernen nicht festgestellt wird (Tajdus, et al., 2021) (Wei, et al., 2016). Vermutlich ist in dem Modell das Kriechen von umliegendem Gebirge in Richtung Kaverne so stark, dass dabei die Kaverne nicht mehr einheitlich komprimiert wird, sondern in eine länglichere Form gezwungen wird, was das Anheben über der Kaverne bewirkt. Ein Materialmodell, welches eine Verfestigung des Salzgesteins berücksichtigt, würde diesen Aspekt realistischer abbilden.

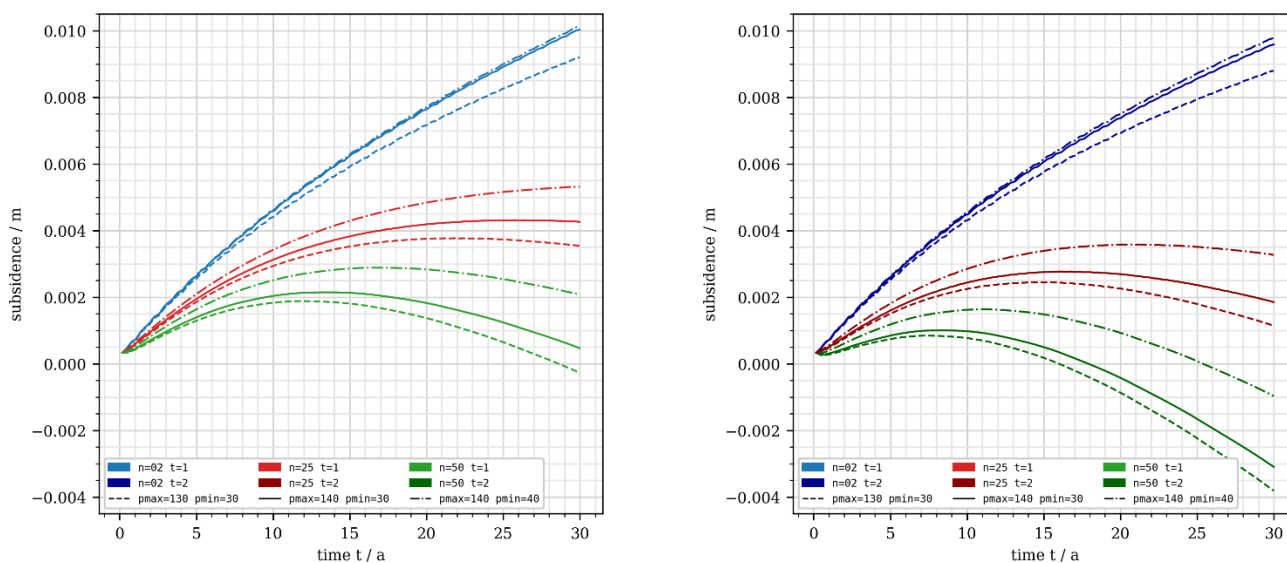


Abbildung 85: Exemplarische Absenkung über der Kaverne bei verschiedenen Minimal- und Maximaldrücken, Zyklen pro Jahr und Verweildauer bei Minimaldruck

In einem nächsten Schritt wurde das Kavernenmodell hydraulisch-mechanisch gekoppelt simuliert in der Konfiguration mit 25 Zyklen pro Jahr und einem Tag Verweildauer bei Minimaldruck. Die Dichte des Wasserstoffs wurde in der Simulation konstant gehalten mit 10 g/cm^3 , was ungefähr der Dichte bei Maximaldruck von 140 bar entspricht. Diese Vereinfachung verbesserte deutlich die numerische Konvergenz der Simulation im Gegensatz zur impliziten Berechnung der Dichte über das ideale Gasgesetz und sollte zudem konservativere Ergebnisse produzieren. Als Materialmodell wurde das PLLC-Modell verwendet und für das Permeabilitätsmodell wurden Varianten gerechnet mit dem „embedded fracture permeability“ Modell (Zill, et al., 2021, $k = f(\varepsilon_{el})$), dem spannungsabhängigen Modell aus Kapitel 4.5.1 (siehe Abbildung 68, blaue Kurve, $k = f(\sigma_{eff})$) und mit konstanter isotroper Permeabilität von $k = 10^{-21} \text{ m}^2$. Die Simulation mit spannungsabhängiger Permeabilität wurde bereits nach einem Zeitraum von 1,5 Jahren abgebrochen, aufgrund deutlich größerer Simulationslaufzeit wegen einer geringen numerischen Konvergenz und kleineren Zeitschritten. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden im Folgenden aufgeführt. In Abbildung 86 ist dargestellt, wie groß der Anteil des Wasserstoffs ist, der in die Kavernenwand infiltriert ist im prozentualen Anteil eines vollständigen Kaverneninhalts bei Maximaldruck über einen Zeitraum von fünf Jahren.

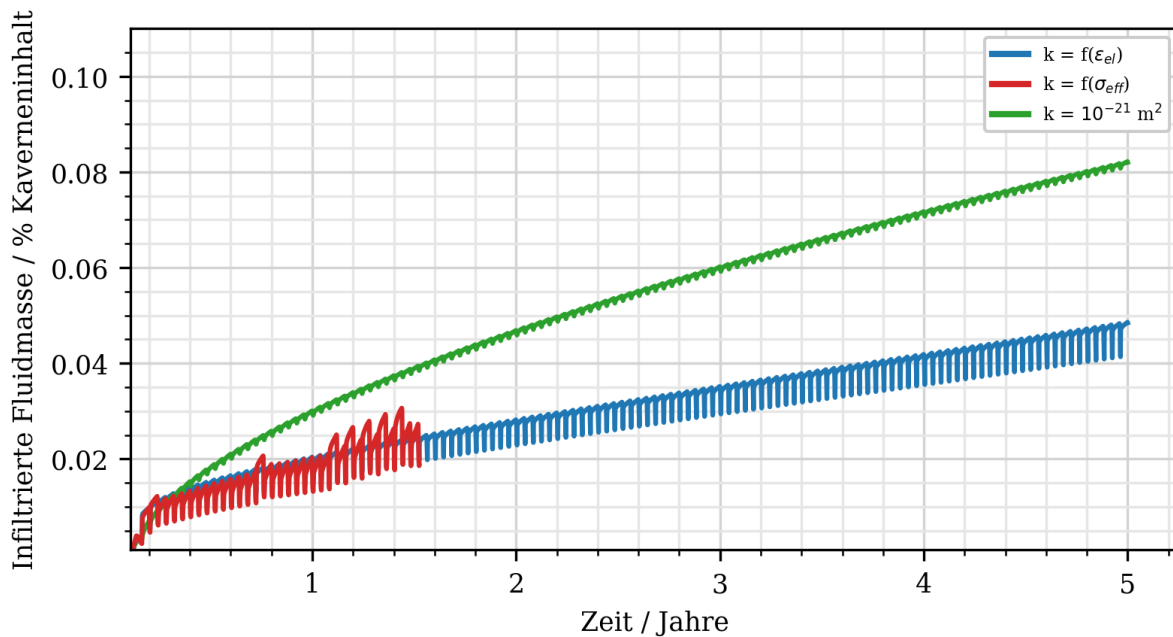


Abbildung 86: Exemplarische Darstellung der in die Kavernenwand infiltrierten Fluidmasse in Prozent einer Kavernenfüllung bei Maximaldruck, für drei verschiedene Permeabilitätsmodelle

Es ist zu erkennen, dass das $f(\varepsilon_{el})$ und das $f(\sigma_{eff})$ Modell sehr ähnliche Verläufe aufweisen. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass der physikalisch/geometrische Ansatz vom $f(\varepsilon_{el})$ Modell ein ähnliches Durchlässigkeitsverhalten erzeugt, wie das phänomenologische $f(\sigma_{eff})$ Modell. Simulationen mit konstanter isotroper Permeabilität von 10^{-21} m^2 ergeben unerwartet eine höhere Infiltration. Der Grund dafür liegt scheinbar darin, dass bei den dehnungs- und spannungsabhängigen Permeabilitätsmodellen eine hohe Durchlässigkeit herrscht, während der Kavernendruck niedrig ist. Dies erlaubt einen Großteil des bereits infiltrierten Fluids wieder zurück in die Kaverne zu entweichen. Mit konstanter Permeabilität tritt dieses Verhalten nicht auf. Dieser Zusammenhang müsste stark abhängig vom Betriebsregime sein, also von der Frequenz der Be- und Entladung der Kaverne und der Haltedauer bei Maximal-, Minimaldruck oder auch Zwischenstufen und sollte noch überprüft werden. Die unregelmäßigen Anstiege beim spannungsabhängigen Modell sind vermutlich auf unzureichende Netzfeinheit abseits des unmittelbaren Kavernenrandes zurückzuführen. Der dadurch verursachte Fehler könnte, sobald das Fluid diesen Bereich erreicht, bei dem $f(\sigma_{eff})$ Modell stärker ins Gewicht fallen und die beobachteten Unregelmäßigkeiten hervorbringen.

In Abbildung 87 ist dargestellt, wie sich die Permeabilität der beiden variablen Permeabilitätsmodelle verändert über die zyklische Be- und Entladung der Kaverne. Dafür wurde bei einem Zyklus nach etwa einem halben Jahr, also nach 12 Zyklen betrachtet, wie hoch die mittlere Permeabilität in radialer Richtung in Abhängigkeit vom Abstand zur Kavernenwand ist bei (1) Maximaldruck unmittelbar vor Entnahme, bei (2) 85 bar während der Entnahme, bei (3) Minimaldruck unmittelbar nach der Entnahme und bei (4) 85 bar während der Füllung.

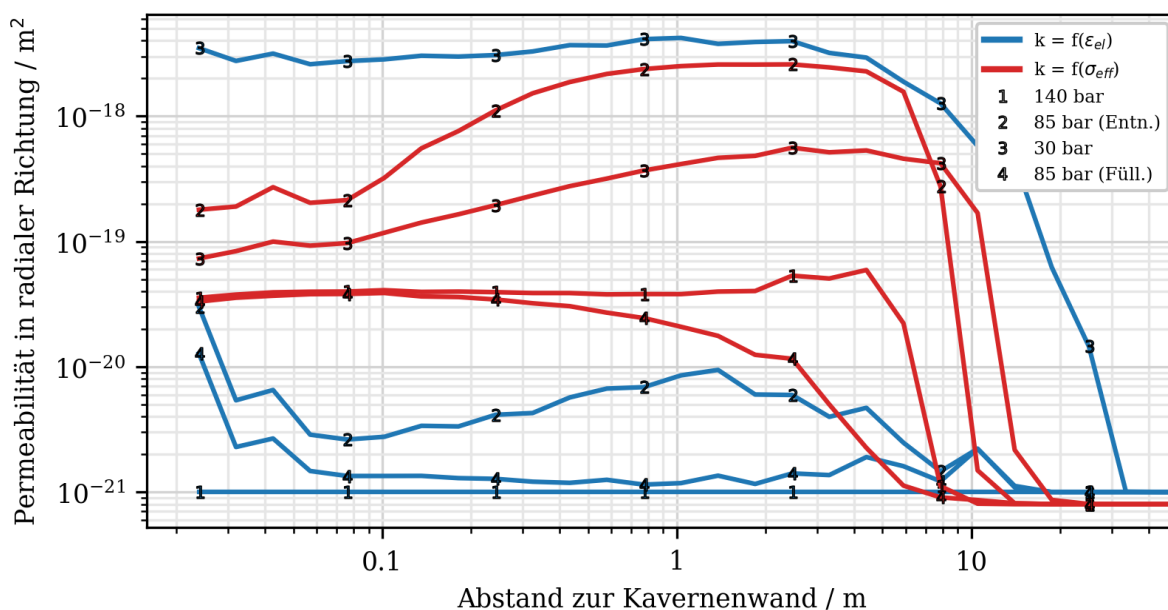


Abbildung 87: Exemplarische Darstellung der mittleren Permeabilität über den Abstand zur Kavernenwand zu verschiedenen Zeitpunkten eines Be- und Entladezyklus einer Kaverne

Das $f(\sigma_{eff})$ Modell zeigt unabhängig vom Fortschritt des Kavernenzyklus eine erhöhte Permeabilität bis zu einer Entfernung von etwa 10 m von der Kavernenwand. Dabei ist der höchste Permeabilitätsanstieg während der Entnahme festzustellen. Bei dem $f(\varepsilon_{el})$ Modell, hingegen, findet dieser unmittelbar nach der Entnahme statt. Zu den anderen Zeitpunkten des Zyklus ist die Permeabilität nur marginal oder gar nicht erhöht. Nicht zu erkennen in dieser Grafik ist, dass beim $f(\varepsilon_{el})$ Modell die einzelnen finiten Elemente eine sehr hohe Streuung bezüglich ihrer Permeabilität aufweisen aufgrund der zufälligen Rotation der Rissebenen, weswegen manche Elemente eine starke Erhöhung aufweisen und andere nur wenig oder keine Erhöhung der Permeabilität aufweisen. Die dargestellten Kurven zeigen schließlich den Mittelwert über alle Elemente in dem geraden Bereich der Kaverne (-957m bis -1.055m). Das $f(\sigma_{eff})$ Modell hingegen weist nur eine sehr geringe Streuung über die Elemente auf. Aufgrund der Verschiedenheit der Permeabilitätseigenschaften der beiden Modelle scheint es ungewöhnlich, dass in Abbildung 86 ein so ähnlicher Kurvenverlauf zu sehen ist. Um dies noch in einer anderen Darstellung zu zeigen, ist in Abbildung 88 dargestellt, wie sich die Permeabilität in Abhängigkeit vom Kavernendruck verändert. Exemplarisch dafür wird die mittlere Permeabilität in zwei Metern Abstand zur Kavernenwand gezeigt. Hier ist ebenfalls gut zu erkennen, wie unterschiedlich die Entwicklung während des Be- und Entladezyklus ist. In Anbetracht dieser Unterschiede könnte der ähnliche Kurvenverlauf in Abbildung 86 damit erklärt werden, dass die Permeabilitätsmaxima beider Modelle über die Be- und Entladezyklen ausreichend sind, um den Porenraum im Bereich, der von der

Permeabilitätserhöhung betroffen ist (etwa 10m), vollständig zu füllen innerhalb eines Zyklus, so dass der genaue Betrag der erhöhten Permeabilität nicht relevant ist für die Menge des infiltrierten Fluids. Der stetige Anstieg der infiltrierten Menge würde sich dann aus dem Fluid ergeben, welches in den Bereich eindringt, in dem die Permeabilität nicht bzw. nicht signifikant erhöht ist.

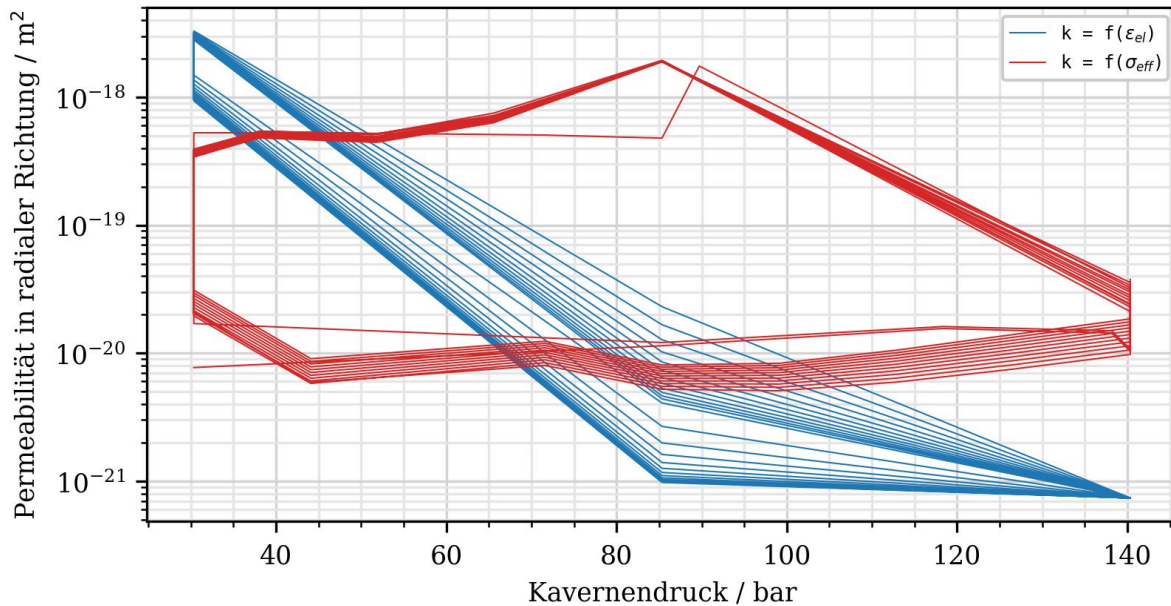


Abbildung 88: Exemplarische Darstellung der mittleren Permeabilität in zwei Metern Abstand zur Kavernenwand über den Kavernendruck während der zyklischen Be- und Entladung einer Kaverne

Ähnlich wie für die Fluidinfiltration und die Permeabilität, wurde außerdem analysiert, wie sich die Dilatanzzone über den Simulationszeitraum entwickelt. Für dessen Auswertung wurde das Minimalspannungskriterium verwendet und wie zuvor der Mittelwert über den geraden Kavernenbereich bestimmt. Da sich die Ausdehnung der Dilatanzzone stark über die Zyklen ändert, sind für eine bessere Übersicht, Hüllkurven in Abbildung 89 dargestellt für die drei zuvor betrachteten Permeabilitätsmodelle.

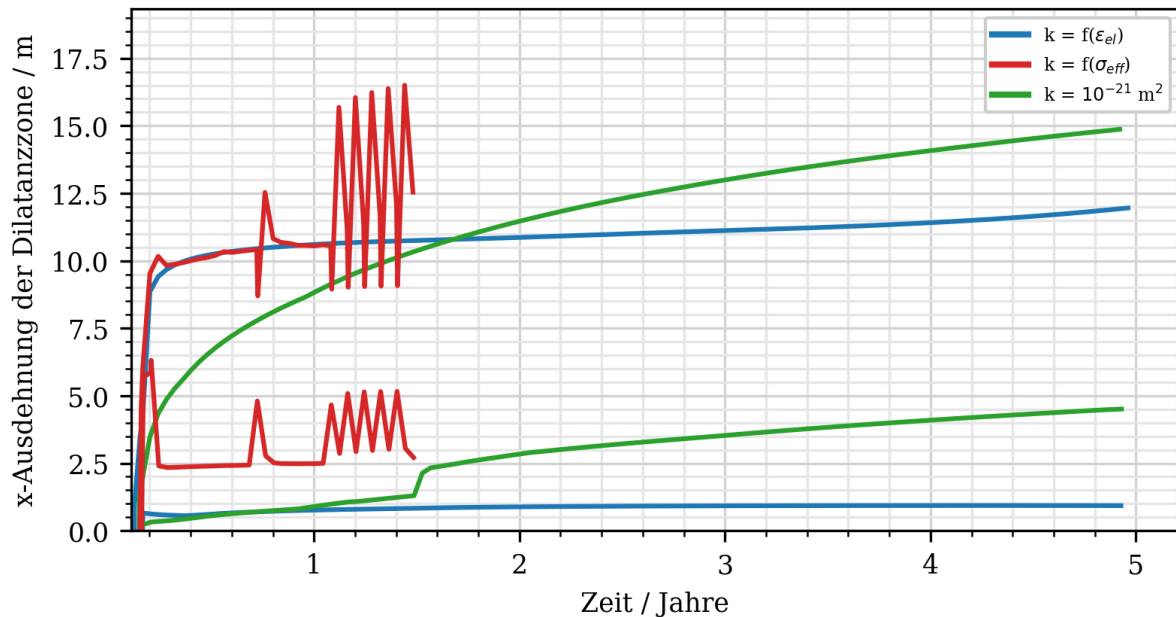


Abbildung 89: Exemplarische Darstellung der Ausdehnung der Dilatanzzone (Min. und Max. pro Zyklus) bei $y = -1.000 \text{ m}$

Die beiden Modelle $f(\epsilon_{el})$ und $f(\sigma_{eff})$ zeigen für die maximale Ausdehnung ebenfalls wieder ähnliche Verläufe. In der Entstehungsphase der Kaverne und in den ersten Zyklen ist zunächst ein sehr schneller Anstieg festzustellen, gefolgt von einer langsameren Ausbreitung. Die Sprünge in den Kurven mit dem $f(\sigma_{eff})$ Modell und die erneute Beschleunigung gegen Ende der Simulation mit dem $f(\epsilon_{el})$ Modell sind wie bei der Infiltration mutmaßlich auf unzureichende Netzfeinheit abseits des unmittelbaren Kavernenrandes zurückzuführen. Ähnlich wie auch bei der Infiltration zeigt auch das konstante isotrope Permeabilitätsmodell auf lange Sicht eine höhere Ausdehnung der Dilatanzzone. Die zuvor genannte Erklärung für die höhere Infiltration würde auch die größeren Dilatanzonen erklären: Da das infiltrierte Fluid nicht so schnell wieder in die Kaverne entweichen kann wie bei den variablen Permeabilitätsmodellen, bleibt ein höherer Fluiddruck tiefer im Gebirge bestehen, der damit eher die minimale Hauptspannung überschreiten kann.

Zur besseren Veranschaulichung ist in Abbildung 90 für das $f(\varepsilon_{el})$ Modell dargestellt, wo sich der Rand der Dilatanzzone nach einem halben Jahr befindet (gelb) zu vier Zeitpunkten während eines Zyklus (v.l.n.r.): (1) bei Maximaldruck vor Entnahme, (2) bei Minimaldruck nach Entnahme, (3) bei Minimaldruck vor Auffüllen und (4) bei Maximaldruck nach Auffüllen. Die Abbildung zeigt einen Teilausschnitt des Kavernenmodells, der den geraden Teil der Kavernenkontur zeigt. Zusätzlich zum Dilatanzbereich ist der Fluiddruck farblich dargestellt sowie die Vernetzung des Modells.

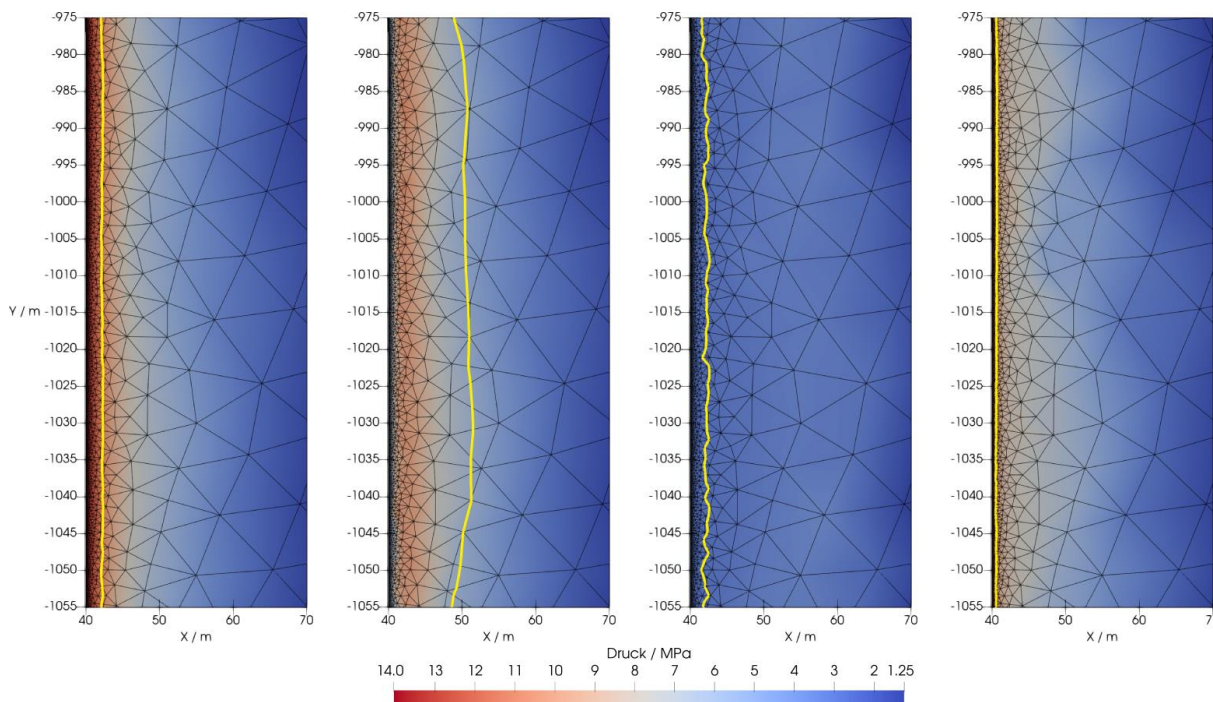


Abbildung 90: Ausschnitt des Kavernenmodells mit exemplarischer Darstellung der Dilatanzzone und des Fluiddrucks nach einem halben Jahr zu vier Zeitpunkten während eines Zyklus (v.l.n.r.): (1) vor Entnahme, (2) nach Entnahme, (3) vor Auffüllen, (4) nach Auffüllen

Es ist zu erkennen, dass die Dilatanzzone im betrachteten Fall die größte Ausdehnung aufweist, unmittelbar nach Erreichen des Minimaldrucks, wobei dieser schnell wieder eine geringe Ausdehnung annimmt, direkt vor dem nächsten Auffüllen, da der Fluiddruck aufgrund der hohen Permeabilität wieder absinken konnte. Während Maximaldruck in der Kaverne herrscht, bleibt die Ausdehnung der Dilatanzzone gering. Die dargestellte Vernetzung zeigt deutlich den Größenunterschied zwischen den finiten Elementen unmittelbar am Kavernenrand und denen in größerer Entfernung. Erstere wurden so klein gewählt, um nicht die Fluidinfiltration bei den geringen Permeabilitäten drastisch zu überschätzen. Allerdings kann diese feine Vernetzung nicht auf das ganze Modell angewendet werden, ohne die Modellgröße und die Rechenzeit so weit nach oben zu treiben, dass das Modell nicht mehr nutzbar ist. Das hier dargestellte Modell hat, abweichend zur verwendeten Vernetzung für die rein mechanische Simulation, ca. 62.000 finite Elemente. Da die rein mechanische Simulation deutlich performanter ist und keine Notwendigkeit bestand den Kavernenrand drastisch feiner zu vernetzen als den Rest des Modells, konnte dort mit einer größeren Elementzahl gerechnet werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass die räumliche Diskretisierung für die hydraulischen Vorgänge auch in mittlerer Entfernung zum Kavernenrand feiner aufgelöst werden muss. Ebenso muss eine feinere zeitliche Diskretisierung getroffen werden. Das $f(\varepsilon_{el})$ Modell konnte durchgängig mit einer

Zeitschrittgröße von einem halben Tag rechnen und damit einen längeren Zeitraum mit der Simulation abdecken. Das $f(\sigma_{eff})$ Modell hingegen hat durch die automatische Zeitschrittsteuerung und wegen schlechter Konvergenzeigenschaften mit diesem Permeabilitätsmodell mit viel feineren Zeitschritten gerechnet. Für eine bessere Vergleichbarkeit beider Modelle sollten beide nochmals mit einer niedrigen und konstanten Zeitschrittgröße rechnen, da die Vorgänge während der Be- und Entladezyklen der Kaverne möglicherweise nur sehr ungenau abgebildet werden können.

Da die Kombination von Material- und Permeabilitätsmodellen sich als sehr rechenintensiv gezeigt hat, muss eventuell anstelle der gesamten Kaverne und ihrer Umgebung mit Submodellen gearbeitet werden, um die Rechendauer zu reduzieren. High Performance Computing kann zusätzlich genutzt werden, um weiter die Simulationszeit zu reduzieren.

Neben den genannten Punkten ist dennoch festzustellen, dass die beiden Modelle $f(\varepsilon_{el})$ und $f(\sigma_{eff})$ für die infiltrierte Fluidmasse und die Ausdehnung der Dilatanzzone einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen. Weitere Untersuchungen können zeigen, ob dies dem Zufall geschuldet ist, oder ob der physikalische Ansatz konsistent ähnliche Ergebnisse erzielt wie der phänomenologische Ansatz.

Es ist nochmals zu betonen, dass die Ergebnisse in diesem Kapitel noch nicht quantitativer Natur sind und etwaige mögliche Schlussfolgerungen nicht korrekt sein müssen. Prinzipiell besteht jedoch die Möglichkeit mit Kontinuumsmodellen in Kombination mit viskoplastischen Materialmodellen und Permeabilitätsmodellen den Kavernenbetrieb zu simulieren, um den Sicherheitsnachweis zu führen. Es sind allerdings weitere Arbeiten nötig, um einen praxistauglichen Zustand mit diesem Ansatz zu erreichen.

4.6 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Aufgrund der durchgeführten Labor-, In-situ- und Modelluntersuchungen kann aus gebirgsmechanischer Sicht eingeschätzt werden, dass die H₂-Speicherung in behälterlosen UGS bezogen auf die gebirgsmechanischen Aspekte der Integrität und Stabilität ebenso möglich ist wie die Erdgasspeicherung. Richtlinien zur Anlage eines UGS (Dimensionierungsvorgaben) und Bewertungsmaßstäbe können dabei aus der Erdgasspeicherung übernommen und angewendet werden. Spezielle Handlungsempfehlungen, die sich von denen der Erdgasspeicherung unterscheiden würden, ergeben sich nicht.

Im Fokus weiterer Untersuchungen sollte der technische Aspekt der Bohrlochkomplettierung liegen. Der Kontakt der Bohrlochinstallation mit der Bohrlochzementierung sowie dem Salzgebirge stellt auch bei der H₂-Speicherung den entscheidenden Sicherheitsfaktor dar. Labor- und In-situ-Versuche haben gezeigt, dass die Qualität und das Anbindeverhalten der Zementation im Bohrloch ausschlaggebend für die technische Dichtheit der Kaverne sind. Ebenso wie bei Erdgaskavernen ist die technische Installation einer H₂-Kaverne auf seine Dichtheit mit Hilfe eines Mechanical-Integrity-Tests (MIT-Test) zu prüfen. Hier gilt es, bei der zukünftigen Anlage einer H₂-Kaverne Bewertungskriterien aus der Erdgasspeicherung auf ihre Anwendbarkeit in einem Realversuch zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

4.7 Literaturverzeichnis

- Amro, M., Häfner F., & Freese, C. (2012). Modern In situ Laboratory Measurements of Permeability and Porosity to Prove Tightness of Underground Storage of Hydrogen, Natural Gas and CO₂. SMRI Fall 2012 Technical Conference, Bremen.
- Bérest, P. (2007). Understanding of the THMC Processes in Salt Rocks. *6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, Hannover, 22.-25. May 2007.
- Bérest, P., et al. (2019). Very Slow Creep Tests on Salt Samples. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, S. 2917–2934.
- Böttcher, N., Görke, U.-J., Kolditz O., & Nagel, T. (2017). Thermo-Mechanical Investigation of Salt Caverns for Short-Term Hydrogen Storage. *Environmental Earth Sciences*, 76 (3), S. 98.
- Brace, W.F., Walsh, J.B., & Frangos, W.T. (1968). Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical Research*.
- Günther, R.-M., et al. (2015). Steady-State Creep of Rock Salt: Improved Approaches for Lab Determination and Modelling. S. 2603-2613.
- Häfner, F., Kornjaev, A., Pohl, A., & Voigt, H.-D. (1996). Permeabilitäts- und Porositätsmessungen an Gesteinsproben mit dem instationären Zweikammerverfahren. *Erdöl Erdgas Kohle*.
- Hildenbrand, A., Schlomer, S., & Krooss, B.M. (2002). Gas breakthrough experiments on fine-grained sedimentary rocks. *Geofluids*.
- Heusermann, S., Lux, K.-H. & Rokahr, R.-B. (1983). Entwicklung mathematisch-mechanischer Modelle zur Beschreibung des Stoffverhaltens von Salzgestein in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur auf der Grundlage von Laborversuchen und begleitenden kontinuumsmechanischen Berechnungen [...]. Hannover: Institut für Unterirdisches Bauen. Schlussbericht zum BMFT/PLT-Forschungsauftrag ET 2011 A.
- Hunsche, U., & Schulze, O. (1994). Das Kriechverhalten von Steinsalz. *Kali und Steinsalz*, 11 (8/9), S. 238-255.
- ITASCA Consulting Group Inc. (2021). 3DEC – Distinct-Element Modeling of Jointed and Blocky Material in 3D, Version 7.00. Minnesota, USA.
- ITASCA Consulting Group Inc. (2018). FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension, Version 7.00. Minnesota, USA.
- Lüdeling, C., Minkley, W., & Naumann, D. (2019). Pressure-Driven Percolation in Rock Salt and Barrier Integrity in the High-p-T Regime – The PeTroS project. *Geophysical Research Abstracts*, 21.
- Maikranz, E. (2016). Historische Entwicklung des Tiefbohrzementes – Vom Portlandzement zum hoch-magnesiumresistenten HMR+ -Hochofenzement. *Erdöl Erdgas Kohle*.
- Minkley, W., Knauth, M., & Brückner, D. (2013). Discontinuum-mechanical behaviour of salt rocks and the practical relevance for the integrity of salinar barriers. *47th US Rock Mechanics Symposium, ARMA*, 23-26 June 2013 San Francisco, USA.

- Minkley, W., Lindert, A., & Brückner, D. (2011). The Improved IfG Storage Cavern Design Concept. *SMRI Fall 2011 Technical Conference*, 03-04 Oct. 2011 York, United Kingdom.
- Minkley, W., Lindert, A., & Schreiner, W. (2005). Zur Gebirgsmechanik von Gasspeicherkavernen. *Freiberger Forschungshefte C505*.
- Minkley, W., & Mühlbauer, J. (2007). Constitutive models to describe the mechanical behavior of salt rocks and the embedded weakness planes. Hannover. S. 119–127.
- Munz, C.-D., & Westermann, T. (2009). Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen. Ein interaktives Lehrbuch für Ingenieure. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg.
- Olivella, S., & Alonso, E. E. (2008). Gas Flow through Clay Barriers. *Géotechnique* 58 (3), S. 157–76.
- RESPEC Company LLC. (2004). Topical Report RSI-1760. Salt Cavern Thermal Simulator Version 2.0. User's Manual Respec an Integrated Consulting and Service Company. South Dekota USA.
- Spiers, C. J., & Carter, N. L. (1998). Microphysics of Rocksalt Flow in Nature. The Mechanical Behaviour of Salt IV. Clausthal-Zellerfeld. S. 115-128.
- Spiers, C. J., et al. (1990). Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. Special Publications. London: Geological Society.
- Tajdus, Krzysztof, et al. (2021). Surface Deformations Caused by the Convergence of Large Underground Gas Storage Facilities. s.l.: Energies.
- Ter Heege, J. H., De Bresser, J. H. P., & Spiers, C. J. (2005). Rheological behaviour of synthetic rocksalt: The interplay between water, dynamic recrystallization and deformation mechanisms. *Journal of Structural Geology*, S. 948–963.
- Urai, J. L., & Spiers, C. J. 2007. The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation.
- Urai, J. L., Spiers, C. J., Zart, H. J., & Lister, G. S. (1986). Weakening of rock salt by water during long-term creep. *Nature*, S. 554–557.
- Wei, L., et al. (2016). A new method of surface subsidence prediction for natural gas storage cavern in bedded rock salts. *Environmental Earth Sciences*.
- Zill, F., Lüdeling, C., Kolditz, O., & Nagel, T. (2021). Hydro-Mechanical Continuum Modelling of Fluid Percolation through Rock Salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104879.
- Zill, F., Wang, W., & Nagel, T. (2022). Influence of THM process coupling and constitutive models on the simulated evolution of deep salt formations during glaciation periods. Utrecht.

5 Mikrobiologie

Petra Bombach⁸, Guido Nowack⁹, Laura Schwab¹⁰, Carsten Vogt¹⁰

5.1 Einleitung

Wasserstoff kann von zahlreichen Mikroorganismen verwertet werden und den Speicherprozess durch H₂-Zehrung, Bildung von Schwefelwasserstoff (H₂S) und Korrosion negativ beeinflussen. Aktuell gibt es zur mikrobiellen H₂-Umsetzung in Salzkavernen keine Erfahrungen. Ziel der Untersuchungen war, die mikrobiellen Risiken für die H₂-Speicherung in Salzkavernen zu bewerten und zu minimieren. Da mikrobielle Prozesse von unterschiedlichen Faktoren (mikrobielle Gemeinschaften, Nährstoffe, pH, Temperatur, etc.) abhängig sind, wurden im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS mikrobielle Konsortien in verschiedenen Salzkavernen charakterisiert und die hydrogeochemischen Eigenschaften der Sole bestimmt, welche maßgeblich die mikrobiellen Prozesse beeinflussen. In Laborversuchen wurde der Einfluss einer H₂-Exposition auf die vorgefundenen mikrobiellen Konsortien untersucht und im Weiteren Maßnahmen zur Hemmung mikrobieller H₂-Umsetzungsprozesse erprobt. Zur Erfassung mikrobieller H₂-Umsetzungsprozesse während einer H₂-Einspeicherung wurde die Eignung der Analyse stabiler Isotope (²H/¹H, ¹³C/¹²C, ¹⁸O/¹⁶O, ³⁴S/³²S) geprüft. Im Ergebnis der mikrobiologischen Untersuchungen wurden verschiedene Potenziale der H₂-Zehrung abgeleitet. Bei der Planung und Realisierung einer H₂-Kaverne ist daher der Einfluss mikrobieller Prozesse auf die H₂-Speicherung zu prüfen. Hierfür wurden Untersuchungskonzepte zur Bewertung und Minimierung mikrobieller Risiken entwickelt.

5.2 Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf mikrobiologische Aspekte

Mikroorganismen sind in der Erdkruste weitverbreitet. In Salzkavernen wurde unter den vorherrschenden sauerstofffreien (anoxischen) Bedingungen eine Entwicklung von thermophilen (wärmeliebend), barophilen (druckliebend) und halophilen (salzliebend) Mikroorganismen nachgewiesen (Vreeland et al., 1998; Bordenave, Chatterjee and Voordouw, 2013; Basso et al., 2009). Neben ursprünglich vorhandenen Mikroorganismen können diese auch durch Bohrung, Solung oder Wartungsarbeiten an Sonden in Salzkavernen eingebracht werden. Mikroorganismen zeichnen sich durch eine Vielzahl von Stoffwechselwegen und Anpassungen an extreme Standorte wie hohe Salzgehalte, Drücke und Temperaturen aus (Ivanova et al., 2007; Tarasov et al., 2011). Voraussetzung für mikrobielles Leben ist die Anwesenheit von Wasser, verschiedenen in höheren Konzentrationen benötigten Elementen („Makroelementen“) wie Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphat, verschiedenen in geringen Konzentrationen benötigten Elementen („Mikroelementen“) wie Metallen sowie einer Energiequelle. Wasserstoff kann von zahlreichen Mikroorganismen als Energiequelle verstoffwechselt werden (Cord-Ruwisch, Seitz and Conrad, 1988; Morita, 1999; Stevens, 1997). Im Unterschied zu Methan, welches in Untergrundgasspeichern (UGS) ohne Sauerstoff nicht in signifikanten Mengen mikrobiell umgesetzt wird,

⁸ Isodetect GmbH, Deutscher Platz 5b, D-04103 Leipzig

⁹ MicroPro GmbH, Magdeburger Straße 26b, D-39245 Gommern

¹⁰ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH, Department für Isotopenbiogeochemie, Permoserstraße 15, D-04318 Leipzig

kann eine Einspeisung von Wasserstoff oder Erdgas-Wasserstoff-Gemischen in UGS mikrobielle Stoffwechselprozesse stimulieren, wenn es die lokalen Milieubedingungen zulassen. Einen entscheidenden Einfluss auf die mikrobiellen Prozesse hat die Anwesenheit von terminalen Elektronenakzeptoren wie Eisen, Sulfat, elementarer Schwefel oder Kohlendioxid. Eine Übersicht der potenziellen mikrobiellen Prozesse, welche zu einer H₂-Zehrung in Kavernen führen könnten, ist in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Übersicht potenzieller mikrobieller Prozesse infolge einer Wasserstoff-Untergrundspeicherung

Reaktion	Reaktionsgleichung	Metabolischer Prozess
(1)	$\text{H}_2 + 2 \text{Fe}^{3+} \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{Fe}^{2+}$	Eisenreduktion
(2)	$4 \text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4 \text{H}_2\text{O}$	Sulfatreduktion
(3)	$\text{H}_2 + \text{S}^0 \rightarrow \text{HS}^- + \text{H}^+$	Schwefelreduktion
(4)	$4 \text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{H}_2\text{O}$	Hydrogenotrophe Methanogenese
(5a)	$4 \text{H}_2 + 2 \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4 \text{H}_2\text{O}$	Homoacetogenese
ggf. (5b)	$4 \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	Acetoklastische Methanogenese
ggf. (5c)	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	Sulfatreduktion mit Acetat

Die Einspeisung von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoff-Gemischen kann mikrobielle Prozesse in UGS begünstigen und dadurch technische Schäden mit ökonomischen Folgen verursachen. Mögliche Risiken sind: (I) Verlust des Speichergutes durch H₂-Zehrung, (II) Minderung der Gasqualität und Versauerung des UGS durch H₂S-Bildung, (III) Korrosion durch Stoffwechselprodukte, und (IV) Biofilmbildung an Anlagenteilen. Der mikrobiellen Sulfat- und Schwefelreduktion kommt aufgrund ihrer negativen Auswirkungen eine hohe Bedeutung bzgl. der Gefährdung des Speicherbetriebs zu.

Zur möglichen Stimulationswirkung von Wasserstoff auf mikrobielle Lagerstättengemeinschaften existieren nur wenige Erfahrungen. Aus der Zeit der Stadtgasspeicherung in Porenspeichern wurde einzeln eine mikrobiell bedingte Abnahme der H₂- und CO₂-Konzentration und zeitgleiche Bildung von Methan beobachtet (Šmigáň et al., 1990). Im Forschungsprojekt Underground Sun Storage und Nachfolgeprojekt Underground Sun Conversion wurde gezeigt, dass während der Einspeicherung eines Wasserstoff-Erdgas-Gemisches bzw. Wasserstoff-Kohlendioxid-Erdgas-Gemisches in den Porenspeicher Lehen-002 Wasserstoff zu Methan durch in der Formation vorkommende methanogene Archaeen umgesetzt wird (Bauer, 23.12.2021).

Generell wird aus mikrobiologischer Sicht die Speicherung von Wasserstoff in Kavernen gegenüber Porenspeichern favorisiert. Ein Hauptargument ist die geringere spezifische Oberfläche, die Mikroorganismen zum Wachstum zur Verfügung steht. Zudem sind sie Stressfaktoren, wie hohen Salzgehalten (bis zur Sättigung) und Drücken, ausgesetzt.

Entscheidend für die Beurteilung des Entwicklungspotenzials von Mikroorganismen ist die Kenntnis der auf sie wirkenden chemischen, physikalischen und mikrobiologischen Standortbedingungen. Diese sind nicht nur zum aktuellen Zeitpunkt zu betrachten, da auch länger zurückliegende Veränderungen von Speichermedien oder Betriebsregime die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften nachhaltig verändern können. Anzustreben ist eine möglichst vollständige Abbildung der Kavernenbedingungen durch Erfassung mikrobiologisch relevanter Parameter (Tabelle 25).

Tabelle 25: Mikrobiologisch relevante Kavernenparameter

Kategorie und Matrix	Parameter
Chemische Parameter	
Speichergas	Methan, Kohlenwasserstoffe Wasserstoff Kohlendioxid Schwefelwasserstoff Feuchte
Sole/ Kavernenrückstand	pH-Wert Gesamtmineralisation Anionen (Chlorid, Chlorat, Karbonate, Sulfat, Thiosulfat, Sulfid) Kationen (Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen, Ammonium) Kohlenstoff (anorganisch, organisch, Fettsäuren, Alkohole, Kohlenwasserstoffe) Schwefelverbindungen (organisch, anorganisch)
Speichergestein	Prinzipiell wie Sole/Kavernenrückstand Mineralzusammensetzung (Halit, Anhydrit, Sylvit, Quarz, ...)
Physikalische Parameter	
	Temperatur (min., max.) Druck (min., max.)
Mikrobiologische Parameter	
	Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften Metabolisches Potenzial

Erste Informationen zum jeweiligen Kavernenstandort können den die Aufschlussbohrung begleitenden Analysen entnommen werden.

Zur Bewertung potenzieller mikrobieller Prozesse infolge einer H₂-Untergrundspeicherung sind weitere hydrogeo- und -isotopenchemische, mikrobiologische sowie molekularbiologische Analysen notwendig, auf die im nachfolgenden Kapitel im Detail eingegangen wird.

5.3 Untersuchungsmethoden

5.3.1 Auswahlkriterien der Kavernenproben

Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden drei Kavernentypen betrachtet:

- Typ I.B Erdgaskaverne mit vormaliger Stadtgasspeicherung,
- Typ I.C Erdgaskaverne,
- Typ I.D Kaverne Sole gefüllt,

Die mikrobiologischen Untersuchungen an einer **Kaverne mit Sole gefüllt** (Typ I.D) dienten dazu, die natürlich vorhandenen und ggf. durch Bohrung eingebrachten mikrobiellen Konsortien zu charakterisieren sowie einen möglichen Eintrag von Mikroorganismen während der Solung zu beurteilen. Aus der Zeit der untertägigen Stadtgasspeicherung sind mikrobielle H₂-Umsetzungsprozesse bekannt (Šmigáň et al., 1990). Untersuchungen an einem Aquiferspeicher zeigen, dass eine über zehnjährige Speicherung von Stadtgas mit einem H₂-Anteil von 50 % die Zusammensetzung mikrobieller Konsortien langfristig verändern kann, sodass auch nach über 40 Jahren ohne H₂-Speicherung noch H₂-verwertende Mikroorganismen in der Formation dominieren (Ranchou-Peyruse et al., 2019). Vor diesem Hintergrund wurde Probenmaterial aus **Erdgaskavernen mit vormaliger Stadtgasspeicherung** (Typ I.B) ins Untersuchungsprogramm aufgenommen, um ein Worst-Case-Szenario zu betrachten. Weiterhin wurde das Potenzial für mikrobielle H₂-Umsetzungsprozesse in **Erdgaskavernen** (Typ I.C) untersucht, die ausschließlich zur Erdgasspeicherung verwendet werden.

Es wurden Kavernendaten für 18 Kavernen am Standort Bad Lauchstädt erhoben. Beim Speicherbetreiber konnten dazu Abschlussberichte der Kavernenbohrungen über die Aussolung und zu Entleerungsarbeiten sowie Formblätter zum geologisch-technischen Zustand eingesehen werden. Betrachtet wurde der Zeitraum seit der Niederbringung der jeweiligen Aufschlussbohrung. Insgesamt wurden sechs Kavernen am Standort Bad Lauchstädt für eine Beprobung ausgewählt. Die Auswahl der Kavernen erfolgte mit besonderem Augenmerk auf mikrobiologisch relevante Parameter:

- Beginn und Dauer der H₂-Exposition (Stadtgas),
- Volumina der Kavernenrückstände (möglicher Reaktionsraum),
- Eintrag von kohlenstoffhaltigen Medien (mögliches Substrat),
- Art und Behandlung des Solungsmediums,
- Soleumlagerungen (insbesondere aus Stadtgaskavernen).

Als Kaverne in Solung wurde die Kaverne C ausgewählt. Die Arbeiten an der Kaverne begannen 2009 mit der Aufschlussbohrung. Seit 2010 befindet sich die Kaverne in Solung; mit der Besonderheit, dass die Sole in der Chloralkali-Elektrolyse verwendet wird. Die Sole wird im Kreislauf gefahren und durchläuft mehrere Prozessschritte. Von mikrobiologischer Relevanz sind hierbei eine Temperaturerhöhung auf ca. 90°C und die Stabilisierung mit Natronlauge, die zu einem pH-Wert oberhalb von 10 führt. Nur wenige Mikroorganismen sind bei pH-Werten oberhalb von 10 aktiv, und bei Temperaturen von 90°C ist zumindest eine Schädigung, wenn nicht Abtötung von in der Sole enthaltenen Mikroorganismen zu erwarten (Heinemann et al., 2021; Freeman et al., 2016; Harrison et al., 2013).

Als Erdgaskavernen mit vormaliger Stadtgasspeicherung wurden die Kavernen F und H ausgewählt. Die Aufschlussbohrungen erfolgten hier im Jahr 1974. Dem Soleprozess schloss sich 1979 die Gaserstbefüllung mit Stadtgas an. Stadtgas wurde bis 1993 gespeichert. Nach der Medienumstellung

fungieren beide Kavernen seit 1994 als Erdgasspeicher. In beide Kavernen wurde ein kohlenwasserstoffhaltiges Abdeckmedium eingebracht. Das Nutzvolumen beträgt 244.183 m³ (F) bzw. 241.785 m³ (H). Für die Restsole ergaben die letzten Vermessungen 10.994 m³ (F) bzw. 21.020 m³ (H).

Die Kaverne L repräsentiert den Typ I.C Erdgaskaverne. Aufschlussbohrung und Solung wurden 1990 abgeschlossen. Seit 1992 wird sie als Erdgasspeicher betrieben. Das Nutzvolumen beträgt 310.276 m³, als Restsole liegt ein Volumen von 16.206 m³ vor. Im Jahr 1993 wurde ein kohlenwasserstoffhaltiges Abdeckmedium eingebracht. Die Kaverne M (Typ I.C) wurde 1996 nach Beendigung der Solung erstmals mit Erdgas befüllt und ist seitdem als Erdgasspeicher in Betrieb, mit einem Nutzvolumen von 432.723 m³ und einem Restsolevolumen von 13.418 m³. Ebenfalls eine Typ I.C -Kaverne ist die Kaverne N. Die Solung erfolgte hier bis 1997. Seit 1998 ist sie als Erdgaskaverne in Betrieb. Das Nutzvolumen beträgt 341.576 m³ bei einem Restsolevolumen von 19.761 m³. In den Kavernen M und N wurde kein Abdeckmedium eingebracht. Die Kaverne N wurde 2013/2014 mit Sole gefüllt, die im Zuge der Solung einer anderen Kaverne den Chloralkali-Elektrolyseprozess durchlaufen hatte.

5.3.2 Entnahme der Soleproben

Das Probenmaterial für die mikrobiologischen und hydrochemischen Untersuchungen umfasste Sole aus einem Wasserabscheider, Dick- und Dünnssole aus einer Kaverne in Solung sowie Sole aus dem Kavernensumpf von Erdgaskavernen sowie Erdgaskavernen mit vormaliger Stadtgasspeicherung.

Im Wasserabscheider wird das bei der Gasauspeisung in dem feuchten Speichergas enthaltene Wasser abgeschieden. Der Abscheider wird wechselnd bei der Auspeisung verschiedener Kavernen benutzt. Bei der aus dem Wasserabscheider der Sammelleitung RS03-VK03.1 entnommenen Flüssigprobe handelt es sich um eine Mischprobe aus mehreren Kavernen, wobei zum Zeitpunkt der Probenahme vor allem aus der Kaverne F ausgespeist wurde. An der Kaverne in Solung (C) wurden Proben, der während des Solungsprozesses in die Kaverne eintretende Dünnssole und der austretenden Dünnssole genommen. Die Probenahme erfolgte über Ventile aus den obertägigen Soleleitungen (Abbildung 91).



Abbildung 91: Übersicht Bohrplatz Kaverne C, Bohrlochkopf (links), Entnahmestellen Sole (rechts)

Bei den Bestandskavernen des Typs I.A und I.B erfolgte eine Tiefenprobenahme von Sole aus dem Kavernensumpf gemeinsam mit den Firmen SOCON Sonar Control Kavernenmessung GmbH und der BLM – Gesellschaft für Bohrlochmessung mbH unter Verwendung druckfester Stahlzylinder mit einem Fassungsvermögen von 2 L, dargestellt in Abbildung 92. Um die mikrobiologischen Proben steril und sauerstofffrei zu entnehmen, wurde ein Probenahmeprotokoll entwickelt. Die Stahlzylinder wurden vor der Probenahme desinfiziert und Sauerstoff durch Vakuumieren entfernt. Entscheidend

für die Probenqualität ist die Druckentlastungsrate der Probensonde in der Hochdruckschleuse. Bei Einhaltung der maximalen Druckentlastungsrate wird eine Beschädigung und Platzen der Mikroorganismenzellen verhindert. Die Umsetzung der Protokollvorgaben gewährleistet, herstellerunabhängig mit verschiedenen Probenahmesystemen, Proben in hoher Qualität gewinnen zu können.

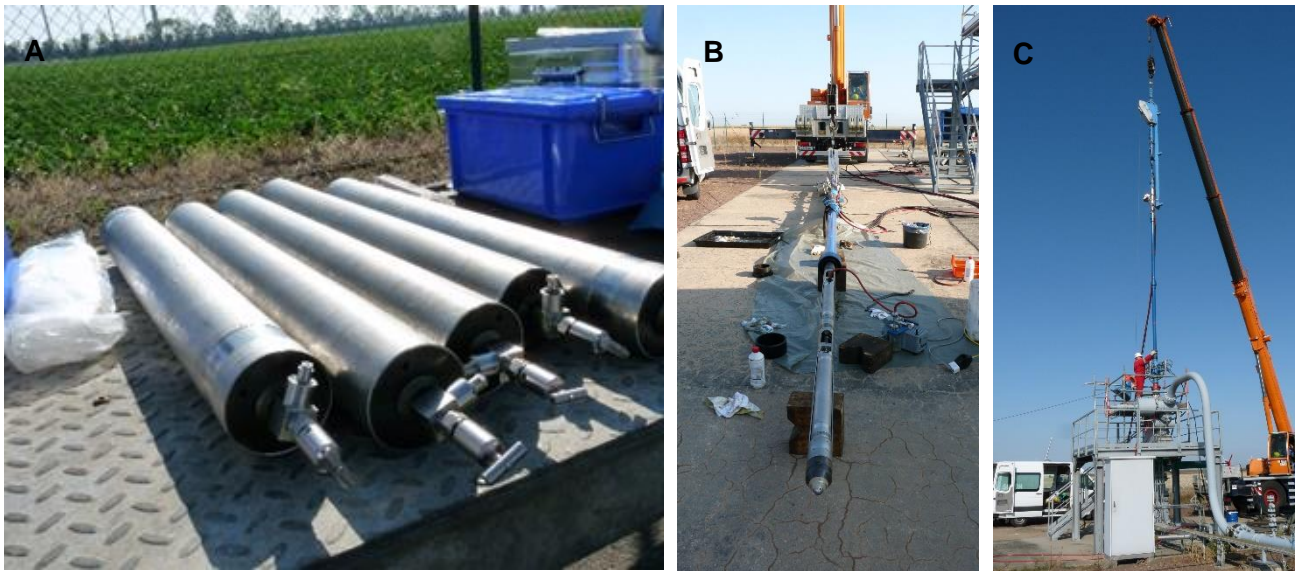


Abbildung 92: *Tiefenprobenahme: a) Probenbehälter (Firma SOCON), b) Trägermodul mit eingesetzten Probenbehältern, c) Einbringung der Probenahmebehälter*

Eine Übersicht über die Anzahl und Herkunft des gewonnenen Probenmaterials ist Tabelle 26 zu entnehmen.

Tabelle 26: Probenmaterial Bad Lauchstädt für mikrobiologische Untersuchungen

Kaverne/Anlage	Charakteristik Kaverne	Herkunft Probe	Teufe Probenmaterial [m]
Obertageanlage		Wasserabscheider, Mischprobe Kondensat aus verschiedenen Kavernen	obertägig
Kaverne C	Typ III Kaverne in Solung	Sole aus Dicksole- und Dünnssoleitung	obertägig
Kaverne F	Typ I.B Erdgaskaverne mit vormaliger Stadtgasspeicherung	Sole aus Kavernensumpf	877–878
Kaverne H	Typ I.B Erdgaskaverne mit vormaliger Stadtgasspeicherung	Sole aus Kavernensumpf	865–869
Kaverne L	Typ I.C Erdgaskaverne	Sole aus Kavernensumpf	909–915
Kaverne M	Typ I.C Erdgaskaverne	Sole aus Kavernensumpf	920–925
Kaverne N	Typ I.C Erdgaskaverne	Sole aus Kavernensumpf	866–868

Alle Proben für mikrobiologische Untersuchungen wurden in sterilen Probenahmegefäßen unter Stickstoffatmosphäre abgefüllt, um den Eintrag von Sauerstoff und nachfolgende oxidative Prozesse zu verhindern.

5.3.3 Entnahme von Gasproben

Am Standort Bad Lauchstädt wurden in verschiedenen Bestandskavernen punktuell Gasproben während der Ein- und Ausspeicherung entnommen und die Gaszusammensetzung sowie Kohlenstoff- ($\delta^{13}\text{C}$) bzw. H_2 -Isotopenverhältnisse ($\delta^2\text{H}$) der Speichergaskomponenten Methan und Kohlendioxid bestimmt, um deren Schwankungsbreite als Bezugswerte für mögliche Veränderungen während einer H_2 -Speicherung zu erfassen.

5.3.4 Hydrochemische Analysen der Soleproben

In den Soleproben aus dem Kavernensumpf und der Abscheiderprobe wurden die hydrochemischen Charakteristika bestimmt. Die Analyseparameter und verwendeten Analysemethoden sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27: Analyseparameter und verwendete Analysevorschriften

Parameter	Norm
pH-Wert	DIN 38404-5
Kohlenwasserstoff-Index	DIN EN ISO 9377-2, 2001-07 (A)
Dissolved Organic Carbon (DOC)	DIN EN 1484, 1997-08 (A)
Total Inorganic Carbon (TIC)	DIN EN 1484, 1997-08 (A)
Methanol	DIN EN ISO 22155, 2016-07 (A)
Ethanol	DIN EN ISO 22155, 2016-07 (A)
Isopropanol	DIN EN ISO 22155, 2016-07 (A)
Carbonsäuren (Formiat, Acetat, Laktat, Propionat, <i>n</i>-Butyrat, <i>i</i>-Butyrat, <i>n</i>-Valerat, Capronat)	Hausmethode in Anlehnung an DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (Open Grid Europe GmbH)
Chlorid	DIN EN ISO 10304-1
Nitrit	DIN ISO 15923-1
Nitrat	DIN ISO 15923-1
Sulfat	DIN EN ISO 10304-1
Ammonium	DIN ISO 15923-1
Phosphat	DIN ISO 15923-1
Eisen (gesamt)	DIN EN ISO 17294-2; EPA Method 200.8
Kalium	DIN EN ISO 17294-2; EPA Method 200.8
Natrium	DIN EN ISO 17294-2; EPA Method 200.8

5.3.5 Stimulationsexperimente

Potenzielle Auswirkungen einer H₂-Exposition auf mikrobielle Prozesse wurden in laborativen Wachstumsexperimenten untersucht. Die Kultivierungsversuche erfolgten in artifiziellen Nährmedien, die den verschiedenen Organismengruppen optimale Bedingungen boten, in artifiziellen Mineralmedien, deren Zusammensetzung sich an Kavernensolen orientierte und unter ausschließlicher Verwendung von aus Kavernenstandorten gewonnen Sole- und Salzproben. Die Stimulationsexperimente erfolgten bei Gasspeichertemperatur unter Niederdruckbedingungen (2 bar) sowie unter Kavernendruck unter Verwendung von Hochdruckreaktoren.

Simuliert wurden einerseits eine reine H₂-Speicherung sowie eine Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas. Mithilfe von chemischen Analysen wurden die Raten der H₂-Umsetzung und Produktbildungen erfasst. Begleitend erfolgte an ausgewählten Versuchsreihen eine molekularbiologische Charakterisierung der in den Inkubationen gewachsenen mikrobiellen Gemeinschaften zur Identifizierung stimulierter Bakterien- und Archaeengruppen.

Kavernenspeicher stellen für Mikroorganismen aufgrund hoher Salinitäten und Drücke sowie teilweise stark basischer pH-Werte extreme Lebensräume dar. Als halophile (Salz liebende) Mikroorganismen werden Organismen bezeichnet, welche an Salzkonzentrationen von 145 g/l oder mehr angepasst sind. In Salzkavernen liegen Salzkonzentrationen von 290 g/l Natriumchlorid und höher vor. Aufgrund der Lithologie der untersuchten Kavernen ist der beprobte Kavernensumpf durch einen erheblichen Anteil an Kalziumsulfat (Anhydrit-Streifensalz) gekennzeichnet. Der Fokus der laborativen Untersuchungen lag auf den Prozessen, die einen Gasspeicherbetrieb beeinflussen können. Ein besonderes Augenmerk galt der mikrobiellen Sulfatreduktion, da auf Grund der chemischen Zusammensetzung von Kavernensumpf und Speichergas die Voraussetzungen hierfür gegeben sind. Darüber hinaus erfolgten Kultivierungsversuche mit halophilen Kulturen der Kultursammlung der MicroPro GmbH, welche aus anderen Salzkavernen, hochsalinen Porenspeichern und Kohlenwasserstofflagerstätten stammten.

5.3.5.1 Stimulationsexperimente unter Niederdruckbedingungen

Erfassung des mikrobiologischen IST-Standes – Charakterisierung der Kavernensoleproben vom Standort Bad Lauchstädt

Die Analyse der aktuellen Speicherbesiedlung erfolgte unter Einbeziehung obertägiger Anlagenteile. Bakteriologische Analysen zur Isolierung von Organismen verschiedener physiologischer Gruppen (Sulfatreduzierer, Methanogene, Kohlenwasserstoffverwerter, anaerobe Heterotrophe) wurden durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf den technisch relevanten Stoffwechselwegen:

- Sulfatreduktion unter Nutzung von Wasserstoff oder sekundär gebildeter Substrate,
- Methanbildung auf der Grundlage von Wasserstoff und Kohlendioxid bzw. Karbonaten,
- Acetogenese unter Verwertung von Wasserstoff und Kohlendioxid.

Mit den gewonnenen Soleproben wurden Kulturversuche angesetzt, mit dem Ziel, Art und Umfang der mikrobiellen Besiedlung der Kavernen festzustellen. Grundsätzlich wird dabei das Probenmaterial in bakteriologische Nährmedien eingebracht, die die Entwicklung unterschiedlicher physiologischer Gruppen ermöglichen. Die Auswahl mikrobiell verwertbarer Substrate insbesondere der Kohlenstoffquellen orientierte sich an den Analyseergebnissen, die das Vorhandensein von organischen Säuren, Alkoholen und Kohlenwasserstoffen belegen.

Über die Versuchszeit wurden periodisch verschiedene Parameter analytisch erfasst. Zur Bestimmung des pH-Wertes wurde ein Messgerät inoLAB der Firma WTW mit SenTix41-Sensor verwendet. Der Druck in den Labormikrokosmen wurde mit Druck-Handmessgeräten GMH 3111 (GMH Messtechnik GmbH) erfasst. Anionen (Fluorid, Chlorit, Bromat, Chlorid, Nitrit, Chlorat, Bromid, Nitrat, Phosphat, Sulfat) und organische Säuren (Formiat, Acetat, Propionat, Laktat, Butyrat) wurden mittels Ionenchromatographen Dionex ICS-1100 mit Leitfähigkeitsdetektor bestimmt. Die Analyse der Gasbestandteile Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Methan und Kohlendioxid erfolgte mit Chromatron-Gaschromatographen Gach 21 mit Wärmeleitfähigkeitsdetektoren.

Isolation und Anreicherung wasserstoffverwertender Mikroorganismen

Die am Standort Bad Lauchstädt gewonnenen Proben können nur die Spezifik dieses Standortes abbilden. Um ein weiterreichendes Verständnis des Zusammenwirkens mikrobieller Kavernengemeinschaften und deren Fähigkeit, Wasserstoff unter hochsalinen Bedingungen umzusetzen, zu erlangen, erfolgte die Charakterisierung weiterer Probenmaterialien hinsichtlich des Spektrums H₂-verwertender Organismen. Es wurden weiterführende Untersuchungen mit Probenmaterial der MicroPro-Kultursammlung durchgeführt, das von Standorten mit vergleichbaren ökologischen Bedingungen (insbesondere Salinität) stammt. Voraussetzung für die Auswahl der Kulturen war, dass sie bei Salzgehalten oberhalb 150 g/l zu Wachstum und Vermehrung in der Lage sind. Im Hinblick auf diese extrem halophilen Mikroorganismen konnte auf Proben verschiedener Ursprünge zugegriffen werden, siehe Tabelle 28.

Tabelle 28: *Herkunft der Kultursammlung*

Probenbezeichnung	Herkunft	Gestein	Beschreibung
GAG	Erdgas Porenspeicher (Aquifer)	Sandstein	Schichtwasser
HFG	offshore Ölfeld	Sandstein	Schichtwasser
HCF	Kohlenwasserstoff Kavernenspeicher	Halit	Sole
HFR	onshore Ölfeld	Sandstein	Schichtwasser
GCG	Erdgas-Kavernenspeicher	Halit	Sole
HCG	Kohlenwasserstoff-Kavernenspeicher	Halit	Sole

Im Hinblick auf methanogene Mikroorganismen wurden zusätzlich Kulturen von Standorten geringerer Salinitäten einbezogen (Tabelle 29), da zu erwarten war, dass Methanogene hohe Salzkonzentrationen überdauern können, dies aber auch zum vollständigen Verlust von Aktivität und Vermehrung führen kann (Oren, 2011).

Tabelle 29: *Herkunft methanogener Testkulturen*

Probenbezeichnung	Herkunft	Beschreibung
BPG	Biogasanlage	Fermenterüberlauf
CPG	Kompostierungsanlage	Kompost
STG	Klärschlamm aus kommunaler Kläranlage	Klärschlamm

Es standen 105 Kulturen zur Verfügung. Diese wurden unter H₂- bzw. H₂-CO₂-Atmosphäre in mineralischen Nährmedien (SRP- und MB-Mineralmedium) kultiviert, um die Kulturbedingungen auf projektrelevante Parameter umzustellen, insbesondere um zuvor verwendete Substrate (vor allem Kohlenstoffquellen) abzureichern. Geeignete Kulturen wurden nach Salinität des Kulturmediums gepoolt zu Testkulturen, bei 150 g/l NaCl die Testkultur MK-S15, bei 200 g/l NaCl MK-S20 und für ≥ 250 g/l NaCl MK-S25. Die weitere Kultivierung erfolgte unter H₂-Atmosphäre in Gegenwart von in Kavernen nachgewiesenen Kohlenstoffquellen (organische Säuren, methylierte Verbindungen, Kohlendioxid).

Charakterisierung der Anreicherungskulturen

Die gewonnenen Test- bzw. Anreicherungskulturen dienen zur Analyse und Vergleich metabolischer Umsatzraten halophiler Mikroorganismen. In artifiziellen Medien wurde auf der Basis des SRP- und MB-Mineralmediums die Abhängigkeit des Stoffumsatzes mit dem Fokus auf sulfatreduzierende, acetogene und methanogene Prozesse untersucht. Die Inkubation erfolgte unter einer reinen H₂- oder einer H₂-CO₂- Atmosphäre (80 Vol.-% : 20Vol.-%). Weitere Kohlenstoffverbindungen wie Acetat, Laktat, Methanol und Trimethylamin wurden in Konzentrationen von 20 mM zugesetzt. Die Untersuchungen erfolgten i. d. R. vergleichend bei drei Salzgehalten 150, 200 und 250 g/l NaCl. Extrem Halophile wurden zudem bei 300 bis 310 g/l NaCl getestet. Die Versuchsansätze wurden bei 30°C und 1.800 bis 2.000 mbar Flascheninnendruck inkubiert. Versuchsbegleitend erfolgten wiederum Analysen zur Gaszusammensetzung und in der Flüssigphase Analysen der Anionen und des Spektrums kurzkettiger organischer Säuren. Von ausgewählten Kulturen wurden Proben für molekularbiologische Analysen (siehe Kapitel 5.4.3.4 und 5.3.6) entnommen, um die mikrobielle Diversität in den Anreicherungskulturen zu bestimmen.

Mikrobiologische, isotochenchemische, molekularbiologische Charakterisierung ausgewählter Wasserstoffverwerter

Aus der MicroPro-Kultursammlung wurden sulfatreduzierende, acetogene und methanogene H₂-verwertende Mikroorganismen angereichert. Zur Erfassung der mikrobiellen Biodiversität der Anreicherungskulturen wurden die bei MicroPro durchgeführten Versuche seitens des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) mit molekulargenetischen Analysen dieser Kulturansätze begleitet. Die Isodetect GmbH untersuchte die Änderungen der H₂- und Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse während der H₂-Exposition. Das Impfgut wurde gewonnen aus Vorkulturen unter identischen Bedingungen. Die Mikroorganismen stammen aus den Proben GAG, HCG, GCG und HFG (Tabelle 28). Die Untersuchungen erfolgten in 125 ml Labormikrokosmen mit artifiziellen Mineralmedien (Tabelle 30).

Tabelle 30: Versuchsmatrix Kulturansätze für Isotopenchemie der Wasserstoffverwertung

MO-Gruppe	Substrate		NaCl	Medium
Methanogene	H ₂	Methanol	150 g/l	MB-Mineralmedium
Methanogene	H ₂	Methanol	200 g/l	MB-Mineralmedium
Methanogene	H ₂	Trimethylamin	150 g/l	MB-Mineralmedium
Methanogene	H ₂	Trimethylamin	200 g/l	MB-Mineralmedium
Acetogene	H ₂	CO ₂	250 g/l	SRP-Mineralmedium
Acetogene	H ₂	CO ₂	250 g/l	SRP-Mineralmedium
Sulfatreduzierer	H ₂	CO ₂	250 g/l	SRP-Mineralmedium
Sulfatreduzierer	H ₂	CO ₂	300 g/l	SRP-Mineralmedium

Wasserstoffeinlagerung im Niederdruckkavernenmodell

Die Untersuchungen orientierten sich an den am Standort Bad Lauchstädt vorgefundenen Bedingungen. Über eine Kultivierung in Labormikrokosmen wurde versucht, das Ökosystem Kaverne abzubilden. Für die Untersuchungen wurde Originalsole, die bei der Kavernenbeprobung gewonnen wurde, und Salz aus Bohrkernmaterial der Kaverne B aus dem Bereich 1.005,85–1.005,90 m MD (Abbildung 93, rote Markierung) verwendet. Die Randschichten des Kerns wurden entfernt, um möglichst ungestörtes Versuchsmaterial zu gewinnen. Das Innere des Kerns wurde auf eine Korngröße unter 5 mm zerkleinert und in sterilen Probenflaschen unter einer H₂-Atmosphäre bis zur Verwendung gelagert.

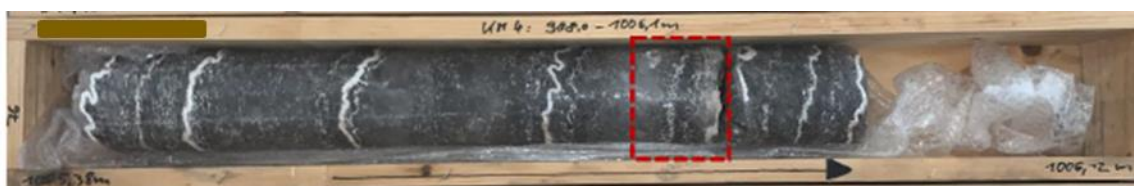


Abbildung 93: Kernprobe Kaverne B

Mit jeder der fünf Soleproben aus der Tiefenprobenahme und der Dicksole aus der Kaverne in Solung wurde eine Versuchsreihe entsprechend der in Tabelle 31 dargestellten Matrix angesetzt.

Entsprechend den vorliegenden hydrochemischen Analysen ist davon auszugehen, dass Karbonate im System der Kaverne die bedeutendste Kohlenstoffquelle (C-Quelle) darstellen. Um die grundsätzliche Entwicklungsfähigkeit halophiler Mikroorganismen unter Kavernenbedingungen zu demonstrieren, erfolgte in zwei Versuchsreihen der Zusatz eines Inokulums, welches durch Kultivierung des Probenmaterials der MicroPro-Kultursammlung unter Verwendung von Mineralmedium gewonnen

wurde. Die Labormikrokosmen (Abbildung 94) wurden bei 30°C und einem Druck von 1.800 mbar inkubiert.

Tabelle 31: Versuchsmatrix Wasserstoffeinlagerung unter Niedrigdruck

Reihe	Sole	Salz	Inokulum	H ₂	CO ₂	CH ₄	Bemerkung
1	60 ml	0	nein	80 %	20 %	0 %	CO ₂ als C-Quelle
2	60 ml	0	ja	80 %	20 %	0 %	CO ₂ als C-Quelle
3	60 ml	10g	nein	100 %	0 %	0 %	kein CO ₂ , Karbonat im Salz
4	60 ml	10g	ja	100 %	0 %	0 %	kein CO ₂ , Karbonat im Salz
5	60 ml	10g	nein	50 %	0 %	50 %	kein CO ₂ , Karbonat im Salz
6	60 ml	10g	nein	10 %	0 %	90 %	kein CO ₂ , Karbonat im Salz

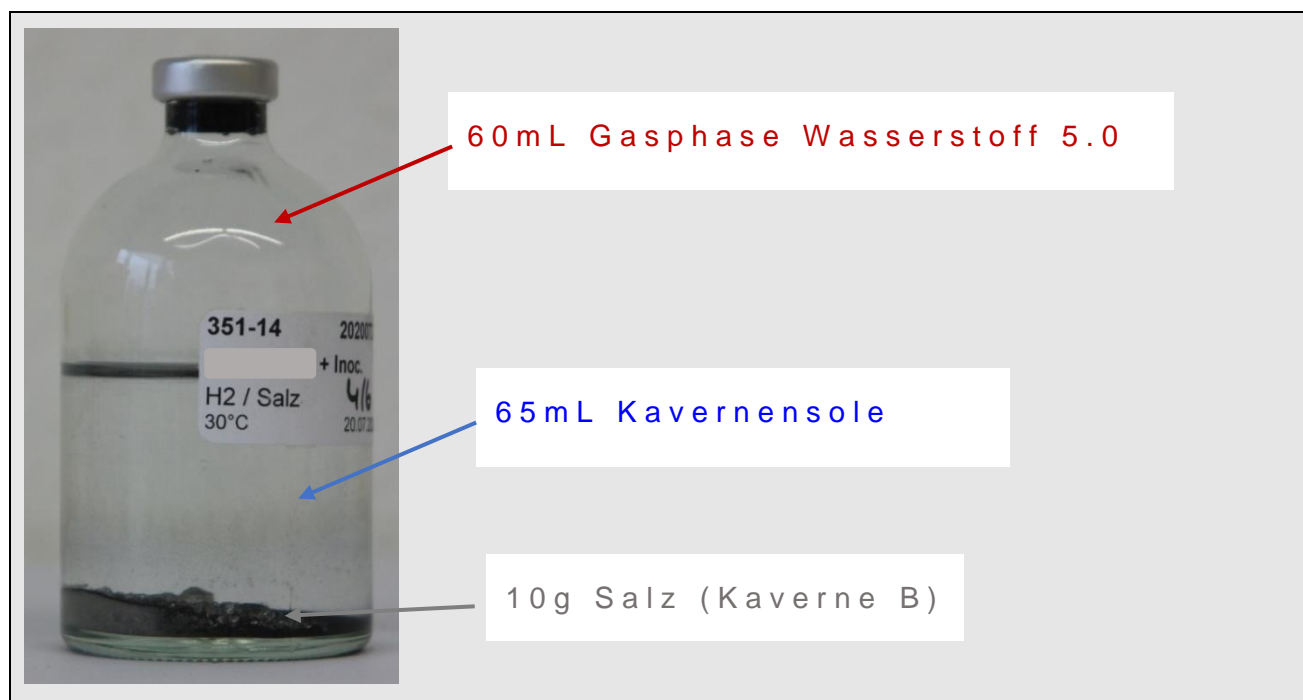


Abbildung 94: Labormikrokosmos Niederdruckkaverne modell

Hydrochemische und gaschemische Analysen erfolgten über den Versuchszeitraum. Zum Versuchsende wurden Sulfide in Flüssig- und Gasphase der Versuchsreihen 3 und 4 bestimmt und vom UFZ in allen Ansätzen molekularbiologische Untersuchungen zur mikrobiellen Diversität durchgeführt.

5.3.5.2 Stimulationsexperimente unter Hochdruckbedingungen

Die Stimulationsexperimente unter Hochdruckbedingungen wurden in Analogie zu den Versuchsreihen 3 und 4 der Niederdruckversuche angesetzt mit Sole aus der Tiefenprobenahme und Salz des Kavernenstandortes. Aufgrund der Reaktorgeometrie wurden hier 125 mL Kavernensole und 10 g Salz der Kaverne B unter einer reinen H_2 -Atmosphäre eingesetzt. Die Inkubation erfolgte bei $30^\circ C$ und 100 bar Innendruck. Verwendung fanden Hochdruckreaktoren BR-500 (Berghof Products + Instruments GmbH, Abbildung 95).



Abbildung 95: Hochdruckreaktoren BR-500

5.3.5.3 Stimulationsexperimente mit Isotopenmarkierung

Zur Charakterisierung mikrobieller Aktivität in den Soleproben wurden neben Kultivierungsversuchen (Kapitel 5.3.5.1) auch Laborexperimente mit isotopisch markierten Tracer-Molekülen durchgeführt, um die mikrobielle Aktivität einzelner Zellen zu untersuchen. Diese sehr sensitive Analyse wurde mit einem nano-scale Sekundärionen-Massenspektrometer (nanoSIMS) durchgeführt. Die nanoSIMS-Analyse ist eine qualitative und quantitative Methode zur Oberflächenanalyse, welche nach den physikalischen Prinzipien der dynamischen SIMS verläuft (Wagner, 2009; Kilburn and Wacey, 2015). Die Mikroorganismengemeinschaft der Kavernensole wurde zusätzlich mit stabilen Isotopen angereicherterem ‚schwerem‘ Wasser (D_2O) und ‚schwerem‘ Bicarbonat ($NaH^{13}CO_3$) versetzt. Aktive Mikroorganismen – Mikroorganismen, die Stoffwechsel betreiben und Wasser und Kohlenstoff in ihre Zellbestandteile einbauen – können so von anderen unterschieden werden, da ihre Zellen einen erhöhten Gehalt an ^{13}C und 2H aufweisen (SIP; Stable Isotope Probing). Die Tracer-Substanzen D_2O und $NaH^{13}CO_3$ wurden ausgewählt, weil sowohl Wasser als auch anorganischer Kohlenstoff kontinuierlich von aktiven autotrophen und heterotrophen Mikroorganismen in Zellbestandteile eingebaut werden.

Für die nanoSIMS-SIP Versuche mit Sole von Kavernen des Typs I.A und I.B wurde der Einfluss von gasförmigem Wasserstoff auf Einbau von D_2O und $NaH^{13}CO_3$ in Zellbestandteile untersucht. Zusätzlich wurden Kontrollreihen (i) mit Isotopenmarkierung und durch Hitzeesterilisation abgetöteten Zellen sowie (ii) ohne Isotopenmarkierung analysiert.

5.3.5.4 Laborversuche zur Hemmung mikrobieller Prozesse

Die Kenntnis der Struktur und Stoffwechselaktivität mikrobieller Gemeinschaften bilden den Ausgangspunkt zur Entwicklung effektiver Strategien zur Eindämmung mikrobieller Aktivitäten. In Laborversuchen mit Mineralmedium und sulfatreduzierenden Mikroorganismen wurde die biozide Wirkung von drei kommerziell erhältlichen Bioziden, einem Metallchlorid und veränderter ökologischer Bedingungen (Änderung des pH-Wertes) erprobt. Als eine biozide Wirkung ist hier eine teilweise oder vollständige Hemmung mikrobieller Aktivität zu verstehen. Als Kriterium für mikrobielle Aktivitäten wurden der Verbrauch von Wasserstoff und die Bildung von Sulfid gewählt.

Biozideinsatz

Getestet wurden Biozide auf der Basis von

- 3,3'-Methylenbis(5-methyloxazolidin) (MBO),
- (Ethyldioxy)dimethanol (EDDM),
- Glutaraldehyd (GA).

Die Wirksamkeit wurde im Konzentrationsbereich von 10–500 µl/l untersucht.

Applikation bakterienhemmender Metallchloride

Eigene Arbeiten zu biozid wirkenden Substanzen für die Anwendung in Erdgas- und Ethylenspeichern rückten zweiwertige Metallchloride in den Fokus. Durch eine sehr gute Löslichkeit ist die Verwendung auch bei hohen Salinitäten in Sole möglich, ohne Wirksamkeitsverluste durch Ausfällungen oder Aufschwimmen. Die Eignung bei einer H₂-Exposition und einem dadurch gegenüber anderen Speichern abweichenden mikrobiellen Konsortium wurde bisher nicht untersucht. Es wurden Einsatzkonzentrationen von 10–2.500 mg/l untersucht.

Veränderung ökologischer Bedingungen

Extreme ökologische Bedingungen vermindern die Risiken einer Keimentwicklung. Durch die Kombination verschiedener Stressfaktoren (Salinität und pH-Wert) ist dies auch für Kavernen ein vielversprechender Ansatzpunkt. Standortspezifisch werden bereits alkalische Solen eingesetzt. Die Entwicklungsfähigkeit H₂-verwertender sulfatreduzierender Mikroorganismen wurde unter pH-Werten im Bereich 5–11 getestet.

5.3.6 Molekularbiologische Analysen

5.3.6.1 16S rRNA-Genanalyse

Die molekularbiologischen Analysen hatten das Ziel, die mikrobielle Diversität in Kavernenproben und halophilen Anreicherungskulturen zu bestimmen. Die Strukturen der mikrobiellen Gemeinschaften wurden mittels Amplikon-Sequenzierung des für die 16S rRNA codierenden Gens analysiert (Illumina, Inc., 2010); die Methode gilt als Standardmethode zur Bestimmung der mikrobiellen Diversität (Woese, 1987). Das Produkt des Gens, die ribosomale RNA (rRNA), ist an der Proteinbiosynthese beteiligt, und somit ist dieses Gen ubiquitär verbreitet und hoch konserviert. Gleichzeitig existieren im Gen variable Regionen, deren Sequenz eine hochaufgelöste Zuordnung zu verschiedenen phylogenetischen Gruppen der Prokaryoten erlaubt. Aufgrund des hohen Salzgehalts der zu untersuchenden Proben mussten gängige Protokolle zur Extraktion von Desoxyribonukleinsäure (DNA; Deoxyribonucleic Acid) zuvor in Testverfahren modifiziert werden (Schwab et al., 2022).

5.3.6.2 Metagenomanalyse

Für das Projekt besonders interessante Proben wurden zusätzlich zur Amplicon-Sequenzierung des 16S rRNA-Gens auch metagenomisch sequenziert, d. h., die Erbinformation (DNA) der Mikroorganismengemeinschaft wurde vollständig analysiert. Dies erlaubt die Identifizierung von Stoffwechselwegen, z. B. das Vorhandensein von Genen für Enzyme zur Sulfat-Atmung, Kohlenstofffixierung, Methanogenese oder Homoacetogenese oder von Genen zur Anpassung an hohe Salzgehalte. Die Metagenomsequenzierung wurde extern durch die Firma Genewiz (Leipzig) durchgeführt, die auf die metagenomische Analyse von geringen DNA-Mengen spezialisiert ist.

5.3.7 Isotopenchemische Analysen

Um mikrobielle H₂-Umsetzungsprozesse während der H₂-Speicherung zu erfassen, wurde die Eignung der Analyse stabiler Isotope geprüft. Speichergase und Kavernensole bestehen überwiegend aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefel, welche in unterschiedlich schweren Formen, den sogenannten stabilen Isotopen vorkommen. Das Verhältnis von schweren zu leichten Isotopen eines Elementes wird als Isotopensignatur oder Isotopenverhältnis bezeichnet (¹³C/¹²C, ²H/¹H, ¹⁸O/¹⁶O, ³⁴S/³²S). Mikrobielle Prozesse bewirken oftmals eine Veränderung des natürlichen Isotopenverhältnisses von Ausgangsstoffen und Produkten, was als Isotopenfraktionierung bezeichnet wird. Dadurch entstehen charakteristische δ²H-, δ¹³C-, δ³⁴S- bzw. δ¹⁸O-Werte, die eine Erfassung mikrobieller Prozesse ermöglichen.

Das Isotopenverhältnis wird im Allgemeinen als delta-Notation (δ ‰) angegeben (Coplen, 2011):

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^2\text{H}, \delta^{18}\text{O}, \delta^{34}\text{S} = \left(\frac{(R)_{\text{Probe}}}{(R)_{\text{Standard}}} - 1 \right) \quad \text{Formel 5}$$

wobei R das Verhältnis des schweren Isotops zum leichten Isotop (¹³C/¹²C, ²H/¹H, ¹⁸O/¹⁶O, ³⁴S/³²S) in einer Probe relativ zu einem internationalen Standard ist. Aufgrund der geringen Unterschiede der Verhältnisse ¹³C/¹²C, ²H/¹H und ¹⁸O/¹⁶O zwischen Probe und Standard werden die δ¹³C-, δ²H-, δ¹⁸O- bzw. δ³⁴S-Werte in Promille [‰] angegeben.

Die Kohlenstoff- und H₂-Isotopenanalysen des Wasserstoffs, Methans und Kohlendioxids (δ¹³C_{CH₄}, δ¹³C_{CO₂}, δ²H_{H₂}, δ²H_{CH₄}) in den Gasproben erfolgten an einem GC-IRMS-System (Gas Chromatography/Isotope Ratio Mass Spectrometry) bestehend aus einem Gaschromatographen, einem Verbrennungsofen für die Kohlenstoff-Isotopenanalyse bzw. einer Pyrolyseeinheit für die H₂-Isotopenanalyse, einer modifizierten Wasserfalle und einem Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (IRMS). Die Kohlenstoff- und H₂-Isotopensignaturen sind in der δ-Notation [‰] relativ zu den internationalen Standards V-PDB (Vienna-PeeDee-Belemnite mit ¹³C/¹²C = 0,0111802) bzw. V-SMOW (Vienna-Standard-Mean-Ocean-Water mit ²H/¹H = 0,0015576) angegeben (siehe Formel 5).

Die Bestimmung der H₂- und O₂-Isotopenverhältnisse der Soleproben (δ²H_{H₂O}, δ¹⁸O_{H₂O}) erfolgte mittels Elementaranalyse-Pyrolyse-Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (EA-P-IRMS) (Dunn and Carter, 2018). Die Messwerte der Proben wurden mit internationalen Referenzmaterialien (SLAP2, VSMOW2, GISP2) kalibriert. Die O₂-Isotopensignaturen sind in der δ-Notation [‰] relativ zu dem internationalen Standard V-SMOW (Vienna-Standard-Mean-Ocean-Water mit ¹⁸O/¹⁶O = 0,0020052) angegeben.

Für die Isotopenuntersuchungen an Sulfat wurden die Proben angesäuert und anschließend das Sulfat durch Zugabe von Bariumchlorid-Lösung gefällt. Der Niederschlag in Form von Bariumsulfat wurde

über Filtration (Porengröße: 0,45 µm) vollständig von der wässrigen Phase abgetrennt und bei 60 °C getrocknet. Das aufliegende Bariumsulfat wurde zur Isotopenanalyse von Sulfat verwendet (Krouse and Mayer, 2000). Die Bestimmung des Schwefel-Isotopenverhältnisses erfolgte mittels Elementaranalysator bei 1.010 °C. Die Schwefel-Isotopensignaturen sind in der δ-Notation [‰] relativ zu dem internationalen Standard V-CDT (Vienna-Cañon-Diablo-Troilite mit $^{34}\text{S}/^{32}\text{S} = 0,045005$) angegeben. Die O₂-Isotopenverhältnisse wurden mittels Hochtemperaturpyrolyse bei 1.530 °C bestimmt.

5.3.8 Mikroskopische Analysen

5.3.8.1 Gesamtzellzahlbestimmung

Die Originalproben wurden mikroskopisch mittels Phasenkontrast-Mikroskopie (Zeiss AxioScope A.1; Vergrößerung 1.600-fach) analysiert und anschließend die Zellzahl mikroskopisch mittels Thoma-Zählkammer bestimmt (Nachweisgrenze: 10⁶ Zellen/ml).

5.3.8.2 Elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Visualisierung von Eisenkorrosion

Mikrobiologisch verursachte Korrosion von Eisen kann die Infrastruktur (z. B. Leitungen, Bohrlöcher) einer unterirdischen Gasspeicheranlage potenziell erheblich beschädigen. Im Zuge der Untersuchungen zu mikrobiell verursachter Eisenkorrosion wurden Eisenprüfkörper (WK19-02.6) unter verschiedenen Bedingungen in salzhaltigen Kulturmedien für bis zu drei Monaten inkubiert. Die zeitabhängigen Veränderungen der Eisenkörper wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Heliumionenmikroskopie (HIM) dokumentiert. Eisenprüfkörper wurden der Mannesmann Salzgitter GmbH zur Verfügung gestellt und in der Werkstatt des UFZ auf Testgrößen von 50 mm x 10 mm x 1 mm (L x B x T) zugeschnitten. Im Fokus der Untersuchungen stand die Ermittlung der mikrobiellen Gemeinschaft der Kavernensole L. Zusätzlich wurden Ansätze eingesetzt mit (i) filtersterilisierter Sole, (ii) filtersterilisierter Sole mit als Reduktionsmittel verabreichtem Sulfid (H₂S, 1 mM), und (iii) einem halophilen, sulfatreduzierenden Modellorganismus, *Desulfovermiculus halophilus*. Die Auswertung der mikrobiell-induzierten Korrosion (MIK) erfolgte durch Mikroskopie der Prüfkörper mit dem Rasterelektronenmikroskop an drei Zeitpunkten, zusätzlich wurden Sulfidgehalt, pH-Wert und H₂-Isotopenfraktionierung (Löffler et al., 2019) bestimmt.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Mikrobiologisch relevante Standortparameter

Mikrobielles Wachstum wird von den Milieubedingungen der Umgebung wie pH-Wert, Temperatur, Salinität und Nährstoffverfügbarkeit stark beeinflusst. Dabei haben Mikroorganismen unterschiedliche Anforderungen an die Wachstumsbedingungen. Um mikrobielle Prozesse beurteilen zu können, kommt der Kenntnis der Milieubedingungen in der Sole große Bedeutung zu. Detaillierte hydrochemische Analysen erfolgten an Soleproben aus dem Sumpf von Gasspeicherkavernen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 zusammengefasst.

Die In-situ-Temperaturen der Kavernensumpfproben variierten zwischen 25 und 28 °C. Alle fünf Kavernenproben wiesen nach Druckentlastung ein schwach saures Milieu auf. Die Salinitäten lagen im Bereich von 294 und 310 mg/l. Organische Verbindungen wie Kohlenwasserstoffe, Alkohole und Carbonsäuren wurden in allen Kavernensumpfproben gefunden und können von zahlreichen Mikroorganismen als Energiequelle genutzt werden. Das Vorhandensein kurzkettiger organischer Säuren wie Acetat, Formiat und Butyrat deutet auf mikrobielle Prozesse. Hierbei handelt es sich um Abbauprodukte aus der mikrobiellen Umsetzung langkettiger organischer Kohlenstoffverbindungen, welche wiederum von anderen Mikroorganismen als Energiequelle genutzt werden können. Acetat wurde ausschließlich in den ehemaligen Stadtgaskavernen gefunden.

Sulfat als terminaler Elektronenakzeptor lag in allen Kavernensumpfproben in Konzentrationen > 3.300 mg/l vor, sodass eine mikrobielle Sulfatreduktion ablaufen könnte. Nitrat als potenzieller Elektronenakzeptor konnte nicht oder nur in Spuren nachgewiesen werden und kann für mikrobielle Prozesse nur untergeordnet eine Rolle spielen. Phosphat als wichtiges Makroelement lag mit Ausnahme der Sumpfprobe der Kaverne H mit $\geq 0,7$ mg/l in ausreichend hohen Konzentrationen vor. Eisen in Form von Eisen (III) stellt ebenfalls ein potenzieller Elektronenakzeptor in Kavernen dar. Darüber hinaus ist Eisen ein wichtiger Nährstoff für mikrobielles Wachstum, z. B. als Bestandteil von Enzymen. Die Gesamteisenkonzentrationen waren sehr gering, sodass Eisen ein limitierender Faktor im Falle eines H₂-stimulierten mikrobiellen Wachstums sein könnte.

Tabelle 32: Hydrochemische Analysen der Kavernensumpfproben und Abscheiderprobe

Kaverne		F	H	L	M	N	Abscheiderprobe
Kavernenhistorie		ehem. Stadtgaskaverne		Erdgaskaverne			
Teufe Solespiegel	[m]	877–879	863–871	909–916	919–926	866–869	
Ø Temperatur – Sole	[°C]	28	25	28	26	26	17
Kavernendruck	[bar]	119	75	107	126	120	
pH-Wert		6,2	6,2	6,0	6,4	6,5	6,84
KW-Index	[mg/l]	7,0	0,25	0,51	<0,3*	0,58	0,33
DOC	[mg/l]	460	220	270	250	190	5.300
TIC	[mg/l]	100	120	73	62	55	130
Methanol	[mg/l]	1.200	620	760	1.000	380	10.000
Ethanol	[mg/l]	320	19	42	120	220	5,7
Isopropanol	[mg/l]	52	4,2	0,49	0,29	4,4	83
Formiat	[mg/l]	0,4	3,8	<0,1	0,40	0,5	38,4
Acetat	[mg/l]	30	26,8	<0,1	<0,1	<0,1	164,3
Laktat	[mg/l]	<0,1	<0,1	5,5	<0,1	<0,1	11,4
Propionat	[mg/l]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	3,6
<i>n</i> -Butyrat	[mg/l]	43,5	62,5	43	47	45	10,1
<i>i</i> -Butyrat	[mg/l]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
<i>n</i> -Valerat	[mg/l]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Capronat	[mg/l]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Chlorid	[mg/l]	186.470	190.251	200.876	190.015	186.593	500
Nitrit	[mg/l]	0,04	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<10
Nitrat	[mg/l]	0,8	<0,5	0,7	<0,05	2,1	<0,1
Sulfat	[mg/l]	3.501	3.329	3.779	4.012	4.991	680
Ammonium	[mg/l]	12,7	11,2	10,0	7,9	3,9	10,0
Phosphat	[mg/l]	2,5	<0,1	1,2	4,2	0,7	<0,01
Fe (gesamt)	[mg/l]	< 0,3	0,7	< 0,3	4,2	< 0,3	300
Kalium	[mg/l]	61	59	57	44	31	5,9
Natrium	[mg/l]	108.590	110.230	109.430	108.650	106.990	n.a.

5.4.2 Charakterisierung mikrobieller Kavernengemeinschaften

Erfassung des mikrobiologischen IST-Standes – Charakterisierung der Kavernensoleproben vom Standort Bad Lauchstädt

In den fünf entnommenen Soleproben aus dem Kavernensumpf der Bestandskavernen wurden Mikroorganismen im Bereich von 5×10^6 und $4,0 \times 10^7$ Zellen/ml detektiert. In den oberirdisch entnommenen Dick- und Dünnssoleproben an der Kaverne in Solung (C) betrug die Zellzahl $< 1 \times 10^6$ Zellen/ml. Mikroskopische Aufnahmen (siehe Anlage 10.5) von den Originalsoleproben deuteten auf Grund der gefunden morphologischen Vielfalt der Organismen auf eine Vielfalt hinsichtlich des Stoffwechselfpotenzials hin.

In den Soleproben der Bestandskavernen wurden sulfatreduzierende Organismen festgestellt, die in mineralischen Nährmedien unter einer H_2 -Atmosphäre mit verschiedenen Kohlenstoffquellen Sulfid bilden können. In den Laborexperimenten wurden die organischen Verbindungen eingesetzt, die in den Soleproben als potenzielle Substrate und Stoffwechselprodukte nachgewiesen wurden: Acetat (Kavernen F, H), Laktat (Kaverne L), Methanol (Kavernen F, H, L, M, N). In den Gasphasen wurde Kohlendioxid eingesetzt, das auch im Speichergas der Kavernen F, H, L, und N nachgewiesen wurde und dessen Quellen im Speichergas (0,3–0,7 Mol.-% CO_2) und in der Sole zu finden sind, wo es aus der Gleichgewichtseinstellung mit Kohlensäure aus dem Anhydrit geliefert werden kann. Methan wurde als bisheriges Speichergas berücksichtigt und Paraffin diente als Modellsubstanz für Kohlenwasserstoffe, wie sie mit dem Blanket und Speichergas eingetragen wurden. Trimethylamin wurde als Modellsubstanz für methylierte Verbindungen und als bevorzugtes Substrat halophiler Methanogener berücksichtigt (Vreeland, 2012). Es entsteht als Abbauprodukt (u. a. durch Sulfatreduzierer) des Glycin Betain. Glycin Betain ist als Bestandteil vieler Mikroorganismenzellen weit verbreitet und insbesondere für viele halophile Mikroorganismen unerlässlich, um unter extremen Umgebungsbedingungen existieren zu können (Oren, 1990).

Das Potenzial zur H_2 -Verwertung wurde durch die in der Kaverne L lebenden Mikroorganismen nachgewiesen. Sole der Kaverne L wurde in mineralischem Medium unter H_2 - CO_2 -Atmosphäre inkubiert. Nach 175-tägiger Verzögerungsphase setzte der Gasverbrauch ein (Abbildung 96) verbunden mit einer Schwarzfärbung, was auf eine Eisensulfidbildung, zurückzuführen ist.

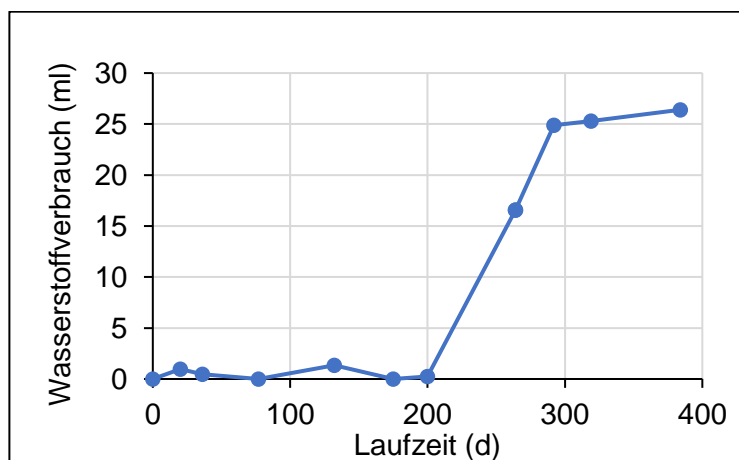


Abbildung 96: Wasserstoffverbrauch im Kulturansatz mit Sole Kaverne L unter H_2 - CO_2 -Atmosphäre

In allen Bestandskavernen konnten Mikroorganismen in Flüssigkultur nachgewiesen werden, die verschiedene Substrate (Kohlenstoff- und Energiequellen) verwerten können (Tabelle 33). Bewertungskriterien waren der Grad der Trübung der Kulturflüssigkeit, der mit der vorhandenen Zellzahl korrespondiert, und die Intensität der Schwärzung infolge der Reaktion des im Kulturmedium vorhandenen Eisen mit dem mikrobiell gebildeten Sulfid (Abbildung 97). Zudem wurde die Menge des verbrauchten Wasserstoffs erfasst. Das verwertete Substratspektrum von Mikroorganismen aus früheren Stadtgaskavernen ist auffallend größer im Vergleich zu Kavernen, in denen bisher nur Erdgas gespeichert wurde. Auch waren diese Organismen aktiver, was sich in kürzeren lag-Phasen in den Labormikrokosmen zeigte.



Abbildung 97: Labormikrokosmen der Kaverne H unter Wasserstoff mit Kohlendioxid, Acetat, Laktat, Trimethylamin (links v.l.n.r.) und Kaverne L unter Wasserstoff/Kohlendioxid sowie mit Acetat und Laktat (rechts v.l.n.r.)

Tabelle 33: Wachstum unter Wasserstoff mit verschiedenen Kohlenstoffquellen und mit Methan

Probe	CO ₂	Acetat	Laktat	TMA ¹⁾	Paraffin	Methanol	CH ₄
F	-	+	+	+	+	-	+
H	-	+	+	+	+	+	+
L	+	+	+	-	-	-	-
M	-	+	+	-	-	-	-
N	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾TMA = Trimethylamin, + mikrobielles Wachstum nachweisbar, - kein mikrobielles Wachstum

In ergänzenden Untersuchungen wurde unter sonst identischen Bedingungen die 10-fache Menge Soleprobe als Impfgut eingetragen. Es wurden 100 ml Probe filtriert (Membranfilter mit Porenweite 0,1 µm) um die Zellen anzureichern. Der Filter wurde dann, mit den darauf befindlichen Zellen, in die Kulturflaschen eingebracht. Die Inkubation erfolgte wie zuvor unter Wasserstoff und zusätzlich unter Stickstoff um negative Effekte hoher H₂-Partialdrücke auszuschließen (Tabelle 34).

Tabelle 34: *Wachstum nach Zellanreicherung*

Probe	H ₂ /CO ₂	Acetat	Laktat	FB-Cyst ¹⁾
F	-	+	+	+
H	-	+	+	+
L	+	+	+	+
M	-	+	+	-
N	-	-	-	-
C	-	-	-	-

¹⁾ FB-Cystein = Medium zum Nachweis anaerober heterotropher Organismen,
+ mikrobielles Wachstum nachweisbar, - kein mikrobielles Wachstum

Mit Proben aus der Kaverne N und C konnten analytisch keine Veränderungen infolge von mikrobiellen Stoffwechselaktivitäten belegt werden.

In den Soleproben der Kaverne C wurden bei Probeneingang mikroskopisch keine Zellen detektiert (Nachweisgrenze 10⁶ Zellen/ml). In Kulturansätzen mit verschiedenen Kohlenstoff- und Energiequellen wurde trotz des basischen pH-Werts von 10 verbunden mit der hohen Salinität und Solebehandlung in der Elektrolyse (ca. 90 °C) eine Entwicklung von Mikroorganismen mikroskopisch nachgewiesen.

Somit konnten in allen Soleproben aus den beprobten Kavernen Mikroorganismen nachgewiesen werden. Kavernen, in denen Stadtgas gespeichert wurde, wiesen eine aktivere Mikroorganismenpopulation auf.

Neben den Soleproben wurde auch Probenmaterial aus dem Wasserabscheider untersucht. Aufgrund der Dichte der Probe ist hier von Salzgehalten von 9 g/l auszugehen. In Kulturansätzen im Labor konnten mikrobielle Aktivitäten bei 10 g/l Salz, nicht aber bei 150 und 300 g/l Salz festgestellt werden. Im Abscheider wurden Organismen gefunden, die Wasserstoff, Formiat, Acetat, Laktat und Trimethylamin verwerten. Alle Umsetzungen waren mit einer Sulfatreduktion verbunden.

Erfassung des mikrobiologischen IST-Standes – Charakterisierung der Kavernensoleproben vom Standort HCF

Es konnte Sole eines weiteren Kavernenstandortes mikrobiologisch untersucht werden. Das Speichergestein wird auch hier von Halit dominiert. Als weitere Hauptkomponente der Sole konnte Sulfat mit 12.000 mg/l bestimmt werden. Die Bedingungen zum Standort Bad Lauchstädt unterscheiden sich insofern, als dass hier Erdölprodukte in der Kaverne gespeichert werden (Kaverne Typ I.D). Aufgrund der anderen Vorgeschichte der Kaverne wurde ein aktives H₂-verwertendes sulfatreduzierendes Mikrobiom vorgefunden. Typische Vertreter des Kavernenmikrobioms sind im mikroskopischen Bild in Abbildung 98 dargestellt.

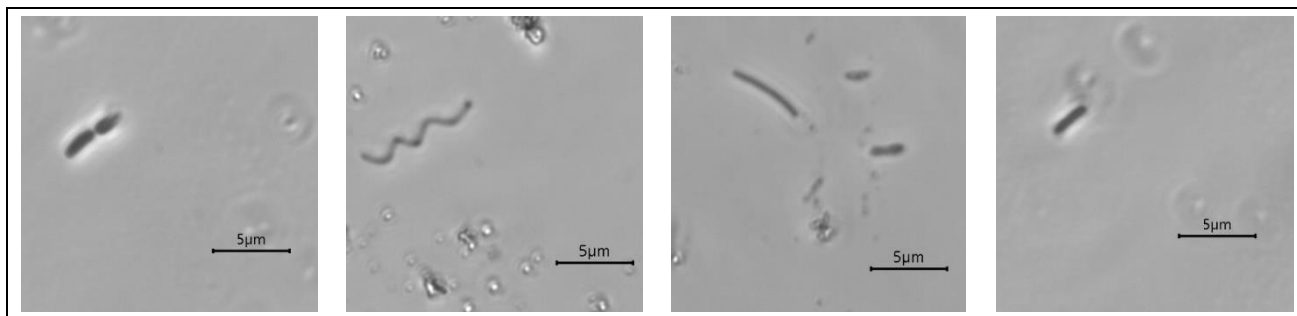


Abbildung 98: Zellformen Kaverne HCF

In identischen Versuchsansätzen mit Salzgehalten von 150 bis 310 g NaCl pro Liter im SRP-Mineralmedium unter H₂-CO₂-Atmosphäre zeigten sich deutlich die Abhängigkeit der Umsatzraten von der Salinität (Abbildung 99). Die Umsatzrate und die Menge des verbrauchten Wasserstoffs bei 150 und 200 g/l NaCl unterscheiden sich nur geringfügig. Deutlich rückläufig sind Umsatzrate und umgesetzte Gasmenge im Versuchszeitraum bei höheren Salzgehalten von 250 und 310 g/l NaCl. Die maximalen Umsatzraten sind mit 0,027 Liter Gas pro Liter Kulturvolumen und Tag bei 150 g/l NaCl erreicht worden, gefolgt von 0,022 Litern Gas pro Liter Kulturvolumen und Tag bei 200 g/l NaCl. In parallelen Labormikrokosmen wurden Umsatzraten von 0,009 bzw. 0,003 Litern Gas pro Liter Kulturvolumen und Tag bei 250 bzw. 310 g/l NaCl ermittelt.

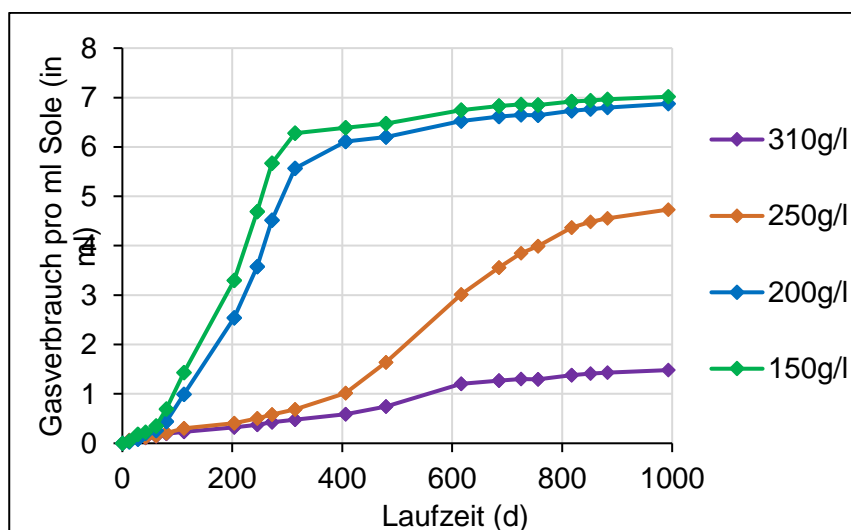


Abbildung 99: Gasverbrauch Probe HCF in Abhängigkeit vom Salzgehalt

Untersuchungen zur mikrobiellen Diversität der Kulturen der Kaverne HCF sind in Kapitel 5.4.3.4 dokumentiert.

Weitere Laborexperimente betrafen den Effekt von zusätzlichen Kohlenstoff- und Energiequellen auf den Gasumsatz bei einem der Originalprobe mit 300 g/l entsprechenden NaCl-Gehalt. Die Auswahl der Supplemente erfolgte auf Grund der hydrochemisch ermittelten möglichen Zusammensetzung von Kavernensolen. Es wurden kurzkettige organische Säuren eingesetzt und Modellsbstanz für methylierte Verbindungen (TMA, Trimethylamin; Methanol), Kohlenwasserstoffe (Paraffin) und für Karbonate (Kohlendioxid). Der Zusatz von Trimethylamin, Acetat und Paraffin führt im Vergleich zur alleinigen Gabe von Wasserstoff und Kohlendioxid zu einer erhöhten H₂-Umsatzrate (Abbildung 100). Vermutlich werden hier hydrogenotrophe Organismen gefördert, die nicht zur vollständig autotrophen Umsetzung von Wasserstoff und Kohlendioxid in der Lage sind. Die geringeren Umsätze in Gegenwart von Formiat, Laktat und Methanol sind durch konkurrierende mikrobielle Prozesse zu erklären, die nicht hydrogenotroph ablaufen. Die maximalen Gasumsatzraten wurden nach einer lag-Phase von 104 Tagen erreicht, siehe Tabelle 35.

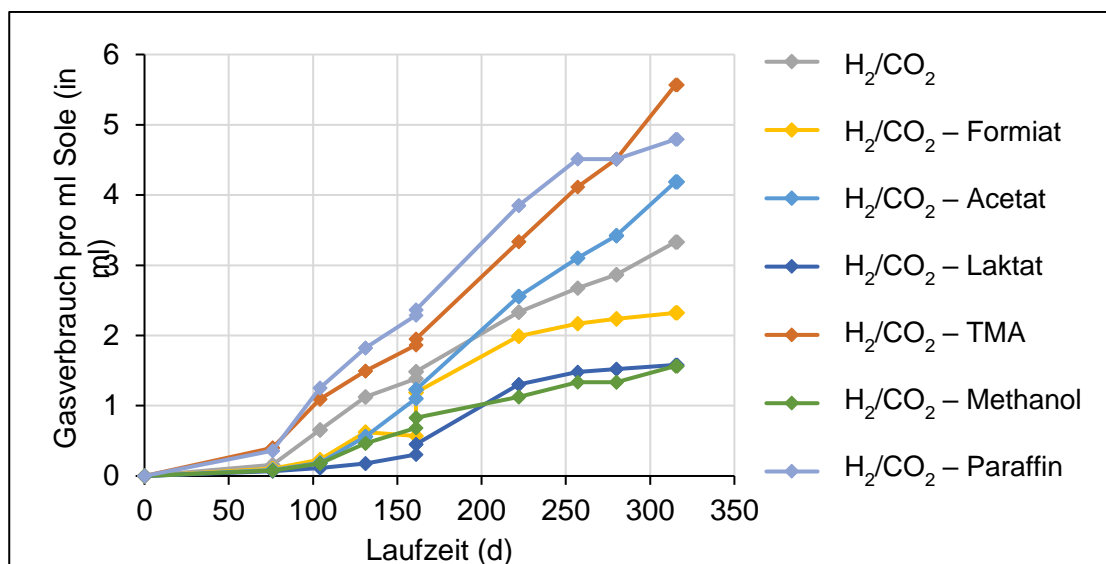


Abbildung 100: Gasverbrauch mit Probe HCF bei 300 g/l NaCl im SRP-Mineralmedium

Tabelle 35: Maximale Gasumsatzraten mit Probe HCF nach Supplementierung

Umsatzrate in Liter Gas je Liter Flüssigkeit und Tag unter Wasserstoff-Kohlendioxid-Atmosphäre und Supplementen						
ohne	Formiat	Acetat	Laktat	TMA	Methanol	Paraffin
0,013	0,014	0,020	0,011	0,020	0,007	0,022

In weiteren Parallelansätzen konnte bei 150 und 200 g/l NaCl eine Methanogenese aus methylierten Verbindungen (Methanol; TMA, Trimethylamin) unter einer H₂-Atmosphäre nachgewiesen werden. Aufgrund der Menge des zur Verfügung stehenden Probenmaterials der HCF-Kaverne konnten keine weiteren detaillierten Untersuchungen zu Sulfidbildungsraten durchgeführt werden.

Molekularbiologische Charakterisierung der Mikrobiome der Kavernensümpfe

Die mikrobiellen Gemeinschaften der Kavernensumpfproben F, H, L, M und N wurden mittels Amplikon-Sequenzierung des 16S rRNA-Gens bestimmt. Insgesamt wurden 881 Amplikon-Sequenzvarianten (ASV) aus dem Datensatz extrahiert, davon waren 118 Archaeen, eine Eukaryonten und 762 Eubakterien mindestens zur taxonomischen Ebene des Stammes zuzuordnen. Am häufigsten in den Proben vorhanden waren Vertreter der *Proteobacteria*, *Halobacterota*, *Bacteroidota*, *Firmicutes*, *Actinobacteriota*, *Halanaerobiaeota* und *Desulfobacterota*, die 91 % der mikrobiellen Gemeinschaften ausmachen (Abbildung 101). Die restlichen 9 % verteilen sich auf 21 weitere Stämme. Die dominierenden Phyla wurden normalerweise von zwei bis vier Familien repräsentiert, mit Ausnahme des Phylums *Firmicutes*, das von neun Familien repräsentiert wurde, und des Phylums *Desulfobacterota*, das nur von der Familie *Desulfohalobiaceae* dominiert wurde (Abbildung 101).

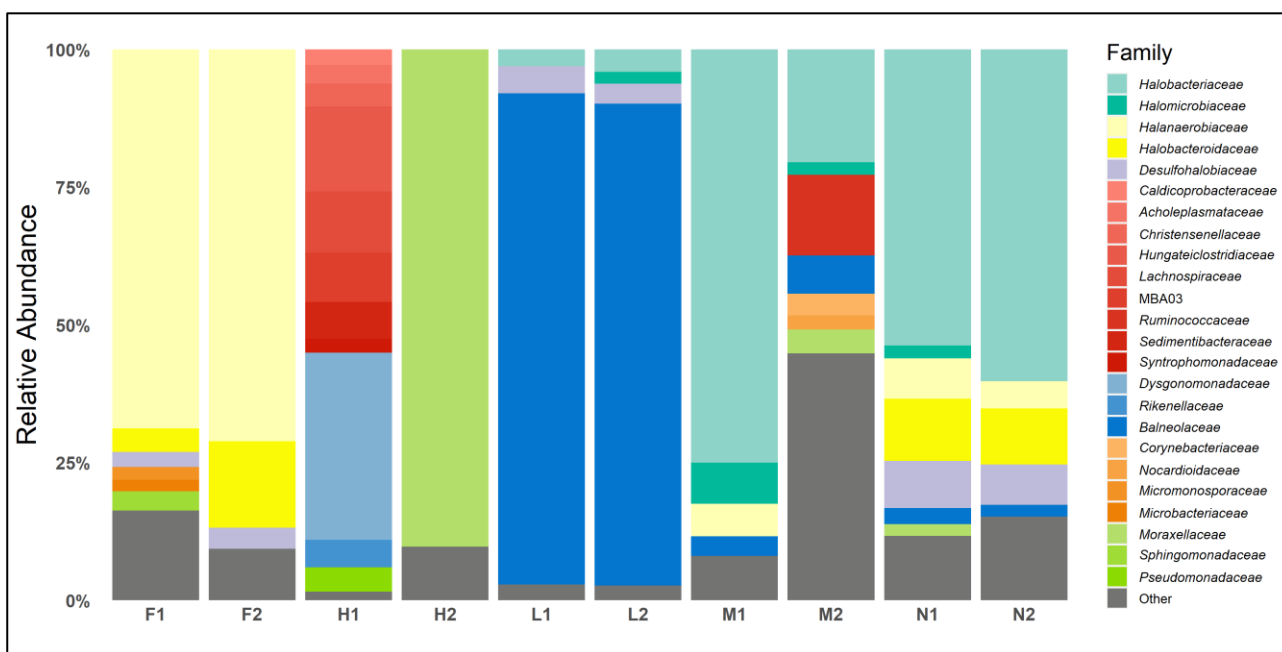


Abbildung 101: Zusammensetzungen der mikrobiellen Gemeinschaften der fünf beprobten Salzkavernen basierend auf Amplikon-Sequenzierung der 16S-V4-Region; gezeigt sind Familien mit einer relativen Häufigkeit > 3 %. DNA-Extraktion, Amplifikation und Sequenzierung wurden in Duplikaten durchgeführt. Die Read-Zählung für H.1 war signifikant niedriger als bei allen anderen Proben. Im Gegensatz zu konsistent ausfallenden Doppelproben der Kavernen F, L, M und N unterschieden sich die Sequenzierungsergebnisse der Replikate von H voneinander: Probe H.1 wurde von Firmicutes und Bacteroidota dominiert, während die andere Wiederholung (H.2) von Moraxellaceae dominiert wurde. Türkistöne: Phylum Halobacterota; gelb: Stamm Halanaerobiaeota; Flieder: Desulfobacterota; rot: Firmicutes; blau: Bacteroidota; orange: Actinobacteriota; grün: Proteobakterien; grau: ASV mit < 2 % relativer Häufigkeit (aus: (Schwab et al., 2022)).

Aus den in Abbildung 101 visualisierten Ergebnissen wird deutlich, dass die Kavernen von mikrobiellen Gemeinschaften besiedelt waren, die sich stark voneinander unterschieden. Dies verdeutlicht

auch Abbildung 102, in der die mikrobiellen Gemeinschaften und die hydrochemische Zusammensetzung in den Kavernenproben korreliert wurden. Die Korrelationsmatrix lässt vermuten, dass die detektierten niedermolekularen organischen Verbindungen Laktat, Acetat und Butyrat mikrobielle Metabolite sind. Am stärksten ähneln sich die Gemeinschaften der Kavernen M und N, beides Typ I.C Erdgaskavernen. Probe F wurde dominiert von *Halanaerobiaceae* (70 %), L wurde dominiert von *Bal-naeolaceae* (88 %) und in M und N waren *Halobacteriaceae* am häufigsten (52 %). *Halobacteriaceae* wurden in geringeren Mengen auch in den anderen Kavernen gefunden (4–10 %), sowie *Desulfohalobiaceae* (3–7 %) und *Halanaerobiaceae* (0,1–7 %).

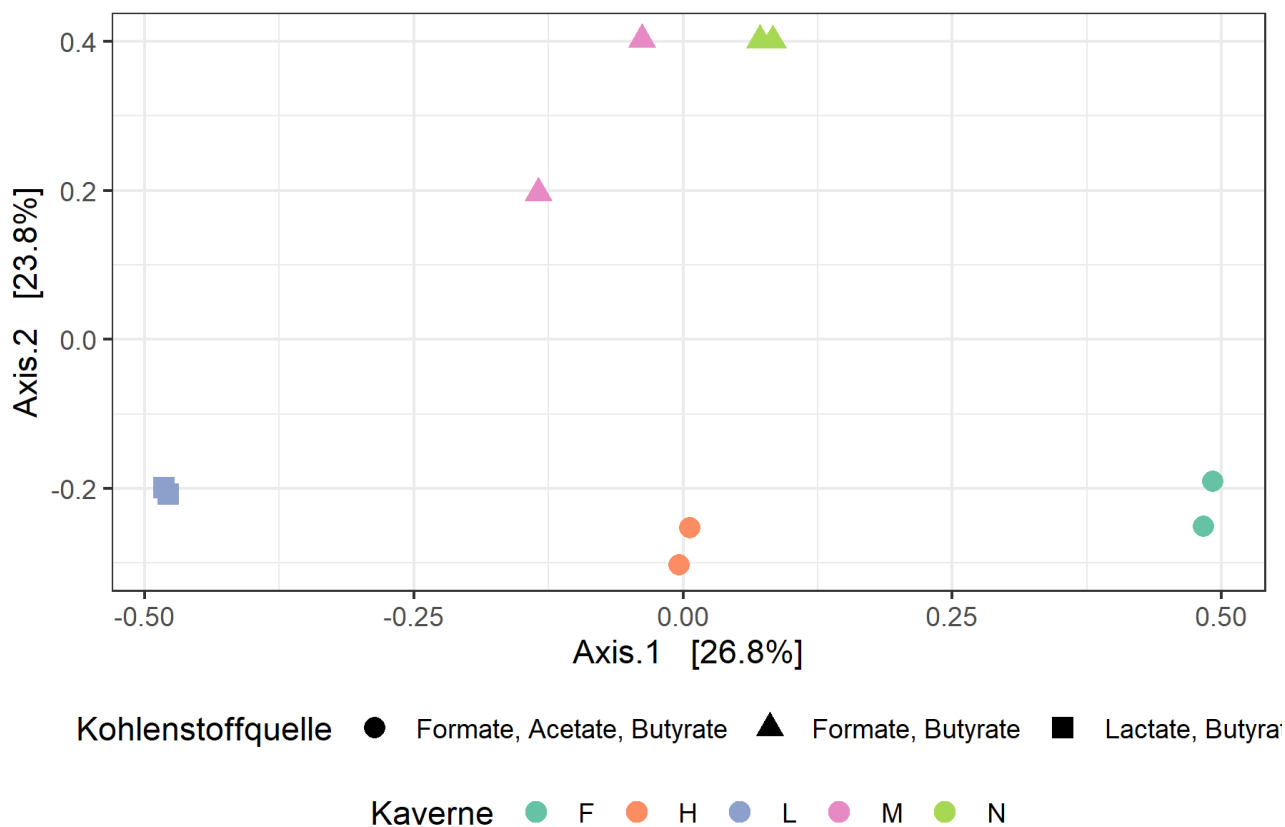


Abbildung 102: Korrelation von mikrobieller Gemeinschaft und hydrochemischer Zusammensetzung in den Kavernensumpfproben (jeweils Doppelbestimmungen). Die Ergebnisse zeigen an, dass die mikrobiellen Gemeinschaften der Kavernen unterschiedlich zusammengesetzt sind (aus: (Schwab et al., 2022)).

Mikrobielle Kerngemeinschaft

Um herauszufinden, ob es Organismen gab, die in allen Kavernen vorkamen, wurde die mikrobielle Kerngemeinschaft analysiert (basierend auf einer Nachweisschwelle von 0,01 und einer Prävalenz von 50 %). Mitglieder von sieben Familien aus fünf Phyla, nämlich *Bacteroidota*, *Desulfobacterota*, *Halanaerobiaeota*, *Proteobacteria* und *Halobacterota*, wurden in allen Kavernensümpfen gefunden (Abbildung 103). Alle nachgewiesenen archaealen ASV sind Halobakterien, sieben konnten der Gattungsebene zugeordnet werden und umfassen *Halapricum*, *Halodesulfurarchaeum*, *Halanaeroarchaeum*, *Halorhabdus*, *Haloarcula*, *Natronomonas* und *Halomicrobium*. Eine Gruppe konnte nicht weiter als der Ordnungsebene *Halobacteriales* zugeordnet werden, und zwei Gruppen sind eng verwandt mit bisher unkultivierten Vertretern der *Halobacteriaceae* und *Halobacteriales*. Die Bakterienvertreter bestanden aus Mitgliedern der Ordnung *Halanaerobiales* (Gattung *Halanaerobium*), *Desulfovibrionales* (Gattung *Desulfovermiculus*) und *Balneolales* (Gattung *Aliifodinibius*).

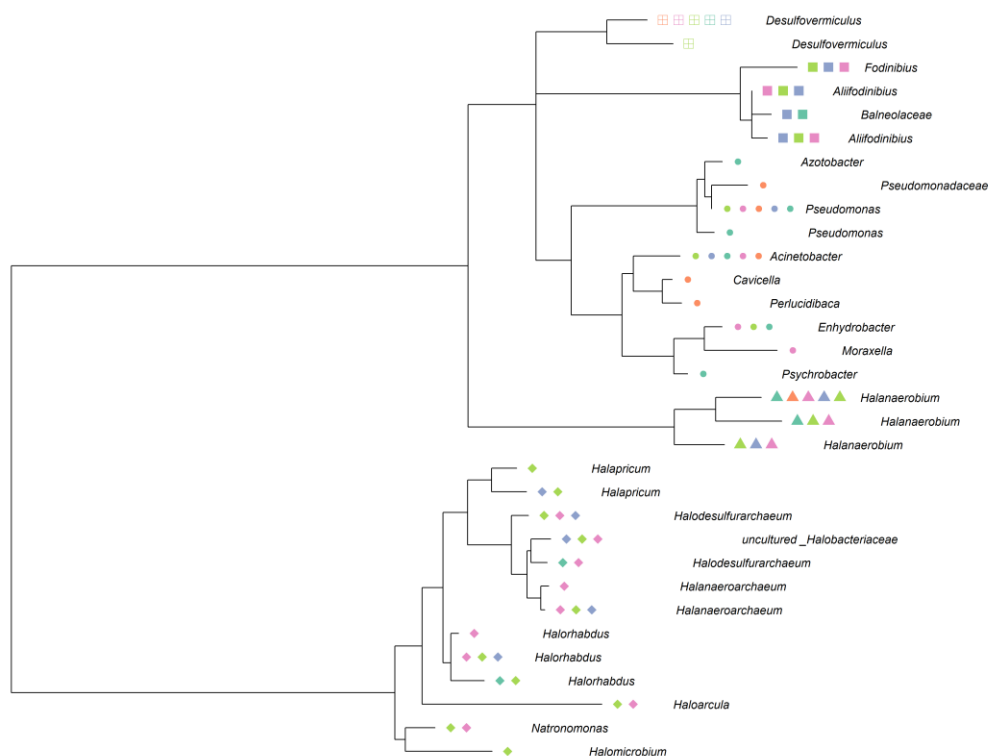


Abbildung 103: Maximum-Likelihood-Baumdarstellung der mikrobiellen Kerngemeinschaft der Kavernensumpfproben. Die Farben repräsentieren die Herkunft der jeweiligen Organismen: ■ F, ■ H, ■ L, ■ M, ■ N. Die Symbole repräsentieren Phyla, von oben nach unten: *Desulfobacterota*, *Bacteroidota*, *Proteobacteria*, *Halanaerobiaeota*, *Halobacterota*.

Sulfatreduzierende Prokaryoten bilden im Zuge ihres Energiestoffwechsels toxischen und korrosiven Schwefelwasserstoff. Die Kenntnis von Mikroorganismen in der Kavernengemeinschaft, die potenziell Sulfat reduzieren können, ist daher von besonderer Bedeutung.

Bekannt in salzigen Habitaten mit anorganischen Schwefelverbindungen atmende Prokaryoten gehören den Gattungen *Desulfovermiculus*, *Halodesulfurarchaeum* und *Halorhabdus* an (Antunes et al.,

2008; Sorokin et al., 2017). Vertreter dieser Gattungen wurden in den Kavernensumpfproben gefunden (Abbildung 103). Die potenziell sulfatreduzierenden Vertreter der *Halodesulfurarchaea*, die in den Kavernenproben nachgewiesen wurden, sind an hohe Salzkonzentrationen angepasst. *H. formicum* das einzige beschriebene Isolat der *Halodesulfurarchaea*. Drei Arten wurden für die Gattung *Halorhabdus* beschrieben; eine wurde aus dem anoxischen Becken des Roten Meeres isoliert bei einem ähnlichen Salzgehalt wie in den untersuchten Kavernensümpfen (4,7 M), eine andere Art wurde aus erbohrtem Salzgestein gewonnen (Antunes et al., 2008; Albuquerque et al., 2016). Aus der Familie *Desulfohalobiaceae* ist nur ein Vertreter, *Desulfovermiculus halophilus*, näher untersucht. Die Art wurde aus Sole eines Ölfeldes isoliert, optimal wächst der Organismus bei 10 % NaCl (1,7 M) und einem pH-Wert von 7,2. *D. halophilus* ist aber in der Lage, bei NaCl-Konzentrationen bis zu 3,8 M Sulfat zu reduzieren, und kann autotroph mit Wasserstoff und Kohlendioxid oder Formiat wachsen. Ferner wurden Vertreter der Gattung *Halanaerobium* in allen Kavernensumpfproben gefunden. Bekannte *Halanaerobium*-Arten sind halophil, anaerob und können organische Verbindungen vergären (Abdeljabbar et al., 2013; Liang et al., 2016; van Stempvoort, Millar and Lawrence, 2009).

Zusammenfassend zeigten die chemischen und biologischen Analysen, dass Solen von mitteleuropäischen Salzkavernen von Mikroorganismen besiedelt sind. Die Mikrobiome der beprobten Salzkavernensümpfe waren strukturell unterschiedlich und bestanden hauptsächlich aus halophilen (salzliebenden) Organismen. Dies belegt, dass die Mehrzahl der Mikroorganismen nicht über Bohr- und Solprozesse von außen eingetragen wurden, sondern autochthon waren und angepasst an die hohen Salzkonzentrationen der Kaverne. Da einige der nachgewiesenen Organismen mit bekannten halophilen sulfatreduzierenden Prokaryoten verwandt sind, die Wasserstoff als Energiequelle nutzen können, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es während der Speicherung von Wasserstoff zu unerwünschter Bildung von Schwefelwasserstoff kommt. Die Ergebnisse legen nahe, dass die langfristige H₂-Speicherung in Salzkavernen von einer regelmäßigen biogeochemischen Überwachung begleitet sein sollte, um eine unerwünschte Bildung von z. B. Schwefelwasserstoff rechtzeitig zu erkennen.

5.4.3 Auswirkungen einer Wasserstoffexposition auf mikrobielle Prozesse

5.4.3.1 Stimulationspotenzial unter Niederdruckbedingungen

Isolation und Anreicherung wasserstoffverwertender Mikroorganismen

Charakterisierung der Anreicherungskulturen

Aus der Kultursammlung gewonnenen Anreicherungskulturen wurden hinsichtlich ihrer Stoffwechsellleistungen charakterisiert, hinsichtlich Verwertung von Bestandteilen des Speichergases und der Kavernensole und der Bildung von organischen Säuren, Methan und Sulfid. Exemplarisch wird hier eine Versuchsreihe mit den Einzelversuchen S4 bis S15 dargestellt, in der vier Varianten bei drei Salzgehalten (150, 200, 250 g/l NaCl) verglichen wurden (Tabelle 36):

Tabelle 36: Versuchsmatrix zur Charakterisierung von Anreicherungen

Versuchsvariante	NaCl-Gehalt [g/l]		
	150	200	260
Wasserstoff / Kohlendioxid / Acetat ¹⁾	S4	S5	S6
Wasserstoff / Kohlendioxid / Laktat	S7	S8	S9
Wasserstoff / Kohlendioxid / Methanol	S10	S11	S12
Wasserstoff / Kohlendioxid	S13	S14	S15

1) Schriftfarben entsprechenden Linienfarben in Abbildung 104 und Abbildung 105

Analysen der Flüssigphase (Abbildung 104) ergaben für Salzgehalte von 150 und 200 g/l eine vergleichbare Keimentwicklung. Die Vermehrungsraten und die zum Versuchsende erreichten Zellzahlen waren nahezu identisch. Bei Salzgehalten von 260 g/l bleiben die Werte deutlich darunter, insbesondere wenn nur Wasserstoff und Kohlendioxid allein oder in Kombination mit Methanol zur Verfügung stehen. Sulfat wird bei 150 und 200 g/l vollständig verbraucht. Bei höherem Salzgehalt konnte im Versuchszeitraum keine Sulfatreduktion festgestellt werden. Vermutlich war die Versuchsdauer zu kurz gewählt und die Organismen benötigen eine längere lag-Phase zur Anpassung, denn bei Nachkontrollen an Rückstellproben konnten außer im Ansatz mit Wasserstoff/Kohlendioxid ein vollständiger Verbrauch des Sulfats festgestellt werden. Acetat wird in allen Ansätzen gebildet. Dies ist in allen Ansätzen aus einer Umsetzung von Wasserstoff und Kohlendioxid erklärbar. Die höchsten Acetatkonzentrationen werden bei Vorhandensein von Laktat erreicht, das von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zu Acetat umgesetzt wird. Laktat wird bei allen Salzgehalten vollständig verwertet. Bei unterschiedlich ausgeprägten lag-Phasen sind die maximalen Umsatzraten dabei kaum vom Salzgehalt abhängig.

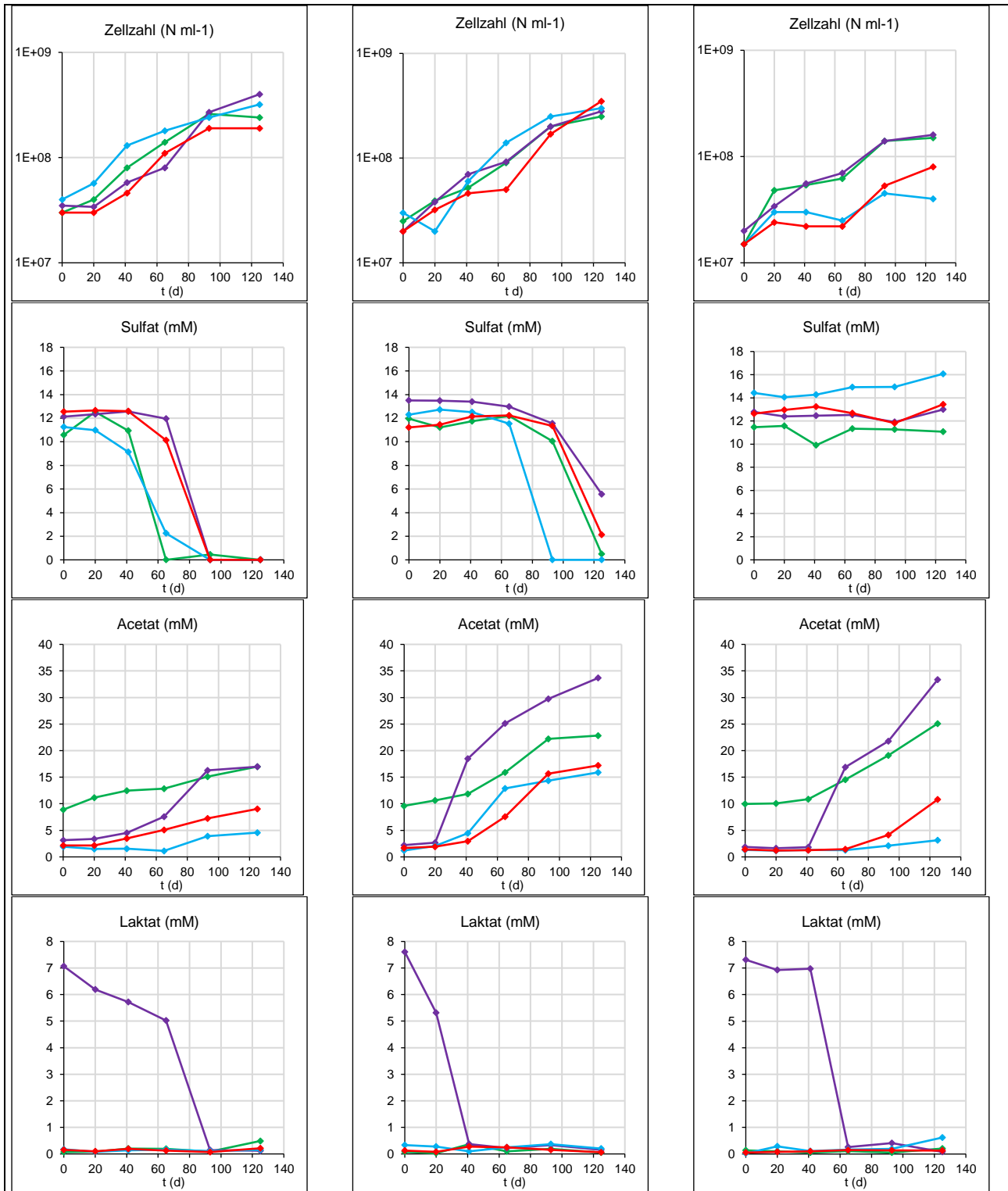


Abbildung 104: Parameter der Flüssigphase, H₂/CO₂ = rot, H₂/CO₂/Acetat = grün, H₂/CO₂/Laktat = lila, H₂/CO₂/Methanol = blau; Salzgehalt: links = 150 g/l, Mitte = 200 g/l, rechts = 260 g/l NaCl

Die Betrachtung der Gasphase (Abbildung 105) zeigt die Umsetzung von Wasserstoff und Kohlendioxid in allen Ansätzen mit einer erwarteten Abnahme der Umsatzraten bei höheren Salzgehalten. Die Bildung von Methan erfolgt nur aus der methylierten Verbindung Methanol. In diesem Versuch bis zu Salzgehalten von 200 g/l NaCl. Dies entspricht weitgehend Literaturdaten, die Methanbildung aus Wasserstoff und Kohlendioxid nur bis 135–150 g/l NaCl und aus Acetat bis 130 g/l belegt. Die Methanogenese aus Laktat ist nicht direkt, sondern erst nach vorherigem Abbau zu Acetat oder C1-Verbindungen möglich.

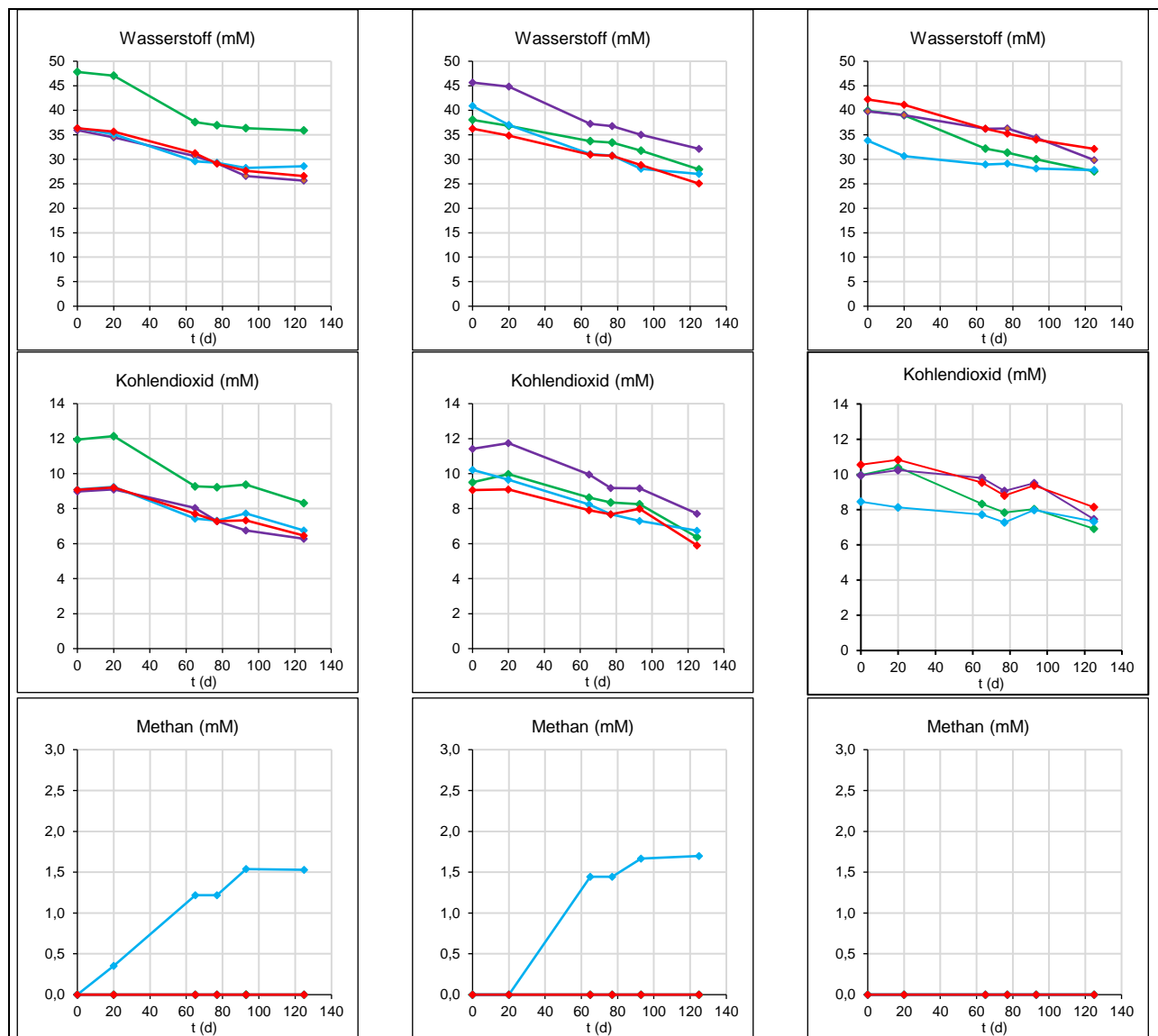


Abbildung 105: Parameter der Gasphase, H₂/CO₂ = rot, H₂/CO₂/Acetat = grün, H₂/CO₂/Laktat = lila, H₂/CO₂/Methanol = blau; Salzgehalt: links = 150 g/l, Mitte = 200 g/l, rechts = 260 g/l NaCl

Die Kulturen wurden darüber hinaus molekularbiologisch charakterisiert (siehe Kapitel 5.4.3.4, Abbildung 117).

In diesen und weiteren Versuchsansätzen auf Grundlage der Anreicherungskulturen in artifiziellen Mineralmedien konnten unter H₂-Exposition nachgewiesen werden:

- Sulfatreduktion mit H₂-Verwertung bis zu Salzsättigung,
- Sulfatreduktion mit Laktatverwertung bis zur Salzsättigung,
- Sulfatreduktion mit Umsetzung von Laktat zu Acetat bis 260 g/l NaCl,
- Acetogenese aus Wasserstoff und Kohlendioxid bis 260 g/l NaCl,
- Hydrogenotrophe Methanogenese bis 150 g/l NaCl,
- Methanogenese aus methylierten Verbindungen bis 250 g/l NaCl,
- Methanogenese aus Acetat bis 150 g/l NaCl.

Die nachgewiesenen H₂-verwertenden Umsetzungen führen bei ausreichend langen Versuchszeiten und sonst nicht limitierenden Bedingungen zu einem vollständigen Verbrauch des Wasserstoffs. In den Labormikrokosmen wurden die Versuche aus messtechnischen Gründen bei 50 mbar Absolutdruck in den Kulturgefäßen abgebrochen.

Mikrobiologische, isotopenchemische, molekularbiologische Charakterisierung ausgewählter Wasserstoffverwerter

Wasserstoffeinlagerung im Niederdruckkavernenmodell

In den Untersuchungen im Niederdruckkavernenmodell (Versuchsmatrix siehe Tabelle 31) konnten in den Versuchsreihen 1, 3, 5, und 6 mit ausschließlichem Einsatz von Original Kavernensole der Kavernen F, H, L, M, N, C und Original Salz des Kavernenstandortes keine messbaren Stoffumsätze gefunden werden. In der Anfangsphase des Versuches kommt es in den Ansätzen mit Salzzusatz zu Gleichgewichtseinstellungen. Die Sulfatkonzentrationen in den Kavernensolen und im mineralischen Vergleichsmedium (siehe Kontrollansatz I-A30 mit 300 g/l NaCl) stabilisieren sich durch Nachlösen aus dem Salz, auch bei nachgewiesener Sulfatverwertung mit Sulfidbildung in Reihe 4 (Abbildung 106).

Der CO₂-Gehalt in der H₂-Atmosphäre steigt durch die Gleichgewichtseinstellung mit den im Salz enthaltenen Karbonaten bis auf 3 % an. In Versuchsreihe 3 ohne messbare mikrobielle Aktivität bleibt dieser Wert stabil. Die Mikroorganismen in Versuchsreihe 4 nutzen die Karbonate als Kohlenstoffquelle. Mit zunehmenden Substratverbrauch stellen sich neue Gleichgewichte ein und ab dem 100. Tag nimmt der Kohlendioxidgehalt deutlich ab bis zum teilweise vollständigen Verbrauch (Abbildung 107). Bei Einsatz der Sole C kann es auf Grund des pH von über 10 nicht zu einer Freisetzung des Kohlendioxids kommen. Das Gleichgewicht ist pH abhängig und liegt hier auf der Seite der Karbonate.

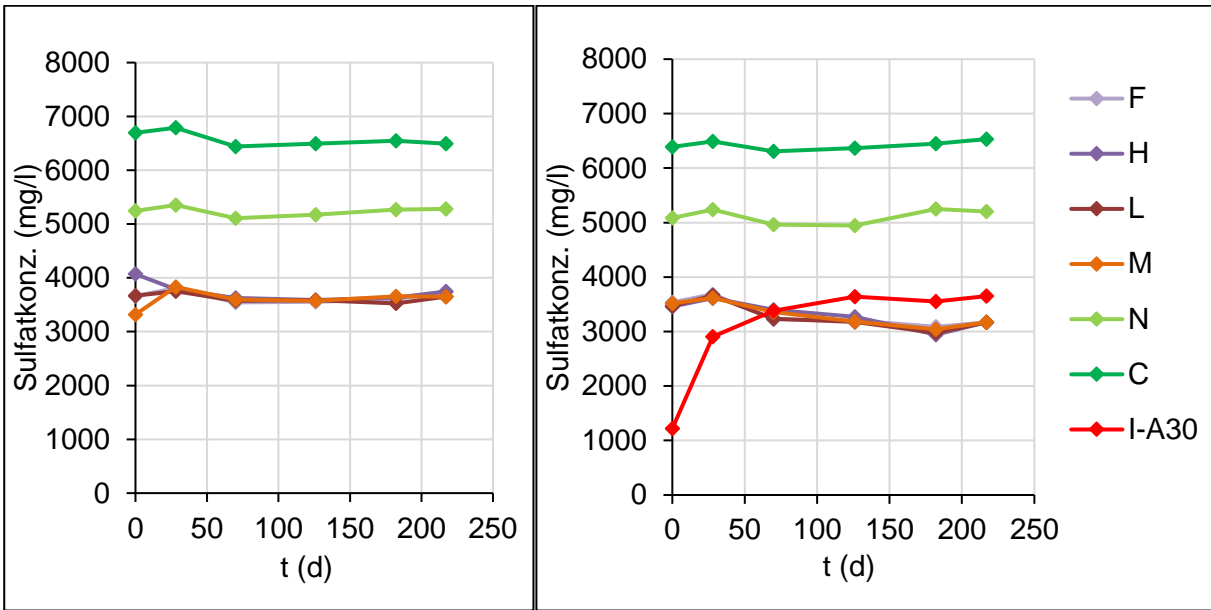


Abbildung 106: Sulfatkonzentration Versuchsreihe 3 (links) und 4 (rechts)

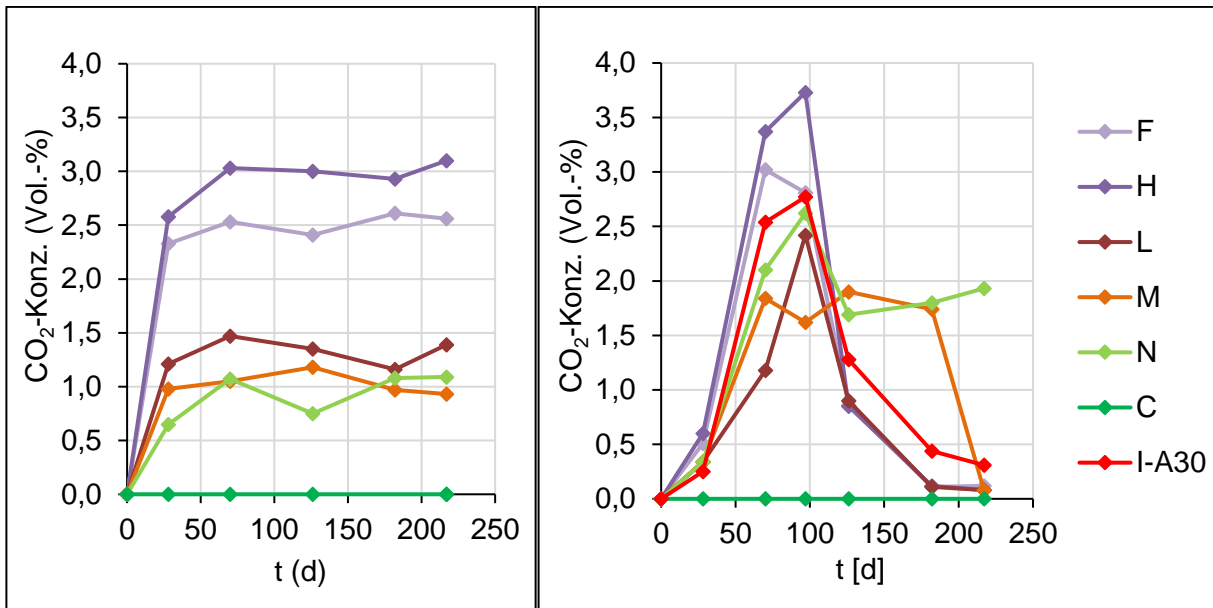


Abbildung 107: Kohlendioxidkonzentration in der Gasphase Versuchsreihe 3 (links) und 4 (rechts)

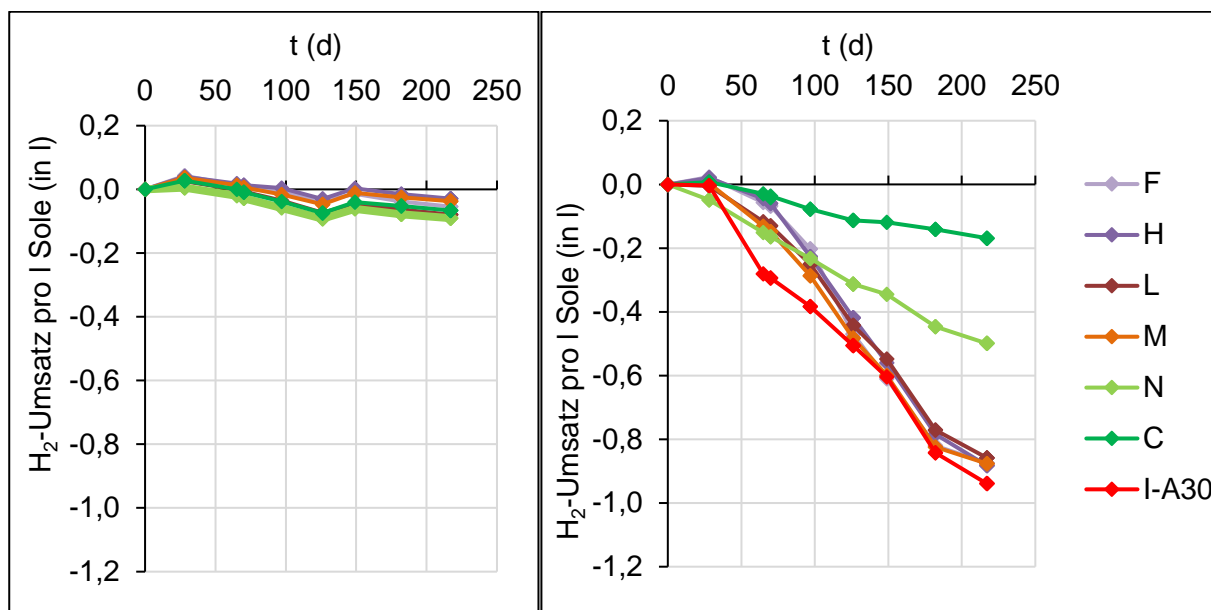


Abbildung 108: Wasserstoffumsatz Versuchsreihe 3 (links) und 4 (rechts)

Nur in den Versuchsreihen 2 und 4 mit Zusatz von halophilen Organismen aus den Anreicherungskulturen konnte eine Bildung von Sulfid und eine Umsetzung von Wasserstoff nachgewiesen werden. Dies belegt die Entwicklungsfähigkeit halophiler Organismen unter Kavernenbedingungen. Mit den Solen der Kavernen F, H, L und M werden vergleichbare Umsätze wie beim Einsatz eines optimierten SRP-Mineralmediums im Kontrollansatz I-A30 erreicht (Abbildung 108). Die Untersuchungen mit Kavernensole C zeigen deutlich geringere Umsätze. Dies ist auf die Verwendung von Elektrolysesole mit pH von 10 zurückzuführen. Bei diesem Wert sind nur wenige Organismen zu Wachstum und Vermehrung in der Lage. Auch bei der Kavernensole N bleiben die Umsätze deutlich geringer. Ein Effekt des pH ist hier nicht herzuleiten, da keine signifikanten Unterschiede zu den Solen F, H, L und M bestehen. Auch wenn die Kaverne im Zuge von Wartungsarbeiten einmalig mit Elektrolysesole geflutet wurde, erreichte der pH nie Werte über 8. Eine hemmende Wirkung kann hier wie auch bei der Kavernensole C durch Chlorat hervorgerufen werden. Chlorat konkurriert mit Sulfat um die Bindung an das aktive Zentrum des Enzyms Sulfatadenyltransferase (Sat). Bindet Chlorat kann Sulfat hier nicht aktiviert und durch die Zellmembran in die Mikroorganismenzelle transportiert werden. Chlorat wurde nur in den Kavernensolen C und N nachgewiesen, mit deutlich höheren Konzentrationen in der Kaverne C. Der Versuchsverlauf deutet an, dass Chlorat mit zunehmender Zellzahl in Folge der irreversiblen Bindung an das Sat-Enzym aus der Sole entfernt wird. In Abbildung 109 zeigen die inokulierten Ansätze, die Versuchsreihen 2 und 4, der Kaverne M eine deutliche Abnahme und der inokulierte Ansatz der Reihe 2 der Kaverne C eine leichte Abnahme der Chloratkonzentration. Weitere Untersuchungen müssen hier zeigen, bei welchem Grad der Keimentwicklung Chlorat zumindest temporär eine hemmende Wirkung haben kann und ob dies in technischen Prozessen zu nutzen ist.

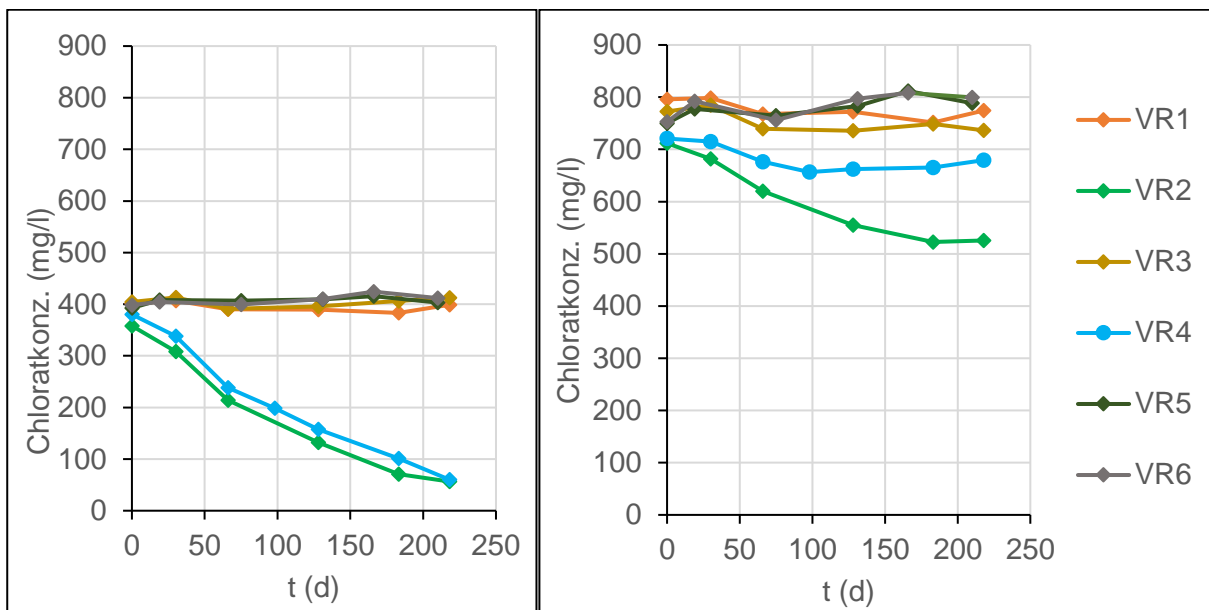


Abbildung 109: Chloratkonzentration in Versuchsreihen (VR) mit Sole der Kaverne M (links) und Kaverne C (rechts)

Zum Abschluss des Versuches (220 Tage) wurden die Sulfide in Flüssig- und Gasphase analysiert. Ausgewählt wurden die Reihen 3 und 4, in denen Wasserstoff mit Original Kavernensole und -sals gelagert wurde. In Reihe 4 wurde eine halophile sulfatreduzierende Kultur zugesetzt, deren Effekt schon rein makroskopisch durch die Eisensulfidbildung infolge der Sulfatreduktion zu erkennen ist, siehe Abbildung 110.

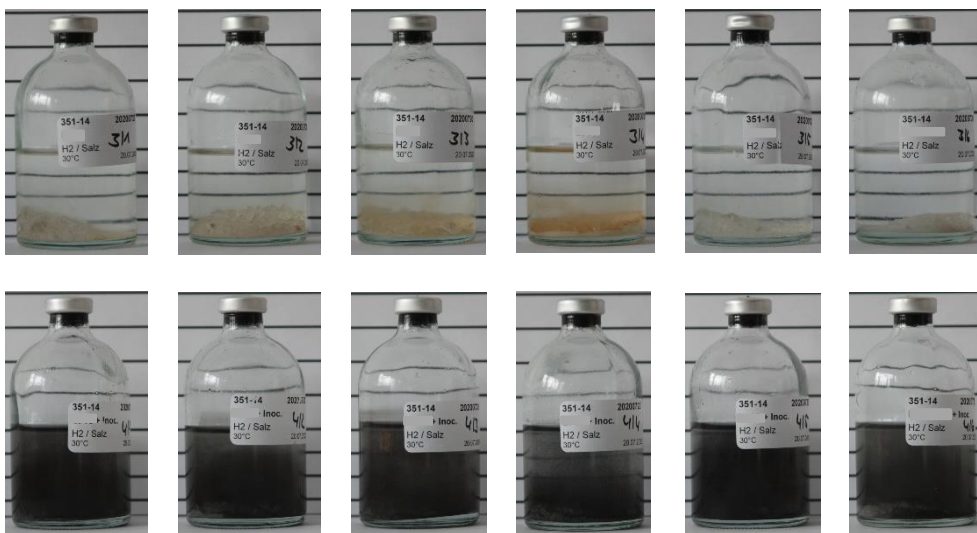


Abbildung 110: Versuchsreihen 3 (oben) und 4 (unten) mit Solen F, H, L, M, N, C (v.l.n.r.) nach 220 Tagen Inkubation

In den Ansätzen der Reihe 3 ohne Zusatz von Anreicherungskultur lagen die Sulfidkonzentrationen unter der Nachweisgrenze für die Flüssigphase von 0,02 mg/l und der Gasphase von 0,005 mg/l. Die Messwerte für Reihe 4 sind in Tabelle 37 zusammengefasst. Neben der Konzentration in der Gasphase konnte die Konzentration des gelösten Sulfids und das Gesamtsulfid als Summe von gelöstem und ungelöstem Sulfid bestimmt werden. Der geringe Anteil nicht gelösten Sulfides zeigt die geringe Bindungskapazität der Sole und des Salzes. Nur ein geringer Anteil des Sulfids kann durch Ausfällung nicht löslicher Metallsulfide gebunden werden.

Tabelle 37: Sulfidkonzentrationen in Gas- und Flüssigphase Versuchsreihe 4 der Wasserstoffeinlagerung

Probe	Gasphase	Flüssigphase	
	H ₂ S [mg/l]	Gelöstes Sulfid [mg/l]	Gesamtsulfid [mg/l]
F	16,6	202,1	204,5
H	16,6	212,5	214,4
L	18,6	208,3	209,7
M	12,0	200,9	209,8
N	7,4	26,6	27,2
C	< 0,005	2,0	12,2
I-A30	36,5	259,9	266,8

Die über die Versuchszeit verbrauchten H₂-Mengen korrelieren mit den gebildeten Sulfidmengen (Abbildung 111). Es ist davon auszugehen, dass die Umsetzungen des Wasserstoffs überwiegend durch Sulfatreduktion erfolgten. Im Kontrollansatz werden mit 4,3 Mol verbrauchten Wasserstoff 1 Mol Sulfid gebildet (stöchiometrisch 4 : 1), für Kavernensole F, H, L und M wurde ein Verhältnis von 5,2 : 1 ermittelt. Mit Sole N und C werden mit 25,0 und 21,7 Mol Wasserstoff pro Mol Sulfid abweichende Werte festgestellt. Die Verteilung der Sulfide zwischen Gas- und Flüssigphase entspricht der bekannten Abhängigkeit vom pH. Für die Solen F, H, L und M finden sich 88–92 % des gebildeten Sulfids in der Flüssigphase. Für die Sole N mit etwas niedrigerem pH sind es 71 % und bei der Sole C mit einem pH von 10 finden sich die Sulfide vollständig in der Flüssigkeit.

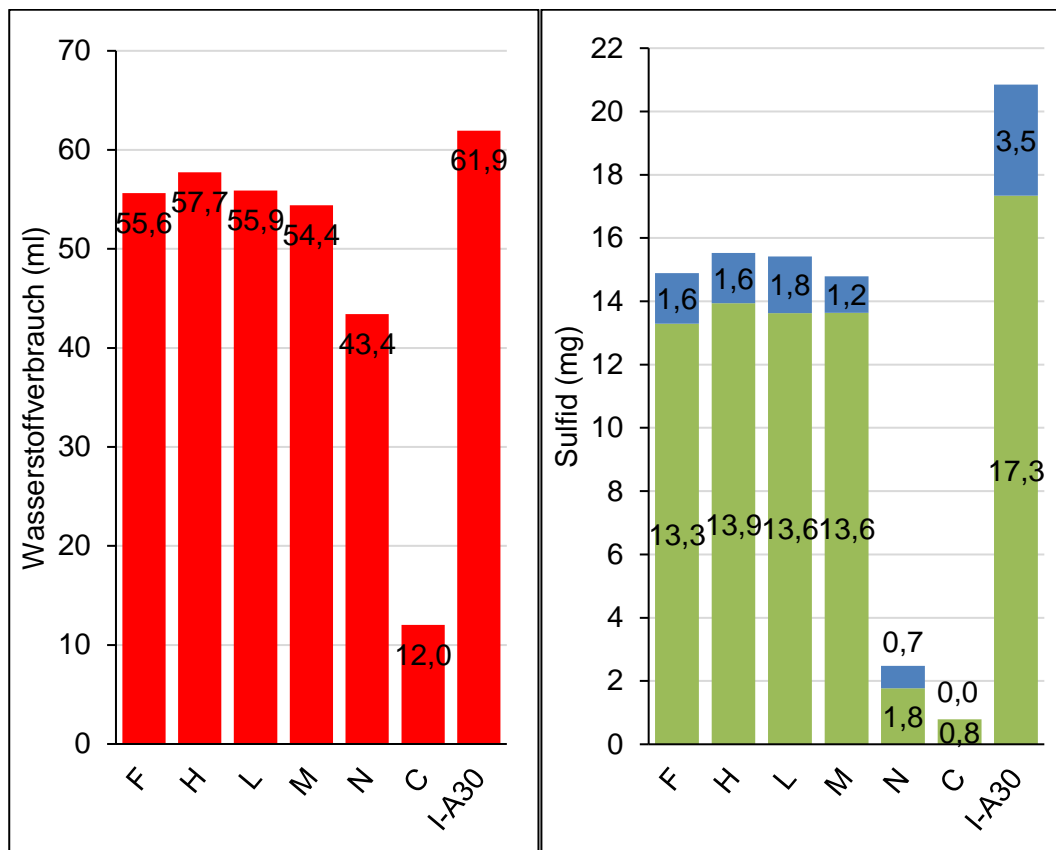


Abbildung 111: Wasserstoffverbrauch (links) und gebildetes Sulfid (Sulfid in Sole = grün, Sulfid im Gas = blau) in Labormikrokosmen nach 220 Tagen

5.4.3.2 Stimulationspotenzial unter Hochdruckbedingungen

Die Experimente wurden mit Sole und Salz des Kavernenstandortes Bad Lauchstädt durchgeführt. Die Untersuchungen ohne Zusatz sulfatreduzierender Organismen zeigten wie im Niederdruckmodell keine messbaren mikrobiellen Umsetzungen. Die Zellzahl blieb über den Versuchszeitraum ebenfalls unverändert. In Parallelansätzen mit der unter sonst identischen Bedingungen im Niederdruckmodell aktiven Kultur konnten bei 100 bar bei Zusatz keine messbaren Stoffumsätze festgestellt werden. Auch hier blieb die Zellzahl über die Versuchsdauer unverändert. Ursache für die Nichtaktivität kann die Hemmung der Mikroorganismen durch Druckstress sein. Eine Zellschädigung durch zu schnelle Druckwechsel bei Beaufschlagen der Reaktoren mit Wasserstoff und der Druckentlastung kann nach mikroskopischer Kontrolle weitgehend ausgeschlossen werden. Auch konnte gaschromatographisch nachgewiesen werden, dass keine toxischen Sauerstoffkonzentrationen vorlagen. Kritisch anzumerken ist, dass die Versuchszeit mit 140 Tagen möglicherweise zu kurz gewählt wurde, um eine Adaptation an die Versuchsbedingungen zu gewährleisten.

5.4.3.3 Identifizierung aktiver Mikroorganismen in Kavernensolen mittels nanoSIMS während einer Wasserstoffexposition

Die Ergebnisse der SIP-Tracer-Experimente sind in Abbildung 112 zusammengefasst. Inkubiert wurden die Kavernensolen H und L für insgesamt 7 Monate mit oder ohne Wasserstoff. Zur Detektion von Zellaktivität wurden einigen Ansätzen die markierten Tracer $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ (15 Atomprozent; at.-%)

und D_2O (15 at.-%) hinzugefügt. In der Abbildung 112 symbolisieren einzelne Punkte jeweils den Einbau von ^{13}C und Deuterium in einzelnen Zellen. Auf der x-Achse ist der Atomprozent-Gehalt an Deuterium (2H , gemessen über das C_2D^- -Ion) und auf der y-Achse der Atomprozent-Gehalt an ^{13}C (gemessen über das ^{13}C -Ion) aufgetragen. Die Zellen, die in einem Bereich von 1,1 at.-% ^{13}C bzw. 0,05 at.-% 2H angesiedelt sind, weisen eine natürliche Häufigkeit dieser Isotope auf. Das bedeutet, dass diese Zellen kein ^{13}C und 2H aus den angebotenen Tracer-Substanzen aufgenommen haben und somit stoffwechselphysiologisch inaktiv sind. Zur Kontrolle wurden auch Zellen analysiert, denen kein isotopisch markierter Tracer angeboten wurde (in der Abbildung durch rote Symbole dargestellt), diese liegen im selben Bereich. Bei Beaufschlagung der Kavernensole mit Wasserstoff reicherte sich Deuterium in einigen Zellen an (in der Abbildung durch graue Symbole dargestellt). In der Mikroorganismengemeinschaft der Kaverne H waren diese Zellen gleichzeitig auch mit schwerem Kohlenstoff (^{13}C) angereichert. Insgesamt waren in der Gemeinschaft der Kaverne H 3,2 % der Zellen in Deuterium und ^{13}C -Kohlenstoff angereichert und 6,5 % der Zellen nur in Deuterium. In der Gemeinschaft der Kaverne L war nur eine Anreicherung in Deuterium, nicht aber in ^{13}C zu sehen. Die Fraktion angereicherter (aktiver) Zellen war deutlich größer in Versuchsansätzen, in denen Wasserstoff zugegeben worden war, als in Versuchsansätzen, in denen kein Wasserstoff zugesetzt wurde (Zellen aus diesen Ansätzen repräsentiert durch orangene Symbole), jedoch gab es auch in diesen Ansätzen einzelne Zellen, die aktiv waren.

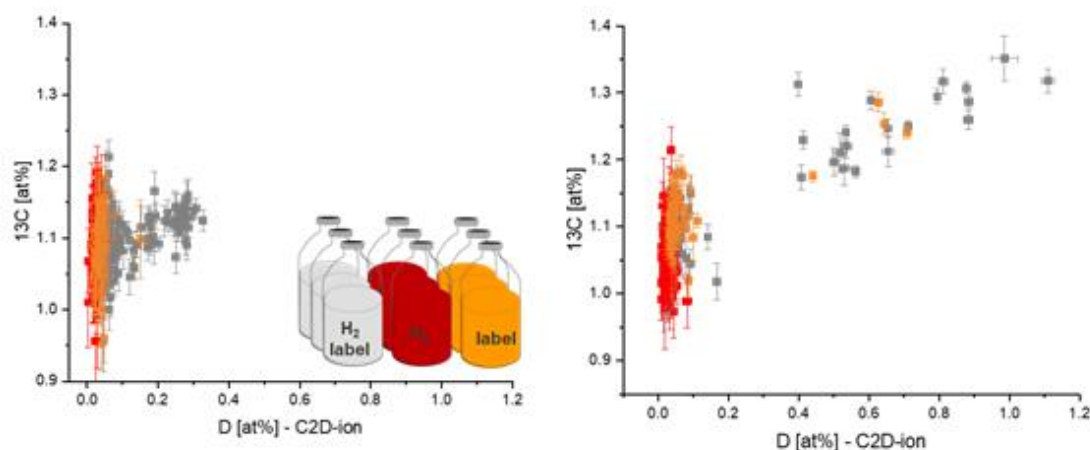


Abbildung 112: Ergebnisse der nanoSIMS-Analysen der mikrobiellen Gemeinschaften der Solen aus den Kavernen L (links) und H (rechts). Auf der y-Achse ist der Einbau von $^{13}C-HCO_3$ dargestellt, auf der x-Achse der Einbau von Deuterium (jeweils in Atomprozent). Einzelne Symbole repräsentieren den Einbau in einzelne Zellen. Rote Symbole: Zellen inkubiert mit Wasserstoff, aber ohne Isotopentracer; orange Symbole: Zellen inkubiert mit Isotopentracern ($^{13}CO_3^{2-}$, D_2O), aber ohne Wasserstoff; graue Symbole: Zellen inkubiert mit Wasserstoff und Isotopentracern ($^{13}CO_3^{2-}$, D_2O). Insbesondere einzelne Zellen der Kaverne H zeigen bei Inkubation mit Wasserstoff und Isotopentracern einen Einbau von markiertem Kohlenstoff und Deuterium.

Während der Inkubation wurde keine Produktion von Sulfid nachgewiesen, was H_2 -Oxidation über Sulfatreduktion angezeigt hätte; die isotopisch markierten Zellen sind zwar aktiv, aber ein messbarer

Umsatz des Elektronenakzeptors Sulfat war nicht detektierbar. Dies weist darauf hin, dass die Umsatzraten der gesamten mikrobiellen Gemeinschaft niedrig waren. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen parallel durchgeführter Inkubationen von Kavernensole mit Wasserstoff (siehe Kapitel 5.4.3.1). Die Ergebnisse der nanoSIMS-Versuche zeigen jedoch, dass die Mikroorganismengemeinschaften der Kavernensolen unter angenäherten In-situ-Bedingungen prinzipiell stoffwechselaktiv sind, ein Ergebnis, welches wir als wertvoll ansehen und welches verdeutlicht, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass einzelne Mitglieder der mikrobiellen Gemeinschaften der Kavernen bei Langzeitexposition mit Wasserstoff selektiv aktiviert werden und biogeochemische Prozesse durchführen, die die H₂-Speicherung negativ beeinflussen könnten. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein regelmäßiges Monitoring mikrobiologischer Prozesse und mikrobieller Gemeinschaften während der H₂-Speicherung in Salzkavernen notwendig ist, um unerwünschte Prozesse frühzeitig zu erkennen.

5.4.3.4 Mikrobielle Diversität in Anreicherungskulturen

Die mikrobielle Diversität wurde in zahlreichen halophilen H₂-verwertenden Anreicherungskulturen (siehe Kap. 5.4.3.1) mittels Amplikon-Sequenzierung des 16S rRNA-Gens bestimmt; das Inokulum dieser Kulturen stammte aus unterschiedlichen unterirdischen Salzformationen. Im Gegensatz zu den untersuchten mikrobiellen Gemeinschaften aus den Kavernensolen F, H, L, M, N waren diese Anreicherungskulturen unter definierten Bedingungen stoffwechselphysiologisch weitaus aktiver, sodass sich in den Kulturen Stoffwechselprozesse, wie z. B. Sulfatreduktion, Methanogenese, Acetogenese oder H₂-Oxidation, über kontinuierlich durchgeführte nasschemische Analysen nachweisen ließen. Darüber hinaus wurden die Kulturen über lange Zeiträume inkubiert (Jahre), sodass aktive Mikroorganismen über Wachstum und Transfer in neue Nährmedien selektiv angereichert werden konnten. Die in den molekularbiologischen Untersuchungen bestimmten Mikroorganismen dieser Anreicherungskulturen repräsentieren also Organismen, die als Indikatororganismen für bestimmte Stoffwechselprozesse – Sulfatreduktion, Methanogenese, Acetogenese, H₂-Oxidation – in unterirdischen Salzformationen angesehen werden können.

Insgesamt wurden die mikrobiellen Gemeinschaften von 27 Anreicherungskulturen bestimmt. In den 27 Kulturen wurden insgesamt 922 Operationale Taxonomische Einheiten (OTU) identifiziert (422 Archeen, 500 Eubakterien), die aus insgesamt 4.469.936 amplifizierten Sequenzen des 16S-rRNA-Gens (in insgesamt 52 Proben) erhalten wurden. Viele OTU konnten nur der Familien- oder maximal Gattungsebene zugeordnet werden, sie waren also nicht mit bekannten Arten nahe verwandt.

Die Strukturen der 27 angereicherten mikrobiellen Gemeinschaften wurden mittels Hauptkomponentenanalyse (HKA; Principal Component Analysis, PCA) nach Bray-Curtis bestimmt (Abbildung 113). Die Mikroorganismengemeinschaften der Herkunft HCF und einiger angereicherter Gemeinschaften der Herkunft MK (MK-S15, MK-S20, MK-S25, siehe Kapitel 5.3.5.1) unterschieden sich deutlich von den restlichen Gemeinschaften, letztere beeinflusst durch hohe Salzkonzentrationen im Medium („Salinity Medium high“, Abbildung 113). Das Ergebnis zeigt, dass einzelne halophile Mikroorganismen ggf. nicht ubiquitär vorkommen (singuläre Struktur des HCF-Konsortiums), und dass die Struktur einer halophilen Mikroorganismengemeinschaft stark durch den Salzgehalt beeinflusst werden kann (singuläre Struktur der bei hohen Salzgehalten kultivierten Mikroorganismengemeinschaften MK).

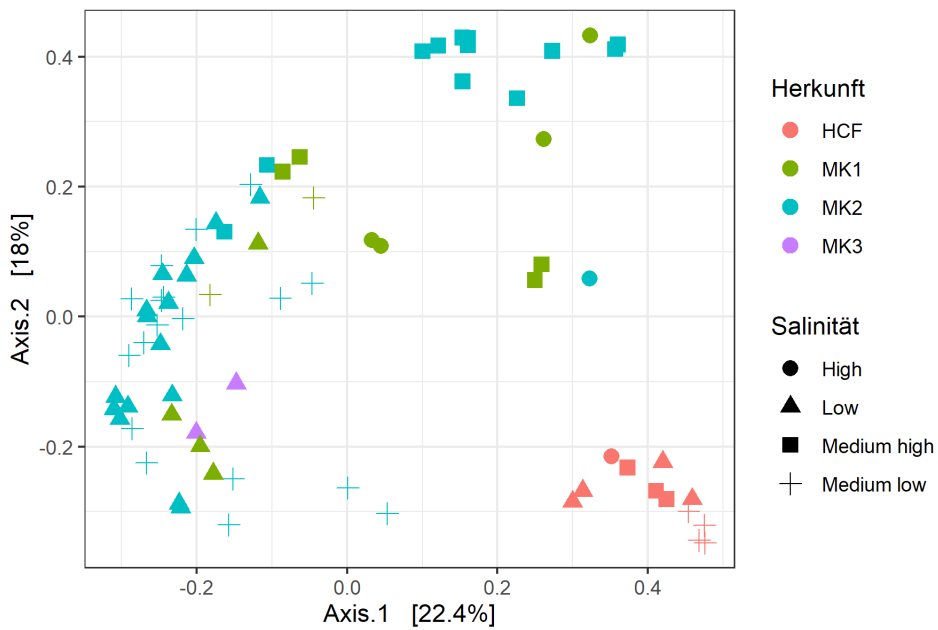


Abbildung 113: Ähnlichkeitsanalyse der untersuchten Anreicherungskulturen mittels Hauptkomponentenanalyse nach Bray-Curtis. Die Mikroorganismengemeinschaften der Herkunft HCF und einiger angereicherter Gemeinschaften der Herkunft MK unterscheiden sich deutlich von den restlichen Gemeinschaften.

Gesamtanzahl an Arten

In den 27 Anreicherungskulturen wurden Organismen identifiziert, die sich taxonomisch in 20 verschiedene Phyla und 72 Familien zuordnen lassen (Abbildung 114). Hauptsächlich gehören die Organismen den Phyla *Firmicutes*, *Proteobacteria* und *Desulfobacterota* innerhalb der Domäne Bakterien und den *Halobacterota* innerhalb der Domäne Archaea an. Die bei den höchsten Salzkonzentrationen angereicherten mikrobiellen Gemeinschaften (310 g/l NaCl) wurden zumeist von einer einzigen Gattung dominiert.

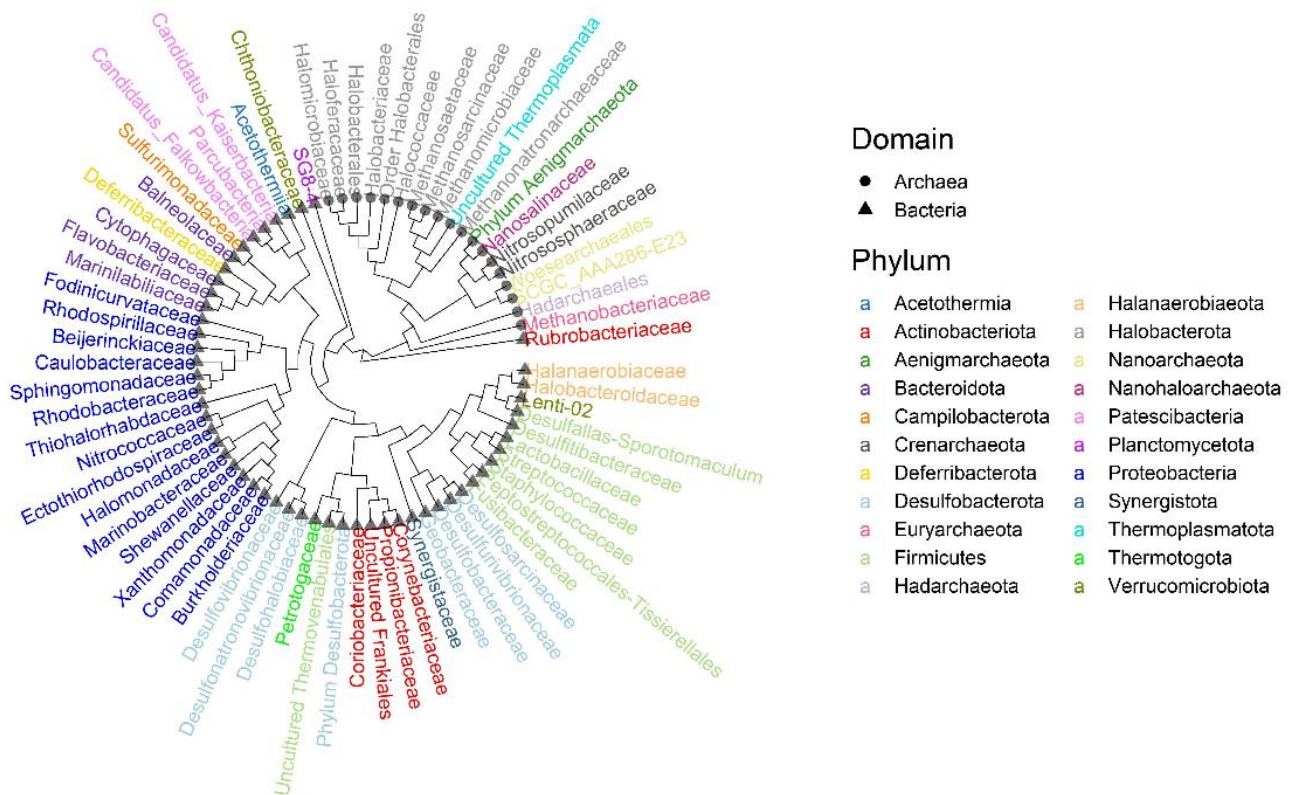


Abbildung 114: Kladogramm der in den 27 Anreicherungskulturen identifizierten Phyla und Familien

Abbildung 115 zeigt die Zusammensetzungen der mikrobiellen Gemeinschaften aller Proben in einer Heatmap mit den 20 wichtigsten Gattungen, die im Gesamtdatensatz gefunden wurden. Die am häufigsten vorkommenden Gattungen und Familien, die in einem Großteil der Proben nachgewiesen wurden, waren: *Desulfonatronovibrio* (Familie *Desulfohalobiaceae*), *Halanaerobium* (Familie *Halanaerobiaceae*), *Methanohalophilus* (Familie *Methanosarcinaceae*) und die Familie *Halobacteroidaceae*. Die Kulturen der Herkunft HCF zeichneten sich durch einen höheren Artenreichtum aus (Daten nicht gezeigt) und es wurden in HCF mehrere Gattungen gefunden, die in MK-Proben fehlten. Die beobachteten Unterschiede in der Artenvielfalt zwischen MK-Kulturen und HCF-Kulturen könnten durch unterschiedlich strukturierte Ausgangsgemeinschaften, aber auch durch unterschiedliche Inkubationszeiten und Ausgangszellzahlen begründet sein.

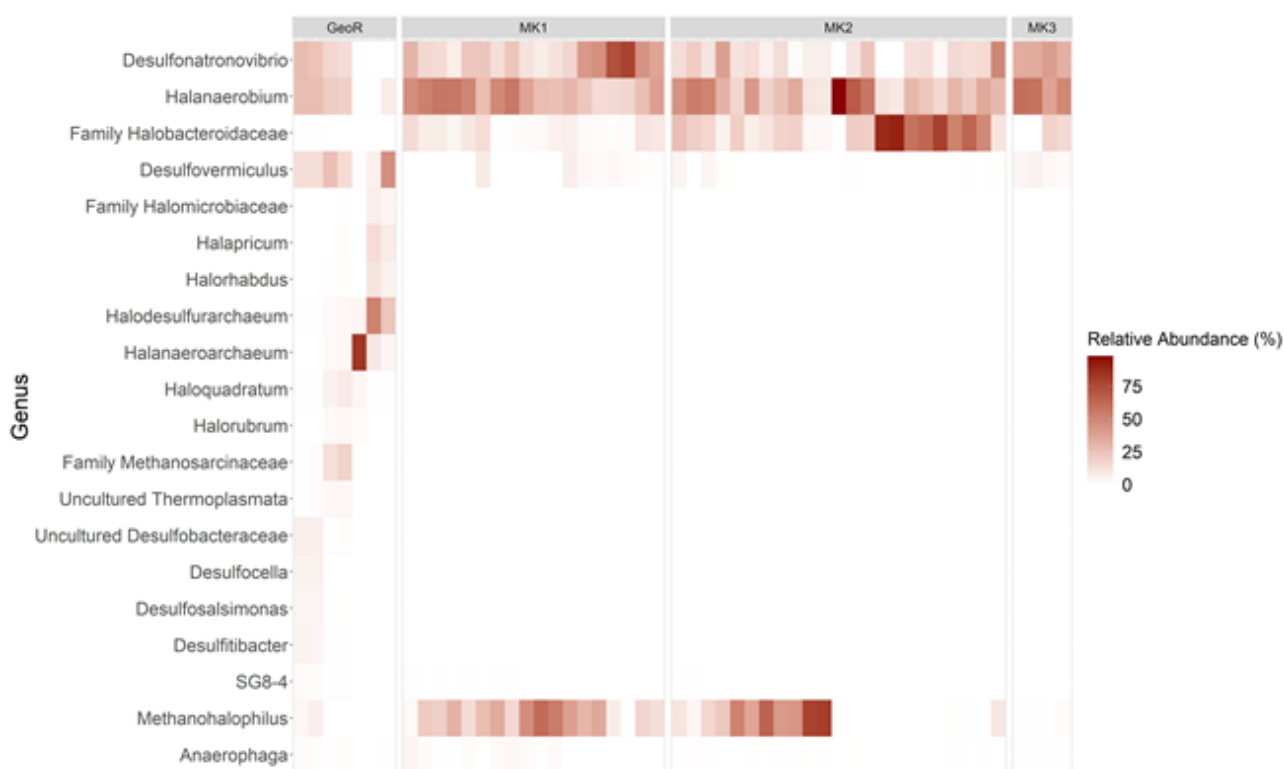


Abbildung 115: Heatmap der relativen Häufigkeit der 20 am häufigsten vorkommenden Gattungen, die in 27 verschiedenen halophilen mikrobiellen Anreicherungskulturen gefunden wurden (einschließlich doppelter Probenanalysen/-messungen), gruppiert nach dem Ursprung der Anreicherungskultur/des Inokulums. Anreicherungskulturen wurden in Medien mit einem Salzgehalt im Bereich von 150 bis 320 g/l NaCl und verschiedenen Kohlenstoffquellen (Kohlendioxid, Laktat, Acetat, Methanol) angezogen.

Die Gattungen *Desulfonatronovibrio* und *Halanaerobium* kamen sowohl in den Proben der Herkunft HCF als auch in Proben der Herkunft MK vor, was auf eine Kerngemeinschaft von Halophilen hinweist, die aus Salzkavernen angereichert werden können. Interessanterweise kamen in Kulturen der Herkunft HCF und MK auch Organismen vor, die taxonomisch methanogenen Archaeen nahestehen (*Methanohalophilus* und Familie *Methanosarcinaceae*), obwohl Methanbildung nur in zwei MK-Proben

nachgewiesen werden konnte, die Methanol enthielten (Daten nicht gezeigt). Dies weist darauf, dass diese Organismen einen anderen Stoffwechsel als Methanogenese betrieben.

Häufig vorkommende Organismen der mikrobiellen Gemeinschaften der Herkunft HCF

Bei hohem Salzgehalt waren die Zellzahlen in HCF-Kulturen um den Faktor 12 niedriger als bei niedrigerem Salzgehalt (Daten nicht gezeigt). Ähnlich wie die Zellzahlen nahm der H₂-Verbrauch mit dem Salzgehalt um das 13-fache ab, wurde jedoch in allen HCF-Proben beobachtet. Sulfidbildung aufgrund von Sulfatreduktion wurde in allen HCF-Anreicherungen in Form von Eisensulfid (FeS)-Präzipitaten beobachtet. Mit sich ändernden Salzgehalten veränderten sich die Strukturen der mikrobiellen Gemeinschaften der HCF-Kulturen (Abbildung 116). Bei niedrigem und mittlerem niedrigem Salzgehalt waren die Gattungen *Halanaerobium* (Familie *Halanaerobiaceae*) und *Desulfonatronovibrio* (Familie *Desulfohalobiaceae*) besonders präsent, verschwanden jedoch bei einem Salzgehalt von über 200 g/l NaCl. Für das Genus *Halanaerobium* wurden bisher zehn Arten beschrieben, sie wurden insbesondere in hypersalinen Ölreservoirs und Fracturing-Flüssigkeiten gefunden (Bordenave, Chatterjee and Voordouw, 2013; Sognstrup Thomsen, Lundgaard and Hatscher, 2016; Parte et al., 2020; Liang et al., 2016). *Halanaerobium* fermentiert Öl oder Kohlenhydrate und produziert dabei Acetat. Für die Gattung *Desulfonatronovibrio* wurden bisher vier verschiedene Arten gefunden; diese sind in der Lage, Sulfat, Sulfit und Thiosulfat zu reduzieren, Wasserstoff und Formiat werden als Elektronen- bzw. Kohlenstoffquelle verwendet. Auch Acetat oder andere Kohlenstoffquellen können von *Desulfonatronovibrio* verwertet werden (Sorokin et al., 2011; Sorokin et al., 2012a; Zhilina et al., 1997). Die Gattung *Halodesulfurarchaeum* (Familie *Halobacteriaceae*) war bei Salzgehalten von 250 g/l am dominantesten, aber bei anderen Salzgehalten kaum vorhanden (Abbildung 116). Bei höchstem Salzgehalt (310 g/l NaCl) wurde die Kultur fast vollständig von *Halanaeroarchaeum* (Familie *Halobacteriaceae*) dominiert. Eine einzige Art dieser Gattung, *Halanaeroarchaeum sulfurireducens*, wurde bisher beschrieben, fähig zur anaeroben Reduktion von elementarem Schwefel (S₀) durch Oxidation von Acetat oder Pyruvat (Sorokin et al., 2016). Eine Oxidation von Wasserstoff mit Sulfat als Elektronenakzeptor – wie sie in den Anreicherungskulturen abgelaufen sein könnte – wurde für diese Art nicht beschrieben. In den Kulturen könnte Wasserstoff auch durch homoacetogene Organismen oxidiert worden sein unter Bildung von Acetat, obwohl bekannte homoacetogene Organismen in der HCF-Untergruppe nicht identifiziert wurden. Die aus der gleichen Familie (*Halobacteriaceae*) stammende Art *Halodesulfurarchaeum formicicum* ist zu einem lithotrophen Metabolismus durch Oxidation von Formiat oder Wasserstoff und Reduktion von elementarem Schwefel, Thiosulfat oder Dimethylsulfoxid (DMSO) fähig (Sorokin et al., 2017). Seine metabolische Vielseitigkeit wurde als Grund für die weite Verbreitung von *Halodesulfurarchaeum* in hypersalinen Umgebungen vorgeschlagen. Die Haloarcheen-Gattungen *Halodesulfurarchaeum* und *Halanaeroarchaeum* wurden zuvor in hypersalinen (See-)Ökosystemen gefunden (Sorokin et al., 2017; Sorokin et al., 2012b). Die Datensätze der HCF-Kulturen implizieren für diese Gattungen eine Nischenpräferenz bei Salzgehalten von 250 bzw. 310 g/l NaCl. Darüber hinaus waren Organismen der Gattung *Desulfovermiculus* (Familie *Desulfohalobiaceae*, Klasse *Deltaproteobacteria*) bei hohen Salzgehalten größtenteils aus den Kulturen verschwunden, während sie bei niedrigerem Salzgehalt die Gemeinschaft dominierten (Abb. 111 *Desulfovermiculus halophilus* nicht extrem halophil ist (Belyakova et al., 2006). Diese fakultativ lithoautotrophe Spezies kann bei Salzgehalten bis zu 230 g/l NaCl wachsen und Sulfat, Sulfit, Thiosulfat oder elementarem Schwefel als Elektronenakzeptor verwenden. Das Vorhandensein von Methanogenen wurde bei niedrigem (Gattung *Methanohalophilus*) und mittlerem (Familie *Methanosarcinaceae*) Salzgehalt beobachtet, jedoch nicht bei 250 g/l NaCl oder höher.

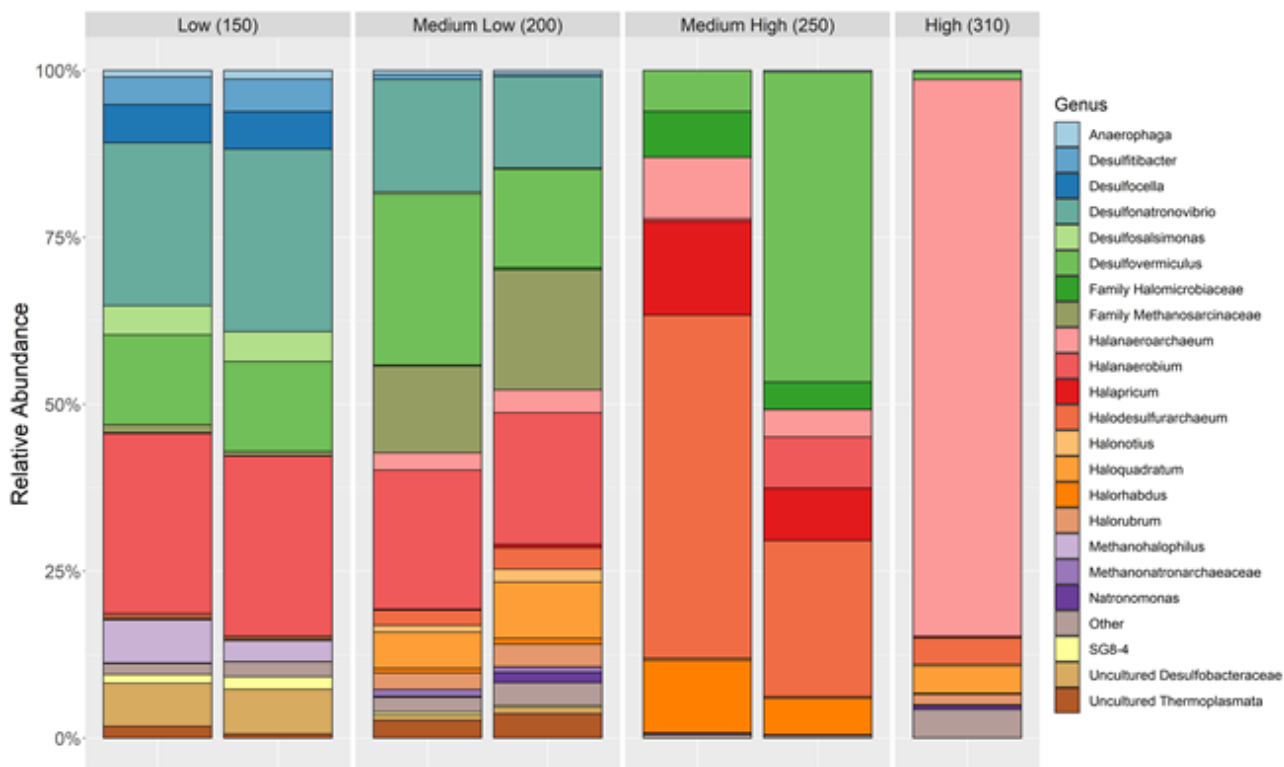


Abbildung 116: Relative Häufigkeit von Gattungen in Anreicherungskulturen der Herkunft HCF. Kulturen wurden bei Salzgehalten im Bereich von 150 g/l bis 310 g/l NaCl angereichert. Alle Kulturen wurden auf Medien mit Kohlendioxid als einziger Kohlenstoffquelle und Wasserstoff als einzigem Elektronendonator angezogen. Zellzahlen und Wasserstoffverbräuche nehmen mit zunehmendem Salzgehalt ab (Daten nicht gezeigt).

Häufig vorkommende Organismen der mikrobiellen Gemeinschaften der Herkunft MK

Ähnlich wie bei den Anreicherungskulturen der Herkunft HCF beobachtet, nahmen die Zellzahlen der Anreicherungskulturen der Herkunft MK mit zunehmendem Salzgehalt ab (Daten nicht gezeigt). Die Raten der H_2 -Oxidation waren bei Salzgehalten von 150 g/l bis 260 g/l in etwa gleich (Abbildung 117, B). Methan wurde nur in Gegenwart von Methanol produziert (Daten nicht gezeigt). Acetat wurde unter allen getesteten Bedingungen gebildet: Während die Bildung von Acetat bei Zugabe von Laktat als Substrat durch die Oxidation von Laktat zu Acetat erklärbar ist, deutet die Bildung von Acetat bei Zugabe von Methanol, Kohlendioxid oder Acetat selbst bei gleichzeitiger Oxidation von Wasserstoff auf Homoacetogenese als dominanten mikrobiologischen Prozess hin. Die Sulfatreduktionsraten waren bei höheren Salzgehalten (260 g/l NaCl) geringer als bei niedrigen Salzgehalten (Abbildung 117, B); Sulfat könnte einerseits mit Wasserstoff oder Laktat als Elektronendonoren reduziert worden sein, andererseits auch über durch Homoacetogenese gebildetes oder direkt zugegebenes Acetat.

Die mikrobiellen Gemeinschaften bei Salzgehalten von 150 oder 200 g/l NaCl wurden hauptsächlich von Organismen der Gattungen *Desulfonatronovibrio* (Familie *Desulfohalobiaceae*), *Halanaerobium* (Familie *Halanaerobiaceae*), *Methanohalophilus* (Familie *Methanosarcinaceae*) und Familie *Halobacteroidaceae* dominiert (Abbildung 117, A). Organismen der Gattung *Methanohalophilus* waren bei einem Salzgehalt von 260 g/l allerdings vollständig verschwunden, was darauf hindeutet, dass diese

Organismen bei extrem hohen Salzgehalten nicht mehr wachsen. Bei 260 g/l NaCl wurden die Anreicherungen von Organismen der Familie *Halobacteroidaceae* dominiert (Abbildung 117, A). Organismen der Gattung *Desulfonatronovibrio* waren bei 260 g/l mit Kohlendioxid als alleiniger Kohlenstoffquelle ebenfalls verschwunden, ähnlich wie für die Kulturen der Herkunft HCF beobachtet. Falls die beobachtete Bildung von Acetat bei über Homoacetogenese erfolgte, könnte diese entweder von *Halanaerobium* oder von Organismen der Familie *Halobacteroidaceae* (jeweils der Ordnung Halanaerobiales) durchgeführt worden sein. Zu letzterer Familie gehört *Acetohalobium arabaticum*, ein halophiler homoacetogener Organismus (Parte et al., 2020).

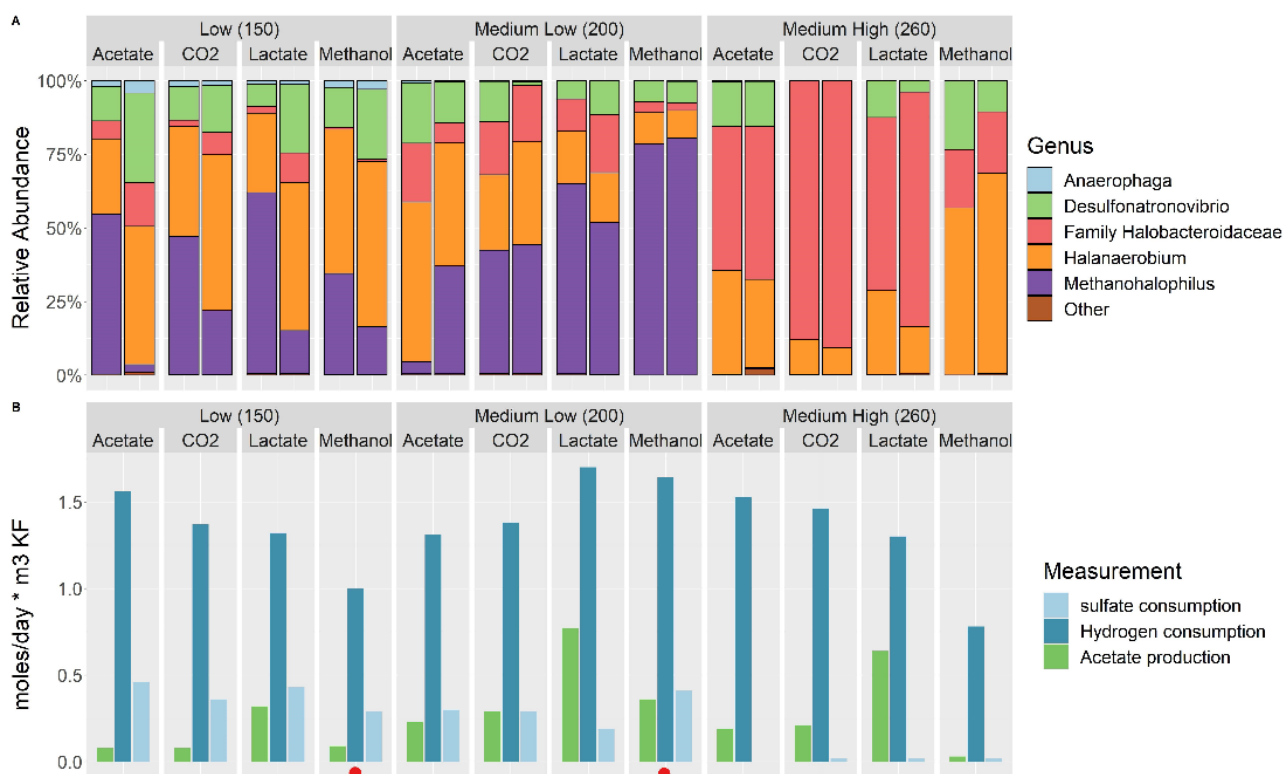


Abbildung 117 A, B: Relative Häufigkeit von Gattungen in Anreicherungskulturen der Herkunft MK. Die Kulturen wurden bei Salzgehalten zwischen 150 g/l und 260 g/l NaCl angereichert mit Wasserstoff als Elektronendonator und verschiedenen Kohlenstoffquellen (Kohlendioxid, Acetat, Laktat oder Methanol). Die Zellzahlen nahmen mit zunehmendem Salzgehalt ab (Daten nicht gezeigt). Methan wurde in Proben gemessen, die mit einem roten Punkt gekennzeichnet sind.

5.4.4 Mikrobielle Begleiterscheinungen während einer Wasserstoffexposition – Untersuchungen zur Eisenkorrosion durch halophile Mikroorganismen

In Laborexperimenten wurden potenzielle biogene Korrosionseffekte an Modelleisenprüfkörpern in salzhaltigen Medien unter Beaufschlagung von Wasserstoff untersucht. Folgende Ansätze wurden getestet (jeweils in Duplikaten oder Triplikaten):

- 1a) Eisenprüfkörper + stark salzhaltiges Mineralsalzmedium + H₂ + *Desulfovermiculus halophilus*,
- 1b) Eisenprüfkörper + stark salzhaltiges Mineralsalzmedium + *Desulfovermiculus halophilus*,
- 2a) Eisenprüfkörper + Kavernensole L + H₂ + H₂S (1 mM),
- 2b) Eisenprüfkörper + Kavernensole L + H₂S (1 mM),
- 3a) Eisenprüfkörper + Kavernensole L + H₂
- 3b) Eisenprüfkörper + Kavernensole L
- 4a) Eisenprüfkörper + filtersterilisierte Kavernensole L + H₂ + H₂S (1 mM),
- 4b) Eisenprüfkörper + filtersterilisierte Kavernensole L + H₂S (1 mM).

Untersucht wurden die Oxidation von H₂ mittels ²H-Isotopenanalyse (Löffler et al., 2019) sowie die Veränderungen auf der Oberfläche der Eisenprüfkörper mittels Rasterelektronenmikroskopie bzw. Heliumionenmikroskopie.

Die Ansätze, die mit dem Modellorganismus *Desulfovermiculus halophilus* angeimpft wurden (Ansätze 1a und 1b), dienten als Positivkontrolle, da dieser in salzreicher Umgebung Wasserstoff mit Sulfat als Elektronenakzeptor oxidieren kann. Abbildung 118 zeigt, dass die Isotopensignaturen des H₂ (δ²H₂-Werte) in den Ansätzen mit *D. halophilus* kontinuierlich leichter wurden; sie fielen von einem Ausgangswert von ca. -220 ‰ auf Werte bis ca. -690 ‰ ab. Dies beweist, dass der Organismus H₂ oxidierte, denn die mikrobielle Oxidation von H₂ (die das Enzym Hydrogenase katalysiert) geht einher mit einer starken Gleichgewichtsfractionierung von H₂ und H₂O, die zu einer starken Anreicherung des leichten ¹H-Isotopes im verbleibenden H₂ führt (Löffler et al., 2019). Die mit der Oxidation von H₂ verbundene Reduktion von Sulfat führte zur Bildung von Sulfid (HS⁻) und zur Ausfällung von Eisensulfid (FeS) und Eisencarbonat (FeCO₃) auf der Oberfläche der Eisenprüfkörper, analysiert über Elektronenmikroskopie-Energiedispersive Röntgenspektroskopie (SEM-EDX) und sichtbar gemacht mit dem Heliumionenmikroskop (Abbildung 119).

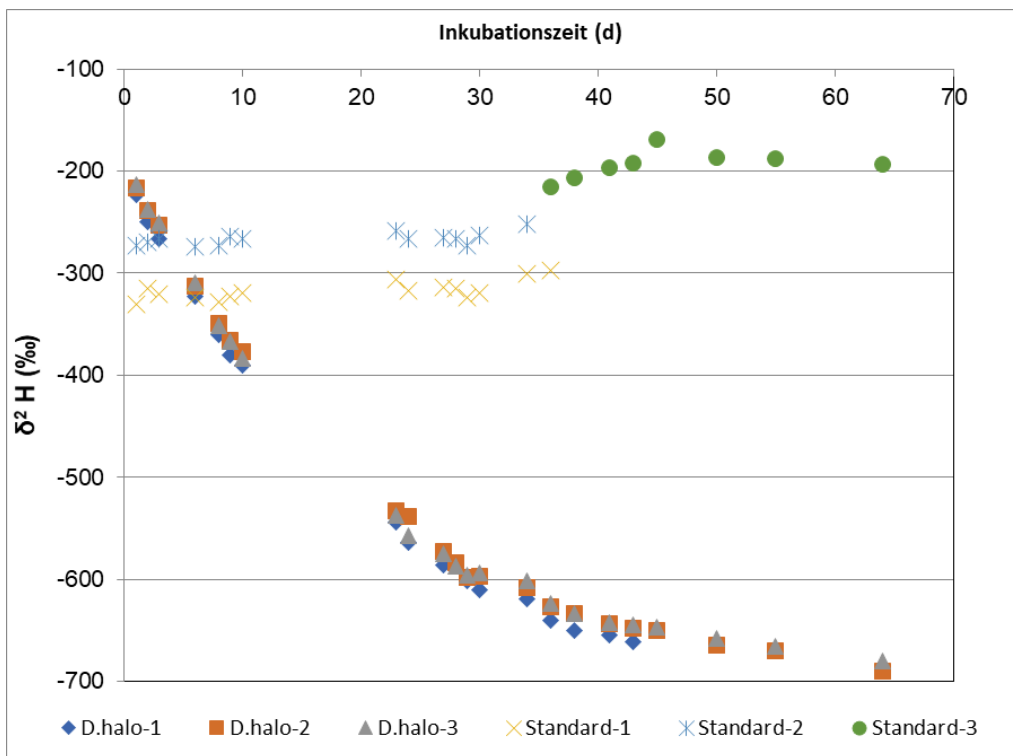


Abbildung 118: Änderungen der ^2H -Isotopensignatur [in ‰] von Wasserstoff in Ansätzen mit *D. halophilus* in sulfat- und salzhaltigem Mineralmedium und inkubierten Eisenprüfkörpern. Die Änderungen der Signaturen von ca. -220 ‰ auf ca. -690 ‰ weisen die Verwertung von Wasserstoff durch *D. halophilus* nach.

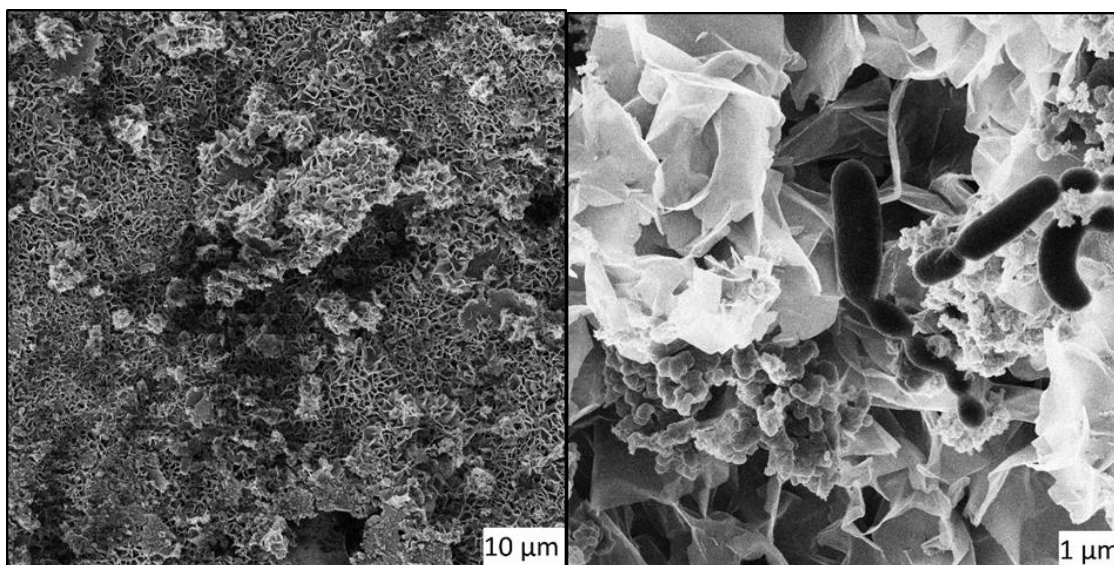


Abbildung 119: Oberfläche des Eisenprüfkörpers nach Inkubation mit dem Modellorganismus *D. halophilus* und Beaufschlagung durch Wasserstoff, visualisiert durch heliumionenmikroskopische Aufnahmen (links: $10\ \mu\text{m}$ -Maßstab; rechts: $1\ \mu\text{m}$ -Maßstab). Durch mikrobiell gebildetes Sulfid (HS^-) und im Medium vorhandenem Bicarbonat entstehen Krusten aus Eisensulfid und Eisencarbonat auf der Oberfläche des Metalls. Daran angehaftet/eingebettet sind Zellen von *D. halophilus* (rechts).

Auch in Kavernensole kam es zu einer Änderung der $\delta^2\text{H}_2$ -Werte, die allerdings weitaus weniger stark ausgeprägt war (Abbildung 120). Das deutet darauf hin, dass weniger Wasserstoff als in dem Ansatz mit *D. halophilus* und Mineralsalzmedium umgesetzt wurde, und dementsprechend auch weniger Sulfat reduziert und Sulfid gebildet wurde. Diese Annahme wird über die elektronenmikroskopischen Analysen bestätigt: Auf den Eisenprüfkörpern dieses Ansatzes waren keine ausgeprägten Eisensulfidkrusten sichtbar (Abbildung 121).

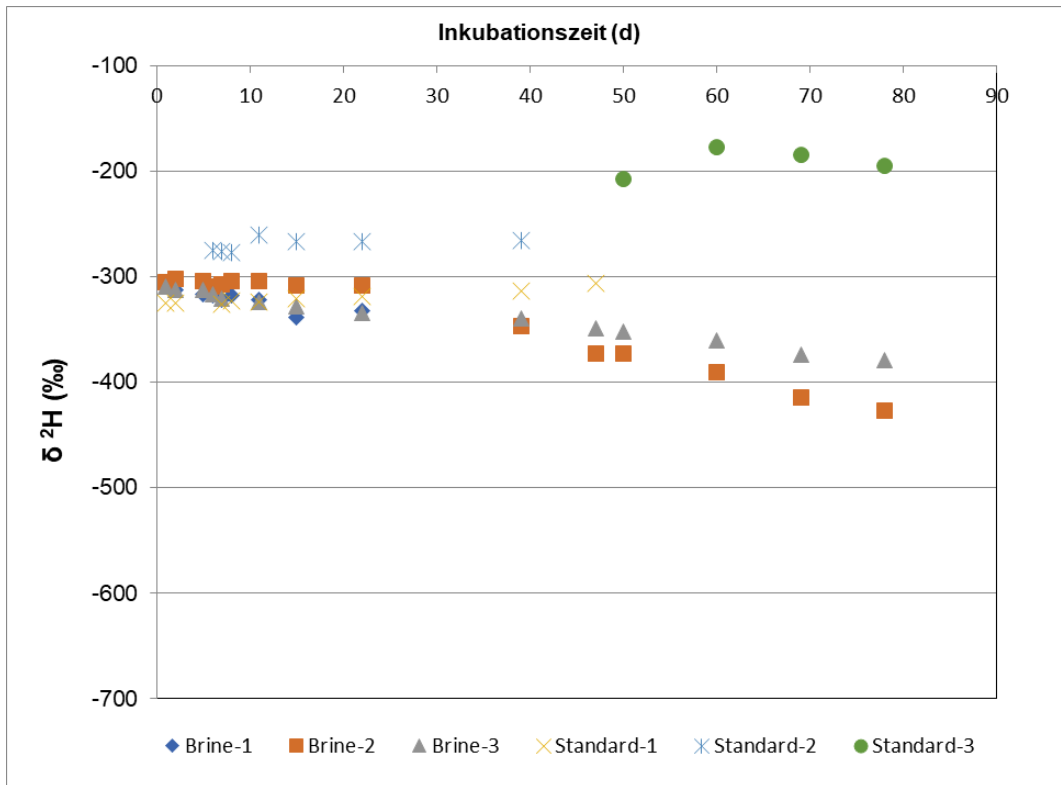


Abbildung 120: Änderungen der ^2H -Isotopensignatur [in ‰] von Wasserstoff in Ansätzen mit Kavernensole, Eisenprüfkörper und zugesetztem Wasserstoff. Die Änderungen der Signaturen von ca. -300 ‰ (Ausgangswert) auf ca. -380 ‰ bzw. -420 ‰ sind ein Indikator für die Verwertung von Wasserstoff durch Organismen der Kavernensole.

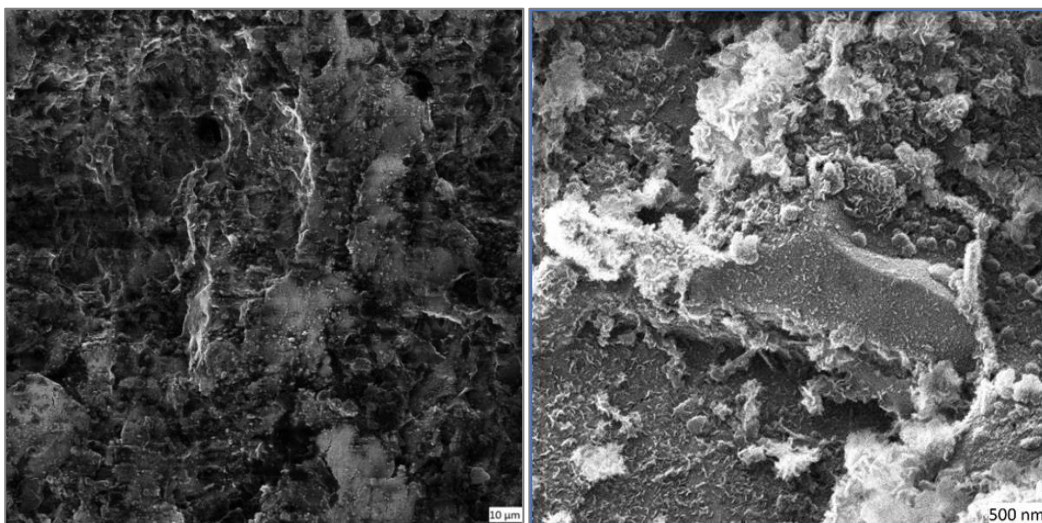


Abbildung 121: Oberfläche des Eisenprüfkörpers nach Inkubation mit Wasserstoff und Kavernensole, visualisiert durch heliumionenmikroskopische Aufnahmen (links: Maßstab 10 µm; rechts: Maßstab 500 nm).

In steriler Kavernensole mit zugesetztem H₂S (1 mM) wurde Wasserstoff hingegen nicht oxidiert, wie die ausgebliebene ²H-Isotopenfraktionierung zeigt (Abbildung 122). Aufgrund des zugesetzten H₂S (1 mM) kam es auch in diesem Ansatz zu einer flächenhaften Ausbildung einer Kruste aus Eisensulfid und Eisencarbonat auf dem Eisenprüfkörper (Daten nicht gezeigt).

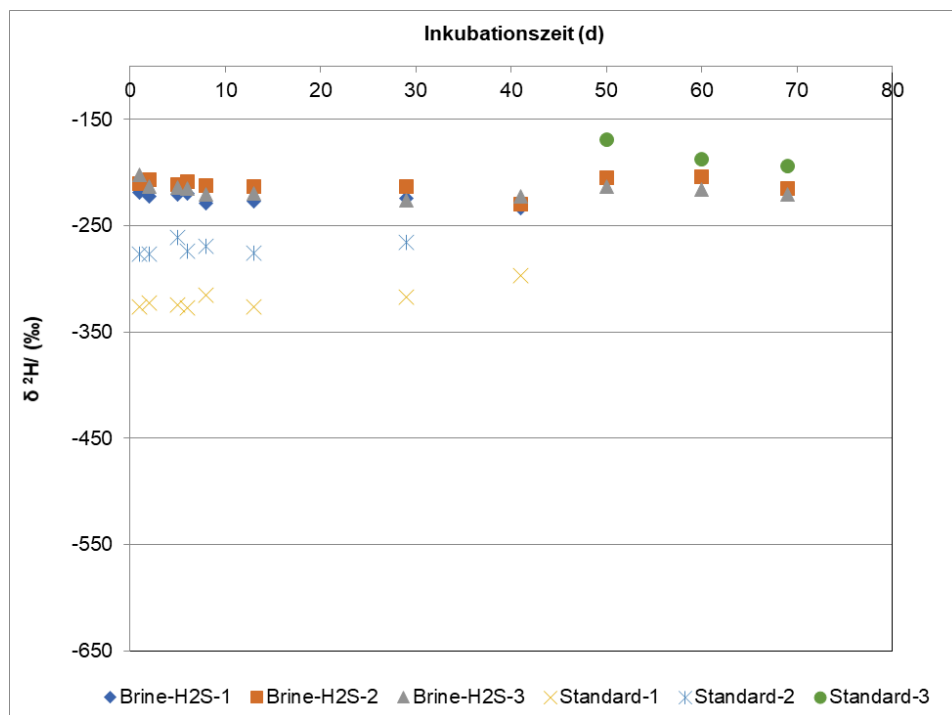


Abbildung 122: Änderung der ²H-Isotopensignatur [in ‰] von Wasserstoff in Ansätzen mit sterilisierter Kavernensole und Eisenprüfkörper. Die unveränderte Signatur ist ein Indikator für die ausgebliebene mikrobielle Verwertung von Wasserstoff aufgrund der vorherigen Abtötung der Mikroorganismen.

Die Ergebnisse der Inkubationen von Kavernensole indizieren, dass die darin enthaltenen mikrobiellen Gemeinschaften zugesetzten Wasserstoff oxidieren können, wenngleich vermutlich in geringen Raten. Die Ergebnisse der Experimente mit dem wasserstoffoxidierenden Modellorganismus *D. halophilus* zeigen, dass ein prinzipieller Korrosionseffekt im Zuge der Sulfatreduktion die Ausbildung von Krusten aus Eisensulfid und Eisenkarbonat auf Eisenoberflächen ist. Ob halophile Sulfatreduzierer oder andere anaerobe halophile Mikroorganismen in der Lage sind, Eisen als Elektronendonator zu verwenden und somit Fe(0)-Körper aufzulösen, muss in weitergehenden Studien untersucht werden.

5.4.5 Maßnahmen zur Hemmung mikrobieller Aktivitäten

Mikrobielle Aktivitäten können zum Verlust von Wasserstoff führen, die Gasqualität durch Schwefelwasserstoffbildung verschlechtern und ursächlich für korrosive Prozesse (mikrobiell induzierte Korrosion) sein. Möglich sind zudem Veränderungen am Salzgestein durch Lösung von Mineralien (z. B. Calciumkarbonat) oder der Kavernensole durch Ausfällung von Mineralien (z. B. Eisensulfid). Es war notwendig zu untersuchen, welchen Maßnahmen geeignet sind, die den Speicherprozess beeinflussende mikrobiellen Aktivitäten zu hemmen. Fokus lag auf dem, als kritischsten eingeschätzten, Prozess der hydrogenotrophen Sulfatreduktion. Die Untersuchungen wurden über einen Zeitraum von 175 Tagen durchgeführt. Bewertungskriterium waren H₂-Verbrauch und Sulfidbildung infolge Sulfatreduktion.

Biozideinsatz

Getestet wurden drei Biozide mit den bakterizid wirkenden Substanzen:

- 3,3'-Methylenbis(5-methyloxazolidin) (MBO),
- Ethylendioxydimethanol (EDDM),
- Glutaraldehyd (GA).

MBO und EDDM hemmten vollständig die mikrobielle Entwicklung bei Konzentrationen von 25 µl/l (entsprechend ml/m³) und höher. Eine geringere Wirksamkeit wurde bei Einsatz von GA festgestellt. Bei Salzgehalten von 200 g/l bedarf es mindestens 300 µl/l und bei 300 g/l mindestens 100 µl/l um eine Entwicklung von Mikroorganismen sicher auszuschließen. Der Tabelle 38 sind die notwendigen Einsatzkonzentrationen zu entnehmen.

Tabelle 38: Wirkmatrix der getesteten Biozide

Biozid	Salz	Biozidkonzentration [$\mu\text{l/l}$]								
		[g/l]	10	25	50	100	200	300	400	500
MBO	200	++	-	-	-	-	-	-	-	-
MBO	300	+	-	-	-	-	-	-	-	-
EDDM	200	++	-	-	-	-	-	-	-	-
EDDM	300	+	-	-	-	-	-	-	-	-
GA	200	+++	+++	+++	+++	+	-	-	-	-
GA	300	+	+	+	-	-	-	-	-	-

Legende: Sulfidbildung ohne -, gering +, mittel ++, stark +++, rot Wasserstoffverbrauch, grün kein Wasserstoffverbrauch

Applikation bakterienhemmender Substanzen

Zinkchlorid hemmte vollständig die mikrobielle Entwicklung hinsichtlich des H_2 -Verbrauchs und Sulfatreduktion bei Konzentrationen von 50 mg/l und höher (Tabelle 39). Gegenüber der Zinkchlorid-freien Kontrolle war mit 300 g/l NaCl in SRP-Mineralmedium bereits eine deutliche Hemmung der Entwicklung der Organismen bei 10 und 25 mg/l zu beobachten.

Tabelle 39: Wirkmatrix Zinkchlorid

Salz	Zinkchlorid [mg/l]								
	[g/l]	10	25	50	100	200	300	400	500
200	+++	+++	-	-	-	-	-	-	-
300	++	+	-	-	-	-	-	-	-

Veränderung ökologischer Bedingungen

Die Versuchsansätze wurden in Abhängigkeit vom pH hinsichtlich des H₂-Verbrauchs (gemessen als Druckdifferenz) und der Sulfatreduktion (bewertet über die Eisensulfidbildung) ausgewertet. Bei einem Salzgehalt von 200 g/l konnten H₂-Verbrauch und Sulfatreduktion im pH-Bereich von 6 bis 9 festgestellt werden, bei Salzgehalten von 300 g/l im Bereich von 6 bis 8 (Tabelle 40, Abbildung 123).

Tabelle 40: Wirkmatrix pH-Wert

Salz	pH							
	[g/l]	5	6	7	8	9	10	11
200	-	+++	+++	+++	++	-	-	-
300	-	+++	+++	+++	-	-	-	-

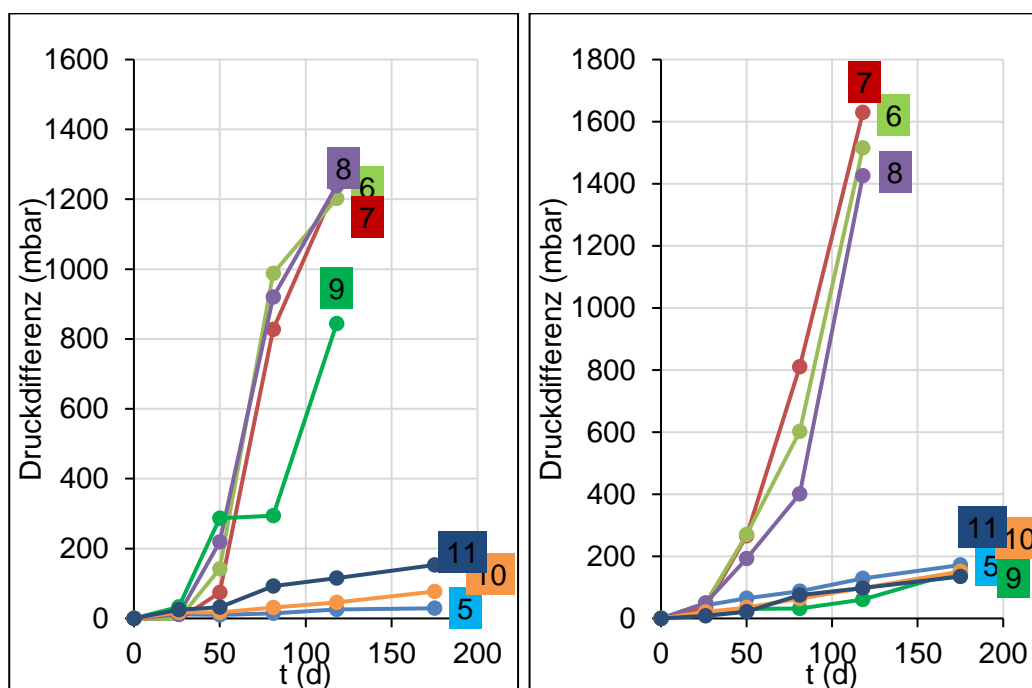


Abbildung 123: Druckdifferenz in Abhängigkeit vom pH mit 200 g/l und 300 g/l NaCl

Die bei der Tiefenprobenahme gewonnenen Soleproben wiesen pH-Werte im schwach sauren Bereich auf, die für die Entwicklung von Sulfatreduzieren unkritisch sind. Um die pH-Werte in den unphysiologischen bzw. hemmenden Bereich anzuheben, ist der Zusatz von Natronlauge als Mittel der Wahl anzusehen. Im Laborversuch wurden die Soleproben mit Natronlauge versetzt, um den Bedarf an Natriumhydroxid zu ermitteln. Bei den Salzgehalten der Solen ist ein pH-Wert von 9 und höher anzustreben. Für die Sole der Kaverne L wird ein pH-Wert von 9 nach Zusatz von 260 g NaOH pro m³ Sole, von 10 nach Zusatz von 380 g NaOH/m³ und von 10 nach Zusatz von 680 g NaOH/m³ erreicht (Abbildung 124).

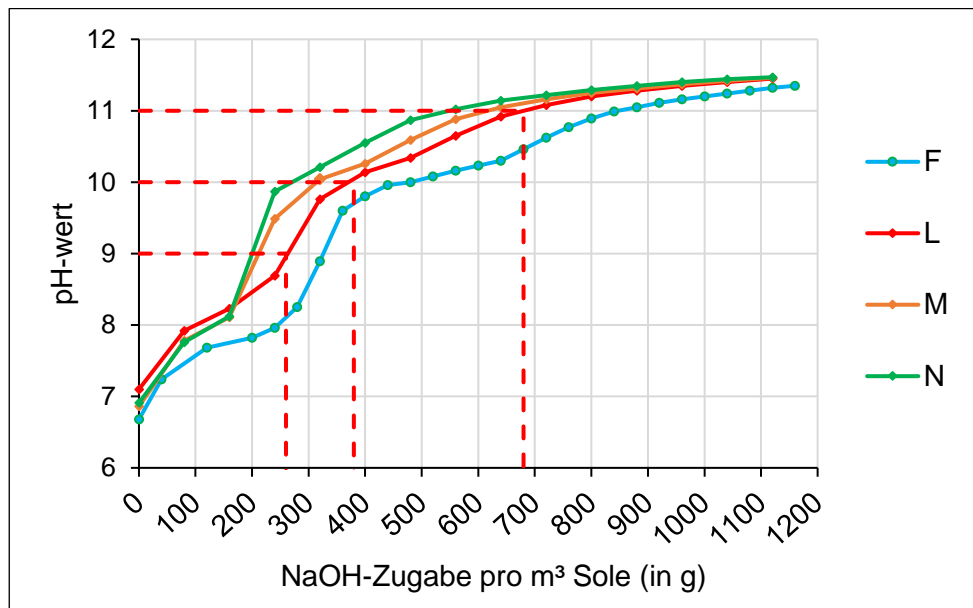


Abbildung 124: pH-Wert der Kavernensolen in Abhängigkeit vom zugesetzten Natriumhydroxid

Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählten Methoden die Entwicklung von Mikroorganismen wirksam hemmen. Eine technische Umsetzung ist abhängig vom Betriebszustand der Kaverne möglich. Im solegefüllten Zustand ist die Applikation der Wirkstoffe mit vergleichsweise geringem Aufwand zu realisieren. Konzepte für die Applikation unter Gasspeicherung, die sicherstellen, dass das gesamte Solevolumen behandelt wird, sind noch zu entwickeln. Damit einhergehend sind auch ökonomische Betrachtungen erforderlich, die den Aufwand einer Solebehandlung den Aufwendungen einer nachgeschalteten Gasreinigung gegenüberstellen.

5.4.6 Erfassung mikrobieller Prozesse während einer Wasserstoffeinspeicherung

Zur Erfassung mikrobieller Prozesse während einer H₂-Einspeicherung wurde die Eignung der Analyse stabiler Isotope geprüft. Speichergase und Kavernensole bestehen überwiegend aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefel, welche unterschiedliche stabile Isotopen aufweisen. Das Verhältnis von schweren zu leichten Isotopen eines Elementes wird als Isotopensignatur oder Isotopenverhältnis bezeichnet (²H/¹H, ¹³C/¹²C, ³⁴S/³²S, ¹⁸O/¹⁶O). Mikrobielle Prozesse bewirken oftmals eine Veränderung des natürlichen Isotopenverhältnisses von Ausgangsstoffen (z. B. H₂, CO₂, SO₄²⁻) und Produkten (z. B. CH₄, H₂S), wodurch mikrobielle Prozesse qualitativ und quantitativ erfasst werden können.

Aus der Stadtgasspeicherung existieren einzelne Studien zur Erfassung H₂-stimulierter mikrobieller Prozesse in Porenspeichern auf Grundlage von Isotopenanalysen (Šmigáň et al., 1990). Für Kavernenspeicher fehlen bislang vergleichbare Studien. Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurde die Eignung von Isotopenanalysen zur Erfassung mikrobieller Prozesse in Salzkavernen erprobt. Hierfür wurde eine Bestandsaufnahme der isotopischen Variationen der Soleproben, des darin gelösten Sulfates sowie der Speichergaskomponenten Methan und Kohlendioxid realisiert. In Labor-

versuchen mit H₂-verwertenden Mikroorganismen wurde die Veränderung der natürlichen Isotopenverhältnisse von Ausgangsstoffen (H₂, CO₂) und Produkten (CH₄) der mikrobiellen H₂-Umsetzung untersucht.

5.4.6.1 Bestandsaufnahme der isotopischen Variation

Um zukünftig Isotopenanalysen zur Erfassung mikrobieller Prozesse während der untertägigen H₂-Speicherung einzusetzen, erfolgte eine Bestandsaufnahme der isotopischen Variation als Bezugspunkte zur Bewertung mikrobieller H₂-Umsetzungsprozesse in Kavernen.

Soleproben aus dem Kavernensumpf

Mittels der Analytik der H₂-Isotopenverhältnisse ($\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte) und O₂-Isotopenverhältnisse ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte) kann die Herkunft des Solefluides identifiziert werden. Die Isotopenanalysen an den Soleproben aus dem Kavernensumpf zeigten für die Kavernen F, H, L und M ähnliche H₂- und O₂-Isotopen-signaturen mit mittleren $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten von $-67 \text{‰} \pm 6$ und $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten von $-8,9 \text{‰} \pm 0,4$ (Abbildung 125). An der Kaverne N wurde dahingegen ein $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert von $-39 \text{‰} \pm 2$ und $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert von $-9,0 \text{‰} \pm 0,4$ gefunden, was auf Grundlage einer historischen Recherche auf die Flutung mit Sole aus der Chloralkali-Elektrolyse zurückgeführt werden kann.

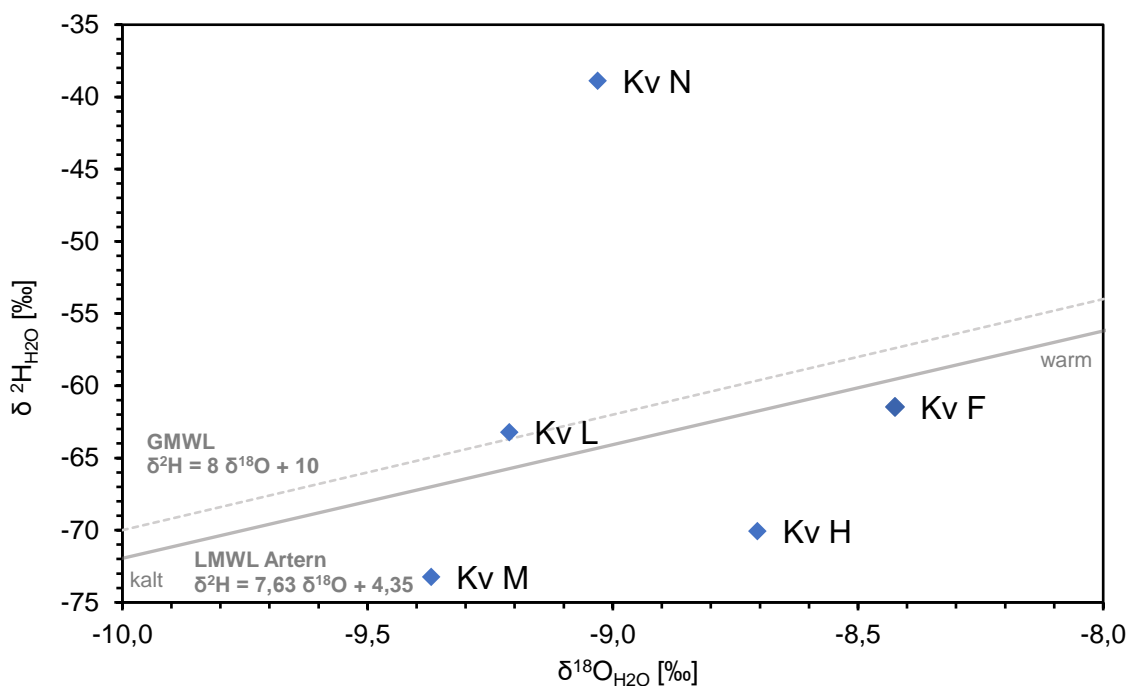


Abbildung 125: Gegenüberstellung der Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotopenverhältnissen der Solefluide ($\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte) aus dem Kavernensumpf von fünf Bestandskavernen der Erdgasspeicherung. Mit eingezeichnet sind die mittleren $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - und $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte im Niederschlagswasser auf der globalen Niederschlagsgeraden (Global Meteoric Water Line, GMWL) und lokalen Niederschlagsgeraden (LMWL für die Stadion Artern).

Die Soleproben aus dem Kavernensumpf wiesen Sulfatkonzentrationen $> 3.300 \text{ mg/l}$ auf, sodass Sulfat als terminaler Elektronenakzeptor für eine mikrobielle Sulfatreduktion ausreichend zur Verfügung steht und eine mikrobielle Sulfatreduktion stattfinden könnte. Die mikrobielle Sulfatreduktion ist mit

großen Änderungen des Schwefel- und O₂-Isotopenverhältnisses von Sulfat ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) verbunden und kann daher genutzt werden, um eine Stimulation der mikrobiellen Sulfatreduktion bei der H₂-Speicherung zu bewerten. Im Rahmen der Bestandsaufnahme wurde die $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte im Kavernensumpf der untersuchten Forschungskavernen sowie in der Dünn- und Dicksole einer Kaverne in Sole ermittelt.

Die $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte zeigten deutliche Unterschiede, was auf verschiedene Sulfat-Quellen zurückgeführt werden kann (Abbildung 126). In den Erdgaskavernen F, L, H und M weisen die Isotopenwerte des gelösten Sulfates auf evaporitischen Ursprung. In der Erdgaskaverne N sowie Kaverne C in Solung werden die Isotopenwerte des Sulfates durch die Sole aus der Chloralkali-Elektrolyse geprägt.

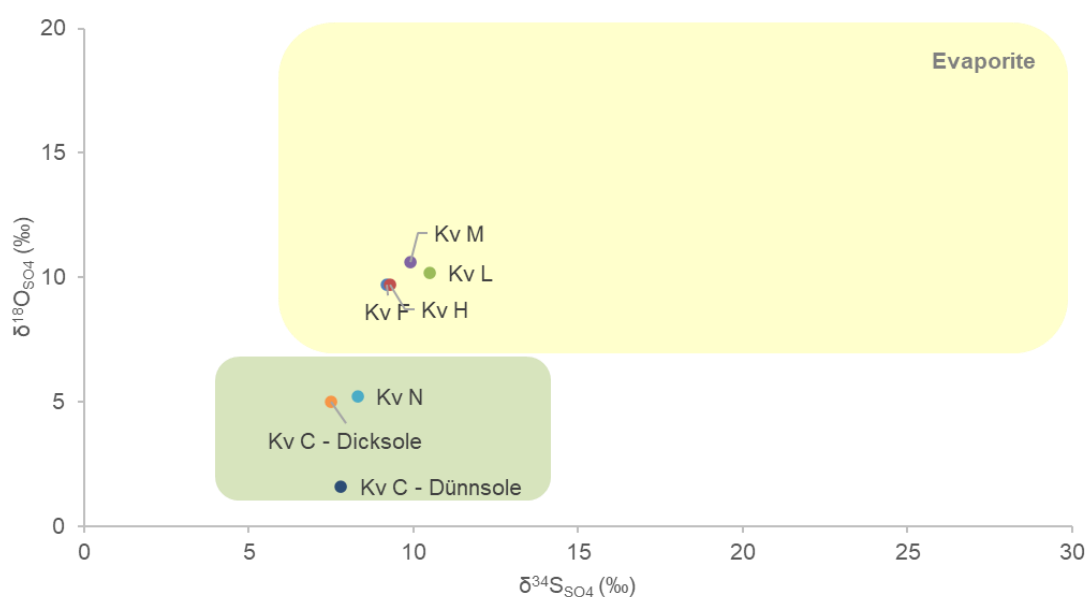


Abbildung 126: Schwefel- und Sauerstoff-Isotopenverhältnissen des gelösten Sulfates ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) in Erdgaskavernen und einer Kaverne in Solung. Charakteristischer Isotopenbereich für evaporitisches Sulfat wurde aus (Aravena and Mayer, 2009) entnommen.

Die mikrobielle Sulfatreduktion führt zur Anreicherung des schweren ³⁴S-Isotops im verbleibenden Sulfatpool, sodass die $\delta^{34}\text{S}$ -Werte positiver werden (Seal, 2018). Die Analytik der Schwefelisotopenverhältnisse kann dementsprechend zur Detektion der mikrobiellen Sulfatreduktion während einer H₂-Speicherung herangezogen werden.

Speichergas

In den untersuchten Kavernen wurde während des Forschungsprojektes sowohl Nordverbundgas wie auch russisches Erdgas eingespeichert. Während der Ein- und Ausspeicherung wurden punktuell Gasproben entnommen und die Kohlenstoff- ($\delta^{13}\text{C}$) bzw. Wasserstoff-Isotopensignaturen ($\delta^2\text{H}$) der Speichergaskomponenten Methan und Kohlendioxid bestimmt, um deren Schwankungsbreite zu erfassen (Tabelle 41).

Tabelle 41: *Ermittelte Schwankungsbreiten für die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte der Speichergaskomponenten Methan und Kohlendioxid*

Ermittelte Schwankungsbreite			
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ [‰]	$\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ [‰]	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ [‰]
Einspeicherung	-43,2 bis -40,6	-209,6 bis -185,5	-5,9 bis +5,5
Ausspeicherung	-43,0 bis -35,3	-214,3 bis -185,5	+0,9 bis +7,6

5.4.6.2 Wasserstoffstimulierte Isotopenfraktionierung in Laboruntersuchungen

In Laborversuchen mit halophilen H_2 -verwertenden Anreicherungskulturen wurde die biologisch bedingte Änderung der Isotopenverhältnisse von Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan erfasst. Die Untersuchungen erfolgten entsprechend dem in Tabelle 30 dargestellten Versuchsaufbau.

Wasserstoff

Sowohl während der H_2 -Umsetzung durch methylotrophe Methanogene wie auch acetogene und sulfatreduzierende Mikroorganismen wurde eine Änderung der H_2 -Isotopenverhältnisse des Wasserstoffgases ($\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Wert) verzeichnet. In Abbildung 127 ist exemplarisch die Änderung der $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Werte in einer Anreicherungskultur mit methylotropen Methanogenen dargestellt.

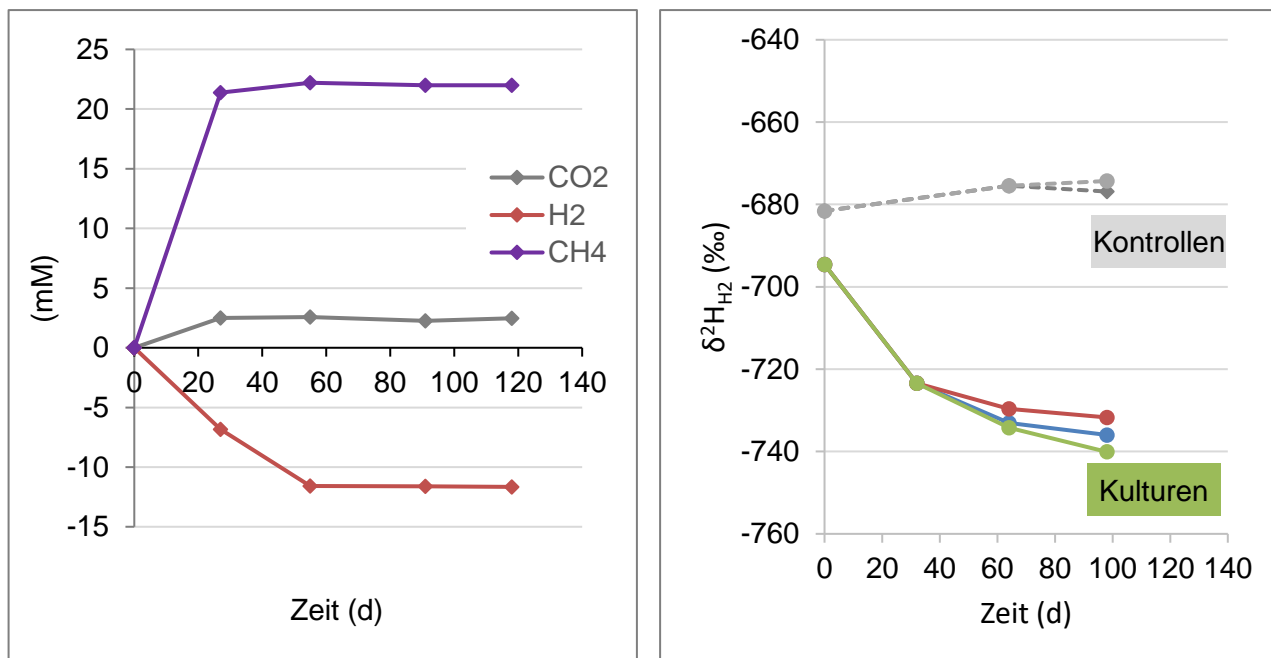


Abbildung 127: *Änderung der Wasserstoffkonzentration und -Isotopenverhältnisse (als $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$) in Anreicherungskulturen während einer Methanogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 150 g/l NaCl mit Wasserstoff und Methanol.*

Die Änderung der $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Werte um -41‰ im Verlaufe der Inkubation ist auf eine Gleichgewichts-Isotopenfraktionierung von H_2 -Isotopen zwischen dem eingespeicherten Wasserstoff und Formationswasser zurückzuführen. Dieser Prozess wird durch die Aktivität von Hydrogenasen, dem Enzym, welches in H_2 -umsetzenden Mikroorganismen die Oxidation von Wasserstoff aktiviert, verursacht und führt zu einer starken Anreicherung des leichten ^1H -Isotopes im verbleibenden H_2 (Löffler et al., 2019; Kawagucci et al., 2010; Pester et al., 2018). Generell ist eine Änderung der $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Werte auch durch abiotische Prozesse möglich. Auf Grundlage von Modellansätzen ist bei Temperaturen im Bereich von 20 bis 90 °C eine abiotische Änderung der $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Werte jedoch erst nach mehreren Jahren bis Jahrzehnten zu erwarten (Lin et al., 2005). Eigene laborative Untersuchungen mit Soleproben aus dem Kavernensumpf von Erdgaskavernen und Kernmaterial belegen, dass innerhalb von 78 Tagen Inkubation keine abiotisch bedingte Änderung der $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Werte zu verzeichnen ist (Daten nicht gezeigt). Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH untersucht, inwieweit Wasserstoff bei Kontakt mit Stahlleitungsrohren abiotischen Reaktionen unterliegt, die Änderungen des $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Wertes bewirken. Stahl aus Leitungsrohren wurde in Hochdruckautoklaven unter H_2 -Atmosphäre bei 100 bar für 30 d inkubiert. Sowohl eine Aufnahme von Wasserstoff durch die Stahlproben wie auch eine Veränderung des $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Wertes von $+48\text{‰}$ wurde festgestellt. Entgegengesetzt dazu führt die mikrobielle H_2 -Umsetzung zu deutlich negativeren $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$ -Werten und kann damit in Salzkavernen anhand von Isotopenanalysen detektiert werden.

Kohlendioxid

Während der H_2 -Umsetzung durch methanogene Mikroorganismen wurde eine Änderung der Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse von Kohlendioxid ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Wert) von $+48\text{‰}$ beobachtet (Abbildung 128).

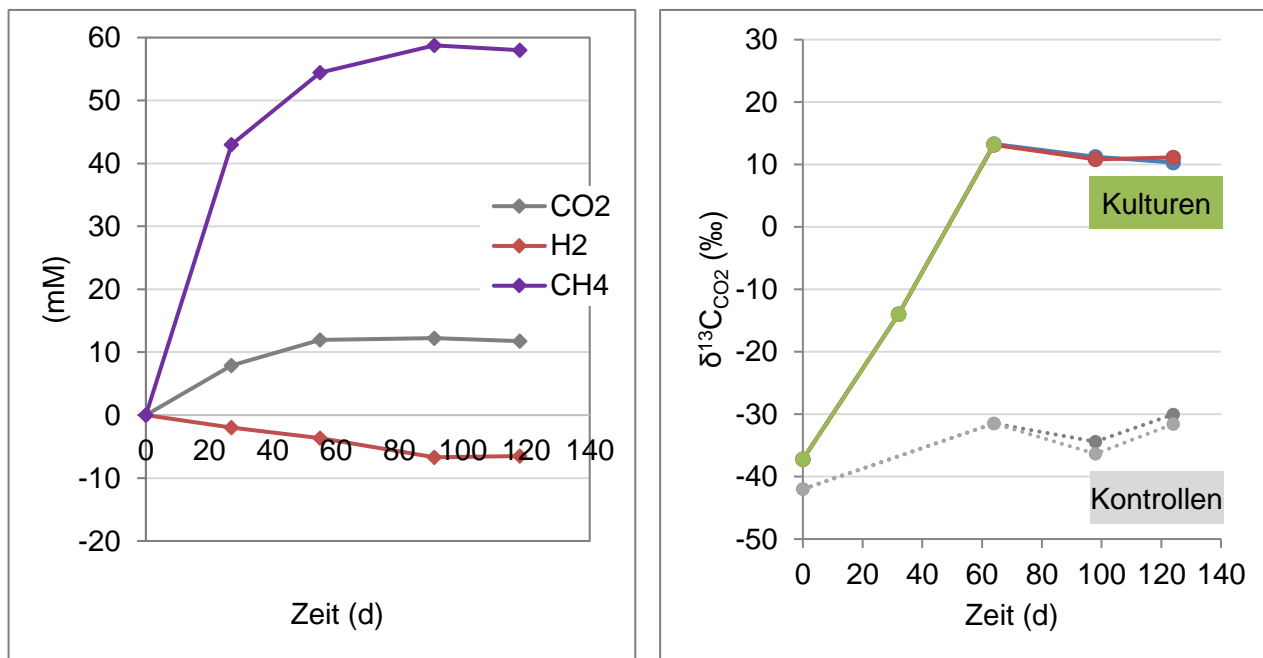


Abbildung 128: Änderung der Kohlendioxidkonzentration und -Isotopenverhältnisse (als $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) in Anreicherungskulturen während einer Methanogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 150 g/l NaCl mit Wasserstoff und Trimethylamin.

Während einer acetogenen Umsetzung von Wasserstoff mit Kohlendioxid unter Bildung von Acetat änderte sich der $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Wert um maximal +55 ‰ (Abbildung 129).

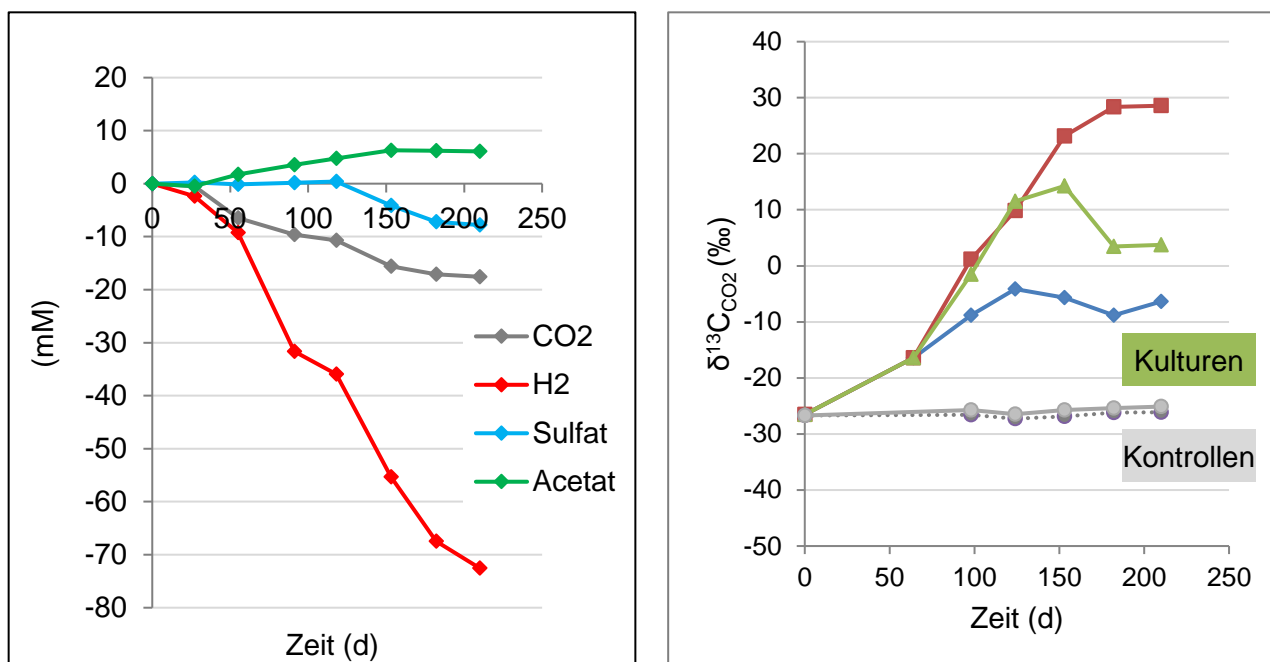


Abbildung 129: Änderung der Kohlendioxidkonzentration und -Isotopenverhältnisse (als $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) in Anreicherungskulturen während einer Acetogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 250 g/l NaCl unter Wasserstoff-Kohlendioxid-Atmosphäre. Nach 120-tägiger Inkubation wurde eine Sulfidbildung verzeichnet, was auf die Aktivität von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zurückzuführen ist.

Durch abiotische Prozesse wie Lösung von Kohlendioxid aus der Gasphase in die Sole ist eine Änderung der $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Werte bei 25°C von maximal +10 ‰ zu erwarten (Clark and Fritz, 1997), wie in den Kontrollansätzen der Anreicherungskulturen mit methanogenen Mikroorganismen beobachtet wurde (Abbildung 128). Die mikrobiellbedingten Änderungen der $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Werte während methanogener und acetogener H_2 -Umsetzung sind deutlich höher als die abiotisch verursachte sowie der ermittelte Schwankungsbereich der $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Werte für im Speichergas enthaltenes Kohlendioxid (Δ_{max} : 11,3 ‰, Tabelle 41). Somit können durch die Bestimmung von $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Werten Rückschlüsse auf die methanogene oder acetogene H_2 -Umsetzung in Kavernen gezogen werden.

Methan

Während der H_2 -Umsetzung durch methanogene Mikroorganismen mit Wasserstoff und Trimethylamin als Energiequellen unterlagen die Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse von Methan ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ -Wert) einer Änderung von +19 ‰ (Abbildung 130). Die biologisch bedingte Änderung der $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ -Werte ist deutlich höher als der ermittelte Schwankungsbereich der $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ -Werte für die Speichergaskomponente Methan (7,7 ‰). Dementsprechend ist es potenziell möglich, methanogene H_2 -Umsetzungsprozesse in Kavernen anhand der Isotopenanalyse von Methan zu erfassen.

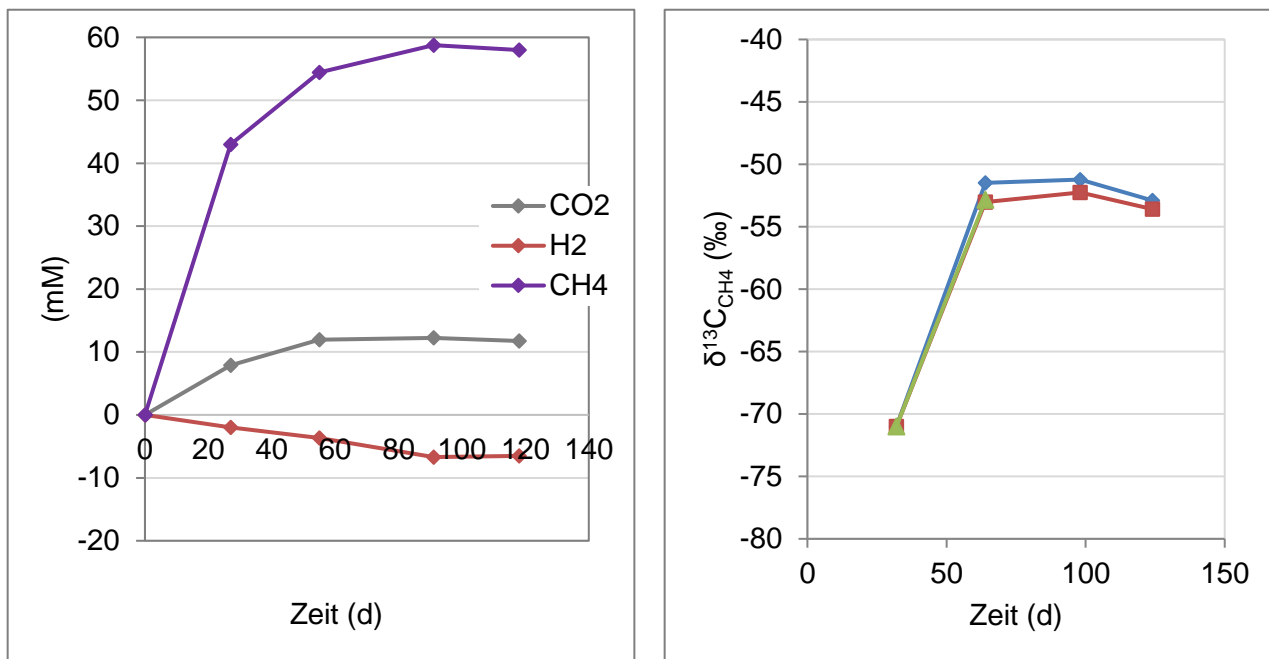


Abbildung 130: Änderung der Methankonzentration und Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse (als $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) in Anreicherungskulturen während einer Methanogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 150 g/l NaCl mit Wasserstoff und Trimethylamin.

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Isotopenanalysen, dass mikrobielle H₂-Umsetzungsprozesse zu einer deutlichen Änderung in den Isotopenverhältnissen von Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan führen, die größer sind als deren jeweilige Schwankungsbreite in den untersuchten Salzkavernen. Isotopenuntersuchungen ermöglichen somit grundsätzlich, mikrobielle Prozesse während der H₂-Speicherung in Salzkavernen zu erfassen.

5.5 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die mikrobielle Besiedlung sowohl im Kavernensumpf von Erdgaskavernen, Abscheideranlagen wie auch von Kavernen in Solung nachgewiesen. Molekulargenetische Analysen belegen diverse mikrobielle Gemeinschaften mit einer Dominanz von halophilen (salzliebenden), potenziell Sulfat und Schwefel reduzierenden, acetogenen und fermentativen Mikroorganismen. Im Kavernensumpf verschiedener Kavernen unterscheidet sich die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften deutlich.

Mikrobielles Wachstum wird von den Milieubedingungen der Umgebung wie pH-Wert, Temperatur, Salinität und Nährstoffverfügbarkeit stark beeinflusst. Die hydrochemischen Analysen an fünf Soleproben aus dem Sumpf von Erdgaskavernen verdeutlichten, dass mit In-situ-Temperaturen zwischen 25 und 28 °C, Salinitäten im Bereich von 294 und 310 g/l sowie dem Vorhandensein von organischen Verbindungen wie Kohlenwasserstoffe, Alkohole und Carbonsäuren und ausreichend Makronährstoffen wie Phosphat die Voraussetzungen für mikrobielles Wachstum gegeben sind. Als terminaler Elektronenakzeptor dominierte in den Soleproben Sulfat mit Konzentrationen > 3.300 mg/l, sodass eine mikrobielle Sulfatreduktion ablaufen könnte.

Eine mikrobielle H_2 -Umsetzung durch die vorhandenen mikrobiellen Kavernengemeinschaften ist möglich. Wie in Laboruntersuchungen mit Anreicherungskulturen aus verschiedenen Kavernen- und hochsalinaren Porenspeichern nachgewiesen wurde, kann in Salzkavernen eine mikrobielle H_2 -Umsetzung durch Sulfatreduktion unter Bildung von Schwefelwasserstoff bis zur Salzsättigung ablaufen. Als weiterer H_2 -umsetzender Prozess wurde eine Acetogenese unter Bildung von Acetat in den Laboruntersuchungen nachgewiesen. Als Obergrenze des Salzgehaltes wurde für die Acetogenese eine Konzentration von 260 g/l an NaCl bestimmt. Eine hydrogenotrophe Methanogenese, bei der Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan umgesetzt werden, ist bis zur einer Salinität von 150 g/l zu erwarten. Weiterhin wurde eine mikrobielle Umsetzung von Wasserstoff, Methanol und Trimethylamin zu Methan (methylotrophe Methanogenese) bis zu einer Salinität von 250 g/l NaCl verzeichnet. Die mikrobiellen H_2 -Umsetzungsprozesse und Folgereaktionen sind in Abbildung 131 zusammengefasst.

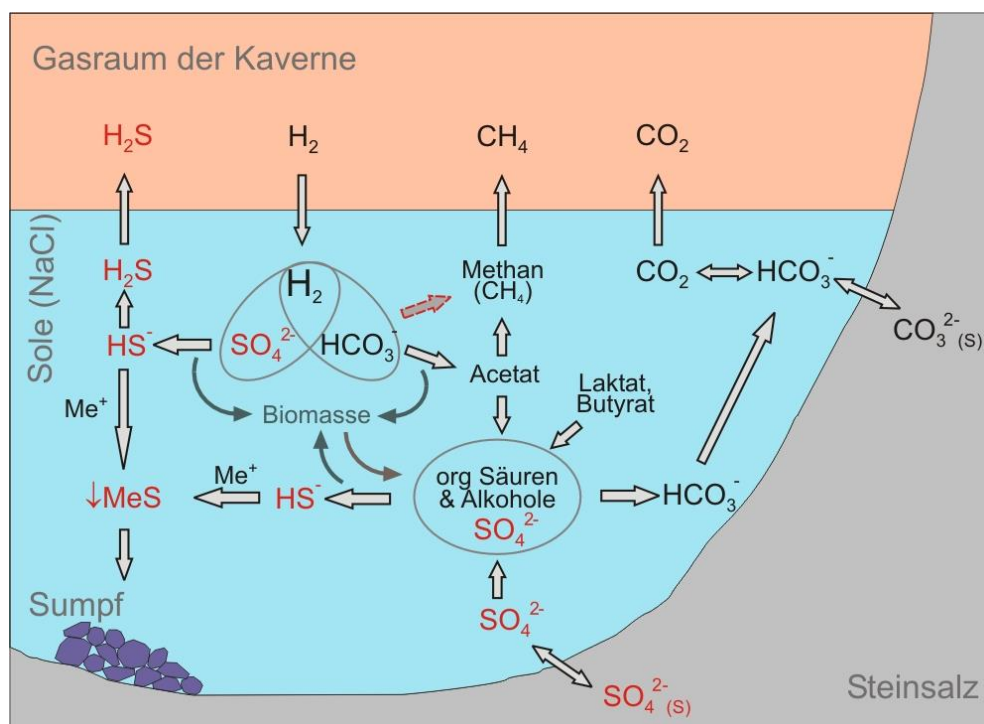


Abbildung 131: Potenzielle mikrobielle Wasserstoff-Umsetzungsprozesse und Folgereaktionen in Salzkavernen

Resultierend aus den Untersuchungsergebnissen wurde in Laborversuchen mit Soleproben eine mikrobielle H_2 -Umsetzung durch Sulfatreduktion unter Bildung von Schwefelwasserstoff als mikrobielles Risiko für eine H_2 -Speicherung in Salzkavernen identifiziert. In den Korrosionsexperimenten zeigte sich, dass mikrobiell gebildeter Schwefelwasserstoff zur Bildung von Krusten aus Eisensulfid auf der Oberfläche von Eisenproben führte. Zu erwarten sind in der Literatur beschriebene korrosive Effekte bei langanhaltender Exposition des Eisens mit Schwefelwasserstoff (Enning et al., 2012); diese Effekte konnten aufgrund der begrenzten Dauer der Versuche (maximal 15 Wochen) nicht weiter untersucht werden.

Ob eine mikrobielle H_2 -Umsetzung während untertägiger H_2 -Speicherung stattfindet und falls ja, mit welcher Reaktionsgeschwindigkeit, ist abhängig von den vorhandenen mikrobiellen Gemeinschaften und hydrogeochemischen Milieubedingungen in der Kaverne. Dementsprechend ist im Zuge einer

Umrüstung vorhandener Erdgaskavernen zur H₂-Speicherung oder Neubau einer H₂-Kaverne eine Einzelbetrachtung jeder Kaverne hinsichtlich Charakteristik der mikrobiellen Gemeinschaft und dessen Potenzial zur Umsetzung von Wasserstoff erforderlich. Begleitend sollten hydrogeochemische Analysen durchgeführt werden, um die Randbedingungen für mikrobielle H₂-Umsetzungsprozesse zu prüfen. Historische Daten bezüglich dem verwendeten Speichermedium, Speichergas und Abdeckmedium sind hierbei zu berücksichtigen. Im Rahmen einer Risikobewertung ist der Besiedlungsgrad des UGS zu erfassen und das Gefährdungspotenzial durch H₂-verwertende Mikroorganismen zu untersuchen. Auf Grundlage dessen sind technische und ökonomische Risiken und entsprechende Vorbeugungs- und Behandlungsstrategien abzuleiten. Mikrobiologisch relevante Parameter und geeignete Untersuchungsmethoden zur Beurteilung mikrobieller Risiken sind in Tabelle 42 zusammengefasst. Die mikrobiologischen Untersuchungen sollten präferentiell an Soleproben aus dem Kavernensumpf durchgeführt werden.

Tabelle 42: Mikrobiologisch relevante Parameter und Untersuchungsmethoden zur Beurteilung mikrobieller Risiken zur Konzeption einer Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen

Parameter	Probenmaterial	Methode	Anwendungsbereich und -grenze der Methode
Physikalische Parameter			
Temperatur	Sole		Einfluss auf Lebensfähigkeit und Wachstumsrate von Organismen
Druck			
Chemische Parameter			
pH-Wert	Sole	pH-Sonde	Meist pH-Wert-Bestimmung unter atmosphärischem Druck; Korrektur des pH-Wertes unter Berücksichtigung des In-situ-Druckes empfehlenswert
Anionen (Chlorid, Karbonate, Sulfat, Thio-sulfat, Sulfid, Phosphat)	Sole	Ionenchromatographie	Bestimmung der Milieubedingungen Erfassung Salinität Prüfung Vorhandensein relevanter Makronährstoffe Hinweise auf Redoxprozesse (z. B. Sulfatreduktion)
Kationen (Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen, Ammonium)	Sole	Ionenchromatographie	
Kohlenwasserstoff-Index	Sole	Gaschromatographie; DIN EN ISO 9377-2, 2001-07 (A)	Energie- und Kohlenstoffquelle für mikrobielles Wachstum

Parameter	Probenmaterial	Methode	Anwendungsbereich und -grenze der Methode
Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)	Sole	DIN EN 1484	Kohlenstoff- und Energiequelle für mikrobielles Wachstum
Gesamter anorganischer Kohlenstoff (TIC)	Sole	DIN EN 1484	Kohlenstoffquelle für mikrobielles Wachstum Elektronenakzeptor der Methanogenese und Homoacetogenese
Alkohole (Methanol, Ethanol, Isopropanol)	Sole	Gaschromatographie; DIN EN ISO 22155, 2016-07 (A)	Energiequelle für mikrobielles Wachstum
Carbonsäuren (Formiat, Acetat, Laktat, Propionat, Butyrat, Valerat, Capronat)	Sole	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC, High Performance Liquid Chromatography)	Abbauprodukte mikrobieller Umsetzung langkettiger organischer Kohlenstoffverbindungen Acetat kann aus mikrobieller Umsetzung von Wasserstoff und Kohlendioxid stammen (Homoacetogenese) Carbonsäuren können von Mikroorganismen als Energiequelle genutzt werden
Gaszusammensetzung (Wasserstoff, Kohlendioxid, Methan, Propan, Ethan, Schwefelwasserstoff)	Speichergas	Gaschromatographie; DIN EN ISO 6974-3: 2002-6	Abnahme der H ₂ -Konzentration während der Speicherung liefert Hinweise auf mikrobielle H ₂ -Umsetzung Anstieg der Methankonzentration liefert Hinweise auf methanogene H ₂ -Umsetzung Detektion von Schwefelwasserstoff liefert Hinweise auf H ₂ -Umsetzung durch Sulfatreduktion
Mineralzusammensetzung Speichergestein	Kernmaterial		Methoden und Bewertung der Parameter entsprechen den Ausführungen zur Sole

Parameter	Probenmaterial	Methode	Anwendungsbereich und -grenze der Methode
Mikrobiologische Parameter			
Zellzahl	Sole	Zellzahlbestimmung mittels Mikroskopie	Information zur Quantität der mikrobiellen Besiedlung
	Sole	Bestimmung des Adenosintriphosphat (ATP)-Gehalts	Information zur Quantität der mikrobiellen Besiedlung lebender Mikroorganismen
Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft	Sole	Hochdurchsatzsequenzierung (NGS, Next Generation Sequencing)	Kenntnis der Zusammensetzung mikrobieller Gemeinschaften vor Beginn der H ₂ -Speicherung ermöglicht Beurteilung mikrobieller Risiken
	Sole	Quantitative Polymerasekettenreaktion (quantitativ Polymerase Chain Reaction, qPCR) zur Quantifizierung von Bakterien, Archaeen, Sulfatreduzierern und methanogenen Archaeen	Kenntnis zur Quantität sulfatreduzierender Bakterien und Archaeen sowie methanogener Archaeen vor Beginn der H ₂ -Speicherung liefert erste Hinweise auf das Potenzial für Sulfatreduktion und Methanogenese
Potenzial zur mikrobiellen H ₂ -Umsetzung	Sole	Labormikrokosmen-Studien unter Niederdruckbedingungen	Erfassung des mikrobiellen Stimulationspotenzials; In-situ-Druckverhältnisse können nicht nachgestellt werden
	Sole	Hochdruckversuche	Erfassung des mikrobiellen Stimulationspotenzials unter Berücksichtigung des In-situ-Druckes

Parameter	Probenmaterial	Methode	Anwendungsbereich und -grenze der Methode
Isotopenanalysen			
Wasserstoff, Kohlendioxid, Methan	Speichergas	Kohlenstoff- und Wasserstoff-Isotopenanalyse	Bestimmung der Isotopenverhältnisse ($\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$, $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) als Referenzwerte zur Erfassung mikrobieller H_2 -Umsetzung während der H_2 -Speicherung
Sulfat	Sole	Schwefel- und Sauerstoff-Isotopenanalyse Sulfat	Bestimmung der Isotopenverhältnisse ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) als Referenzwerte zur Erfassung mikrobieller Sulfatreduktion während der H_2 -Speicherung
Wasserstoff, Kohlendioxid, Methan, Sulfat	Gasproben und Fluid aus Labormikrosomen-Studien oder Hochdruckversuchen	Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Schwefel- und Sauerstoff-Isotopenanalyse	Bestimmung der Isotopenverhältnisse ($\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$, $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) zur Verifizierung der mikrobiellen H_2 -Umsetzung sowie zur Prüfung der Anwendbarkeit als Prozessmonitoring während der H_2 -Speicherung
Solefluid	Sole	Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotopenanalyse	Bestimmung der Isotopenverhältnisse ($\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$) als Referenzwerte zur Erfassung mikrobieller H_2 -Umsetzung und Methanogenese während der H_2 -Speicherung

Bei der Planung und Solung neuer Kavernen können mikrobielle Risiken unter Berücksichtigung folgender Aspekte minimiert werden:

- Verwendung von Solemedium/Wasser mit geringer organischer Belastung; ggf Abscheidung tierischer pflanzlicher Bestandteile von Meerwasser/Flusswasser,
- sulfatarme Salzformation wählen,
- alkalische Laugung; führt zu deutlich geringeren mikrobiellen Aktivitäten.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der mikrobiellen Risikobewertung dienen als Grundlage für die Durchführung des Feldversuches. Da es sich bei Salzkavernen um große Reaktionsräume handelt und mit einer Heterogenität der mikrobiellen Gemeinschaften und den hydrogeochemischen Bedingungen in einer Kaverne zu rechnen ist, sollten potenzielle mikrobielle Prozesse während der untertägigen H₂-Speicherung fortlaufend untersucht werden. Da mikrobielle H₂-Umsetzungsprozesse zu einer deutlichen Änderung der Isotopenverhältnisse von Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan führen, eignen sich Isotopenanalysen an einfach zugänglichen Gasproben, um mikrobielle Prozesse während der H₂-Speicherung in Salzkavernen zu detektieren. Mittels molekulargenetischer Analysen können Änderungen in der Zusammensetzung mikrobieller Gemeinschaften erfasst und Vermehrung spezifischer Mikroorganismen identifiziert werden. Hierfür sind idealerweise Soleproben aus dem Kavernensumpf zu verwenden. Ein entsprechendes Untersuchungsprogramm ist in Abbildung 132 dargestellt. Details zu den Untersuchungsmethoden zum Monitoring mikrobieller Prozesse während des Speicherbetriebes sind Tabelle 43 zu entnehmen.

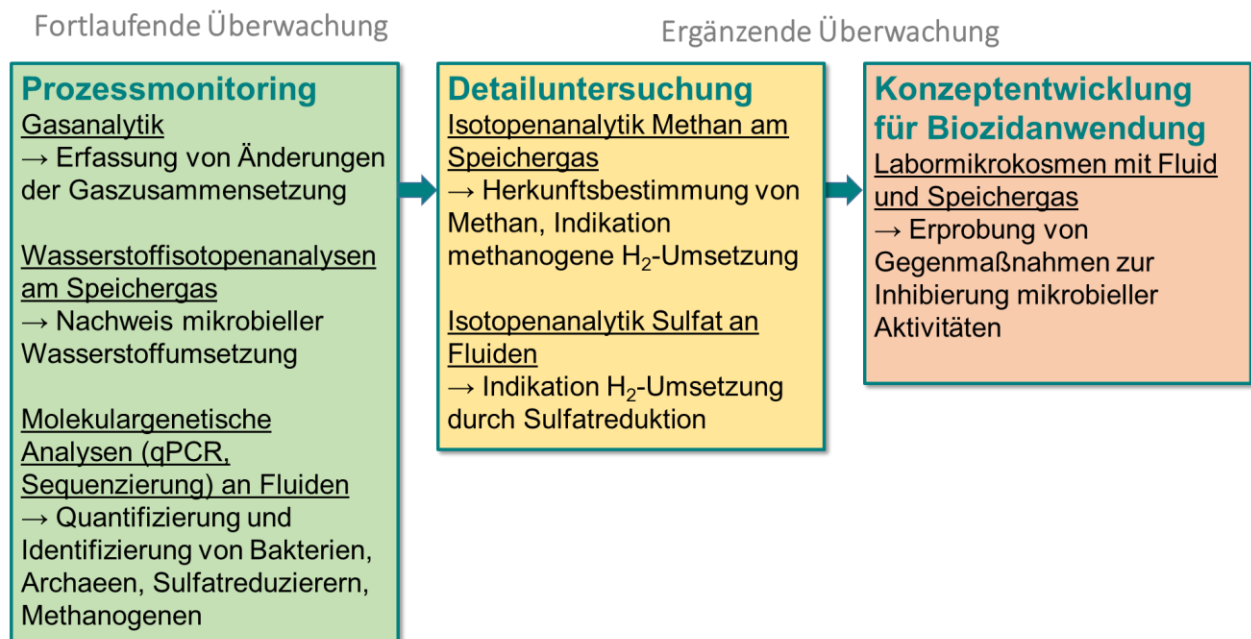


Abbildung 132: Konzept zur Überwachung mikrobieller Prozesse während der Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen

Tabelle 43: Mikrobiologisch relevante Parameter und Untersuchungsmethoden – Monitoring mikrobieller Risiken während der Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen

Parameter	Probenmaterial	Methode	Anwendungsbereich und -grenze der Methode
Physikalische Parameter			
Temperatur	Sole		Einfluss auf Lebensfähigkeit und Wachstumsrate von Organismen
Druck			
Chemische Parameter			
pH-Wert	Sole	pH-Sonde	Meist pH-Wert-Bestimmung unter atmosphärischem Druck; Korrektur des pH-Wertes unter Berücksichtigung des In-situ-Druckes empfehlenswert
Gaszusammensetzung (Wasserstoff, Kohlendioxid, Methan, Propan, Ethan, Schwefelwasserstoff)	Speichergas	Gaschromatographie; DIN EN ISO 6974-3: 2002-6	Abnahme der H ₂ -Konzentration während der Speicherung liefert Hinweise auf mikrobielle H ₂ -Umsetzung Anstieg der Methankonzentration liefert Hinweise auf methanogene H ₂ -Umsetzung Detektion von Schwefelwasserstoff liefert Hinweise auf H ₂ -Umsetzung durch Sulfatreduktion
Mikrobiologische Parameter			
Zellzahl	Sole	Zellzahlbestimmung mittels Mikroskopie	Zunahme der Zellzahl indiziert Stimulation mikrobieller Prozesse
	Sole	Bestimmung des ATP-Gehalts	Zunahme der Anzahl lebender Zellen indiziert Stimulation mikrobieller Prozesse

Parameter	Probenmaterial	Methode	Anwendungsbereich und -grenze der Methode
Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft	Sole	Quantitative Polymerasenkettenreaktion (qPCR) und 16S rRNA Sequenzierung zur Quantifizierung und Charakterisierung von Bakterien, Archaeen, Sulfatreduzierern und methanogenen Archaeen	Änderung der Zellzahl sulfatreduzierender Bakterien und Archaeen sowie methanogener Archaeen während der H ₂ -Speicherung lässt Rückschlüsse auf die Relevanz von Sulfatreduktion und Methanogenese zu Erfassung des Stimulationspotenzials der H ₂ -Exposition
		Lebendnachweis von aktiv wachsenden Zellen	Charakterisierung von lebenden stoffwechselaktiven Mikroorganismen Grundlage für Anreicherungskulturen für Inhibierungsuntersuchungen
Isotopenanalysen			
Wasserstoff	Gasprobe	Wasserstoff-Isotopenanalyse Wasserstoff	Erfassung der mikrobiellen H ₂ -Umsetzung
Kohlendioxid	Gasprobe	Kohlenstoff-Isotopenanalyse	Erfassung der mikrobiellen H ₂ -Umsetzung
Methan	Gasprobe	Kohlenstoff- und Wasserstoff-Isotopenanalyse Methan	Erfassung der methanogenen H ₂ -Umsetzung
Sulfat	Sole	Schwefel- und Sauerstoff-Isotopenanalyse Sulfat	Erfassung der H ₂ -Umsetzung durch Sulfatreduktion
Erprobung Biozidanwendung			
Biozid	Sole	Labormikrokosmen-Studien	Erprobung von Gegenmaßnahmen zur Inhibierung mikrobieller Aktivitäten

5.6 Ausblick – Risiken und Chancen

Im Vergleich zu Poren- und Aquiferspeichern ist davon auszugehen, dass Salzkavernen aufgrund der hohen Salinität und geringeren spezifischen Besiedlungsoberfläche geringere mikrobielle Risiken bergen. Mikrobiologische Erkenntnisse aus der H₂-Speicherung in Salzkavernen fehlen bislang weitgehend. In den Laboruntersuchungen unter Simulation der Speicherbedingungen hat sich gezeigt, dass die vorhandenen mikrobiellen Kavernengemeinschaften Wasserstoff umsetzen können. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, sowohl bei der Planung wie auch Durchführung der untertägigen H₂-Speicherung hydrogeochemische, mikrobiologische, molekulargenetische und isopenchemische Untersuchungen zu integrieren. Für eine zukünftige großvolumige und effiziente H₂-Speicherung bedarf es vor und während der H₂-Speicherung mikrobiologischer Begleituntersuchungen, um mikrobielle Risiken zu erfassen und ggf. zu minimieren. Entsprechende Untersuchungskonzepte wurden im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS erarbeitet.

5.7 Literaturverzeichnis

- Abdeljabbar H., Cayol J.-L., Ben Hania W., Boudabous A., Sadfi N. and Fardeau M.-L. (2013) *Halanaerobium sehlinese* sp. nov., an extremely halophilic, fermentative, strictly anaerobic bacterium from sediments of the hypersaline lake Sehlina Sebkh. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **63**, 2069–2074.
- Albuquerque L., Kowalewicz-Kulbat M., Drzewiecka D., Stączek P., d'Auria G., Rosselló-Móra R. and Da Costa M. S. (2016) *Halorhabdus rudnickae* sp. nov., a halophilic archaeon isolated from a salt mine borehole in Poland. *Syst. Appl. Microbiol.* **39**, 100–105.
- Antunes A., Taborda M., Huber R., Moissl C., Nobre M. F. and Da Costa M. S. (2008) *Halorhabdus tiamatea* sp. nov., a non-pigmented, extremely halophilic archaeon from a deep-sea, hypersaline anoxic basin of the Red Sea, and emended description of the genus *Halorhabdus*. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **58**, 215–220.
- Aravena R. and Mayer B. (2009) Isotopes and processes in the nitrogen and sulfur cycles. In *Environmental isotopes in biodegradation and bioremediation* (eds. C. M. Aelion and C. M. Aelion). CRC Press. Boca Raton, Fla., pp. 203–248.
- Basso O., Lascourreges J. F., Le Borgne F., Le Goff C. and Magot M. (2009) Characterization by culture and molecular analysis of the microbial diversity of a deep subsurface gas storage aquifer. *Res. Microbiol.* **160**, 107–116.
- Bauer S. (23.12.2021) *Underground Sun Conversion*.
- Belyakova E. V., Rozanova E. P., Borzenkov I. A., Tourova T. P., Pusheva M. A., Lysenko A. M. and Kolganova T. V. (2006) The new facultatively chemolithoautotrophic, moderately halophilic, sulfate-reducing bacterium *Desulfovermiculus halophilus* gen. nov., sp. nov., isolated from an oil field. *Microbiology* **75**, 161–171.

- Bordenave S., Chatterjee I. and Voordouw G. (2013) Microbial community structure and microbial activities related to CO₂ storage capacities of a salt cavern. *Int. Biodeterior. Biodegradation* **81**, 82–87.
- Clark I. D. and Fritz P. (1997) *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis, Boca Raton.
- Coplen T. B. (2011) Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and gas-ratio measurement results. *Rapid Commun. Mass. Spectrom.* **25**, 2538–2560.
- Cord-Ruwisch R., Seitz H.-J. and Conrad R. (1988) The capacity of hydrogenotrophic anaerobic bacteria to compete for traces of hydrogen depends on the redox potential of the terminal electron acceptor. *Arch. Microbiol.* **149**, 350–357.
- Dunn P. J. H. and Carter J. F. (2018) *Good practice guide for isotope ratio mass spectrometry*.
- Enning D., Venzlaff H., Garrelfs J., Dinh H. T., Meyer V., Mayrhofer K., Hassel A. W., Stratmann M. and Widdel F. (2012) Marine sulfate-reducing bacteria cause serious corrosion of iron under electroconductive biogenic mineral crust. *Environ. Microbiol.* **14**, 1772–1787.
- Freeman K., Harrison J., Dobinson L., Cockell C., McKenzie R., Wyllie D. and Nixon S. L. (2016) Mapping limits to life on Earth. *Astron. Geophys.* **57**, 2.15-2.17.
- Harrison J. P., Gheeraert N., Tsigelnitskiy D. and Cockell C. S. (2013) The limits for life under multiple extremes. *Trends Microbiol.* **21**, 204–212.
- Heinemann N., Alcalde J., Miodic J. M., Hangx S. J. T., Kallmeyer J., Ostertag-Henning C., Hassanpouryouzband A., Thaysen E. M., Strobel G. J., Schmidt-Hattenberger C., Edlmann K., Wilkinson M., Bentham M., Stuart Haszeldine R., Carbonell R. and Rudloff A. (2021) Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. *Energy Environ. Sci.*, 10.1039.D0EE03536J.
- Illumina, Inc. (2010) *Illumina Sequencing Technology*.
- Ivanova A. E., Borzenkov I. A., Tarasov A. L., Milekhina E. I. and Belyaev S. S. (2007) A microbiological study of an underground gas storage in the process of gas extraction. *Microbiology* **76**, 461–468.
- Kawagucci S., Toki T., Ishibashi J., Takai K., Ito M., Oomori T. and Gamo T. (2010) Isotopic variation of molecular hydrogen in 20°–375°C hydrothermal fluids as detected by a new analytical method. *J. Geophys. Res.* **115**.
- Kilburn M. R. and Wacey D. (2015) CHAPTER 1 Nanoscale Secondary Ion Mass Spectrometry (NanoSIMS) as an Analytical Tool in the Geosciences. In *Principles and Practice of Analytical Techniques in Geosciences*. The Royal Society of Chemistry, pp. 1–34.
- Krouse H. R. and Mayer B. (2000) Sulphur and Oxygen Isotopes in Sulphate. In *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* (eds. P. G. Cook and A. L. Herczeg). Springer US, Boston, MA, s.l., pp. 195–231.
- Liang R., Davidova I. A., Marks C. R., Stamps B. W., Harriman B. H., Stevenson B. S., Duncan K. E. and Suflita J. M. (2016) Metabolic Capability of a Predominant Halanaerobium sp. in Hydraulically Fractured Gas Wells and Its Implication in Pipeline Corrosion. *Front. Microbiol.* **7**, 988.

- Lin L.-H., Slater G. F., Sherwood Lollar B., Lacrampe-Couloume G. and Onstott T. C. (2005) The yield and isotopic composition of radiolytic H₂, a potential energy source for the deep subsurface biosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta* **69**, 893–903.
- Löffler M., Kümmel S., Vogt C. and Richnow H. H. (2019) H₂ Kinetic Isotope Fractionation Superimposed by Equilibrium Isotope Fractionation During Hydrogenase Activity of *D. vulgaris* Strain Miyazaki. *Front. Microbiol.* **10**, 1545.
- Morita R. Y. (1999) Is H₂ the Universal Energy Source for Long-Term Survival? *Microb. Ecol.* **38**, 307–320.
- Oren A. (1990) Formation and breakdown of glycine betaine and trimethylamine in hypersaline environments. *Antonie van Leeuwenhoek* **58**, 291–298.
- Parte A. C., Sardà Carbasse J., Meier-Kolthoff J. P., Reimer L. C. and Göker M. (2020) List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature (LPSN) moves to the DSMZ. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **70**, 5607–5612.
- Pester N. J., Conrad M. E., Knauss K. G. and DePaolo D. J. (2018) Kinetics of D/H isotope fractionation between molecular hydrogen and water. *Geochim. Cosmochim. Acta* **242**, 191–212.
- Ranchou-Peyruse M., Auguet J.-C., Mazière C., Restrepo-Ortiz C. X., Guignard M., Dequidt D., Chiquet P., Cézac P. and Ranchou-Peyruse A. (2019) Geological gas-storage shapes deep life. *Environ. Microbiol.* **21**, 3953–3964.
- Schwab L., Popp D., Nowack G., Bombach P., Vogt C. and Richnow H. H. (2022) Structural analysis of microbiomes from salt caverns used for underground gas storage. *Int. J. Hydrog.*, 20684–20694.
- Seal R. R. (2018) 12. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals. In *Sulfide Mineralogy and Geochemistry* (ed. D. J. Vaughan). De Gruyter Inc. Boston, pp. 633–678.
- Šmigáň P., Greksák M., Kozánková J., Buzek F., Onderka V. and Wolf I. (1990) Methanogenic bacteria as a key factor involved in changes of town gas stored in an underground reservoir. *FEMS Microbiol. Lett.* **73**, 221–224.
- Sognstrup Thomsen U., Lundgaard T. and Hatscher S. (2016) Presence of Oil-Degrading and H₂S-Producing Microorganisms in a Brownfield Hypersaline Sandstone Oil Reservoir. *2214-4609*.
- Sorokin D. Y., Kublanov I. V., Gavrilov S. N., Rojo D., Roman P., Golyshin P. N., Slepak V. Z., Smedile F., Ferrer M., Messina E., La Cono V. and Yakimov M. M. (2016) Elemental sulfur and acetate can support life of a novel strictly anaerobic haloarchaeon. *ISME J.* **10**, 240–252.
- Sorokin D. Y., Messina E., Smedile F., Roman P., Damsté J. S. S., Ciordia S., Mena M. C., Ferrer M., Golyshin P. N., Kublanov I. V., Samarov N. I., Toshchakov S. V., La Cono V. and Yakimov M. M. (2017) Discovery of anaerobic lithoheterotrophic haloarchaea, ubiquitous in hypersaline habitats. *ISME J.* **11**, 1245–1260.
- Sorokin D. Y., Tourova T. P., Abbas B., Suhacheva M. V. and Muyzer G. (2012a) *Desulfonatronovibrio halophilus* sp. nov., a novel moderately halophilic sulfate-reducing bacterium from hypersaline chloride-sulfate lakes in Central Asia. *Extremophiles*: **16**, 411–417.

- Sorokin D. Y., Tourova T. P., Kolganova T. V., Detkova E. N., Galinski E. A. and Muyzer G. (2011) Culturable diversity of lithotrophic haloalkaliphilic sulfate-reducing bacteria in soda lakes and the description of *Desulfonatronum thioautotrophicum* sp. nov., *Desulfonatronum thiosulfatophilum* sp. nov., *Desulfonatronovibrio thiodismutans* sp. nov., and *Desulfonatronovibrio magnus* sp. nov. *Extremophiles*: **15**, 391–401.
- Sorokin D. Y., Zacharova E. E., Pimenov N. V., Tourova T. P., Panteleeva A. N. and Muyzer G. (2012b) Sulfidogenesis in hypersaline chloride-sulfate lakes of Kulunda Steppe (Altai, Russia). *FEMS Microbiol. Ecol.* **79**, 445–453.
- Stevens T. (1997) Lithoautotrophy in the subsurface. *FEMS Microbiol. Rev.* **20**, 327–337.
- Tarasov A. L., Borzenkov I. A., Chernykh N. A. and Belyayev S. S. (2011) Isolation and investigation of anaerobic microorganisms involved in methanol transformation in an underground gas storage facility. *Microbiology* **80**, 172–179.
- van Stempvoort D. R., Millar K. and Lawrence J. R. (2009) Accumulation of short-chain fatty acids in an aquitard linked to anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons. *Appl. Geochem.* **24**, 77–85.
- Vreeland R. H. (ed.) (2012) *Advances in Understanding the Biology of Halophilic Microorganisms*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Vreeland R. H., Piselli A. F., McDonough S. and Meyers S. S. (1998) Distribution and diversity of halophilic bacteria in a subsurface salt formation. *Extremophiles*: **2**, 321–331.
- Wagner M. (2009) Single-cell ecophysiology of microbes as revealed by Raman microspectroscopy or secondary ion mass spectrometry imaging. *Annu. Rev. Microbiol.* **63**, 411–429.
- Woese C. R. (1987) Bacterial evolution. *Microbiol. Rev.* **51**, 221–271.
- Zhilina T. N., Zavarzin G. A., Rainey F. A., Pikuta E. N., Osipov G. A. and Kostrikina N. A. (1997) *Desulfonatronovibrio hydrogenovorans* gen. nov., sp. nov., an Alkaliphilic, Sulfate-Reducing Bacterium. *Int. J. Syst. Bacteriol.* **47**, 144–149.

6 Gasvermischung/Thermodynamik

Rico Rockmann¹¹, Benjamin Keßler¹¹, Cruz Marrune¹¹

6.1 Einleitung

Kavernen-Untergrundgasspeicher können durch die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten. Bei der Umstellung einer Erdgaskaverne zur Speicherung von Wasserstoff spielt die Untersuchung der Gasvermischung in der Kaverne zur Einhaltung der Gasqualität eine wichtige Rolle. Grundsätzlich wird ein Kissengas benötigt, um die Stabilität auch bei minimalem Speicherdruck zu gewährleisten; dieses verbleibt bei Ausspeicherphasen permanent im Speicher. In der Speicherpraxis haben sich für die Prozesssimulation von Kavernen halbnurische, null- bzw. eindimensionale Lösungsverfahren bewährt, in dem die detaillierte Beschreibung der Fluidynamik sehr stark vereinfacht wird. Für Kavernen, welche lediglich eine durchmischte Gaszusammensetzung aufweisen, ist ein solcher Ansatz ausreichend. Muss jedoch die Kaverne umgestellt werden bzw. treten mehrere nicht durchmischte Gase auf, so muss dieser Ansatz erweitert werden, um die Auswirkungen auf den thermischen Zustand von Bohrung und Kaverne sowie die Gasqualitäten einschätzen zu können.

Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurde deshalb untersucht, ob der Einsatz bzw. der Verbleib von Erdgas als Kissengas eingesetzt werden kann. Aller Voraussicht nach wird im Anfangsstadium des Speicherbetriebes das H₂-Angebot noch nicht so groß sein, um die Kaverne komplett zu füllen und um für die Produktionsphasen das gesamte Wasserstoffvolumen zur Nutzung bereit zu stellen. Mit der Simulation unterschiedlicher thermodynamischer Zustände und Szenarien wurde untersucht, ob hauptsächlich der wirtschaftlich nutzbare Wasserstoff ausgespeichert und das Erdgas als Kissengas in der Kaverne belassen werden kann.

Da Wasserstoff bzw. das Mischgas abweichende Stoffeigenschaften zu konventionellen Speichermedien aufweist und diese zudem bei der Umstellung zeitabhängig sind, haben diese Ergebnisse wesentliche Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit einer Umstellmaßnahme. Für die möglichen Verwertungsstrategien wurden Grenzwerte definiert, welche zur späteren Nutzung des Speichergases zur Verfügung stehen. Dabei wurden die Erkenntnisse aus Kapitel 8.3 berücksichtigt, um marktrelevante Szenarien mit einzubeziehen. Ergänzend wurden die konventionellen Kriterien von Erdgas-Kavernen auf das H₂-Kavernenmodell (bzw. Mischgasmodell) übertragen, um die maximale energetische Performance zu evaluieren.

Dafür wurden parallel experimentelle Daten erhoben, um thermodynamische Grundlagen zum Kondensationsverhalten von feuchtem Wasserstoff und Wasserstoffgemischen zu schaffen und den Zusammenhang von Wassergehalt und Taupunkt zu beschreiben. Mit Veränderung der Gaszusammensetzung verändert sich der Wassergehalt möglicherweise signifikant und damit die Anforderung an die Trocknungsleistung der Anlage. Deshalb wurde der Einfluss des Wassergehaltes auf verschiedene Trocknungsverfahren untersucht und bewertet.

¹¹ DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Karl-Heine-Straße 109/111, D-04229 Leipzig

Die Löslichkeit von Gasen ist ein wichtiger Parameter bei der Speicherung von Gasen in Kavernen zur Bewertung der mikrobiellen Aktivität und der Wechselwirkungen zwischen dem Kavernensumpf und des Speichergases. Bei einer Umstellung einer Kaverne von Erdgas auf die Speicherung von Wasserstoff lassen sich auch Aussagen über die Veränderung der Zusammensetzung der im Kavernensumpf gelösten Gase und damit über die Desorption von Komponenten (auch Verunreinigungen) in das Speichergas treffen.

6.2 Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf Gasvermischung und Thermodynamik

Die Erkundung, Errichtung und der Betrieb von Erdgas-Untergrundgasspeichern (Erdgas-UGS) in Salzkavernen ist Stand der Technik. Dafür liegen zahlreiche Erfahrungen hinsichtlich verschiedener Aspekte wie Speicherdesign, technische Ausführung, Nachweis- und Monitoringverfahren vor und können für die H₂-Speicherung verwendet werden. Bei der Umrüstung einer bestehenden Erdgaskaverne auf Wasserstoff gibt es noch keine praktischen Erfahrungen. Es bestehen einige Kenntnisse aus der Stadtgasspeicherung, die in die aktuelle Forschung eingegangen sind. Zur Bestimmung der Betriebsparameter für UGS zur H₂-Speicherung wurden die jahrelangen Erfahrungen aus der Stadtgasspeicherung in Salzkavernen ausgewertet, analysiert sowie die Umstellung des Kavernenspeichers von Erdgas auf Wasserstoff mittels moderner 3D-Simulation untersucht und die strömungsmechanischen wie thermodynamischen Prozesse abgeleitet.

6.3 Stadtgasspeicherung

In Deutschland, besonders auf dem Gebiet der ehemaligen DDR – aber auch in der Bundesrepublik Deutschland vor 1990 –, wurde jahrzehntelang Stadtgas in die Gasinfrastruktur eingespeist und in den verschiedenen UGS-Typen ein- und ausgelagert. Stadtgas ist ein Gas der öffentlichen Versorgung mit einem sehr hohen H₂-Anteil (≥ 50 Vol.-%) (Tabelle 44). Anfang der 1990er Jahre erfolgte in den neuen Bundesländern eine Umstellung der für Stadtgas genutzten Gasinfrastruktur von Stadtgas auf Erdgas (Schmitz, et al., 2018, S. 80).

Tabelle 44: Hauptkomponenten von Stadt- und Erdgas in Vol.-% (Schmitz, et al., 2018, S. 81).

		CH ₄	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	O ₂	KW ¹⁾
Erdgas [Vol.-%]	H-Qualität	96	2	-	-	1	-	1
	L-Qualität	88	11	-	-	1	-	-
Stadt- gas [Vol.-%]	1960	18	7	55	16	3,5	0,3	0,2
	1990	25	25	32	15	2	0,5	0,5

¹⁾KW = Kohlenwasserstoffe: Ethan bis Butan

Stadtgas wurde in Frankreich, Deutschland, Belgien, der ehemaligen Tschechoslowakei und Polen, sowie in den USA in UGS gespeichert. Seit den 1950er Jahren wird in Deutschland Gas in UGS gespeichert, anfangs überwiegend Kokerei- und Stadtgas. Ab den 1990er Jahren erfolgte in den neuen Bundesländern die Umstellung der Gasversorgung von Stadtgas auf Erdgas und ab 1995 war dieses dann vollständig durch Erdgas ersetzt. Während der Zeit der Umstellung der Versorgung auf Erdgas wurden einige Stadtgasspeicher aus Kostengründen stillgelegt, bei anderen UGS wiederum, vor allem bei Kavernenspeichern, erfolgte eine Umstellung auf Erdgas (Schmitz, et al., 2018, S. 81).

Im folgenden Kapitel werden die damaligen Erfahrungen und Überlegungen hinsichtlich der Medienumstellung dargestellt, analysiert und hinsichtlich der Anwendbarkeit dieser Erkenntnisse auf die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff geprüft.

6.3.1 Gasqualität und Gasqualitätsveränderungen während der Medienumstellung von Stadtgas auf Erdgas

In diesem Kapitel werden die Archivdaten der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (DBI-GUT GmbH) hinsichtlich der Umstellung des Mediums von Stadtgas auf Erdgas für die Kavernen der Verbundnetz Gas AG (VNG; jetzt: VNG Gasspeicher GmbH) in Bad Lauchstädt analysiert, um einen Referenzfall für die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff zu entwickeln.

Bei der Stadtgasumstellung wurde besonderes Augenmerk auf den Brennwert und den CO-Gehalt im Speichergas gelegt. Der Brennwert gibt die spezifische gebundene Energie eines Stoffes pro Volumen an, welcher bei Stadtgas zwischen 4 und 6 kWh/m³ beträgt. Der Brennwert von Erdgas mit H-Gas-Qualität¹² ist um ein Vielfaches höher (10–11 kWh/m³). Der CO-Gehalt hat neben dem Einfluss auf den Brennwert auch Auswirkungen auf technische Aspekte im Bereich der OTA und wurde im Zeitraum der Umstellung unter den geltenden Grenzwerten entsprechend überwacht. Aktuell ist der Grenzwert von CO im DVGW Regelwerk G 260 definiert.

¹² Gas mit einem höherem Methangehalt und demzufolge einem höherem Brennwert.

Die Umstellung des Speichermediums von Stadtgas auf Erdgas für die Kavernen der VNG in Bad Lauchstädt begann im April 1992 und war mit dem 21.03.1994 abgeschlossen. Die Stadtgasspeicherung wurde damit beendet (Schulze, 1995a, S. 9).

6.3.2 Theoretische Betrachtungen der Stadtgas-Erdgas-Umstellung

Zur Medienumstellung der Stadtgaskavernen auf Erdgas wurden von DBI GUT verschiedene Simulationen zur Optimierung der Mischgasqualität durchgeführt (Kretzschmar & Klafki, 1991). Im Rahmen dieser Simulationen wurden folgende Fragen beantwortet:

- Notwendige Druckabsenkung einer Stadtgaskaverne,
- Durchmischung von Stadt- und Erdgas während der Ruhephasen,
- Gasqualität im Ausspeisegas.

Zur Beantwortung der Fragen wurden verschiedene Simulationen mit der Software KASO-MO durchgeführt. Diese besteht aus zwei Modulen und bildet die Kaverne zylinderachsensymmetrisch (2D-Zylinderkoordinaten) ab:

- Impulstransportmodul zur Berechnung der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im Kavernenraum;
- Massentransportmodul mit Berücksichtigung von maximal fünf Eigenschaften. In den nachfolgenden Simulationen wurden lediglich drei Eigenschaften berücksichtigt (Erdgas- und Stadtgasnormdichte und die Temperatur).

Nicht berücksichtigt wurde in dem damaligen Modell die Diffusion. Die Einspeisung in die Kaverne wird über einen Quell-Senkerterm abgebildet. Gerade bei langen Standzeiten der Kaverne und großen Dichteunterschieden der zu betrachtenden Gase kann und sollte die Diffusion nicht vernachlässigt werden.

Anhand der Kaverne E wurden vier verschiedene Umstellungsvarianten simuliert. Diese Kaverne hat einen Arbeitsdruckbereich zwischen 24,5 und 135,6 bar und eine Temperatur zu Beginn der Einspeisung von 299 K. Die weitere Kavernencharakteristik und die zugrundgelegte Zusammensetzung von Stadtgas und Erdgas kann im Abschlussbericht der Medienumstellung von (Kretzschmar & Klafki, 1991) nachgelesen werden.

Um eine optimale Umstellung der Speicher von Stadtgas auf Erdgas zu gewähren, wurden folgende Umstellungsvarianten von DBI GUT untersucht:

- 1) Druckabsenkung auf 24,5 bar, nach Einspeisen drei Wochen Ruhephase,
- 2) Druckabsenkung auf 10 bar, nach Einspeisen drei Wochen Ruhephase,
- 3) Druckabsenkung auf 5 bar, nach Einspeisen drei Wochen Ruhephase,
- 4) Druckabsenkung auf 10 bar, nach Einspeisen drei Wochen Ruhephase, Zwischenentleerung auf 50 % des Arbeitsgases, Wiederbefüllung mit anschließend zwei Wochen Ruhephase.

Ziel war es, mit einem Gasumschlag eine möglichst hohe Reinheit an Erdgas zu erreichen, um dieses direkt nutzen zu können. Für alle Umstellungsvarianten wurde die Kaverne mit einem konstantem Einspeisevolumenstrom von 50.000 m³/h mit einer Temperatur von 307 K bis zu einem maximalen Speicherdruck von 136,5 bar befüllt (Kretzschmar & Klafki, 1991, S. 6).

Variante 1 – Druckabsenkung auf 24,5 bar

Bereits zum Ende der Einspeisung haben sich in der Kaverne Mischgaszonen mit einem hohen Anteil an Stadtgas ausgebildet. Nach drei Wochen Ruhephase haben sich das Stadtgas und Erdgas fast vollständig vermischt. Bei maximalem Kavernendruck bildet sich im unteren Teil der Kaverne eine Schichtung der beiden Gase, aufgrund der höheren Dichte von Erdgas ($\rho_{Erdgas} = 108,4 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{Stadtgas} = 99,08 \text{ kg/m}^3$). Durch Ausbilden einer großen Mischgaszone mit einem Stadtgasgehalt von 16 Vol.-% konnte diese Umstellungsvariante nicht genutzt werden, da diese die geforderte Gasqualität nicht erfüllen würde (Kretzschmar & Klafki, 1991, S. 9) (Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH, 1991, S. 29).

Variante 2 – Druckabsenkung auf 10 bar

Nach Ende der Erdgaseinspeisung bilden sich Mischgaszonen mit unterschiedlichen Anteilen von Stadtgas aus. Zum Ende der Ruhephase haben sich das Stadtgas und das Erdgas fast vollständig vermischt. In der Kaverne bildet sich somit eine Mischgaszone mit einem Stadtgasgehalt von 6 Vol.-%, was eine Verletzung der Gasqualität bedeuten würde. Nur im unteren Teil der Kaverne würde sich aufgrund der thermodynamischen Effekte ein Gas mit einer geeigneten Qualität ausbilden (Kretzschmar & Klafki, 1991, S. 10). Aufgrund der Qualitätsverletzung konnte diese Umstellungsvariante ebenfalls nicht genutzt werden.

Variante 3 – Druckabsenkung auf 5 bar

Zum Ende der Erdgaseinspeisung bilden sich Mischgaszonen mit verschiedenen Anteilen an Stadtgas aus, wobei der überwiegende Teil dieser Mischgaszonen die Qualitätsanforderungen erfüllen würde. Nach drei Wochen Verweilzeit haben sich das Stadt- und Erdgas fast vollständig vermischt. Im Ausspeisegas würde sich ein Stadtgasanteil von 3 Vol.-% befinden (Kretzschmar & Klafki, 1991, S. 10). Diese Umstellungsvariante ist aufgrund der schnellen Einstellung der geforderten Qualität die beste, jedoch war eine Druckabsenkung so weit unter dem minimalen Arbeitsdruck aus Sicht der Bergbehörde nicht möglich. Aus diesem Grund konnte diese Variante nicht genutzt werden.

Variante 4 – Druckabsenkung auf 10 bar mit Zwischenentleerung

Nach Beenden der Ersteinspeisung mit Erdgas stellt sich eine Mischgasqualität mit ungefähr 6 Vol.-% Stadtgas ein (siehe Variante 2). Nach der erneuten Entleerung auf 50 % des Arbeitsgases und anschließender Wiedereinspeisung bildet sich eine große Zone mit Mischgas aus, welche die Qualitätsanforderungen erfüllen würde. Während der Ruhephase durchmischen sich die beiden Gase vollständig und es bildet sich ein Mischgas aus, welches die Qualitätsanforderungen vollständig erfüllt (Kretzschmar & Klafki, 1991, S. 10).

Da Variante 3 unter geomechanischen Gesichtspunkten nicht realisierbar war, wurde im Rahmen der Medienumstellung Variante 4 gewählt (Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH, 1991, S. 30).

6.3.3 Monitoring Umstellung der Kaverne K

Die Medienumstellung der Kaverne K erfolgte im Zeitraum vom 03.04. bis 23.04.1992 nach der in Kapitel 6.3.2 vorgestellten Umstellungsvariante 4. Die Kaverne wurde hierfür bis auf einen Druck von 9,6 bar entleert, welcher unter dem minimalen, zulässigen Druck von 13,7 bar liegt. Ab dem 29.04.1992 wurde die Kaverne K bis zu einem Druck von 122,6 bar mit Erdgas wieder aufgefüllt. Der

zulässige maximale Arbeitsdruck der Kaverne K beträgt 132,3 bar (Möller & Hillert, 1992, S. 7). In Tabelle 45 ist die Zusammensetzung des ausgespeicherten Gases dargestellt, welche sich nach der Einspeisung mit Erdgas im April 1992 eingestellt hat.

Tabelle 45: Eingestellte Qualität des ausgespeicherten Gases der Kaverne K nach Umstellung von Stadtgas auf Erdgas (ohne Verfasser, Interner Bericht, S. 2)

	Zusammensetzung [Vol.-%]		
	In der Kaverne befindliches Rest-Stadtgas	Eingespeichertes Erdgas H-Gas	Eingestellte Mischung ¹⁾
CO	12,54	0	0,91
CH₄	29,18	98,25	93,22
N₂	27,96	0,83	2,81
O₂	0,25	0,02	0,04
C₂H₆	0,31	0,53	0,51
CO₂	2,15	0,11	0,26
n-C₅H₁₂	0	0,01	0,01
i-C₅H₁₂	0	0,01	0,01
n-C₄H₁₀	0	0,04	0,04
i-C₄H₁₀	0	0,03	0,03
C₃H₈	0,04	0,16	0,15
He	0	0,01	0,01
H₂	27,57	0	2
Volumen [Mio. m³] (bei maximalem Speicherdruck)	4,146	52,754	56,9
¹⁾ gemessen beim maximalem Kavernendruck, gemessen nach der Umstellung (nach einer Woche Ruhephase)			

Im Zeitraum vom 10.02. bis 04.03.1993 erfolgte die erstmalige Ausspeicherung des Mischgases aus der Kaverne K. Während der erstmaligen Ausspeicherung von 34,4 Mio. m³ i. N. stellte sich ein durchschnittlicher CO-Gehalt von ca. 1,0 Vol.-% ein. Der netzseitige maximale CO-Gehalt beträgt 0,8 Vol.-%. Infolgedessen wurde in der Obertageanlage des Speichers das ausgespeiste Gas mit dem einer anderen Erdgaskaverne zugemischt, um die Qualitätsanforderung zu gewährleisten (Möller & Hillert, 1992, S. 7–8). Um die Qualitätsanforderungen möglichst schnell zu erreichen, erfolgte nach dem erstmaligen Befüllen der Kaverne mit Erdgas bis zum maximalen Druck die erstmalige Ausspeisung dieses Mischgases bis zum minimalen Arbeitsdruck von 13,7 bar (Schulze, 1995b, S. 7). Durch anschließendes Wiederbefüllen der Kaverne stellten sich die gewünschten Qualitätsanforderungen ein.

Anhand der in Tabelle 45 gemessenen Mischgasqualität ist zu sehen, dass sich im ausgespeicherten Gas im stöchiometrischen Verhältnis Stadt- und Erdgas befunden haben. Ob die Gase sich bereits während der Injektion, Ruhephase oder erst beim Ausspeichern gemischt haben, kann aufgrund der fehlenden Messungen nicht gesagt werden. Gemessen wurde die Zusammensetzung des ausgespeicherten Gases bei maximalem Kavernendruck.

6.3.4 Umstellung weiterer Kavernen und die Entwicklung der Gasqualität in den Jahren 1997 bis 1998

In den Jahren 1993 und 1994 wurden die letzten Kavernen in Bad Lauchstädt von Stadt- auf Erdgas umgestellt. Tabelle 46 zeigt die Brennwertentwicklung der Kavernen nach der Umstellung auf Erdgas mit H-Qualität im Jahr 1993/1994 bis zum Jahre 1998.

Tabelle 46: Entwicklung des mittleren Brennwertes des ausgespeicherten Gases der Kavernen der VNG Gasspeicher GmbH im Zeitraum von 1993 bis 1998 (ohne Verfasser, Gasbeschaffenheit im Winter 1997–98 – Interner Bericht, 1998, S. 53)

Zeitraum	Brennwertentwicklung für die Kavernen [kWh/m ³]								
	A	E	G	I	D	F	H	J	K
1993–1994	4,65 ¹⁾	4,65*	4,65*	4,65 ¹⁾	10,50	10,59	10,53	10,60	10,88
1994–1995	10,57	10,59	10,58	10,50	10,97	10,99	10,95	10,99	11,02
1995–1996	10,98	10,99	10,65	10,61	11,03	11,05	11,03	11,05	11,03
1996–1997	11,05	10,91	10,86	10,98	11,05	11,06	11,06	11,06	11,08
1997–1998	11,06	11,11	11,10	11,03	11,08	11,07	11,08	11,07	11,08

¹⁾Stadtgas

Anhand der Brennwertentwicklung in Tabelle 46 ist zu erkennen, dass sich dieser nach Umstellung der Kavernen A, E, G und I auf Erdgas in H-Gas-Qualität nicht von dem der bereits auf H-Gas umgestellten Kavernen unterscheidet. Lediglich in den Kavernen E, G, I und K konnten noch Spuren von Wasserstoff und Kohlenmonoxid gefunden werden (ohne Verfasser, Gasbeschaffenheit im Winter 1997–98 – Interner Bericht, 1998, S. 53–54). Der mittlere Brennwert wurde im Ausspeichergas der jeweiligen Kavernen gemessen. Da weder die Ein- und Auspeiseraten, die Speicherstände und die Zusammensetzung des Gases in der Quelle angegeben sind, sind die verfügbaren Daten für eine detaillierte Analyse unzureichend. Jedoch ist gut zu sehen, dass sich nach der Umstellung von Stadtgas auf Erdgas der gewünschte H-Gas Brennwert schnell eingestellt hat.

6.3.5 Anwendbarkeit der Ergebnisse auf die Medienumstellung mit Wasserstoff

Eine generelle Übertragung der Vermischungsergebnisse auf die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff ist nur bedingt möglich, da sich die Dichte von Wasserstoff (0,0899 kg/m³) deutlich von der von Stadtgas (0,9908 kg/m³) und Erdgas (1,084 kg/m³) unterscheidet und die gemessenen Daten

während der Umstellung spärlich verfügbar sind. Aufgrund von Strahlbedingungen, Turbulenz und Diffusion ist es zu einer Vermischung von Stadtgas und Erdgas gekommen. Die Vermischung bzw. die Thermodynamik kann somit nicht auf die Umstellung auf Wasserstoff übertragen werden, jedoch können die Daten, Erfahrungen und Umstellungsvarianten genutzt werden

6.4 Feuchteentwicklung bei der Gasspeicherung in Salzkavernen

Die Errichtung einer Kaverne erfolgt durch Aussolen eines Salzstockes mittels Wasser. Da sich im Salzgestein nicht nur lösliche Bestandteile befinden, sondern auch unlösliche, bleiben diese nach Ende der Solung in der Kaverne zurück und bilden den sogenannten „Sumpf“. Dieser Sumpf besteht aus den unlöslichen Bestandteilen und der Restsole, welche aus technischen bzw. geometrischen Gründen in der Kaverne verbleiben.

Aus diesem Sumpf nimmt das trockene, eingespeiste Gas Wasser auf, in Abhängigkeit von Druck und Temperaturbedingungen. Darüber hinaus sind auch die Kavernenwände eine Feuchtigkeitsquelle, welche durch den Solprozess Wasser aufgenommen haben. Während der Verweilzeiten und der anschließenden Förderung des Gases, nimmt dies einen gewissen Teil an Feuchtigkeit auf. Durch die hohen Qualitätsanforderungen an das Gasversorgungsnetz muss Gas mit zu einem zu hohen Wassergehalt in den obertägigen Anlagen des Speichers getrocknet werden. Die Dimensionierung dieser Gastrocknungsanlage hat immense Auswirkungen auf die Kosten. Aus diesem Grund sind genaue Kenntnisse über den Feuchtigkeitsgehalt des ausgespeisten Gases notwendig, da eine zu groß dimensionierte Gastrocknungsanlage hohe Anschaffungs- und Betriebskosten verursachen würde (Kadner, 2002, S. 12). Zusätzlich birgt ein zu hoher Feuchtigkeitsgehalt eine weitere Gefahr: Sehr feuchtes Gas erhöht das Risiko an Korrosionserscheinung am Tubing, einem sicherheitsrelevanten Teil der Anlage.

Nicht nur aus anlagentechnischer Sicht ist die Feuchteentwicklung von Kavernen interessant, diese beeinflusst auch das thermodynamische Verhalten des Gases. In Abhängigkeit von der molaren Masse des Gases erhöht oder verringert sich die Dichte.

Die für diesen Leitfaden betrachteten Gase sind Erdgas, mit einer molaren Masse von ~ 18 g/mol und Wasserstoff mit einer molaren Masse von ~ 2 g/mol. Da der Wasserdampf eine molare Masse von ~ 18 g/mol hat, würde sich die Dichte von Erdgas bei Aufsättigung mit Wasserdampf nicht erhöhen. Die Dichte von Wasserstoff würde bei Aufnahme von Wasserdampf dementsprechend zunehmen. Dies hat zur Folge, dass das schwere Gas bestrebt ist, am tiefsten Punkt der Kaverne zu bleiben, was ein Entgegenwirken der temperaturgetriebenen Konvektion bedeutet (Kadner, 2002).

Aus Gründen der gegebenen Komplexität des Modells wurde der Feuchtetransport im Simulationsmodell nicht mitberücksichtigt.

6.5 Geochemische Reaktionen Wasserstoff/Salz/Kavernensumpf

Der Kavernensumpf besteht im Wesentlichen aus der in der Kaverne verbliebenen Sole und unlöslichen Bestandteilen, z. B. Tone. In einigen Bestandskavernen wurde während der Solung ein Blanket – bestehend aus einer Mischung hoch siedender Kohlenwasserstoffe, z. B. Dieselöl – eingesetzt. Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen als Blanket in der Kaverne dient der physischen Trennung der Sole

von der Gasphase darüber bzw. dem Schutz des Kavernendaches während der Solung. Das Blanket verbleibt in der Kaverne zusammen mit der nicht ausgeförderten Sole.

Abbildung 133 zeigt, die gaschromatographische (GC) Analyse eines Blankets (schwarz) und einem Standard (magenta) bis zu einer Kohlenstoffanzahl von C40.

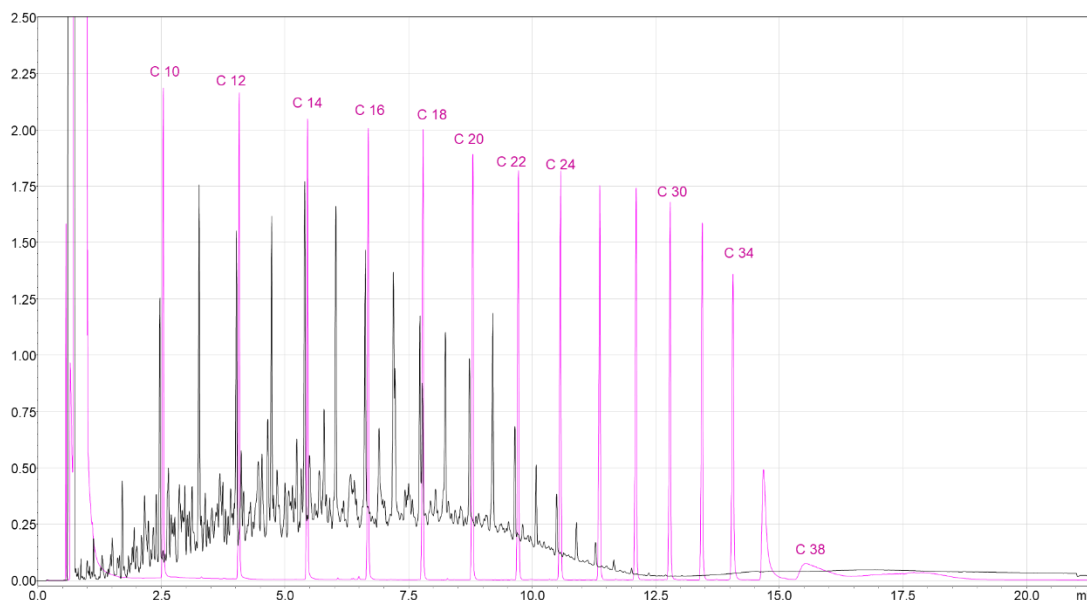


Abbildung 133: GC-Fingerprint-Analyse eines eingesetzten Blankets (schwarz) und einem Standard (magenta) bis zu einer Kohlenstoffanzahl von C40

Die GC-Analyse zeigt die typische Zusammensetzung eines Mineralöls mit Kohlenwasserstoffen bis zu einer Kohlenstoffanzahl von C28. Aus diesen Mischungen können einzelne Komponenten in die Gasphase diffundieren. Die Konzentration im eingespeisten Gas, im vorliegenden Fall Wasserstoff, ist abhängig vom Dampfdruck und damit von der Kettenlänge der Kohlenwasserstoffe. Aus den Erfahrungen der Stadtgasspeicherung ist bekannt, dass keine chemische Reaktion des Blankets mit dem eingelagerten Wasserstoff erfolgt.

Das Auftreten einer erhöhten Konzentration von Kohlenwasserstoffen im Wasserstoff ist analog zur mikrobiologischen Aktivität als spezifisch für jeden Kavernentyp zu betrachten.

Grundsätzlich kann das umgebene Salz in einer Kaverne als chemisch inert betrachtet werden. Wechselwirkungen und damit chemische Veränderungen können ausgeschlossen werden. Dies bestätigen zum einen durchgeführte Untersuchungen und zum anderen die Erfahrungen aus der Stadtgasspeicherung. Bei Einlagerungsversuchen von Salzkernen unter trockener H₂-Atmosphäre konnten keine Veränderung der Kerne nachgewiesen werden.

Zur Beurteilung des Einflusses von Wasserstoff auf die Sole wurden Einlagerungsversuche im Autoklaven durchgeführt. Dazu wurde die aus einer Kaverne entnommene Sole direkt in Kontakt mit Wasserstoff gebracht und bei einem Druck von 80 bar und 40 °C eingelagert. Nach einer Einlagerungsdauer von drei Monaten wurde der Autoklav abgekühlt und langsam entspannt. Nach der Einlagerung konnte keine Veränderung der Sole nachgewiesen werden. Es wurde keine biologische Aktivität in Form eines Biofilms oder Ausfällungen aus der Sole beobachtet werden.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche an Salzkernen und der Sole kann davon ausgegangen werden, dass keine chemischen Reaktionen von Salz und Sole mit Wasserstoff zu erwarten sind. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass Kohlenwasserstoffe aus dem Blanket in das eingelagerte Gas diffundieren.

6.6 Gaslöslichkeiten in Wasser/Sole

Für die Speicherung von Wasserstoff ist die Löslichkeit von Wasserstoff im Kavernensumpf ein wichtiger Parameter in Bezug auf mikrobielle Aktivität.

Da es sich bei biologischen Prozessen grundsätzlich um eine Reaktion in der Flüssigphase handelt, müssen die entsprechenden Substrate, in diesem Fall Wasserstoff, in die flüssige Phase übergehen. Im Folgenden sollen die Löslichkeit von Wasserstoff in salinaren Wässern dargestellt werden.

Im Vergleich zu Methan ist die Löslichkeit von Wasserstoff in salinaren Lagerstättenwässern weit weniger gut untersucht. Deshalb wurden Messungen zur Löslichkeit von Wasserstoff durchgeführt. Abbildung 134 zeigt den Versuchsaufbau zur Messung von Gaslöslichkeiten.

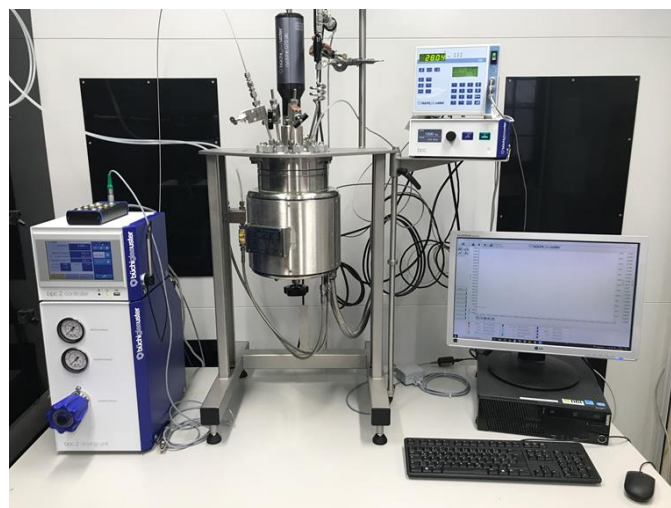


Abbildung 134: Versuchsaufbau zur Messung von Gaslöslichkeiten

Grundprinzip der Messung ist die Dosierung einer definierten Gasmenge in einem temperierten Druckbehälter. Aus der Druckdifferenz vor und nach dem Lösungsvorgang lässt sich dann die in der Flüssigkeit gelöste Gasmenge bestimmen.

Bei der Umstellung einer Erdgaskaverne sind auch die Löslichkeiten der zuvor gespeicherten Hauptkomponenten, in diesem Fall Methan, von Interesse. Die Löslichkeit von Methan ist über einen breiten Temperatur- und Druckbereich gut untersucht. Abbildung 135 zeigt die Löslichkeit von Methan in Wasser bei verschiedenen Temperaturen.

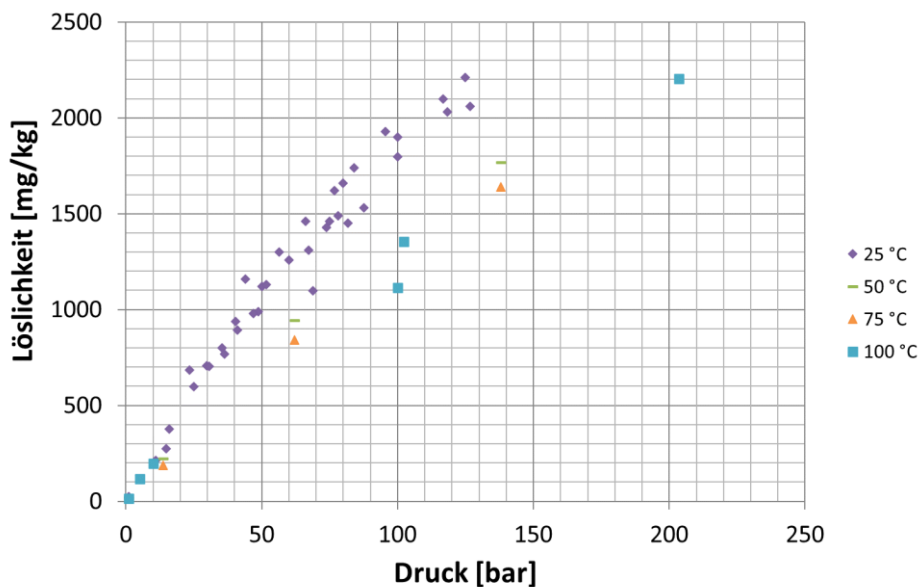


Abbildung 135: Löslichkeit von Methan in Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken (Mao, et al., 2011), (Liège, 2006), (Wang, 2003)

Am Beispiel der Löslichkeit von Methan wird deutlich, dass bei steigender Temperatur die Löslichkeit von Gasen abnimmt. Mit steigendem Druck hingegen nimmt die Löslichkeit von Gasen zu.

Im Gegensatz zur Löslichkeit von Methan in Wasser ist die Löslichkeit von Gasen in salinaren Wässern bei hohen Drücken und Temperaturen bisher weit weniger untersucht. Abbildung 136 zeigt exemplarisch die Löslichkeit von Methan bei 50 °C in Natriumchlorid-(NaCl)-Lösungen unterschiedlicher Konzentration.

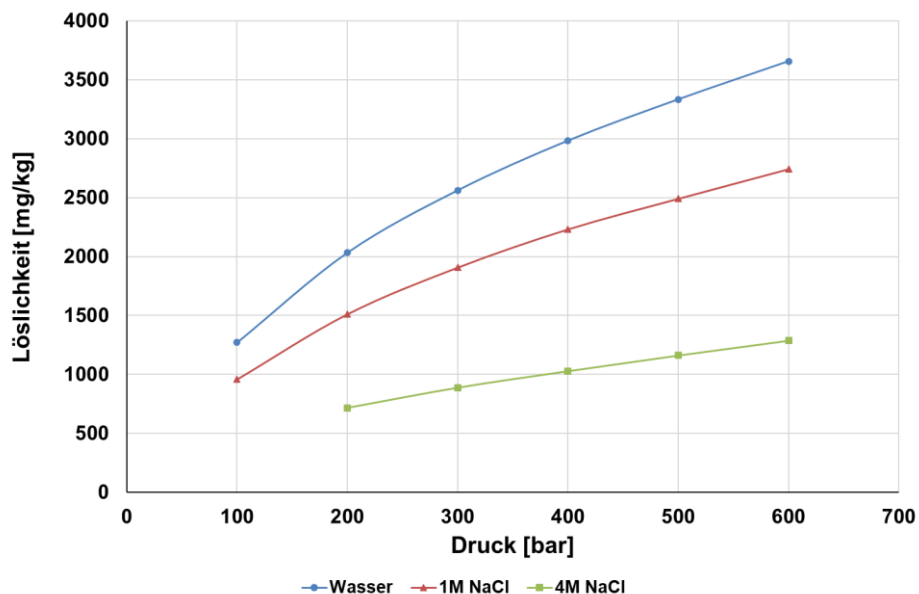


Abbildung 136: Löslichkeit von Methan in NaCl-Lösungen bei 50 °C in Abhängigkeit vom Druck und verschiedenen NaCl-Konzentrationen (O'Sullivan & Smith, 1970)

Das Beispiel in Abbildung 136 zeigt, dass mit zunehmender Salinität des Lösungsmittels die Löslichkeit von Methan bzw. von Gasen allgemein abnimmt. Wie stark die Änderung zwischen der Löslichkeit in reinem Wasser und der Sole ist, hängt von dem jeweiligen Gas und von der Zusammensetzung der Sole ab. Die Löslichkeit in Sole wird von verschiedenen An- und Kationen unterschiedlich beeinflusst.

Die Löslichkeit von Wasserstoff ist im Vergleich zu Methan weit weniger untersucht. Abbildung 137 zeigt die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser bei verschiedenen Temperaturen.

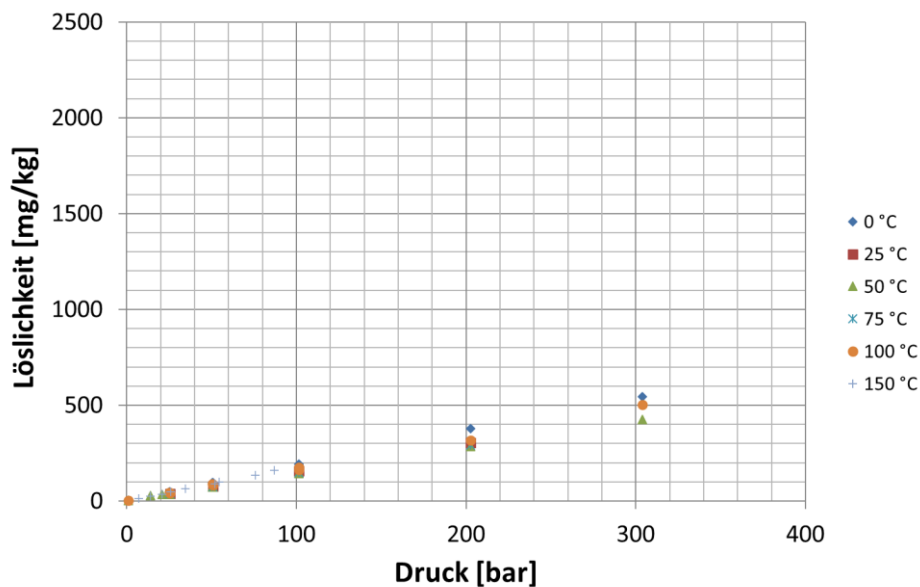


Abbildung 137: Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken; eigene Messungen und Literaturdaten (Gordon, et al., 1977), (Crozier & Yamamoto, 1974)

Der Vergleich der Löslichkeit von Methan und Wasserstoff zeigt, dass die Löslichkeit von Methan ca. 10-mal höher ist als von Wasserstoff.

Abbildung 138 zeigt den Einfluss der Temperatur bei verschiedenen Drücken und Abbildung 139 den Einfluss des Drucks bei verschiedenen Temperatur auf die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser (Chabab, et al., 2020), (Torín-Ollarves & Trusler, 2021).

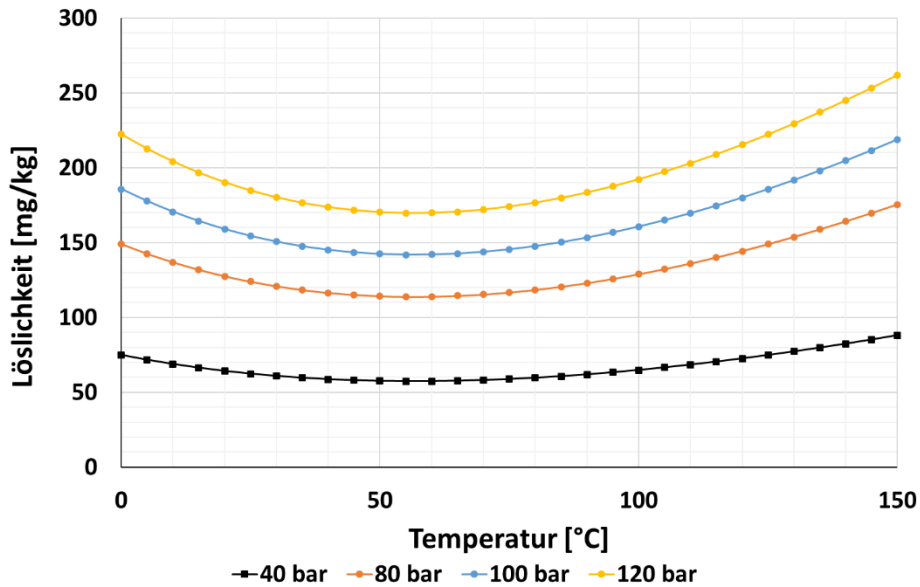


Abbildung 138: Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser bei verschiedenen Drücken (Chabab, et al., 2020)

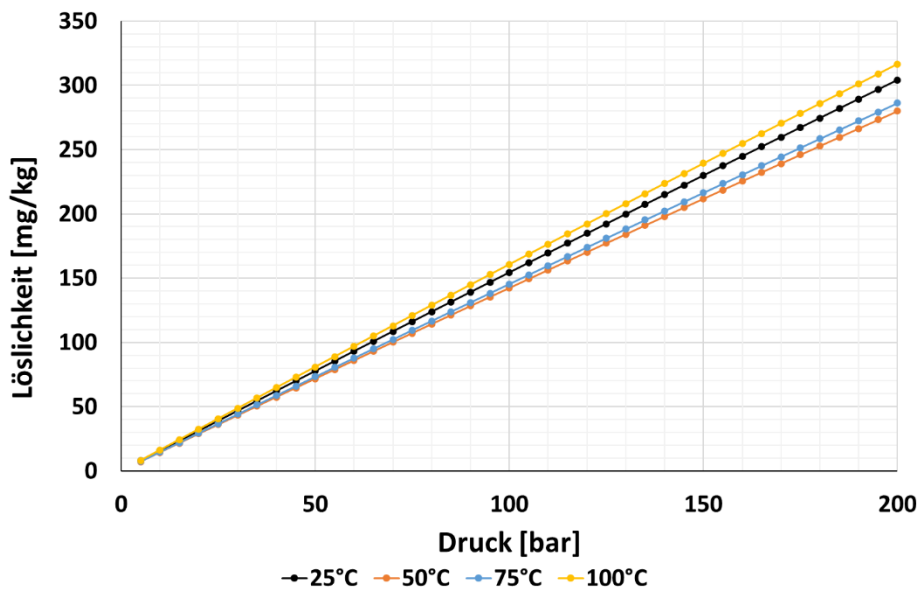


Abbildung 139: Einfluss des Drucks auf die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser bei verschiedenen Temperaturen (Chabab, et al., 2020)

Im Temperaturbereich von 0–50 °C nimmt die Löslichkeit von Wasserstoff ab. Mit weiter steigender Temperatur nimmt die Löslichkeit zu. Dieses Verhalten von Wasserstoff wurde durch verschiedene in der Literatur durchgeführte Messungen und durch Simulationen bestätigt.

In jüngerer Literatur wurde verstärkt der Einfluss der Salinität auf die Löslichkeit von Wasserstoff untersucht. Abbildung 140 zeigt die Löslichkeit von Wasserstoff bei einer Temperatur von 50 °C und Abbildung 141 bei einer Temperatur von 100 °C in NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen. Mit steigender Salinität nimmt die Löslichkeit erwartungsgemäß ab.

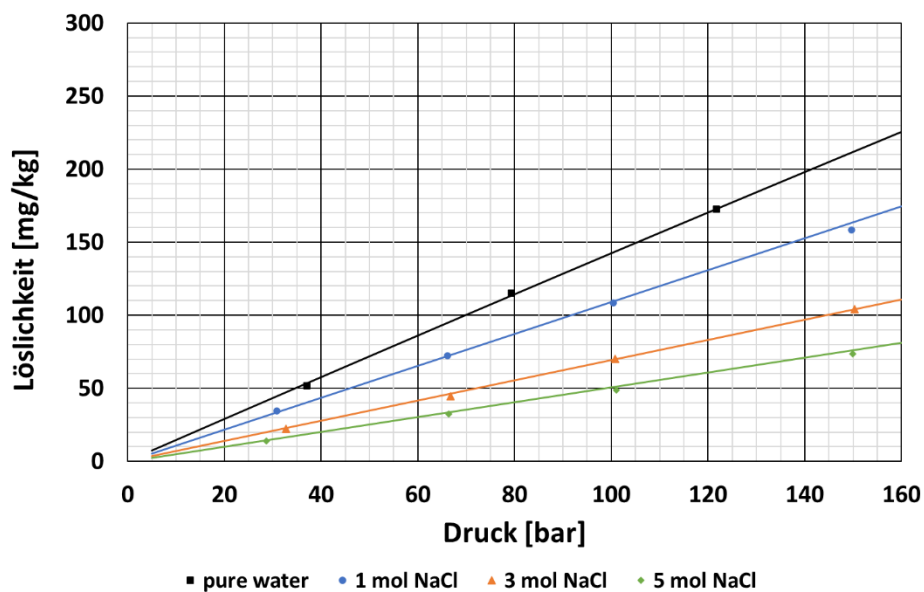


Abbildung 140: Löslichkeit von Wasserstoff in NaCl-Lösungen bei 50 °C in Abhängigkeit vom Druck und verschiedenen NaCl-Konzentrationen (Chabab, et al., 2020)

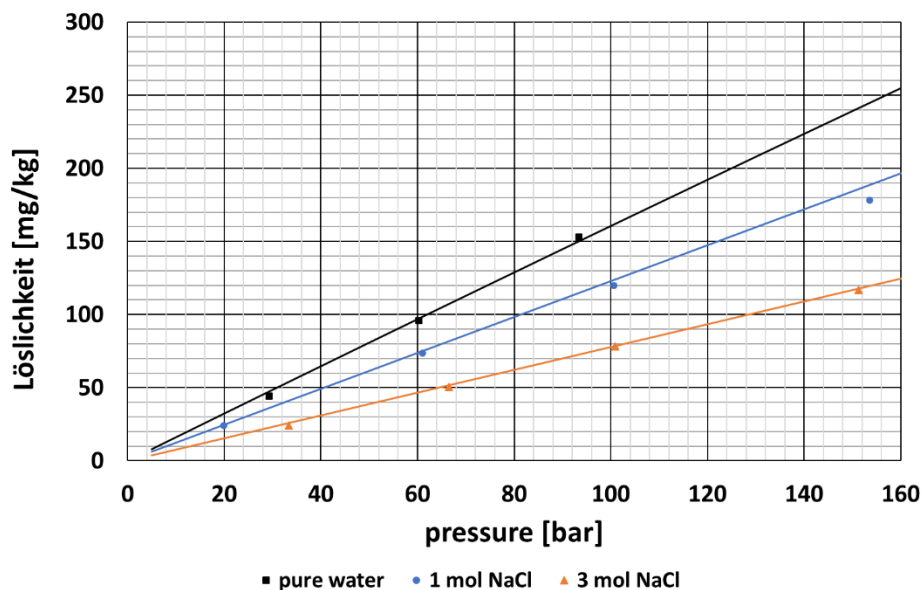


Abbildung 141: Löslichkeit von Wasserstoff in NaCl-Lösungen bei 100 °C in Abhängigkeit vom Druck und verschiedenen NaCl-Konzentrationen (Chabab, et al., 2020)

Die Löslichkeit von Methan-Wasserstoff-Gemischen ist experimentell weniger untersucht. Dennoch lassen sich Aussagen zum Lösungsverhalten von Gasgemischen treffen. Methan ist bei niedrigeren Temperaturen besser löslich in Wasser als Wasserstoff. Somit wird der Anteil an einem Mischgas gelöst in Wasser mit einem hohen Methangehalt immer größer sein als der mit einem hohen H₂-Anteil. Es ist anzunehmen, dass die einzelnen Molanteile, die sich von jedem einzelnen Gas lösen direkt proportional mit der Gaszusammensetzung sind. Wenn größere Anteile eines Gases in der Mischung vorhanden sind, lösen sich auch mehr von diesem in Wasser.

6.7 Wassergehalt und Taupunkt von Wasserstoff

Der Feuchtegehalt in Gasen spielt für die Einhaltung der Reinheitsanforderung und bei der Auslegung von Trocknungsanlagen bei der Speicherung von Wasserstoff eine wichtige Rolle. Der Zusammenhang von Wassergehalt und Taupunkttemperatur ist für Erdgase gut untersucht. In der DIN EN ISO 18453 „Erdgas – Beziehung zwischen Wassergehalt und Taupunkt“ ist ein Verfahren zur Berechnung von Wassergehalten bei gegebenem Taupunkt und umgekehrt auf Grundlage der Gaszusammensetzung spezifiziert. Für Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemische existiert derzeit keine normierte Berechnungsgrundlage.

Aus diesem Grund wurde der Wassergehalt von Wasserstoff bei unterschiedlichen Drücken und vorgegebenen Taupunkttemperaturen experimentell bestimmt. Abbildung 142 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage.

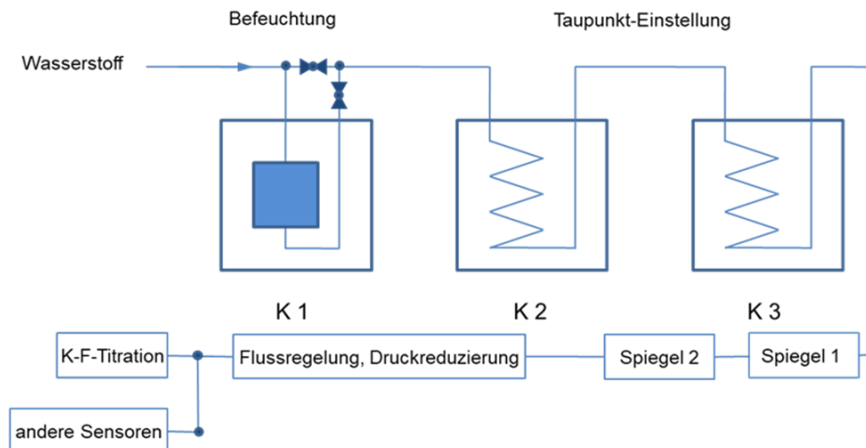


Abbildung 142: Schematischer Aufbau des Versuchstandes zur Messung von Wassergehalten und Taupunkten

Der Gasstrom wurde über einen mit befeuchteter Aktivkohle gefüllten Druckbehälter geleitet, welcher sich in einem Kältebad (K 1) befindet. Anschließend passiert das Gas die Kältebäder K 2 und K 3. Die Temperatur in den Bädern entspricht der Taupunktvorgabe. Der vorgegebene Taupunkt wird kontinuierlich über die Taupunktspiegel 1 und 2 kontrolliert. Der Wassergehalt bei konstantem vorgegebenem Taupunkt wurde mit Hilfe der Karl-Fischer-Titration bestimmt. Die Werte der Taupunkttemperatur und die gemessenen Wassergehalte wurden für die Auswertung herangezogen.

Abbildung 143 zeigt die experimentell bestimmten Wassergehalte von Wasserstoff in Abhängigkeit der vorgegebenen Taupunkttemperatur im Druckbereich von 20 bis 100 bar(a).

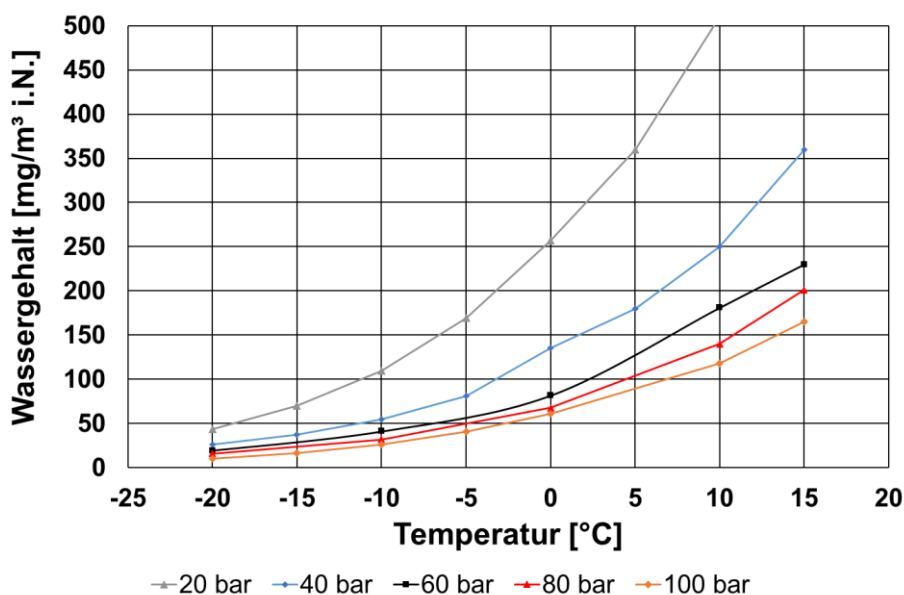


Abbildung 143: Experimentell bestimmte Wassergehalte von Wasserstoff in Abhängigkeit der vorgegebenen Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken

Mit steigendem Druck nimmt der absolute Wassergehalt im Gas ab. Bei steigender Taupunkttemperatur nimmt der Wassergehalt zu. Zu einer Bewertung und Diskussion des Wassergehaltes von Wasserstoff sind in Abbildung 144 die experimentell ermittelten Wassergehalte von Methan unterschiedlichen Drücken zusammengefasst. Abbildung 145 zeigt den Vergleich der Wassergehalte von Methan und Wasserstoff bei Drücken von 40 und 80 bar.

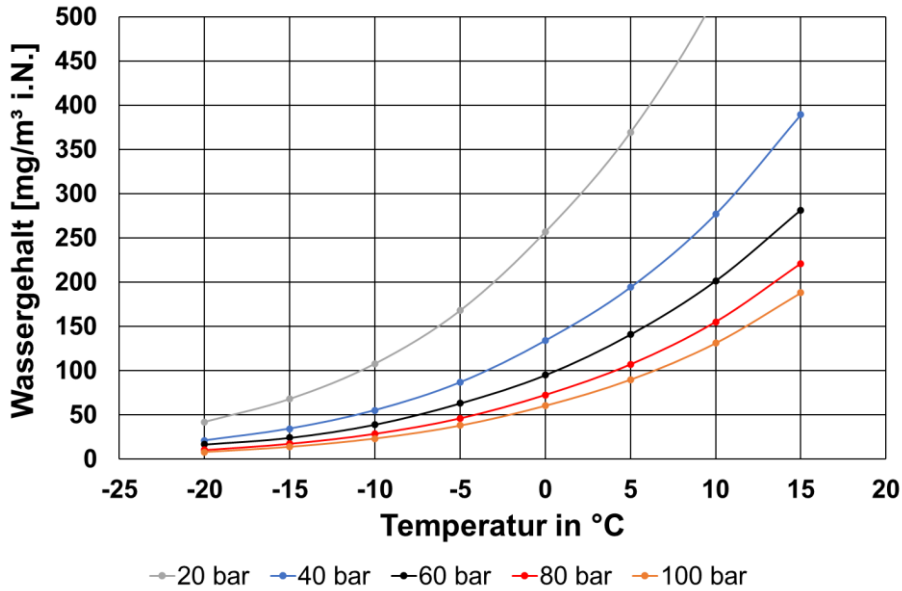


Abbildung 144: Experimentell bestimmte Wassergehalte von Methan in Abhängigkeit der vorgegebenen Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken

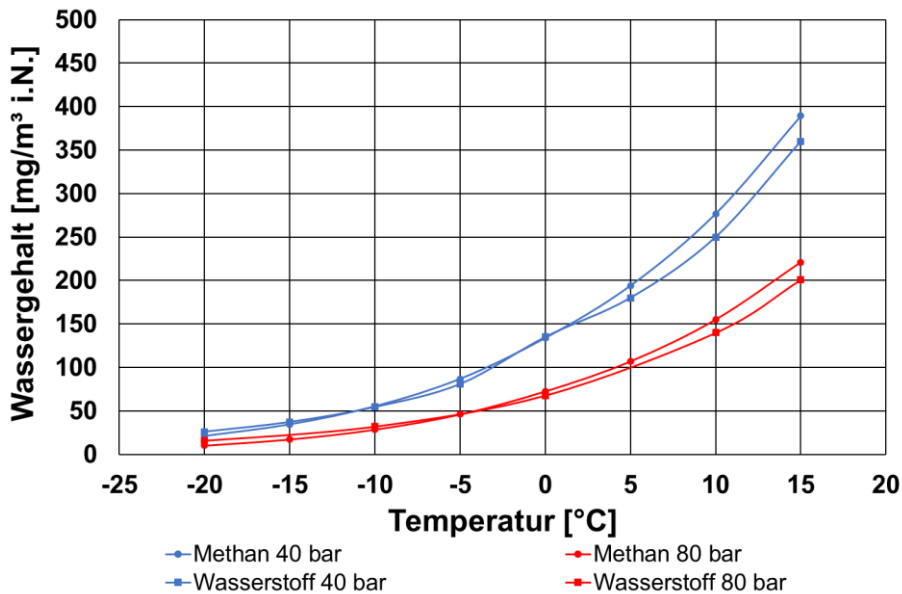


Abbildung 145: Experimentell bestimmte Wassergehalte von Methan und Wasserstoff bei Drücken von 40 und 80 bar im Vergleich

Der Vergleich zeigt, dass der Wassergehalt prinzipiell einen sehr ähnlichen Verlauf zeigt. Im niedrigen Taupunktbereich differieren die Werte nur sehr gering. Mit steigender Temperatur nimmt die absolute Differenz zwischen den Wassergehalten zu. Insgesamt zeigt Wasserstoff eine geringfügig niedrigere Wasserlöslichkeit.

Zur genaueren Beschreibung und vor allem zur Umrechnung von Taupunkten in Wassergehalte ist eine Berechnungsverfahren erforderlich.

In der DIN EN ISO 18453 ist eine Berechnungsmethode zur Berechnung von Wassergehalten und Taupunkten auf Grundlage der Gaszusammensetzung für Erdgase spezifiziert.

Dieses Berechnungsverfahren wurde zur Beschreibung der experimentellen Daten herangezogen und auf die Komponenten angepasst.

Das Berechnungsverfahren basiert auf der Zustandsgleichung von Peng-Robinson und wurde im Rahmen erarbeitet. Die Grundlage der Berechnung bildet die kubische Zustandsgleichung von (Peng & Robinson, 1976):

$$p(T, V_m) = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a(T)}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} \quad \text{Formel 6}$$

mit:

$$A = \frac{a(T) p}{R^2 T^2} \quad \text{Formel 7}$$

$$B = \frac{b p}{RT} \quad \text{Formel 8}$$

Die Koeffizienten a und b können basierend auf dem kritischen Druck und der Temperatur bestimmt werden. Aus den Bedingungen am kritischen Punkt folgt:

$$a(T_c) = 0.457235 \cdot \frac{R^2 T_c^2}{p_c} \quad \text{Formel 9}$$

$$b(T_c) = 0.077796 \cdot \frac{RT_c}{p_c} \quad \text{Formel 10}$$

Bei anderen Temperaturen gilt:

$$a(T) = a(T_c) \alpha(T_R, \omega) \quad \text{Formel 11}$$

$$b = b(T_c) \quad \text{Formel 12}$$

Formel 13 enthält den azentrischen Faktor ω , der die Abweichung eines Moleküls von der idealen Kugelform beschreibt, als stoffspezifische Konstante. $A(T_R, \omega)$ ist eine dimensionslose Funktion der reduzierten Temperatur T_R welche bei der kritischen Temperatur 1 wird.

$$T_R = \frac{T}{T_C} \quad \text{Formel 13}$$

Peng und Robinson (Wang, et al., 2003) fanden dafür die empirische Form:

$$\alpha(T_R, \omega) = \left[1 + \kappa \left(1 - T_R^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2 \quad \text{Formel 14}$$

κ ist eine substanzspezifische Konstante, die unter Verwendung des azentrischen Faktors ω verallgemeinert wird (Wang, et al., 2003):

$$\kappa = 0.374640 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad \text{Formel 15}$$

Um Zustandsgleichungen auf die Berechnung von Gemischeigenschaften anzuwenden, müssen die Parameter $a(T)$, b der reinen Verbindungen durch die Parameter der Mischung a_M , b_M ersetzt werden. Die Beziehung zwischen Gemischparametern und den Parametern der reinen Verbindung wird durch Mischungsregeln begründet. Dieses Verfahren basiert auf der „One-Fluid-Theorie“. Es wird angenommen, dass eine (hypothetische) reine Substanz existiert, die sich (unter gegebenen p , T) genauso wie das Gemisch verhält. Die Gleichungen lauten (DIN EN ISO 18453), (GERG Technical Monograph TM14):

$$a_M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_i \xi_j a_{ij} \quad \text{Formel 16}$$

$$b_M = \sum_i \xi_i b_i \quad \text{Formel 17}$$

$$a_{ij} = (1 - k_{ij}) \cdot \sqrt{(a_i a_j)} \quad \text{Formel 18}$$

mit:

$$k_{ij} = k_{ji} \text{ und } k_{ii} = k_{jj} = 0 \quad \text{Formel 19}$$

Die binären Wechselwirkungsparameter k_{ij} sind temperaturabhängig und können für die Komponentenpaare ij bzw. ji experimentell bestimmt. Es gilt folgende Näherungsformel:

$$k_{ij}(T) = k_{ij,0} + k_{ij,1} \cdot \left(\frac{T}{273,15K} - 1 \right). \quad \text{Formel 20}$$

Zur Beschreibung der experimentellen Daten wurden die Wechselwirkungsparameter k_{ij} für die Komponenten Wasserstoff, Wasser und Methan angepasst.

Abbildung 146 zeigt den Vergleich der experimentell bestimmten Wassergehalte von Wasserstoff mit den nach der Zustandsgleichung von Peng-Robinson berechneten Werten.

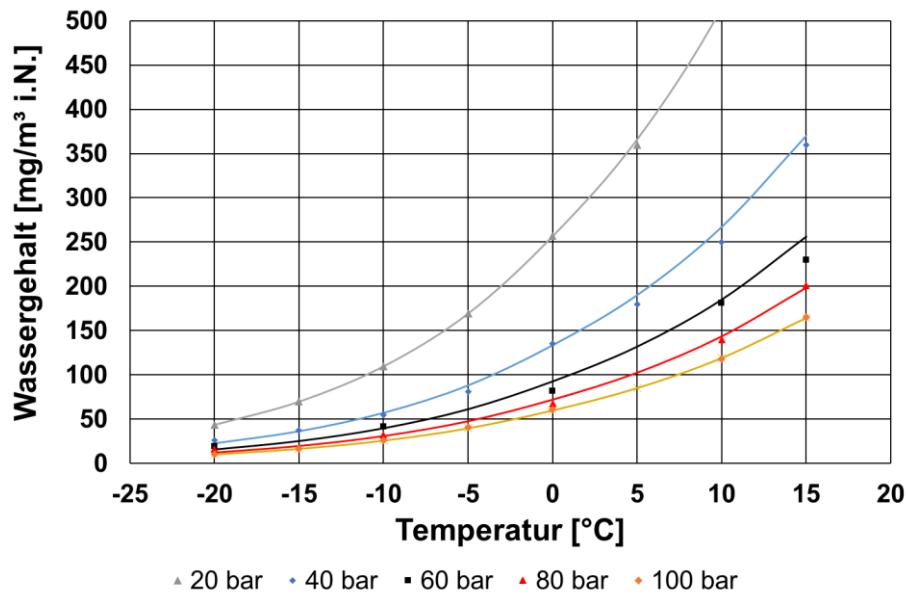


Abbildung 146: Vergleich der experimentell bestimmten Wassergehalte von Wasserstoff mit den berechneten Werten in Abhängigkeit der vorgegebenen Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken

Insgesamt zeigt der Vergleich der experimentellen Daten mit den Simulationsergebnissen eine gute Übereinstimmung.

Beim Betrieb einer Kaverne sind der Druckbereich bis 200 bar und der Temperaturbereich bis 75 °C von besonderem Interesse. Abbildung 147 zeigt den Wassergehalt von reinem Wasserstoff in Abhängigkeit der Temperatur bei unterschiedlichen Drücken und die relevanten Speicherbedingungen in einer Kaverne.

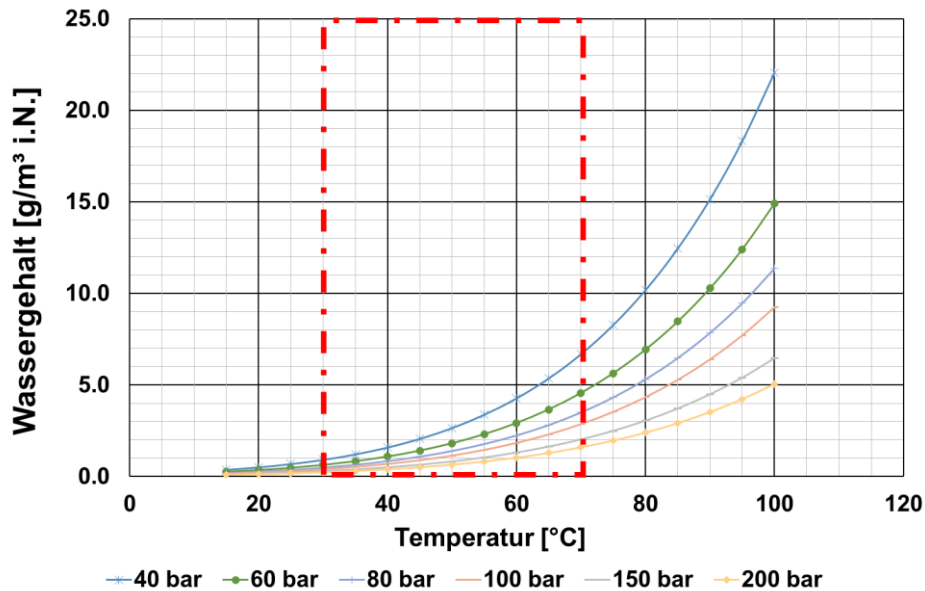


Abbildung 147: Berechneter Wassergehalt von Wasserstoff in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken im relevanten Speicherbereich (rot)

In Abbildung 148 ist der berechnete Wassergehalt von Wasserstoff in Abhängigkeit des Drucks bei verschiedenen Temperaturen im betrachteten Speicherbereich dargestellt.

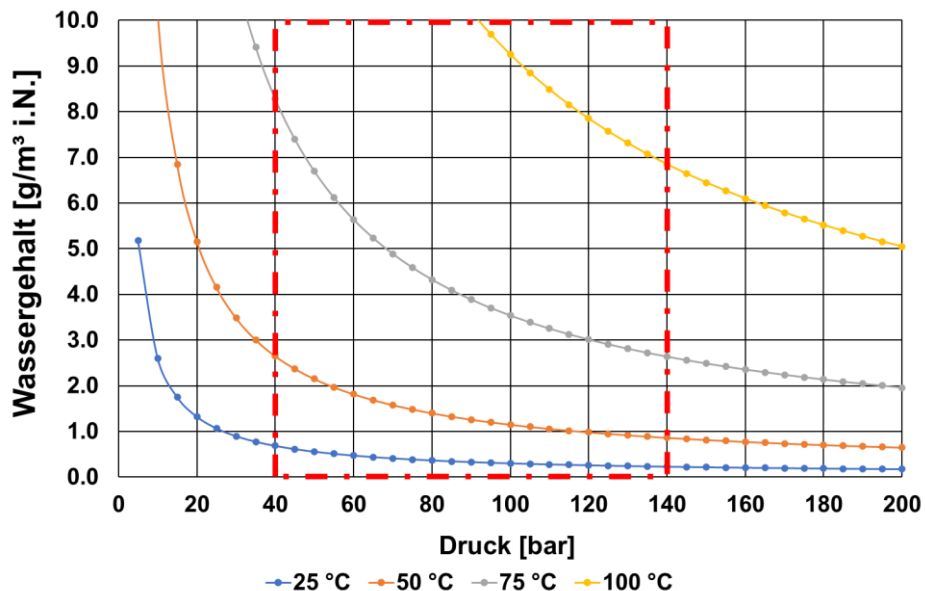


Abbildung 148: Berechneter Wassergehalt von Wasserstoff in Abhängigkeit des Drucks bei verschiedenen Temperaturen im betrachteten relevanten Speicherbereich (rot)

Im Gegensatz zu den Bedingungen im Speicher bei hohen Temperaturen und Drücken spielen bei der Qualitätskontrolle des ausgespeisten Gases nach der Trocknung deutlich andere Taupunkte eine Rolle. Die Wassergehalte und damit auch die Taupunkte sind nach der Trocknung deutlich geringer. Abbildung 149 zeigt exemplarisch die berechneten Taupunkte bei verschiedenen Wassergehalten im Bereich von 5 bis 200 mg/m³ i. N.

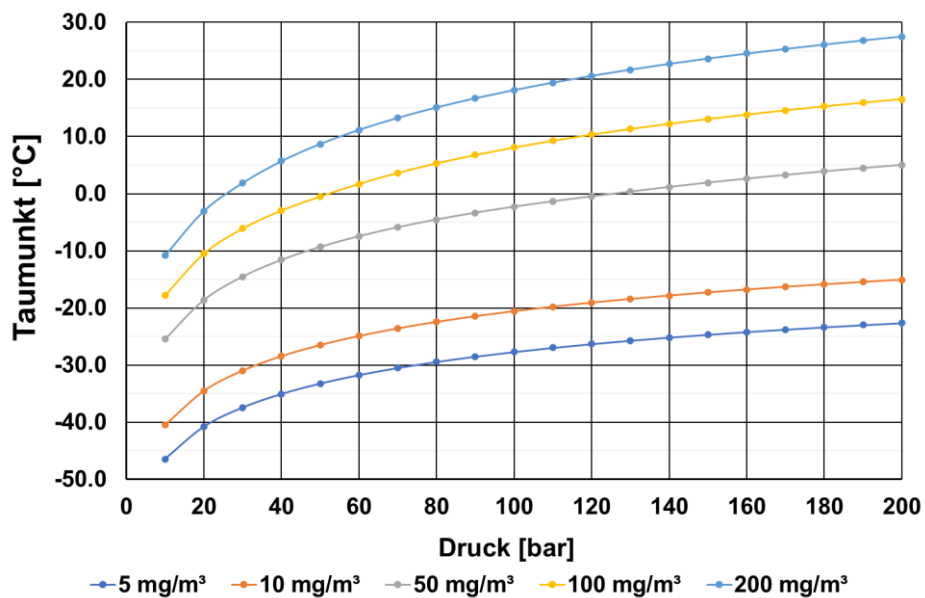


Abbildung 149: Berechneter Taupunkt von Wasserstoff in Abhängigkeit des Drucks bei verschiedenen Wassergehalten

Im Zuge der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff spielt auch der Wassergehalt von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen zur Einhaltung der entsprechenden Regelwerke eine wichtige Rolle. Abbildung 150 zeigt zum Vergleich die berechneten Wassergehalte von Methan, Wasserstoff und einem Gemisch von 50 Mol-% Wasserstoff und 50 Mol-% Methan in Abhängigkeit des Taupunktes.

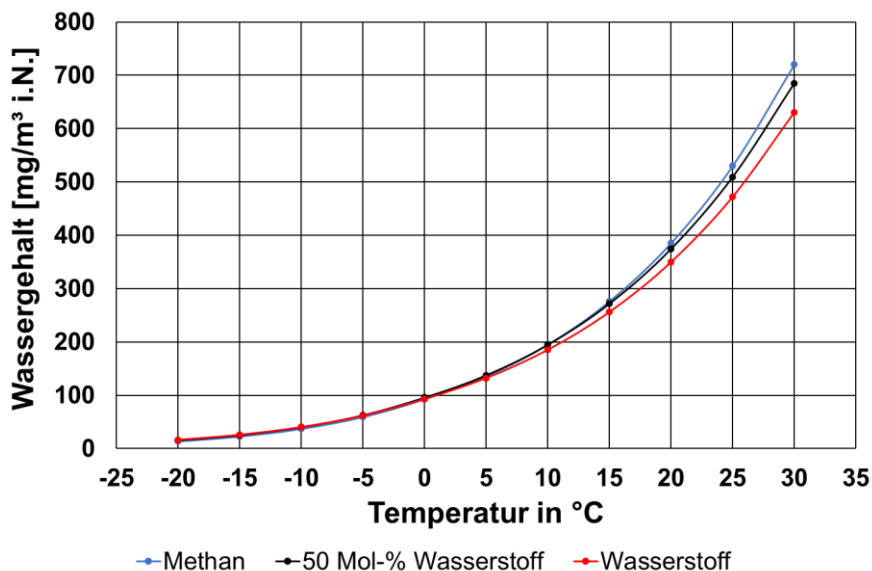


Abbildung 150: Vergleich der berechneten Wassergehalte von Methan, Wasserstoff und einem Gemisch von 50 Mol-% Wasserstoff und 50 Mol-% Methan in Abhängigkeit des Taupunktes

Grundsätzlich ist mit zunehmender Standzeit (keine Ein- und Auspeisung) mit einer Zunahme des Wassergehaltes im eingelagerten Gas zu rechnen. Dies liegt auch in der zunehmenden Erwärmung des eingelagerten Gases begründet. Es erfolgt ein Temperatenausgleich zwischen dem umgebenden Gebirge und dem Inneren der Kaverne.

Es ist insgesamt nicht mit einem höheren Wassergehalt als bei untertägiger Speicherung von Erdgas zu rechnen. D. h., dass keine grundsätzlich andere Auslegung von Trocknungsanlagen erforderlich ist.

6.8 Entwicklung eines thermodynamischen Gasmischungsmodell für Kavernen

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Simulationsmodells, vom grundsätzlichen Aufbau, der Geometrie über die Randbedingungen und die Beschreibung der im Simulationsmodell COMSOL verfügbaren Turbulenz- und Strömungsmodule bis hin zum fertigen Modell beschrieben.

Modellkonzeption

Abbildung 151 und Abbildung 152 zeigen den konzeptionellen Modellentwurf mit den dazugehörigen Bereichen und den vorherrschenden thermodynamischen Prozessen. Im inneren Bereich des Modells, in Blau dargestellt, befindet sich die gasgefüllte Kaverne. Im äußeren Bereich des Modells ist das umgebende Salzgestein in grau dargestellt. Abbildung 152 zeigt den Bereich der Bohrung und den Übergang dieser in die Kaverne. Die Förderinstallation wie Tubing, Casing und Zementation wurden aufgrund des geringen Volumens im Verhältnis zum Gesamtmodell und des damit einhergehenden geringen thermischen Einflusses vernachlässigt.

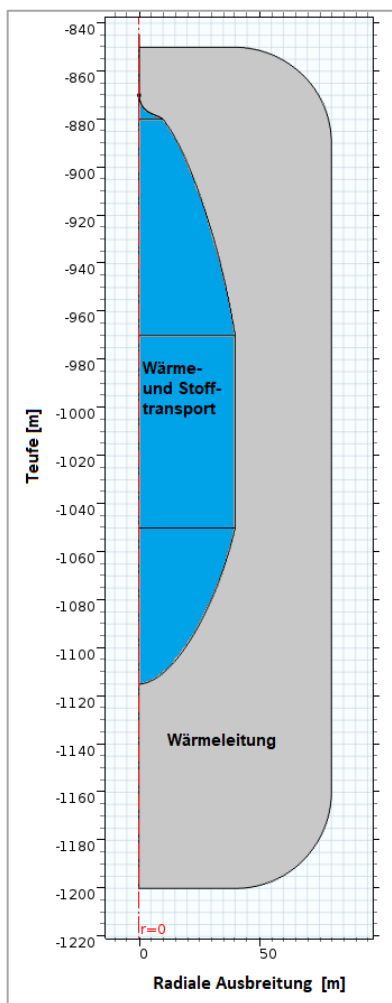


Abbildung 151: Gesamtdiagramm

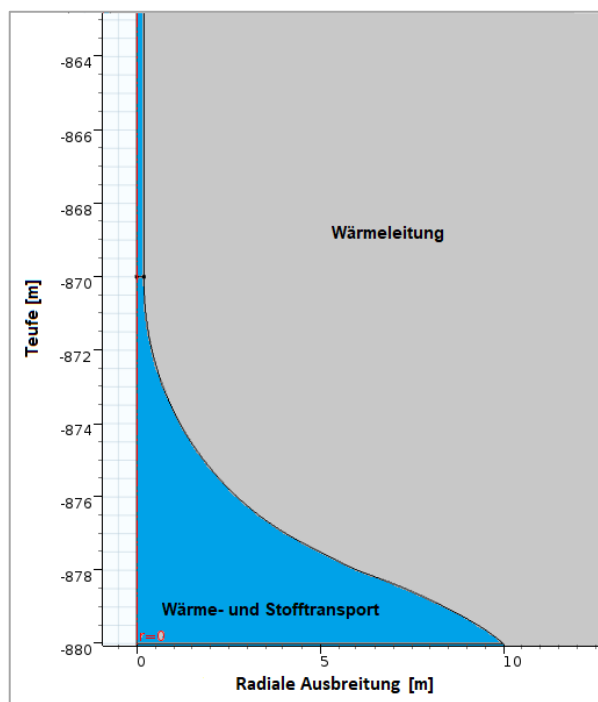


Abbildung 152: Darstellung Bohrung und Übergang zur Kaverne

Um die Rechenzeit und das Modell zu vereinfachen, wurde das Modell radialsymmetrisch aufgebaut mit der Rotationsachse bei $r = 0$. Rotationssymmetrisch bedeutet, dass jeder Punkt, um einen bestimmten Winkel um die Rotationsachse gedreht, das Objekt auf sich selbst darstellt. Da hierbei ein dreidimensionales Problem auf eine Ebene projiziert wird, reduziert dies drastisch die Anzahl an Zellen die berechnet werden und demzufolge benötigt es weniger Rechenzeit und -leistung. Durch die idealisierte Form der Kaverne und die Annahme, dass das Salzgestein homogen verteilt ist, ist diese Vereinfachung des Modells zulässig.

In der gasgefüllten Kaverne und Bohrung findet Wärme- und Stofftransport vorwiegend durch Konvektion statt. Im angrenzenden Salzgestein findet ausschließlich Wärmetransport durch Wärmeleitung statt. Das Fluid bewegt sich bei der Injektion hauptsächlich durch den Impulsstrom, welcher beim Befüllen der Kaverne erzeugt wird. Während der Ruhephase bewegt sich das Fluid aufgrund temperaturbedingter Dichteunterschiede und Konzentrationsunterschiede. Gebirge und das in der Kaverne befindliche Fluid beeinflussen sich gegenseitig durch Wärmeleitung. Der Arbeitsdruckbereich der Kaverne liegt zwischen 30 und 140 bar, basierend auf der Typkaverne des Verbundvorhabens H2-UGS.

Im ersten Teil der Simulation soll die Injektionsphase simuliert werden, mit dem Ziel die Temperaturentwicklung in der Kaverne und das Mischungsverhalten zwischen Erdgas und Wasserstoff zu untersuchen. Eine zentrale Frage ist, ob der Impulsstrom eine Vermischung der beiden Fluide zur Folge hat, oder ob es zu einer Schichtung kommt. Zum Start der Simulation befindet sich Erdgas beim minimalen Arbeitsdruck von 30 bar in der Kaverne. Anschließend wird über eine Dauer von 11 Tagen Wasserstoff bis zum maximalen Arbeitsdruck der Kaverne von 140 bar injiziert. Die Einspeisedauer von 11 Tagen begründet sich mit dem geomechanischen Richtwert, dass die maximale Druckschwankung bzw. die maximale Druckänderungsgeschwindigkeit einer Kaverne 10 bar pro Tag betragen darf.

An die Injektion schließt sich die Ruhephase an. Während dieser Phase liegt das Interesse bei der in der Kaverne stattfindenden freien Konvektion und ob diese eine Vermischung der Gase bedingt. Das im unteren Bereich der Kaverne befindliche Fluid wird durch die Formation erwärmt, was zu einer Reduzierung der Dichte führt, und steigt in Wandnähe nach oben. Das Fluid im oberen Teil der Kaverne gibt die Wärme an die Formation ab, kühlt sich dadurch ab und bewegt sich somit in der Kaverne mitte in die Tiefe, während das durch den geothermischen Gradienten bedingte im tieferen Bereich wärmere Fluid dann in der Nähe der Wand nach oben steigt.

6.8.1 Geometrie

Die Kavernengeometrie lehnt sich an die idealisierte Form einer Kaverne an, die im Verbundvorhaben H2-UGS genutzt und in Kapitel 2.2 wurde. Aufgrund des komplexen Modells und der Anfälligkeit für Fehler wurden der Kavernensumpf und demzufolge auch der Feuchtigkeitstransport in der Kaverne nicht berücksichtigt. Eine Bohrung wurde von 845 m Teufe bis 900 m angedeutet. Tabelle 47 zeigt die Randbedingungen der Kaverne, in Anlehnung an die in Kapitel 2.2 Typkaverne angepasst für die Simulation; im Folgenden „Typkaverne Simulation“.

Tabelle 47: *Parameter der Typkaverne Simulation*

Typkaverne Simulation		
Teufe der letzten zementierten Rohrtour (IzRT)	[m]	900
Minimaler Druck	[bar]	30
Maximaler Druck	[bar]	140
Tiefster Punkt der Kaverne	[m]	1.200
Maximaler Radius der Kaverne	[m]	40
Geometrisches Volumen	[m ³]	~780.000

6.8.2 Randbedingungen

In Abbildung 153 sind die Anfangs- und Randbedingungen dargestellt, wobei die Simulationen für verschiedene Anfangsbedingungen durchgeführt werden, welche in Kapitel 0 näher beschrieben werden. Am äußeren Rand der Formation liegt der geothermische Gradient an, welcher im Durchschnitt in Deutschland 3 K pro 100 m, bzw. 0,03 °K/m beträgt. Je nach Simulation hat das in der Kaverne befindliche Gas eine unterschiedliche Temperatur. Als Gesteinseigenschaften wurden die Eigenschaften des Hauptsalzes Na2 der Staßfurter Serie angenommen, in welchem sich die Forschungskaverne im Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt befinden (siehe Kapitel 4.4.2). Das Gebirge wird als homogen angenommen, wodurch die Gesteinseigenschaften in alle Richtungen gleichmäßig verteilt sind. Der Druck der Kaverne liegt zu Beginn der Simulation bei 30 bar und Endpunkt der Simulation ist bei 140 bar, was je nach Variante angepasst wird. Die Oberflächentemperatur des Bodens wird mit 10 °C angenommen. Alle Randbedingungen sind in Tabelle 48 zusammengefasst.

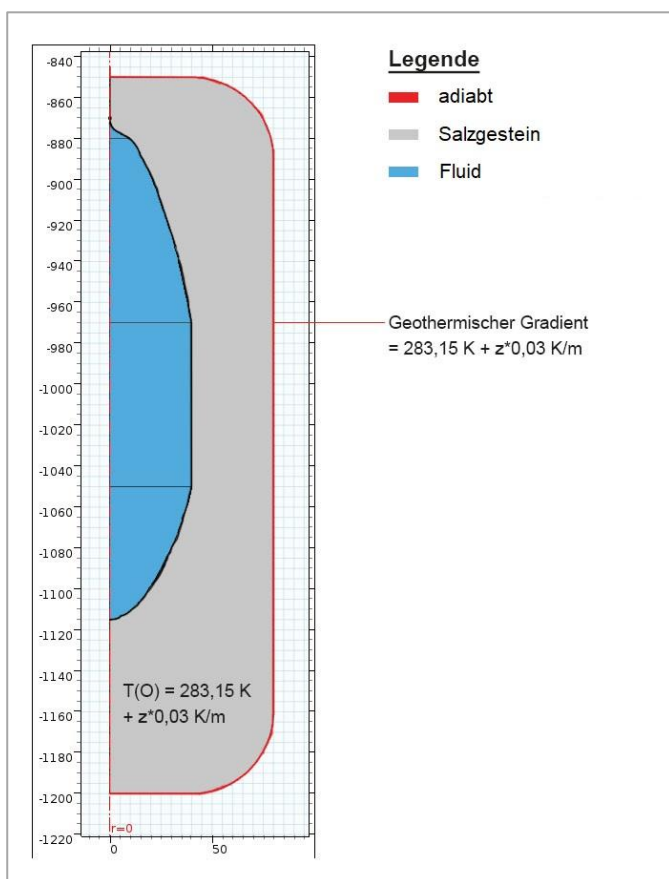


Abbildung 153: Randbedingungen des Simulationsmodells

Tabelle 48: Randbedingungen der Simulation

Randbedingungen		
Oberflächentemperatur des Bodens	[°C]	10
Geothermischer Gradient	[K/m]	0,03
Wärmekapazität Steinsalz	[J/(kg*K)]	863
Dichte Steinsalz	[kg/m ³]	2.200
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m*K)]	5.6

6.8.3 Vernetzungsmethodik

In Simulationen ist das Lösen von Fluidströmungsproblemen jeglicher Art, laminar oder turbulent, rechenintensiv. Es sind feine Netze erforderlich und es gibt viele Variablen, nach denen zu lösen ist. Bei größeren 3D-Modellen können die Simulationen Stunden oder Tage dauern. Aus diesem Grund muss der optimale Punkt, zwischen Genauigkeit der Ergebnisse und Rechenaufwand bzw. -zeit gefunden werden.

Wie zu Beginn von Kapitel 6.5 dargestellt, wurde das Modell radialsymmetrisch aufgebaut, mit der Symmetrieachse bei $r = 0$; also schneidet diese die Kaverne und das Gebirge in vertikaler Ebene im Mittelpunkt der Kaverne. Die verschiedenen Bereiche des Modells – Bohrung, Kaverne und Gebirge – besitzen unterschiedliche Anforderungen an die Feinheit des Netzes. Im Gebirge ändert sich während der Simulation nur die Temperatur aufgrund der Temperaturänderung in der Kaverne. Dieser Bereich hat dadurch sehr geringe Anforderungen an die Feinheit des Netzes. Im Gegensatz dazu hat die fluidgefüllte Kaverne sehr hohe Anforderungen an die Feinheit des Netzes, durch eine Überlagerung verschiedener Prozesse wie Wärmeleitfähigkeit, Strömungsprozesse, Stofftransport und Diffusion. Um diese Prozesse genau abbilden bzw. berechnen zu können, ist ein sehr hoher Rechenaufwand und ein sehr feines Netz notwendig. Abbildung 154 zeigt die Vernetzung zwischen Kaverne, im linken Teil der Abbildung, und des Gebirges, im rechten Teil der Abbildung. Bei einer horizontalen Ausdehnung von 40 m befindet sich die Kavernenwand. Die maximale Elementgröße im Bereich der Kaverne beträgt 0,3 m und im Bereich des Gebirges 5 m. Zur Abbildung von etwaigen Verwirbelungen und Randflüssen an der Kaverneninnenwand wurden zusätzlich in diesem Bereich sogenannte Randschichten eingesetzt.

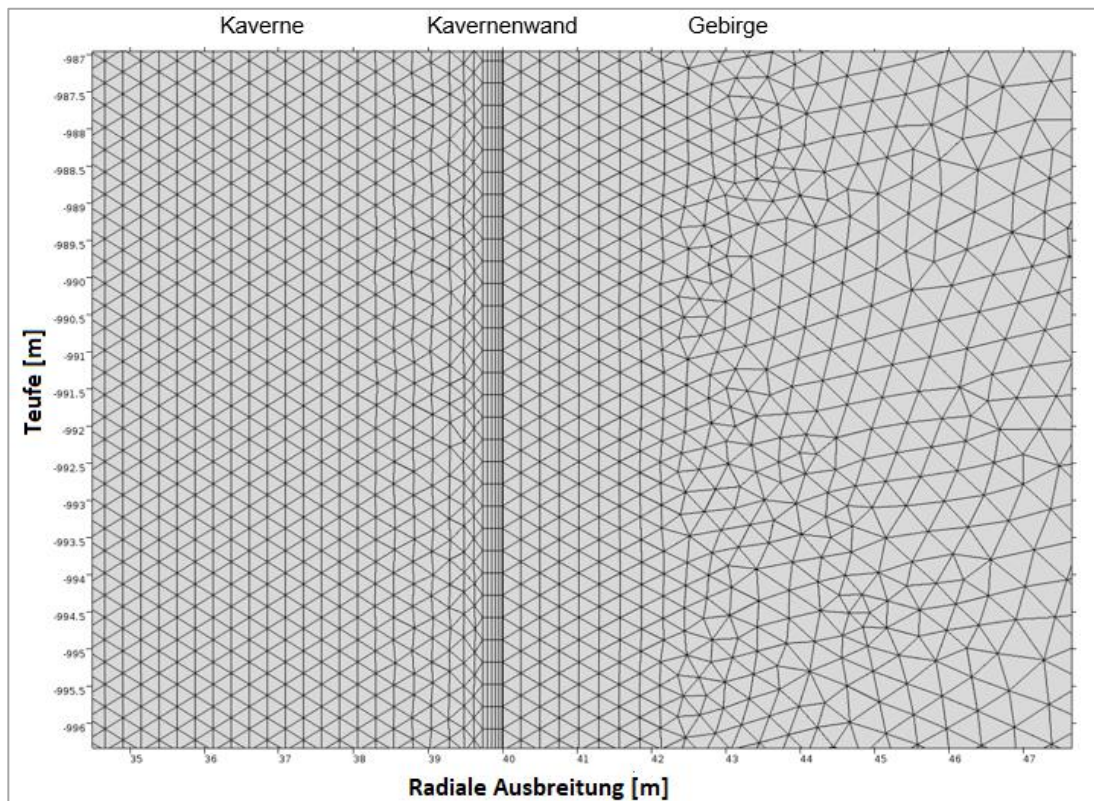


Abbildung 154: Vernetzung im Bereich Kaverne und Gebirge

Abbildung 155 zeigt den Übergang von der Bohrung in den oberen Teil der Kaverne bei einer Tiefe von 870 m. Dieser Bereich der Bohrung wurde mit einem quadratischen Netz versehen, im Gegensatz zum Rest des Modells, welches mit einem Dreiecksnetz vernetzt wurde. Der obere Bereich der Kaverne, zwischen 870 und 880 m, wurde zusätzlich mit einem noch feineren Netz versehen, um etwaige Turbulenzen und Vermischungen durch den Impulsstrom während der Injektion darzustellen. Die maximale Elementgröße in diesem Bereich beträgt 0,1 m.

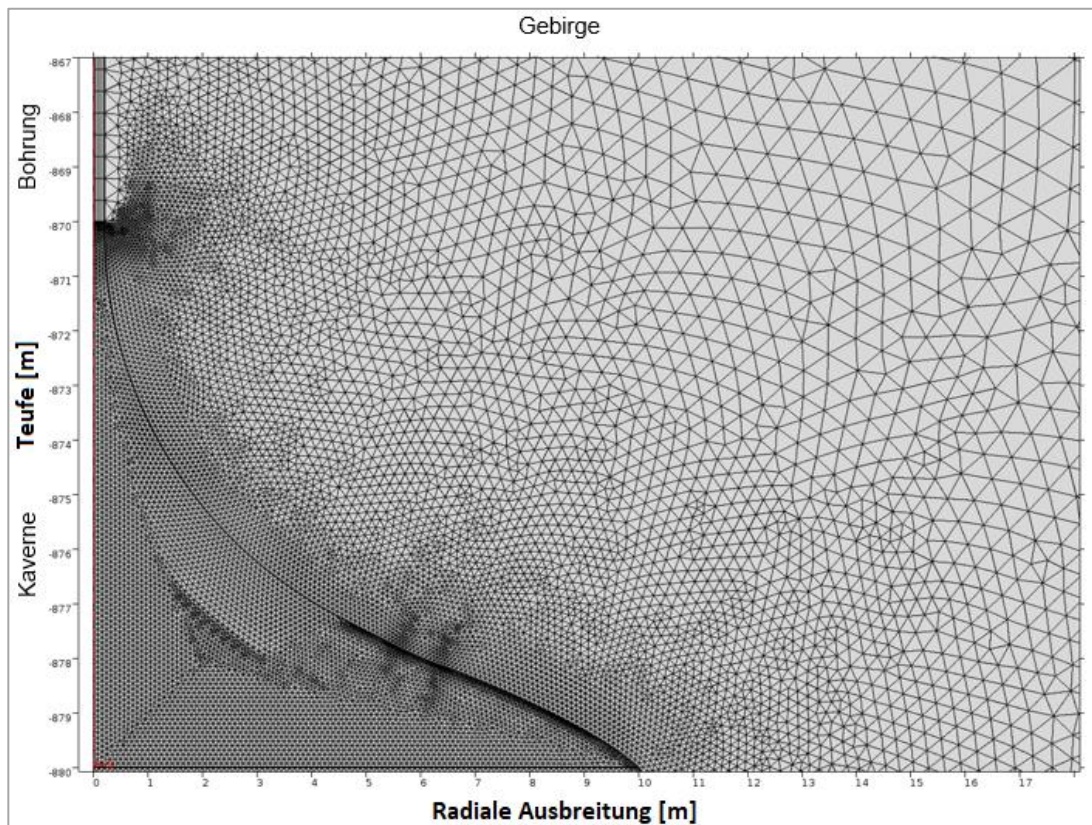


Abbildung 155: Vernetzung im Bereich Bohrung, Kaverne und Gebirge

Die Simulation mittels COMSOL Multiphysics bietet zusätzlich die Möglichkeit die Qualität der Vernetzung der Geometrie bzw. die Elementqualität darzustellen, auf einer Skala von 0 bis 1, wobei 1 die bestmögliche Elementqualität darstellt (Göthall, 2017). In Tabelle 49 sind die Anzahl der Elemente und die Elementqualität für die Bereiche Bohrung, Kaverne und Gebirge dargestellt.

Tabelle 49: Anzahl der Elemente und Elementqualität des Netzes

Bereich	Anzahl der Elemente	Durchschnittliche Elementqualität
Bohrung	300	0,1915
Gebirge	66.934	0,9751
Kaverne Gesamt	251.638	0,9672
Oberer Teil Kaverne (870–880 m)	8.541	0,9437
Unter Teil Kaverne (880–1.115m)	243.097	0,968
Gesamtes Modell	318.872	0,9681

Die Elementqualität der Formation und der Kaverne ($> 0,96$) deutet auf eine sehr gute Vernetzung hin. Im Gegensatz dazu, weist die Elementqualität der Bohrung eine sehr geringe Qualität auf. Da die Bohrung im Verhältnis zum Gesamtmodell sehr klein ist und die meisten thermodynamischen Prozesse, wie Wärme- und Stofftransport in der Kaverne ablaufen, konnte der Kompromiss einer schlechteren Elementqualität zu Gunsten einer reduzierten Rechenzeit eingegangen werden.

6.8.4 Beschreibung und Auswahl der verfügbaren Turbulenzmodule

Die Simulation mittels COMSOL Multiphysics bietet verschiedene Ansätze zur Lösung turbulenter Strömungsprobleme. Folgende Turbulenzmodule sind verfügbar: L-VEL, algebraisches $yPlus$, Spalart-Allmaras, $k-\varepsilon$, $k-\omega$, niedrige Reynoldszahl $k-\varepsilon$, SST und $v2-f$. All diese Ansätze sind im Computational-Fluid-Dynamics-Modul (CFD-Modul) von COMSOL Multiphysics verfügbar (Abbildung 156), die Module L-VEL, algebraisches $yPlus$, $k-\varepsilon$ und niedrige Reynoldszahl $k-\varepsilon$ sind auch im Wärmeübertragungsmodul verfügbar. Im folgenden Abschnitt soll dargestellt werden, welche Module wann genutzt werden, welche Vor- und Nachteile diese bieten und welches zur Simulation der Kaverne genutzt wurde (Frei, 2017).



Abbildung 156: Verfügbare Strömungsmodule innerhalb von COMSOL

Die turbulente Strömung in der Nähe einer flachen Wand kann in vier Bereiche unterteilt werden. An der Wand ist die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Reibung Null. In der darüber befindlichen dünnen Schicht steigt die Strömungsgeschwindigkeit linear, mit dem Abstand zur Wand, an. Dieser Bereich wird als viskose Unterschicht oder laminare Unterschicht bezeichnet. Weiter von der Wand entfernt befindet sich ein Bereich, der als Pufferschicht bezeichnet wird. Im Pufferbereich dominieren die Turbulenzspannungen gegenüber den viskosen Spannungen, und daran schließt sich der Bereich an, in dem die Strömung vollständig turbulent ist, welche als Log-law-Region bekannt. Dieser Name leitet sich ab von der Strömungsgeschwindigkeit, die sich aus dem logarithmischen Abstand zur Wand berechnet. Noch weiter von der Wand entfernt, geht die Strömung in den Freistrahlsbereich über. Die Grenzschichtdicke δ der viskosen Schicht und die Pufferschicht sind sehr dünn. Im Vergleich dazu besitzt die Log-law-Region die hundertfache Dicke von δ (Frei, 2017). Abbildung 157 zeigt die Strömungsbereiche, welche sich an einer Wand ausbilden.

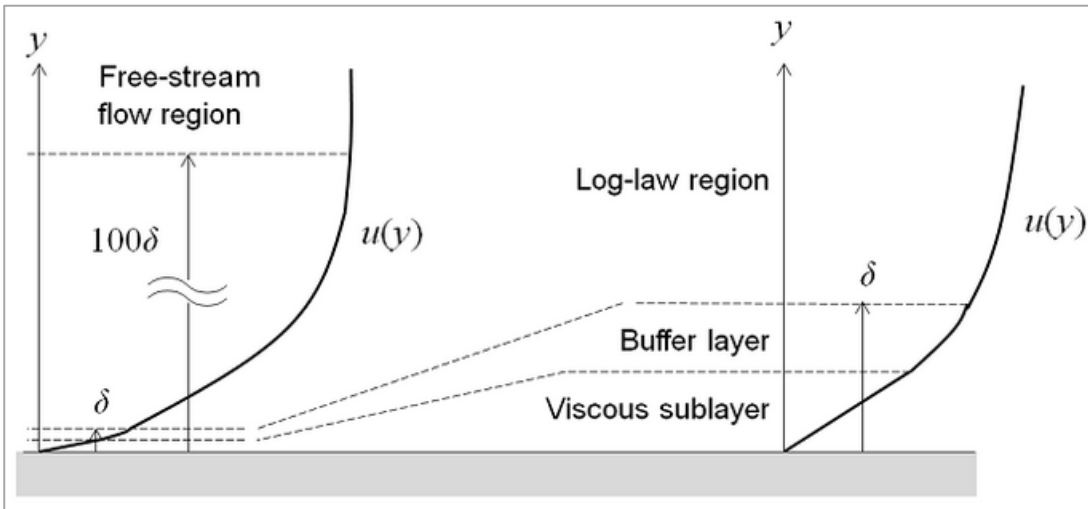


Abbildung 157: Strömungsbereich an einer Wand (Frei, 2017)

Es ist möglich, das Strömungsfeld in allen vier Bereichen zu berechnen. Da jedoch die Dicke der Pufferschicht so gering ist, kann es vorteilhaft sein, in diesem Bereich eine Näherung vorzunehmen. In COMSOL ist dies mittels sogenannter Wandfunktionen möglich. Diese ignorieren das Strömungsfeld im Pufferbereich und berechnen analytisch eine Fluidgeschwindigkeit ungleich Null an der Wand. Wenn eine Wandfunktion genutzt wird, wird für die Strömung in der viskosen Schicht eine analytische Lösung berechnet, was eine erhebliche Reduzierung des Rechenaufwands bedeutet. [Abbildung 158](#) zeigt den Vergleich zwischen dem realen Strömungsfeld und dem berechneten Strömungsfeldes mittels Wandfunktionen (Frei, 2017).

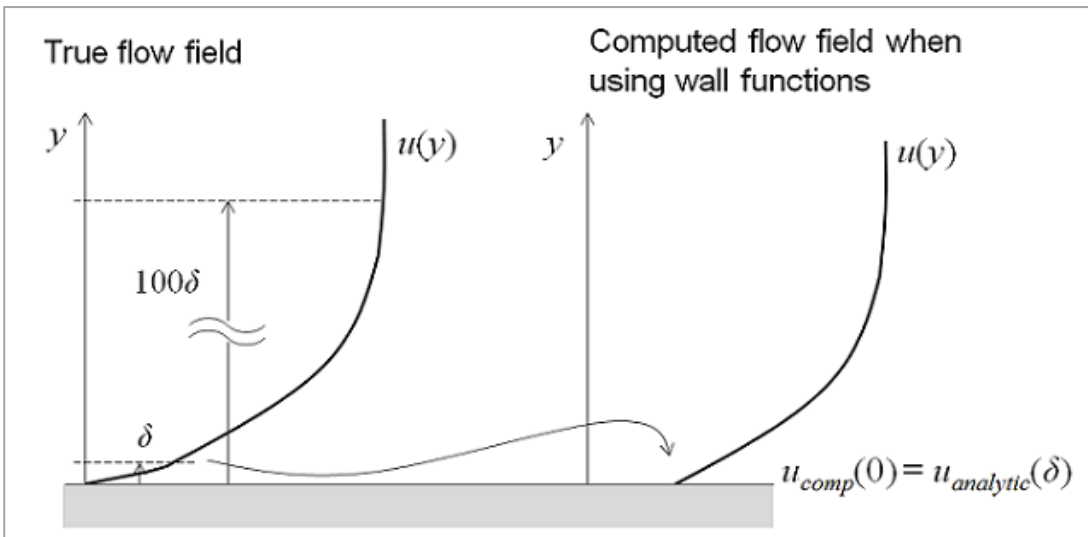


Abbildung 158: Reales Strömungsfeld und berechnetes Strömungsfeld mittels Wandfunktion (Frei, 2017)

Modelle mit niedriger Reynoldszahl

Der Begriff „Modell mit niedriger Reynoldszahl“ klingt wie ein Widerspruch, da Strömungen nur turbulent sein können, wenn die Reynoldszahl hoch genug ist. Die Bezeichnung „niedrige Reynoldszahl“ bezieht sich nicht auf die Strömung auf globaler Ebene, sondern auf den Bereich nahe der Wand, in dem viskose Effekte dominieren, wie in Abbildung 157 dargestellt. Ein Modell mit niedriger Reynoldszahl ist ein Modell, das das Grenzverhalten bei verschiedenen Durchflussmengen korrekt wiedergibt, auch den Bereich nahe der Wand. Eine korrekte Berechnung bzw. Simulation des Fluidverhaltens bedeutet, dass mit dem Turbulenzmodell die gesamte Grenzschicht einschließlich der viskosen Unterschicht und der Pufferschicht modelliert werden kann (Frei, 2017).

Die meisten ω -basierten Modelle sind konstruktionsbedingt Modelle mit niedrigen Reynoldszahlen. Das Standard- k - ϵ -Modul und andere häufig vorkommende k - ϵ -Modelle sind jedoch keine Modelle mit niedriger Reynoldszahl. Einige von ihnen können jedoch mit sogenannten Dämpfungsfunktionen ergänzt werden. Diese werden dann als k - ϵ -Module mit niedriger Reynoldszahl bezeichnet (Frei, 2017).

Modelle mit niedriger Reynoldszahl berechnen häufig sehr genau die Strömung der Grenzschicht. Das scharfe Strömungsgefälle bzw. der steile Gradient in der Nähe von Wänden erfordert jedoch sehr hohe Netzauflösungen, was wiederum bedeutet, dass dies mit einem sehr hohen Rechenaufwand verbunden ist. Aus diesem Grund werden für industrielle Anwendungen häufig alternative Methoden zur Modellierung der Strömung in der Nähe von Wänden eingesetzt (Frei, 2017).

L-VEL- und yPlus-Modul

Das L-VEL- und algebraische yPlus-Turbulenzmodelle berechnen die Wirbelviskosität mit algebraischen Ausdrücken, die nur auf der lokalen Flüssigkeitsgeschwindigkeit und dem Abstand zur nächsten Wand basieren. Sie lösen keine zusätzlichen Transportgleichungen. Diese Modelle lösen die Strömung überall auf und sind das robusteste und am wenigsten rechenintensive der acht Turbulenzmodelle. Obwohl sie im Allgemeinen die ungenauesten Modelle sind, liefern sie gute Näherungswerte für den internen Durchfluss, insbesondere bei elektronischen Kühlanwendungen (Frei, 2017).

Spalart-Allmaras Modul

Das Spalart-Allmaras-Modul fügt eine einzige zusätzliche Variable für eine ungedämpfte kinematische Wirbelviskosität hinzu. Es ist ein Modul mit niedriger Reynoldszahl und kann das gesamte Strömungsfeld bis zur Wand auflösen. Das Modell wurde ursprünglich für aerodynamische Anwendungen entwickelt und hat den Vorteil, dass es relativ robust ist, moderate Netzauflösungsanforderungen stellt und eine gute Konvergenz aufweist. Erfahrungen zeigen jedoch, dass es Strömung mit Scherströmungen, getrennte Strömungen oder Modelle mit abklingender Turbulenz nicht genau berechnet (Frei, 2017).

k- ϵ -Modul

Das k - ϵ -Modul löst nach zwei Variablen auf: k – die kinetische Turbulenzenergie und ϵ – der Dissipationsrate der kinetischen Turbulenzenergie. In diesem Modul werden Wandfunktionen verwendet, so dass die Strömung im Pufferbereich nicht simuliert wird. Das k - ϵ -Modul war in der Vergangenheit wegen seiner guten Konvergenzrate und seines relativ geringen Speicherbedarfs für industrielle Anwendungen sehr beliebt. Strömungsfelder, die ungünstige Druckgradienten, starke Krümmungen der Strömung oder Strahlströmung aufweisen, werden nicht sehr genau berechnet. Es eignet sich beispielsweise gut für Modelle bei denen komplexen Geometrien umströmt werden (Frei, 2017).

k- ω -Modul

Das k- ω -Modul ähnelt dem k- ϵ -Modul, es wird jedoch nach ω aufgelöst – der spezifischen Dissipationsrate der kinetischen Energie. Es ist ein Modul mit niedriger Reynoldszahl, kann aber auch in Verbindung mit Wandfunktionen verwendet werden. Dieses Modul ist nicht linear: es konvergiert schwieriger als das k- ϵ -Modul und es reagiert sehr empfindlich auf die anfängliche Schätzung der Lösung. Das k- ω -Modul ist in vielen Fällen nützlich, in denen das k- ϵ -Modul nicht genau ist, z. B. bei internen Strömungen, Strömungen mit starker Krümmung oder getrennten Strömungen. Ein gutes Beispiel für eine interne Strömung ist die Strömung durch einen Rohrbogen (Frei, 2017).

Niedrige Reynoldszahl k- ϵ

Das k- ϵ -Modul mit niedriger Reynoldszahl ähnelt dem k- ϵ -Modul, benötigt jedoch keine Wandfunktionen, wodurch es die Strömung überall auflösen kann. Es ist eine logische Erweiterung des k- ϵ -Moduls und teilt viele seiner Vorteile, erfordert jedoch im Allgemeinen ein dichteres Netz, nicht nur an Wänden. Es kann manchmal nützlich sein, das k- ϵ Modul zu verwenden, um zuerst eine gute Anfangsbedingung zum Lösen des k- ϵ -Moduls mit niedriger Reynoldszahl zu berechnen (Frei, 2017).

Das k- ϵ -Modul mit niedriger Reynoldszahl kann Auftriebs- und Widerstandskräfte berechnen, Wärmeströme können im Vergleich zum k- ϵ -Modul mit höherer Genauigkeit modelliert werden. Es hat sich auch gezeigt, dass eine Trennung und ein erneutes Anhaften von Teilchen in einer Strömung in einer Reihe von Fällen recht gut vorhergesagt werden kann (Frei, 2017).

SST

Das SST-Modul ist eine Kombination aus dem k- ϵ -Modul in der freien Strömung und dem k- ω -Modul in der Nähe der Wände. Es ist ein Modell mit niedrigen Reynoldszahlen, woraus ähnliche Anforderungen an die Netzauflösung wie das k- ω -Modul und das k- ϵ -Modul mit niedriger Reynoldszahl resultieren. Zusätzlich beseitigt es, aufgrund seines Formulismus, einige Schwächen, die bei den reinen k- ω und k- ϵ Modulen auftreten (Frei, 2017).

V2-f

In der Nähe von Wänden sind die Schwankungen des Geschwindigkeitsbetrags in den Richtungen parallel zur Wand viel größer, im Vergleich zu der Richtung senkrecht zur Wand. Daraus resultiert, dass die Geschwindigkeitsschwankungen anisotrop sind. Weiter von der Wand entfernt sind die Schwankungen in alle Richtungen gleich groß. Die Geschwindigkeitsschwankungen werden in diesem Bereich isotrop (Frei, 2017).

Das v2-f Turbulenzmodell beschreibt die Anisotropie der Turbulenzintensität in der turbulenten Grenzschicht unter Verwendung von zwei neuen Gleichungen. Zusätzlich zu den beiden Gleichungen für die kinetische Turbulenzenergie (k) und die Dissipationsrate (ϵ). Die erste Gleichung beschreibt den Transport turbulenter Geschwindigkeitsschwankungen senkrecht zu den Stromlinien. Die zweite Gleichung berücksichtigt nicht lokale Effekte wie die wandinduzierte Dämpfung der Umverteilung der kinetischen Turbulenzenergie zwischen der normalen und der parallelen Richtung (Frei, 2017).

In Tabelle 50 sind die einzelnen Turbulenzmodelle mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen zusammengefasst.

Tabelle 50: Zusammenfassung der verschiedenen Turbulenzmodule

Turbulenzmodul	Zusammenfassung
L-VEL and yPlus	<ul style="list-style-type: none"> • Lösen die Wirbelviskosität mit algebraischen Ausdrücken, • keine zusätzlichen Transportgleichungen werden gelöst, • robustestes, aber ungenauestes Modul.
Spalart-Allmaras	<ul style="list-style-type: none"> • Besitzt zusätzlich eine Variable für eine ungedämpfte kinematische Wirbelviskosität, • Modul mit niedriger Reynoldszahl.
k-ε	<ul style="list-style-type: none"> • Löst nach zwei Variablen: <ul style="list-style-type: none"> ○ k – kinetische Turbulenzenergie, ○ ε – Dissipationsrate der kinetischen Turbulenzenergie, • Verwendung von Wandfunktionen, • gute Konvergenzrate und relativ geringer Speicherbedarf.
k-ω	<ul style="list-style-type: none"> • Ähnlich dem k-ε-Modul, • löst nach ω – der spezifischen Dissipationsrate der kinetischen Energie, • Modul für niedrige Reynoldszahlen, • schwieriger zu konvergieren als das k-ε-Modul.
Niedrige Reynoldszahl k-ε	<ul style="list-style-type: none"> • Ähnlich dem k-ε-Modul, benötigt jedoch keine Wandfunktion, • benötigt ein dichteres Netz.
SST	<ul style="list-style-type: none"> • Kombiniertes Modul zwischen k-ε im Freistrombereich und k-ω in Wandnähe, • Modul mit niedriger Reynoldszahl.
v2-f	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibt die Anisotropie der Turbulenzintensität in der turbulenten Grenzschicht, • Verwendung von zwei neuen Gleichungen, • Die erste Gleichung beschreibt den Transport turbulenter Geschwindigkeitsschwankungen senkrecht zu den Stromlinien; • Die zweite Gleichung berücksichtigt nicht lokale Effekte, wie die wandinduzierte Dämpfung der Umverteilung der kinetischen Turbulenzenergie zwischen der normalen und der parallelen Richtung.

Zur Simulation der thermo- und fluiddynamischen Prozesse in einer Kaverne wurde das k-ε-Modul gewählt, da dies eine sehr gute Konvergenzrate bei relativ geringem Speicherbedarf aufweist. Die Bereiche in der Nähe der Wände sind im Vergleich zum Gesamtvolumen der Kaverne sehr klein, wofür die Wandfunktion genutzt.

6.8.5 Mathematische Beschreibung des Turbulenzmoduls

Wenn es darum geht, die Geschwindigkeits- und Druckfelder innerhalb des zu analysierenden Systems zu beschreiben, gibt es viele Gleichungen, die geeignet sein könnten. Bei der numerischen Simulation von Strömungs- und Temperaturfelder ist es wichtig, dass die Randbedingungen und die Fragen des Modellaufbaus geklärt werden. Einige Fragen hierbei können beispielsweise sein, ob es sich um natürliche oder erzwungene Konvektion handelt, ob die Strömung kompressibel oder inkompressibel ist, oder ob es sich um eine isotherme oder eine nicht isotherme Strömung handelt (Carasi, 2016). Im folgenden Kapitel werden diese Fragen geklärt und es wird eine mathematische Beschreibung des Moduls vorgenommen, welches in Kapitel 6.8.4 zur Simulation der Kaverne ausgewählt wurde.

Im Allgemeinen sind die verschiedenen Eigenschaften von Fluiden nicht konstant und können von einer Reihe von Größen abhängen. Ob solche Abhängigkeiten in den jeweiligen Modellierungsprozessen berücksichtigt werden müssen, hängt vom Anwendungsfall ab bzw. liegt im Ermessen des Modellierers.

Art der Kompressibilität

Der erste Schritt besteht darin, die Art der Strömung, die modelliert werden soll, anhand der Fluidichte zu charakterisieren. Alle Flüssigkeiten sind kompressibel, das bedeutet, dass ihre Dichte vom absoluten Druck und der Temperatur abhängt, welche durch eine thermodynamische Beziehung miteinander verknüpft sind ($\rho = \rho(p, T)$). In einigen Fällen können, je nach Anwendungsfall, die Fluide so beschrieben werden, dass sie eine Dichte haben, welche nur von der Änderung der Temperatur abhängig ist ($\rho = \rho(T)$) (Carasi, 2016). COMSOL bietet innerhalb des Einphasenströmungs-Moduls drei verschiedene Möglichkeiten für die Impuls- und Massenerhaltungsgleichung an: kompressible Strömung ($Ma < 0,3$), schwach kompressible Strömungen und inkompressible Strömungen.

Die Mach-Zahl (Ma) beschreibt das Verhältnis von Geschwindigkeit eines Fluides oder Festkörpers zu der Schallgeschwindigkeit des umgebenden Fluides und wird über Formel 21 berechnet (Kümmel, 2007, S. 160). Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Kaverne erhält man in jedem Fall – sowohl für Erdgas, als auch für Wasserstoff – eine Mach-Zahl von unter 0,3 und somit befindet man sich damit im kompressiblen Bereich.

$$Ma = \frac{u}{c} = \frac{u}{\sqrt{\kappa * \frac{R}{M} * T}} \quad \text{Formel 21}$$

Ma	Mach-Zahl [-]
u	Geschwindigkeit [m/s]
c	Schallgeschwindigkeit [m/s]
κ	Isotropenexponent [-]
R	universelle Gaskonstante [J/mol*K]
M	Molare Masse [kg/mol]
T	Temperatur [K]

Isotherme und nicht isotherme Strömung

Isotherme Strömungssimulationen gehen davon aus, dass ρ , κ , μ und C_p nicht temperaturabhängig sind. Wenn die Eigenschaften als Funktion von T definiert sind, werden diese bei einem angegebenen Referenzwert berechnet.

Im Gegensatz dazu sind bei nicht isothermen Strömungen Parameter wie ρ , κ , μ und C_p abhängig von Druck und Temperatur. Nicht isotherme Strömungssimulationen beziehen sich typischerweise auf Kühl- und Heizanwendungen, nämlich die Wärmeübertragung. Weitere Anwendungsfälle sind Systeme, welche durch natürliche, erzwungene oder gemischte Konvektion gesteuert werden.

Tabelle 51 fasst die verfügbaren Kompressibilitäts- und Strömungsoptionen zusammen, welche in COMSOL verfügbar sind.

Tabelle 51: Zusammenfassung der Kompressibilitäts- und Strömungsoptionen (Carasi, 2016)

Art der Kompressibilität	Isotherme Strömung	Nicht isotherme Strömung
Kompressible Strömung (Ma < 0,3)	Nicht zu vernachlässigende Dichteänderungen	Nicht zu vernachlässigende Dichteänderungen, Gas in geschlossenen Hohlräumen
Schwach kompressible Strömung	Dichte ist zusätzlich zum Druck von einer weiteren Variable abhängig	Gilt häufig für in offenen Systemen strömendes Gas oder Luft
Inkompressible Strömung	Konstante Dichte	Boussinesq-Annäherung

Mathematische Beschreibung des k-ε-Moduls

Wie in Kapitel 6.8.4 beschrieben, wurde zur Simulation des thermodynamischen Verhaltens in der Kaverne und der damit verbundenen freien Konvektion das k-ε-Modul gewählt. Des Weiteren handelt es sich hierbei um eine kompressible Strömung, da die Mach-Zahl deutlich kleiner als 0,3 ist. Der Wärmetransport zwischen den Fluiden und zwischen Fluid und dem umgebenden Salzgestein wird in diesem Modell berücksichtigt, weshalb zusätzlich das Modul für eine nicht isotherme Strömung genutzt wurde.

Die Berechnung der Strömung in COMSOL erfolgt über die Navier-Stokes-Gleichung (Formel 22). Über Term 1 werden die Trägheitskräfte, über Term 2 die Druck- und Zähigkeitskräfte und über Term 3 die äußeren Kräfte, welche auf das Fluid wirken, berechnet:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} * \nabla)\mathbf{u} = \nabla * \left[-p\mathbf{l} + (\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u})\mathbf{l} - \frac{2}{3}\rho k\mathbf{l} \right] + \mathbf{F} + \rho\mathbf{g} \quad \text{Formel 22}$$

1 = 2 + 3

ρ	Fluiddichte [kg/m ³]
\mathbf{u}	Fluidgeschwindigkeit [m/s]
p	Fluiddruck [Pa]
\mathbf{l}	Längenskala [m]
μ	dynamische Viskosität [kg/m*s]
μ_T	turbulente dynamische Viskosität [kg/m*s]
k	turbulente kinetische Energie [m ² /s ²]
T	Temperatur [K]
\mathbf{F}	Volumenkraft [N/m ³]
\mathbf{g}	Erdbeschleunigung [m/s ²]

Formel 23 zeigt die Kontinuitätsgleichung für die inkompressible Strömung bei Mach-Zahlen kleiner als 0,3. Diese Gleichung besagt, dass die Divergenz und die Streckungsrate des Volumens überall Null sind.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla * (\rho\mathbf{u}) = 0 \quad \text{Formel 23}$$

Über Formel 24 wird die turbulente kinetische Energie berechnet:

$$\rho(\mathbf{u} * \nabla)\mathbf{k} = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla\mathbf{k} \right] + P_k - \rho\varepsilon \quad \text{Formel 24}$$

ρ	Fluiddichte [kg/m ³]
\mathbf{u}	Fluidgeschwindigkeit [m/s]
k	turbulente kinetische Energie [m ² /s ²]
\mathbf{l}	Längenskala [m]
μ	dynamische Viskosität [kg/m*s]
μ_T	turbulente dynamische Viskosität [kg/m*s]
σ_k	konstanter Modellparameter [-]
ε	turbulente Dissipationsrate [m ² /s ²]

Formel 25 beschreibt die Gleichung für die Dissipationsrate. Die Dissipationsrate bedeutet so viel wie „Zerstreuung“ und gibt beispielsweise an, wie viel Energie durch in einer Strömung herrschenden Reibung in thermische Energie übergeht.

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} * \nabla) \varepsilon = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_c} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{c1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{c2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad \varepsilon = \varepsilon_p \quad \text{Formel 25}$$

ρ	Fluiddichte [kg/m ³]
\mathbf{u}	Fluidgeschwindigkeit [m/s]
ε	turbulente Dissipationsrate [m ² /s ²]
μ	dynamische Viskosität [kg/m*s]
μ_T	turbulente dynamische Viskosität [kg/m*s]
k	turbulente kinetische Energie [m ² /s ²]
C_{c1}, C_{c2}, σ_c	Konstanter Turbulenzmodellparameter [-]

Die nachfolgende Formel 26 zeigt die Berechnung der turbulenten dynamischen Viskosität:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Formel 26}$$

μ_t	turbulente dynamische Viskosität [kg/m*s]
ρ	Fluiddichte [kg/m ³]
C_μ	konstanter Turbulenzmodellparameter [-]
k	turbulente kinetische Energie [m ² /s ²]
ε	turbulente Dissipationsrate [m ² /s ²]

Abbildung 159 zeigt die beispielhafte Kopplung des Strömungs- und Wärmetransports-Modules mittels der Stoffeigenschaften des Fluides, wie Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, dynamische Viskosität und deren Kopplung über das Geschwindigkeitsfeld.

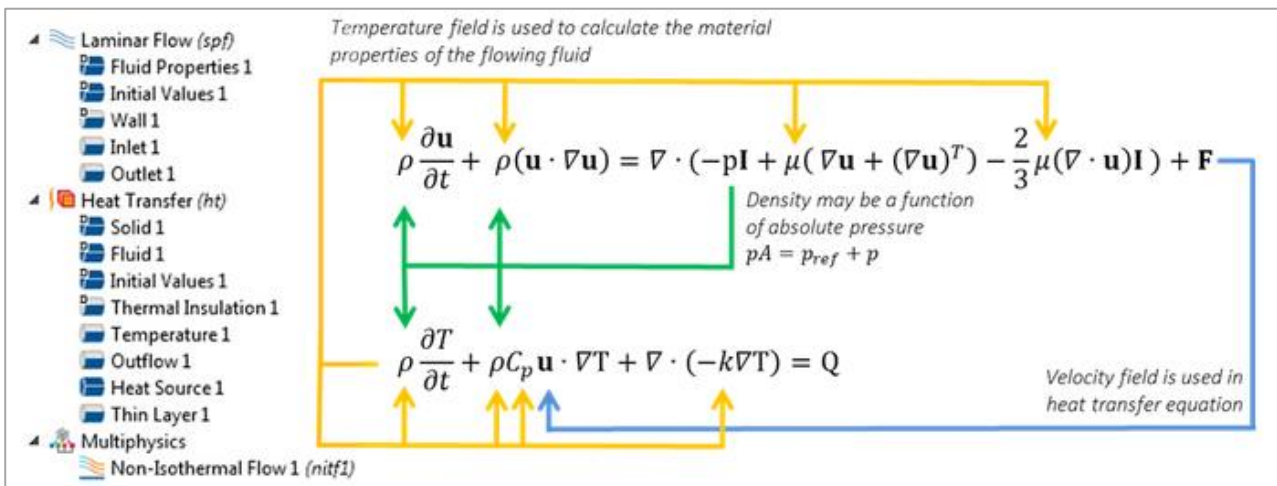


Abbildung 159: Beispiel für die Kopplung des Strömungs- und des Wärmetransport Moduls (Carasi, 2016)

6.9 Simulation der Medienumstellung

In diesem Kapitel wird die Umstellung einer Kaverne von Erdgas auf Wasserstoff in Abhängigkeit von Parametern wie Druck, Eintrittsgeschwindigkeit und der Temperatur variantenmäßig untersucht, um eine optimale Umstellungsstrategie zu entwickeln. Die einzelnen Varianten sind in Tabelle 52 dargestellt.

6.9.1 Umstellungsstrategien

Für die geplante Umstellung von Erdgaskavernen auf Wasserstoff ist der Umstellungsprozess bzw. der Gasvermischungsvorgang zwischen Erdgas und Wasserstoff in der Kaverne durch Simulationen variantenmäßig zu untersuchen. Generell wird angestrebt, mit einem einmaligen Ausspeichern von Erdgas und der anschließenden Injektion von Wasserstoff bis zum maximalen zulässigen Druck, die optimale Gasqualität zu erreichen. Zur Umstellung der Erdgaskavernen auf Wasserstoff gibt es verschiedene Überlegungen, um die Entwicklung der Mischgasqualität zu optimieren (siehe Kapitel 6.3.2).

Folgende Aussagen werden bei der Umstellung besonders betrachtet:

- Ermittlung der optimalen Druckabsenkung,
- Ausbreitung der Mischgaszonen und Konzentrationsverteilung,
- Mindestdauer der Ruhephasen,
- Mischgasqualität im Ausspeichergas.

Der generelle Modellaufbau und die zugrunde gelegten Eigenschaften der Typkaverne Simulation wurden in Kapitel 6.8.1 beschrieben. Um die Erkenntnisse aus den Simulationen auf anderen Kavernen zu übertragen, wird von einer idealisierten Kaverne ausgegangen. Vor der Realisierung sollte jedoch das Modell immer auf die exakte Kavernengeometrie angepasst werden.

Zur Optimierung der Mischgasqualität werden in Tabelle 52 folgende Varianten zur Speicherumstellung betrachtet:

Tabelle 52: *Simulationsmatrix mit den jeweiligen Anfangsbedingungen*

Variante	Gegenstand der Untersuchung	Einströmgeschwindigkeit [m/s]	Druck [bar]	Temperatur [K]	
				CH ₄	H ₂
1 ¹⁾	Einfluss der Einströmgeschwindigkeit	10	30	T _{Geograd}	285,15
2		20	30	T _{Geograd}	285,15
3	Einfluss des Anfangsdrucks	10	20	T _{Geograd}	285,15
4 (1)		10	30	T _{Geograd}	285,15
5		10	85	T _{Geograd}	285,15
6 (1)	Einfluss des Temperaturverhältnisses	10	30	T _{Geograd}	285,15
7		10	30	280,15	303,15
8	Simulation der Ruhephase basierend auf den Ergebnissen aus Variante 1				
9	Simulation der Ausspeicherphase basierend auf den Ergebnissen aus Variante 8				
1) Basisvariante; (1) entspricht der Basisvariante					

6.9.2 Simulation der Injektionsphase für unterschiedliche Randbedingungen

Während der Injektionsphase wird die Vermischung von Wasserstoff und Erdgas anhand der Einströmgeschwindigkeit, den Temperaturverhältnissen und dem Anfangsdruck untersucht.

Untersuchung des Einflusses der Eintrittsgeschwindigkeit

Variante 1 bis 7

Im folgenden Abschnitt werden die Injektionsvarianten 1 bis 7 zusammengefasst, da diese alle das gleiche Ergebnis haben. In den Simulationen mit unterschiedlichem Anfangsdruck der Kaverne (Variante 3 und 5) ist die Teufenlage der Hauptvermischungszone eine andere, die Mächtigkeit dieser unterscheidet sich jedoch nicht.

Abbildung 160 zeigt für die Variante 1 die Verteilung des Volumenanteils von Wasserstoff beim Erreichen des maximalen Arbeitsdruck von 140 bar. Auffallend ist, dass es unter den vorliegenden Bedingungen zu einer Schichtung der beiden Gase, aufgrund des hohen Dichteunterschiedes kommt ($\rho_{\text{Erdgas}} = 72,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\rho_{\text{H}_2} = 9,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bei einem Druck von 140 bar und einer Temperatur von 370 K). Im oberen Bereich der Kaverne befindet sich nahezu reiner Wasserstoff, rot dargestellt. Unterhalb der

Übergangszone befindet sich nahezu reines Erdgas, blau dargestellt. Lediglich im Teufenbereich zwischen 1.032,2 und 1.045,4 m kommt es zur Ausbildung einer Hauptvermischungszone (Abbildung 161). Die Vermischungszone wird definiert als Übergang von einer Konzentration von 98 Vol.-% Wasserstoff zu 98 Vol.-% Erdgas. Die Reinheit an Wasserstoff im oberen Bereich der Kaverne beträgt 99,86 %. Aufgrund des Impulsstroms kommt es zu einer teilweisen Vermischung der Gase. Durch den großen Dichteunterschied der Gase und der abnehmenden Reichweite des Injektionsstrahls mit zunehmendem Druck wird eine weitere Vermischung der Gase verhindert.

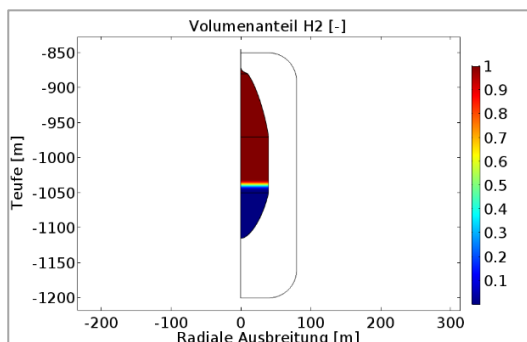


Abbildung 160: Variante 1 – Verteilung des Volumenanteils nach der Injektion bei einem Druck von 140 bar

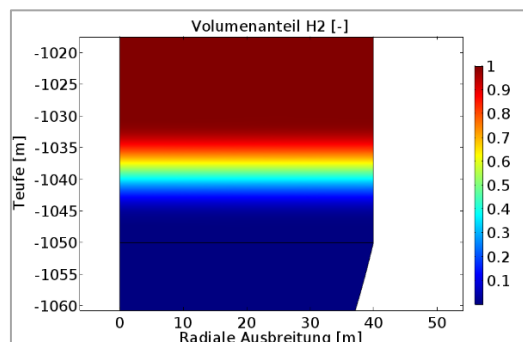


Abbildung 161: Variante 1 – Übergangs- bzw. Vermischungszone beim maximalen Arbeitsdruck von 140 bar

Interessant hierbei ist, dass es selbst bei der maximalen Injektionsrate mit einer Einströmgeschwindigkeit von 20 m/s zu einer Schichtung der Gase kommt.

Bei dieser Umstellungsvariante ist zu beachten, dass hierbei die maximale Druckänderungsgeschwindigkeit der Kaverne (10 bar/d) deutlich überschritten wird. Aus diesem Grund sollte diese Umstellungsvariante nicht umgesetzt werden. Unter dem Gesichtspunkt der Vermischung ist dies jedoch sehr interessant, weil es zeigt, dass es selbst unter sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten nur zur Ausbildung einer kleinen Vermischungszone kommt.

Abbildung 162 zeigt die Strömungsgeschwindigkeit der Variante 2 beim Eintritt von Wasserstoff in die Kaverne. Auffallend ist dabei, dass diese sehr schnell von 20 m/s auf maximal 2 m/s abfällt und zu diesem Zeitpunkt eine maximale radiale Ausbreitung von 12–13 m aufweist. Im oberen Teil der Kaverne kommt es zu einer Verwirbelung entgegen dem Uhrzeigersinn. Außerhalb dieser Verwirbelung treten nur noch sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten auf ($> 0,004$ m/s). Abbildung 163 zeigt zum exakt selben Zeitpunkt wie Abbildung 162 das Verhalten der Grenzschicht zwischen Erdgas und Wasserstoff und das Geschwindigkeitsfeld. Eine Vermischung zwischen Erdgas und Wasserstoff gibt es nur in sehr geringem Maße. Zudem lässt sich erkennen, dass sich schon sehr schnell nach dem Start eine stabile Schichtung aufgrund des großen Dichteunterschieds ergibt. Damit bleibt die Konvektionsströmung nur im Wasserstoff. Die Diffusion reicht nicht aus, um eine stärkere Vermischung zu erreichen, weshalb nur geringe Mengen an Erdgas aus der Mischzone mitgerissen werden und sich in den Wasserstoff verteilen

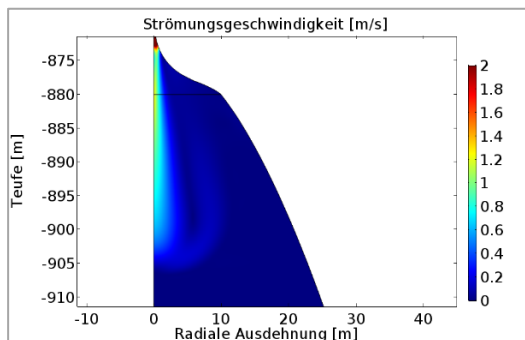


Abbildung 162: Variante 2 – Entwicklung der Strömung beim Eintritt von Wasserstoff in die Kaverne bei einer Einströmgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Druck von 34 bar

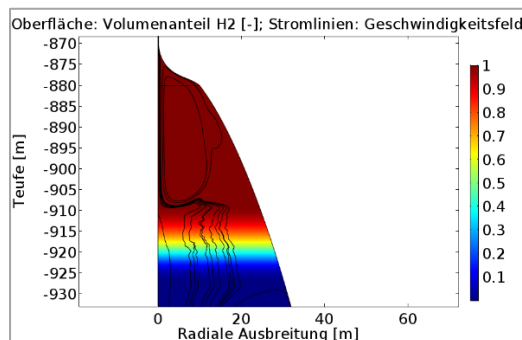


Abbildung 163: Variante 2 – Strömungsverhältnisse und Verhalten der Übergangszone bei der Injektion von Wasserstoff und einer Einströmgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Druck von 34 bar

In Abbildung 164 ist die Ausbildung von Verwirbelungen, aufgrund des Impulsstroms, zu sehen. Im oberen Bereich, in welchem sich Wasserstoff befindet (rot), bildet sich aufgrund des einströmenden Impulsstroms eine Verwirbelung mit Geschwindigkeiten zwischen 0,1 und 0,9 m/s mit aufsteigendem Gas in Wandnähe. Im Bereich des Erdgases gibt es aufgrund der Konvektion eine Verwirbelung in Richtung des Uhrzeigersinns. Die Strömungsgeschwindigkeit unterhalb der Vermischungszone beträgt zwischen 0,002 und 0,008 m/s.

Über die Vermischungszone hinaus gibt es nur einen sehr geringen Austausch zwischen Erdgas und Wasserstoff. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Vermischungszone liegt bei ungefähr 0,002 m/s.

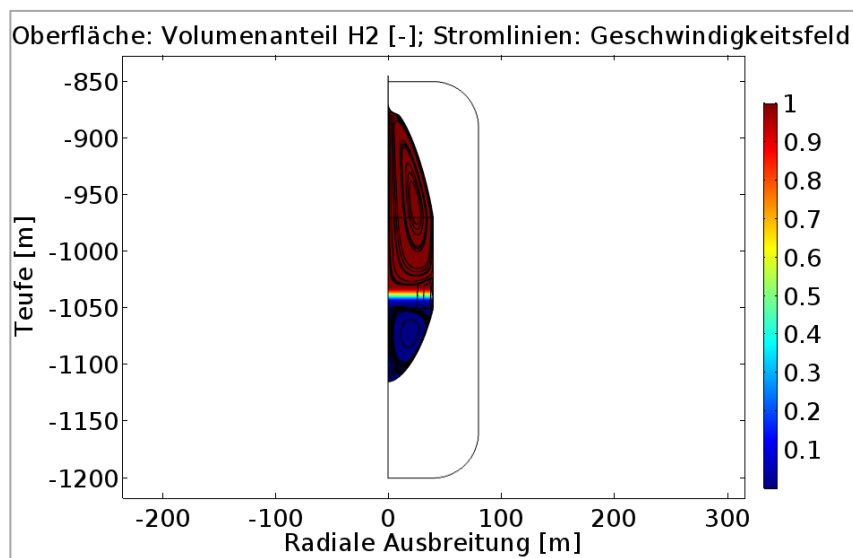


Abbildung 164: Variante 2 – Strömungsverhältnisse und Verhalten der Übergangszone beim Erreichen des maximalen Arbeitsdrucks von 140 bar und einer Einströmgeschwindigkeit von 20 m/s

6.9.3 Simulation der Ruhephase

Variante 8

Basierend auf den Ergebnissen der Einspeisephase der Basisvariante 1 wurde die anschließende Ruhephase simuliert. Angestrebt wurde eine Simulationsdauer von mindestens einem halben Jahr, um eine etwaige Konvektion und Diffusion korrekt abbilden zu können.

Aufgrund der langen Rechenzeit konnte eine Simulationsdauer von nur 7 Tagen simuliert werden. Für diese 7 Tage Simulationszeit wurden 72 Tage Rechenzeit benötigt, aus welchem Grund auch von einer noch längeren Simulationszeit abgesehen wurde.

Während der Ruhephase kommt es zu keiner Veränderung innerhalb und außerhalb der Vermischungszone. Das bedeutet, dass die Vermischungszone in Teufe und Mächtigkeit sich nicht ändert. Gleiches kann man über die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten sagen. Diese bleiben über den Untersuchungszeitraum nahezu gleich. Abbildung 165 zeigt den Volumenanteil von Wasserstoff über die komplette Teufe der Kaverne. In einer Teufenlage zwischen 1.032 und 1.045 m kann man deutlich die Vermischungszone erkennen. Oberhalb dieser beträgt der Volumenanteil an Wasserstoff 99,86 Vol.-% und unterhalb dieser liegt der Volumenanteil bei 10^{-3} Vol.-%.

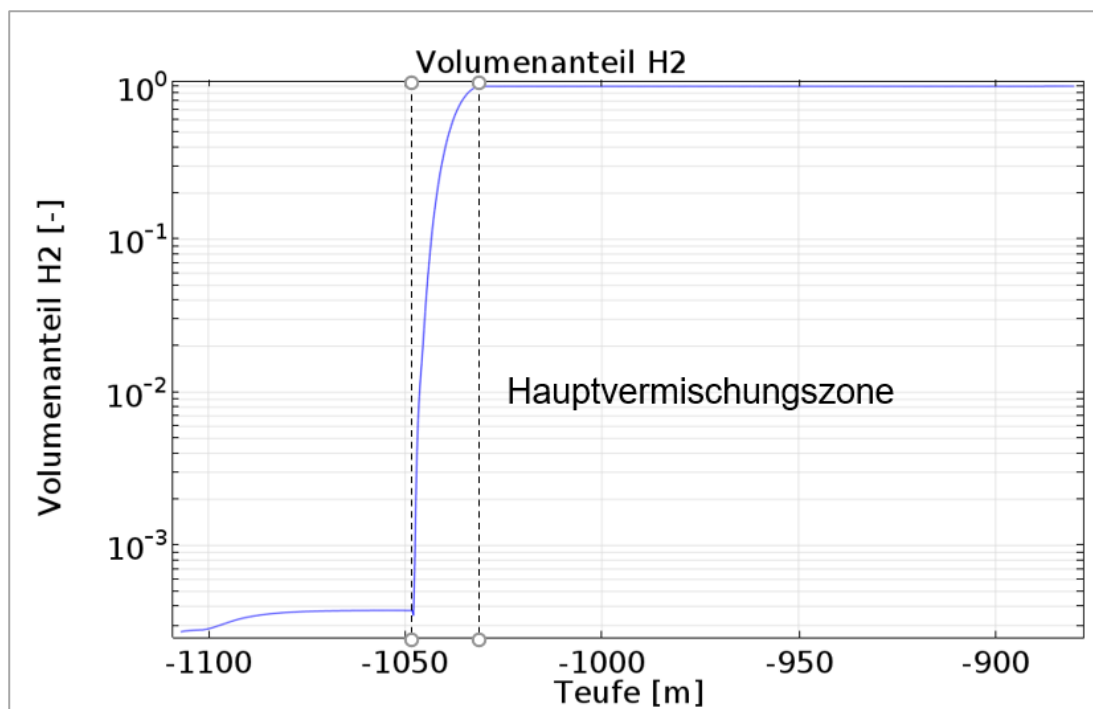


Abbildung 165: Variante 8 – Vermischungszone als Log-Diagramm

Abbildung 166 zeigt den H₂-Gehalt von der Vermischungszone bis zum Kavernenhals. Die Reinheit bzw. der Volumenanteil liegt hierbei bei ungefähr 99,86 Vol.-%. Das bedeutet, dass es während des erstmaligen Einspeicherns von Wasserstoff zu einer geringfügigen Vermischung von Kissengas und Wasserstoff kommt. D. h., es gibt ein Mindestgehalt von Kissengas im Wasserstoff, der sich in der Ruhephase kaum verändert. Es ist zu erwarten, dass sich das Einmischen von Kissengas bei vollständigen Folgezyklen verstärkt.

Für eine direkte Nutzung des ausgespeicherten Wasserstoffs müsste die Reinheit im Ausspeichergas bei mindestens 99,96 Vol.-% liegen (Abbildung 166). Wenn für die Umstellung einer Erdgaskaverne auf Wasserstoff diese Umstellungsvariante gewählt wird, gelten besondere Anforderungen an die Gasreinigung/-aufbereitung. Diese muss in der Lage sein, ein Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff zu trennen und aufzubereiten, um die volle Speicherbarkeit der Kaverne zu nutzen.

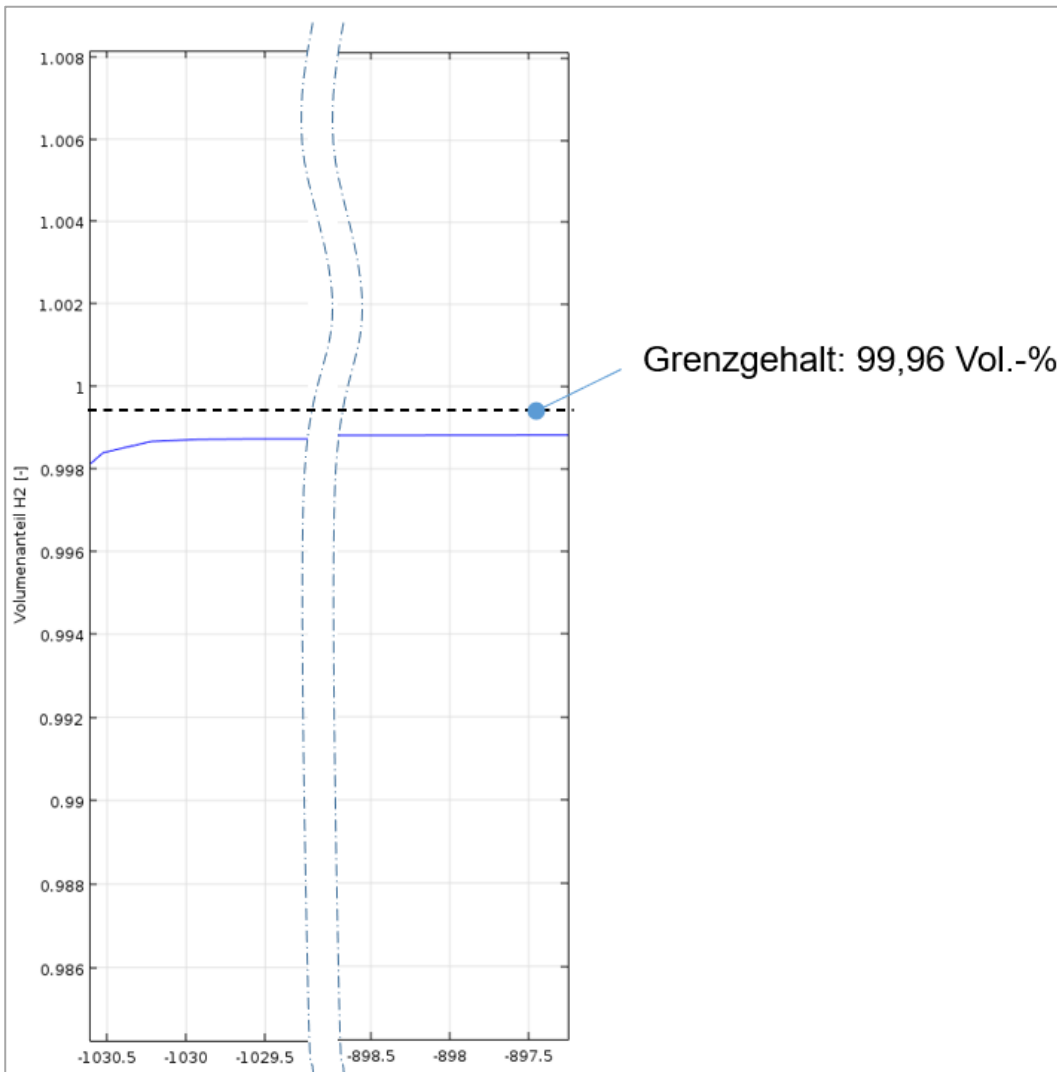


Abbildung 166: Variante 8 – Darstellung des Wasserstoffgehaltes oberhalb der Vermischungzone im Detail

Aufgrund der unzureichenden Simulationszeit von 7 Tagen wurde ein Plausibilitätscheck und Langzeituntersuchungen auf Basis eines neuen, vereinfachten analytischen Modells durchgeführt. Mittels dieses Modells soll eine etwaige Vermischung aufgrund von Diffusion untersucht werden, was der Hauptparameter für eine Vermischung ist. Eine Vermischung aufgrund von Konvektion, verursacht durch Dichte und Temperaturunterschiede, wird ausgeschlossen, da der Dichteunterschied zwischen Erdgas und Wasserstoff zu groß ist.

Für das analytische Modell wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- reine Diffusion,
- keine Konvektion aufgrund von Temperatur- und Dichteunterschiede,
- konstanter Druck und Temperatur.

Die Diffusion wurde mittels Formel 27 nach (Tautz, 1971) berechnet:

$$\zeta(t) = \frac{\zeta_A}{2} \left[\operatorname{erf} \frac{L-x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \left(\frac{L+x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

Formel 27

$\zeta(t)$ – Konzentration zur Zeit t für $x \geq 0$

ζ_A – Anfangskonzentration für $t = 0$ und $0 \leq x \leq L$

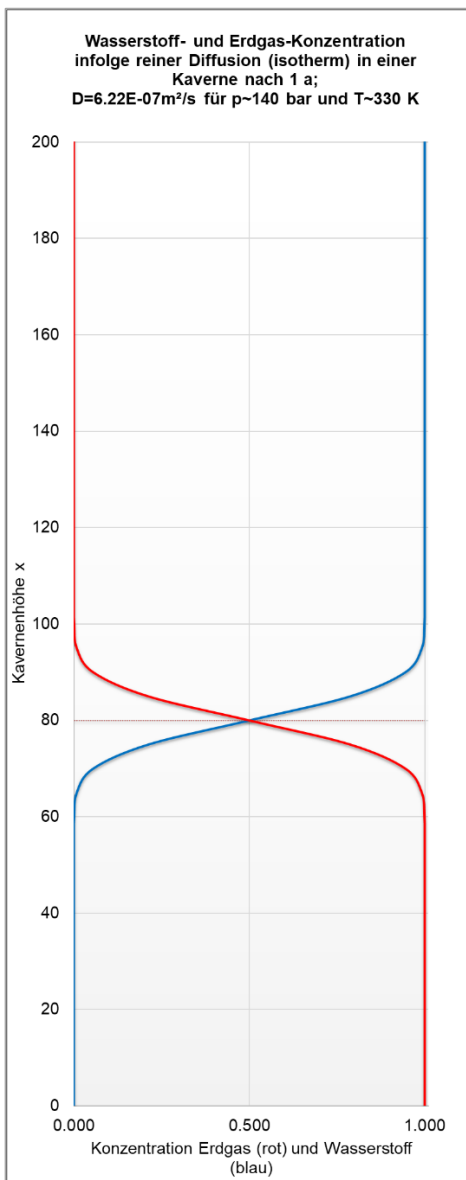


Abbildung 167: Variante 8 – Ergebnis der analytischen Berechnung (1 Jahr)

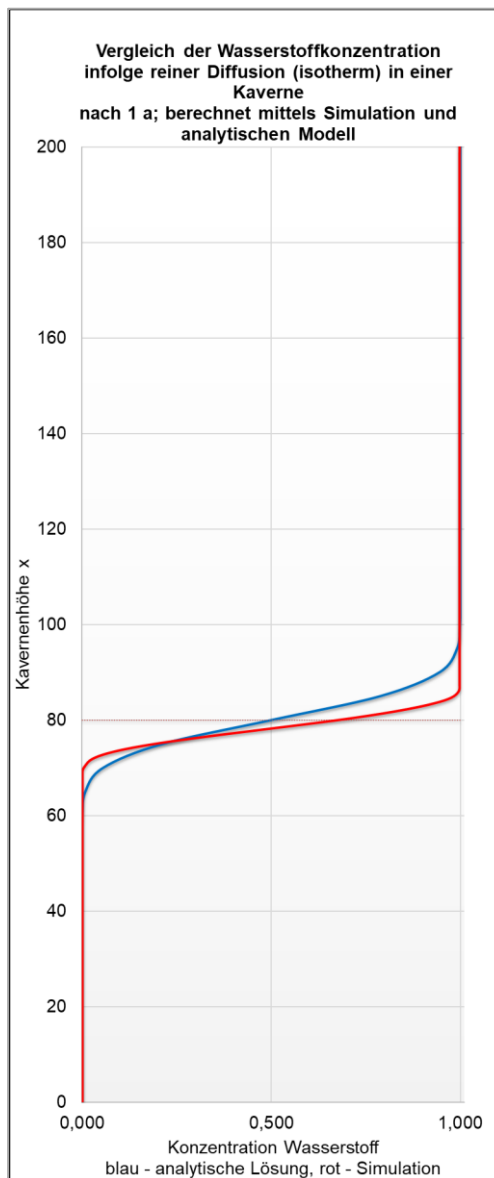


Abbildung 168: Variante 8 – Vergleich der analytischen Lösung nach einem Jahr zur numerischen Simulation (7 Tage)

Abbildung 167 zeigt die Diffusion zwischen Erdgas und Wasserstoff, welche mittels des analytischen Modells berechnet wurde, zeigt die Entwicklung der Vermischungszone zwischen Erdgas und Wasserstoff nach einer Standzeit der Kaverne von einem Jahr. Wie man sehr deutlich sehen kann, kommt es in diesem Fall zu einer Ausbreitung der Vermischungszone aufgrund von Diffusion. Je länger die Standzeit desto größer wird auch die Vermischungszone (80 m nach einer Standzeit von 10 Jahren).

Abbildung 168 zeigt den Vergleich zwischen dem Ergebnis des analytischen Modells und der Simulation. Wie man deutlich sehen kann, stimmen die Ergebnisse sehr gut überein und es kommt in beiden der Fälle zu einer Schichtung der Gase. Die Vermischungszonen liegen hinsichtlich Teufe und

Mächtigkeit auch sehr gut übereinander. Leichte Abweichungen gibt es hierbei natürlich, da das Simulationsmodell auch Parameter wie Dichte- und Temperaturunterschiede berücksichtigt und für das analytische und Simulationsmodell verschiedene Randbedingungen zu Grunde liegen.

6.9.4 Simulation der Ausspeicherphase

Variante 9

Auf Basis der in Kapitel 6.9.3 vorgestellten Ruhephase wurde anschließend die Ausspeicherphase simuliert. Basis ist hierbei eine vorausgehende Ruhephase von 7 Tagen. Die Ausströmgeschwindigkeit beträgt in diesem Fall 10 m/s, sodass die maximale Druckänderungsgeschwindigkeit der Kaverne von 10 bar/d eingehalten wird.

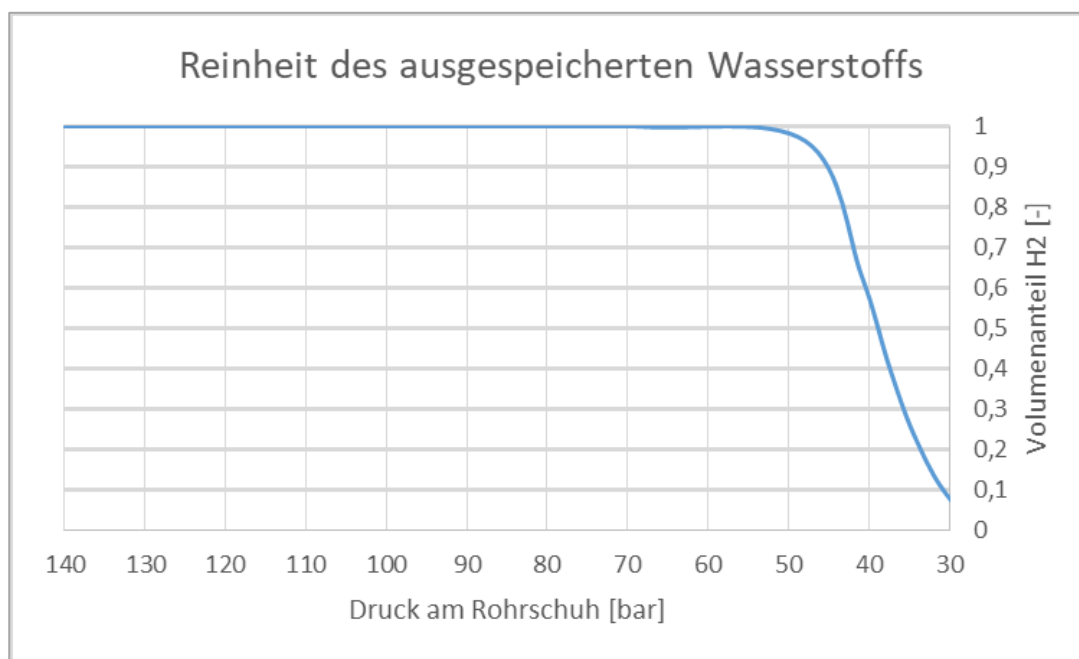


Abbildung 169: Variante 9 – Reinheit des ausgespeicherten Wasserstoffs bei der Ausspeicherung vom maximalen zum minimalen Arbeitsdruck

Abbildung 169 zeigt den Verlauf der Reinheit des ausgespeicherten Wasserstoffs. Wie deutlich zu erkennen ist, kommt es unterhalb von einem Druck von 54 bar zu einem Anstieg des Erdgasgehalts im Wasserstoff, was bedeutet, dass ein Teil des Kissengases mitgefördert wird. Der Erdgasgehalt nimmt bis zum Erreichen des minimalen Arbeitsdrucks immer weiter zu. Sind hohe Reinheitsanforderungen gegeben bzw. soll die volle Speicherkapazität der Kaverne genutzt werden, sind zusätzliche Abscheidemaßnahmen für mitgefördertes Erdgas erforderlich.

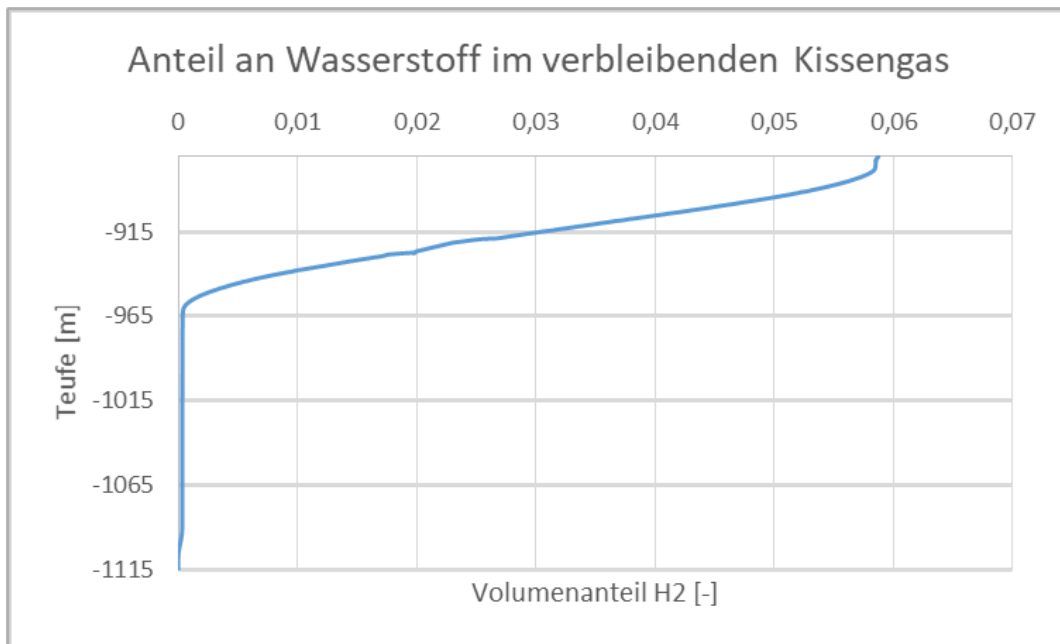


Abbildung 170: Variante 9 – Volumenanteil an Wasserstoff im verbleibenden Kissengas bei Erreichen des minimalen Arbeitsdrucks nach dem erstmaligen Ausspeichern von Wasserstoff

Abbildung 170 zeigt den Anteil an Wasserstoff im verbliebenen Kissengas. Es ist zu sehen, dass sich im oberen Teil der Kaverne ein H₂-Anteil von rund 5,8 Vol.-% befindet. Demnach ist zu erwarten, dass sich das Einmischen von Kissengas bei Folgezyklen (bei vollständiger Entleerung) verstärkt. Dies führt zu einem ansteigenden Anteil an Wasserstoff im Kissengas, was wiederum dazu führt, dass das Erdgas nach einer Vielzahl von Zyklen fast vollständig durch Wasserstoff ersetzt ist, was aber deutlich nach der Lebensdauer einer Kaverne (50 Jahre) liegen kann.

6.9.5 Prognose der zu erwartenden Gasqualitäten

Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass es bei allen untersuchten Einspeisevarianten zu einer Schichtung der Gase kommt. Die beim maximalem Speicherdruck und während der erstmaligen Injektion von Wasserstoff in eine mit Erdgas gefüllte Kaverne entstehende Vermischungszone ist rund 13 m mächtig. Während der Ruhephase bleibt diese Zone bestehen und es kommt zu keinen Veränderungen in allen Bereichen der Kaverne.

Bei der Produktion kommt es zu einer Mitförderung von Erdgas aus dem Kissengas. Dadurch kommt es zu einer Verunreinigung des Wasserstoffs, wodurch besondere Anforderung an die Gasaufbereitung gestellt werden müssen.

Mit fortschreitenden Ein- und Ausspeicherzyklen ist damit zu rechnen, dass der Anteil von Wasserstoff im Kissengas immer weiter zunimmt.

6.9.6 Zusammenfassung

Einfluss von Druck, Temperatur und der Eintrittsgeschwindigkeit während der Einspeicherphase

Die Vermischung von Erdgas und Wasserstoff bei der Injektion von Wasserstoff in eine mit Erdgas gefüllte Kaverne wurde anhand verschiedener Randbedingungen untersucht. Die gewählten Einflussgrößen waren der Anfangsdruck der Kaverne, die Temperatur der Gase und die Eintrittsgeschwindigkeit des Wasserstoffs. Untersucht wurde die Vermischung oder Schichtung der beiden Gase in Abhängigkeit der Eingangsgrößen. Für alle Varianten konnte ein ähnliches Verhalten der Gasvermischung in der Kaverne festgestellt werden. In jedem dieser Fälle kam es zu einer Ausbildung einer kleinen Hauptmischzone. Durch das Strömungsprofil im Bereich des Wasserstoffs kommt es zur Einmischung eines – wenn auch geringen – Teils des Kissengases. Die Restkonzentration des Kissengases führt dazu, dass die Zielkonzentration für den ausgespeisten Wasserstoff nicht für die gesamte gespeicherte H₂-Menge eingehalten werden kann. Dieses Verhalten zeigt, dass es möglich ist, dass in der Kaverne befindliche Erdgas als Kissengas zu nutzen. Das Erdgas würde eine Barriere zwischen dem Sumpf und dem Wasserstoff darstellen, was eine Wechselwirkung zwischen diesen unterbinden würde. Somit kann eine Schwefelwasserstoff-Bildung gehemmt werden.

Ruhephase

Basierend auf dem Ergebnis der Einspeisung der Basisvariante wurde die Standzeit der Kaverne simuliert. Durch eine sehr lange Rechenzeit der Simulation konnte nur eine Simulationszeit von 7 Tagen erreicht werden. Um eine etwaige Durchmischung aufgrund von Diffusion ausschließen zu können, wurde diese mittels eines analytischen Modells überprüft. Sowohl bei der Simulation als auch beim analytischen Modell kam es zu einer Vermischung und Schichtung der Gase.

Die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der einzelnen Bereiche der Kaverne blieben nahezu gleich. Jedoch kam es bereits während des erstmaligen Einspeicherns von Wasserstoff zu einer geringfügigen Vermischung von Kissengas und Wasserstoff.

Ausspeicherphase

Um festzustellen, welche Reinheit der Wasserstoff bei der Produktion aufweist, wurde die Ausspeicherphase, basierend auf dem Ergebnis der Ruhephase, simuliert. Die Ausströmgeschwindigkeit betrug 10 m/s, um die maximale Druckänderungsgeschwindigkeit der Kaverne nicht zu überschreiten.

Während der Förderung von Wasserstoff kommt es unterhalb von einem Druck von 54 bar zu einer teilweisen Förderung des Kissengases. Bei fortschreitender Förderung steigt der Anteil von Erdgas im Wasserstoff bis zu einem Anteil von 94,2 Vol.-%.

6.10 Berechnung der Bohrungsbelastung

Bei der Kavernenumstellung von Erdgas auf Wasserstoff ändert sich das thermodynamische Verhalten und somit auch die Belastungen in die Bohrung. Um die Belastung im Tubing zu untersuchen, ist es sinnvoll, thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Simulationen durchzuführen. Mit entsprechenden Modellen können die auftretenden Belastungen zuverlässig vorhergesagt werden. Analytische Modelle können dabei nur bedingt die variablen Randbedingungen des Systems Bohrung und Kaverne erfassen (Schulz, 2015).

Für die Spannungsberechnung wurde der triaxiale Spannungszustand eines Rohres gewählt. Hierbei werden die einzelnen Belastungen nicht mehr anhand von Drücken und Kräften berechnet, sondern mit Hilfe von Radial- (σ_r), Tangential- (σ_θ) und Axialspannung (σ_{ax}) ermittelt und kombiniert.

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_a r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{p_i - p_a}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_i r_a}{r} \right)^2 \quad \text{Formel 28}$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_i r_i^2 - p_a r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} + \frac{p_i - p_a}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_i r_a}{r} \right)^2 \quad \text{Formel 29}$$

Die Berechnungen wurden an unterschiedlichen Querschnitten entlang der Bohrung durchgeführt. Die Ermittlung der Spannungszustände, ausgehend vom Steigraum bis hin zum Ringraum und von der Casinginnenwand bis hin zum Gebirgsaußenradius, erfolgt getrennt voneinander. Dabei wird der Ringraum als neutrale Zone betrachtet über die Temperatur aber kein Druck übertragen werden kann. Der hydrostatische Ringraumdruck wirkt somit auf das Tubing als Außendruck und auf das System Casing/Zement/Gebirge als Innendruck.

Für das Berechnungsmodell wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Spannungsberechnung erfolgt anhand des triaxialen Spannungstensors unter Berücksichtigung von druck- und thermodynamischen Verhältnissen.
- Der Ringraum, welcher sich zwischen Tubing und Casing befindet, ist mathematisch schwer zu beschreiben, deswegen wird er als neutrale Zone angesehen. Über den Ringraum wird kein Druck vom Casing an das Tubing bzw. umgekehrt übertragen. Der Außendruck des Tubings bzw. Innendruck des Casings ist gleich dem hydrostatischen Druck des Ringraumfluids.
- Die Temperatur im Ringraum ist konstant. Somit ist die Außentemperatur des Tubings dieselbe wie die Innentemperatur des Casings.
- Axialspannungen (Vorspannung, Eigengewicht, Schleiflasten) werden berücksichtigt. Ballooning und Reverse Ballooning sowie deren Auswirkung auf die Axialspannung sind in der triaxialen Spannungsberechnung integriert.
- Biegungsspannungen und Knickkräfte innerhalb von Tubing und Casing werden nicht berücksichtigt.

Für eine komplette Integritätsbewertung müssen die am Packer wirkenden Kräfte separat ermittelt werden.

6.10.1 Modell für Spannungsberechnung im Tubing

Der Spannungszustand im Tubing wird maßgeblich von den druck- und thermodynamischen Spannungsänderungen während der Produktion oder Injektion eines Fluids geprägt. Die Ermittlung der Spannungen erfolgt über den Ansatz der linearen Elastizitätstheorie. Der Außen- und Innendruck ist dabei als isotrop zu betrachten, siehe Abbildung 171.

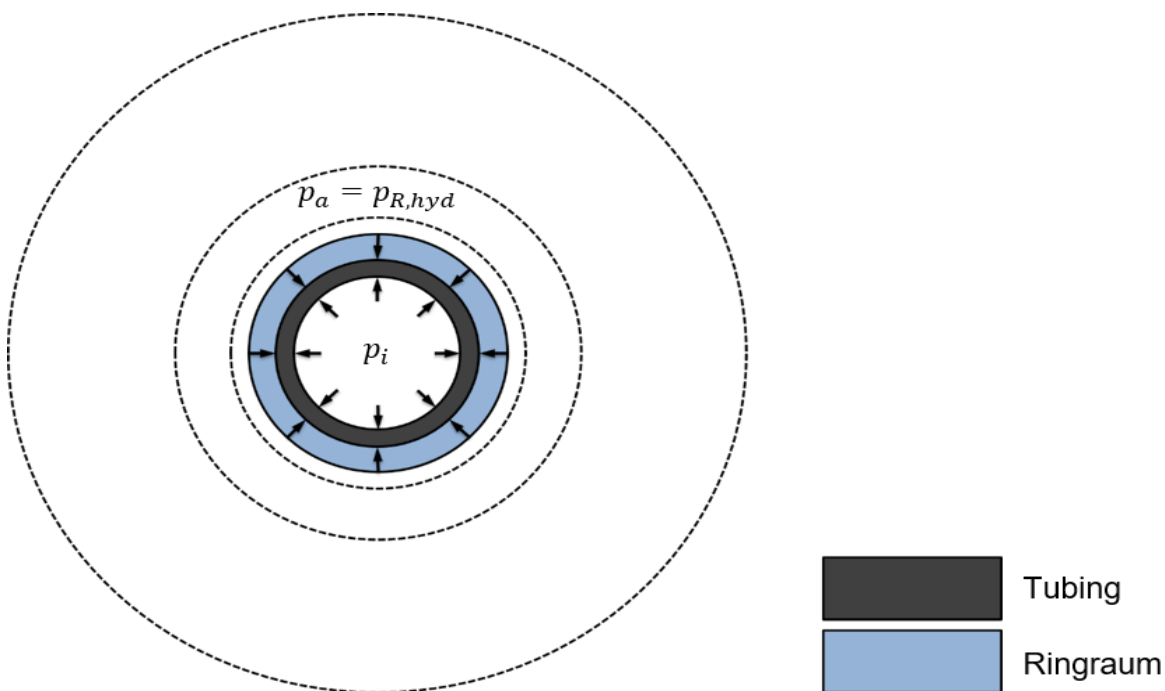


Abbildung 171: Druckbelastung Tubing

Die Spannungen des Tubings zwischen Bohrlochkopf und Packer werden mit Hilfe des ebenen Deformationszustands berechnet. Das Tubing ist in axialer Richtung durch Packer und Tubinghanger fest fixiert und kann demnach keine Längsdehnung oder -stauchung erfahren ($\varepsilon_{ax} = 0$). Somit tritt, wie von (Götzen, 1986) beschrieben, im Tubing eine zusätzliche Axialspannung (σ_{ax}) auf, welche sich aus der Summe von Radial- (σ_r) und Tangentialspannung (σ_θ) mit der thermischen Zusatzspannung ($\sigma_{th-u}/\sigma_{th-nu}$) und der Poissonzahl (ν) nach Formel 30 zusammensetzt.

$$\sigma_{ax,t} = \nu_t [\sigma_{r,t} + \sigma_{\theta,t}] + \alpha E_t \Delta T \quad \text{Formel 30}$$

Zur Berechnung der thermischen Spannungen im Tubing werden die Innen- und Außentemperatur des Tubings benötigt. Die Temperatur im Steigraum wird dabei durch die Eigenschaften des Gases in der Bohrung und dem jeweiligen Betriebszustand definiert. Die Gebirgstemperatur wird über den geothermischen Gradienten bestimmt. Der radiale Temperaturverlauf ausgehend vom Steigraum bis hin zur Gebirgstemperatur wird mit Hilfe der Gleichung für stationäre Wärmeleitung (Groß, 2011, S. 7-

8) ermittelt. Zu Beginn wird mit Formel 31 der Wärmestrom (\dot{Q}) über das Gesamtsystem (Tubing/Ringraum/Casing/Zement/Gebirge) berechnet:

$$\dot{Q} = 2\pi L(T_i - T_f) \sum_j \frac{\lambda_j}{\ln(d_{aj}/d_{ij})} \quad \text{Formel 31}$$

Die einzelnen Elemente (j) stehen für die ineinander geschichteten Rohre (Tubing/Ringraum/Casing/Zement/Gebirge). Dabei wird die Annahme getroffen, dass der Ringraum eine so hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt, dass angenommen werden kann, dass Tubingaußen- gleich Casinginnentemperatur ($T_{ta} - T_{ci}$) ist. Nach der Bestimmung des Wärmestroms können mit Hilfe der Wärmeleitwiderstände der einzelnen Elemente (j) die jeweiligen Randtemperaturen bestimmt werden (Formel 32).

$$R_{\lambda j} \dot{Q} = (T_{j,i} - T_{j,a}) \quad \text{Formel 32}$$

Un- und gleichmäßige Temperaturbelastung

Als gleichmäßige Temperaturspannung beschreibt (Haider, et al., 2012) die gleichmäßige Erwärmung bzw. Abkühlung ($T_i = T_a$) der Bohrlochkomplettierung bei der Förderung oder Injektion von Fluiden. Dabei werden die einzelnen Bestandteile (Tubing, Casing, Zement und Gebirge) um eine bestimmte Temperatur erwärmt oder abgekühlt. Das hat zur Folge, dass eine zusätzliche Spannung (Formel 33 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) induziert wird. Für die Berechnung wird das Elastizitätsmodul (E), der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient (α) und die Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen Anfangs- und Endzustand (momentane und initiale Temperatur) benötigt.

$$\sigma_{th-u} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \text{Formel 33}$$

Eine ungleichmäßige Temperaturspannung entsteht, wenn ein Temperaturunterschied innerhalb eines Rohres existiert ($T_i \neq T_a$). Diese Spannung ist maßgeblich von der Zeit abhängig. Mit zunehmender Dauer der Produktion oder Injektion gleichen sich die Innen- und Außentemperatur eines Rohres immer weiter an, damit nimmt die ungleichmäßige Temperaturbelastung ab und geht in die gleichmäßige Temperaturbelastung über, siehe Formel 34 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Für die Berechnung sind zu den Parametern der gleichmäßigen Temperaturspannung noch die Poissonzahl (ν) und die Radien (r_i/r_a) notwendig. Es ist zu beachten, dass zwischen der Temperaturdifferenz am Rohrinternen und -äußeren unterschieden werden muss. Die folgenden Formeln zur Berechnung der ungleichmäßigen Temperaturspannung innerhalb eines Rohres stammen von (Götzen, 1986).

$$\sigma_{r,th-nu} = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[-\frac{(\Delta T_i - \Delta T_a)}{(r_a^2 - r_i^2)} \left(\frac{r_i r_a}{r}\right)^2 + \frac{(\Delta T_i \ln\left(\frac{r_a}{r}\right) - \Delta T_a \ln\left(\frac{r_i}{r}\right))}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} + \frac{(\Delta T_i r_i^2 - \Delta T_a r_a^2)}{(r_a^2 - r_i^2)} \right]$$

Formel 34

$$\sigma_{\theta,th-nu} = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left[\frac{(\Delta T_i - \Delta T_a)}{(r_a^2 - r_i^2)} \left(\frac{r_i r_a}{r}\right)^2 + \frac{(\Delta T_i \ln\left(\frac{r_a}{r}\right) - \Delta T_a \ln\left(\frac{r_i}{r}\right))}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} + \frac{(\Delta T_i r_i^2 - \Delta T_a r_a^2)}{(r_a^2 - r_i^2)} - \frac{(\Delta T_i - \Delta T_a)}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \right]$$

Formel 35

Als nächstes werden die druck- und thermodynamischen Radial- und Tangentialspannungen über das Superpositionsprinzip aus Formel 28 und Formel 29 sowie Formel 34 und Formel 35 berechnet.

$$\sigma_r = \frac{\alpha E_t}{2(1-\nu_t)} \left[-\frac{(\Delta T_i - \Delta T_a)}{(r_a^2 - r_i^2)} \left(\frac{r_i r_a}{r}\right)^2 + \frac{(\Delta T_i \ln\left(\frac{r_a}{r}\right) - \Delta T_a \ln\left(\frac{r_i}{r}\right))}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} + \frac{(\Delta T_i r_i^2 - \Delta T_a r_a^2)}{(r_a^2 - r_i^2)} \right] + \left[\frac{p_i r_i^2 - p_a r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{p_i - p_a}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_i r_a}{r}\right)^2 \right]$$

Formel 36

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha E_t}{2(1-\nu_t)} \left[\frac{(\Delta T_i - \Delta T_a)}{(r_a^2 - r_i^2)} \left(\frac{r_i r_a}{r}\right)^2 + \frac{(\Delta T_i \ln\left(\frac{r_a}{r}\right) - \Delta T_a \ln\left(\frac{r_i}{r}\right))}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} + \frac{(\Delta T_i r_i^2 - \Delta T_a r_a^2)}{(r_a^2 - r_i^2)} - \frac{(\Delta T_i - \Delta T_a)}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \right] + \left[\frac{p_i r_i^2 - p_a r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} + \frac{p_i - p_a}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_i r_a}{r}\right)^2 \right]$$

Formel 37

Der Außendruck (p_a) ist gleich dem hydrostatischen Druck im Ringraum (Formel 38) und der Innendruck (p_i) ist gleich dem Druck im Tubing.

$$p_a = p_{R,hyd} = \rho_{RF} \cdot g \cdot H_{RF}$$

Formel 38

Nachdem die Spannungen in der Schnittebene durch das Tubing berechnet wurden, folgt anschließend anhand von Formel 39 die Ermittlung der Summe aller Axialspannungen. Diese setzen sich zusammen aus dem Eigengewicht und Vorspannung des Tubings, der Schleiflasten während der Produktion oder Injektion sowie der zusätzlichen Axialspannung aus Formel 30. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

$$\sigma_{ax,t} = \left[\left(\frac{L_t \cdot M_t \cdot g}{A_t} \cos \beta \right) - \frac{(\Delta p_R)_R \cdot A_{SF}}{A_t} + (\nu_t [\sigma_{r,t} + \sigma_{\theta,t}] + \alpha E_t \Delta T) + \sigma_{Vor,t} \right]$$

Formel 39

Darauf aufbauend werden die Spannungen des Tubings unterhalb des Packers berechnet. Als analytischer Ansatz gilt jetzt nicht mehr der ebene Deformationszustand, sondern der ebene Spannungszustand ($\sigma_{ax} = 0$). Das Endstück vom Tubing ist freibeweglich und eine Längenänderung ist möglich. Die Spannungsberechnung in radialer und tangentialer Richtung erfolgt analog nach Formel 36 und Formel 37. Der Außendruck (p_a) ist nicht mehr der hydrostatische Druck im Ringraum, sondern der Fließdruck am Rohrschuh (p_f). Die Axialspannungen – hervorgerufen durch Eigengewicht, Auftrieb und Schleiflast – sind weiterhin vorhanden, lediglich die zusätzliche Axialspannung erzeugt durch Radial-, Tangential- und Vorspannung sind gleich Null. Demnach lautet Formel 40 für die Axialspannung:

$$\sigma_{ax,t} = \left(\frac{L_t \cdot M_t \cdot g}{A_t} \cos \beta \right) - (H_F \cdot \rho_F \cdot g) - \frac{(\Delta p_R)_R \cdot A_{SF}}{A_t} - (p_f) \quad \text{Formel 40}$$

Zuletzt wird die Längenänderung des Tubings unterhalb des Packers mit Hilfe von Formel 41 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, gemäß (Sitz, 1983), berechnet. Die axiale Deformation (ε_{ax}) des Tubings ergibt sich aus Formel 42.

$$\Delta L = \varepsilon_{ax,t} \cdot L_t \quad \text{Formel 41}$$

$$\varepsilon_{ax,t} = \frac{1}{E_t} [\sigma_{ax,t} - \nu_t (\sigma_{r,t} + \sigma_{\theta,t})] + \alpha \Delta T \quad \text{Formel 42}$$

Im Vergleich dazu wird ein Tubing mit abgesetztem Packer und zusätzlicher Längenausgleichseinheit betrachtet. In diesem Fall kann in beiden Bereichen, sowohl zwischen Tubinghanger und Packer als auch unterhalb des Packers, der ebene Spannungszustand ($\sigma_{ax} = 0$) angesetzt werden. Somit werden die Radial- und Tangentialspannungen über Formel 36 und Formel 37 ermittelt. Die Berechnung der Axialspannungen erfolgt anhand Formel 43. Die Längenänderung, die von der Längenkompensationseinheit ausgeglichen werden muss, wird über Formel 41 und Formel 42 bestimmt. Die Spannungsberechnungen im Tubing unterhalb des Packers erfolgen weiterhin nach dem oben genannten Prinzip.

$$\sigma_{ax,t} = \left(\frac{L_t \cdot M_t \cdot g}{A_t} \cos \beta \right) - \frac{(\Delta p_R)_R \cdot A_{SF}}{A_t} + (\nu_t [\sigma_{r,t} + \sigma_{\theta,t}] + \alpha E_t \Delta T) \quad \text{Formel 43}$$

Mit der Berechnung der Spannungszustände des Tubings können erste Integritätsaussagen getroffen werden. Die Herausforderung besteht vor allem darin, Aussagen zur Standsicherheit der einzelnen Materialien für den elastischen und plastischen Bereich treffen zu können. Für die Beschreibung von Radial-, Tangential- und Axialspannungen ist eine Vergleichsspannung notwendig, die den triaxialen Spannungszustand in eine eindimensionale Spannung transformiert. Anhand der Radial-, Tangential- und Axialspannungen lassen sich schwierig Aussagen zur Standsicherheit der einzelnen Materialien im elastischen und plastischen Bereich treffen. Für die Beschreibung des Verhaltens in diesen Bereichen ist eine Vergleichsspannung notwendig, die den triaxialen Spannungszustand in eine eindimensionale Spannung transformiert. In der aktuellen Fassung der API-Norm (ISO 10400) wird die sogenannte Mises-Spannung (Formel 44) verwendet, um eine Vergleichsspannung von Tubing und Casing zu ermitteln, welche mit der eindimensionalen Festigkeitskenngröße (Streckgrenze) des Tubings verglichen wird.

$$\sigma_{V,Mi-t} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{r,t} - \sigma_{\theta,t})^2 + (\sigma_{\theta,t} - \sigma_{ax,t})^2 + (\sigma_{ax,t} - \sigma_{r,t})^2]} \quad \text{Formel 44}$$

Solange die Vergleichsspannung ($\sigma_{V,Mi-c}$) kleiner der Streckgrenze (σ_R) ist, hält das Tubing der Belastung stand.

Für das Modell wurden die folgenden Parameter der Kaverne und der Bohrlochkomplettierung definiert und in Tabelle 53 zusammengefasst.

Tabelle 53: Parameter des verwendeten analytischen Modells

Parameter Komplettierung	Einheit	
Teufe Rohrschuh	[m]	870
Tubing Außenradius	[m]	0,1223
Tubing Innenradius	[m]	0,1123
Elastizitätsmodul Tubing	[GPa]	210
Querdehnungszahl Tubing	[-]	0,3
Metergewicht Tubing	[kg/m]	59,53
Festigkeit Tubing J55 (Gabolde & Ngyuen, 2006)	[MPa]	379
Injektionstemperatur	[K]	283,15
Geothermischer Gradient	[K/m]	0,03
Oberflächentemperatur	[K]	283,15
Thermischer Ausdehnungskoeffizient Stahl	[K ⁻¹]	1,25*10 ⁻⁰⁵
Maximaler Druck am Rohrschuh	[bar]	140
Minimaler Druck	[bar]	30
Kavernenhöhe	[m]	300

Parameter Komplettierung	Einheit	
Maximaler Kavernenradius	[m]	40
Geometrisches Kavernenvolumen	[m ³]	780.000
Wärmeleitfähigkeit Gebirge	[W/m/K]	5
Spezifische Wärmekapazität Gebirge	[J/kg/K]	850

6.10.2 Ergebnisse

Für die Berechnung der Spannungen wird die Gesamtlänge des Tubings betrachtet. Tabelle 54 zeigt die Ergebnisse des Rechenmodells für das Tubing für die zwei Szenarien unter den Tabelle 53 genannten Randbedingungen.

Tabelle 54: Sicherheitsfaktoren nach Mises in den Szenarien Injektion und Produktion

	Erdgas	Wasserstoff	Bewertung
	S [-]		
Produktion	2,92	2,092	Standicherheit ist gegeben
Injektion	2,76	2,056	Standicherheit ist gegeben

Für die beide Szenarien ist erkennbar, dass der Sicherheitsfaktor beim H₂-Betrieb des Tubings ca. 30 % geringer als beim Erdgasbetrieb ist. Hauptgrund hierfür ist, dass Wasserstoff im Tubing durch die vordefinierte Injektionstemperatur von 283 K anders belastet wird als Erdgas. Die Sicherheitsfaktoren für Wasserstoff sind aufgrund der geringeren Gasdichte gegenüber Erdgas geringfügig reduziert. Durch die geringe Gasdichte resultiert ein erhöhter Druck am Bohrlochkopf.

6.11 Bewertung und Handlungsempfehlungen

6.11.1 Bewertung Kavernenumstellung

Erwartete Gasqualität

Durch eine Mitförderung eines Teils des Kissengases kommt es zu Verunreinigung des Wasserstoffs. Sind hohe Reinheitsanforderungen gegeben bzw. soll die volle Speicherkapazität der Kaverne genutzt werden, sind zusätzliche Abscheidemaßnahmen für mitgefördertes Erdgas erforderlich bzw. sollte auf ein Kissengas abweichend von Wasserstoff verzichtet werden.

Umstellungsstrategien

Als erste Umstellungsvariante könnte die Kaverne mit vollgesättigter Sole gefüllt werden, um das Erdgas vollständig fördern zu können. Anschließend kann Wasserstoff in die mit Sole gefüllte Kaverne injiziert werden. Für diese Umstellungsvariante ist es notwendig, den Soleentleerungsstrang in die Bohrung einzubauen, wofür eine Workover-Anlage vonnöten ist. Diese Variante bringt den Vorteil, dass eine reine H₂-Kaverne zur Verfügung steht und geringere Anforderungen an die Gasaufbereitung gestellt werden müssen. Gasverluste durch die Gasaufbereitung werden so vermieden.

Bei der zweiten Umstellungsvariante einer Kaverne sollte der Druck möglichst weit abgesenkt werden, möglichst bis zum minimalen Kavernendruck. Besser wäre eine Druckabsenkung unter den minimalen Kavernendruck, was aber nur mit einem geomechanischen Gutachten und in Abstimmung mit der Bergbehörde zu realisieren ist. Durch eine Druckabsenkung bis zum minimalen Kavernendruck kann erreicht werden, dass sich ein möglichst hoher Anteil an Wasserstoff in der Kaverne befindet, und das Erdgas kann als Kissengas genutzt werden. Bei der Gasaufbereitung ist darauf zu achten, dass diese in der Lage ist ein Erdgas-Wasserstoff-Gemisch aufzubereiten. Diese Variante bringt den Vorteil, dass das in der Kaverne befindliche Gas als Kissengas genutzt werden kann.

Bei der Umstellung von Kavernen von Erdgas auf Wasserstoff sind folgende Untersuchungen und Gutachten zu erstellen bzw. zu erarbeiten:

- geomechanische Untersuchung zur Druckentlastung der Erdgaskaverne und des zu erwartenden minimalen bzw. maximalen Drücken der H₂- bzw. Mischgaskaverne,
- Gutachten zu Gasvermischungsprozessen bei Medienumstellung und zu erwartende Gasqualität des Ausspeisegases,
- Aussage zur Wiederverwendung von Materialien,

Erarbeitung von Betriebsregimen zur Medienumstellung und zum Ein-/Ausspeicherbetrieb der anderen Speicherkomponenten.

Die Wahl der Umstellungsvariante ist hauptsächlich von wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig.

6.11.2 Bewertung Bohrungsbelastung

Die Integrität des Tubings als erste Barriere ist grundsätzlich gegeben (siehe Kapitel 7.3.1.5 für Begriffsdefinitionen), muss aber standortspezifisch betrachtet werden. Des Weiteren sollten folgende Effekte genauer untersucht werden:

- Ballooning und Reverse Ballooning,
- Knickkräfte innerhalb der Stahlrohe,
- Drücke im Zementstein sowie Gebirgsdruck (Isotrop und Anisotrop),

- Packer ist separat zu bewerten,
- Belastung entlang der Bohrung unterschiedlich,
- kritische Stelle sollte definiert und mit den Behörden abgestimmt werden, ob weitere Untersuchungen notwendig sind.

Die Bohrung ist zudem bei Anfahren, Einspeichern, Ausspeichern der Speicher zu bewerten, da hier verschiedene Belastungen auftreten. Diese Belastungen können infolge verschiedener Effekte bzw. Betriebszustände auftreten und sollten somit in der Spannungsberechnung genauer untersucht und ausgewertet werden. Die folgenden Effekte bzw. Rahmenbedingungen müssen unter den spezifischen Betriebsbedingungen berücksichtigt werden:

Ballooning bzw. Reverse Ballooning

Axialspannungen entstehen nicht nur aufgrund axialer Kräfte, sondern auch durch radiale Verformungen. Diesen Effekt nennt man Ballooning ($\Delta P_i > \Delta P_R$) bzw. Reverse Ballooning ($\Delta P_i < \Delta P_R$). Basierend auf den Druckunterschieden zwischen dem Ringraum und dem Steigraum werden radiale Verschiebungen hervorgerufen, welche eine axiale Zug- oder Druckspannung erzeugt.

Temperaturbelastung

Temperaturbelastungen kommen bei der Produktion und Injektion von Fluiden mit Temperaturen ungleich der Gebirgstemperatur vor. Aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen Steigraum und Gebirge werden im Tubing, Casing, Zement und Gebirge zusätzliche Spannungen erzeugt, diese gilt es zu erfassen und in die Spannungsberechnung mit einzubeziehen.

Belastung im Zementstein

Belastungen auf den Zement können diesen beschädigen, somit sind die Drücke bzw. Spannungshypothese im Zementstein sowie im Gebirgsdruck (Isotrop und Anisotrop) zu überprüfen. Dies kann durch Triaxialversuche im Labor ermittelt werden.

Packer

Der Packer ist während des Gasbetriebes durch die Druckunterschiede ober- und unterhalb des Packers und der Vorspannung des Tubings belastet. Dieser sollte somit separat untersucht und ausgewertet werden.

Weiterhin sind die Biegungsspannungen und Knickkräfte innerhalb der Stahlrohre, Tubing und Casing zu berücksichtigen sowie eine klare Definition der Barriere-Elemente oder kritische Stelle innerhalb der Bohrung, die höhere Belastungen aufnehmen.

6.12 Literaturverzeichnis

- Carasi, B. (2016). Compressibility Options and Buoyancy Forces for Flow Simulations. COMSOL Blog. Abgerufen am 07.01.2020 von <https://www.comsol.com/blogs/compressibility-options-and-buoyancy-forces-for-flow-simulations/>
- Chabab, S., Théveneau, P., Coquelet, C., Corvisier, J., & Paricaud, P. (2020). Measurements and predictive models of high-pressure H₂ solubility in brine (H₂O+NaCl) for underground hydrogen storage application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (56), S. 32206–32220.
- Crozier, T. E., & Yamamoto, S. (1974). Solubility of hydrogen in water, sea water, and sodium chloride solutions. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 19 (3), S. 242–244.
- DIN CEN ISO/TR 10400:2011-07, „Petroleum and natural gas industries – Equations and calculations for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing“, 2011.
- DIN EN ISO 18453 „Erdgas – Beziehungen zwischen Wassergehalt und Taupunkt (ISO 18453:2004)“, 01/2006.
- Frei, W. (2017). Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application? COMSOL Blog. Abgerufen am 11.12.2019 von <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
- Gabolde, G., & Nguyen, J.-P. (2006). Drilling data handbook. Paris: Technip.
- GERG Technical Monograph TM14 (L. R. Oellrich, K. Althaus). Relationship between water content and water dew point keeping in consideration the gas composition in the field of natural gas.
- Gordon, L. I., Cohen, Y., & Standley, D. R. (1977). The solubility of molecular hydrogen in seawater. *Deep Sea Research*, 24 (10), S. 937–941
- Göthall, H. (2017). How to Inspect Your Mesh in COMSOL Multiphysics®. COMSOL Blog. Abgerufen am 04.12.2019 von <https://www.comsol.com/blogs/how-to-inspect-your-mesh-in-comsol-multiphysics/>.
- Götzen, P. (1986). Zur Beanspruchung von Futterrohtouren in Dampfinjektionsbohrungen. Clausthal, Technische Universität Clausthal, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen. Dissertation.
- Groß, U. (2011). Technische Thermodynamik 2. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik. Arbeitsunterlagen.
- Haider, M. G., Sanjayan, J., & Ranjith, P. G. (2012). Modeling of a Well-bore Composite Cylinder System for Cement Sheath Stress Analysis in Geological Sequestration of CO₂. *46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Chicago, ARMA 369* (12).
- Kadner, K. (2002). Experimentelle und theoretische Untersuchung zur Feuchteentwicklung von Erdgasen in Gasspeicherkavernen. Freiberg.
- Kretschmar, H.-J., & Klafki, M. (1991). Abschlussbericht: Vermischungssimulation Kavernenumstellung UGS Bad Lauchstädt – Interner Bericht. Freiberg.

- Kümmel, W. (2007). Technische Strömungsmechanik – Theorie und Praxis. Wiesbaden: B.G Teubner Verlag/GWV Fachverlage.
- Liège, X. C. (2006). Dissolution of Light Hydrocarbons in Drilling Muds, Prediction of the Nature of Reservoir Fluids Based on Gas Shows. Dissertation. Technical University of Denmark, Lyngby. Department of Chemical Engineering.
- Mao, S., Duan, Z., Zhang, D., Shi, L., Chen, Y., & Li, J. (2011). Thermodynamic modeling of binary CH₄–H₂O fluid inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75 (20), S. 5892–5902.
- Möller, H., & Hillert, G. (1992). Jahresbericht UGS Bad Lauchstädt 1991/1992 – H-Gas Kavernen. Bad Lauchstädt.
- O'Sullivan, T. D., & Smith, N. O. (1970). Solubility and partial molar volume of nitrogen and methane in water and in aqueous sodium chloride from 50 to 125.deg. and 100 to 600 atm. *The Journal of Physical Chemistry*, 74 (7), S. 1460–1466.
- ohne Verfasser. (1998). Gasbeschaffenheit im Winter 1997/98 – Interner Bericht. Bad Lauchstädt.
- ohne Verfasser. (kein Datum). Interner Bericht.
- Peng, D. Y., & Robinson, D. B. (1976). A new two-constant equation of state. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 15 (1), 59-64.
- Schmitz, S., Kleinickel, C., Barsch, M., Schulz, P., Keßler, B., Pumpa, M., & Rockmann, R. (2018). Abschlussbericht – Wissenschaftliche Forschung zu Windwasserstoff Energiespeichern – Teilprojekt DBI „Gaseinspeisung und Untergrundspeicherung“. Freiberg.
- Schulz, P. (2015). Bestimmung der Spannungszustände an UGS-Bohrungskompletierungen, unter Berücksichtigung thermischer und druckdynamischer Spannungsänderungen. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg. IBF, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH.
- Schulze, V. (1995a). Jahresbericht UGS Bad Lauchstädt 1993/94, Stadtgaskavernen – Interner Bericht. Bad Lauchstädt.
- Schulze, V. (1995b). Jahresbericht UGS Bad Lauchstädt 1994/1995, H-Gas Kavernen – Interner Bericht. Bad Lauchstädt.
- Sitz, P. (1983). Standsicherheitsprobleme in der Bohr- und Fördertechnik. TU Bergakademie Freiberg, Sektion Geotechnik und Bergbau, Wissenschaftsbereich Tiefbohrtechnik. *Forschungsheft* 001935010.
- Tautz, H. (1971). Wärmeleitung und Temperatenausgleich. Weinheim: Verlag Chem.
- Torín-Ollarves, G. A., & Trusler, J. P. M. (2021). Solubility of hydrogen in sodium chloride brine at high pressures. *Fluid Phase Equilibria*, 539, S. 113025.
- Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH. (1991). Verfahrensstudie UGS Bad Lauchstädt – Medienumstellung von Stadtgas auf Erdgas. Mittenwalde.
- Wang, L.-K., Chen, G.-J., Han, G.-H., Guo, X.-Q., & Guo, T.-M. (2003). Experimental study on the solubility of natural gas components in water with or without hydrate inhibitor. *Fluid Phase Equilibria*, 207 (1), S. 143–154.

7 Untertägiges Speicherdesign und Ausrüstungen

Claudia Abdel Haq¹³, Dr. Thomas Faber¹³, Detlef Miersch¹³, Dr. Klaus-Peter Rehmer¹³, Claudia Seckel¹³, Benjamin Keßler¹⁴, Martin Kirch¹⁵

7.1 Einleitung

Für die herkömmliche untertägige Gasspeicherung existieren anerkannte Normen, Regelungen und Auslegungsvorschriften für zu verwendende Werkstoffe sowie Bauteile. Ausrüstungskomponenten sind bekannt und über Jahrzehnte erprobt. Aktuell gibt es in Deutschland keine Untergrundgasspeicher (UGS) für reinen Wasserstoff. In den USA und Großbritannien werden einige wenige H₂-Kavernen betrieben, zu denen aber keine Betriebserfahrungen für Werkstoffe für Untertageausrüstungen und Rohre bekannt sind. Daher war ein wesentliches Ziel innerhalb des Verbundvorhabens H₂-UGS die Entwicklung einer untertägigen Gesamtkonzeption für die H₂-Speicherung in Kavernen, die Ableitung von Akzeptanz- bzw. Versagenskriterien bzgl. der zu betrachtenden Barriere-Elemente sowie die Festlegung der notwendigen Ausrüstungskomponenten und Ausrüstungsmaterialien unter Berücksichtigung der Sonderanforderungen durch Wasserstoff. Die Festlegungen und Empfehlungen waren unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Verbundvorhaben H₂-UGS, etwaigen neuen Regelwerken bzgl. der H₂-Speicherung sowie den Untersuchungsergebnissen zu geben.

Die Ausgangsbedingungen und mögliche Einflussfaktoren bei der untertägigen H₂-Speicherung sind in Kapitel 2.2 genannt.

7.2 Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf das untertägige Speicherdesign und Ausrüstungen

Die Speicherung von Erdgas im Untergrund hat in Deutschland einen sehr hohen sicherheitstechnischen Standard erreicht. Das derzeitige Komplettierungsdesign basiert auf langjährigen Betriebserfahrungen, welche sich letztlich im BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ (Stand 07/2021) wiederfinden. Schon während der Planung der Bohrung, über die Maßnahmen zur Errichtung bis zum Betrieb des Speichers sind die Risiken unkontrollierter Leckagen auszuschließen. Mit Vorliegen des BVEG-Leitfadens „Bohrungsintegrität“ existiert ein Leitfaden der Fluid- und Speicherindustrie, welcher nach aktuellem Stand analog für die Untertagespeicherung von H₂-haltigen Gasen/reinem Wasserstoff anzuwenden ist. Der BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ definiert den Stand der Technik von neuen Bohrungen auf dem Festland in Deutschland. Für Bohrungen im Bestand werden im Leitfaden Verfahren und Bedingungen beschrieben, mit denen Schutzziele gewährleistet werden können.

Unter Kavernenspeicherbedingungen ist Wasserstoff gasförmig. Die Realgasfaktoren von Wasserstoff sind über 1,0 und somit größer als bei Erdgas. Bei gleichen Speicherbedingungen führt dies gegenüber Erdgas zu einem reduzierten Arbeitsgasvolumen im Speicher, was auch Auswirkungen

¹³ Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH, Berliner Chaussee 2, D-15749 Mittenwalde

¹⁴ DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Karl-Heine-Straße 109/111, D-04229 Leipzig

¹⁵ TU Bergakademie Freiberg, Institut Bohrtechnik und Fluidbergbau, Agricolastraße 22, D-09599 Freiberg

auf die Druckänderungsgeschwindigkeit in einer Kaverne hat. Bei gleicher Entnahmeleistung ist diese bei Wasserstoff höher. Die diesbezügliche gebirgsmechanische Einzelfallbetrachtung ist erforderlich.

Oberhalb von -43 °C weist der Joule-Thomson-Koeffizient negative Werte auf, d. h., Wasserstoff erwärmt sich im Gegensatz zu Erdgas etwas bei der Drosselung mit dem typischen Effekt der Entspannungskälte. Mit Ausnahme von Anfahrprozessen kann daher auf die Vorwärmung bei der Ausspeisung völlig verzichtet werden. Eine Abkühlung in der Kaverne bei Ausspeisung findet dagegen trotzdem statt (isentrope Behälterentspannung). Innerhalb der Kaverne fallen die Temperaturveränderungen im Vergleich zu Erdgas jedoch moderater aus.

Wasserstoff hat eine im Vergleich zu Erdgas/Methan wesentlich geringere Viskosität und Dichte. Dies führt zu kleineren Druckverlusten über Rohrleitungen im Vergleich zu Erdgas (bis zu 8-fach geringer bei typischen Druck-/Temperaturverhältnissen bei Gasspeichern) und damit günstigeren hydraulischen Bedingungen.

Aufgrund der geringen Dichte ist auch der statische Druckunterschied über der Bohrung viel geringer. Der statische Kopfdruck liegt nur geringfügig unterhalb des Kavernendruckes. Dies ist bei den Auslegungen der technischen Anlagen (z. B. für die Gaserstbefüllung) zu beachten.

Blowout-Szenarien mit Sicherheitsradien um die Bohrung sind abweichend von Erdgas zu bewerten. Hierfür wird auf die aktuelle Überarbeitung des BVEG-Leitfadens „Auswirkungen von Störfällen im Speicherbetrieb auf die Nachbarschaft“ (09/2017) verwiesen.

Der Zündbereich von Wasserstoff ist sehr breit. Wasserstoff verteilt sich beim Ausströmen aufgrund des höheren Diffusionskoeffizienten und der geringen Dichte besser und schneller in Luft, als beispielsweise Erdgas, steigt nach oben und neigt eher zum Abbrennen als zur Explosion. In geschlossenen Räumen sind dagegen die Auswirkungen einer Explosion heftiger als bei Erdgas. Für Arbeiten an der Bohrung sind entsprechende Sicherheitskonzepte zu entwickeln. Sicherheitsbetrachtungen zum Anlagenbetrieb mit Wasserstoff werden in Kapitel 8.3.5 dargestellt.

Wasserstoff besitzt eine erhöhte Löslichkeit in Metallen. Im Vergleich zu Erdgas ist der durch Permeation verursachte Wasserstoffverlust in Stahlrohren theoretisch größer, wird aber als technisch nicht relevant angesehen. Stähle verändern in einer Wasserstoffatmosphäre ihre Eigenschaften. Sie unterliegen insbesondere einer Versprödung, die durch einen Abfall der Werkstoffzähigkeit angezeigt wird. Die Grundlage der Wasserstoffaufnahme in metallischen Werkstoffen bildet die Dissoziation molekularen Wasserstoffs an der Grenzfläche zum Metall in seine atomare Form. Ist die Absorption des Wasserstoffs in den metallischen Werkstoff erfolgt, diffundiert der atomare Wasserstoff, d. h., die Wasserstoffatome bewegen sich durch das Kristallgitter. Für Stahlwerkstoffe weicht der Diffusionskoeffizient in Abhängigkeit vom vorliegenden Kristallgitter stark voneinander ab. So besitzen hochlegierte, austenitische Stähle bei Raumtemperatur einen um Zehnerpotenzen kleineren Diffusionskoeffizienten gegenüber ferritischen Stählen, wie z. B. die herkömmlichen Ölfeldstähle der Gruppe 1 nach API 5CT (10th Edition). Gleichzeitig haben äußere Zugspannungen einen Einfluss auf die Wasserstoffverteilung in einem Werkstoff. So ist die Wasserstoffkonzentration in Bereichen mit erhöhten Zugspannungen gegenüber Bereichen mit geringerer Zugspannung höher. Allein die Wasserstoffabsorption und -diffusion führt schon zu einer Veränderung der Werkstoffeigenschaften, ähnlich wie die Zugabe eines Legierungselementes Werkstoffeigenschaften verändern kann. Durch die Versprödung, die der atomare Wasserstoff im Gitter hervorruft, können in Verbindung mit einer äußeren Kraft Risse entstehen.

Des Weiteren besitzt Wasserstoff im Vergleich zu üblichen Speichermedien, wie Methan, eine hohe Mobilität und Diffusionsfähigkeit, was auf den vergleichsweise kleinen Moleküldurchmesser und die niedrige dynamische Viskosität zurückzuführen ist. Daraus ergibt sich für die Speicherung von Wasserstoff ein gegenüber Methan höheres Leckage-Risiko für die gesamte Bohrlochkonstruktion inklusive Komplettierung und Bohrlochkopf. Diesem ist bei der Auslegung der Bohrlochkonstruktion bzw. technischen Installationen Rechnung zu tragen.

Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen können Elastomere, die als Dichtungswerkstoffe in Bohrlochkonstruktionen verwendet werden, auch Wasserstoffmoleküle aufnehmen. D. h., der Wasserstoff muss vor der Absorption nicht dissoziieren. Der Konzentrationsausgleich als Triebkraft führt auch bei Elastomeren zu einer Wasserstoffsättigung. Diese Wasserstoffsättigung kann bei einer schlagartigen Druckentlastung zu einer Übersättigung führen, die beim Überschreiten der Festigkeit des Materials Risse bilden kann. Elastomere weisen eine unterschiedliche Kompatibilität auch in Abhängigkeit der Einsatztemperaturen gegenüber wasserstoffhaltigen Gasen auf. Die Permeabilität verschiedener Elastomere weicht stark voneinander ab. Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS sind keine Untersuchungen an Elastomeren durchgeführt wurden. Ein wesentliches Ziel war daher die mögliche Reduzierung solcher Komponenten im Bohrungsausbau.

In den Untersuchungen hinsichtlich des untertägigen Speicherdesigns wurden die zementierte Endverrohrung einer Bohrung, die Hohlraumform des Kavernenspeichers sowie die Förderkomplettierung und zugehörige Sicherheitseinrichtungen betrachtet.

7.3 Spezifikation der Untertageausrüstung

7.3.1 Technische Ausrüstungen, Materialien und Einbautechniken

7.3.1.1 Werkstoffe allgemein

Die Dimensionierung von Konstruktionen und Bauteilen findet normalerweise auf der Basis von Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften der Werkstoffe statt. Für den Nachweis von Werkstoffeigenschaften existieren Normen, die die Prüfverfahren, deren Durchführung sowie notwendige Ergebnisse festlegen. Sowohl die Dimensionierungsregeln als auch Nachweise der Werkstoffeigenschaften sind für Bohrlochkonstruktionen und Komplettierungen zur Speicherung von Kohlenwasserstoffen und anderen Medien wie Luft, Stickstoff, Helium o. a. bekannt und wurden erfolgreich über Jahrzehnte hinweg angewendet. Sie sind in Normen und Richtlinien niedergelegt und schaffen die Basis für die Gewährleistung der öffentlichen und der Bergsicherheit. Ggf. auftretende Lücken oder neue Erkenntnisse führten zur Anpassung und Erweiterung geltender Vorschriften und Richtlinien, die dann wiederum ein höheres Sicherheitsniveau zur Folge hatten. Die grundlegenden Anforderungen an die Herstellung, Prüfung und Dokumentation von Rohrwerkstoffen für UGS enthält die API 5CT in der die Rohrwerkstoffe in Gruppen aufgeteilt sind. Die in der bisherigen Untergrundspeicherung nahezu ausschließlich verwendeten Stahlgüten wie J55, K55 oder auch N80 lassen sich alle der Gruppe 1 zuordnen. Für alle Rohrwerkstoffe der Gruppe 1 sind hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung nur die Maximalgehalte für Phosphor und Schwefel begrenzt. Alle anderen minimalen und maximalen Gehalte an Legierungselementen sind für diese Stahlgüten nicht festgelegt, sodass bei der gleichen Stahlgüte sehr unterschiedliche chemische Zusammensetzungen auftreten können. Ähnliche Aussagen können auch für den Wärmebehandlungszustand und dem daraus resultierenden Gefüge der

Stahlgüten gemacht werden. Unter Beachtung dieser Umstände können bei gleicher Stahlgüte für eine bereits eingebaute Rohrtour sehr unterschiedliche werkstofftechnische Eigenschaften hinsichtlich Gefüge und Homogenität auftreten. D. h., die Benennung einer Stahlgüte in einem Zertifikat für eine eingebaute Rohrtour sichert den einzelnen Rohren eine nachvollziehbare Festigkeit und Zähigkeit bei Verwendung der bisher üblichen Speicherprodukte zu. Allerdings sind für Speicherprodukte, die bei bestimmten chemischen Zusammensetzungen oder Wärmebehandlungsstrukturen die mechanisch-technologischen Eigenschaften der eingesetzten Rohrwerkstoffe ändern, die bisherigen Festlegungen in der API 5CT unzureichend. Bei der Auswahl von Rohren für solche Anwendungen sind über die Festlegungen der Norm hinausreichende Spezifikationen notwendig.

Untertageausrüstungen wie Packer, Landenippel, Untertagesicherheitsventile (UTSAV) u. a. unterliegen im Betrieb teilweise hohen Belastungen und Verschleiß, sodass diese Bauteile meist aus anderen Stahlgüten als die Rohre bestehen. Die Werkstoffauswahl für die einzelnen Produkte erfolgt herstellerbezogen im Rahmen der Auslegung der Produkte nach ingenieurtechnischen Regeln. Wasserstoff ändert die Eigenschaften der üblicherweise verwendeten Werkstoffe und besitzt damit großen Einfluss auf die Materialauswahl und die Auslegung von Bohrlochkonstruktionen für den Einsatz in UGS. Normen und Regeln für die Auswahl von Werkstoffen bei der Untergrundspeicherung von Wasserstoff existieren derzeit jedoch nicht.

Schädigungsmechanismen und -arten

Stähle verändern in einer Wasserstoffatmosphäre ihre Eigenschaften. Sie unterliegen insbesondere einer Versprödung, die durch einen Abfall der Werkstoffzähigkeit angezeigt wird.

Die Grundlage der Wasserstoffaufnahme in metallischen Werkstoffen bildet die Dissoziation molekularen Wasserstoffs an der Grenzfläche zum Metall in seine atomare Form. Wasserstoffmoleküle, die sich in Richtung einer Metalloberfläche bewegen, können an dieser elastisch abprallen, gebeugt werden oder anhaften. An der Metalloberfläche anhaftende Wasserstoffmoleküle können auf zwei Wegen in Wasserstoffatome aufgespalten werden. Entweder ist die kinetische Energie des Wasserstoffatoms beim Aufprall groß genug, dass das Wasserstoffmoleküle direkt dissoziiert oder die an der Metalloberfläche anhaftenden Wasserstoffmoleküle treffen bei ihrer Bewegung über die Metalloberfläche auf eine Gitterleerstelle oder eine Oberflächenverunreinigung, an der sie dissoziieren und anschließend absorbiert werden können. Geeignete Dissoziationsstellen, wie die Gitterleerstellen oder Oberflächenverunreinigungen, wirken dabei wie ein Katalysator, sodass sowohl die Menge der Anhaftungen wie auch die Anzahl potenzieller Dissoziationspunkte mit Oberflächenverunreinigungen und -defekten zunimmt.

Ist die Absorption des Wasserstoffs in den metallischen Werkstoff erfolgt, diffundiert der atomare Wasserstoff, d. h., die Wasserstoffatome bewegen sich durch das Kristallgitter. Triebkraft der Diffusion ist ein Streben nach Konzentrationsausgleich, sodass sich Wasserstoffatome von einer hohen in Richtung einer niedrigen Konzentration bewegen bis dieser erfolgt ist. Die Dauer bis zum Erreichen des Konzentrationsausgleichs ist bei gleichem Abstand eines Konzentrationsgefälles sehr stark vom Diffusionskoeffizienten abhängig (Wackermann, et al., 2019). Für Stahlwerkstoffe weicht der Diffusionskoeffizient in Abhängigkeit vom vorliegenden Kristallgitter stark voneinander ab. So besitzen hochlegierte, austenitische Stähle bei Raumtemperatur einen um Zehnerpotenzen kleineren Diffusionskoeffizienten gegenüber ferritischen Stählen, wie z. B. die herkömmlichen Ölfeldstähle der Gruppe 1 nach API 5CT.

Gleichzeitig haben äußere Zugspannungen einen Einfluss auf die Wasserstoffverteilung in einem Werkstoff. So ist die H_2 -Konzentration in Bereichen mit erhöhten Zugspannungen gegenüber Bereichen mit geringerer Zugspannung höher.

Allein die Wasserstoffabsorption und -diffusion führt schon zu einer Veränderung der Werkstoffeigenschaften, ähnlich wie die Zugabe eines Legierungselementes Werkstoffeigenschaften verändern kann. Durch die Versprödung, die der atomare Wasserstoff im Gitter hervorruft, können in Verbindung mit einer äußeren Kraft Risse entstehen. Diese Rissbildung wird als Hydrogen Stress Cracking (HSC) bezeichnet. Sie tritt bei Temperaturen unterhalb von 150 °C an den üblichen metallischen Werkstoffen, wie beispielsweise unlegierten Kohlenstoffstählen, auf.

Zur Vermeidung des Auftretens von HSC sind die Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eignung wie Legierungselemente, Stahlbegleiter, Mikrostruktur, Härte und Festigkeit auszuwählen. Weiterhin sind Herstellungs- und Montageverfahren darauf abzustimmen, dass möglichst geringe Veränderungen der Gefügestruktur oder des Spannungszustandes stattfinden, die ein Auftreten von Rissen begünstigen. Dies trifft insbesondere für die schweißtechnische Verarbeitung von Stählen zu, da hierbei Gefügeumwandlungen stattfinden und Spannungen entstehen, die im fertigen Bauteil verbleiben und nur durch zusätzliche Maßnahmen rückgängig gemacht werden können.

Eine weitere Werkstoffschädigung kann durch die Rekombination der diffundierten Wasserstoffatome zu Molekülen an inneren Fehlstellen wie Versetzungen, Mikrorissen, Poren o. ä. entstehen. Die Wasserstoffmoleküle sind gegenüber den -atomen im Kristallgitter immobil. Ihre Anreicherung an den Fehlstellen führt zu hohen Drücken, die Zugspannungen hervorrufen. Diese Zugspannungen wiederum bewirken eine Werkstoffversprödung und können allein oder in Überlagerung mit äußeren Spannungen zur Rissbildung führen. Diese Schädigung wird als wasserstoffinduzierte Rissbildung (HIC, Hydrogen Induced Cracking) bezeichnet. Quellen für den Wasserstoff zum Auslösen von wasserstoffinduzierten Rissen können sein:

- Wasserstoff als Transport- oder Speichermedium in reiner Form oder als Mischgas,
- aus Reaktionen in schwefelhaltigem Milieu (H_2S),
- aus Reaktionen in Verbindung mit dem kathodischen Korrosionsschutz,
- bei Schweißvorgängen eingetragener Wasserstoff aus Wassergehalten von Umhüllungen, Pulvern, Gasen oder aus Tauwasser bzw. Feuchtigkeit in der Schweißfuge.

Zur Vermeidung der wasserstoffinduzierten Rissbildung sind sowohl die Quellen zum Wasserstoffeintrag als auch die Anzahl der Fehlstellen und Hohlräume bei der Herstellung und Verarbeitung von Werkstoffen zu minimieren.

Die oftmals in Verbindung mit Wasserstoff dargestellte Spannungsrisskorrosion (SCC, Stress Corrosion Cracking) ist keine spezifische Form der Wasserstoffkorrosion. Sie kann an spannungsbeaufschlagten Bauteilen, insbesondere aus Kohlenstoff- oder niedriglegierten Stählen, allerdings auch ohne Vorhandensein von Wasserstoff als Transport- oder Speichermedium, auftreten.

Neben den genannten Korrosionsarten treten auch weitere Formen von Korrosion in Verbindung mit Wasserstoff unter besonderen Bedingungen, wie erhöhte Temperaturen, sauren Elektrolyten oder Wechsellasten usw. auf und können zu Erscheinungen wie Entkohlung, Wasserstoffblasenbildung,

Verschlechterung der Ermüdungsfestigkeit u. a. führen. Zur Vermeidung oder Verringerung des Einflusses von Korrosionserscheinungen auf die Integrität von Bauteilen müssen die Werkstoffe für den Einsatz in wasserstoffhaltigen Gasen spezifiziert werden.

Aus dem Wirkprinzip der Wasserstoffaufnahme und -diffusion in metallischen Werkstoffen lassen sich für die Werkstoffauswahl und den -einsatz folgende Konsequenzen ableiten:

- Das Entstehen von atomarem Wasserstoff, der von Metallgitter aufgenommen werden kann, lässt sich an Metalloberflächen nicht verhindern.
- Eine Aufsättigung des Gefüges mit Wasserstoff kann nicht verhindert werden, da immer ein Konzentrationsgefälle zwischen Behälterinnen- und -außenseite besteht.
- Oberflächenverunreinigungen sind zur Minimierung von Dissoziationspunkten und damit zur Minimierung der Teilchenstromdichte bei der Wasserstoffdiffusion zu reduzieren.
- Zugspannungen im Werkstoff sind zur Reduzierung der Wasserstoffkonzentration im Werkstoff zu minimieren.
- Fehlstellen im Werkstoff wie Versetzungen, Mikrorissen, Poren o. ä. sind zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Zähigkeit zu minimieren.

7.3.1.2 Rohrwerkstoffe

Ausgangspunkt

Eignungsnachweise der Stahlgüten gemäß API 5CT für Rohre liegen für die H₂-Anwendungen bisher nicht vor und sind entsprechend den Festlegungen in der aktuellen Version dieser Norm ohne zusätzliche Spezifikationen nicht möglich. Aus dem Pipelinebau sind Rohrwerkstoffe bekannt, deren Eignung für H₂-Anwendungen nachgewiesen wurde. Auch andere Industriezweige, wie z. B. die Industriegashersteller, verfügen über langjährige Betriebserfahrungen zu Werkstoffen für H₂-Anwendungen, die in Vorschriften zusammengefasst sind. In der EIGA-Richtlinie „Hydrogen Pipeline Systems“ IGC Doc 121/14 (2014) werden diese Werkstoffe und deren Einsatzbedingungen beschrieben. Die Anforderungen an die Rohrwerkstoffe für eine Kavernenkomplettierung zur H₂-Speicherung soll über vergleichende Betrachtungen nachfolgend an Hand der Festlegungen dieser Richtlinie beschrieben werden.

Stähle für H₂-Anwendungen besitzen im Gegensatz zu den Stählen der Gruppe 1 der API 5CT auf Basis ihrer Stahlmarke eine festgelegte chemische Zusammensetzung mit Toleranzbereichen. Hiermit wird in Verbindung mit anderen Merkmalen des Stahls wie z. B. dem Wärmebehandlungszustand ein annähernd gleiches Verhalten der Stahlmarke gegenüber dem H₂-Einfluss sichergestellt.

Stähle für den Einsatz in einer H₂-Atmosphäre sollten gemäß EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 (2014) eine maximale Härte von 22 HRC aufweisen. Diese Härte entspricht ungefähr 238 HB bzw. 248 HV 10 und führt zu einem Äquivalent der Zugfestigkeit von ca. 800 MPa. D. h., nach der EIGA-Richtlinie sollte die Zugfestigkeit von Stählen für H₂-Anwendungen 800 MPa nicht überschreiten. Wenn bei der Verarbeitung der Stähle, wie z. B. beim Schweißen, eine Zunahme der Festigkeit angenommen werden kann, so sollte die maximale Zugfestigkeit weiter reduziert und auf 500 MPa herabgesetzt werden.

Eine schweißtechnische Verarbeitung von Rohren beim Einbau einer Rohrtour in eine Bohrung vorausgesetzt, wird dieser Grenzwert für Werkstoffe der Gruppe 1 der API 5CT nur durch die Güte H40, der allerdings nur in äußerst geringen Umfang eingesetzt wird, erfüllt. Der Werkstoff J55 als vielfach

verwendete Güte bei Rohreinbauten überschreitet diesen vorgegebenen Grenzwert mit 517 MPa bereits, wenn auch nur in geringem Maße. Die Werkstoff K55 und N80 liegen mit 655 MPa bzw. 689 MPa erheblich über diesem Grenzwert. Für die maximale Härte ist bei keinen dieser Werkstoffe in der API 5CT ein Grenzwert definiert.

Laut EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 sollen folgende metallurgische Aspekte bei der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden:

Bevorzugt sollen Legierungen mit einem homogenen feinkörnigen Gefüge verwendet werden.

Die Verwendung harter oder hochfester Legierungen sollte vermieden werden.

Es sind Stähle mit hoher Reinheit und geringen nicht metallischen Einschlüssen zur Erhöhung der Zähigkeit und Beständigkeit gegenüber Wasserstoffversprödung zu verwenden. Die Gehalte für Schwefel und Phosphor sollten abgesenkt sein.

Weiterhin sollen Bauteile frei von signifikanten Oberflächen- und Innendefekten sein.

Sollten nicht alle diese Aspekte bei der Werkstoffwahl berücksichtigt werden können, ist gemäß EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 der Betrieb mit einem abgesenkten Spannungsniveau angeraten. Die auftretenden maximalen Spannungen im Bauteil sollten dann nicht größer als 30 % der Mindeststreckgrenze bzw. 20 % der Mindestzugfestigkeit sein, wobei der kleinere Wert für die Auslegung zu berücksichtigen ist. Praktisch ist diese Forderung durch die Erhöhung der tragenden Querschnittsfläche, die sich aus dem Durchmesser der Rohre und der Wanddicke ergibt, realisierbar.

Als Wärmebehandlung empfiehlt die EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 für Kohlenstoffstähle ein Normalisieren zur Erzeugung eines homogenen, feinkörnigen Gefüges. Solch ein Gefüge verfügt im Normalfall über eine hohe Ausgangszähigkeit, die auf Grund der Versprödung des Werkstoffes während des Betriebs erforderlich ist und für gewöhnlich durch Kerbschlagbiegeversuche nachgewiesen wird.

Gemäß API 5CT sind Wärmebehandlungsmaßnahmen für den J55 und K55 im PSL1 (Product Specification Level) nicht festgelegt. PSL2 sieht für beide Güten ein Normalisieren oder ein Normalisieren und Anlassen vor. Für die Güte N80 Type 1 ist ein Normalisieren ggf. in Verbindung mit Anlassen und für den Typ Q ein Härten und Anlassen vorgesehen.

Bei der Prüfung der Kerbschlagzähigkeit mit dem Kerbschlagbiegeversuch soll die Kerbschlagarbeit für die Werkstoffe J55 und K55 mindestens 16 J für eine Quer- und 27 J für eine Längsprobe betragen, wobei diese Prüfung im PSL1 für einen Rohrkörper nicht gefordert ist. Für N 80 beträgt der Mindestwert der Kerbschlagzähigkeit bei einer Querprobe 14 J und bei einer Längsprobe 27 J, wobei eine Kerbschlagbiegeprüfung für den Rohrkörper bei N80 Type 1 im PSL1 nicht gefordert ist. Die Prüftemperatur für alle Kerbschlagbiegeprüfungen ist entsprechend den Anforderungen festzulegen.

Montageverfahren, Einbautechnologien

Die herzustellenden Verbindungen, z. B. beim Rohreinbau zwischen den einzelnen Rohren, unterliegen hinsichtlich der Integrität des Speichers hohen Anforderungen. Die EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 (2014) schreibt aufgrund der besonderen Eigenschaften von Wasserstoff hinsichtlich Verbindungen möglichst immer die geschweißte Ausführung vor. Sollten Schweißverbindungen nicht möglich sein, können Flanschverbindungen angewendet werden. Aufgrund der prognostizierten langen Lebenszeit stellt das Verschweißen von Rohren in der Speichertechnik den Stand der Technik dar. Mit Bezug auf die EIGA-Richtlinie ist der Einsatz von Schraubverbindungen nur in Ausnahmen zulässig und muss auf ein absolutes Minimum reduziert werden.

Bei bestimmten Materialpaarungen und den daraus resultierenden Schwierigkeiten beim Schweißen sind Schraubverbindungen in der Speicher- und Fördertechnik nicht vollständig zu ersetzen. Beispielfähig sollen die internen Verbindungen von speziellen Ausrüstungsteilen und deren Anschluss an die Förderinstallation genannt werden. Nach Aussage der Firma Vallourec (05/2019 – 11/2021) liegt die theoretische Leckrate bei Wasserstoff um das 2,2-fache höher als bei konservativen Gasgemischen oder Helium. Aktuell laufen umfangreiche Tests an bekannten VAM Premium-Verbindern. Die bisherigen Laborergebnisse zeigen nach Herstelleraussage (2021) keine „großen“ Abweichungen zwischen Stickstoff, Helium und Wasserstoff. Die Firma Vallourec verweist darauf, dass die Verbinder aus der Familie VAM, im speziellen Fall VAM 21, eine gute Performance aufweisen.

Zur Einschätzung der Schweißbarkeit eines Stahls begrenzt die EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 das Kohlenstoffäquivalent CE auf 0,43 % (CE = CEV). Das Kohlenstoffäquivalent wird dabei nach Formel 45 berechnet:

$$CEV = \%C + (\%Mn)/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15 \quad \text{Formel 45}$$

Im Gegensatz zu obertägigen Anwendungen ist der Einsatz von Premiumschraubverbindern in der Tiefbohrtechnik zum gasdichten Verbinden von Rohrtouren weit verbreitet und für einige Anwendungsfälle, wie beispielsweise bei Entleerungsrohrtouren, die nach einer Kavernenentleerung mit einer Snubbing-Anlage ausgebaut werden müssen, nur sehr schwer ersetzbar. Bisher liegen zur temporären oder auch Langzeitdichtheit für Premiumschraubverbinder bei H₂-Anwendungen noch keine Erfahrungen vor. Erste Prüfungen durch Hersteller von gasdichten Verbindern werden derzeit durchgeführt. Auf Basis dieser Prüfergebnisse besteht ggf. im Gegensatz zu den Empfehlungen der EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 die Möglichkeit des Einsatzes von Schraubverbindungen bei H₂-Anwendungen in der Tiefbohrtechnik.

Die Analyse der Gasdichtheit von geschraubten Verbindungen bei der Speicherung von Wasserstoff war nicht Bestandteil der Untersuchungen, die für den Leitfaden durchgeführt wurden.

Werkstoffprüfungen zum Nachweis der Wasserstoffempfindung eines Rohrstahts

Zur Bereitstellung eines Rohrwerkstoffes für die untertägige Speicherung von Wasserstoff wurde im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS der Rohrwerkstoff X56M zum Ausschluss wasserstoffbedingter Werkstoffschädigungen und Korrosionserscheinungen untersucht und in Kapitel 3.5 und 3.6 dieses Leitfadens dargestellt. Die Auswahl dieses Pipelinestahls, spezifiziert in der API 5L „Seamless and Welded Pipe“ PSL2 (45th Edition, Product Specification Level, 2007), erfolgte mit der Zielstellung des Einsatzes dieser Stahlmarke als Werkstoff J55 gemäß API 5CT für Untertageanwendungen. Bei

den geprüften Rohren aus X56M handelt es sich um einen thermomechanischgewalzten Stahl, der bei der Rohrherstellung mit einer Längsnaht geschweißt wurde. Das Grundgefüge des Stahls ist in Abweichung zu den Empfehlungen der EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 nicht normalisiert, sondern bainitisch.

Die Untersuchung umfasste Prüfungen am Grundwerkstoff, an den HFI-geschweißten Längsnähten und an hergestellten Rundschweißnähten, die mit einer Schmelzschweißtechnologie gefertigt wurden. Beginnend mit der Durchführung üblicher, zerstörender Werkstoffprüfungen zur Klassifikation des Werkstoffes wie Zugversuch und Kerbschlagbiegeprüfung, die einerseits die Kennwerte im Zertifikat und andererseits die Zulässigkeit der angewendeten Schweißtechnologien zur Herstellung von Verbindungen belegten, wurden anschließend Prüfungen zum Nachweis der Sauer gasbeständigkeit und spezielle Prüfungen zur Beurteilung der H₂-Eignung durchgeführt.

Während bei der Prüfung der Sauer gasbeständigkeit mit dem HIC-Test (Hydrogen Induced Cracking) eine akzeptable Anzahl kleiner Blister auftrat, wurden bei der SSC-Prüfung des Grundwerkstoffes, der HFI-Längsschweißnaht und auch der schmelzgeschweißten Rundnaht keine Risse nachgewiesen. Beide Prüfungen ergaben die Zulässigkeit des Einsatzes dieses Stahles für Sauer gasanwendungen.

Der Einfluss von Wasserstoff auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften von metallischen Werkstoffen wird üblicherweise mit speziellen Prüfverfahren erfasst. Aus vielen Prüfungen an H₂-beladenen Zugproben ergab sich, dass unter H₂-Einfluss die Zähigkeit des Werkstoffes sinkt, während die Festigkeitseigenschaften, wie Streckgrenze und Zugfestigkeit, im Wesentlichen nicht beeinflusst werden. Ein Zähigkeitsverlust wird beim Zugversuch durch die Abnahme der Bruchdehnung und Brucheinschnürung sowie der Zunahme des Spröbruchanteils ersichtlich.

Da der H₂-Gehalt von Werkstoffproben einen markanten Einfluss auf die Prüfergebnisse besitzt, wird bei der Prüfung die höhere H₂-Konzentration in Bereichen höherer Zugspannungen, beispielsweise bei Slow-Strain-Rate-Tests (SSRT), genutzt. Die Durchführung dieser Prüfungen an den Proben aus X56M unter einer H₂-Atmosphäre ergab für reinen Wasserstoff nur geringe Einbußen bei der Bruchdehnung.

Abschließend wurden für den untersuchten Werkstoff bruchmechanische Lebensdauerberechnungen durchgeführt.

Die vorliegenden Ergebnisse aller durchgeführten Prüfungen bestätigen eine uneingeschränkte Eignung des X56M für H₂-Anwendungen. Auf Grund seiner chemischen und mechanischen Eigenschaften der untersuchten Charge ist die Verwendung dieses Stahls als Stahlmarke J55 nach API 5CT möglich. Damit wäre der Einsatz des X56M als J55 für Untertageanwendungen bei der Speicherung von Wasserstoff prinzipiell machbar. Notwendige Einschränkungen der chemischen Zusammensetzung, des Wärmebehandlungszustandes usw. sind für einen H₂-geeigneten J55 gemäß dem untersuchten Werkstoff im Vorschriftenwerk nicht verankert. Für die Spezifikation eines H₂-geeigneten J55 nach API 5CT sind derzeit dann – neben den üblichen Anforderungen an den Werkstoff gemäß API 5CT – die Besonderheiten der chemischen Zusammensetzung und des Wärmebehandlungszustandes gemäß API 5L anzugeben.

Mit dem Nachweis der Eignung eines J55 nach API 5CT auf der Basis eines X56M für H₂-Anwendungen ist ein Anfang zur Herstellung einer geeigneten Bohrlochkonstruktion inklusive Komplettierung

und Bohrlochkopf vollzogen. Auf Grund unterschiedlicher mechanischer und auch korrosiver Beanspruchungen beispielsweise in größeren Teufen durch den zunehmenden Außendruck oder für Dichtungsbereiche bei Untertageausrüstungen wie Untertagesicherheitsventile sind für die Erstellung einer betriebsbereiten Kaverne für die H₂-Speicherung neben dem J55 auch andere, höherfeste oder korrosionsresistente Stähle notwendig. Ein Nachweis der Eignung dieser Stähle, die für die Errichtung und den Betrieb einer Kaverne zur Speicherung von Wasserstoff unverzichtbar sind, steht noch aus.

Dafür ist auf Basis der durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse für den Eignungsnachweis des X56M ein sinnvoller, notwendiger Prüfumfang für die Zulassung anderer Stahlmarken zur Ausrüstung von Kavernen für die H₂-Speicherung als Konsens festzulegen. Dieser Prüfumfang inklusive der Akzeptanzkriterien bildet dann eine erste Grundlage zur Festlegung von Regeln zur Werkstoffauswahl bei untertägiger Speicherung von Wasserstoff. Eine Weiterentwicklung dieser Regeln zu festgelegten Spezifikationen in Normen, wie z. B. die Beschreibung der PSL im Anhang H der API 5CT, wäre wünschenswert. Nur mit dem Eingang der Erkenntnisse zur Bestimmung und Prüfung von Werkstoffen für Untertageausrüstungen bei H₂-Anwendungen in verbindliche Normen und Regeln kann für Betreiber wie auch Projektanten und Ingenieure Rechtssicherheit gewährleistet werden.

7.3.1.3 Werkstoffe für Untertageausrüstung und Bohrlochköpfe

Für die Herstellung einer Kavernenkomplettierung gemäß dem Stand der Technik wird eine Untertageausrüstung benötigt. Üblicherweise beinhaltet die Komplettierung eines Bohrlochs zur Speicherung gasförmiger Medien Komponenten wie Packer, Landenippel, Untertagesicherheitsventile (UTSAV) u. a., die zur Realisierung eines Mehrbarrierenkonzeptes notwendig sind. Gemäß den Vorgaben der gültigen Regelwerke für UGS wie der Tiefbohrverordnungen der Bundesländer oder des Bundesverbandes Erdgas, Erdöl und Geoenergie e. V. (BVEG) sind einige Ausrüstungskomponenten wie z. B. ein UTSAV für einen regulären, genehmigungsfähigen Speicherbetrieb unumgänglich.

Für Untertageausrüstung gelten im Wesentlichen die gleichen Voraussetzungen wie für Rohrwerkstoffe. Betriebserfahrungen für Untertageausrüstung in Kavernen zur Speicherung von Wasserstoff liegen bisher nicht vor. Eignungsnachweise für Stahlgüten zur Fertigung von Untertageausrüstungen sind derzeit sowohl durch Hersteller als auch durch Forschungsprogramme nicht erbracht. Sie waren auch nicht Bestandteil dieser Untersuchungen. Eine Kavernenkomplettierung für Wasserstoff mit zertifizierter Untertageausrüstung wäre demzufolge momentan nicht realisierbar. Und das nicht zuletzt deshalb, weil bis heute für eine solche Untertageausrüstung kein Markt besteht.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei einem angemessenen Bedarf an Ausrüstung für die H₂-Speicherung die Hersteller diese Eignungsnachweise erbringen werden. Gegenwärtig sprechen keine Ergebnisse aus vorliegenden Materialuntersuchungen für obertägig angewendete Werkstoffe gegen ein positives Prüfergebnis solcher Untersuchungen.

Die Eignungsnachweise für die Werkstoffe von Untertageausrüstung zur H₂-Speicherung in Kavernen können aus derzeitiger Sicht auch nur durch die Hersteller der Ausrüstungskomponenten erbracht werden, da es sich bei vielen Ausrüstungskomponenten wie Packer, UTSAV u. a. um sehr komplexe Bauteile handelt, die aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien bestehen, die wiederum unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt sind. D. h., die verwendeten Werkstoffe sind produkt- und herstellerspezifisch, sodass nur eine genaue Kenntnis der bestehenden Beanspruchungen und eingesetzten Materialien eine sinnvolle Nachweisführung ermöglicht.

Im Gegensatz hierzu können einige Hersteller von Bohrlochkopfverflansungen und -armaturen bereits H₂-geeignete Ausrüstung anbieten. Sie beziehen sich für ihre Ausrüstung mit H₂-Eignung auf Erfahrungen aus Obertageanwendungen. Die Lieferung H₂-geeigneter Bohrlochköpfe ist somit bereits heute möglich.

7.3.1.4 Zement, Verbund Salzgestein/Zement/Casing

Für die technische Dichtheit von Gasspeicherkavernen ist ein intakter Verbund Salzgestein/Zement/Casing essenziell. Für die Erdgasspeicherung liegen vielfältige Untersuchungsergebnisse und Erfahrungen für verschiedene Zementgesteine und Gesteine vor. Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden verschiedene laborative Untersuchungen an Einzelproben von Zementstein, Salzgestein und Anhydrit sowie an Verbundproben von Zementstein/Salzgestein bzw. Salzgestein/Zement/Casing durchgeführt. Die Testausführungen und Ergebnisse werden in den Kapiteln 4.4 und 7.3.3 näher ausgeführt.

Analog zur Erdgasspeicherung hat der Nachweis der technischen Dichtheit (technische Installation, Verbund Salzgestein/Zement/Salzgestein) für H₂-Speicherkavernen mittels eines Dichtheitstests (Mechanical Integrity Test, MIT) zu erfolgen. Der Schwerpunkt des Verbundvorhabens H₂-UGS bestand darin, anerkannte Prüf- und Bewertungsverfahren hinsichtlich der H₂-Anwendung zu untersuchen und ggf. anzupassen bzw. zu erweitern (siehe auch Kapitel 9.2.1).

7.3.1.5 Mehrbarrierensystem

Grundlagen

Im BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ (07/2021) sind die Bedingungen, unter welche eine Bohrung als integer innerhalb der vorgesehenen Betriebsphasen gilt, definiert. Mit technischen, operativen und organisatorischen Maßnahmen ist der sichere Betrieb über den gesamten Lebenszyklus einer Bohrung zu gewährleisten. Dazu zählt die Herstellung einer Bohrung mit physischen/mechanischen Bohrungsbarrieren. Der wesentliche Betriebsparameter zur Beurteilung der Notwendigkeit von mehr als einer Barriere ist das Open-flow Potential. Dieses ist definiert als die maximale beständige Fließrate aus der Lagerstätte bei atmosphärischem Druck am Bohrlochkopf. Der BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ fordert für Bohrungen mit einem Open-flow Potential grundsätzlich zwei voneinander unabhängig verifizierte Bohrungsbarrieren. Dementsprechend ist für die Kavernenspeicherung von Wasserstoff ein Zwei-Barrieren-System anzuwenden. Die Integrität einer Bohrungsbarriere muss durch betriebliche Maßnahmen wie Überwachungssysteme, Praktiken und Prozeduren sichergestellt werden. Jedes Barriere-Element muss daher für die gesamte Lebensdauer der Bohrung überwacht und kontrolliert werden. Im Folgenden werden verschiedene Begrifflichkeiten, wie sie im Weiteren verwendet werden, definiert.

Begriffsdefinitionen

Akzeptanzkriterien	Die BVEG beschreibt mit Hilfe von Akzeptanzkriterien Verfahren, mit denen die Integrität einer Bohrung, die nicht nach diesem Stand der Technik hergestellt wurde, gewährleistet werden kann.
Barrieren allgemein	<p>Barrieren sind eine Kombination aus Komponenten oder Verfahren, die zur Zuverlässigkeit des Bohrungssystems beitragen, um unkontrollierten Fluidfluss zu verhindern oder zu beenden. Barrieren können sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Hardware-Barrieren</u>: Herstellung der Bohrung mit physischen/mechanischen Bohrungsbarrieren (ausgelegte, eingebaute und geprüfte Ausrüstung); • <u>betriebliche Barrieren</u>: Die Integrität der Hardware-Barrieren muss durch betriebliche Maßnahmen wie Überwachungssysteme, Praktiken und Prozeduren sichergestellt werden; • <u>menschliche Barrieren</u>: Kompetenz, Ausbildung; • <u>administrative Kontrollen</u>: Aufgabenzuweisung, Bereitstellung von Ressourcen, Audits, Überprüfungen.
Barriere-Element	Eine Barriere setzt sich aus einzelnen Barriere-Elementen zusammen, z. B. Rohrtouren, Bohrlochkopf, Packer, Formation, etc.
Barriere-Fehler	Das Kriterium der technischen Dichtheit eines oder mehrerer Barriere-Elemente wird nicht mehr erfüllt, ohne dass es zu einer Leckage von Fluiden aus der Bohrung nach außen kommt, weil eine sekundäre Barriere vorhanden ist und/oder aufgrund der vorherrschenden Druckbedingungen untertage nur ein Fluss in das Bohrloch erfolgen kann.
Barrieren-Philosophie	Der Betreiber muss eine Philosophie festlegen und dokumentieren, worin die Grundsätze für die Aufrechterhaltung der Kontrolle von Bohrungsfluiden festgelegt sind. Die Barrieren-Philosophie sollte die anzuwendenden Barrieren (bohrungsbezogen, betrieblich, menschlich) und administrative Kontrollen beschreiben.
Bohrungsintegrität nach BVEG	„Die technische Integrität einer Bohrung ist gegeben, wenn die in einer Bohrung enthaltenen Fluide bei jeder möglichen Kombination von Druck und Temperatur, der sie innerhalb der vorgesehenen Betriebsbedingungen ausgesetzt werden können, sicher beherrscht werden.“
Bohrungsintegrität nach DIN EN ISO 16530-1 (11/2017)	Bohrungsintegrität bezieht sich darauf, jederzeit die vollständige Kontrolle über Fluide innerhalb einer Bohrung aufrechtzuerhalten, durch Einsatz und Aufrechterhaltung einer oder mehrerer Bohrungsbarrieren, um unbeabsichtigte Fluidbewegungen zwischen Formation mit unterschiedlichen Druckregimen oder unkontrollierten Austritt in die Umgebung zu verhindern.

BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“	Der BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ definiert den Stand der Technik für Neubohrungen auf dem deutschen Festland. Sie beschreibt aber auch Verfahren und Bedingungen für Bohrungen im Bestand, die ggf. nicht nach dem in der BVEG beschriebenen Stand der Technik hergestellt wurden, mit denen die Schutzziele gewährleistet werden können. Diese sind in den sogenannten Akzeptanzkriterien beschrieben.
DIN EN ISO 16530-1, 11/2017	Die DIN 165359-1 ist ein Leitfaden für den Bohrlochbetreiber zum Management der Integrität eines Bohrlochs während des gesamten Lebenszyklus. Dort wird die Bohrlochintegrität in zwei Hauptbestandteilen beschrieben: Sicherstellung der Integrität während der Auslegungs- und Herstellungsphase und Erstellung eines Bohrungsmanagementsystems für die gesamte Lebensdauer einer Bohrung, um die Integrität zu jedem Zeitpunkt gewährleisten zu können.
Integritätsfehler	Das Kriterium der technischen Dichtheit eines oder mehrerer Barriere-Elemente wird nicht mehr erfüllt. Eine Leckage von Fluiden aus der Bohrung nach außen ist möglich.
Open-flow Potential	Ist definiert als die maximale, beständige Fließrate aus der Lagerstätte bei atmosphärischem Druck am Bohrlochkopf.
Primäre Barriere	Die primäre Barriere ist im Kontakt mit Fluid und Druck.
Sekundäre Barriere	Die sekundäre Barriere dient als Rückfallabsicherung und garantiert die Sicherheit für den Fall des Versagens der primären Barriere. Die sekundäre Barriere sollte nach Möglichkeit die primäre Barriere umhüllen.

Barriere-Elemente

Tabelle 55: Beschreibung und Funktion der Barriere-Elemente

Barriere-Element	Beschreibung	Funktion
Formation	Durchbohrte undurchlässige geologische Formation, die an den äußeren Futterrohrtour-Ringraum mit dem darin enthaltenen abdichtenden Material (Zement) angrenzt oder an Stopfen, die im Bohrloch platziert werden.	Gewährleistung einer dauerhaften und undurchlässigen Abdichtung, die die Migration von Fluiden zur Oberfläche oder in angrenzende geologische Schichten verhindert.
Futterrohrtour	Letzte zementierte Rohrtour (LzRT)	Bohrung nach außen hin abschließen; Fluss von Produktions- und Injektionsfluiden auf das Innere der verrohrten Bohrung beschränken; Eindringen von Fluiden aus Gebirgsschichten bzw. Abfluss in Gebirgsschichten verhindern.
Zementation Futterrohrtour	Zementmantel im Ringraum zwischen konzentrischen Futterrohrtouren oder Futterrohrtour und der Formation.	Schaffung einer dauerhaften und undurchlässigen Abdichtung entlang einer Bohrung, die Migration von Fluiden in den jeweiligen Ringräumen verhindert; Druckbarriere ist für Einwirkungen von oben oder unten; Das Bohrloch stabilisiert; Futterrohrtouren strukturell unterstützt und vor Einwirkungen von Lagerstättenfluiden schützt.
Packer	Element bestehend aus einem Gehäuse mit einem Verankerungsmechanismus zur LzRT und einem ringförmigen Dichtelement.	Schaffung eines dichten Abschlusses für den Ringraum zwischen Förderrohrtour und LzRT, um Kommunikation zwischen Formation und Ringraum 1 zu unterbinden; Schaffung eines dichten Ringraumes zwischen Förderrohrtour und LzRT zur Aufnahme von Korrosionsschutz-Flüssigkeit und zum Monitoring der Dichtigkeit der angrenzenden Elemente.

Barriere-Element	Beschreibung	Funktion
Steigrohrstrang	Förderrohrtour	Schaffung eines Fließweges für Speicherfluide bis zu Tage bzw. von Injektionsfluiden in den Speicher
Bohrlochkopf	Abdichtflansche mit Seitenauslässen zu den Ringräumen der Bohrung mit Aufnahme diverser Armaturen und Abhängungen von Förderrohrtour und IzRT mit Dichtelementen.	Abhängen und Abdichten der IzRT und der Förderrohrtour, Anschluss des Eruptionskreuzes sowie Verhindern von Fluss aus Bohrloch und Ringräumen in Formationen und Umwelt.
Untertagesicherheitsventil (UTSAV) <u>übertägig angesteuert</u>	Vorrichtung in der Förderrohrtour mit einem Öffnungs- und Schließmechanismus zum Abdichten des Förderrohrtour-Kanals.	Barriere-Element für das aktive Einschließen einer Bohrung; Verhinderung des Flusses von Fluiden in Richtung übertage durch selbstständiges Schließen im Falle eines Bruchs der Bohrlochverflanschung.
UTSAV <u>untertägig angesteuert</u>	Vorrichtung in der Förderrohrtour mit einem Öffnungs- und Schließmechanismus zum Abdichten des Förderrohrtour-Kanals.	Verhinderung des Flusses von Fluiden in Richtung übertage durch selbstständiges Schließen im Falle eines Bruchs der Bohrlochverflanschung.

Entsprechend der Akzeptanzkriterien des BVEG-Leitfadens „Bohrungsintegrität“ wird der Erstdnachweis der Wirksamkeit der Barriere-Elemente nach Herstellung geführt. Im Leitfaden wird unterschieden in:

- „muss“ (M) – Mindestanforderung,
- „soll“ (S) – strenge Vorgabe, von der nur in zu begründenden Ausnahmefällen abgewichen werden kann,
- „kann“ (K) – Empfehlung, von der jederzeit abgewichen werden kann.

Leistungsnormen und Akzeptanzkriterien bilden die Basis für den Nachweis der fortgesetzten Wirksamkeit der Barriere-Elemente in den nachfolgenden Lebenszyklus-Phasen der Bohrung durch Prüf- und Überwachungsmaßnahmen. Für die Durchführung dieser Maßnahmen ist in der Regel Ausrüstung erforderlich, deren Notwendigkeit und Installationsverfahren im Bohrprogramm beschrieben werden sollten.

Tabelle 56:

Akzeptanzkriterien

Barriere-Element	Planung und Herstellung	Erstnachweis
Formation	<p>Für die Formation in der erforderlichen Teufe gilt (M):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Formation muss undurchlässig sein; • Der Bohrfad in dieser Formation muss abseits von Rissystemen und/oder Störungen verlaufen, die zu Abflüssen oder Querflüssen führen können; • Die ECD (Equivalent Circulation Density) muss kleiner als der Frack Gradient sein; • Barriere-Formationen dürfen durch Änderungen des Lagerstättendrucks in ihren Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden (Deplettierung, Kompaktion, Fracking, Reaktivierung von Störungen); • Die Formation schließt direkt an das Material im Futterrohrtour-/Liner-Ringraum (z. B. Futterrohrzement) bzw. den Stopfen im Bohrloch an. 	<p>Die Formationsintegrität muss durch eine der folgenden Methoden nachgewiesen werden (M):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formationsintegritätstest (FIT), • Formationsdrucktest (LOT), sollte gefolgt werden von einer Einschließphase, • erweiterter Formationsdrucktest (XLOT), wenn die minimale Horizontalspannung noch nicht bekannt ist, • dokumentiertes geologisches Modell.
Futterrohrtour (LzRT)	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung der Rohrtouren inklusive ihrer Verbindungen, um allen Belastungen während des Lebens der Bohrung standzuhalten (Regelbetrieb und mögliche Ereignisse) (M); • Anwendung von Sicherheitsfaktoren die u. a. Korrosion und Verschleiß berücksichtigen, Einbeziehung der Untertage-Temperatur für die Minderung der Streckgrenze (M); • Berücksichtigung von Biegebelastungen während des Einbaus für abgelenkte und horizontale Bohrungen (M); • Anwendung von akzeptierten und in technischen Regelwerken dokumentierten Berechnungsmethoden (M); 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachweis, dass die Bohrung den höchsten anzunehmenden Druckbelastungen in ihrem Lebenszyklus standhält; • Der Wirksamkeitsnachweis setzt sich zusammen aus der Qualitätskontrolle beim Hersteller, einer Montage gemäß definierter Montageanleitung und einem hydraulischen Dichtigkeitstest im Bohrloch. Vorgaben für die anzulegenden Differenzdrücke in Bezug auf den Dichtigkeitstest sind in einem Arbeitsprogramm zu definieren (M); • Bei Dichtigkeitstest im Rahmen des Zementationsvorganges: Aufgabe eines Druckes nach Stopfenanschlag deutlich höher als der letzte (auswertbare) Zirkulationsdruck vor Anschlag (min. 10 bar bis zu 100 bar bzw.

Barriere-Element	Planung und Herstellung	Erstnachweis
	<ul style="list-style-type: none"> • Gasbohrungen: Auslegung drucktragender Futterrohre im Kontakt mit Gas gasdicht. Ausnahme: Ankerrohrtour, die Shallow Gas unter erwarteten normalen Drücken ausgesetzt sein kann (M); • Lagerung und Handhabung von für den Einbau bestimmten Rohren, die Schäden am Rohrkörper und an den Gewinden vor Einbau vermeidet (S); • Konditionierung des Bohrloches vor Einbau (S); • Bei Schraubverbindung: Herstellung der Verbindungen nach Herstellervorgaben. Drehmomentaufzeichnung mit Verschraub-Diagramm zur Auswertung bei gasdichten Verbindern (M); • Bei Verschweißung: zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung (M); • Rohrtour-Zentrierung im zu zementierenden Bohrlochbereich mit Hilfe von Zentralisatoren, deren Anzahl und Position rechnerisch bestimmt wird (S). 	<ul style="list-style-type: none"> • 70 % der Rohrinnendruckfestigkeit), der sich über 10 Minuten hinweg nicht ändert (M); • Bei Dichtheitstest nach Zementation mit Bohrspülung: Durchführung nach ausreichender Abbindung und vor Aufbohren des Zementes mit einem für die jeweilige Verrohrung relevanten Druck. Die Testdauer sollte mind. 30 Minuten betragen. In dieser Zeit muss in der Druckentwicklung eine klare Tendenz zu einem stabilen Druckwert erkennbar sein, der mehr als 90 % des Ausgangswerts beträgt (M); • Kavernen, vor Beginn des Solprozesses: Nachweis der hydraulischen bzw. der (technischen) Gasdichtheit der IzRT und Rohrschuhzementation unter Ansatz der Anforderungen im Solprozess eingesetzten Blankets (flüssig oder gasförmig) (M); • Gaskavernen, vor der Erstbefüllung: Nachweis der (technischen) Gasdichtheit der IzRT und der Rohrschuhzementation mit Stickstoff und maximalem Betriebsdruck (M).
<p>Zementation LzRT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zementgüten/-dichten auf der Basis von Poren- und Frackdruck-Prognosen sowie erwartetem Druck, Temperatur und mechanischen und chemischen Belastungen und Wechselbelastungen (M); • Abstimmung von Dichten und rheologischen Eigenschaften von Spülung, Zementbrühe und Trennfluid zwischen Spülung und Zementbrühe, um eine maximale Spülungsverdrängung vor Platzierung der Zementbrühe zu erreichen und Vermischungszonen zwischen Spülung und Zement zu verhindern (M); 	<ul style="list-style-type: none"> • Drucktest nach Aufbohren des Zementes mit dem höchsten zu erwartenden Druck, mit dem dieser Rohrschuh und der unmittelbar darunterliegende Gesteinsabschnitt im Laufe der Herstellung und des Betriebes der Bohrung belastet wird (S); • Feststellung des zementierten Intervalls durch eine der nachfolgenden Methoden (M): <ul style="list-style-type: none"> ○ Messung des Zementkopfes (z. B. Temperaturmessungen);

Barriere-Element	Planung und Herstellung	Erstnachweis
	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung der Abbindezeit (Versteifungszeit) der Zementbrühe unter Berücksichtigung der realen Bohrlochtemperatur (M); • Nachweis der gewünschten Eigenschaften der Zementrezeptur in Labor-Untersuchungen (S); • Rohrtourzentrierung im zu zementierenden Bohrlochbereich für optimale Spülungsverdrängung und Zementplatzierung mit Hilfe von Zentralisatoren, deren Anzahl und Position rechnerisch bestimmt wird (S); • Planung der Zementationsstrecken; <ul style="list-style-type: none"> ○ Ankerrohrtour: Auslegung für die Belastungen der Bohrlochkopf Ausrüstung und des Betriebes, Zementation bis zu Tage (M); ○ Zwischenrohrtour und Produktionsrohrtour: Zementationshöhe abhängig von den technischen und geologischen Gegebenheiten bis zu einer planmäßig festgelegten Teufe (S); ○ Grundsätzlich: Mindestens 100 m MD über Futterrohrschuh. Reicht die Rohrtour durch eine Zuflusszone, Zementation von mindestens 200 m MD über diese Zone (M); • Bestimmung des für die Zementation erforderlichen Volumens (M); • Anpassung der geplanten Zementrezeptur und Zementationshöhe in Kenntnis der festgestellten Bedingungen des Bohrlochs (M); • Untersuchung der hergestellten Zementbrühe auf geplante Eigenschaften (M); 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Verdrängungseffizienz basierend auf Aufzeichnungen des Zementationsvorganges (verpumptes Volumen, Rückfluss während der Zementation, etc.) in Übereinstimmung mit dem Zementationsprogramm; ○ Bei Abweichungen vom Programm sowie für Produktionsrohr Touren, Nachweis der Zementation durch alternative Verifizierungsverfahren, z. B. akustische Bohrlochmessungen. Die Messungen sollten azimutale/segmentierte Daten liefern; • Für die Qualifizierung einer Zementation als Bohrungsbarriere-Element, Nachweis von Mindeststrecken für die Zementation oberhalb eines Zuflusshorizontes (M): • 50 m MD bei Zementationen, nachgewiesen durch Verdrängungsberechnungen oder 30 m MD bei Nachweisen durch Messungen; • 2 x 30 m MD bei Nachweisen durch Messungen, wenn die Zementation Teil der ersten und der zweiten Barriere ist; • Kavernen, vor Beginn des Solprozesses: Nachweis der hydraulischen bzw. der (technischen) Gasdichtheit der gesamten Bohrung einschließlich der IzRT unter Ansatz der Anforderungen des im Solprozess eingesetzten Blankets (flüssig oder gasförmig) (M); • Gas-Kavernen, vor Erstbefüllung: Nachweis der (technischen) Gasdichtheit der IzRT und des Rohrschuhes mit Stickstoff und maximalem Betriebsdruck (M).

Barriere-Element	Planung und Herstellung	Erstnachweis
	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfung der Zirkulationsmöglichkeit des Bohrloches (M); • Spülungskonditionierung, um eine maximale Verdrängung durch das Trennfluid und die Zementbrühe zu erreichen (M); • Bewegung des Rohrstranges während der Zementation, bevorzugt drehend (K). 	
Packer	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung für erwartete Betriebs-/Fluid-Bedingungen (M); • Packer Herstellung und Test nach ISO 14310 (2019) (S); • Bohrungsvorbereitung, z. B. durch entsprechende Reinigungen, um einen störungsfreien Setzvorgang sowie einen direkten Kontakt des Packerelementes zur Rohrwandung sicherzustellen (M); • Packer-Setzteufe, die sicherstellt, dass Leckagen von Produktionsrohrtour und/oder Produktionsliner unterhalb des Packers von Barrieren sicher umschlossen sind (M). 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitätskontrolle beim Hersteller (M); • Ringraumdruckprobe nach Setzen (M); • Belastungsteste nach Setzen auf Kompression/Zug, sofern technisch machbar (K).
Förderrohrtour	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung für erwartete Betriebs-/Fluid-Bedingungen (M); • Gasbohrungen: für Stränge, die während ihrer Lebensdauer mit Gas in Kontakt kommen, gasdichte Auslegung aller Komponenten des Steigrohrstranges (M); • Für Packer-Komplettierungen: Beschreibung der erwarteten Betriebszustände und Berechnung der Triaxial-, Kollaps-, Berst- und Axialbeanspruchungen des Steigrohrstranges (M); 	<ul style="list-style-type: none"> • Verschraubte Rohre: Verschraub-Protokoll (Torque-Turn-Diagramm bzw. „Torque-Position-Record“) (M), in der Regel Drucktest in Kombination mit Packer (K); • Verschweißte Rohre: Drucktest, zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (ZfP) (M).

Barriere-Element	Planung und Herstellung	Erstnachweis
	<ul style="list-style-type: none"> • Definition von Sicherheitsbeiwerten unter Berücksichtigung von z. B. Temperatureffekten, Korrosion, Abnutzung (M); • Steigrohrstrang-Auswahl unter Berücksichtigung von z. B. (S): <ul style="list-style-type: none"> ○ Belastungen durch Zug und Druck, ○ Berst und Kollaps Kriterien, ○ Fließraten im Steigrohr und ggf. im Ringraum, ○ Korrosive und abrasive Bestandteile, ○ Festigkeitsreduktion durch Temperatureffekte. • Bei verschraubten Rohren für „Gasproduktion/-injektion“: Herstellung gasdichter Premium-Verbindungen unter Beachtung der Herstellervorgaben mit protokollierter drehmomentkontrollierter Verschraubung (z. B. Torque-Turn-Diagramm) (M); • Bei verschweißten Rohren: Herstellung der Verbindungen in der Regel durch konventionelle Schweißtechnik und zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung. Ggf. Durchführung korrektiver Maßnahmen zur Behebung festgestellter Defekte (M). 	
Bohrlochkopf	<ul style="list-style-type: none"> • Der Nenndruck jeder Sektion des Bohrlochkopfes muss größer sein als der maximale Bohrlochkopf-Schließdruck, der die jeweilige Sektion während ihres Lebenszyklus ausgesetzt sein kann, plus einen definierten Sicherheitsbeiwert (M); • Der Kopf muss für alle Ringräume über Vorrichtungen zum Anschluss von Messeinrichtungen verfügen, um 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Bohrlochkopf sowie die Ringraumzugänge mit Absperreinrichtungen und Futterrohr Dichtelemente müssen für den jeweiligen Betriebsdruck auf Dichtheit geprüft werden (M); • Test aller Absperreinrichtungen und Verflansungen des Eruptionskreuzes mit dem Bohrlochkopf bis mindestens dem 1,3-fachen des zu erwartenden maximalen Betriebsdruckes (M).

Barriere-Element	Planung und Herstellung	Erstnachweis
	<p>ein Monitoring der Ringraumdrücke sowie ein Zuführen/Ablassen von Fluiden in/aus dem Ringraum zu erlauben (M);</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ist vorgesehen, durch den Bohrlochkopf aus/in einen Ringraum zu produzieren/injizieren, muss der Bohrlochkopf entsprechend ausgelegt und qualifiziert werden, um die Integrität der Bohrung zu gewährleisten (M); • Futterrohr-Abhängevorrichtungen müssen eine Abdichtung im Normalbetrieb und in Bohrlochkontroll-Situationen gewährleisten (M); • Installation entsprechender Absperrereinrichtungen an den jeweiligen Seitenauslässen (M). <p>Eruptionskreuz (E-Kreuz)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auslegung erfolgt nach Open-flow Potential Erfordernis mit ein oder zwei Barrieren (M); • Ausstattung des Eruptionskreuzes mit mindestens einer Hauptabsperr-Armatur und Absperrhähnen für Leitungen nach Untertage (M); • Gasspeicherbohrungen: auf Clusterplätzen von Gasspeicherbohrungen Planung der Eruptionskreuze zusätzlich feuerresistent gemäß API 6FA (K). 	
UTSAV <u>übertägig</u> angesteuert	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung für erwartete Betriebs-/Fluid-Bedingungen (M); • Ausführung betriebssicher, selbsttätig schließend (M). 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachweis der Funktionsfähigkeit und Dichtheit des UTSV in Anlehnung an API Spec 14A/ISO 10432 im Zuge der Inbetriebnahme (M).

Barriere-Element	Planung und Herstellung	Erstnachweis
UTSAV <u>untertägig</u> angesteuert	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung für erwartete Betriebs-/Fluid-Bedingungen (M); • Ausführung betriebssicher, selbsttätig schließend (M). 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachweis der Funktionsfähigkeit und Dichtheit des UTSV in Anlehnung an API Spec 14A/ISO 10432 im Zuge der Inbetriebnahme (M).

Überwachung der Barriere-Elemente

Neben der Definition der Barriere-Elemente ist auch die Überwachung dieser erforderlich, um sicherzustellen, dass die Schutzfunktion der Barrieren während der verschiedenen Lebenszyklen aufrechterhalten bleibt.

Tabelle 57: Überwachung/Monitoring der Barriere-Elemente

Barriere-Element	Überwachung/Monitoring
Formation	Keine
LzRT	Bei geschlossenem Ringraum (RR), Druck-Überwachung von RR I (M), Druck-Überwachung der Folge-Ringräume in regelmäßigen Abständen, jeweils mit Vorgabe von Schwellwerten (M); Ereignisabhängig (M) und ggf. bei Umnutzung, Überprüfung der fluid-benetzten LzRT auf Korrosion und Abnutzung durch z. B. Inspektion und/oder Drucktest.
Zementation LzRT	Regelmäßige Druck-Überwachung der Ringräume oberhalb von Zementationen (M); Ereignisabhängig Messung der Zementation, vorzugsweise bei Vorlage einer Nullmessung (K).
Packer	Regelmäßige, ggf. kontinuierliche Druck-Überwachung von RR A am Bohrlochkopf (M).
Förderrohrtour	Regelmäßige, ggf. kontinuierliche Druck-Überwachung von RR A mit Vorgabe von Schwellwerten (M).
Bohrlochkopf	Prüfung der Ringraum-Armaturen an den Seitenauslässen in regelmäßigen Abständen auf Funktionsfähigkeit, mindestens gemäß anwendbarer Tiefbohrverordnung (BVOT) (M); Regelmäßige, ggf. kontinuierliche Drucküberwachung von Ringraum A zur Identifikation von Druck-Anomalien. Überprüfung der Drücke der anderen Ringräume in regelmäßigen Abständen (M); Beobachtung von Bohrlochkopfbewegungen und Vergleich mit Auslegungswerten (z. B. für Kavernen) (K); Überprüfung zugänglicher Dichtelemente ereignisabhängig auf Dichtigkeit, mindestens gemäß anwendbarer BVOT (M); Regelmäßige Inspektion des Bohrlochkopfes im Rahmen von Lokationsbefahrungen auf seinen allgemeinen Zustand sowie auf Anzeichen von Leckagen oder Blasenbildung, mindestens gemäß anwendbarer BVOT (M). <u>E-Kreuz</u>

Barriere-Element	Überwachung/Monitoring
	Prüfung aller Absperrarmaturen in regelmäßigen Abständen auf Funktionsfähigkeit und Dichtheit, mindestens gemäß BVOT (M); Jährlicher Test von angesteuerten Sicherheitsarmaturen entsprechend Herstellerspezifikation und Betriebsfestlegungen (M).
UTSAV <u>übertägig</u> angesteuert	Überprüfen von Funktionsfähigkeit und Dichtheit des UTSV in regelmäßigen Abständen, mindestens gemäß anwendbarer BVOT (M); Überprüfen der Leckageraten entsprechend ANSI/API RP 14B (M).
UTSAV <u>untertägig</u> angesteuert	Überprüfen von Funktionsfähigkeit und Dichtheit des UTSV in regelmäßigen Abständen, mindestens gemäß anwendbarer BVOT (M); Überprüfen der Leckageraten entsprechend ANSI/API RP 14B (M).

7.3.2 Untertägiges Komplettierungsdesign

7.3.2.1 Ausgangssituation

Aufgrund fehlender Kurz- und Langzeiterfahrungen bzgl. der dauerhaften Dichtheit und Widerstandsfähigkeit von üblicherweise eingesetzten untertägigen Bauteilen wie z. B. Rohre, Packer und Untertagesicherheitsventile gegenüber Wasserstoff kann aktuell nicht auf geprüfte Standardausrüstungen für die Bohrlochkomplettierung zurückgegriffen werden. Es ist jedoch absehbar, dass der Betrieb eines untertägigen H₂-Speichers ohne bewährte Sicherheitssysteme, wie es das Untertagesicherheitsventil darstellt, nicht genehmigungsfähig ist. Grundsätzlich sind die auf dem Markt verfügbaren Systeme hinsichtlich ihrer Funktionalität auch für den H₂-Einsatz geeignet.

Analog zur klassischen Gasspeicherung ergeben sich für die untertägige H₂-Speicherung die Hauptbaugruppen: Bohrlochkopf, Förder- bzw. Untertageinstallation und Untertagesicherheitsventil. Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden die für die Gasspeicherung bewährten Praktiken und Einbautechnologien von Untertagekomponenten analysiert und mögliche besondere Anforderungen für die H₂-Speicherung untersucht und bewertet.

Axiale Vorspannung

Vor dem Hintergrund, dass Wechselbeanspruchungen an Komplettierungselementen (insbesondere an Dichtungselementen) und Beanspruchungen der Förderkomplettierung durch Buckling ausgeschlossen werden sollen, werden bei der Kavernenspeicherung von Erdgas Förderrohrtouren in Vorspannung gezogen. Die zusätzliche Zugspannung soll thermisch bedingte Längenänderungen vollständig kompensieren, sodass sich der Förderstrang in jedem Betriebszustand im statischen Bereich befindet. Wasserstoff besitzt im für die gasförmige Speicherung relevanten Druckbereich negative Joule-Thomson-Koeffizienten. Der damit verbundene Effekt einer leichten Erwärmung bei der Druckreduzierung kommt jedoch nur bei einer Drosselung über ein Ventil oder einem Widerstand zum Tragen (isenthalpe Zustandsänderung). Dagegen sind die Prozesse der Verdichtung oder der Entspannung eines isolierten Behälters ebenso wie bei Erdgas (idealisiert) isentrope Vorgänge, die auf der einen Seite ebenfalls zur Temperaturzunahme bei der Kompression und auf der anderen Seite zur Abkühlung bei Druckentspannung aus einem Behälter führen. Für die Einspeisung von Wasserstoff,

die in der Regel mit Verdichtern realisiert wird, sind dadurch zunächst in etwa gleiche Temperaturverhältnisse wie bei Erdgas zu erwarten, da die Abkühlung über die nachgeschalteten Gas-Luftkühler von der Umgebungslufttemperatur bestimmt wird und damit unabhängig vom Medium ist. Bei der Ausspeisung haben thermodynamische Vergleichssimulationen dagegen (Bültemeier, et al., 2022) gezeigt, dass die Temperaturabsenkung in der Kaverne über eine längere Periode weniger stark ausgeprägt ist als bei Erdgas. Die resultierende Temperaturspreizung ist somit enger und damit moderater als bei Methan bzw. Erdgas. Einflussgebend sind die extrem geringere Dichte sowie eine höhere Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff, wodurch sich der Einfluss des umgebenden Gebirges und der Restsole (innerhalb der Kaverne) auf den Wärmetausch mit dem Gas erhöht und somit auch zur Dämpfung der Abkühlung beiträgt. Der Effekt schlägt sich ebenfalls bei der Entwicklung der Kopftemperatur durch. Hier sind auch bei anhaltenden Ausspeisephase mit hohen H₂-Raten keine solchen geringen Gastemperaturen wie bei Erdgas mit unter 0 °C bzw. mit vorheriger Abschaltung bei +2...+5 °C zu erwarten.

Überlagert ist allerdings der Fakt, dass der Druckunterschied zwischen Speicher und Kopf aufgrund der geringen Dichte ebenfalls um Größenordnungen kleiner ist als bei Erdgas. Das führt dazu, dass der zugehörige statische Kopfdruck ähnlich dem Wert des Speicherdruckes ist, also nur wenige bar geringer. Bei Erdgas kann die Differenz für die in Deutschland üblichen zulässigen maximalen Drücke 20 bar betragen, im Vergleich dazu nur 1 bis 2 bar bei Wasserstoff (Ansatz Rohrschuhteufe 1.000 m, Rohrschuhdruck 200 bar).

Ein- und Ausbau von Rohren unter Gas

Verfahrensbedingt müssen über die Betriebszeit von Gasspeicherkavernen Rohre unter Gasdruck bewegt werden, beispielsweise der Ausbau der Entleerungsrohrtour nach abgeschlossener Gas(erst)befüllung. Im Bereich der Methangasspeicherung bietet die Gas- und Ölfeldindustrie erprobte und zertifizierte Technik und Technologien an. Die Vorbereitung des zu bewegendes Stranges und der Ausbau mittels einer Snubbing Unit hat einen hohen sicherheitstechnischen Stand erreicht. Die Aspekte der Barrieren-Theorie spielen dabei eine übergeordnete Rolle.

Bestandskavernen

Für eine mögliche Speicherung von Wasserstoff kommen neben neu zu errichtenden Kavernen auch Bestandskavernen (Bohrungskategorie/Typ I.A) mit unterschiedlicher bisheriger Nutzung in Frage. Dazu zählen ehemalige Ölkavernen, Solkavernen, welche in ihrer Errichtungsphase mit dem Blanket Öl in Verbindung gekommen sind und Kavernen, die aus unterschiedlichsten Gründen eine Umwidmung erfahren sollen.

Aufgrund des Alters sowie der Bohrungshistorie (siehe Kapitel 2.2) der Bestandskavernen ist oftmals eine Neuverrohrung in Betracht zu ziehen. Da die Liquidierung alter Bohrlochkonstruktionen technisch sehr anspruchsvoll und teuer ist, kommen zusätzliche Verrohrungen in Betracht. Grundvoraussetzung ist hier die geomechanische Eignung der anstehenden oder der durch Fensterfräsen zu schaffenden Schichten. Neben der Eignungsprüfung der vorhandenen Bohrlochkomplettierung ist somit auch eine gebirgsmechanische Bewertung erforderlich. Dabei sind folgende Faktoren zu untersuchen bzw. zu bewerten:

- das Kriech- und Auflaufvermögen des Gebirges ist durch den Zeitverzug zwischen Abteufen der Bohrung und den Folgemaßnahmen zumindest zeitlich eingeschränkt. Unter Umständen bestehen keine optimalen Bedingungen für Neuverrohrungen (z. B. Liner);
- im Zuge der Hohlraumschaffung (Kaverne, unverrohrter Kavernenhals) entsteht an der Kontur eine Auflockerungszone. Infolgedessen ist am Stoß mit Micro-Rissen zu rechnen;
- Penetration der Kontur mit in der Kaverne verbliebenen Reststoffen (z. B. Öl-Blanket, ehemalige Speichermedien).

Zur Sicherung der technischen Dichtheit des Verbundes Salzgestein/Zement/Casing sind entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, z. B.:

- Bereißen des Salzstoßes, d. h., den Stoß frisch anzuschließen, bevor weitere technische Maßnahmen bzw. die Zementage folgen.
- Einsatz von Reinigungszusätzen,
- Einsatz von Spezialzement,
- technologische Wartezeit nach Rohrzementationen zur Erreichung der horizontalen Einspannung durch das Gebirge.

Bestimmte Aktivitäten lassen sich aber nur unter definierten Randbedingungen durchführen. Dazu zählt die Zementation von Rohrtouren. Besteht bei reinen Bohrlöchern die Möglichkeit eine Abgrenzung mit sogenannten viskosen Schichten zu erreichen, ist diese Verfahrensweise bei angeschlossener Kaverne nicht zielführend. Hier ist eine Abgrenzung durch eine mechanische Sperre notwendig. In der Komplettierungspraxis haben sich für diese temporäre Maßnahme Zementbrücken durchgesetzt. Durch den Einsatz von Zement lässt sich:

- eine klare Schichtgrenze einstellen,
- die erforderliche Festigkeit erreichen,
- die hydraulische Dichtheit zur Kaverne erreichen,
- der spätere Zugang zur Kaverne bohrtechnisch sicher gestalten.

Voraussetzung für das Einbringen einer Zementbrücke ist ein mechanisches Widerlager. Ein geeignetes Tool ist z. B. der Spider Plug, welcher bisher erfolgreich auf mehreren Lokationen eingesetzt wurde. Der Spider Plug ist eine von der UGS GmbH entwickelte und patentierte, mechanische Absperrvorrichtung zum Aufbau einer Basisbrücke aus verschiedenen fraktionierten Schüttgütern, welche in der Tegel von der groben zur feinen Körnung eingebracht werden (UGS-Innovationen). Darauf aufbauend wird eine hydraulische Sperre in Form einer oder mehrerer Zementbrücken eingebracht. Beim Fraunhofer IAP und bei der TU Bergakademie Freiberg wurden umfangreiche Versuchsreihen zur Optimierung des Spider Plugs durchgeführt. Er wurde erfolgreich im Rahmen von Reparaturarbeiten an Kavernen eingesetzt, besonders bei Kavernen mit großkalibigen Kavernenhälsen. Hier war der Einsatz herkömmlicher Absperrtechnologien nicht möglich.

Fallbezogen sind die jeweiligen Rand- und Einsatzbedingungen hinsichtlich Kavernenhalsdurchmesser und möglicher Setzteufe zu prüfen und festzulegen. Günstige Voraussetzung für das Setzen des Plugs sind markante Konturänderungen in Form von Einengungen oder Absätzen.

Die Anforderungen an die Zementation einer Neuverrohrung können qualitativ unterschiedlich sein. Während die Forderung nach der Befestigung der Rohre im Bohrloch für sämtliche Bohrungen uneingeschränkt zutrifft, können die Forderungen, insbesondere die Abdichtung von Ringräumen unterschiedlich sein. Die folgenden geologischen und technisch-technologischen Aspekte sind relevant:

1. Genaue Kenntnisse der Bohrlochsituation und der geologischen Beschaffenheit;
2. Das anstehende Gebirge sollte frei von Unregelmäßigkeiten und Auflockerungszonen infolge langer Standzeiten sein. Sofern umsetzbar ist der Stoß frisch aufzuschließen, um etwaige Wegsamkeiten infolge von Mikrorissen im Gebirge zu vermeiden;
3. Vermeidung von Exzentrizitäten, Anstreben eines nahezu runden Bohrlochs ohne Auskesselungen und Auswaschungen zur Erreichung optimaler Strömungsverhältnisse und Vermeidung von Mischzonen und Kanalbildung;
4. Gleichmäßiger nicht zu dicker Zementmantel. Je dicker der Zementmantel, desto größer ist die Angriffsfläche und damit die Gefahr für Undichtheiten;
5. Vollständige Verdrängung der im Ringraum befindlichen Flüssigkeit (wenn möglich turbulenter Fluss);
6. Einstellung eines Pumpregimes während der Zementation unter Beachtung der Druckbalance im Bohrloch zur Vermeidung von Verlusten sowie einer maximalen Verdrängung;
7. Zementrezepturen in Abhängigkeit von der geologischen Beschaffenheit und dem späteren Medium. Dabei ist das Festigkeits- und das Deformationsverhalten des Zementes unter Berücksichtigung des Zeit- und Temperatureinflusses zu beachten;
8. Zur besseren Qualitätskontrolle sollte das Anmischen der Zementschlämme in Abhängigkeit von der Menge möglichst im Vormischbehälter erfolgen;
9. Einsatz von Zement mit hoher Festigkeit und Verwendung von Zuschlagstoffen und Additiven, häufig Einsatz von Lead- und Tail-Zement;
10. Einsatz eines nicht schrumpfenden Zementsteines;
11. Bestmögliche Zentrierung des Casings durch den Einsatz von Hilfsmitteln. Für eine optimale Zementation wird ein Stand Off der Rohrtour von > 70 % angestrebt¹⁶;
12. Minimale Zementmantelbeanspruchung durch Druck und Temperatur.

7.3.2.2 Ausgewählte Untertagekomponenten

Bohrlochkopf

Der Bohrlochkopf ist Bestandteil sowohl der Bohrlochkonstruktion als auch der gastechnischen Komplettierung. Je nach Speicherart, Medium und Betreiberphilosophie ergeben sich verschiedene Anforderungen. Grundsätzlich sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Planung und Fertigung im Rahmen des Regelwerkes API Spezifikation 6A (11/2019),

¹⁶ Der Stand Off beschreibt die zentrische Ausrichtung der Rohrtour im Bohrloch, wobei 100 % die absolut mittige Platzierung beschreibt und 0 % das Anliegen der Rohrtour an der Bohrlochwand.

- mechanische Verankerung aller obertägig anstehenden Rohrtouren und Aufnahme der axialen Lasten,
- Abdichtung aller im Bohrlochkopf eingebundenen Rohrtouren,
- Absperrung des Förderstromes,
- Kontroll- und Überwachungsmöglichkeit aller Räume,
- Schnittstelle zwischen gastechnischer Komplettierung und obertägigen Anlagen.

Bei der technischen Umsetzung kommen folgende Prinzipien zum Tragen:

- Herstellung der drucktragenden Bauteile aus Schmiedestahl,
- redundante Abdichtung aller Rohreinbindungen, möglichst nachaktivierbar,
- redundante Absperrung aller Ringraumabgänge und des Steigraumes,
- Armaturen überwiegend in der Variante Kugelhahn,
- Flanschdesign mit „metallischer Dichtbuchse“ möglich,
- Steigraumseitiges autarkes Sicherheitssystem, Sicherheitsarmatur Typ Fail Safe,
- Innendurchgang des Bohrlochkopfes in der Bohrlochachse mindestens Innendurchgang der Förderrohrtour.

Verfahrenstechnisch erfolgt die Speicherung von Wasserstoff im Expansionsprinzip und ist somit der Erdgasspeicherung gleichzusetzen. Abbildung 172 zeigt eine schematische Darstellung eines Standard-Bohrlochkopfes. Auf dem Markt existieren bereits fertige Lösungen, die im Rahmen von Forschungs-/Leuchturnprojekten derzeit eingesetzt bzw. unter realen Bedingungen getestet werden.

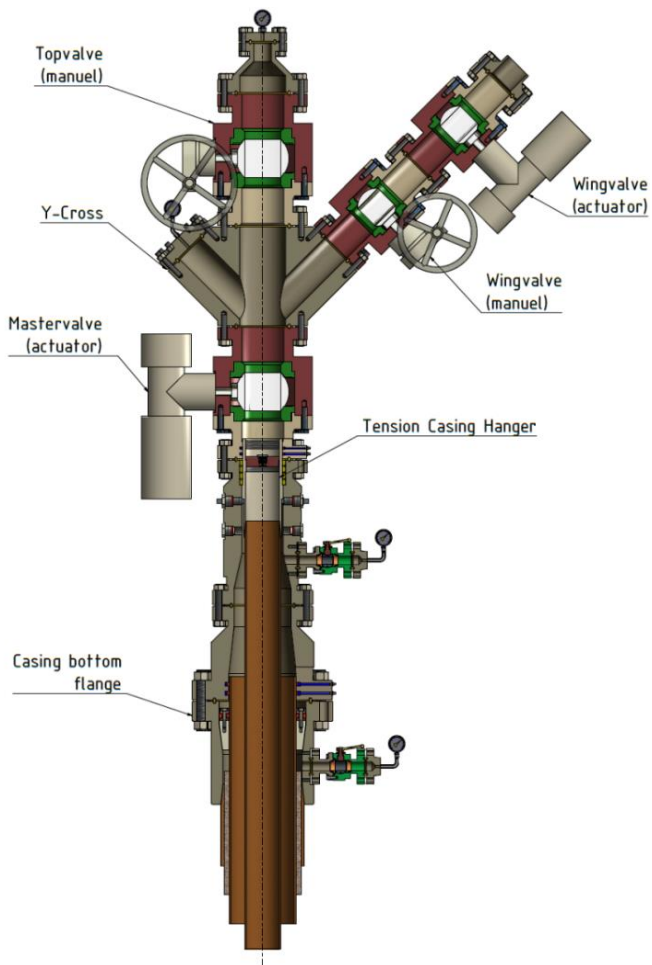


Abbildung 172: Standard-Bohrlochkopf

Weiterhin zeichnet sich gegenwärtig ein Trend in der Ausführung von Dichtsystemen ab. Sowohl bei den Armaturen als auch bei der Abdichtung der Rohrtouren innerhalb der Verflansungen finden metallisch dichtende Systeme zunehmend Anwendung. Metallisch dichtende Kugelhähne im Double-Pisten Design (z. B. Design Firma Hartmann Valves & Wellheads) erfüllen sogar das Kriterium einer zweifachen metallischen Abdichtung. Durch die Kombination einer Blockfertigung mit integriertem Kugelhahn im Double-Pisten Design werden selbst an seitlichen Abgängen zwei echte Barrieren geschaffen (siehe Abbildung 173). Auch für die Abdichtung der Rohrtouren existieren metallisch dichtende Systeme, allerdings lassen sie sich aktuell nicht im eingebauten Zustand von außen nachaktivieren.

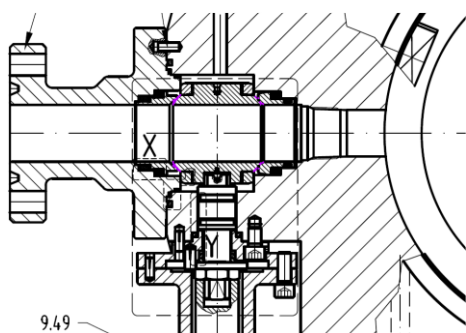


Abbildung 173: Kugelhahn mit Double-Pisten Design in Blockfertigung

Untertagesicherheitsventil (UTSAV)

Die rechtliche Grundlage für den Einsatz von UTSAV in Speicherbohrungen ist in den meisten Bundesländern eine Technische Verfügung oder eine Tiefbauverordnung, die sinngemäß im Wesentlichen der Tiefbohrverordnung (BVOT) von Niedersachsen entspricht. Gemäß § 34 (5) und § 35 (4) der BVOT muss im Förderstrang eine Absperreinrichtung vorhanden sein, die den Förderstrom im Bohrloch bei Bruch der Bohrlochverschlüsse selbsttätig unterbricht. Technische Anforderungen und Informationen über die Konstruktion, den Betrieb, die Installation und die Prüfung von unterirdischen Sicherheitsventilsystemen sowie für die Lagerung/den Transport, die Wartung und die Instandsetzung von UTSAV-Ausrüstungen sind in spezifischen Richtlinien/Normen beschrieben:

- API-Spezifikation 14A, Spezifikation für unterirdische Sicherheitsventilausrüstung (01/2015),
- API-Spezifikation 14B, Entwurf, Installation, Betrieb, Test und Reparatur von unterirdischen Sicherheitsventilsystemen (09/2015),
- API-Spezifikation 14L, 3rd Edition, Spezifikation für Lock Mandrel und Landenippel (06/2020).

Für die untertägige H₂-Speicherung gelten im Wesentlichen die Anforderungen aus der Erdgasspeicherung:

- vollständige Absperrung des Förderstranges im Störfall,
- in „Offenstellung“ muss ein ausreichender Querschnitt zur Verfügung stehen; zulässige Strömungsraten liegen bei 30–60 m/s,
- für Messfahrten muss ein freier Querschnitt von mindestens 42 mm gegeben sein bzw. das UTSAV muss ziehbar sein,
- das geschlossene Ventil muss für den Fall, dass das hydraulische Ansteuern fehlschlägt, mechanisch geöffnet werden können.

Im Kavernenspeicherbau haben sich im Wesentlichen UTSAV vom Typ Storm Choke (Klassifizierung 2b) und Controlline gesteuerte Klappenventile (Klassifizierung 2a) durchgesetzt, für die gute betriebliche Erfahrungen vorliegen. Die Auswahl erfolgte oftmals auf Grund der Sicherheitsphilosophie der Betreiber, wobei in den letzten Jahren Controlline-gesteuerte Klappenventile den Vorrang haben. Erfahrungen mit dem Speichermedium Wasserstoff liegen noch nicht vor, vereinzelt werden UTSAV im Rahmen von Leuchtturmprojekten in einem H₂-Testbetrieb getestet (HyStock hydrogen storage, Gasunie). Neben dem eigentlichen Ventil ist bei der Eignungsprüfung die gesamte UTSAV-Sektion zu betrachten (Ventil, Landenippel, Übergänge). Hinsichtlich der Beanspruchung gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie beim Förderstrang selbst (H₂-Kontakt, Wechselbeanspruchung, verschweißter Einbau).

Sonderausführung – Ringraumsicherheitsventilen

Der Einsatz von Ringraumsicherheitsventilen in Speicherbohrungen ist von untergeordneter Bedeutung. Vereinzelt wurden sie in Europa u. a. bei jahrelang andauernden Entleerungsprozessen bei Kavernen eingesetzt.

7.3.2.3 Varianten zur Untertageinstallation

Die sich aus der H₂-Speicherung ableitenden Anforderungen an die Bohrlochkonstruktion, des Bohrlochabschlusses und der Technologien sind mit den Anforderungen an die Speicherung von Erdgas vergleichbar. Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden die folgenden Fragestellungen im Rahmen einer Variantendiskussion untersucht:

1. Prüfung der Standardkomplettierungen zur Speicherung methanhaltiger Gase auf Übertragbarkeit auf die H₂-Speicherung hinsichtlich der technischen Machbarkeit und der Bohrungsintegrität;
2. Reduzierung des Bohrlochdesigns auf möglichst einfache technische Lösungen durch Verzicht auf H₂-anfällige Elemente;
3. Anpassung des Komplettierungsdesigns auf möglichst praxiserprobte Lösungen, Dimensionen und Technologien;
4. Minimierung der Anzahl der Komplettierungselemente.

Aufgrund von lokationsspezifischen Anforderungen bzw. geologische und/oder technische Besonderheiten ist keine Vereinheitlichung von Komplettierungsvarianten sinnvoll. Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden exemplarisch fünf Komplettierungsvarianten definiert sowie hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Funktionalität für die untertägige H₂-Speicherung untersucht und bewertet:

Variante 1: Einfachpackerkomplettierung,

Variante 2: Linerkomplettierung,

Variante 3: Doppelpackerkomplettierung,

Variante 4: Rohrschuhkomplettierung „Einfachausführung“,

Variante 5: Rohrschuhkomplettierung „Doppeltausführung“.

7.3.2.4 Mehrbarrierenkonzept

Die in 7.3.2.3 genannten Komplettierungsvarianten wurden auf ihre Eignung hinsichtlich der Anwendung des Zwei-Barrieren-Systems untersucht. In den folgenden Abbildungen sind die in Kapitel 7.3.1.5 benannten Barrieren bzw. die einzelnen Barriere-Elemente für die jeweiligen Komplettierungsvarianten dargestellt.

Das in den technischen Varianten verwendete Installationselement „Untertagesicherheitsventil (UTSAV)“ (unabhängig ob über- oder untertägig angesteuert) wird laut Definition BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ der primären Barriere zugeordnet und wird daher als oberste Absperrung dieser angesetzt. Für den Betriebsfall in dem das UTSAV offen steht, gilt der Bohrlochkopf als oberste Absperrung der primären Barriere. Das eingebaute UTSAV wird daher für den Fall eines Bruchs der Förderrohrtour als oberste Absperrung der primären Barriere angesetzt. Somit wird das UTSAV in den weiteren Betrachtungen als ein Sicherungselement und nicht direkt als Barriere-Element einer Barriere eingestuft. In den Tabelle 58 bis Tabelle 62 werden die verschiedenen Komplettierungsvarianten zusammenfassend dargestellt sowie die Barrieren-Situation diskutiert.

Tabelle 58: Charakterisierung Variante 1 – Einfachpackerkomplettierung

Variante 1 – Einfachpackerkomplettierung	
Primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation, Kavernenhals, • Letzte zementierte Rohrtour unterhalb Packer (inklusive Zementation), • Packer, • Förderrohrtour, • Bohrlochkopfeinbindung Förderrohrtour.
Sicherungselement primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Obertägig angesteuertes Untertagesicherheitsventil
Sekundäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation im Bereich Packer, • Letzte zementierte Rohrtour (inklusive Zementation), • Bohrlochkopfeinbindung letzte zementierte Rohrtour.

Die schematische Darstellung einer Einfachpackerkomplettierung inklusive Zwei-Barrieren-System ist in Abbildung 174 dargestellt.

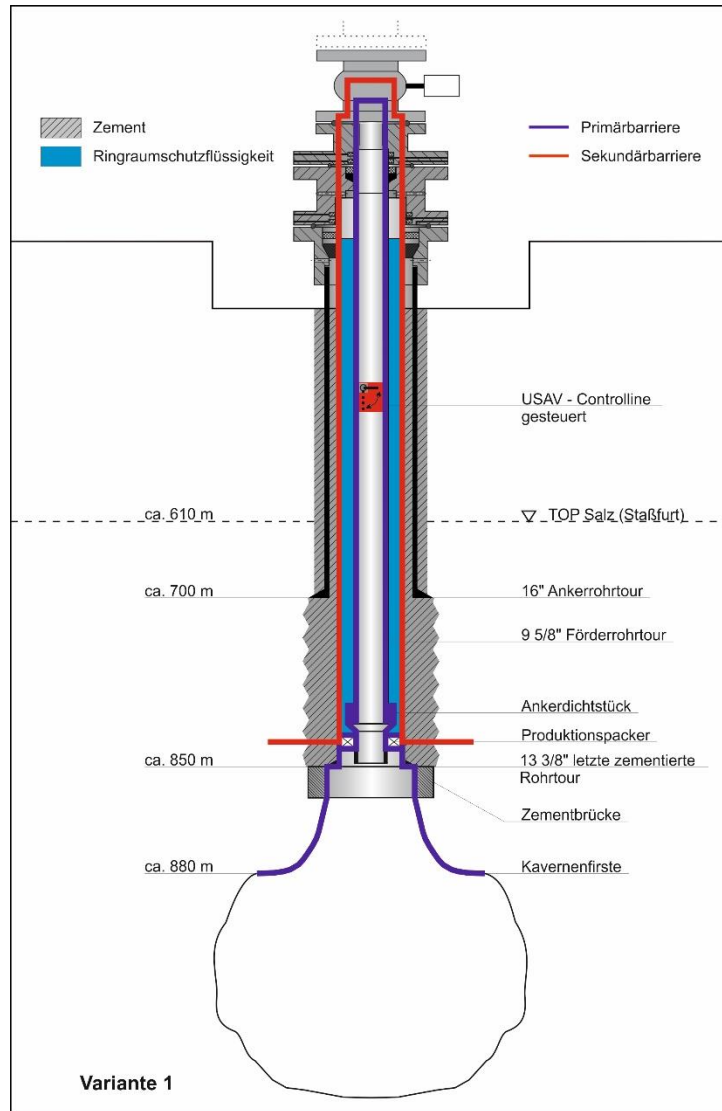


Abbildung 174: Variante 1 – Einfachpackerkomplettierung mit Zwei-Barrieren-System

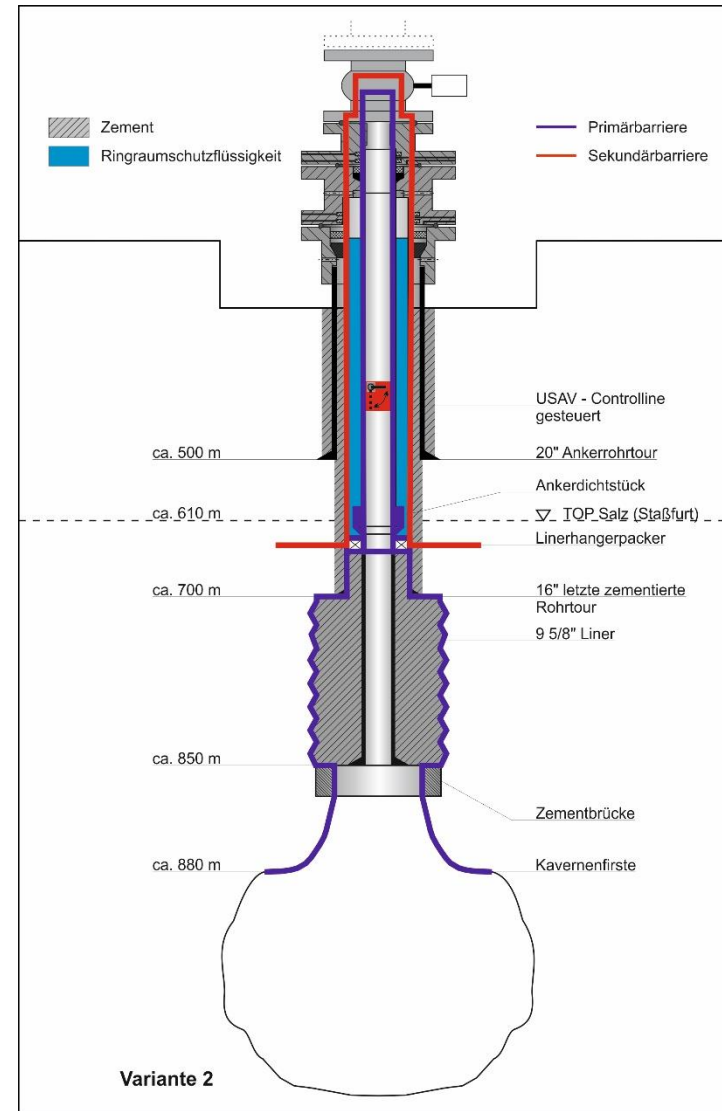


Abbildung 175: Variante 2 – Linerkomplettierung mit Zwei-Barrieren-System

Tabelle 59: Charakterisierung Variante 2 – Linerkomplettierung

Variante 2 – Linerkomplettierung	
Primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation, zementierter Kavernenhals, • Letzte zementierte Rohrtour unterhalb Packer (inklusive Zementation), • Packer, • Förderrohrtour, • Bohrlochkopfeinbindung Förderrohrtour.
Sicherungselement primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Obertägig angesteuertes Untertagesicherheitsventil.
Sekundäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation im Packerbereich, • Letzte zementierte Rohrtour (inklusive Zementation), • Bohrlochkopfeinbindung Letzte zementierte Rohrtour.

Abbildung 175 zeigt eine Linerkomplettierung mit Zwei-Barrieren-System.

Tabelle 60: Charakterisierung Variante 3 – Doppelpackerkomplettierung

Variante 3 – Doppelpackerkomplettierung	
Primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation, Kavernenhals, • Letzte zementierte Rohrtour unterhalb 1. Packer (inklusive Zementation), • 1. Packer, • Förderrohrtour, • Bohrlochkopfeinbindung Förderrohrtour.
Sicherungselement primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Untertägig angesteuertes Untertagesicherheitsventil
Sekundäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation im Bereich des 1. Packers, • Letzte zementierte Rohrtour (Teilbereich vom 1. Packer bis zum 2. Packer; inklusive Zementation), • 2. Packer, • 11 ¾" Schutzrohrtour, • Bohrlochkopfeinbindung 11 ¾" Schutzrohrtour.

Die gastechische Komplettierung in Form einer Doppelpackerkomplettierung ist in Abbildung 176 dargestellt.

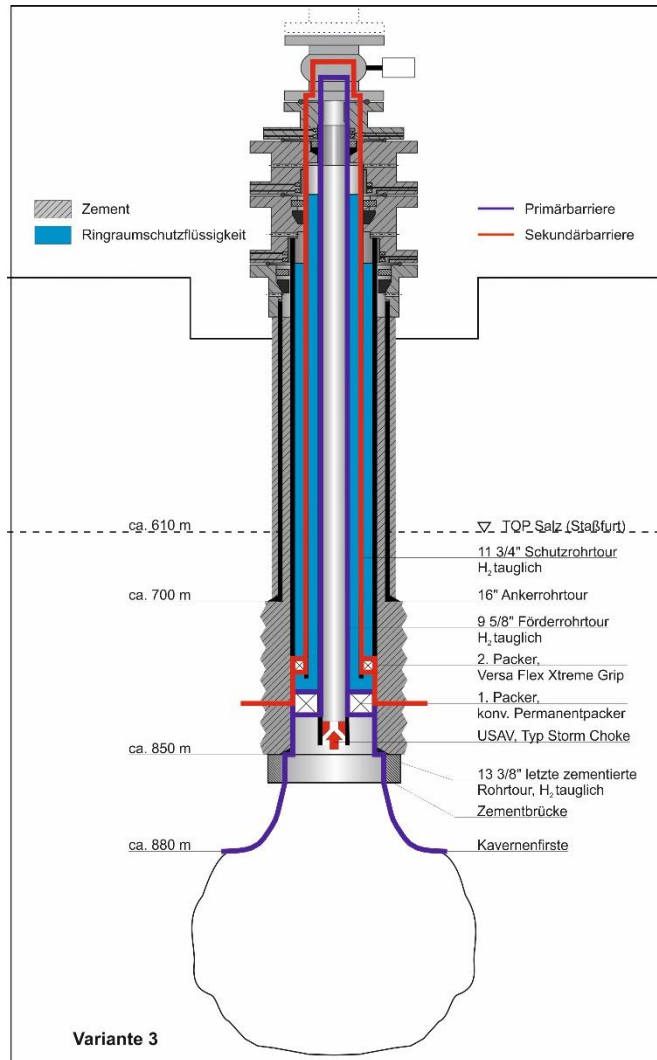


Abbildung 176: Variante 3 – Doppelpackerkomplettierung mit Zwei-Barrieren-System

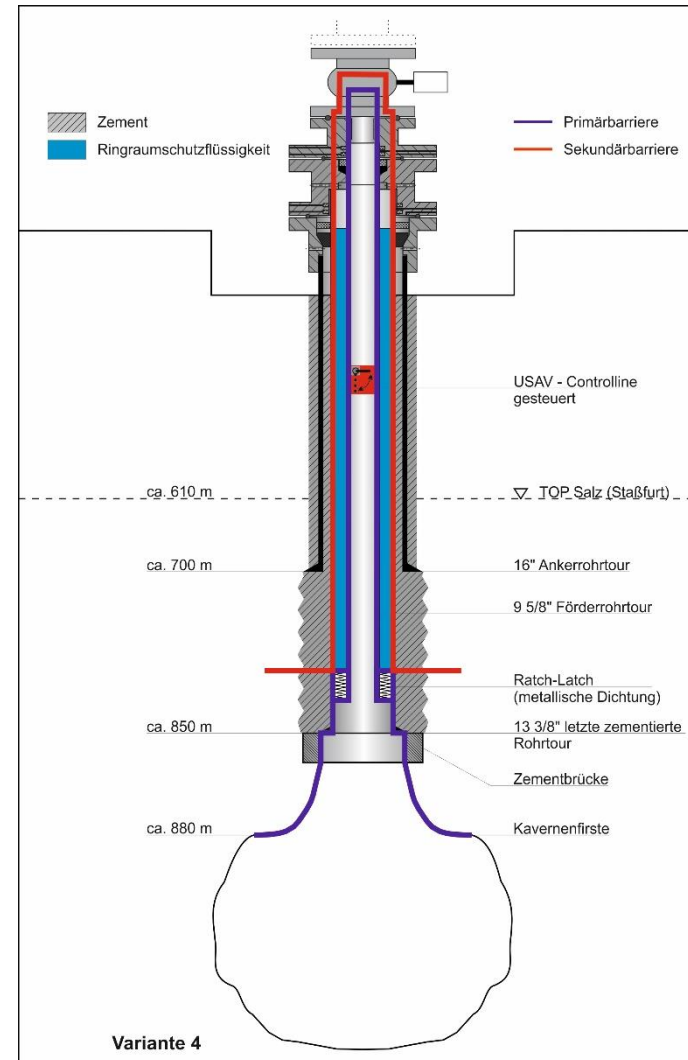


Abbildung 177: Variante 4 – Sonderlösung einfache lösbare Verbindung mit Zwei-Barrieren-System

Tabelle 61: Charakterisierung Variante 4 – Rohrschuhkomplettierung „Einfachausführung“

Variante 4 – Rohrschuhkomplettierung „Einfachausführung“	
Primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation, Kavernenhals, • Letzte zementierte Rohrtour unterhalb Packer (inklusive Zementation), • Packer/Ratch Latch, • Förderrohtour, • Bohrlochkopfeinbindung Förderrohtour.
Sicherungselement primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Untertägig angesteuertes Untertagesicherheitsventil.
Sekundäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation im Packerbereich/Ratch Latch Bereich, • Letzte zementierte Rohrtour (inklusive Zementation), • Bohrlochkopfeinbindung letzte zementierte Rohrtour.

Die Rohrschuhkomplettierung in der Ausführung „einfache lösbare Verbindung“, dargestellt in Abbildung 177 stellt eine Sonderkomplettierung dar.

Tabelle 62: Charakterisierung Variante 5 – Rohrschuhkomplettierung „Doppeltausführung“

Variante 5 – Rohrschuhkomplettierung „Doppeltausführung“	
Primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation, Kavernenhals, • Ratch Latch Block bis 1. Ratch Latch Verbindung, • Förderrohtour, • Bohrlochkopfeinbindung Förderrohtour.
Sicherungselement primäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Untertägig angesteuertes Untertagesicherheitsventil
Sekundäre Barriere	<ul style="list-style-type: none"> • Formation im Bereich Ratch Latch Block, • 2. Ratch Latch Verbindung, • 11 ¾" Schutzrohtour, • Bohrlochkopfeinbindung 11 ¾" Schutzrohtour.

Eine weitere Sonderlösung ist die Rohrschuhkomplettierung mit „doppelt lösbarer Verbindung“ (siehe Abbildung 178).

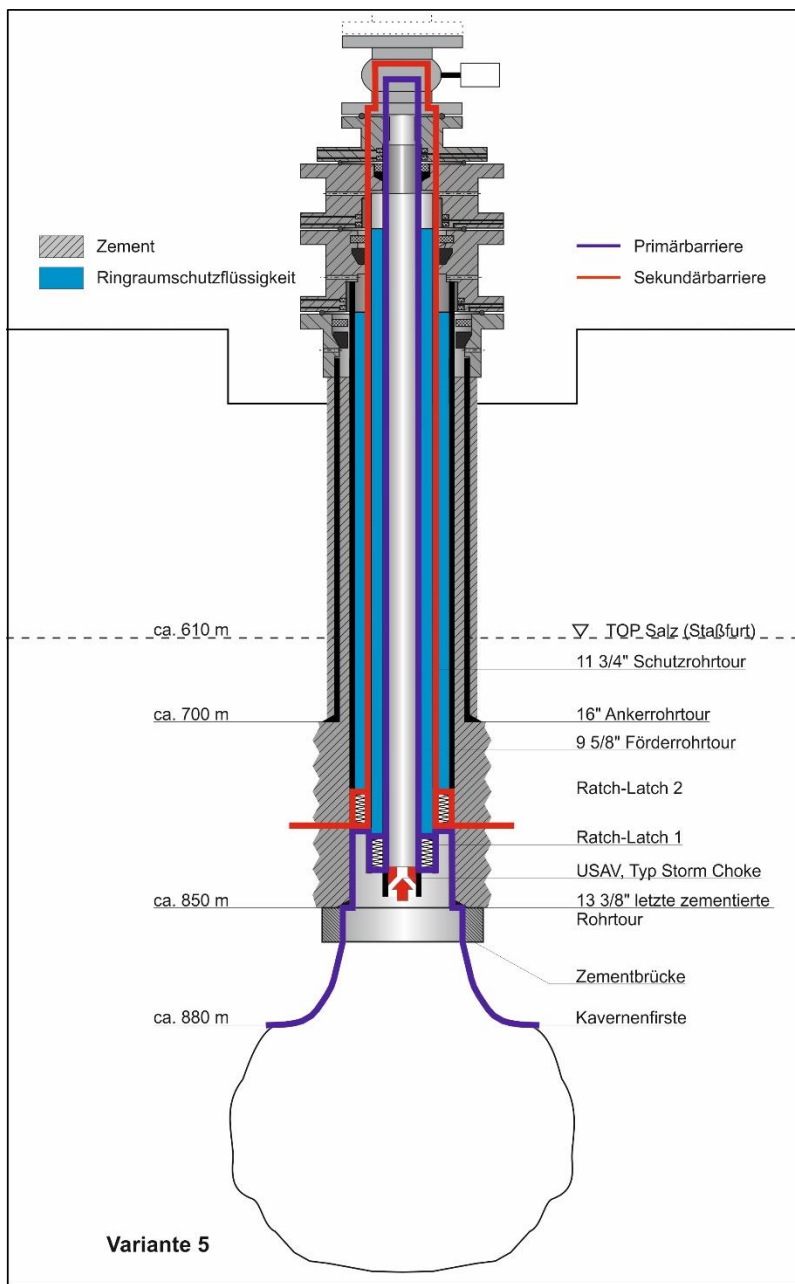


Abbildung 178: Variante 5 – Sonderlösung doppelte lösbare Verbindung mit Zwei-Barrieren-System

Tabelle 63 fasst die Bewertungsergebnisse nach dem Zwei-Barrieren-System für die fünf dargestellten Varianten zusammen. Mit Ausnahme der Linerkomplettierung (Variante 2) lässt sich das Zwei-Barrieren-System auf die restlichen Komplettierungsvarianten umsetzen. Für die dargestellte Komplettierungsvariante 2 kann ein Zwei-Barrieren-System nur hergestellt werden, wenn ein längerer Teufenbereich (140 m) der primären als auch der sekundären Barriere zugeordnet wird. Somit bestände für diesen Bereich lediglich eine Barriere zur Verfügung. Unter Berücksichtigung des derzeit unbekanntem Verhaltens von Wasserstoff als Speichermedium wird diese dargestellte Variante nicht empfohlen bzw. müsste für ein Zwei-Barrieren-System angepasst werden.

Tabelle 63: Übersicht Bewertung der Varianten nach dem Zwei-Barrieren-Konzept

Variante	Formale Bewertung Barrieren-System	Bemerkungen	Schlussfolgerungen
1	<ul style="list-style-type: none"> • Zwei-Barrieren-System ist möglich, • Barrieren sind unabhängig voneinander, • sekundäre Barriere umhüllt die primäre Barriere vollständig, • UTSAV vorhanden. 	-	Entspricht dem Stand der Technik, der für neue Gasspeicherbohrungen auf dem Festland gefordert ist.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Zwei unabhängig verifizierte Barrieren sind <u>nicht</u> möglich, • sekundäre Barriere umhüllt nicht vollständig die primäre Barriere, • UTSAV vorhanden. 	Für einen Bereich von 140 m (ab Rohrschuh primäre Barriere aufwärts) steht nur eine Barriere zur Verfügung – die primäre Barriere wird nicht vollständig umhüllt.	Ungeeignet für eine Nutzung als H ₂ -Speicherkaverne, da ein 140 m langer Teufenbereich mit lediglich einer Barriere abgedeckt werden würde und dieser Bereich nicht überwacht werden kann.
3	<ul style="list-style-type: none"> • Zwei-Barrieren-System ist möglich, • Barrieren sind unabhängig voneinander, • sekundäre Barriere umhüllt die primäre Barriere vollständig, • UTSAV vorhanden, 	Durch den Einbau einer zusätzlichen Rohrtour wurde ein weiterer Überwachungsringraum geschaffen.	Entspricht dem Stand der Technik, der für neue Gasspeicherbohrungen auf dem Festland gefordert ist. Es stehen zwei mit Ringraumschutzflüssigkeit gefüllte Überwachungsringräume zur Verfügung, es ergibt sich eine zusätzliche Überwachungsmöglichkeit.
4	<ul style="list-style-type: none"> • Zwei-Barrieren-System ist möglich, • Barrieren sind unabhängig voneinander, • sekundäre Barriere umhüllt die primäre Barriere vollständig, • UTSAV vorhanden. 	-	Entspricht dem Stand der Technik, der für neue Gasspeicherbohrungen auf dem Festland gefordert ist.
5	<ul style="list-style-type: none"> • Zwei-Barrieren-System ist möglich, 	Durch den Einbau einer zusätzlichen	Entspricht dem Stand der Technik, der für neue

Variante	Formale Bewertung Barrieren-System	Bemerkungen	Schlussfolgerungen
	<ul style="list-style-type: none"> • Barrieren sind unabhängig voneinander, • sekundäre Barriere umhüllt die primäre Barriere vollständig, • UTSAV vorhanden. 	Rohrtour wurde ein weiterer Überwachungsringraum geschaffen.	Gasspeicherbohrungen auf dem Festland gefordert ist. Es stehen zwei mit Ringraumschutzflüssigkeit gefüllte Überwachungsringräume zur Verfügung, es ergibt sich eine zusätzliche Überwachungsmöglichkeit.

7.3.3 Experimentelle Untersuchungen zu Casing/Zement/Gebirge

Ergänzend zu den Versuchen an Vollzylinder-Proben in Kapitel 4.4.1 werden Versuche an Hohlzylinder-Verbundproben durchgeführt. Diese Proben (siehe Abbildung 179) haben eine Länge von ca. 16 cm und einen Außendurchmesser von ca. 29 cm. Das Material des Futterrohrs erfüllt die Anforderungen an den Werkstoff X56 (nach API 5L). Der Zementmantel besteht aus dem gleichen Material wie die bereits untersuchten Zementstein-Proben und weist eine Dicke von ca. 6 cm auf.



Abbildung 179: Verbundproben Futterrohr/Zementstein

Die Herstellung der Zementschlämme erfolgt mit Hilfe eines vier-flügligen Propellerrührers nach dem bereits in Kapitel 4.4.1 erläuterten Verfahren. Die Zementschlämme wird dann in eine Gießform gegeben (welche Höhe und Durchmesser vorgibt) und für 24 Stunden anhärtet lassen. Anschließend wird die Gießform entfernt und die Verbundprobe in einem mit Anmachwasser gefüllten Behälter für mindestens 28 Tage eingelagert. Die Dichtflächen der Probe sind während dieser Zeit durch Schutzkappen vor Korrosion geschützt.

Als Versuchsmethode finden Gasdurchbruchmessungen in einer modifizierten Zwei-Kammer-Anlage Anwendung, deren Messprinzip identisch zur bereits vorgestellten Anlage (siehe Kapitel 4.4.1) ist. Aufgrund der Größe der Proben wurden Kammervolumen und die Autoklavengröße angepasst. Die Versuchsanlage erlaubt Manteldrücke bis zu 10 MPa, was in einem maximalen Effektivdruck von ca. 9 MPa resultiert.

Ergebnisse – variabler Effektivdruck

Analog zu den Versuchen der Vollzylinder-Proben wurden Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit des Effektivdrucks durchgeführt. Ziel dieser Versuche ist ein Vergleich der Vollzylinder- mit den Verbundproben. Sollten die Verbundproben die gleiche Durchlässigkeit wie die reinen Zementstein-Proben aufweisen, kann der Verbund aus Futterrohr und Zementstein als Schwachstelle ausgeschlossen werden.

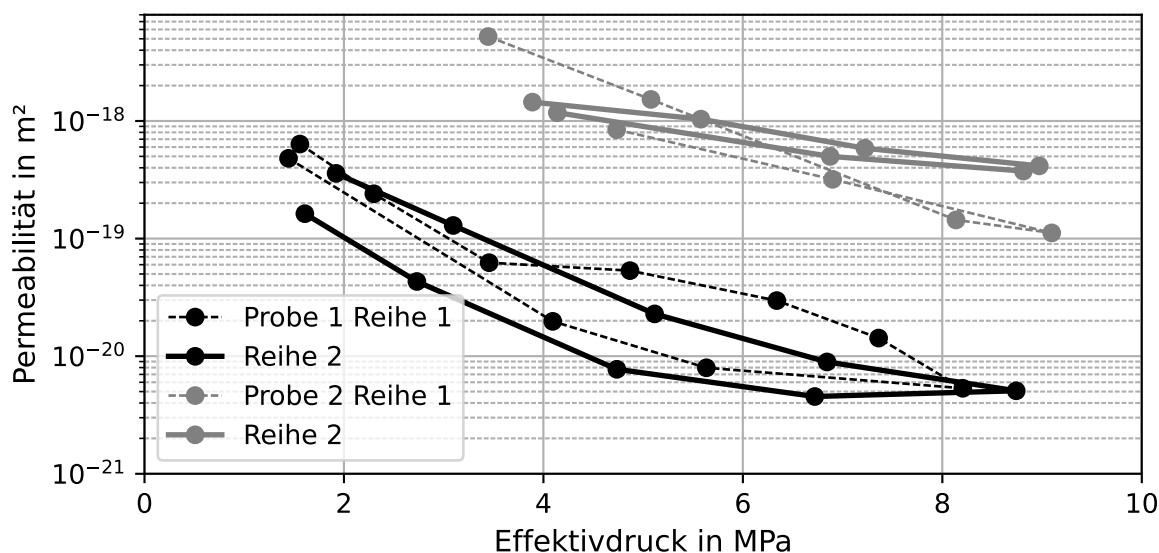


Abbildung 180: Permeabilität der Verbundproben in Abhängigkeit des Effektivdrucks

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse von zwei Verbundproben vorgestellt. An jeder Verbundprobe wurden zwei Versuchsreihen unter zu- und abnehmender Effektivdruck-Belastung durchgeführt (Abbildung 180). Beginnend bei einem Druck unterhalb von 2 bzw. 4 MPa wurde dieser stufenweise auf ca. 9 MPa erhöht und anschließend wieder reduziert. Verbundprobe 1 zeigt niedrige Permeabilitäten im Bereich zwischen $6,4 \cdot 10^{-19}$ und $4,5 \cdot 10^{-21}$ m². Die Permeabilität sinkt mit zunehmendem Effektivdruck ab und in Versuchsreihe 2 ist eine Hysterese zu erkennen, d. h., im Entlastungszyklus werden niedrigere Permeabilitäten gemessen. Verbundprobe 2 weist im Gegensatz dazu eine deutlich höhere Durchlässigkeit im Bereich zwischen $5,2 \cdot 10^{-18}$ und $1,1 \cdot 10^{-19}$ m² auf, eine Hysterese ist nicht sichtbar. Verbundprobe 2 zeigt im Vergleich zur Verbundprobe 1 bei identischen Effektivdrücken eine bis zu zwei Größenordnungen höhere Permeabilität. Zur Einschätzung der Permeabilität erfolgt ein Vergleich zu den Werten der reinen Zementstein-Proben (siehe Abbildung 181).

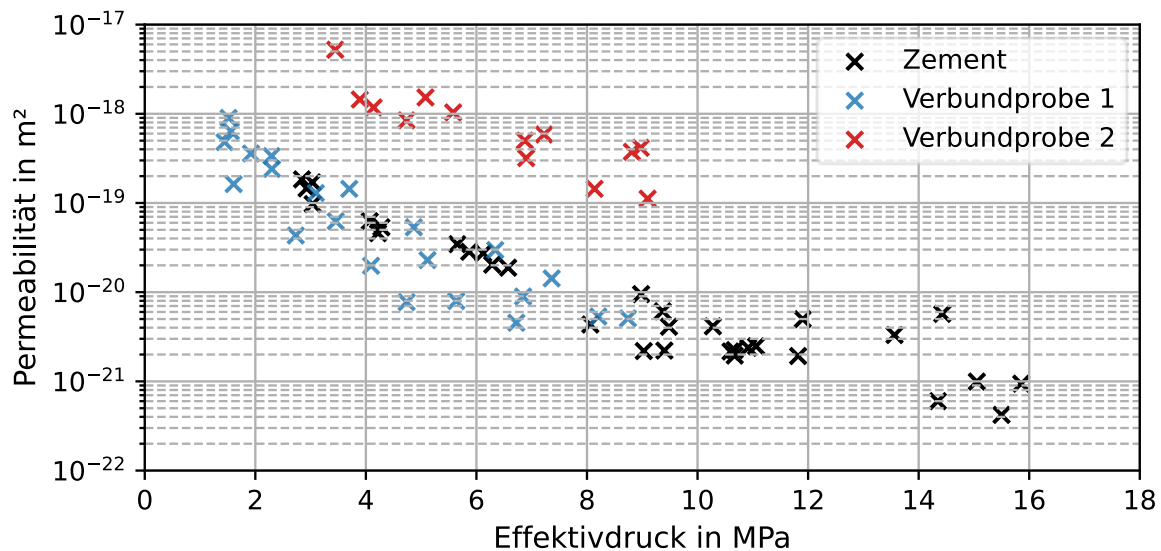


Abbildung 181: Vergleich der Durchlässigkeit Verbundproben – Vollzylinder-Proben

Der Vergleich zeigt, dass die Verbundprobe 1 eine ähnliche Permeabilität wie die reinen Zementstein-Proben aufweist. Im Gegensatz dazu besitzt die Verbundprobe 2 bei identischem Effektivdruck eine um bis zu zwei Größenordnungen höhere Permeabilität. Als Grund dafür wird eine Schädigung der Probe bzw. des Zementmantels angenommen. Bereits im Rahmen der Probenvorbereitung neigten die Zementproben zur Ausbildung von Rissen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Verbund aus Futterrohr und Zementstein die gleiche Permeabilität wie der reine Zementstein aufweisen kann. Es stellt sich jedoch auch heraus, dass dazu eine optimale Zementation nötig ist. Die im Vergleich zur praktischen Anwendung kurze Zementlänge und die Abbindebedingungen, welche nicht den In-situ-Bedingungen entsprechen ($\vartheta = 13\text{ °C}$, Atmosphärendruck), wird als Grund für die Ausbildung durchgehender Risse angesehen, welche im Fall der Verbundprobe 2 zu einer erhöhten Durchlässigkeit führte.

Ergebnisse – variabler Innendruck

Um den Einfluss des Innendrucks (Druck im Inneren des Futterrohrs) auf die Permeabilität der Verbundprobe abzuschätzen, wurden Messungen unter variablem Innendruck durchgeführt. Im Rahmen von Vorversuchen zeigte sich, dass nur bei niedrigen Manteldrücken ein Einfluss des Innendrucks messbar ist. Aus diesem Grund werden die Versuche bei niedrigen Manteldrücken (zwischen 1 und 4 MPa) durchgeführt.

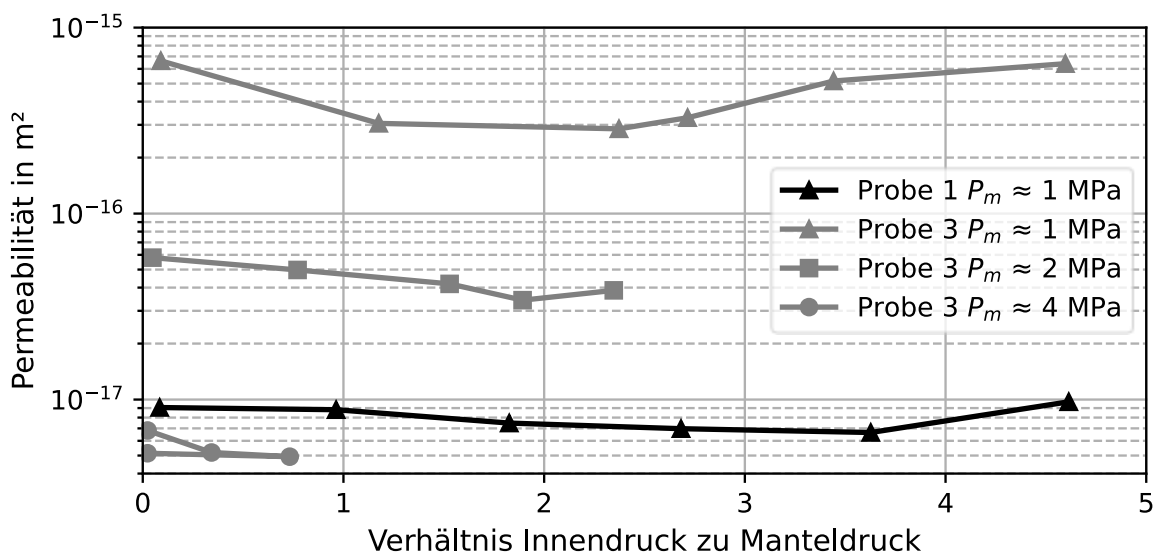


Abbildung 182: Einfluss des Innendrucks auf die Permeabilität

An der Verbundprobe 3 wurden drei Versuchsreihen bei jeweils konstantem Manteldruck von rund 1, 2 und 4 MPa durchgeführt (siehe Abbildung 182). Nur bei niedrigen Manteldrücken bzw. hohem Innendruck zu Manteldruck Verhältnis ist ein Einfluss messbar. Die ermittelte Permeabilität sinkt mit zunehmendem Innendruck-Verhältnis ab, steigt dann wieder an. Der Grund dafür ist, dass der Innendruck erst zu einer zusätzlichen Kompaktion des Porenraums beiträgt. Dies geschieht aufgrund der höheren Steifigkeit des Futterrohrstahls (im Vergleich zum Zementstein) jedoch im geringeren Umfang als durch den Manteldruck. Mit weiterer Erhöhung des Innendrucks bilden sich im Zementmantel tangentielle Zugspannungen aus, welche zu einer Vergrößerung des Porenraums und damit in einer erhöhten Permeabilität resultieren. Im Fall der Überschreitung der Zugfestigkeit des Zements kann dies zur Rissbildung und dauerhaften Schädigung des Zementmantels führen. Im Fall der Verbundprobe 1 wurde bei einem Innendruck-Verhältnis von ca. 4,5 eine höhere Permeabilität als unter initialen Bedingungen (Innendruck gleich Atmosphärendruck) gemessen. Die bewusste Schädigung der Probe durch weitere Innendruckerhöhung war aufgrund der Druckgrenzen des Versuchsaufbaus nicht möglich.

Zusammenfassung der laborativen Untersuchungen

Der folgende Teil fasst die Ergebnisse der laborativen Untersuchungen der Kapitel 4.4.1 und 7.3.3 zusammen:

- Bei der Untersuchung der Salzstein-Proben ergibt sich eine maximale Permeabilität von $5,1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$. Bei dieser niedrigen Durchlässigkeit ist von einem diffusionsdominierten Stofftransport auszugehen. Ein Einfluss der Gasart (Wasserstoff und Methan) auf die ermittelte Permeabilität konnte nicht nachgewiesen werden.
- Die Anhydrit-Proben haben Permeabilitäten im Bereich $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$, wobei der Effektivdruck einen großen Einfluss auf die ermittelte Permeabilität hat. Bei Salzstein-Proben, welche Anhydrit-Schichten besitzen, kann deren Durchlässigkeit durch das Fremdgestein maßgeblich beeinflusst werden.

- Die effektive Permeabilität der Zementstein-Proben wird im wasser(teil)-gesättigtem Zustand durch Gasdurchbruchmessungen bestimmt. Nach erfolgtem Gasdurchbruch stellt sich eine maximale effektive Permeabilität von $1,8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $9,4 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ bei einem Effektivdruck von 2,8 Pa bis 15,9 MPa ein. Verbundproben aus Salzstein und Zementstein weisen maximal die Permeabilität von reinen Zementstein-Proben auf. Der Materialverbund stellt hier keine Schwachstelle in Hinblick auf die Durchlässigkeit dar. Vergleichsmessungen mit Methan als Messgas ergeben keine abweichenden Permeabilitäten.
- Neben dem Effektivdruck kann die Höhe des Gasdrucks die gemessene effektive Permeabilität beeinflussen. Im Rahmen der Versuche wurden Gas-Differenzdrücke von bis zu 13 MPa eingestellt.
- Die Verbundproben aus Futterrohr und Zementstein können die gleiche Durchlässigkeit wie die reinen Zementsteinproben aufweisen, was für die Güte des Materialverbunds spricht. Probleme/Fehler bei der Probenherstellung können zur Rissbildung des Zementmantels und in Folge zu einer stark erhöhten Permeabilität führen.
- Die Futterrohr-Innendruckbelastung hat im Vergleich zur Manteldruckbelastung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Permeabilität. Bei Innendrücken, welche den Manteldruck deutlich übersteigen, können auftretende tangentielle Zugspannungen zum Versagen des Zementmantels führen.

Im Labor konnte gezeigt werden, dass der Verbund Futterrohr/Zementstein zu keiner zusätzlichen Permeabilität führen muss. Anhand der theoretischen Grenzwerte wird folgend die Dichtheit der Proben bewertet. Für eine typische Kaverne ergibt sich bei maximalem Speicherdruck ein Effektivdruck von 6 MPa, bei mittlerem Speicherdruck ein Wert von 10 MPa. Im Labor wurde bei diesem Druck eine maximale Permeabilität von $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bzw. $4 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ ermittelt. Im Vergleich mit dem konservativen Grenzwert (Konvektion = Diffusion, siehe Kapitel 4.4.1) im Bereich von $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ zeigt, dass die ermittelte Permeabilität leicht oberhalb liegt. Der weniger konservative Grenzwert von $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ wird deutlich übertroffen. Dieser Umstand in Kombination mit den, im Vergleich zu Methan, ähnlichen Ergebnissen, zeigt die technische Dichtheit der Proben und die Vergleichbarkeit mit der Erdgasspeicherung.

7.4 Gaserstbefüllungskonzepte

Das Gaserstbefüllungskonzept gibt in der Regel eine Orientierung für die zulässigen minimalen und maximalen Parameter, die notwendige Gasrate bzw. die zu realisierende Soleentleerungsrate sowie den zeitlichen Verlauf der Soleentleerung. Weiterhin beinhaltet es Aussagen zur Medienbereitstellung und Soleabnahme/-entsorgung, etwaige Qualitätsanforderungen an die Medien, die sole- bzw. gasseitigen Prozesszuständigkeiten sowie zur Prozessüberwachung. Entsprechend den Festlegungen im Verbundvorhaben H₂-UGS wird von einer solegefüllten Kaverne ausgegangen, die vollständig mit Wasserstoff zu befüllen ist. Je nach Kavernenhistorie kann es sich dabei um eine Gaserst- oder Gaswiederbefüllung handeln. Etwaige Besonderheiten, z. B. in der Kaverne verbliebenes Restblanket aus dem Solprozess oder Speichermedium aus der vorangegangenen Betriebsphase, sind bei den Planungen der ober- und untertägigen Anlagen sowie bei den Arbeitsabläufen der Rekomplettierung zu berücksichtigen (z. B. Unterschneiden von Kavernenhalssektionen zur Reduzierung bzw. zur Beseitigung von Restöl vor Einbau der H₂-Komplettierung). Aus der Erdgasspeicherung sind Standardpraktiken bekannt.

Betrachtungen zur Herkunft des Wasserstoffs wurden im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS nicht geführt. Für die Berechnungen wird vorausgesetzt, dass die zu entleerende Kaverne für die Entleerung umgerüstet, leitungstechnisch eingebunden und der Soleabstoß uneingeschränkt möglich ist.

Grundlage für die Arbeiten zur Gas(erst)befüllung/Soleentleerung bilden verschiedene Betriebspläne. Üblicherweise werden Sonderbetriebspläne zur Umrüstung der Kaverne zum Entleerungs-/Gasspeicherbetrieb, zur Umsetzung, Aufbau und Betrieb der Soleentleerungsanlage und zum Ausbau des Entleerungsstranges nach Abschluss der Gaserstbefüllung erstellt.

7.4.1 Fahrweisen

Bei der Soleentleerung wird grundsätzlich in die Fahrweisen „kontinuierlich“ und „diskontinuierlich“ unterschieden. Die Fahrweisen werden üblicherweise im Rahmen eines Flutprogrammes für jeden Anwendungsfall festgelegt. Das Flutprogramm bildet in der Regel eine Anlage zum zugehörigen Sonderbetriebsplan. Sie sind u. a. von der Kavernenspezifik, den Druckverhältnissen sowie der Gas- und Soleentleerungsrate abhängig. Das tatsächliche Programm zur H₂-Erstbefüllung ist für jeden Anwendungsfall auf Basis der aktuellen Planungsdaten zu planen.

Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden exemplarisch drei Entleerungsvarianten berechnet (Anlage 10.1):

Variante 1: Startvariante, Gasraten von 2.000–5.000 m³/h i. N.,

Variante 2: Referenzvariante, Gasraten von 20.000–50.000 m³/h i. N.,

Variante 3: Maximalvariante, Gasrate von 1.200.000 m³/h i. N.

Die Festlegungen der Varianten basieren auf eine Betreiberumfrage, welche innerhalb des Verbundvorhabens H₂-UGS durchgeführt wurde (siehe Kapitel 8.3.1). Die Maximalvariante wird im Folgenden nicht näher betrachtet, da sie der Referenzvariante unter Einbezug mehrerer Kavernen entspricht. Die Varianten 1 und 2 wurden sowohl für die Forschungskaverne B als auch für die im Verbundvorhaben

H₂-UGS festgelegte Typkaverne betrachtet. Für die Berechnungen wurde die UGS-Software KA-VENT genutzt, die standardmäßig zur Planung und Begleitung von Entleerungs- und Flutprozessen genutzt wird.

7.4.2 Anforderungen bei Wasserstoffbefüllungen

Die notwendigen ober- und untertägigen Anlagen und Prozesse sind bei der H₂-(Erst)befüllung mit denen der Befüllung mit Erdgas vergleichbar. Mit Ausnahme der obertägig zu berücksichtigenden zusätzlichen Sicherheitsanforderungen (siehe auch Kapitel 8.3.5) sind die Prozesse ohne Einschränkungen von der Erdgasspeicherung auf die H₂-Speicherung übertragbar.

Untertägig kommen bei der Gaserstbefüllung die üblichen Installationen zum Einsatz:

- Installation für die Entleerung (Soleentleerungsstrang, Soleentleerungskopf),
- Installation für den Gasspeicherbetrieb (Gasförderrohrtour, Packer, Bohrlochkopf).

Die Dimensionierung der Gasförderrohrtour ist vor allem abhängig von den zukünftigen Ein- und Auspeicherraten im Gasbetrieb sowie von den geforderten Drücken. Üblicherweise kommen bei der Entleerungsrohrtour gasdichte Schraubverbinder zum Einsatz. Zur Minimierung des Risikos einer Undichtheit durch z. B. Salzfall wird der Strang im offenen Kavernenbereich mitunter verschweißt. Für die H₂-Erstbefüllung können die üblichen Casingdimensionen (4 ½" – 6 5/8") eingesetzt werden. Die Wahl zur Dimensionierung ist dabei abhängig von:

- dem kleinsten Innendurchmesser der Gasinstallation,
- ausreichend vorhandenem Ringraumvolumen/Ringraumquerschnitt für den Gasfluss (Reibungsdruckverluste, maximale Strömungsgeschwindigkeiten),
- erforderlichem Innendurchmesser (maximale Soleauslagerungsrate/Entleerungsrate),
- maximal möglichen Dimensionierungen beim Ausbau des Soleentleerungsstranges durch auf dem europäischen Markt verfügbare Snubbing Units.

Der Rohrschuh des Soleentleerungsstranges wird, sofern keine besonderen Anforderungen seitens des Betreibers vorliegen, in Abhängigkeit der Sumpfausbildung ca. 0,5–1 m oberhalb des Kavernentiefsten abgesetzt. Ziel ist die maximal mögliche Auslagerung der Sole und damit die Reduzierung der Restsolemenge auf das Minimum.

Auch für die obertägigen Soleentleerungsanlagen sind die Anforderungen für eine H₂-Erstentleerung ohne Einschränkungen aus der Erdgasspeicherung übertragbar. Wesentliche Bestandteile der Soleentleerungsanlage sind:

- Verrohrung (Solefeldleitungssystem, Gasleitung, Frischwasserleitungen),
- Mengengeräte und Regelventile,
- Pumpen (Frischwasserdosierpumpe, Rückspülpumpe, Soletransportpumpe),
- Soleentgasungstank,
- Absperrventile (SAV, Sicherheitsabsperrventile; POV, Pressure Operated Valves).

Wird gesättigte Sole aus der Kaverne über den Soleentleerungsstrang ausgetragen, kühlt diese während des Entleerungsprozesses ab und es kann zu Salzausfällungen im Strang und zum Druckanstieg kommen. Zur Vermeidung von Salzausfällungen ist die Solesteigleitung mit Wasser zu spülen. Laboruntersuchungen (Müller, 2013) haben gezeigt, dass dabei eine Verweilzeit von ca. 20 Minuten (mit

Bezug auf gesättigte NaCl-Sole) ausreicht (Amro & Müller, 2013). Die Rückspülung der Solesteigleitung erfolgt bei Standardentleerungen (kontinuierliche Soleentleerung bei Raten von 120 m³/h) einmal täglich. Das Spülintervall kann aber auch entsprechend der Kristallisationsneigung der Sole und je nach Betriebserfahrung (Betriebsführung soleseitig) operativ angepasst werden.

Optional kann die Zudosierung von Wasser (Verdünnung) zur bereits zutage geförderten Sole erfolgen, um das Auskristallisieren von Salz in der Soletransportleitung zu verhindern. Bei Soleraten von maximal 30 m³/h sollten zu diesem Zweck ca. 1 m³/h Wasserzugabe eingestellt werden. Wenn es keine Anzeichen für Ablagerungen gibt (Druckverluste), kann die Dosierrate operativ reduziert werden.

Analog zu Gasbefüllungen mit Erdgas sind während H₂-Befüllungsprozessen die folgenden Parameter zu überwachen:

Gas:

- Tagesmengen und Gesamtmengen,
- Gasrate,
- Kopfdruck,
- Gastemperatur.

Sole:

- Soleabstoßmengen und Gesamtmengen,
- Spülwasser und Wasserzudosierungsmengen (optional),
- Soleaustragsmengen (Soleabstoß abzüglich Wasserzudosierung),
- Kopfdruck Sole bzw. Wasser beim Rückspülen,
- Temperatur Sole,
- Dichte Sole, Soleanalysen (Solezusammensetzung z. B. zur Potenzialabschätzung mikrobiologischer Aktivitäten bzw. für die Bewertung der gelösten Minerale),
- Entleerungs-, Spül- und Verweilzeiten.

Zur Kontrolle des Entleerungsfortschritts und für den Abgleich zwischen Planungs- und Istwerten sind Gas-Sole-Spiegelmessungen durchzuführen. Die Anzahl der Messungen ist im Rahmen der Planungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Kavernenform (Fokus: Hintersolungsbereiche) festzulegen und kann während des Betriebes operativ angepasst werden.

Nach Abschluss der Gaserstbefüllung wird die Durchführung einer Sonarvermessung (Nullmessung unter Speichergasbedingungen) mit einem Abgleich zur Soleendvermessung und zum ausgelagerten Solevolumen empfohlen.

7.4.3 Entleerungsregime Forschungskaverne, diskontinuierliche Fahrweise

Die Forschungskaverne B hat das Solende erreicht. Die Kaverne ist stark asymmetrisch ausgebildet und weist eine unregelmäßige Kontur auf. Das Kavernenendvolumen beträgt ca. 500.000 m³. Unter Berücksichtigung der Absetzteufe des Soleentleerungsstranges ergibt sich ein Nutzvolumen von 497.450 m³.

Die Tabelle 64 gibt einen Überblick über die Berechnungsgrundlagen zur H₂-Erstbefüllung bzw. Soleentleerung der Forschungskaverne B.

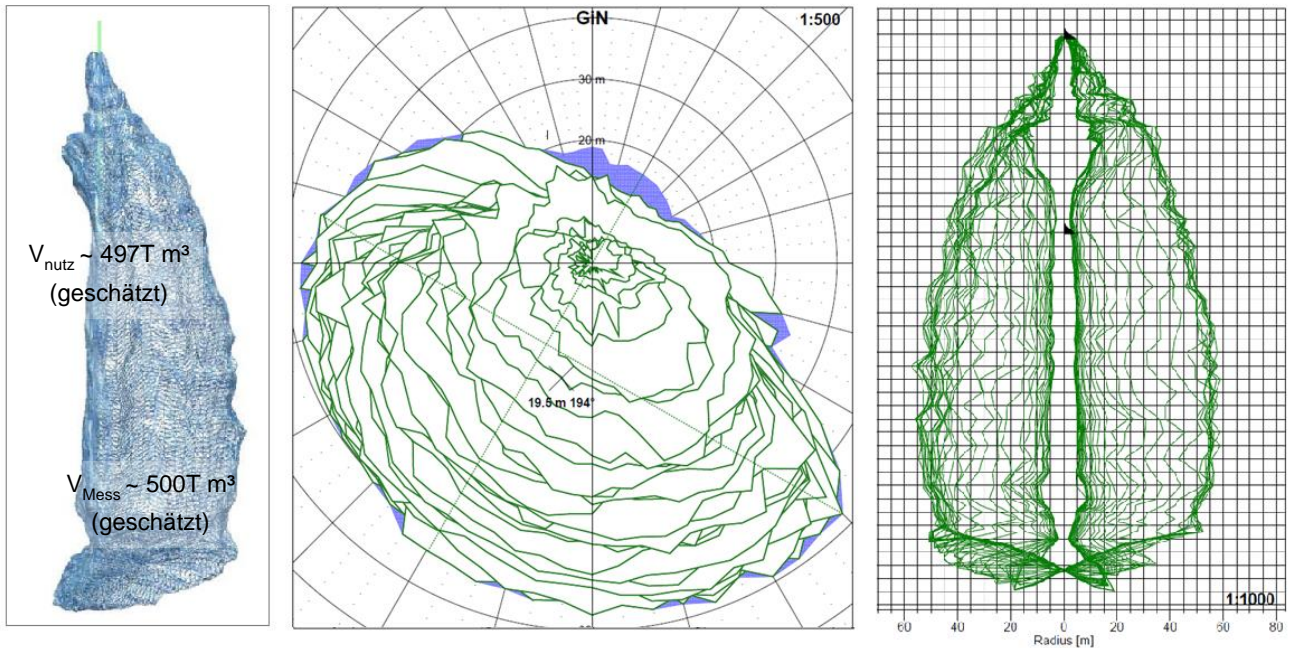


Abbildung 183: Forschungskaverne B, Vertikalschnitt 330°–150°, Sonarvermessung 05.02.2016

Tabelle 64: Berechnungsgrundlage Gaserstbefüllung Forschungskaverne

Parameter	Einheit	Vorgaben/Annahme
Rohrschuh technische Rohrtour (RS TR) 16"	[m]	689
Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour (RS IzRT) 13 3/8"	[m]	850
Rohrschuh Förderrohrtour (RS FRT) 9 5/8"	[m]	840
Rohrschuh Soleentleerungsrohrtour (RS SRT) 4 1/2" / Wanddicke	[m] / [mm]	1.096,5 / 6,88
Spiegelteufe Sole	[m]	898
Durchmesser OT-Leitung	[mm]	100
Durchmesser Spülleitung	[mm]	50
Rohrrauigkeit k FRT	[mm]	0,2
Rohrrauigkeit k SRT und Leitung, obertage	[mm]	0,1
Rohrrauigkeit k Leitung, Spülung	[mm]	0,4
Gaszusammensetzung, Gastemperatur	[°C]	reiner H ₂ , 40
Soledichte [kg/m ³], Soletemperatur	[°C]	1.200, 32
Druckgradient	[bar]	0,187
Zulässiger Druck am IzRS	[bar]	158,95
Maximaldruck IzRS abzüglich 10 %-ige Reserve (siehe Varianten)	[bar]	143
Maximaldruck IzRS abzüglich 5 %-ige Reserve (siehe Varianten)	[bar]	151
Minimaldruck IzRS	[bar]	30
Minimal zulässiger Druck vor dem Regelventil	[bar]	2
Soleaustragsrate (max. Abnahmekapazität)	[m ³ /h]	30
Gasrate	[m ³ /h i. N.]	10.000–11.000
Fahrweise		diskontinuierlich

Zunächst erfolgte die Berechnung bei kontinuierlicher Fahrweise. Bei einer Soleentleerungsrate von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ und einem maximalen Druck von 143 bar kann eine Gasrate von ca. $3.300 \text{ m}^3/\text{h}$ i. N. realisiert werden. Grundsätzlich sind beim Entleerungsprozess aufgrund prozesstechnischer Anforderungen und hinsichtlich gebirgsmechanischer Aspekte kontinuierliche Fahrweisen gewünscht. Da die gewünschte Gasrate nicht erreicht wurde, erfolgte die Berechnung für einen diskontinuierlichen Gasbetrieb. Diskontinuierliche Fahrweisen führen jedoch zu Druckschwankungen. Die Kaverne wird durch Gaseinspeisung jeweils bis zum Maximaldruck aufgepuffert und fällt dann bis zu einem vertretbaren p_{MIN} (Annahme 120 bar) ab. Die Soleentnahme läuft stets kontinuierlich weiter mit $30 \text{ m}^3/\text{h}$, entsprechend den lokalen Soleabstoßbedingungen. Die Dauer der einzelnen Etappen nimmt mit fortschreitendem Befüllgrad der Kaverne zu. Gegen Ende des Entleerungsprozesses wird der p_{MIN} nicht mehr angefahren, da die Solerate von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ sonst nicht mehr sichergestellt werden könnte. Die Abbildung 184 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Betriebsparameter der Entleerung der Forschungskaverne bei diskontinuierlicher Fahrweise.

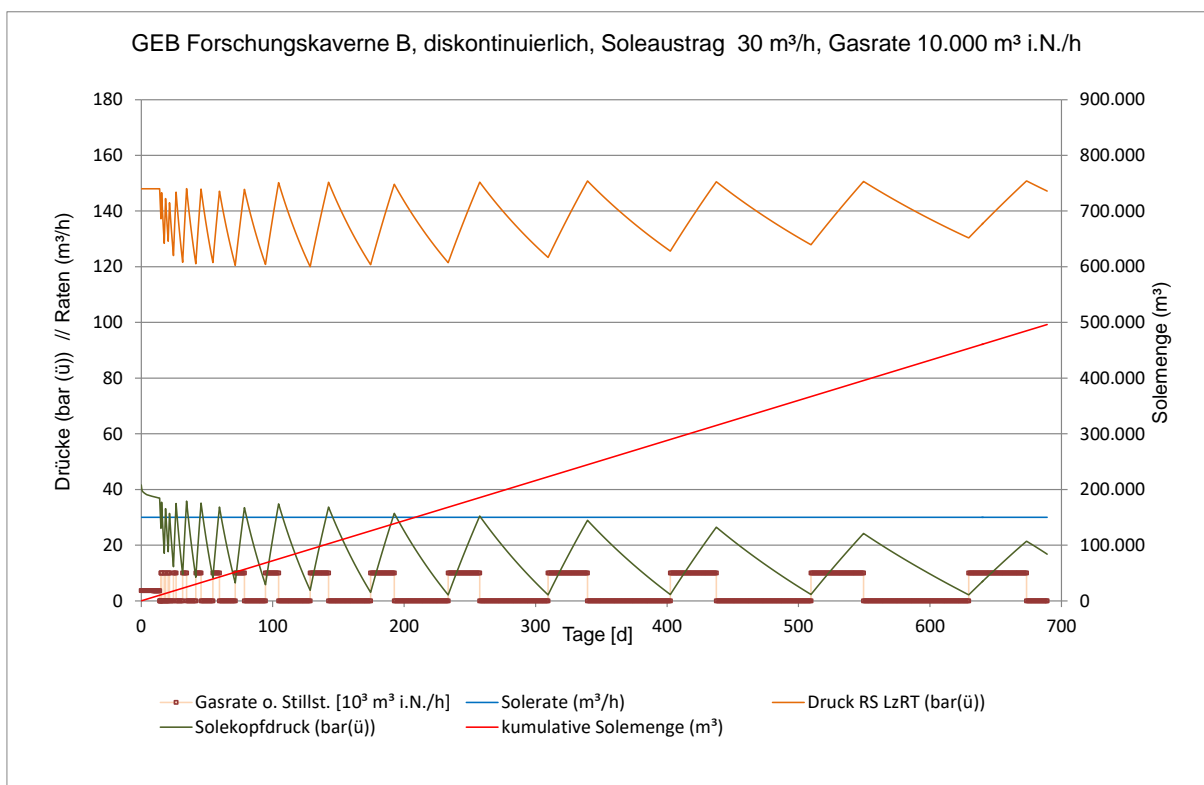


Abbildung 184: Exemplarische Entwicklung der Betriebsparameter bei diskontinuierlicher Befüllung der Forschungskaverne B, Soleaustrag $30 \text{ m}^3/\text{h}$, Gasrate $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ i. N.

7.4.4 Entleerungsregime Typkaverne, diskontinuierliche Fahrweise

Bei den Berechnungen zur H_2 -Erstbefüllung wurde die für das Verbundvorhaben H_2 -UGS festgelegte Typkaverne zugrunde gelegt (siehe Abbildung 61) sowie die in Tabelle 65 aufgeführten Parameter als Berechnungsgrundlage genutzt.

Tabelle 65: Berechnungsgrundlage Gaserstbefüllung Typkaverne

Parameter	Einheit	Vorgaben/Annahme
RS TR 16"	[m]	700
RS IzRT 13 $\frac{3}{8}$ "	[m]	850
RS FRT 9 $\frac{5}{8}$ "	[m]	840
RS SRT 4 $\frac{1}{2}$ " / 1 m oberhalb Sumpf/Wanddicke	[m] / [mm]	1.099 / 6,88
Spiegelteufe Sole	[m]	880
Durchmesser OT-Leitung	[mm]	100
Durchmesser Spüleleitung	[mm]	50
Rohrrauigkeit k FRT	[mm]	0,2
Rohrrauigkeit k SRT und Leitung, obertage	[mm]	0,1
Rohrrauigkeit k Leitung Spülung	[mm]	0,4
Gaszusammensetzung, Gastemperatur	[°C]	reiner H ₂ , 40
Soledichte, Soletemperatur	[kg/m ³], [°C]	1.200, 30
Druckgradient	[bar]	0,205
Zulässiger Druck am LzRS	[bar]	174
Maximaldruck LzRS abzüglich Reserve	[bar]	158
Minimaldruck LzRS	[bar]	30
Minimal zulässiger Druck vor dem Regelventil	[bar]	2
Gasrate, Startvariante	[m ³ /h i. N.]	2.000–5.000
Gasrate, Referenzvariante	[m ³ /h i. N.],	20.000–50.000
Solerate, Startvariante/Referenzvariante	[m ³ /h]	60/120
Fahrweise		diskontinuierlich

7.4.4.1 Variante 1 – Startvariante

Zunächst wurde eine Soleentleerungsrate von 120 m³/h definiert. Nach einer hinsichtlich der ein- und austretenden Mengen reduzierten Startphase wirkt sich in dieser Variante die Gasrate limitierend auf den Gesamtprozess aus. Ein diskontinuierlicher Entleerungsprozess bedeutet in diesem Fall das gelegentliche Pausieren der Soleentnahme, während die Gaszufuhr kontinuierlich mit der maximalen Einspeicherleistung betrieben wird. Da Soleaustragsrate und Gaseintragsrate nicht miteinander in Einklang stehen, wären sehr häufige Wechsel des Fahrregimes mit entsprechend starken Druckschwankungen die Folge. Um den Prozess zu optimieren, wurde im Zuge der Prozesssimulation die Soleaustragsrate von 120 auf 60 m³/h reduziert. Dies bringt folgende Vorteile:

- die gebirgsschonendere Fahrweise aufgrund geringeren Druckschwankungen bzw. Druckänderungsraten,
- die Auslegung der Soleentgasungsanlage bzw. der Soleabstoßes kann reduziert werden,
- weniger und kürzere Unterbrechungen des Soleaustrages.

Abbildung 185 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Betriebsparameter.

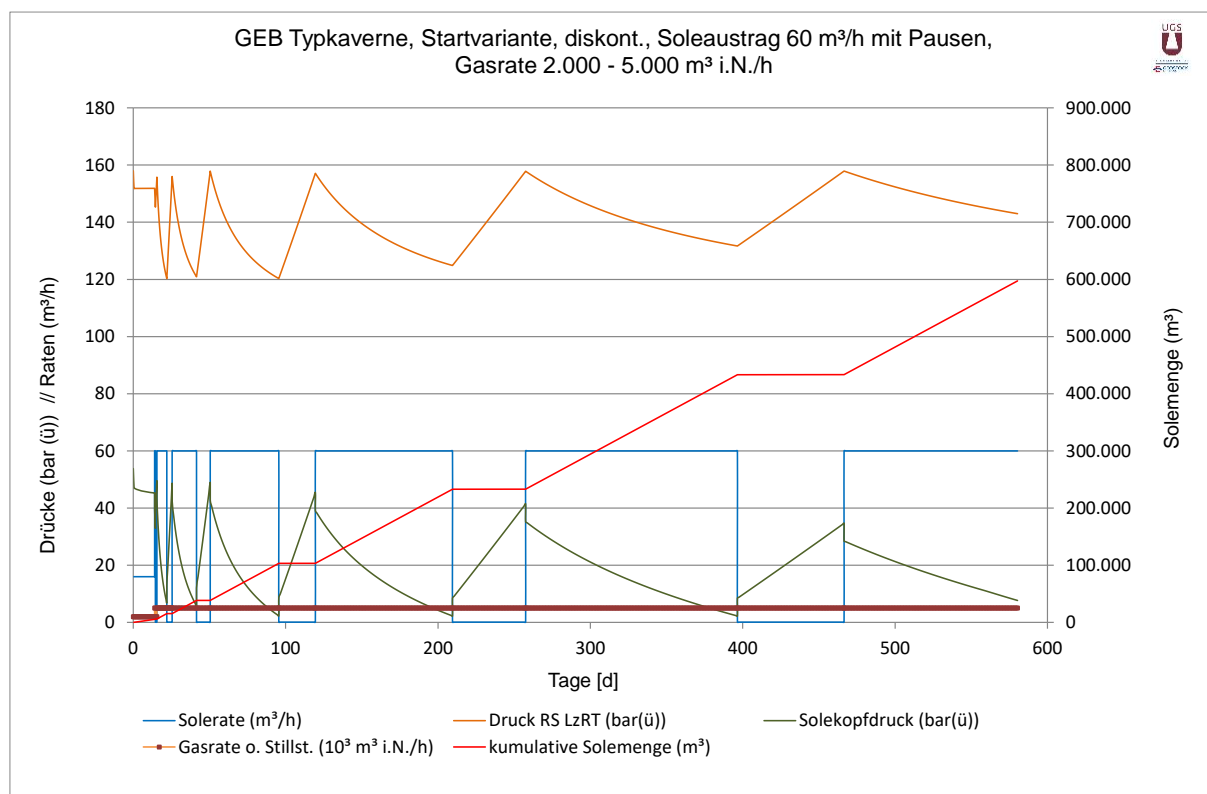


Abbildung 185: Exemplarische Entwicklung der Betriebsparameter bei diskontinuierlicher Befüllung einer Typkaverne, Startvariante: Soleaustrag 60 m³/h (mit Pausen), Gasrate 2.000–5.000 m³/h i. N.

7.4.4.2 Variante 2 – Referenzvariante

Die diskontinuierliche Fahrweise, in der vorliegenden Variante nur sporadischen Gaseinspeisung bei konstanter Soleauslagerung, führt während einer Gaserstbefüllung zu Druckschwankungen in der Kaverne und am Bohrlochkopf. Wenn sich die Druckschwankungen nicht auf die Soleaustragsrate auswirken sollen, sondern diese konstant zu halten ist, so muss stets ein Mindestdruck aufrechterhalten werden. Dieser Umstand schränkt das zulässige Druckspiel mit sinkendem Solespiegel zunehmend ein. Es kommt zu einer Vielzahl von Wechsell.

Für die Referenzvarianten mit den in Tabelle 65 genannten Betriebsparametern muss für die ersten Tage der Gaserstbefüllung eine Sonderlösung gefunden werden. Die minimale Gasrate des Verdichters mit 20.000 m³ i. N. ist für einen Soleaustrag von 120 m³/h zu hoch. Optionen für diese Sonderlösung wäre z. B. das sehr kurzzeitige An- und Abfahren des Verdichters für Minuten oder wenige Stunden oder das Abtrennen eines Teilstromes und Rückführung auf die Saugseite des Verdichters (Kreisfahrweise). Bei den dargestellten Betriebsparametern wäre eine Gasrate von ca. 14.600 m³/h i. N. optimal, damit ließe sich der Gasdruck relativ konstant halten. Abbildung 186 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Betriebsparameter.

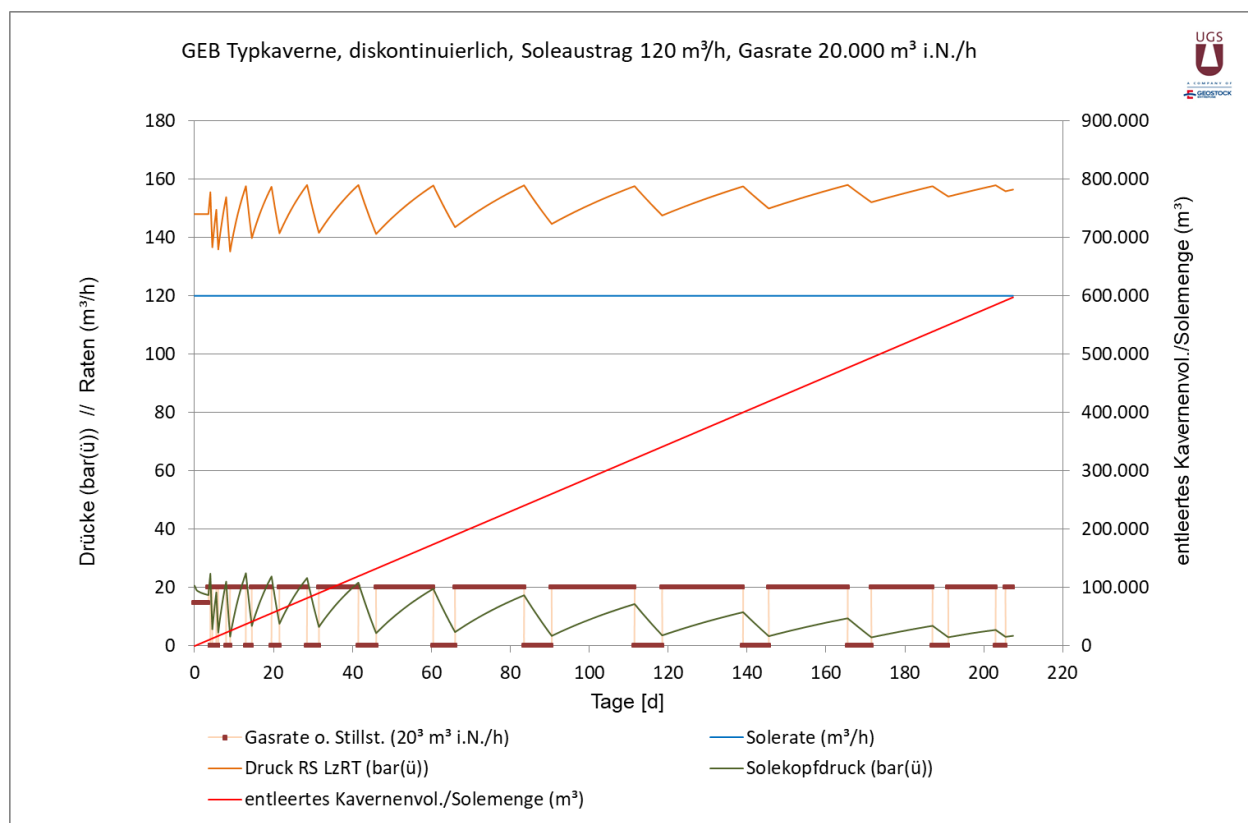


Abbildung 186: Exemplarische Entwicklung der Betriebsparameter bei diskontinuierlicher Befüllung einer Typkaverne, Referenzvariante: Soleaustrag 120 m³/h, Gasrate 20.000 m³/h i. N.

7.4.4.3 Ergebnisübersicht

Tabelle 66: Übersicht Vorgaben und Berechnungsergebnisse Varianten diskontinuierliche Gaserstbefüllung

	Einheit	Forschungskaverne	Typkaverne Startvariante	Typkaverne Referenzvariante
Nutzvolumen	[m ³]	496.200	597.400	597.400
Gasrate	[m ³ /h i. N.]	0 // 10.000	2.000–5.000 durchgängig	0 // 20.000
Soleaustragsrate	[m ³ /h]	30	0 / 16 bzw. 60	120
Dauer (netto)	[d]	689	580	207
Druckspiel	[bar]	120–150,8	119–157	135–157
Druck am Ende (am Rohrschuh)	[bar]	147	142	156
Gasmenge in Kaverne am Ende	[Mio. m ³ i. N.]	58,5	68,5	74,4

7.5 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen auf Basis der experimentellen Untersuchungen zum Verbund Casing/Zement/Gebirge

Im Rahmen der Untersuchungen am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau der TU Bergakademie Freiberg zur Bohrungsintegrität von Wasserstoff und basierend auf der praktischen Erfahrung des Institutes mit der Speicherung von Erdgas konnten keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich der Bohrungsintegrität zwischen Gasspeicherung und H₂-Speicherung festgestellt werden.

Die Feststellung der Funktion der Barriere-Elemente Zement, Verbund Zement/Casing sowie Zement/Formation beruht zurzeit auf der kontinuierlichen Überwachung der Bohrung, da aktuell noch keine Felderfahrung auf dem Gebiet der H₂-Speicherung vorhanden ist.

Um sicherzustellen, dass die ober- und untertägigen Ausrüstungen in der Bohrung den Anforderungen gerecht werden, werden abhängig von dem Bohrungsprofil wiederkehrende Prüfungen, die in Tabelle 67 angegeben sind, empfohlen.

Tabelle 67: Wiederkehrende Prüfung von Bohrungsausrüstung

Bauteil	Methode	Art der Prüfung
Bohrlochkopf komplett	Sichtprüfung, Drucküberwachung	Sichtprüfung, Drucküberwachung
Ringraum	Drucküberwachung	Dichtigkeit
Tubing	Multifinger-Kaliber	Innendurchmesser, Ablagerungen, Ovalität
Tubing	Druckprüfung	Dichtigkeit des Tubings
LZ-Casingschuh	Bohrlochsonde (z. B. URS, MTD) oder vergleichbares Messverfahren	Materialprüfung, Wanddicke, Korrosionsrate, Rohrgeometrie und Zementanbindung an Casing und Formation
Produktions-casing	Multifinger-Kaliber und URS bzw. Druckmessungen	Materialprüfung, Wanddicke, Korrosionsrate, Rohrgeometrie und Zementanbindung und Druckfestigkeit

Handlungsempfehlungen zur Werkstoffauswahl für Kavernen zur H₂-Speicherung

Die Eignung der eingesetzten Rohrwerkstoffe für die geplante H₂-Anwendung ist vor Einsatz zu erbringen. Unter Berücksichtigung des thermodynamischen Verhaltens von Wasserstoff ist die axiale Spannungssituation von Förderrohrtouren zu minimieren. Auf Grund der derzeit geringen Erfahrungen zum Werkstoffeinsatz bei der untertägigen H₂-Speicherung sollte die Spannungsauslastung der verwendeten Werkstoffe auf 30 % der Mindeststreckgrenze bzw. 20 % der Mindestzugfestigkeit begrenzt werden, wobei der kleinere der beiden Werte maßgeblich ist. Die Sicherheitsbeiwerte gemäß BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“ sind ggf. anzupassen.

Handlungsempfehlungen Untertagedesign

Je nach vorhandener Bohrungssituation (I, II, III) sind geeignete Komplettierungskonzepte unter Einhaltung des Zwei-Barrien-Konzepts zu entwickeln. Für Bestandsbohrungen ist im Vorfeld zu prüfen, ob die Anforderungen nach BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ eingehalten werden bzw. durch entsprechende Rekomplettierung erreicht werden können.

Hinsichtlich einzusetzender Untertageausrüstungen sind für Wasserstoff geeignete Materialien zu verwenden. Sollten diese auf dem Markt nicht verfügbar sein, sollte u. U. eine Auslegung nach Sauer gasstandard erfolgen. Die Festlegung dazu ist auf Basis der Ergebnisse aus mikrobiologischen Untersuchungen zu treffen, z. B. sollte im entsprechenden Anwendungsfall ein erhöhtes Potenzial zur H₂S-Bildung vorhanden sein. Mögliche Untersuchungen wurden für die verschiedenen Betriebsphasen durch die Mikrobiologie in Kapitel 5.4 benannt.

Flexible Anlagenkomponenten können zusätzlich zyklischen Prüfungen unterzogen werden, um den Einfluss von Wasserstoff während des Gasspeicherbetriebes zu analysieren und zu überwachen (siehe Kapitel 9).

Die Notwendigkeit des Einsatzes eines Ringraum-Untertagesicherheitsventils für die Dauer der Gaserstbefüllung wird mit speziellem Bezug zur H₂-Speicherung nicht gesehen, da es sich um eine temporäre Betriebsphase handelt.

Wasserstoff(erst)befüllung

Da es sich bei der Gaserstbefüllung um einen temporären Prozess handelt, müssen die flexiblen Anlagenkomponenten nicht zwingend H₂-resistent ausgelegt sein. Sollte ein solegetriebener H₂-Prozess geplant sein, ist in Anhängigkeit der geplanten Dauer die Notwendigkeit H₂-resistenter Materialien bzw. Anlagenkomponenten zu prüfen.

Die zulässigen Druckschwankungen (Druckänderungsrate) während Wasserstoff-Befüllungsprozessen werden vom zuständigen Gebirgsmechaniker fallbezogen vorgegeben. Sie liegen in der Regel in Bereichen von 10–30 bar/d. Der Druck am Rohrschuh darf sich während der Gaserstbefüllung zwischen dem gebirgsmechanisch zulässigen p_{MIN} und p_{MAX} bewegen.

Die Überwachung von H₂-Befüllungsprozessen kann nach dem üblichen Standard der Erdgasbefüllung (siehe 7.4.1) erfolgen. Ggf. sind ergänzend spezielle Soleanalysen durchzuführen, wenn hinsichtlich des Soleabstoßes besondere Qualitätsanforderungen bestehen oder um potenzielle mikrobiologische Prozesse und somit den Einfluss auf die Reinheitsanforderungen von Wasserstoff abschätzen bzw. bewerten zu können (siehe Kapitel 2.2, 5 und 0). Der Analyseumfang richtet sich dabei nach den jeweiligen Anforderungen des Betreibers bzw. dem geplanten Verwertungsmodell des Wasserstoffes.

Für die H₂-Befüllung und den Speicherbetrieb ist ein Sicherheits- und Brandschutzdokument zu erstellen. Die notwendigen Inhalte sind zwischen dem Betreiber und der zuständigen Behörde abzustimmen. Im Wesentlichen sollten die folgenden Punkte enthalten sein:

- Grundlagen:
 - obertätige Baumaßnahmen (Neugestaltung Kavernenplatz),
 - Windenarbeiten,
 - Errichtung des gastechnischen Anschlusses inklusive Erstinbetriebnahme Gasbetrieb,
 - Gaserstbefüllung mit anschließenden Snubbing-Arbeiten unter Gas,
 - Speicherbetrieb als Dauerbetrieb,
- Gefahrenanalyse für Baumaßnahmen, technische Arbeiten und Betriebsphasen,
- Beschreibung der geplanten Arbeiten und des Betriebes,
- Überwachung der Arbeiten und des Betriebes,
- Maßnahmen zur Gewährleistung des sicheren Betriebes.

7.6 Ausblick – Risiken und Chancen

Um eine verlässliche Risikobewertung für H₂-Speicherprojekte durchführen zu können, ist eine Bewertung jeder einzelnen Komponente als Barriere im Bohrloch unerlässlich.

Bohrlochbarrieren werden durch eingebrachte Barriere-Elemente gebildet. Im laufenden Betrieb unterscheidet man zwischen mechanischen Barrieren, wie beispielsweise Casing und Zement nach abgeschlossener Komplettierung, und geologischen Barrieren, wie dem Deckgebirge der Lagerstätte.

Das Versagen eines einzelnen Elements führt nicht zwangsläufig zum Verlust der kompletten Integrität, da teilweise Redundanzen existieren (z. B. Casing/Zement/Gebirge).

Vor jedem Gasinjektionsprojekt, unabhängig von der Art des Gases oder den geologischen Gegebenheiten, ist eine eingehende Risikobewertung erforderlich. Chemische und physikalische Wechselwirkung während der Gasinjektion können Formationsschäden auslösen und letztlich die Integrität des Bohrlochs gefährden. Anders als bei der Wechselwirkung des Wasserstoffs mit einigen metallischen Werkstoffen ist das Migrationsverhalten des Wasserstoffs in geologischen Formationen und Zementationen trotz seines hohen Mobilitätspotenzials mit anderen Gasen, z. B. Stickstoff oder Methan, vergleichbar.

Wie bei der Speicherung von Erdgas im geologischen Untergrund gilt eine besondere Aufmerksamkeit dem Verbund von Zement und Gebirge bzw. Casing. Die für die Überwachung der Erdgasspeicherung geltenden Festlegungen, wie Wartungsprogramme, Monitoring und Überwachungsanforderungen, sind grundsätzlich auf die H₂-Speicherung übertragbar.

7.7 Literaturverzeichnis

- Amro, M., Müller, M. (2013). Untersuchung zum Auskristallisationsverhalten gesättigter Sole beim Abkühlungsprozess, Abschlussbericht, uneröffentlicht, 13.09.2013.
- API Spezifikation 6A, 21st Edition, „Wellhead and Tree Equipment“, American Petroleum Institute Washington, 11/2019.
- API Spezifikation 14A, 12th Edition, „Subsurface Safety Valve Equipment“, American Petroleum Institute Washington, 01/2015.
- API SPEC 14L, 3rd Edition, „Lock Mandrels and Landing Nipples“, American Petroleum Institute Washington, 06/2020.
- API Recommended Practice 14B, „Design, Installation, Operation, Test, and Redress of Subsurface Safety Valve Systems“, American Petroleum Institute Washington, 09/2015.
- API 5CT 10th Edition, Specification for Casing and Tubing, American Petroleum Institute, 07/2019.
- API 5L 45th Edition „Seamless and Welded Pipe“ PSL2, pipe grades B and X42 – X120, Product Specification Level, American Petroleum Institute Washington D. C., 2007
- Bültemeier, H., Keßler, B., Hüttenrauch, J., Sperlich, J., Kühn, M., Schlichtenmayer, M., Wagler, T., Kruck, O., Schneider, G.-S., Abdel Haq, C., Bayer, T., Faatz, K., Faber, T., Frommhold, A., Miersch, D., Schwabe, M., Städtke, L., & Zemke, J. (2022). Wasserstoff speichern – soviel ist sicher – Transformationspfade für Gasspeicher. Hrsg. v. INES Initiative Energien Speichern e.V., Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität – Technische Regel“; Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., 07/2021.
- BVEG-Leitfaden „Auswirkungen von Störfällen im Speicherbetrieb auf die Nachbarschaft“, 09/2017.
- DIN EN ISO 16530-1:2017, „Erdöl- und Erdgasindustrie – Bohrungsintegrität – Teil 1: Lebenszykluslenkung“, 11/2017.
- DIN EN ISO 14310:2009-03, „Erdöl- und Erdgasindustrie – Bohrloch-Ausrüstung – Packer und Brückenstopfen (ISO 14310:2008)“, 2009.
- EIGA-Richtlinie „Hydrogen Pipeline Systems“, IGC Doc 121/14, European Industrial Gases Association, 2014.
- UGS-Innovationen, Maut, D., & Pfeifer, K. Abgerufen von <https://www.ugsnet.de/de/innovationen/spider-plug/>
- Wackermann, K., Schweizer, F., & Pfeiffer, W. (2019). Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe: Adsorption, Diffusion und Werkstoffeigenschaften. *gwf Gas + Energie* 2-3/2019, S. 66–75.

8 Gesamtanlagendesign

Dr. Maurice Schlichtenmayer¹⁷, Jörg Fröbel⁷, Dr. Mario Gruhne¹⁷, Dr. Michael Glöckner¹⁷, Marco Henel¹⁸, Atefeh Maghamini¹⁸

8.1 Einleitung

Das Kapitel „Gesamtanlagendesign“ stellt mögliche Fahrweisen und Gesamtspeichersimulationen, eine Detailbeschreibung der obertägigen Anlagen eines H₂-Kavernenspeichers und spezifische Sicherheitsbetrachtungen dar. Durch das gewählte Vorgehen ist es möglich, zunächst wesentliche Randbedingungen herzuleiten, die die weiteren Arbeiten beeinflussen. Dazu ist es erforderlich den Gesamtspeicher hinsichtlich Kapazitäts- und Leistungsanforderungen zu dimensionieren. Darüber hinaus werden die betrieblichen Druck- und Temperaturbereiche ausgehend vom Zustand der Kaverne abgeleitet bzw. verifiziert. Auf Basis dieser Werte werden beispielhafte Anlagenkonfigurationen entworfen und die Machbarkeit bzw. Verfügbarkeit der jeweiligen Komponenten überprüft und die Grundlagen des Betriebsführungskonzeptes abgeleitet. Es wird detailliert auf die Optionen zur Verdichtung des Wasserstoffs eingegangen, da bei der Untergrundspeicherung besondere Anforderungen an den Verdichter gestellt werden. Anhand von Detailsimulationen der Speicherprozesse wird das effektive Zusammenspiel der einzelnen Komponenten nachvollzogen und verifiziert. Für die untersuchten Anlagenkonfigurationen werden mögliche kritische Abweichungen der Betriebsparameter untersucht und entsprechende Sicherheitsmaßnahmen hergeleitet.

Für den Leitfaden wurden drei Speichervarianten unterschiedlicher Größe definiert und im Detail untersucht, die als Musterbeispiele für eine Umsetzung der H₂-Kavernenspeicherung in Deutschland in den nächsten Jahrzehnten dienen können.

8.2 Grundlagen der Wasserstoffspeicherung im Hinblick auf das Gesamtanlagendesign

Die Grundlagen der H₂-Speicherung unterscheiden sich nicht wesentlich von denen der herkömmlichen Erdgasspeicherung. Die wesentlichen Rahmenbedingungen sind nachfolgend zusammengefasst:

- Teufenbereich der Kaverne und damit maximaler und minimaler Betriebsdruck, sowie Temperaturverhalten in der Kaverne;
- Maximale Ein- und Ausspeicherkapazität der einzelnen Kaverne und des gesamten Speichers;
- Herleitung der sich einstellenden Kopfdrücke am Bohrlochkopf und Förderraten bei Ein- und Ausspeicherung, abhängig von geologischen und physikalischen Randbedingungen sowie von der Komplettierung der Bohrung;
- Länge der Feldleitung von der Obertageanlage (OTA) zur Kaverne, Druckverluste des Wasserstoffs beim Transport durch die Feldleitung.
- Verdichter:

¹⁷ ESK GmbH, Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg

¹⁸ DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Karl-Heine-Straße 109/111, D-04229 Leipzig

- Benötigter maximaler Verdichterausgangsdruck, in Abhängigkeit vom Pipelinedruck,
- Verdichtertyp: z. B. Kolben- oder Turboverdichter, ölfrei oder geschmiert,
- ein- oder zweistufige Verdichtung, benötigte Rückkühltemperatur(en).
- Es ist auszuarbeiten, ob durch bestimmte Komponenten eine Limitierung bezüglich einer minimalen oder maximalen Durchflussrate besteht.
- Die Kapazität der Gasaufbereitungsanlage ist so auszulegen, dass bei der Ausspeicherung die definierte Reinheitsanforderung (z. B. Grade A oder Grade D) gewährleistet wird. Dazu sind mögliche Begleitkomponenten, z. B. aus mikrobiologischer Aktivität oder aus der geologischen Formation, vorab zu identifizieren und eine geeignete Aufbereitungstechnik auszuwählen.
- Die Messtechnik, vor allem für die fiskalische Messung, ist festzulegen.
- Gemäß der Anlagenkonfiguration und der Betriebsdrücke und -raten ist eine Sicherheitsbeurteilung (HAZOP) und EX-Zonen-Auslegung vorzunehmen.
- Sämtliche Materialien, die mit dem Speichermedium in Kontakt kommen, sind so auszuwählen, dass sie Sicherheit gegen Degradation auch unter dynamischen Bedingungen (Wechsellasten) bieten.
- Die stoffspezifischen Besonderheiten des Speichermediums Wasserstoff sind hinsichtlich Anlagenkonfiguration (Joule-Thomson-Koeffizient) in der Auslegung zu berücksichtigen (andere Anforderungen an die Vorwärmung/Kühlung).

Im Gesamtprojekt sind die Einflussfaktoren, die sich aus den zuvor dargestellten Ergebnissen der verschiedenen Bereiche ergeben, in der Verzahnung der Projektinhalte zu übertragen und bei der Konfiguration der OTA zu berücksichtigen.

Dies betrifft zum einen die Schnittstelle UT/OT am Bohrlochkopf, wo die wesentlichen Parameter hinsichtlich des Durchflusses bei Ein- und Ausspeicherung sowie maximale und minimale Kopfdrücke bei den verschiedenen Befüllungsgraden der jeweiligen Kaverne bestimmt werden. Aber auch die Parameter der Erstbefüllung/Solverdrängung bei der Herstellung einer neuen Kaverne sind maßgeblich für das Anlagendesign in dem Sinne, ob ein separater Verdichter dafür eingesetzt werden muss oder ob die Verdichter für den Einspeicherbetrieb diese Aufgabe bei angepasster Auslegung mit übernehmen können.

Mikrobiologische Aspekte werden als weiterer Input berücksichtigt, da im Kavernensumpf entsprechende Aktivitäten bzw. Stoffwechselprodukte zu unerwünschten Gasbegleitstoffen führen können.

Diese müssen bei der Auswahl und Auslegung der Reinigungsanlagen für das auszuspeichernde Gas (H₂S-Entfernung?) geprüft werden.

Ein weiterer Aspekt ist die grundlegende Anforderung an die zu gewährleistende Reinheit des Wasserstoffes. Hierfür maßgeblich ist für die Anlagen der Gasversorgung die DVGW Regel G 260 (hier 5. Gasfamilie).

8.3 Betriebsführungskonzept

8.3.1 Speicherfahrweisen auf Basis realistischer Marktmodelle

Die vorliegenden Untersuchungen wurden standortneutral durchgeführt, um eine weitreichende Anwendbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. So ist zunächst offen, wie der Gesamtspeicher hinsichtlich Kapazität und Leistung zu dimensionieren ist. Aus diesem Grund wurde in einem zweistufigen Verfahren – bestehend aus einer umfassenden Literaturrecherche sowie einer Befragung von Stakeholdern – im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS, die Bandbreite der bestehenden Erwartungshaltungen ermittelt. Hieraus wurden drei Speichervarianten abgeleitet, welche die relevante Bandbreite der Speicherdimensionierung abbilden.

Insbesondere im Licht der jüngeren Entwicklungen hinsichtlich einer H₂-Wirtschaft ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen im Jahr 2019 zwar bereits eine Vielzahl an Quellen zu dem Themenkomplex existierte und sich zahlreiche Akteure der Wissenschaft, der Gas- und Energiewirtschaft und angrenzender Fachbereiche hiermit auseinandersetzten, dass jedoch gerade in den letzten Jahren eine erhebliche Weiterentwicklung und Konkretisierung stattgefunden hat. Diese Entwicklungen können im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS nicht in die Detailbetrachtung mit einbezogen werden. Es wird jedoch in Kapitel 8.4 eine kurze Einordnung der Ergebnisse in den aktuellen Kontext vorgenommen.

8.3.1.1 Literaturanalyse zu Speichereinsatzszenarien

Insgesamt wurden etwa 70 Literaturquellen¹⁹ aus den Jahren 2008 bis 2019 recherchiert, von denen über 40 hinsichtlich relevanter Informationen analysiert wurden und schließlich 11 Quellen (aus den Jahren 2015 bis 2019) quantitativ ausgewertet werden konnten. Ältere Quellen wurden nicht betrachtet, da hier der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung als Basis für grünen Wasserstoff noch nicht hinreichend absehbar war. Es wurden ausschließlich frei verfügbare Literaturquellen namhafter Autoren verwendet. Die Quellen wurden inhaltlich ausgewertet, jedoch ohne eine eigene Wertung der jeweiligen Darstellungen vorzunehmen. Der Fokus der Auswertung lag auf folgenden Aspekten:

- Volumen des zukünftigen Wasserstoffmarkts,

¹⁹ Liste der Literaturquellen: (Nitsch, 2008), (Wietschel, et al., 2010); (Nitsch, et al., 2010), (Schlesinger, Lindenberger, & Lutz, 2010), (Kohler, Agricola, & Seidl, 2010), (Tröster, Kuwahata, & Ackermann, 2011), (Adamek, et al., 2012), (Krieg, 2012), (Ausfelder, 2013) (Fischer, Verse, & Fuchs, 2013), (Stolzenburg, et al., 2014), (Landing, et al., 2014), (Doetsch, Grevé, & Rohrig, 2014), (Fürstenwerth & Waldmann, 2014), (Sternner & Stadler, 2014), (Schlesinger, Lindenberger, & Lutz, 2014), (Fichtner, 2014), (Nicolosi, 2014), (Agricola, et al., 2014), (Töpler & Lehmann, 2014), (Jentsch, 2015), (Gammer, 2015), (Ausfelder, 2015), (Ausfelder, et al., 2015), (Mühleck, 2015), (Hüttenrauch, et al., 2015), (Sternner, et al., 2015), (Wallasch, Lüers, & Rehfeldt, 2015), (BP, 2016), (DIN, et al., 2016), (50Hertz, 2016), (Schenuit, Heuke, & Paschke, 2016), (Peter, Bertschmann, & Lückge, 2017), (Kirchner, et al., 2016), (Ecke, et al., 2017), (Adler, 2017), (Bothe, et al., 2017), (Hecking, et al., 2017), (Klein, et al., 2017), (Adolf, et al., 2017), (Nikogosian, Özalay, & Kaltschnee, 2018), (Smolinka, et al., 2018), (Richwien, et al., 2018), (Bründlinger, et al., 2018), (Ohlen, 2018), (Repenning, et al., 2018), (Hobohm, et al., 2018), (Gerbert, et al., 2018), (Müller-Syring, et al., 2018), (Bettgenhäuser, et al., 2018), (Moser, Marjanovic, & Stein, 2018), (Schmitz, et al., 2018a), (Tanguy, 2019), (Bothe, 2019), (Rippel, et al., 2019), (Repenning, et al., 2019), (Michalski, et al., 2019), (Ganz, et al., 2019), (Posch & Mellahn, 2019), (Hydrogen Europe, 2019)

- Prognose der zukünftig installierten gesamten Elektrolyseurleistung und des verfügbaren Überschussstroms,
- deutschlandweiter zukünftiger Bedarf für H₂-Speicher,
- Annahmen zum Speicherzyklus,
- zukünftige Quellen und Senken im H₂-Markt.

Volumen des zukünftigen Wasserstoffmarkts

Zum zukünftigen Volumen des H₂-Marktes fanden sich in den untersuchten Quellen die meisten Angaben, wobei hier 11 Quellen konkrete Zahlenangaben nennen (Abbildung 187). Der Fokus lag bei den meisten Autoren auf dem Stützjahr 2050. Von diesen führten vier auch Angaben zu den Stützjahren 2030 bzw. 2035 auf.

Unter dem Volumen des H₂-Marktes ist im Rahmen dieser Arbeit die gesamte Menge des in Deutschland erzeugten bzw. importierten sowie des verbrauchten bzw. exportierten Wasserstoffs zu verstehen, wobei eine ausgeglichene Gesamtbilanz unterstellt wird. Der H₂-Markt soll entsprechend auch diejenigen Mengen enthalten, die als Zwischenprodukt beispielsweise bei der Erzeugung von synthetischen Brennstoffen wie SNG (Synthetic Natural Gas, synthetisches Methan) oder PtL-Brennstoffen (Power-to-Liquid) Verwendung finden. Da in den betrachteten Quellen teils unterschiedliche Definitionen angesetzt werden, ermöglicht diese Herangehensweise eine optimale Schnittmenge, wobei Abweichungen aufgrund der verwendeten Definition grundsätzlich nur zu einer Untererfassung des Volumens in der verwendeten Quelle führen können.

Die Sichtweisen der Autoren sind jedoch hochgradig verschieden, teilweise wird dem Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem nahezu keine Bedeutung beigemessen, teilweise wird Wasserstoff auch als Transport-/Speicherform für einen Großteil des deutschen Primärenergieverbrauchs gesehen. In die Auswertung konnten nur Quellen aufgenommen werden, die sich überhaupt zu Wasserstoff positioniert haben. Insofern kann eine Verzerrung der Ergebnisse zugunsten eines größeren H₂-Marktes nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

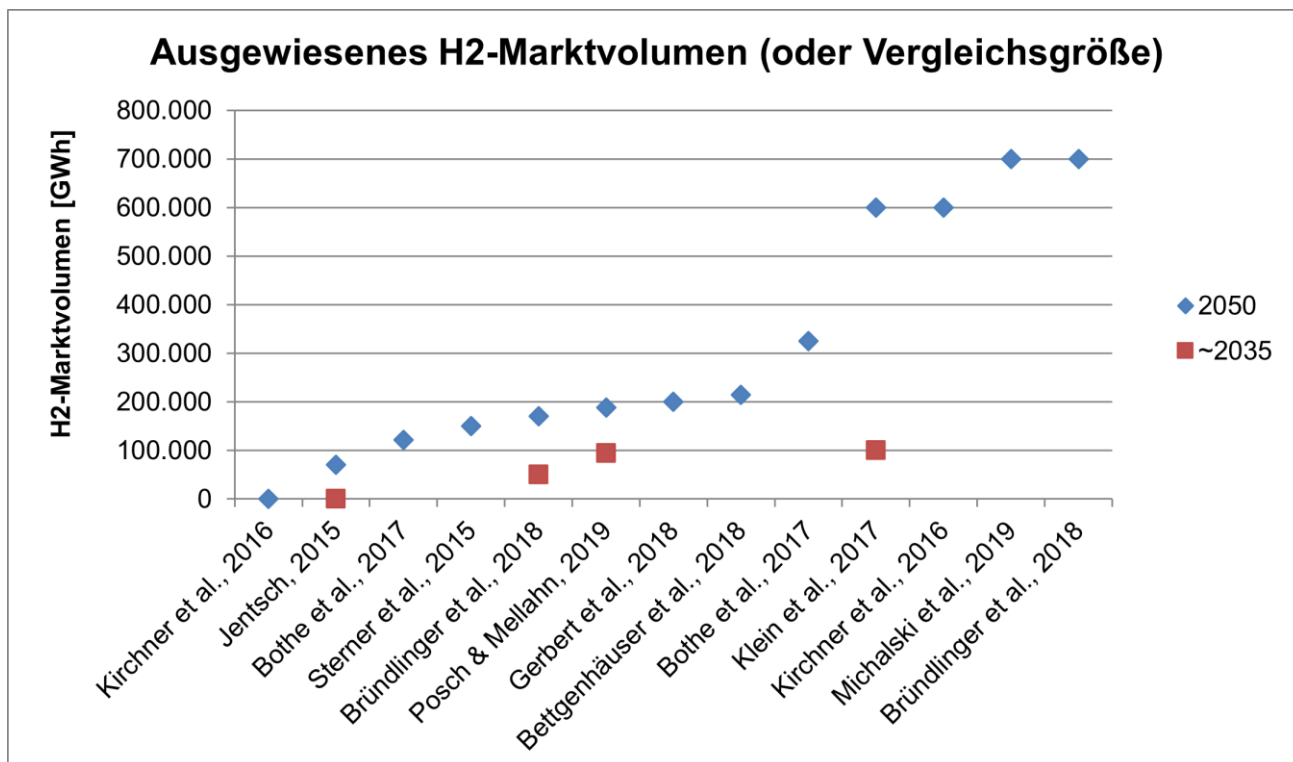


Abbildung 187: Übersicht der laut Quellen ausgewiesenen Wasserstoff-Marktvolumina oder entsprechender Vergleichsgrößen (sofern das Marktvolumen nicht explizit beziffert wurde aber entsprechende Rückschlüsse möglich sind, z. B. wurde bei Nutzung von Wasserstoff als Zwischenprodukt die angegebene Vergleichsgröße in Wasserstoffäquivalente umgerechnet).

In manchen Quellen wird nicht deutlich zwischen Wasserstoff und SNG differenziert: z. B. weist (Ecke, et al., 2017) nur SNG explizit aus, räumt aber Wasserstoff ein nicht näher spezifiziertes eigenes Marktpotenzial ein, wobei jedoch vernachlässigt wird, dass die Erzeugung von SNG über Wasserstoff als Zwischenstufe erfolgt. Eine ähnliche Darstellung findet sich bei (Gerbert, et al., 2018).

Insgesamt liegt das erwartete Marktvolumen bei den in Tabelle 68 dargestellten Werten.

Tabelle 68: Erwartetes Marktvolumen

Jahr	Einheit	Marktvolumen	Mittelwert
2035	[GWh]	0...100.000	60.000
2050	[GWh]	0...700.000	300.000

Insbesondere die Quellen mit Marktvolumina von jährlich 600.000 GWh oder mehr (Ecke, et al., 2017), (Kirchner, et al., 2016), (Michalski, et al., 2019) (Bründlinger, et al., 2018) (Bründlinger, et al., 2018) gehen von einer umfassenden Verwendung von Wasserstoff als Hauptenergieträger in allen relevanten Anwendungen aus, d. h. Nutzung in Industrie, Mobilität, Wärmemarkt und zum saisonalen Ausgleich der Stromerzeugung. An dieser Stelle kann nicht bewertet werden, wie realistisch derartige

Szenarien sind. Da allerdings auch in den konservativeren Szenarien bereits erhebliche Speicherkapazitäten erforderlich sind (siehe unten), werden die besonders progressiven Szenarien für die Speicherauslegung im vorliegenden Projekt nicht unbedingt benötigt.

Bei den Betrachtungen wurden Quellen bis einschließlich 2019 herangezogen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass das erwartete Marktvolumen auch bei neueren Quellen in vergleichbaren Größenordnungen liegt (z. B. 103 TWh–690 TWh in 2050 bei (Lux, et al., 2021)).

Elektrolyseleistung und Stromüberschussleistung

Von den untersuchten Quellen weisen zehn die maximal verfügbare Überschussleistung im deutschen Stromnetz aus (Abbildung 188). In fast allen Quellen (auch in solchen, die keine quantitativen Angaben machen) wird argumentiert, dass gerade dieser Überschussstrom sinnvollerweise zur Erzeugung von Wasserstoff verwendet werden könnte. Eine untersuchte Quelle (Nikogosian, Özalay, & Kaltschnee, 2018) weist lediglich die in Deutschland installierte Elektrolyseleistung aus, welche hier zu Vergleichszwecken gemeinsam mit der Überschussleistung dargestellt wird.

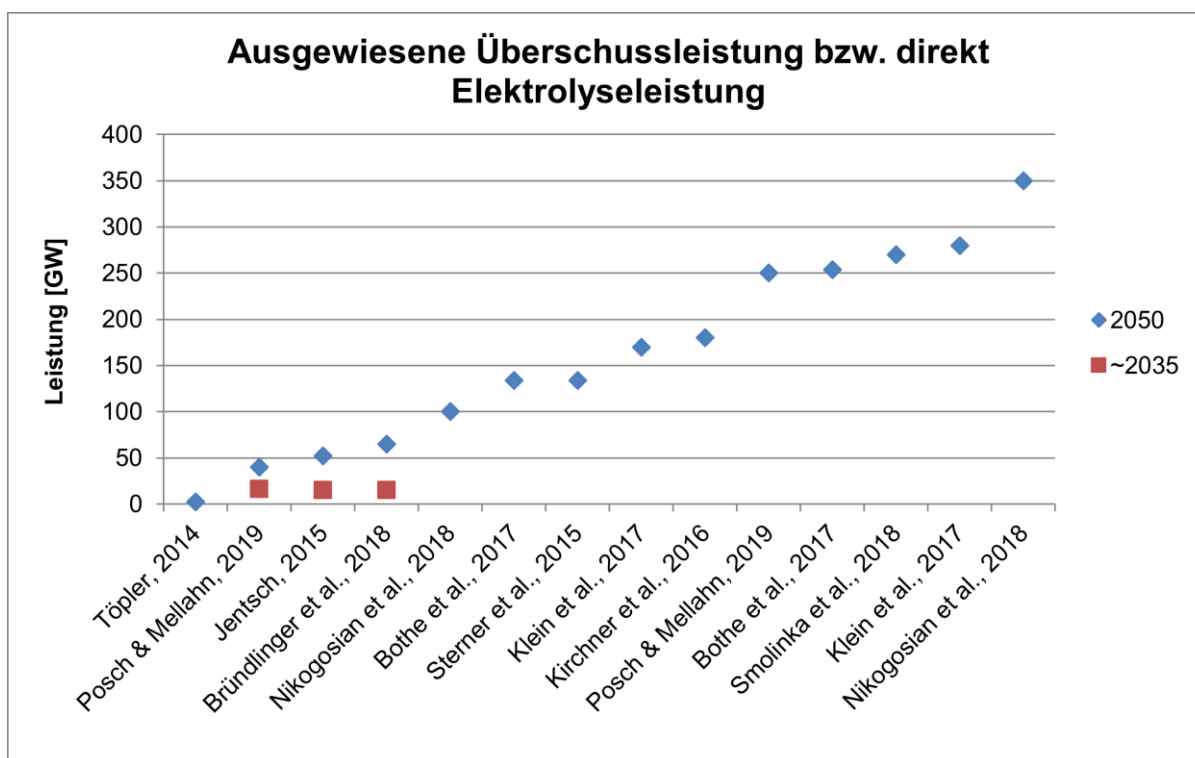


Abbildung 188: Übersicht der ausgewiesenen Überschussleistungen im deutschen Stromnetz bzw. der installierten Elektrolyseleistung

Die in den Quellen ausgewiesenen Werte liegen für 2035 bei 15 bzw. 16 GW und für 2050 zwischen Null und 350 GW. Der Mittelwert für 2050 liegt über alle Quellen bei 160 GW.

Grundsätzlich macht in den einzelnen Quellen die jeweilige maximale Überschussleistung einen signifikanten Anteil der installierten Stromerzeugungskapazitäten aus, was durch den durchgehend hohen Anteil an erneuerbarer Stromerzeugung begründet ist (Reduktion der CO₂-Emissionen um 80–95 % ist in den meisten Quellen vorausgesetzt). Dabei besteht bei allen Quellen eine positive Korrelation von Überschussleistung und H₂-Marktpotenzial, was grundsätzlich plausibel erscheint.

Unter der Hypothese, dass die deutschlandweit installierte Elektrolyseleistung an der maximalen Überschussleistung bemessen wird, lässt sich bei einigen Quellen eine hypothetische Auslastung der Anlagen ermitteln. Diese beträgt bei allen auswertbaren Quellen zwischen 750 h und 4.700 h, was vor allem in der Spitze nicht mit einer ausschließlichen Verwertung von Erzeugungsspitzen konsistent ist, jedoch grundsätzlich auch nicht völlig aus dem Rahmen fällt. Bezogen auf den Speicherbetrieb wären die Zeiten des Elektrolysebetriebs diejenigen, in denen der Speicher befüllt würde. Im Vergleich mit der typischen saisonalen Fahrweise von Erdgas-Untergroundspeichern (Erdgas-UGS), bei der die Befüllung des Speichers vorrangig in den Sommermonaten stattfindet und je nach Marktsituation wenige Monate bis etwa ein halbes Jahr in Anspruch nimmt, wäre im Fall der H₂-Speicherung grundsätzlich eine ähnliche Fahrweise denkbar. Aus den Untersuchungen geht jedoch zumeist nicht direkt hervor, ob eine Speicherbefüllung an einem Stück oder über das Jahr verteilt, stattfinden würde (siehe untenstehenden Abschnitt in diesem Kapitel zum Speicherzyklus). Es ist damit zu rechnen, dass die Speicherfahrweisen insgesamt dynamischer und fluktuierender sein werden.

Vergleicht man die ausgewiesenen Überschussleistungen mit den Leistungsdaten der bestehenden Erdgasspeicher, so fällt auf, dass die derzeit in Deutschland insgesamt installierte Plateau-Entnahmerate aller Erdgas-Kavernenspeicher zusammen mit 22 Mio. m³/h i. N. (LBEG, 2021) nur etwa der Hälfte der erwarteten Elektrolyseleistung entspricht (Mittelwert: 160 GW entspricht ohne Berücksichtigung des Wirkungsgrads 46 Mio. m³/h i. N.). Dies ist insofern bemerkenswert, als dass die Einspeicherleistung bei Erdgasspeichern üblicherweise deutlich geringer als deren Ausspeicherleistung ausgelegt ist (um etwa einen Faktor 2 kleiner, siehe (Gas Infrastructure Europe (GIE), 2022)), also deutlich. Sollte die genannte Erzeugungsleistung aus der Elektrolyse auch eingespeichert werden können, so müssten beispielsweise die Verdichteranlagen zukünftiger H₂-Kavernenspeicher (aber auch die Rohrleitungen und weitere technische Anlagen) deutlich größer ausgelegt werden, als dies bisher bei Erdgasspeichern üblich ist.

Neuere Quellen nach 2019 konnten nicht mehr im Detail in die Untersuchung mit einbezogen werden, weisen aber ebenfalls erhebliche Elektrolyseleistungen für Deutschland aus (z. B. 41 GW bis 74 GW in 2050 bei (Lux, et al., 2021)).

Deutschlandweiter zukünftiger Bedarf für Wasserstoffspeicher

Von besonderem Interesse für das Verbundvorhaben H₂-UGS sind die Aussichten bezüglich des zukünftigen Bedarfs an H₂-Speicherkapazitäten. Dieser Aspekt der H₂-Wirtschaft wird jedoch nur in wenigen der zum Zeitpunkt der Bearbeitung vorhandenen Quellen im Detail behandelt.

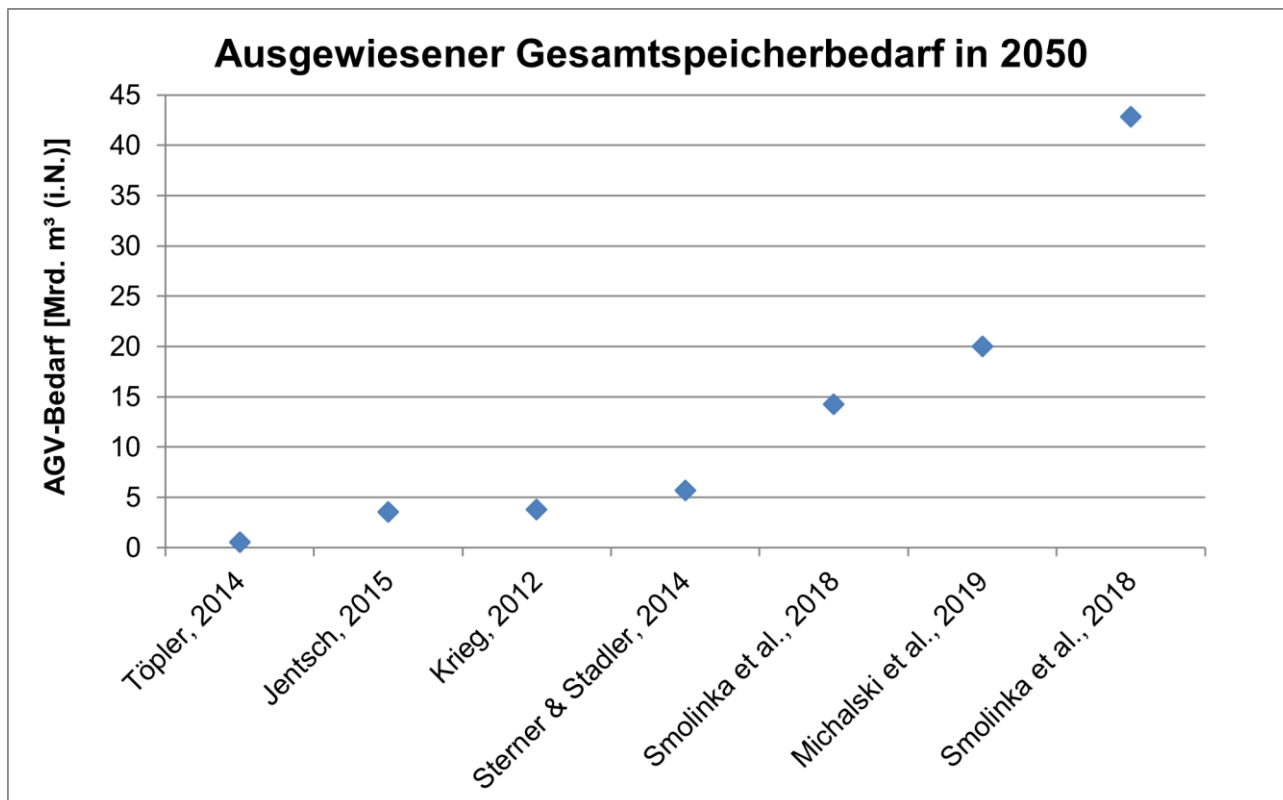


Abbildung 189: Übersicht der ausgewiesenen Gesamtspeicherbedarfe in 2050

In den untersuchten Quellen wurden lediglich für das Stützjahr 2050 konkrete Angaben zum erwarteten Gesamtspeicherbedarf für Wasserstoff in Deutschland ausgewiesen, die zwischen 0,6 und 43 Mrd. m³ i. N. liegen (Abbildung 189). Der Mittelwert liegt bei 13 Mrd. m³ i. N., was in der Größenordnung mit dem derzeitigen Erdgas-Kavernenspeichervolumen vergleichbar ist (15,2 Mrd. m³ i. N. (LBEG, 2021)). Eine Bereitstellung dieser H₂-Speicherkapazität mithilfe von Salzkavernenspeichern in Analogie zu den bestehenden Erdgasspeichern oder auch in Form einer Nachnutzung von Erdgas-Kavernenspeicher erscheint somit an dieser Stelle zumindest hinsichtlich der Speicherkapazitäten machbar.

Ein Vergleich des Speicherbedarfs mit dem H₂-Marktvolumen lässt sich leider nur bei zwei Quellen direkt ziehen (Jentsch, 2015), (Michalski, et al., 2019), wobei der Speicheranteil 10 % bzw. 18 % des gesamten Marktvolumens entspricht. Ein ähnliches Verhältnis erhält man allerdings auch, wenn man die Mittelwerte oder die Bandbreiten der insgesamt ausgewiesenen Speicherbedarfe und Marktvolumina betrachtet.

Eine Ableitung von zeitlichen Zwischenstufen bei der Speicherkapazität ist mangels publizierter Daten an dieser Stelle nicht möglich.

Auch zum Speicherbedarf gibt es in neueren Quellen Angaben, die hier nicht mehr in die Untersuchungen mit einbezogen werden können, die aber ebenfalls die Ergebnisse stützen (z. B. 13,3 Mrd. m³ i. N. bis 20,6 Mrd. m³ i. N. in 2050 bei (Lux, et al., 2021)).

Annahmen zum Speicherzyklus

Neben dem Bedarf an Speicherkapazität ist auch die Fahrweise der Speicher von großem Interesse für das Verbundvorhaben H₂-UGS, da beide in Kombination für die erforderliche Dimensionierung der technischen Anlagen zur Ein- und Ausspeicherung benötigt werden. Explizite Angaben hierzu sind in den Quellen jedoch rar und zudem widersprüchlich: Sie reichen von einer vorwiegend saisonalen Fahrweise (Krieg, 2012) zu wöchentlichen bis monatlichen Speicherzyklen (Töpler & Lehmann, 2014), (Sternier, et al., 2015). Aus einigen Quellen kann jedoch geschlossen werden, dass ein Nachfolgen der Speicherfüllstände entsprechend der erneuerbaren Stromerzeugung erwartet wird. Diese Erwartungshaltung erscheint dann schlüssig, wenn die Produktion des Wasserstoffs vorwiegend mittels Elektrolyse aus erneuerbarem Strom erfolgt und der Verbrauch über das Jahr näherungsweise konstant erfolgt. Hierdurch würde sich ebenfalls ein vorwiegend saisonaler oder auch 6-monatiger Speicherzyklus ergeben, der durch kleinskalige Fluktuationen mit kürzerer Periode (stunden-/tageweise) überlagert wird (siehe Kapitel 8.3.1.3).

Zukünftige Quellen und Senken im Wasserstoffmarkt

In der untersuchten Literatur wird eine Vielzahl möglicher Quellen für den Wasserstoff genannt und teilweise in den jeweiligen Erzeugungsleistungen sehr unterschiedlich eingestuft. Im Wesentlichen werden die folgenden Technologien bzw. Erzeugungspfade genannt:

- Wasserelektrolyse
 - Im Inland, teilweise mit Strombezug dezidiert aus angeschlossenen Windparks, bei Netzbezug wird teilweise eingeschränkt auf Direktverträge mit Erzeugern erneuerbaren Stroms oder zertifizierten Ökostromverträgen, teilweise auch nur Kappung von Erzeugungsspitzen;
 - Elektrolyse im Ausland ist in der untersuchten Literatur eher selten genannt;
 - Wasserstoff aus Elektrolyse als Zwischenprodukt bei der Herstellung von synthetischem Methan oder synthetischen Brennstoffen im Ausland wird in der Literatur genannt, wird jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht mit betrachtet, da dieser Pfad nicht direkt zum H₂-Markt in Deutschland beiträgt;
- Dampfreformierung von Erdgas, zumeist als Übergangslösung;
- Wasserstoff als Nebenprodukt bei Raffinerieprozessen und Chloralkali-Elektrolyse oder bei der Acetylenherstellung.

Da die Auswahl der Literaturquellen mit Fokus auf den H₂-Markt in Deutschland erfolgt ist, darf es nicht verwundern, dass auch bei der Herkunft des Wasserstoffs die inländische Erzeugung eine große Rolle spielt. Vielfach geht es in den Studien auch primär darum, das Energiesystem in Deutschland mit der Vernetzung – also der Sektorenkopplung – der verschiedenen Energieträger darzustellen. Die oben genannten quantitativen Auswertungen basieren zumeist auf einer Fortschreibung des Energieanlagenbestands und typischer Jahressganglinien.

Die Technologie der Methanpyrolyse sowie der Import von Wasserstoff werden in der untersuchten Literatur nur am Rande erwähnt. Insbesondere konnte keine Information zur Auswirkung von H₂-Import auf den Speicherbedarf in Deutschland ermittelt werden.

Vor allem langfristig wird in der Literatur vorwiegend Wasserstoff aus Wasserelektrolyse mittels erneuerbarem Strom erwartet. Dies unterstreicht einerseits die Annahme von saisonalen Schwankungen im H₂-Dargebot. Zudem kann hieraus abgeleitet werden, dass der Wasserstoff voraussichtlich eine hohe Reinheit bzw. eine geringe Anzahl an Nebenkomponenten aufweist. Als Begleitstoffe sind dann vor allem Wasserdampf und Sauerstoff zu erwarten. Im Gegensatz dazu muss bei einer (übergangsweisen) Erzeugung mittels Erdgasreformierung mit einem eher konstanten Dargebot und mit Verunreinigungen durch Kohlenstoffverbindungen und weiteren Erdgasnebenbestandteile gerechnet werden.

Als Senken im zukünftigen deutschen H₂-Markt werden die folgenden Sektoren bzw. Anwendungen genannt:

- Mobilität (teilweise spezifisch als Brennstoffzellen-Mobilität):
 - Individualverkehr,
 - Bahnverkehr (nicht elektrifizierte Nebenlinien),
 - Logistik (inklusive Standortlogistik).
- Stromerzeugung:
 - zum Teil als komplette Substitution des derzeitigen Erdgaseinsatzes in der Stromerzeugung,
 - zeitweise lediglich zur Netzstabilisierung.
- Verschiedene Industrieprozesse (nicht abschließende Aufzählung):
 - Stahlindustrie,
 - Ammoniakproduktion,
 - Glasindustrie,
 - Erzeugung synthetischer Brenn-/Kraftstoffe.
- Wärmemarkt.

Der Fokus wird in den verschiedenen Literaturquellen sehr unterschiedlich auf die jeweiligen Verbraucher gelegt, wobei der Mobilitätssektor tendenziell am häufigsten genannt wird. Eine Gewichtung der verschiedenen Literaturquellen soll an dieser Stelle nicht erfolgen.

Für die vorliegende Arbeit sind auch hier vor allem die Jahresganglinie und die Reinheitsanforderungen von Bedeutung. Hier kann festgehalten werden, dass in den Sektoren Mobilität und Industrie mit einer eher konstanten bzw. lediglich stunden- oder tageweise schwankenden Abnahme zu rechnen ist. Dahingegen ist vor allem im Wärmemarkt, aber auch in der Stromerzeugung mit einer signifikanten Schwankung der Abnahme im Jahresverlauf zu rechnen. Hinsichtlich der Reinheit des Wasserstoffs ist in der Mobilität mit den höchsten Anforderungen zu rechnen (DIN EN 17124, 2019), wohingegen bei Wärme und Stromerzeugung eher moderate Anforderungen zu erwarten sind (DVGW G 260, 2021). Bei den Industrieanwendungen hängt die Reinheit vom konkreten Prozess ab, wobei die Anforderungen zumeist zwischen den oben genannten liegen wird.

In der untersuchten Literatur wird davon ausgegangen, dass ab etwa 2035 die meisten der aufgezählten Verbrauchspfade weitgehend marktreif sind und zumindest in lokalen Verbrauchszentren zur Anwendung kommen. Kurzfristig ist in den meisten Quellen vor allem die Nutzung im Mobilitätssektor genannt. Hinzu kommen unspezifische Spezialanwendungen und die Beimischung ins Erdgasnetz.

Zwischenfazit zur Literaturrecherche

Laut den untersuchten Literaturquellen kann mit dem Hochlauf eines H₂-Marktes bis etwa 2050 gerechnet werden. In diesem Markt wäre auch Bedarf für Speicherleistungen in einer vergleichbaren Größenordnung wie die derzeitigen Erdgasspeicher (ggf. auch für weitere Kleinspeicher). Die Einspeicherung von Wasserstoff findet voraussichtlich volatil entsprechend dem Angebot an erneuerbarem Strom statt. Durch die schwankende H₂-Erzeugung ergibt sich bei näherungsweise konstantem Verbrauch eine vorwiegend saisonale Fahrweise (bzw. halbjährliche Fahrweise), die jedoch von Kurzzeit-Fluktuationen auf einer Zeitskala von Stunden bis wenigen Tagen überlagert wird. Somit kann auch die Dimensionierung der Obertageanlage (OTA) weitestgehend analog zu Erdgasspeichern vorgenommen werden. Hiervon abweichend sollte voraussichtlich die Einspeicherschleife (vor allem der Elektrolyseur) etwas größer ausgelegt werden, als bei Erdgasspeichern üblich, um auch verstärkt auftretende Einspeisespitzen bewältigen zu können.

Für die Hochlaufzeit bis 2050 können leider kaum Angaben in den Quellen gefunden werden. Das Marktvolumen wird beispielsweise 2035 deutlich geringer ausfallen als 2050. Aus den vereinzelt Angaben lässt sich jedoch schließen, dass auch zu dem Zeitpunkt bereits lokal begrenzt Speicherleistung von allem innerhalb von Inselnetzen erforderlich seien.

8.3.1.2 Stakeholderbefragung zum Speichereinsatz

In Ergänzung zur Literaturrecherche wurde eine Umfrage unter 80 Stakeholdern im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS durchgeführt. Diese beinhaltete keinen Anspruch auf Repräsentativität, sondern diente dazu, das Risiko für mögliche Lücken in der Literaturanalyse zu verringern. Sie umfasste die folgenden Fragen:

- Was sind Ihrer Ansicht nach die wesentlichen Quellen und Verbraucher für den zu speichernden Wasserstoff im Jahr 2025, 2035 und 2050?
- Welchen Speicherbedarf für Wasserstoff wird es Ihrer Einschätzung nach in Deutschland insgesamt im Jahr 2025, 2035 und 2050 geben?
- In welcher Größenordnung erwarten Sie die vorherrschende Speicherperiodendauer im Jahr 2025, 2035 und 2050?
- Welche Anforderungen an die maximale Ein-/Auspeicherleistung von Einzelspeichern erwarten Sie im Jahr 2025, 2035 und 2050?
- Sehen Sie den Bedarf eher für zentrale Großspeicher oder dezentrale kleinere Einheiten?
- Welche Transportform wird nach Ihrer Meinung für Wasserstoff in Deutschland in Zukunft vorherrschen?
- Was sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Literaturquellen für:
 - die zu erwartende Entwicklung der H₂-Wirtschaft,
 - die zu erwartende Entwicklung des Speicherbedarfs für Wasserstoff,
 - Sicherheitsaspekte im Zusammenhang mit Wasserstoff,
 - technische Auslegung und Genehmigungsverfahren für H₂-Anlagen?

Von den angeschriebenen Teilnehmern haben etwa 30 % auf die Anfrage geantwortet und 25 % detaillierte Antworten gegeben (jedoch nicht notwendigerweise alle Fragen vollständig beantwortet). Alle Rückmeldungen waren in sich jeweils konsistent, auch wenn die Positionen der Antwortenden teilweise deutlich auseinander lagen.

Die Nennungen der wesentlichen Quellen und Verbraucher für Wasserstoff deckten sich weitgehend mit den Ergebnissen der Literaturrecherche. Während für die Jahre 2025 und 2035 von den einzelnen Teilnehmern noch unterschiedliche Anwendungen als Schwerpunkt des H₂-Verbrauchs angesehen wurden, so wurde für 2050 von den meisten Teilnehmern eine umfassende Nutzung in allen Bereichen erwartet.

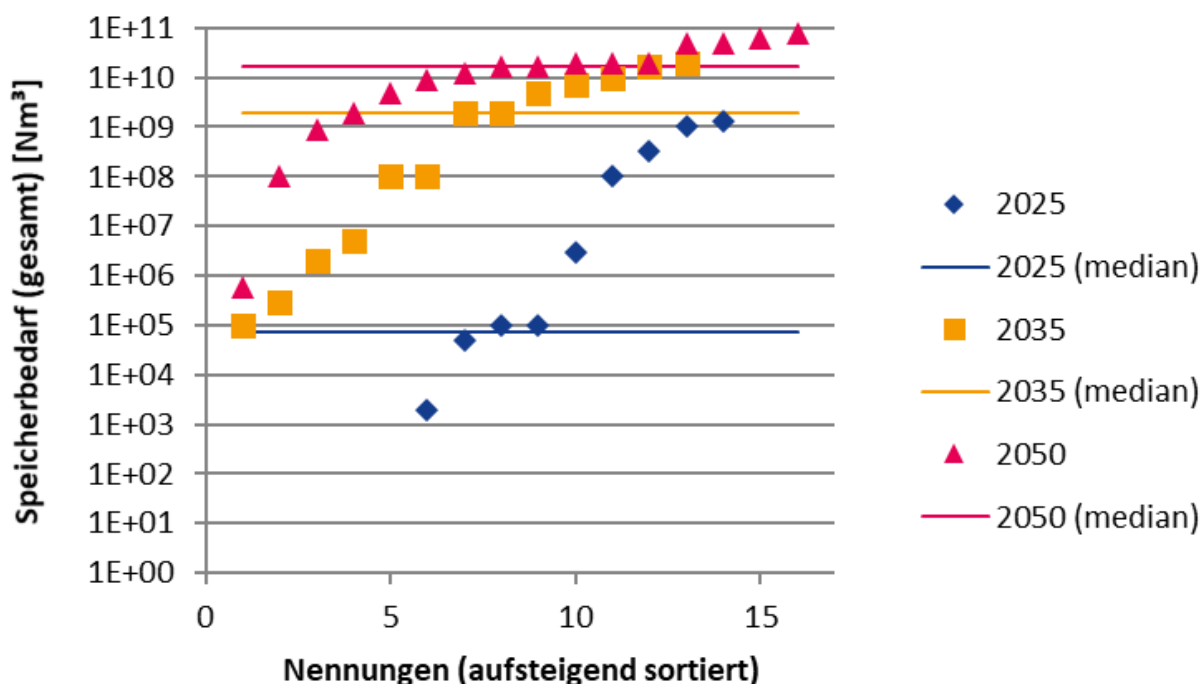


Abbildung 190: Gesamtspeicherbedarf für Wasserstoff nach Stakeholderbefragung

Die Erwartung der Teilnehmer an die Entwicklung des Gesamtspeicherbedarfs für Wasserstoff ist in Abbildung 190 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die breite Streuung um mehrere Zehnerpotenzen und die zeitliche Zunahme des erwarteten Speicherbedarfs. Für 2050 gaben die meisten Teilnehmer mehr als 10 Mrd. m³ i. N. Speicherbedarf an, was mit den aktuellen Speicherkapazitäten für Erdgas vergleichbar ist (LBEG, 2021).

Zur erwarteten Dauer der Speicherperiode (Abbildung 191) wurden für die Jahre 2025 und 2035 vorwiegend tägliche bzw. wöchentliche Speicherzyklen genannt. Für 2050 überwog dann die Nennung einer saisonalen Speicherung.

Zu den weiteren Fragen wurden nur vereinzelt Antworten gegeben. Eine vergleichende Auswertung ist daher nicht möglich. Festzuhalten ist jedoch, dass einzelne Teilnehmer eine Entwicklung von lokalen H₂-Verbrauchszentren über Regionalnetze hin zu einem umfassenden H₂-Markt mit einem

deutschlandweites Leitungsnetz skizziert haben. In der Frühphase dieser Entwicklung haben die eingesetzten Speicher die Aufgabe die Erzeugung und den Verbrauch im jeweiligen Teilnetz zu glätten und die Sicherheit gegen kurzzeitigen Ausfall einzelner lokaler Marktteilnehmer zu verbessern.

Sofern in den Rückmeldungen zur Stakeholderbefragung noch bis dahin unberücksichtigte Literaturquellen genannt wurden, wurden diese im Nachgang in die Literaturanalyse mit aufgenommen (in der obenstehenden Auswertung bereits berücksichtigt).

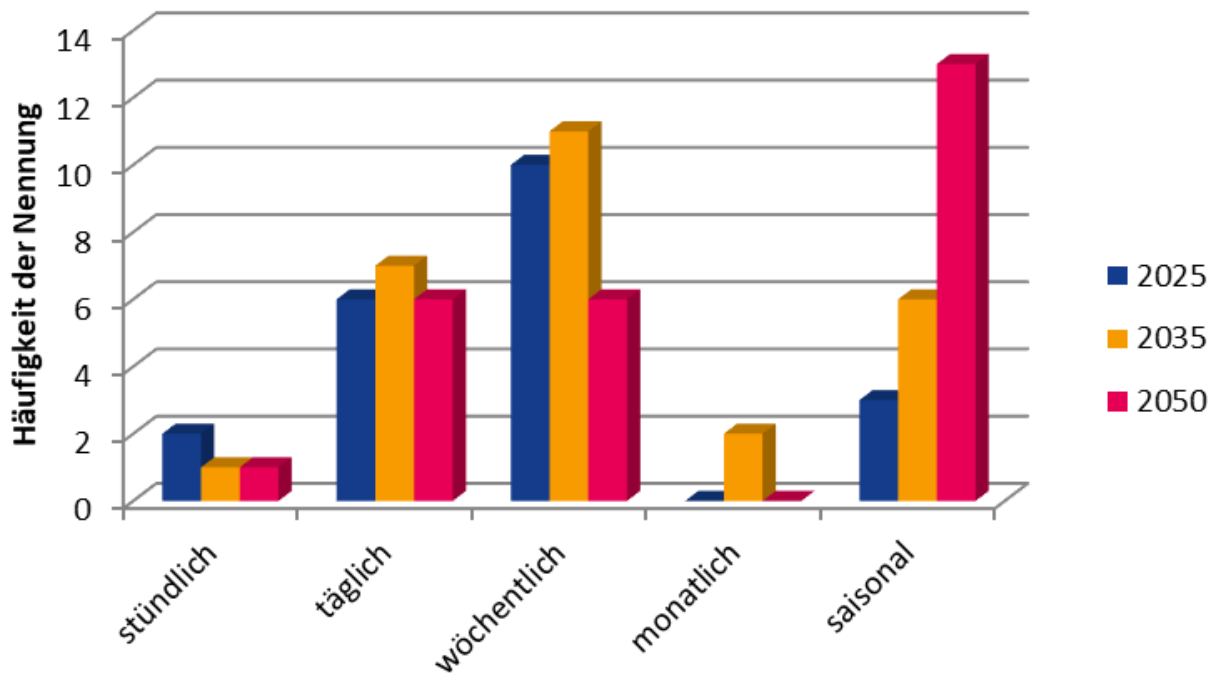


Abbildung 191: Dauer der Speicherperiode nach Stakeholderbefragung

Insgesamt stimmen die Antworten auf die Stakeholderbefragung gut mit den Ergebnissen der Literaturrecherche überein. Bis 2050 wird zumeist ein signifikanter Bedarf für H₂-Speicher erwartet, der in der Größenordnung mehrerer Kavernenspeicher liegt. Diese Speicher werden voraussichtlich vorwiegend saisonal gefahren, wobei eine Überlagerung durch Tages- oder Wochenzyklen möglich ist.

Die Zeit bis dahin wird als Übergangsphase interpretiert, für die keine genauen Angaben abgeleitet werden können.

8.3.1.3 Ableitung der Speichervarianten

Auf Basis der Literaturrecherche und der Stakeholderbefragung wurden drei Speichervarianten definiert (Start-, Referenz- und Maximalvariante), welche die relevante Bandbreite der Speicheranforderungen abdecken sollen. Die Varianten sind in Tabelle 69, Tabelle 70 und Tabelle 71 charakterisiert. Die Startvariante repräsentiert einen sehr kleinen Speicher, der sich vor allem für die frühe Phase des Markthochlaufs eignen kann. Die Referenzvariante ist mit einem kleinen bis mittleren Erdgasspeicher vergleichbar und sowohl in verschiedenen Marktphasen als auch an unterschiedlichen Standorten realisierbar. Die Maximalvariante wird voraussichtlich bei einem breiten Einsatz von Wasserstoff als

Energieträger benötigt, kann jedoch nur an entsprechend ausgedehnten Salzvorkommen errichtet werden.

Tabelle 69: Definition der Startvariante

Startvariante	
Arbeitsgasvolumen	100.000 m ³ i. N.
Ausspeicherleistung	5.000–10.000 m ³ /h i. N. (Peak-Leistung)
Einspeicherleistung	2.000 m ³ /h i. N. (später ggf. Upgrade bis 10.000 m ³ /h i. N.)
Betriebszyklus	Vorwiegend Wochenzyklus mit Entladespitzen wochentags im Tagesverlauf und Bandedinspeisung am Wochenende, Abfangen von EE-Erzeugungsspitzen in früher Marktphase noch nicht notwendig
Gasqualität	<ul style="list-style-type: none"> • Einspeicherung: 1 % O₂ und wassergesättigt, keine weiteren Komponenten (Hochdruck-Elektrolyse, Arbeitswerte) (Smolinka, Günther, & Garche, 2011), • Ausspeicherung: entsprechend Anforderungen zur Nutzung als Kraftstoff (DIN EN 17124, 2019).

- Kleinste sinnvoll erscheinende Variante für einen Kavernenspeicher zur Versorgung eines lokalen Verbrauchsnetzes (regionaler Schienenverkehr und Gewerbemobilität, außerdem partielles Backup für Ausfall Steamreformer);
- Erfordert flache Teufenlage für geringes Betriebsdruckniveau;
- Im Idealfall Nachnutzung kleiner Bestandskavernen an bestehenden Kavernenstandorten möglich (Salzvorkommen in geeigneter Teufenlage sind beispielsweise an den Speicherstandorten Bad Lauchstädt, Bernburg, Harsefeld, Huntorf, Lesum und Staßfurt bekannt);
- Optional Aufstellung eines Druck-Elektrolyseurs direkt auf dem Speicher als Versorgungseinheit (die Möglichkeit von Ausgangsdrücken um 100 bar wird in der Literatur und seitens beteiligter Unternehmen diskutiert (Smolinka, Günther, & Garche, 2011), (KYOCERA AVX, 2022) und könnte für die Startvariante den Verzicht auf einen eigenen Verdichter ermöglichen).

Vorteile der Startvariante	<ul style="list-style-type: none"> • Einspeicherleistung entspricht etwa 20–50 MW Elektrolyseleistung – technisch kurzfristig umsetzbar, bei größeren Anlagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung noch erhebliche Weiterentwicklung nötig; • Verdichter kann ggf. vollständig entfallen; • Standard-UT-Packer einsetzbar, da Druckänderungsrate zu klein für Blister-schäden (z. B. keine inneren Blisterschäden an Elastomeren bei Druckdifferenzen bis 10 bar (Reitenbach & Albrecht, 2014), ähnlicher Effekt auch für andere Dichtungen); • Geringe Kissengasmenge erforderlich (für größere Kavernen Gefahr von Lieferengpässen, solange keine Pipelineanbindung vorhanden ist); • Auch Teilbefüllung größerer Kavernen denkbar, solange Ausgangsdruck der Elektrolyse hoch genug für den freien Betriebsbereich ist (d. h. ohne Beschränkung der Standzeiten).
-----------------------------------	--

Nachteile der Startvariante	<ul style="list-style-type: none">• Nur an wenigen Standorten möglich;• Wirtschaftlichkeit fraglich aufgrund geringer Speicherleistung;• Konkurriert aufgrund der Speicherkapazität unter anderem mit Flüssig-H₂-Speichern;• Für eine mögliche spätere Nutzung des gesamten geomechanisch zulässigen Druckbereichs (insbesondere interessant für mittelgroße bis große, vorher nur teilbefüllte Kavernen) muss UT-Komplettierung (v. a. Elastomer-Packer) ggf. vollständig erneuert werden, um für Kavernenspeicher übliche Druckänderungsraten realisieren zu können;• Technische Ergebnisse ggf. nur zum Teil auf größere Varianten übertragbar.
------------------------------------	---

Tabelle 70: Definition der Referenzvariante

Referenzvariante	
Arbeitsgasvolumen	75 Mio. m ³ i. N. (entspricht 6.743 t reinem Wasserstoff zzgl. Dichteerhöhung durch Verunreinigungen als Arbeitsgas → Kriterium: weniger als 10.000 t Gesamtspeicherinhalt zur Vermeidung/Vereinfachung der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP))
Ausspeicherleistung	50.000 m ³ /h i. N.
Einspeicherleistung	50.000 m ³ /h i. N.
Betriebszyklus	Fahrweise zu ca. 80–90 % saisonal, was bei Elektrolyse-H ₂ aus erneuerbarem Strom zwei Zyklen pro Jahr bedeutet (PV im Sommer, Wind im Winter), Rest durch kurzfristige Schwankungen im Stunden- bis Wochenrhythmus bestimmt (siehe Abbildung, vergleiche auch (Michalski, et al., 2019))
Gasqualität	<ul style="list-style-type: none"> • In Ermangelung eines bestehenden Standards für den H₂-Transport in Rohrleitungen hier die Anwendung der Gasspezifikation entsprechend EIGA Hydrogen Pipeline Systems (EIGA, 2014): <ul style="list-style-type: none"> ○ Wasserdampf: < 20 ppm (T_D < -55 °C bei 1 bar), ○ CO₂: < 100 ppm, ○ CO: < 200 ppm (nur Abgrenzung ggü. „Synthesegas“, tatsächlicher Anteil wahrscheinlich geringer), ○ Inertgase/Methan: balance, ○ andere Komponenten: vernachlässigbar.

- Variante ist mit kleineren bis mittleren aktuellen Erdgas-Kavernenspeichern vergleichbar;
- Variante kann je nach geologischen Gegebenheiten mit einer oder mehreren Kavernen in einem breiten Teufenbereich realisiert werden;
- Arbeitsgasvolumen (AGV) entspricht 6.743 t reinem Wasserstoff zzgl. Dichteerhöhung durch Verunreinigungen als Arbeitsgas → voraussichtlich keine formale UVP-Pflicht, begründet jedoch einen Betriebsbereich (untere Klasse) nach Störfallverordnung;
- Kann ggf. als Bezugsvariante für das Projekt H₂-Forschungskaverne bzw. das Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt verwendet werden;
- Ein-/Ausspeicherleistung gleich, da mit fortschreitender Entwicklung des H₂-Marktes zunehmend Erzeugungsspitzen aus der Elektrolyse abgefangen werden müssen, Befüllung/Entleerung des AGV in zehn Wochen (Vierteljahr, entspricht in etwa den Volllaststunden der Elektrolyse laut Literaturanalyse) zweckmäßig.

Tabelle 71: Definition der Maximalvariante

Maximalvariante	
Arbeitsgasvolumen	2 Mrd. m ³ i. N.
Ausspeicherleistung	1,2 Mio. m ³ /h i. N.
Einspeicherleistung	1,2 Mio. m ³ /h i. N.
Betriebszyklus	Fahrweise zu ca. 80–90 % saisonal, was bei Elektrolyse-H ₂ aus erneuerbarem Strom zwei Zyklen pro Jahr bedeutet (PV im Sommer, Wind im Winter), Rest durch kurzfristige Schwankungen im Stunden- bis Wochenrhythmus bestimmt (siehe Abbildung 192, vgl. (Michalski, et al., 2019))
Gasqualität	<ul style="list-style-type: none"> In Ermangelung eines bestehenden Standards für den H₂-Transport in Rohrleitungen hier die Anwendung der Gasspezifikation entsprechend EIGA Hydrogen Pipeline Systems (EIGA, 2014): <ul style="list-style-type: none"> Wasserdampf: < 20 ppm (T_D < -55 °C bei 1 bar), CO₂: < 100 ppm, CO: < 200 ppm (nur Abgrenzung ggü. „Synthesegas“, tatsächlicher Anteil wahrscheinlich geringer), Inertgase/Methan: balance, andere Komponenten: vernachlässigbar.

- Variante vergleichbar mit größten bestehenden Erdgas-Kavernenspeichern in Deutschland, wird bis 2050 benötigt, falls optimistische Annahmen zum H₂-Marktvolumen eintreten;
- Darstellung beispielsweise durch 15–20 Kavernen à 100–150 Mio. m³ i. N.;
- Ein-/Ausspeicherleistung gleich, da mit fortschreitender Entwicklung des H₂-Marktes zunehmend Erzeugungsspitzen aus der Elektrolyse abgefangen werden müssen, Befüllung/Entleerung des AGV in zehn Wochen (Vierteljahr, entspricht in etwa den Volllaststunden der Elektrolyse laut Literaturanalyse) zweckmäßig.

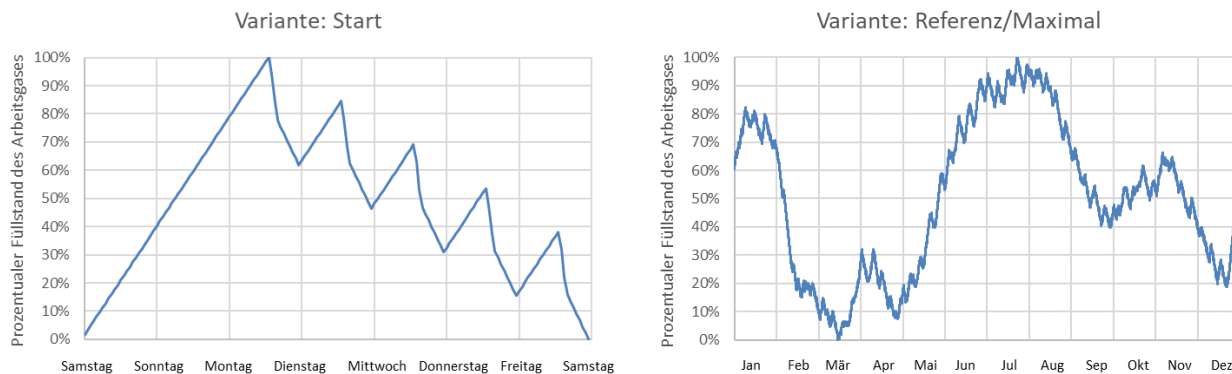


Abbildung 192: Speicherganglinien der Startvariante (links, Wochenzyklus) und der Referenz- und Maximalvariante (rechts, saisonaler Speicherzyklus)

8.3.2 Betriebssimulation für den Speichergesamtprozess (OT/UT)

8.3.2.1 Speicherkonfigurationen

Um der erwarteten Entwicklung des Speicherbedarfs Rechnung zu tragen, wurden für die weiteren Arbeiten für diesen Leitfaden drei Speichervarianten definiert (siehe tabellarische Zusammenfassung in Kapitel 8.3.1.3), für die mit den fortschreitenden Jahren ein Marktpotenzial entstehen könnte und die weiterhin die gesamte Bandbreite der technisch sinnvollen Größen für Kavernenspeicher abdecken.

Die Startvariante verfügt über ein Arbeitsgasvolumen von 100.000 m³ i. N. und eine Ein- und Ausspeicherleistung von 2.000 m³/h i. N. bzw. 5.000 m³/h i. N. Sie kann durch eine kleine Flachkaverne realisiert werden, wodurch die Option eröffnet wird, einen derartigen Speicher ohne eigenen Verdichter direkt aus einem benachbarten Hochdruck-Elektrolyseur zu befüllen. Die Kapazität reicht aus, um in einem lokalen Verbrauchsnetz (Mobilität + Spezialchemie) die zu erwartenden Bedarfsschwankungen im Wochenverlauf abzupuffern und Reserveleistung vorzuhalten.

Die Referenzvariante verfügt über ein Arbeitsgasvolumen von 75 Mio. m³ i. N. und eine Ein-/Ausspeicherleistung von je 50.000 m³/h i. N. Diese Variante kann je nach lokalen geologischen Gegebenheiten sowohl durch eine Einzelkaverne als auch durch mehrere kleine Kavernen realisiert werden. Sie ist in der Lage, die zu erwartende volatile Erzeugung von grünem Wasserstoff in einem mittelgroßen Regionalnetz zwischenzuspeichern und kurzfristige Bedarfsschwankungen zu kompensieren. Sie stimmt hinsichtlich ihrer Parameter gut mit der geplanten Forschungskaverne Bad Lauchstädt überein, sodass die weiteren Projektergebnisse für diese Variante ohne wesentliche weitere Interpretation auf die Forschungskaverne übertragen werden können.

Weiterhin wurde eine Maximalvariante definiert, die ggf. bei hoher Marktdurchdringung erforderlich wird und bereits etwas über die aktuellen Auslegungsgrößen der Erdgas-Kavernenspeicher hinausgeht. Sie besitzt ein Arbeitsgasvolumen von 2 Mrd. m³ i. N. und eine Ein-/Ausspeicherkapazität von 1,2 Mio. m³/h i. N. Hierfür sind mehrere groß dimensionierte Kavernen in großen Teufen erforderlich. Bei dieser Variante sind nach aktuellem Kenntnisstand bereits Besonderheiten im Genehmigungsverfahren zu erwarten. Dennoch werden Speicher dieser Größe voraussichtlich erforderlich werden, sofern sich die Entwicklung des Speicherbedarfs bis 2050 im oberen Bereich des Erwartungsrahmens bewegt.

Ausgehend von der Volumen- und Leistungsdefinition der drei Varianten erfolgt die Parametrisierung der daraus abzuleitenden Modelle und die Festlegung von zugehörigen Speicherbetriebsszenarien (Schedule). Zusätzlich werden Betriebsgrenzen für den Speicherbetrieb (minimale/maximale Kaverneninnendrucke) definiert. Für die Modellierung wird jede Variante durch eine entsprechend dimensionierte Kaverne repräsentiert.

Ziel der Modellierung ist im Wesentlichen die Generierung der für die weiteren Untersuchungen erforderlichen Druck- und Temperaturverläufe an der Schnittstelle zwischen OTA und Kaverne (hier am Bohrlochkopf). Darüber hinaus ermöglicht die Modellierung auch die Überprüfung der praktischen Umsetzbarkeit der definierten Varianten bezüglich:

- der Einschätzung der Auswirkung veränderter Dimensionen der Förderrohrtour,
- der Beurteilung der Wirkung unterschiedlicher Gastemperaturen bei der Einspeicherung hinsichtlich der Einstellung eines Temperaturgleichgewichts in der Kaverne,

- der Ermittlung maximaler Ein- und Auspeicherraten unter Berücksichtigung des Druckbereiches der Kaverne und des verfügbaren Arbeitsgasvolumens,
- der Auswirkung variiertes thermodynamischer Modellparameter.

8.3.2.2 Simulationssoftware KavPool

Die Simulationen werden mit der Simulationssoftware KavPool durchgeführt. KavPool ist ein von der ESK GmbH entwickeltes Softwarepaket, das der Modellierung aller für die Gasspeicherung in Kavernen relevanten Prozesse dient (Abbildung 193).

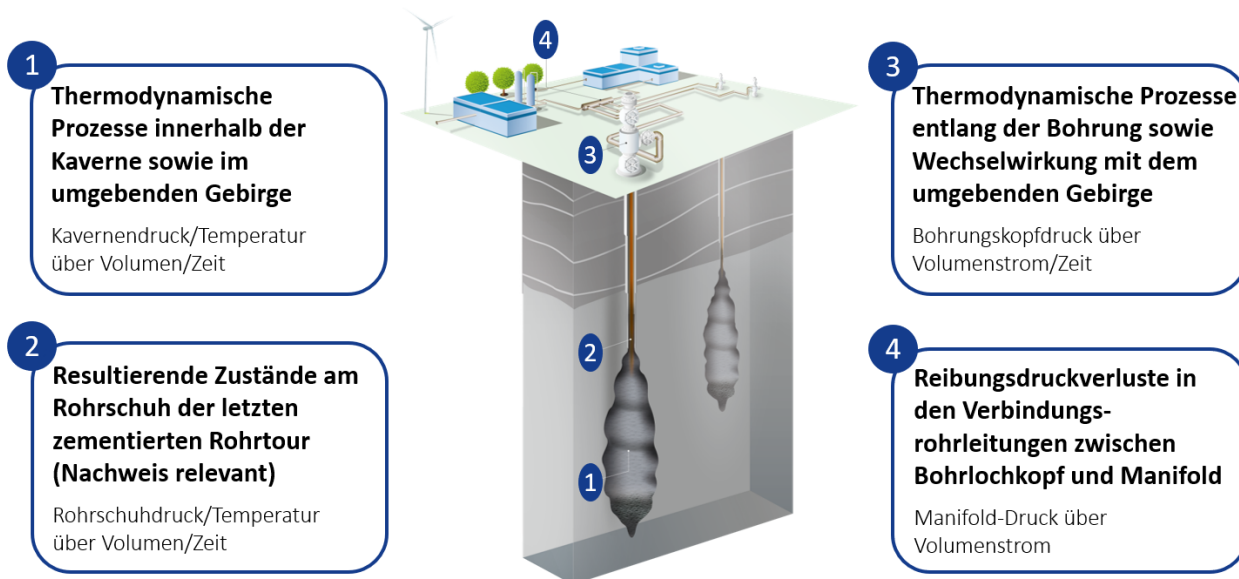


Abbildung 193: KavPool – Prozessübersicht (Darstellung: ESK GmbH)

Es ermöglicht die Simulation sämtlicher thermodynamischer Prozesse, wie:

- das Druck-Volumen-Temperatur-Verhalten des Gases im Strömungsraum,
- den Wärmeaustausch zwischen Speichermedium und umgebendem Gebirge,
- die Berücksichtigung der Reibungsdruckverluste entlang des Steigrohrs und der Anschlussleitungen.

Grundlage der Modellierung bildet ein statisches Modell, welches Bohrungsdaten, Gesteinseigenschaften, Gaszusammensetzungen, Konfiguration des obertägigen Leitungssystems und optional geomechanische Eigenschaften (Konvergenz) umfasst. KavPool berücksichtigt eine große Anzahl verschiedener Gaskomponenten. Betrieblich induzierte Kavernenkonvergenzen können in die Berechnung integriert werden.

Die Validierung des Modells erfolgt i. d. R. im History-Match-Verfahren unter Berücksichtigung realer Betriebszustände aus der Vergangenheit. Die Simulationsrechnung erfolgt auf der Basis von unterschiedlichen Ratenvorgaben wahlweise im Pool- oder Einzelkavernenmodus. Prognoserechnungen ermöglichen die Abschätzung von Ein- und Auspeicherleistungen, das Erkennen von Hydratbildungsbedingungen sowie die Überprüfung der Einhaltung von zuvor definierten Betriebsgrenzen.

Als Simulationsergebnisse werden Drücke, Temperaturen, Volumenströme, Gasinhalt sowohl der Einzelkavernen als auch des Gesamtspeichers ausgegeben, siehe Abbildung 194.

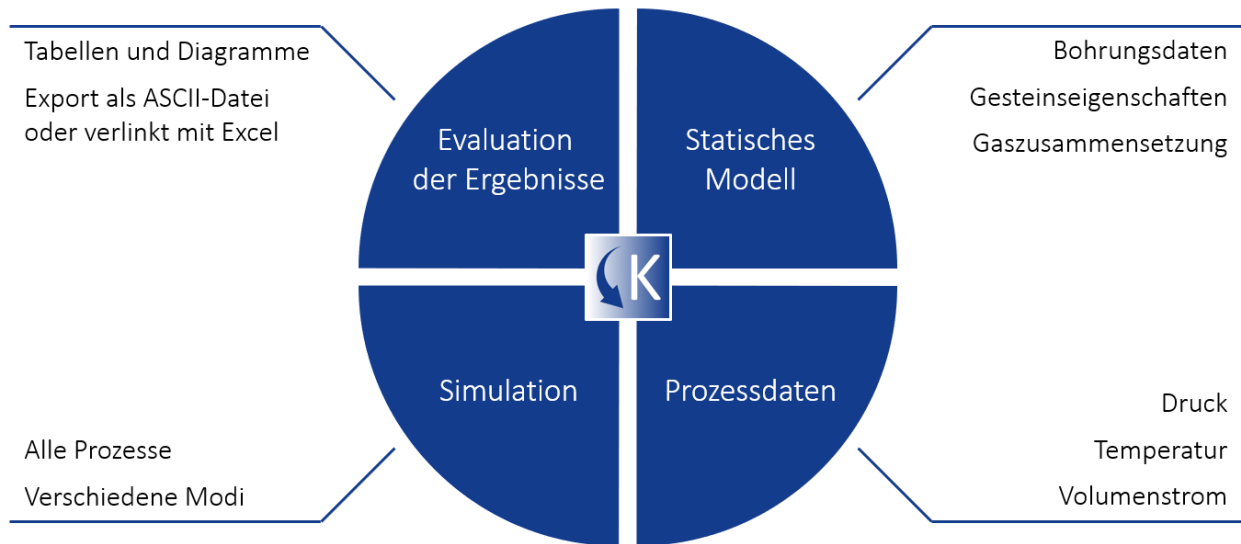


Abbildung 194: KavPool – Programmfunktionen (Darstellung: ESK GmbH)

8.3.2.3 Modellierung

Speicher-/Kaverneneigenschaften

Ausgehend von den in Kapitel 8.3.1 definierten Speichervarianten wurde je Variante eine Modellkaverne entworfen. Die Kavernen unterscheiden sich in Volumen, Teufenlage sowie vertikaler und radialer Ausdehnung. Die geologischen Randbedingungen (z. B. Lage des Salz Top; geothermischer Gradient) sind für alle Kavernen identisch (Tabelle 72).

Tabelle 72: Kaverneneigenschaften

Eigenschaft	Einheit	Variante		
		Start	Referenz	Maximal
Volumen	[m ³]	10.000	600.000	1.000.000
Teufe – Salz Top	[m]	600		
Teufe – Kavernendach	[m]	680	880	1.330
Teufe – Kavernensumpf	[m]	730	1.055	1.630
Durchmesser – Kaverne	[m]	15,96	66,08	65,14
Durchmesser – Kavernenhals	[m]	0,2		
Konvergenz		ohne		
Temperatur – Oberfläche	[°C]	12		
Temperatur – Gestein/Kaverne	[°C]	33	41	56
Bezugsteufe Kavernentemperatur (Kavernenmitte)	[m]	705	967,5	1.480

Die wesentlichen Eigenschaften der Kavernenbohrungen sind mit Ausnahme der Bohrungsteufe und der Druckgrenzen am Rohrschuh der Produktionsrohrtour ebenfalls identisch. Um den Einfluss eines geringeren Querschnitts der Förderrohrtour untersuchen zu können, wurde jeweils eine Variante mit verringertem Durchmesser definiert (Tabelle 73).

Tabelle 73: Bohrungseigenschaften

Eigenschaft	Einheit	Variante		
		Start	Referenz	Maximal
Dimension Bohrloch	[mm]	450		
Dimension/Rohrgewicht Produktionsrohtour	[inch lbs/ft]	13 3/8" 68#		
Teufe Rohrschuh Produktionsrohtour (TVD=MD)	[m]	650	850	1.300
Dimension/Rohrgewicht Förderrohtour (Standard)	[inch lbs/ft]	9 5/8" 36#		
Dimension/Rohrgewicht Förderrohtour (verringertes Durchmesser)	[inch lbs/ft]	5" 13#	8 5/8" 32#	8 5/8" 32#
Feldleitung		l = 100m, d = 200mm, k = 0,15 mm		

Modellparameter

Der Simulator KavPool berücksichtigt das thermodynamische Verhalten des Speichergases (p, V, T), aber auch die thermischen Wechselwirkungen mit dem umgebenden Gebirge und dem technischen Ausbau der Kavernenbohrung (Rohrtouren, Zementation, Eigenschaften des Ringraums). Die entsprechenden physikalischen Materialeigenschaften sind in Tabelle 74 zusammengefasst.

Tabelle 74: Materialeigenschaften

Material	Dichte	Spezifische Wärmekapazität	Wärmeleitkoeffizient
	[kg/m ³]	[J/(kg*K)]	[W/(K*m)]
Salz	2.300	1.000	5,0
Deckgebirge	2.300	1.000	3,0
Stahl	7.850	460	45,0
Ringraum (Wasser)	1.000	4.190	0,5
Zement	2.200	1.000	0,8

Neben der grundsätzlichen Unterscheidung von drei Speicher-/Kavernenvarianten findet für jede Kaverne eine weitergehende Differenzierung statt. Einerseits wird eine Variante mit verringerter Dimension des Förderrohrstranges (Tubing) betrachtet und andererseits wird eine weitere Variante mit erhöhtem Wärmeübertragungskoeffizienten untersucht. Ziel dieser Variation ist Abschätzung der Auswirkung eines verringerten Tubingquerschnittes auf die realisierbaren Ein- und Ausspeicherraten sowie die Untersuchung der Wirkung eines erhöhten Wärmeübertragungskoeffizienten auf die Einstellung einer stationären Temperaturverteilung im Umfeld der Kaverne. Es ergeben sich damit je Kaverne drei unterschiedliche Parametersätze (Tabelle 75).

Tabelle 75: Parametersätze

Bezeichnung	Variante	Tubing		Koeffizient Wärmeübertragung
		Dimension [inch]	Gewicht [lbs/ft]	
HYST0001	Start	9 5/8"	36#	10
HYST0002	Start	5"	13#	10
HYST0003	Start	9 5/8"	36#	50
HYRE0001	Referenz	9 5/8"	36#	10
HYRE0002	Referenz	8 5/8"	32#	10
HYRE0003	Referenz	9 5/8"	36#	50
HYMX0001	Maximal	9 5/8"	36#	10
HYMX0002	Maximal	8 5/8"	32#	10
HYMX0003	Maximal	9 5/8"	36#	50

Speicherfahrweisen – Betriebsparameter

Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Modellrechnungen zu ermöglichen, beginnt die Modellierung immer am selben Startpunkt. Die Startdrücke liegen unter Berücksichtigung des definierten Druckbereiches jedes Speichers im mittleren Druckbereich oder leicht darüber (Tabelle 76). Neben den i. d. R. durch ein geomechanisches Gutachten vorgegebenen minimalen und maximalen Betriebsdrücken (am Rohrschuh) soll auch die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Förderrohrstrang (u_{Max}) auf 20 m/s und die Druckänderungsrate am Rohrschuh (dp_{CS}) auf 10 bar/d begrenzt werden.

Tabelle 76: Startdrücke (am Rohrschuh) für die Simulationsrechnung

Eigenschaft	Einheit	Variante		
		Start	Referenz	Maximal
Maximaler Druck (am Rohrschuh)	[bar]	100	170	230
Minimaler Druck (am Rohrschuh)	[bar]	80	30	60
Startdruck Simulation (am Rohrschuh)	[bar]	90	110	160

Neben der Berücksichtigung der physikalischen und technischen Parameter der einzelnen Speichervarianten wirken sich die Einsatzzwecke der definierten Speichervarianten (siehe Kapitel 8.3.1) direkt auf die Fahrweisen aus.

Die Startvariante unterscheidet sich hier deutlich von den beiden anderen Varianten. Die Startvariante dient der Pufferung eines lokalen Verbrauchsnetzes in einem wöchentlichen Zyklus. Der anfängliche Ratenbereich liegt hier zwischen -800 und 5.000 m³/h i. N. und soll so weit gesteigert werden, bis der Druckbereich des Speichers (und damit das verfügbare Arbeitsgasvolumen) möglichst vollständig ausgeschöpft werden.

Die Referenz- und Maximalvariante dagegen dienen der Zwischenspeicherung von grünem Wasserstoff einschließlich dem Ausgleich von Bedarfsschwankungen im Jahreszyklus. Die anfänglichen Raten variieren zwischen -50.000 und +50.000 m³/h i. N.

Beim Einspeichervorgang hat die Gastemperatur einen direkten Einfluss auf die thermodynamischen Vorgänge in der Kaverne, die letztlich die Geschwindigkeit der Einstellung eines über den Wochen- bzw. Jahreszyklus konstanten Temperaturregimes steuert.

8.3.2.4 Ergebnisse

Startvariante

Die Simulation erfolgt auf Basis eines wiederkehrenden Wochenszenarios mit maximalen Raten im Bereich von -806 m³/h (Einspeisung) und 5.000 m³/h (Ausspeisung) (Tabelle 77). Der vorgegebene Druckbereich (am Rohrschuh) von 80–100 bar wird mit diesem Szenario nur bis ca. 45 % ausgefüllt (Abbildung).

Tabelle 77: Ergebnisse Simulationsrechnungen – Startvariante

Parameter-satz	Rate von – bis [m³/h]	T _{Gas} Injektion [°C]	Simulations- dauer [Wochen]	Druckbereich [bar] (Ausfüllung) Füllstand AGV min/max	u _{Max} Überschreitung	dp _{CS} Überschreitung	T _{Cav} stationär	Bemerkungen
HYST0001	-806 ... 5.000	10	1	89 .. 98 (45 %) 25,4 / 57,0 %	-	+	-	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 21,4 bar/d)
	-1.210 ... 7.500		83 .. 96 (65 %) 25,4 / 72,9 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 31,9 bar/d) / stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 1,5 Jahren erreicht	
	-1.613 ... 10.000		82 .. 99 (85 %) 25,4 / 88,7 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 42,8 bar/d) / stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 1,5 Jahren erreicht	
	-1.210 ... 7.500	50	104	84 .. 97 (65 %) 25,4 / 72,9 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 32,7 bar/d) / stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 1,5 Jahren erreicht
	-1.613 ... 10.000			84 .. 101 (85 %) 25,4 / 88,7 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 44,0 bar/d) / stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 1,5 Jahren erreicht
HYST0002	-1.210 ... 7.500	10		83 .. 96 (65 %) 25,4 / 72,9 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 31,9 bar/d) – stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 1,5 Jahren erreicht
	-1.613 ... 10.000			82 .. 99 (85 %) 25,4 / 88,7 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 42,8 bar/d) – stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 1,5 Jahren erreicht
HYST0003	-1210 ... 7.500	10		83 .. 95 (60 %) 25,4 / 72,9 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 29,2 bar/d) – stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 2 Jahren erreicht
	-1.613 ... 10.000		83 .. 99 (80 %) 25,4 / 88,7 %	-	+	+	Überschreitung dp _{CS} bei Rate > 2.500 m³/h (bis 39,2 bar/d) – stat. Zustand (T _{Cav}) nach ca. 2 Jahren erreicht	

Aus diesem Grund erfolgt eine schrittweise Erhöhung der Raten mit einem konstanten Faktor von 1,5 bzw. 2 (Abbildung). Das Ratenregime mit den höchsten Raten (Faktor 2, -1.210–10.000 m³/h) führt immerhin zu einer Ausfüllung des als zulässig definierten Druckbereiches von 85 %. Bei diesem Ratenregime kommt es jedoch bei Lastwechseln (hohe Ausspeiserate) zu zum Teil sehr hohen Überschreitungen der erlaubten Druckänderungsrate am Rohrschuh von bis zu 42,8 bar/d.

Alle weiteren Simulationsrechnungen fanden nur noch mit den erhöhten Ratenregimes (Faktor 1,5 bzw. 2) statt.

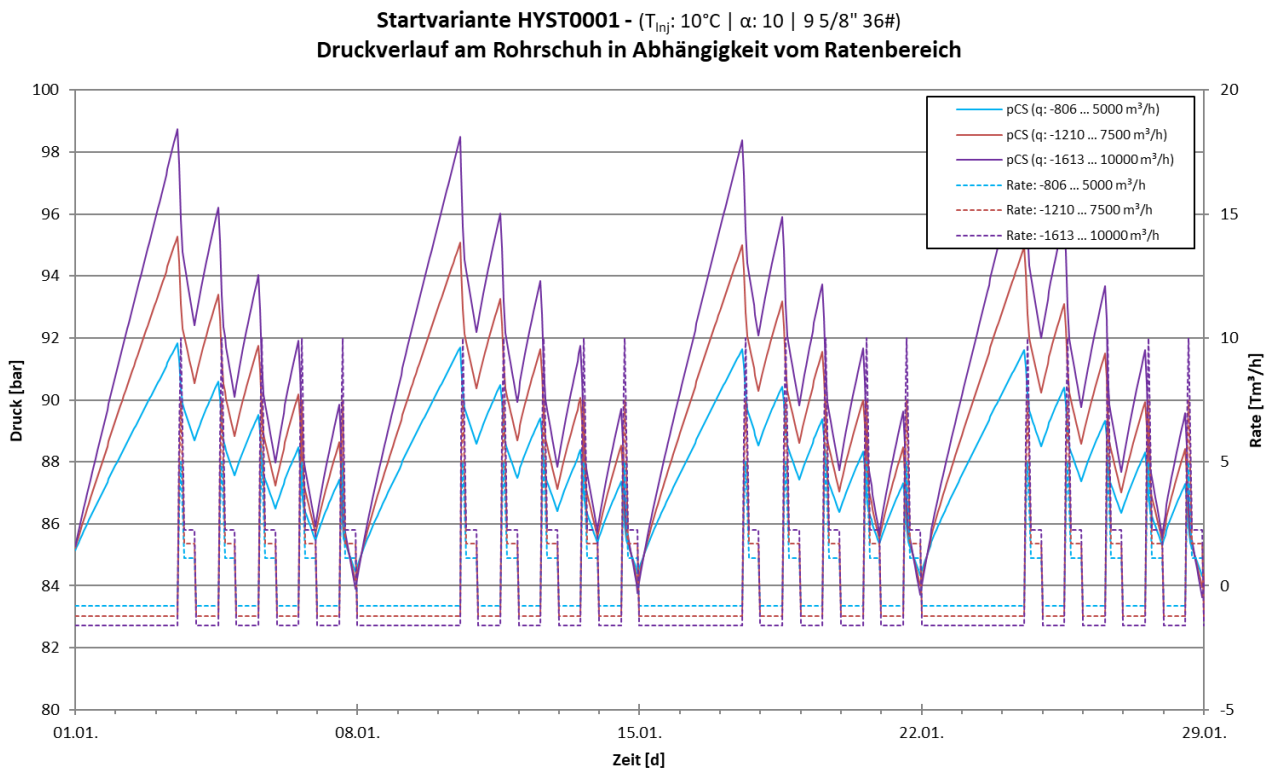


Abbildung 195: Startvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Rate

Die Einstellung eines Temperaturgleichgewichts zwischen dem Gas in der Kaverne und dem umliegenden Gebirge erfolgt nach 1,5 bis 2 Jahren. Ausschlaggebend ist dafür nicht nur das gefahrene Ratenregime selbst, sondern auch die Gastemperatur bei Einspeisung. Im in Abbildung 196 dargestellten Beispiel stellt sich das Temperaturgleichgewicht nach ca. 1,5 Jahren ein.

Die Auswirkung der Injektionstemperatur des Gases auf die sich in der Kaverne einstellenden Temperaturverhältnisse ist in Abbildung 196 dargestellt. Bei einer Gastemperatur von 10 °C wird sich die (mittlere) Kavernentemperatur bei einem unveränderten Betriebsregime (Wochenszenario) auf Werte unterhalb der unbeeinflussten Gebirgstemperatur (33 °C) einstellen. Wird das Gas vor der Einspeisung auf 50 °C vorgewärmt, führt das mittelfristig zu Kavernentemperaturen oberhalb der Gebirgstemperatur.

Die Verringerung der Dimension des Gasförderstranges (Tubing) von 9 5/8" auf 5" zieht keine signifikanten Auswirkungen im Druck- und Temperaturverlauf nach sich. Die gefahrenen Raten sind dafür insgesamt zu niedrig.

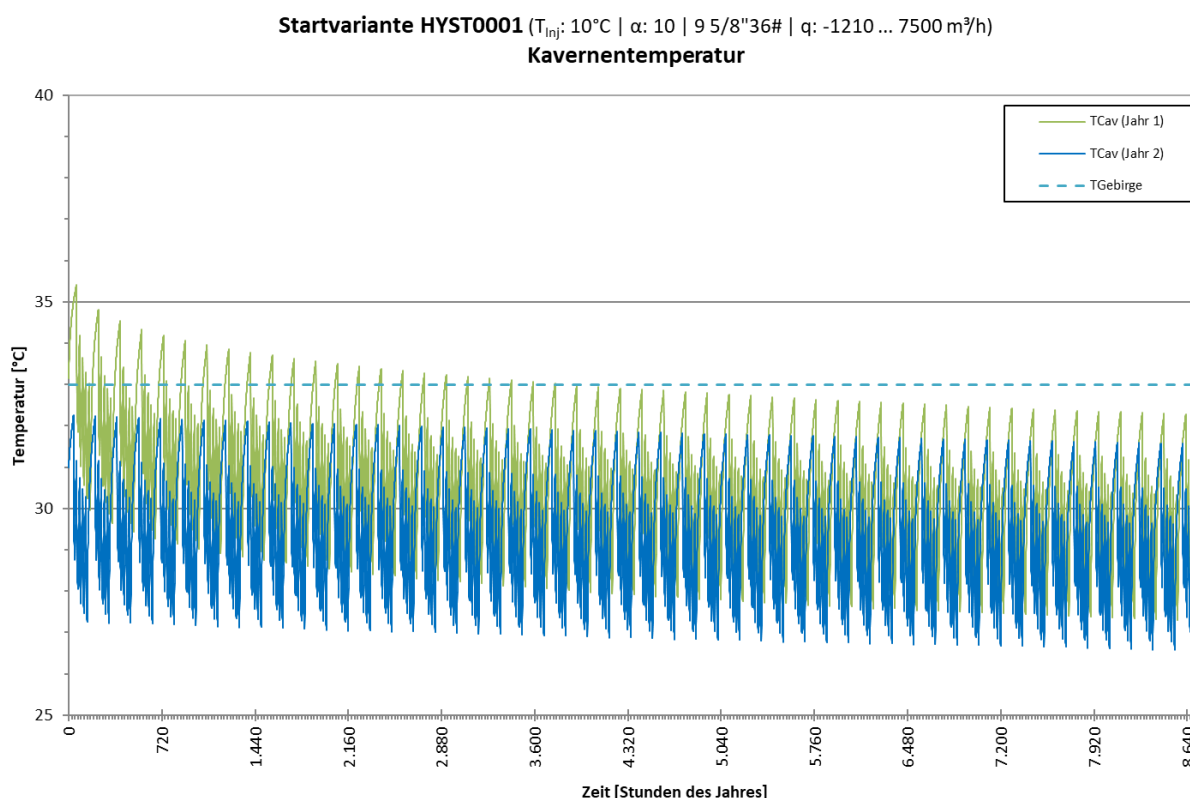


Abbildung 196: Startvariante – Verlauf der Kavernentemperatur

Im Gegensatz dazu hat die Variation des Wärmeübertragungskoeffizienten α Auswirkungen auf das sich in der Kaverne einstellende Temperaturprofil und infolgedessen auf den Kavernendruck.

Der Temperaturverlauf am Bohrlochkopf bei der Ausspeisung des Speichermediums ist insbesondere für die Modellierung der nachfolgenden obertägigen Prozesse von Interesse. Die Gastemperatur bei der Ausspeisung hängt vorrangig von der Kaverneninnentemperatur ab. Diese wird durch die Gebirgstemperatur, die Injektionstemperatur des Speichergases und dem Wärmeaustauschverhalten zwischen Kaverne und umgebendem Gebirge bestimmt. Im Falle der sehr kurzfristigen Wechsel von Ein- und Ausspeise- sowie Ruhephasen wird der Wärmeaustausch zwischen dem im Kavernenhohlraum befindlichen Speichergas und dem umgebenen Gebirge einen geringeren Einfluss haben als z. B. bei einem jahreszeitlich geprägten Speicherregime.

Abbildung 197 zeigt den Verlauf der Kopftemperatur bei Auspeisung für die verschiedenen Randbedingungen bei einem Ratenbereich von $-1.210 \dots 7.500 \text{ m}^3/\text{h}$. Zusätzlich wurde zum Vergleich der kleinste Ratenbereich von $-806 \dots 5.000 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Variante ($\alpha: 10$ und $T_{\text{inj}}: 10 \text{ }^\circ\text{C}$) dargestellt. Erwartungsgemäß treten die größten Schwankungen bei einer Injektionstemperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem Wärmeübertragungskoeffizient von 10 auf. Die Auspeisetemperatur variiert zwischen $20,5$ und $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Alle anderen Varianten mit einer Injektionstemperatur von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ bewegen sich in einem Korridor von ca. $13,8 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $17,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

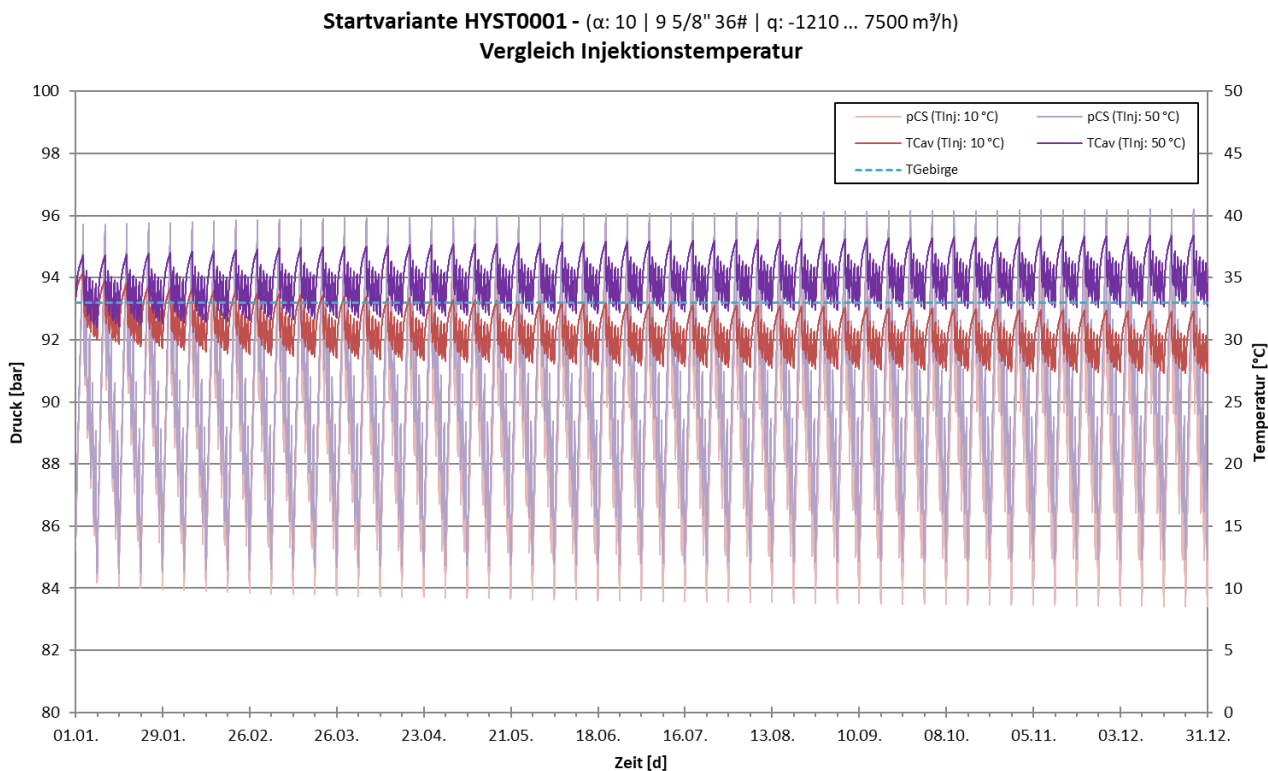


Abbildung 197: Startvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Gastemperatur bei Einspeisung

In Abbildung 198/Abbildung 199 ist der Verlauf der ermittelten Kopftemperaturen und zugehörigen Kopfdrücke dargestellt. Erwartungsgemäß werden bei der Variante mit dem kleinsten Ratenbereich (-806 ... 5.000 m³/h) nicht die Kopfdrücke der anderen Varianten erreicht. Die Varianten im Ratenbereich -1.210 ... 7.500 m³/h zeichnen sich durch einen wenig differenzierten Kopfdruckverlauf aus. Der maximale Kopfdruck liegt bei ca. 94 bar. Lediglich die Kopfdruckkurve der Variante mit erhöhter Einspeisetemperatur (50 °C) liegt um ca. 1 bar über den anderen Kopfdruckverläufen.

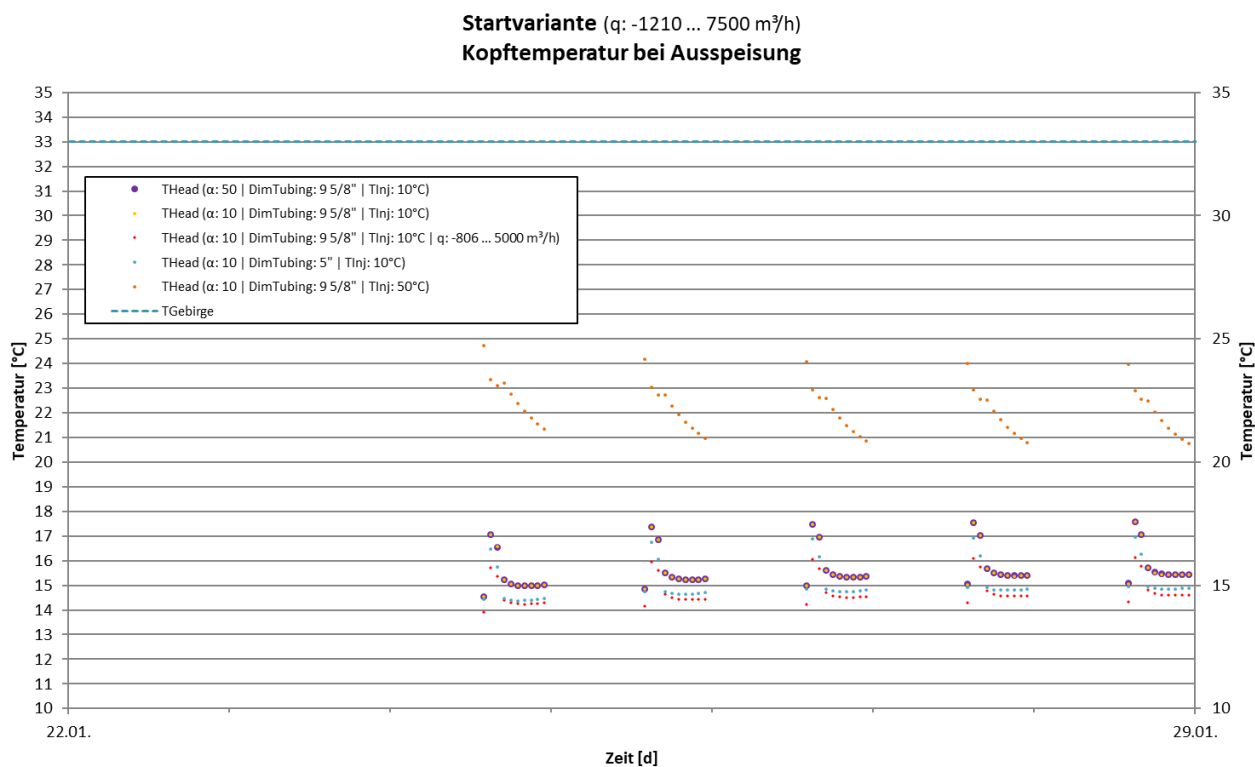


Abbildung 198: Startvariante – Kopftemperatur bei Ausspeisung in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension sowie Ratenbereich

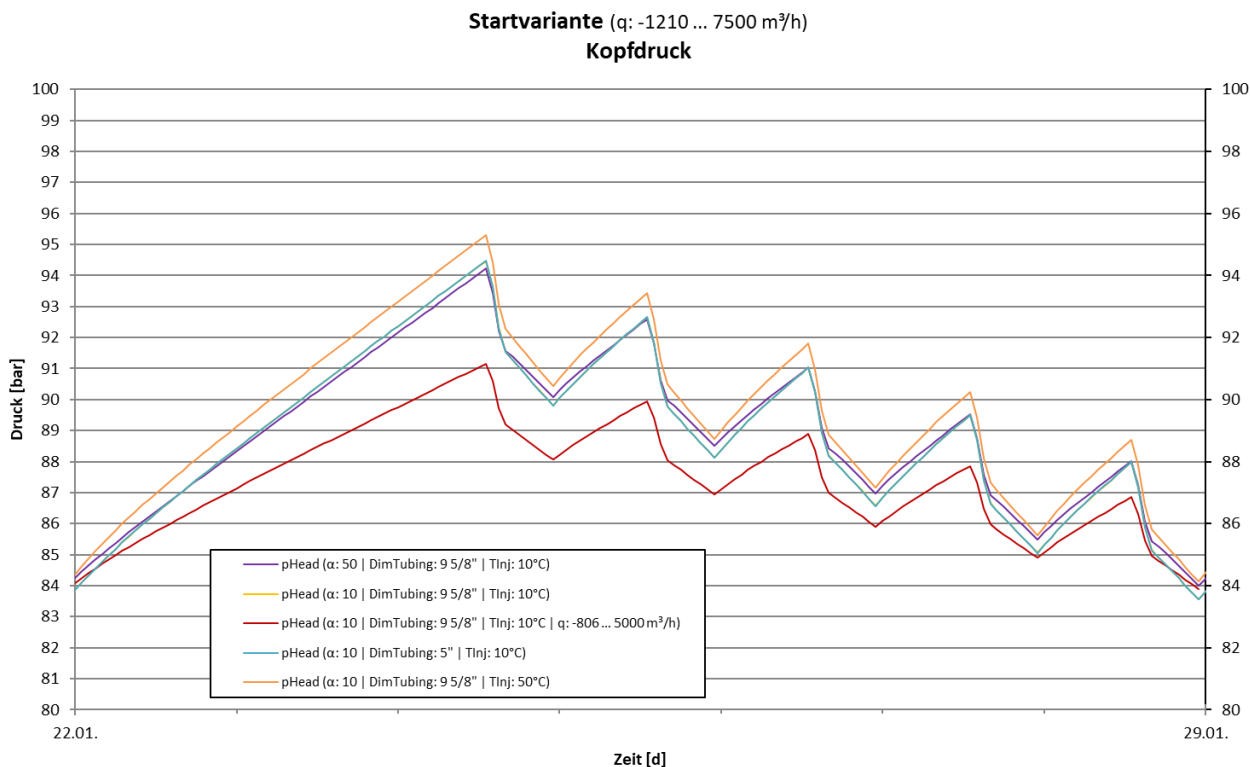


Abbildung 199: Startvariante – Kopfdruck in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension

Referenzvariante

Die Simulation der Referenzvariante erfolgt angelehnt an ein Jahresszenario mit jeweils einer konstanten Rate für Ein- und Auspeisung (Tabelle 78). Die vorgegebenen Grenzdrücke (am Rohrschuh) liegen im Bereich von 30–170 bar. In der Simulation mit der Startrate von 50.000 m³/h wird dieser Bereich nur zu knapp 40 % ausgefüllt. Die Vergrößerung der Raten auf 100.000 bzw. 120.000 m³/h führt erwartungsgemäß zu einer deutlich besseren Ausfüllung des Druckbereiches von 78,6 bzw. 96,4 % (Abbildung 200).

Tabelle 78: Ergebnisse Simulationsrechnungen – Referenzvariante

Parametersatz	Rate [m ³ /h]	T _{Gas} Injektion [°C]	Simulations- dauer [Jahre]	Druckbereich [bar] (Ausfüllung) Füllstand AGV min/max	u _{Max} Überschreitung	dpcs Überschreitung	T _{Cav} stationär	Bemerkungen
HYRE0001	50.000	10	1	75 .. 130 (39,3 %) 36,0 .. 74,1 %	-	-	-	Rate deutlich zu niedrig
	100.000			45 .. 155 (78,6 %) 12,9 .. 90,2 %	(+)	-	-	sporadisch geringfügige Überschreitung u _{Max} (bis 22,7 m/s)
	120.000			30 .. 165 (96,4 %) 3,6 .. 96,4 %	+	+	-	deutliche Überschreitung dpcs (bis 10,8 bar) bzw. u _{Max} (bis 36,5 m/s)
	100.000	50	5	43 .. 155 (80,0 %) 12,9 .. 90,2 %	(+)	-	(+)	sporadisch geringfügige Überschreitung u _{Max} (bis 22,7 m/s) – stat. Zustand (T _{Cav}) nahezu erreicht
	100.000		1	45 .. 165 (85,7 %) 12,9 .. 90,2 %	(+)	-	-	sporadisch geringfügige Überschreitung u _{Max} (bis 23,6 m/s)
			5	45 .. 165 (85,7 %) 12,9 .. 90,2 %	(+)	-	-	sporadisch geringfügige Überschreitung u _{Max} (bis 23,6 m/s) – stat. Zustand nach ca. 2 Jahren erreicht
HYRE0002	100.000	10	1	45 .. 155 (78,6 %) 12,9 .. 90,2 %	(+)	-	-	sporadisch geringfügige Überschreitung u _{Max} (bis 22,9 m/s)
HYRE0003	100.000	10	1	45 .. 155 (78,6 %) 12,9 .. 90,2 %	(+)	-	-	sporadisch geringfügige Überschreitung u _{Max} (bis 22,7 m/s)
		10	5	45 .. 155 (78,6 %) 12,9 .. 90,2 %	(+)	-	(+)	sporadisch geringfügige Überschreitung u _{Max} (bis 22,7 m/s) – stat. Zustand (T _{Cav}) nahezu erreicht

Bei einer Rate von 120.000 m³/h werden sowohl die erlaubten Druckänderungsraten als auch die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Förderrohrtour deutlich überschritten. Alle weiteren Simulationsrechnungen erfolgten deshalb mit einer Rate von 100.000 m³/h.

Zur Untersuchung des Langzeitverhaltens, insbesondere des Erreichens einer stationären Temperaturverteilung im Umfeld der Kaverne, wurden jeweils für die Einspeisegastemperatur von 10 °C und 50 °C Simulationsrechnungen über fünf Jahre durchgeführt.

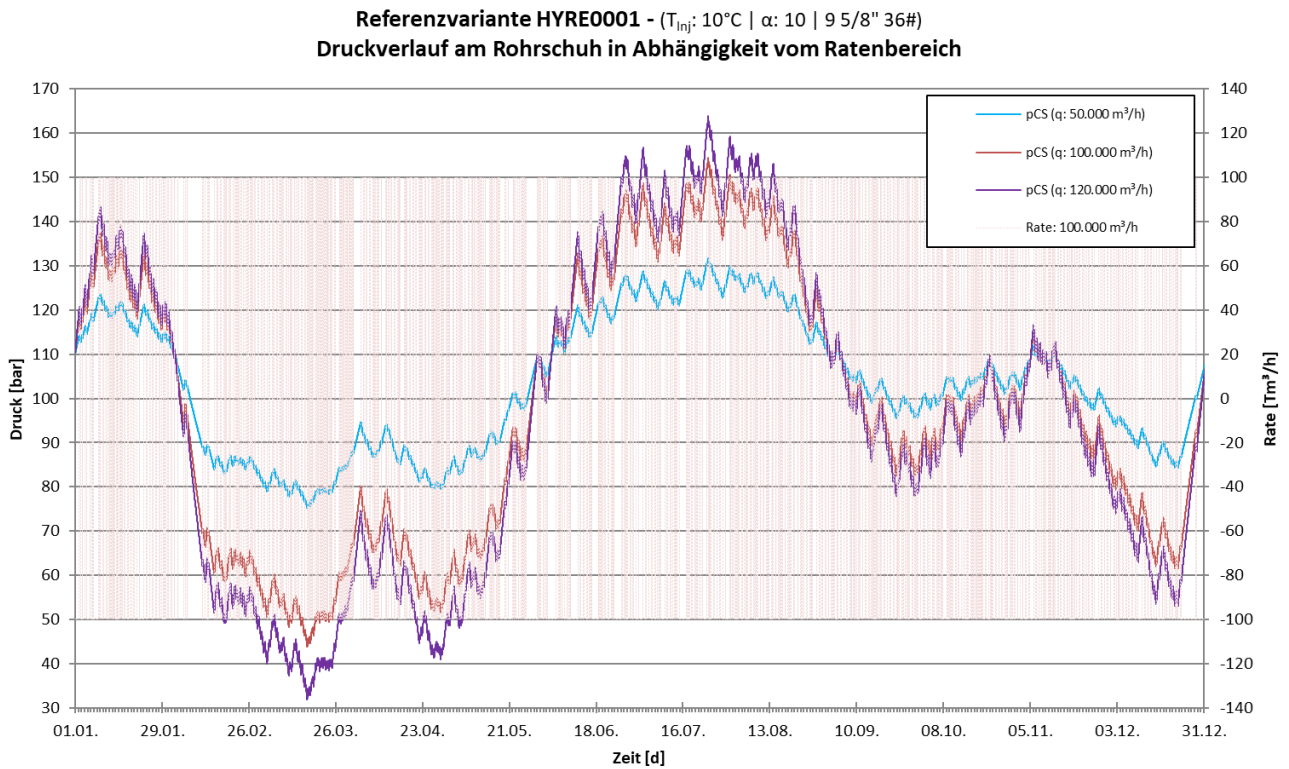


Abbildung 200: Referenzvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Rate

Bei einer angenommenen mittleren Gebirgstemperatur von 41 °C wird der stationäre Zustand im Kavernenumfeld nach ca. fünf Jahren (Injektionstemperatur 10 °C (Abbildung 201) bzw. bereits nach ca. zwei Jahren bei einer Injektionstemperatur von 50 °C erreicht.

Die Auswirkung der beiden Injektionstemperaturen auf das thermodynamische System ist in Abbildung 202 dargestellt. Erwartungsgemäß stellen sich bei geringeren Gastemperaturen bei der Einspeisung niedrigere Temperaturen in der Kaverne ein, was bei gleicher Speicherbilanz (Gasmenge) letztlich auch zu einem verringerten Kaverneninnendruck führt (Abbildung 202).

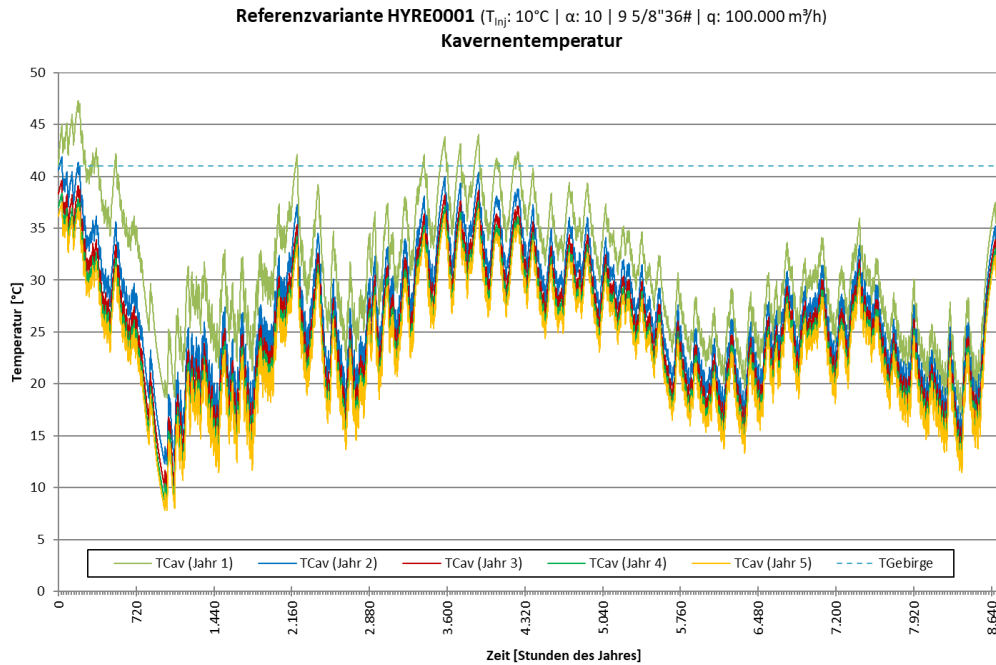


Abbildung 201: Referenzvariante – Verlauf der Kavernentemperatur

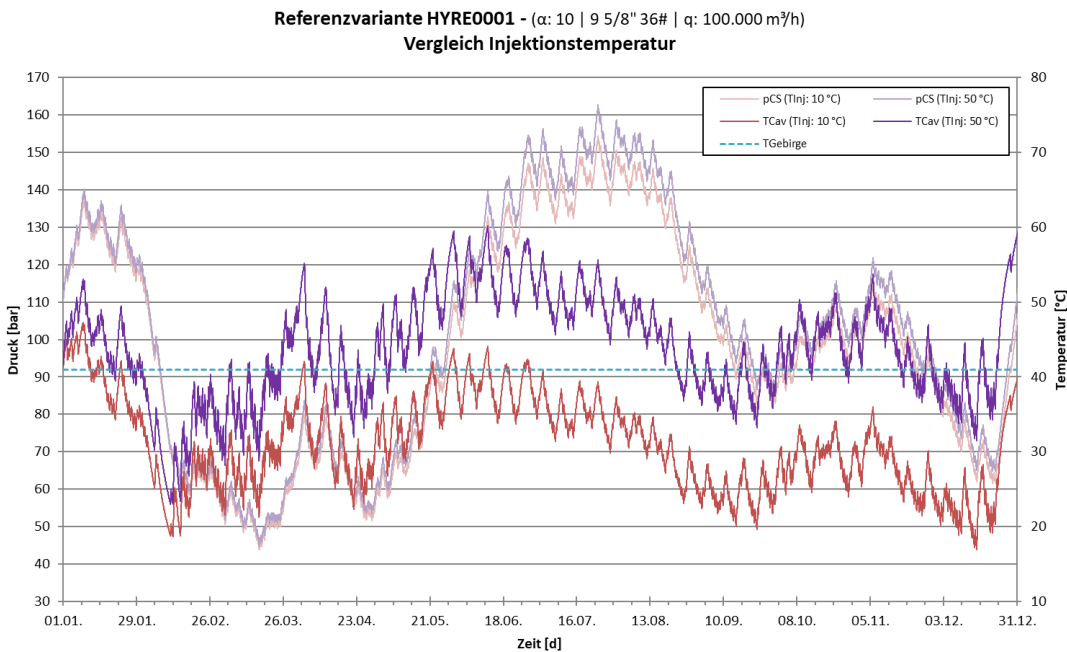


Abbildung 202: Referenzvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Gastemperatur bei Einspeisung

Der um einen Zoll auf eine Dimension von 8 5/8" verringerte Durchmesser der Förderrohrtour hat keine signifikanten Auswirkungen auf das Druck-Temperatur-Verhalten der Gesamtkaverne (Abbildung 203). Aus diesem Grund wurden alle weiteren Simulationen mit einer Tubingdimension von 9 5/8 " durchgeführt.

Abschließend wurde auch bei der Referenzvariante die Auswirkung eines vergrößerten Wärmeübertragungskoeffizienten untersucht (Abbildung 204). Der um den Faktor 5 (von 10 auf 50) erhöhte Wärmeübertragungskoeffizient hat eine signifikante Änderung des Schwankungsbereiches der Kavernentemperatur zur Folge. Aufgrund des Übergangs größerer Wärmemengen von der Kaverne ins Gebirge bei einem höheren Wärmeübertragungskoeffizienten schwankt die Kavernentemperatur weniger stark um die Gebirgstemperatur als bei einem vergleichsweise geringen Wärmeübertragungskoeffizienten. Der geänderte Verlauf der Kavernentemperatur beeinflusst erwartungsgemäß auch den sich in der Kaverne einstellenden Innendruck.

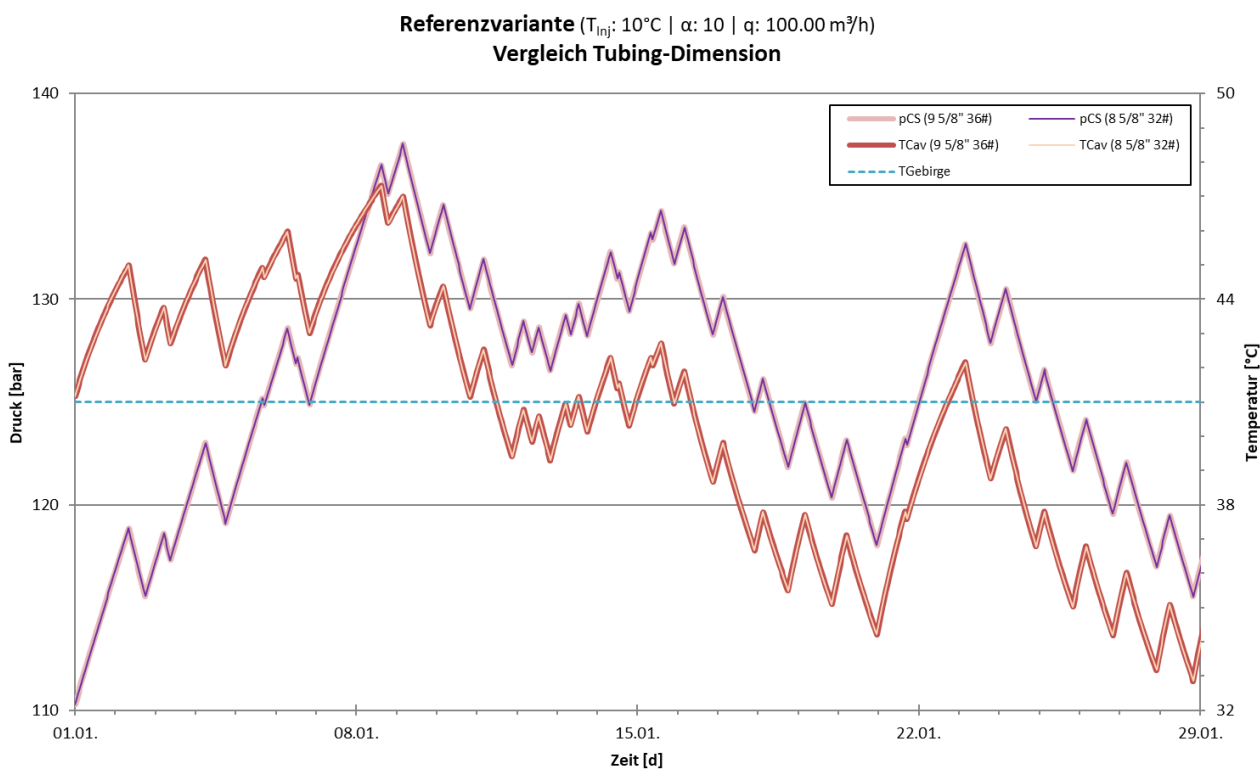


Abbildung 203: Referenzvariante – Verlauf von Rohrschuhdruck und Kavernentemperatur in Abhängigkeit von der Tubingdimension

Für die Modellierung der obertägigen Prozesse ist jedoch insbesondere der Temperatur- und Druckverlauf am Bohrlochkopf bei der Ausspeisung des Speichermediums von Interesse. Die Gastemperatur bei der Ausspeisung hängt vorrangig von der Kaverneninnentemperatur ab. Diese wird durch die Gebirgstemperatur, die Injektionstemperatur des Speichergases und dem Wärmeaustauschverhalten zwischen Kaverne und umgebendem Gebirge bestimmt. Abbildung 205 zeigt die Verläufe der Kopf-temperatur bei Ausspeisung für die verschiedenen Randbedingungen bei einer konstanten Förderrate von 100.000 m³/h. Die größten Schwankungen ergeben sich bei einer Injektionstemperatur von 50 °C

und einem Wärmeübertragungskoeffizient von 10. Hier variiert die Ausspeisetemperatur zwischen 23 und 55 °C. Die geringsten Schwankungen treten bei einer Injektionstemperatur von 10 °C und einem Wärmeübertragungskoeffizienten von 50 auf. Die Ausspeisetemperatur schwankt dann nur zwischen 25 und 38 °C.

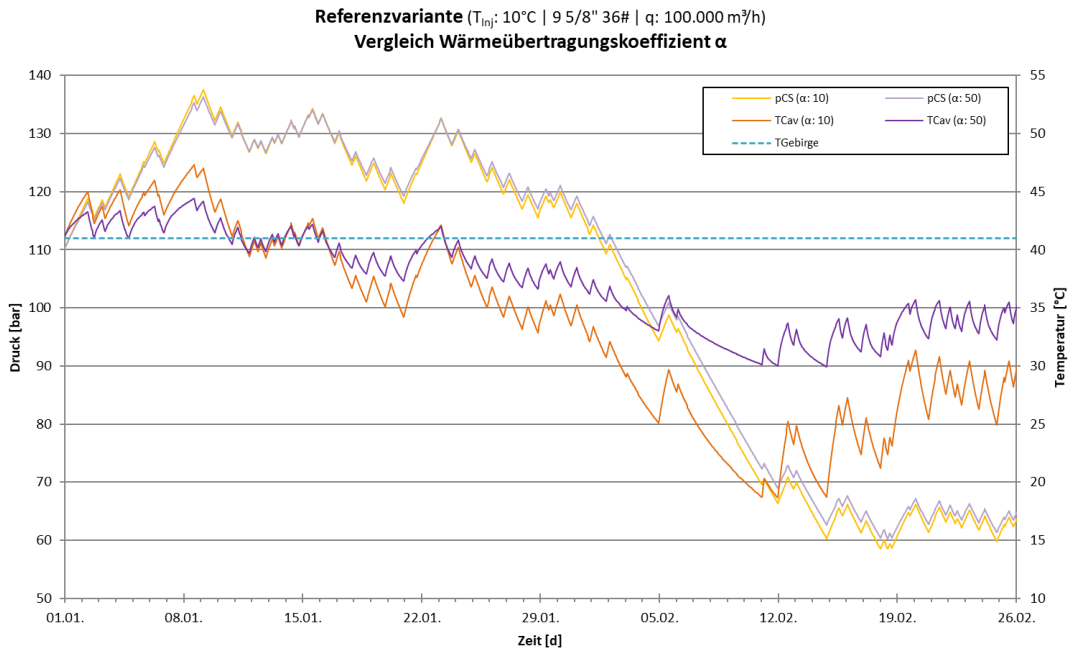


Abbildung 204: Referenzvariante – Verlauf von Rohrschuhdruck und Kavernentemperatur in Abhängigkeit vom Wärmeübertragungskoeffizient α

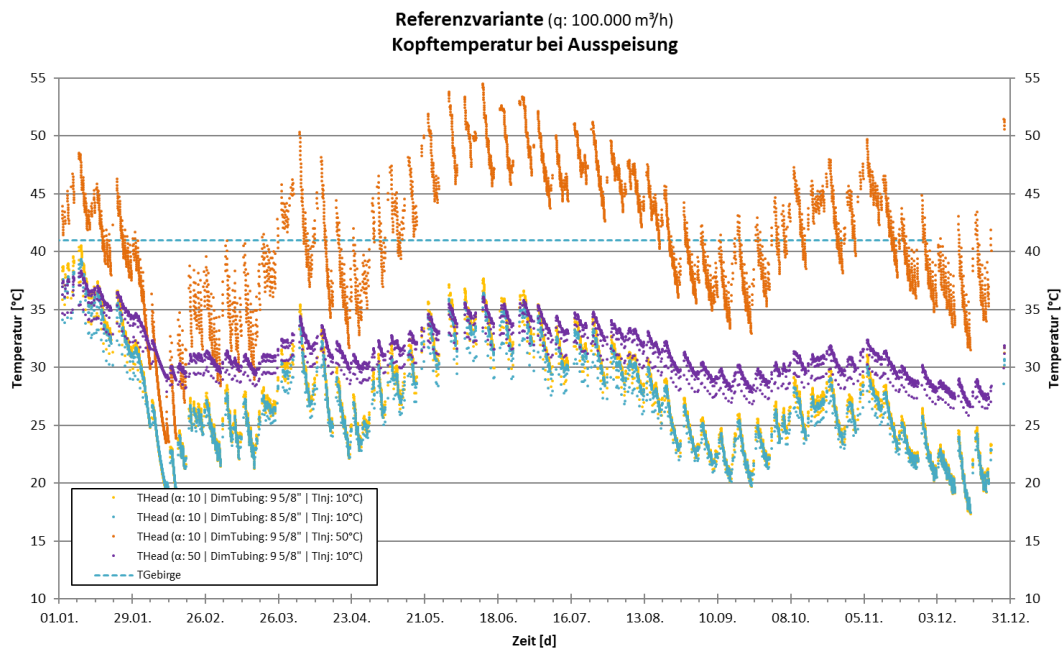


Abbildung 205: Referenzvariante – Kopftemperatur bei Ausspeisung in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension

In Abbildung 206 sind die zugehörigen Kopfdruckverläufe für die einzelnen Varianten dargestellt. Hier verläuft die Kopfdruckkurve der Variante mit erhöhter Einspeisetemperatur (50 °C) in den Einspeisephasen erwartungsgemäß um bis zu 5 bar über dem Kopfdruckverlauf der anderen Varianten. Die Kopfdruckverläufe der Varianten mit einer Einspeisetemperatur von 10 °C sind nahezu deckungsgleich und unterscheiden sich nur marginal.

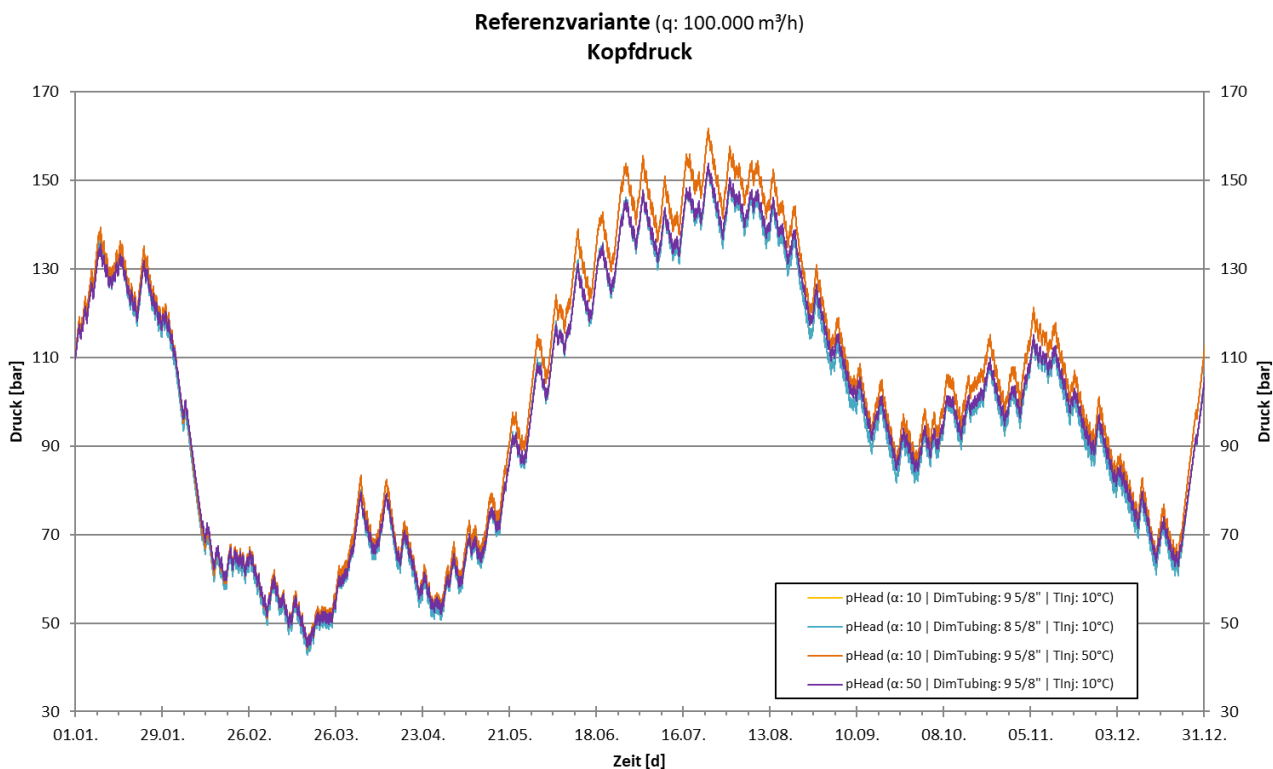


Abbildung 206: Referenzvariante – Kopfdruck in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension

Maximalvariante

Bei der Maximalvariante handelt es sich um eine Tiefkaverne, die die gleichen Ausbauparameter besitzt wie die Referenzvariante, aber ein um 2/3 größeres Volumen besitzt. Aufgrund der Teufenlage der Kaverne liegt die mittlere Gebirgstemperatur bei 56 °C und der Kaverneninnendruck variiert zwischen 60 und 230 bar. Bei den Simulationsrechnungen kommt dasselbe Jahresszenario zur Anwendung wie bei der Referenzvariante. Dieses Szenario wurde wiederum beginnend mit einer Rate von 50.000 m³/h gerechnet (Tabelle 79).

Tabelle 79: Ergebnisse Simulationsrechnungen – Maximalvariante

Parametersatz	Rate [m ³ /h]	T _{Gas} Injektion [°C]	Simulations- dauer [Jahre]	Druckbereich [bar] / Ausfüllung Füllstand AGV (min/max) [%]	u _{Max} Überschreitung	dp _{CS} Überschreitung	T _{Cav} stationär	Bemerkungen
HYMX0001	50.000	10	1	135 .. 175 (23,5 %) 48,6 .. 69,6 %	-	-	-	Rate deutlich zu niedrig
	100.000			110 .. 185 (44,1 %) 36,0 .. 78,0 %	-	-	-	Rate zu niedrig
	160.000			85 .. 200 (67,6 %) 21,0 .. 88,1 %	-	-	-	
	170.000			80 .. 205 (73,5 %) 18,4 .. 89,8 %	(+)	-	-	geringe Überschreitung u _{Max} (bis 21,7 m/s)
	200.000		70 .. 215 (85,3 %) 10,9 .. 94,9 %	+	+	-	Überschreitung dp _{CS} (bis 11,8 bar) und u _{Max} (bis 29,3 m/s)	
	160.000		3	85 .. 200 (67,6 %) 21,0 .. 88,1 %	-	-	-	stationärer Zustand (T _{Cav}) noch nicht erreicht
			5	85 .. 200 (67,6 %) 21,0 .. 88,1 %	-	-	-	
	160.000		50	1	90 .. 210 (70,6 %) 21,0 .. 88,1 %	-	(+)	-
5		90 .. 210 (70,6 %) 21,0 .. 88,1 %		-	(+)	+	sporadische Überschreitung – stati- onärer Zustand (T _{Cav}) spätestens nach 2 Jahren erreicht	
HYMX0002	160.000	10	1	85 .. 200 (67,6 %) 21,0 .. 88,1 %	-	-	-	keine Einschränkung durch Verrin- gerung der Tubingdimension
HYMX0003	160.000	10	1	90 .. 205 (67,6 %) 21,0 .. 88,1 %	-	-	-	
		10	5	85 .. 205 (70,6 %) 21,0 .. 88,1 %	-	-	-	stationärer Zustand (T _{Cav}) noch nicht erreicht

Bedingt durch das deutlich größere Volumen dieser Kaverne wurde der vorgegebene Arbeitsdruckbereich (am Rohrschuh) bei einer Rate von 50.000 m³/h nur zu ca. 23,5 % ausgefüllt. Es erfolgte eine schrittweise Steigerung der Rate auf bis zu 200.000 m³/h, was zu einer Ausfüllung des Druckbereiches bis auf ca. 85 % führte. Bei dieser höchsten Rate wurden jedoch sowohl die Druckänderungsrate als auch die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Förderstrang zum Teil deutlich überschritten. Aus diesem Grund wurde die Rate von 160.000 m³/h für alle weiteren Simulationsrechnungen verwendet (Abbildung 207).

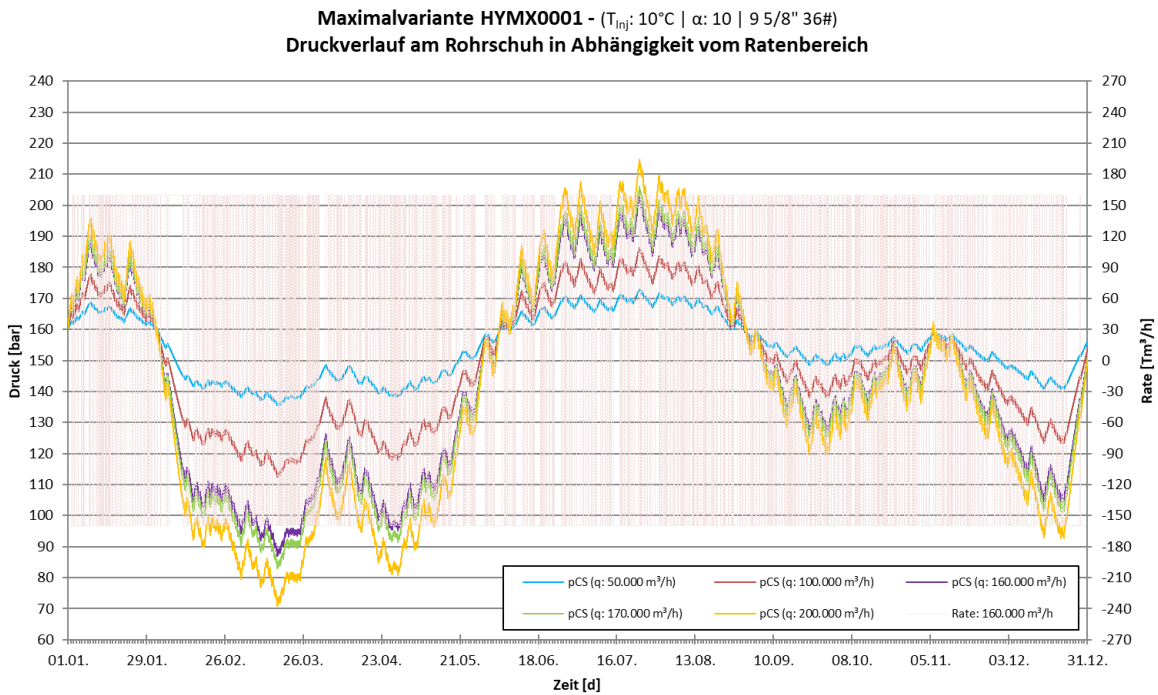


Abbildung 207: Maximalvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Rate

Da das gleiche Betriebsszenario angewendet und die Kavernenbohrung identisch ausgebaut wurde wie in der Referenzvariante, verhält sich die Kaverne der Maximalvariante sehr ähnlich zu diesem Szenario. Der Einfluss der Injektionstemperatur auf das Ausgleichsverhalten der Kavernentemperatur ist aufgrund der höheren Gebirgstemperatur noch deutlicher zu erkennen (Abbildung 208 und Abbildung 209). Bei einer Gastemperatur von 10 °C bei Einspeisung hat der Verlauf der Kavernentemperatur selbst nach fünf Jahren noch keinen stationären Zustand erreicht. Liegt die Temperatur des eingespeisten Gases jedoch bei 50 °C werden praktisch nach zwei Jahren bereits stationäre Temperaturverhältnisse in der Kaverne erreicht.

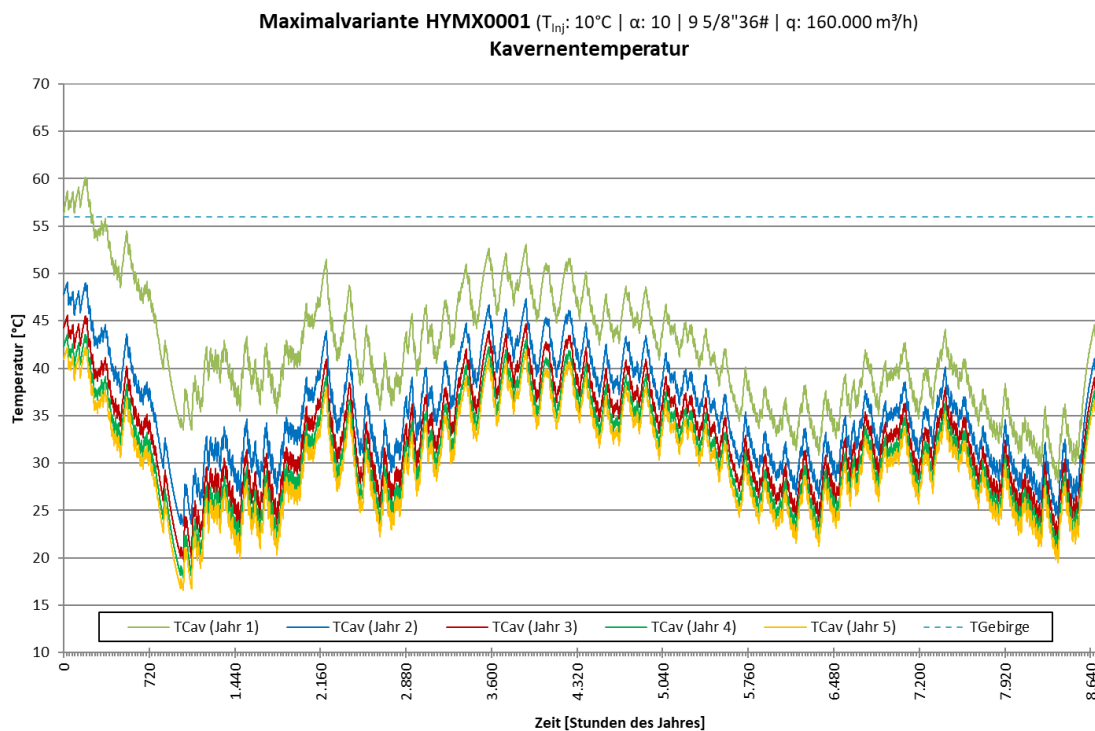


Abbildung 208: Maximalvariante – Verlauf der Kavernentemperatur (Injektionstemperatur 10 °C)

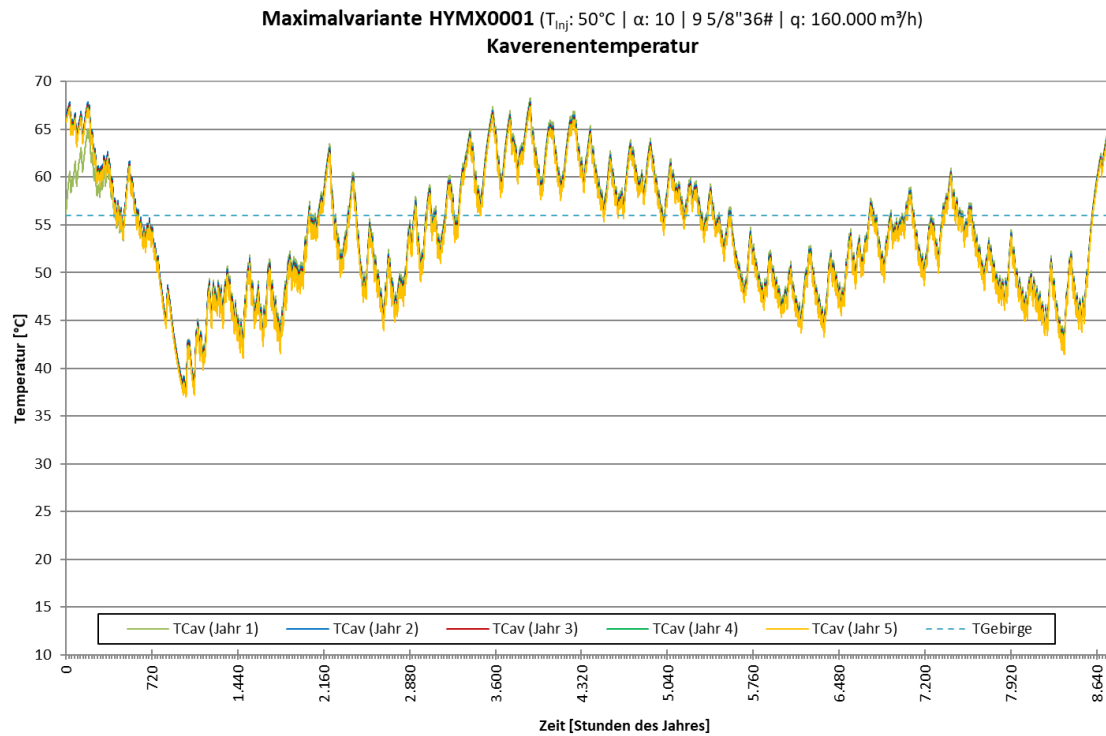


Abbildung 209: Maximalvariante – Verlauf der Kavernentemperatur (Injektionstemperatur 50 °C)

Bezüglich der Auswirkung der verringerten Dimension der Förderrohrtour und auch des erhöhten Wärmeübertragungskoeffizienten verhalten sich Referenz- und Maximalvariante qualitativ gleich.

Genauso wie bei der Referenzvariante wurde auch für die Maximalvariante der Temperatur- und Druckverlauf am Bohrlochkopf bei der Auspeisung betrachtet (Abbildung 210). Aufgrund der tieferen Lage der Kaverne ist die Gebirgstemperatur höher. Daraus ergibt sich wiederum eine im Vergleich zur Referenzvariante erhöhte Kaverneninnentemperatur. Aufgrund des größeren Kavernenvolumens liegt die Förderrate bei 160.000 m³/h. Die größten Schwankungen ergeben sich auch hier bei einer Injektionstemperatur von 50 °C und einem Wärmeübertragungskoeffizienten von 10. Hier variiert die Auspeisetemperatur zwischen 37 und 62 °C. Die geringsten Schwankungen treten bei einer Injektionstemperatur von 10 °C und einem Wärmeübertragungskoeffizienten von 50 auf. Die Auspeisetemperatur schwankt dann nur noch zwischen 35 und 51 °C.

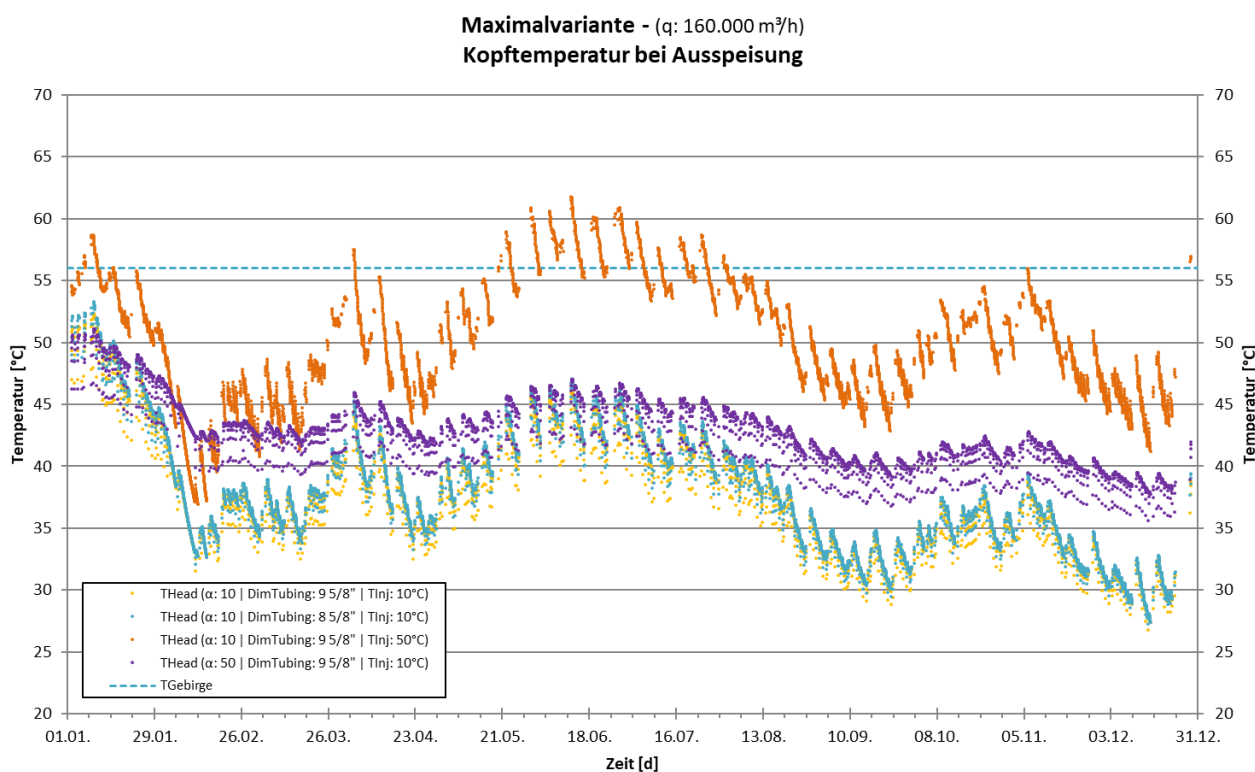


Abbildung 210: Maximalvariante – Kopftemperatur bei Auspeisung in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension

Der Kopfdruckverlauf (Abbildung 211) zeigt ein sehr ähnliches Bild wie bei der Referenzvariante. Bedingt durch die höhere Gebirgstemperatur rückt die Kopfdruckkurve bei einer Injektionstemperatur von 50 °C näher an die Kurvenschar der Varianten mit einer Einspeisetemperatur von 10 °C. Sie liegt aber dennoch sichtbar darüber. Grundsätzlich ist das Verhalten jedoch mit dem der Referenzvariante vergleichbar.

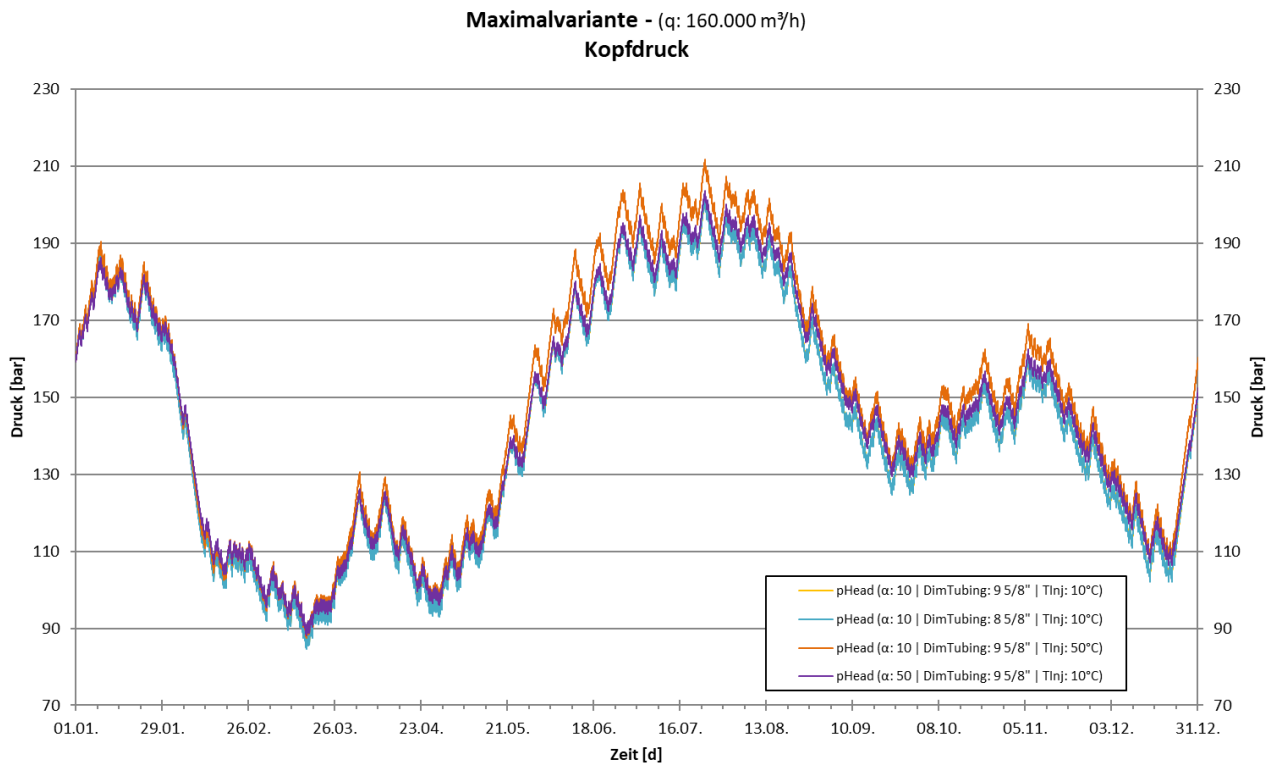


Abbildung 211: Maximalvariante – Kopfdruck in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension

8.3.3 Designspezifikationen der Prozesshauptkomponenten

8.3.3.1 Gesamtspeicherdesign

Für den Betrieb eines Untergrundgasspeichers (UGS) sind mehrere technische Voraussetzungen notwendig. Zum einen muss eine unterirdische Speicherformation (in diesem Fall eine Kaverne in einer Steinsalzformation) vorhanden sein, die technisch geeignet und für die Speicherung von Wasserstoff rechtlich zugelassen ist. Zum anderen ist eine technologische Anlage notwendig, die für den Zweck der Ein- und Ausspeicherung von Wasserstoff in die Speicherformation ausgelegt ist und diesen Prozess mit ausreichender Sicherheit gewährleistet.

In diesem Kapitel wird die OTA als technische Anlage beschrieben, soweit es sich nicht um die Kaverne selbst und die zugehörige Bohrung mit der untertägigen Installation handelt. Die untertägigen Einrichtungen werden in Kapitel 7 beschrieben. Erdverlegte horizontale Rohrleitungen zählen mit zur OTA.

Im vorangegangenen Kapitel wurden mittels Simulation der drei Varianten (Start-, Referenz-, Maximal-) mit KavPool, die Randbedingungen erarbeitet, die seitens der Speicherkavernen mit zugehörigen Bohrungskomplettierungen an der Schnittstelle (Bohrlochkopf) zu den obertägigen Einrichtungen eines Speichers hin determiniert werden.

Darauf aufbauend können nun die Auslegungsparameter und das Anlagendesign bestimmt werden.

Variantenbetrachtung

Es werden drei Speicher-Varianten betrachtet, die unterschiedliche Anforderungen an die Anlagenkonfiguration bedingen. Der grundsätzliche Aufbau der OTA für den Speicher bleibt jedoch für alle Varianten weitgehend gleich. Ein Entwurf der drei Varianten ist in den Prozessfließbildern (PFD) in der Anlage 10.3 dargestellt.

Als zu speicherndes Medium wird Wasserstoff (100 %, wassergesättigt) definiert, der bestimmten Reinheitsanforderungen bei der Ein- und Ausspeicherung genügen muss. Als zusätzliche Variante wird der o. a. Wasserstoff mit H₂S-Anteilen definiert. Für die Materialauswahl sind die H₂S-Anteile nicht preisbildend, müssen jedoch aufgrund der chemischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

Abhängig von der Historie der zur Verfügung stehenden Kavernen (neu errichtet oder Umnutzung aus ehemaliger Erdgasspeicherung) kann es sein, dass Erdgaskomponenten bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Dieser Fall wird nachfolgend jedoch vernachlässigt.

Im Gegensatz zur relativ gut zu definierenden Zusammensetzung des Wasserstoffes bei der Einspeicherung, kann der aus der Kaverne bei der Ausspeicherung geförderte Wasserstoff mit verschiedenen Komponenten, die aus dem Kavernensumpf stammen, verunreinigt sein. Hier sind vor allem Wasser, Kohlenwasserstoffe (aus Erdgasbestandteilen) und H₂S-Anteile (aus bakterieller Aktivität) maßgeblich bei der weiteren Aufbereitung zu beachten (siehe auch Kapitel 5).

Die nachfolgenden drei Varianten der Speicherauslegung werden für diesen Leitfaden im Verbundvorhaben H₂-UGS für das Design der OTA bei der Speicherbefüllung zu Grunde gelegt (Tabelle 80).

Tabelle 80: Unterscheidung der obertägigen Speichervarianten

Startvariante	Einheit	
Verdichtungsenddruck	[bar]	41–141
Verdichtersaugdruck	[bar]	31–61
Durchsatz im Auslegungspunkt	[m ³ /h i. N.]	5.000 (31 auf 141 bar)
Minimaldurchsatz	[m ³ /h i. N.]	2.000
Referenzvariante		
Verdichtungsenddruck	[bar]	41–171
Verdichtersaugdruck	[bar]	31–61
Durchsatz im Auslegungspunkt	[m ³ /h i. N.]	50.000 (31 auf 171 bar)
Minimaldurchsatz	[m ³ /h i. N.]	20.000
Maximalvariante		
Verdichtungsenddruck	[bar]	61–231
Verdichtersaugdruck	[bar]	31–61
Durchsatz im Auslegungspunkt	[m ³ /h i. N.]	100.000 (31 auf 231 bar)
Minimaldurchsatz	[m ³ /h i. N.]	20.000

Für die Ausspeicherung (Speicherentleerung) gibt es folgende Varianten (Tabelle 81), die bei der Auslegung der Ausspeicherstrecke berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 81: Auslegungsdaten für die Ausspeicherstrecken

Parameter am Ein- und Ausgang der Trocknung	Startvariante	Referenzvariante	Maximalvariante
Bemerkung	Bisher ungenutzte Kaverne ohne Gaskontakt, Bakterienaktivität unbekannt	Umgerüstete Gaskaverne mit Ölblanket	Neu gesolte Kaverne mit Stickstoffblanket
Durchfluss [m ³ /h i. N.]	5.000	50.000	1,2 Mio.
Eingangsdruck [bar]	80–100	30–170	60–230
Ausgangsdruck [bar]	30–60	25–30	25–30
Eingangstemperatur [°C]	10–40	10–40	10–40
Max. H ₂ O-Anteil (Eingang → Ausgang) [ppm]	Gesättigt → 10	75 % gesättigt → 20	75 % gesättigt → 20
Max. O ₂ -Anteil (Eingang → Ausgang) [ppm]	10.000 → nicht nachweisbar	2-10 → 2-10	2-10 → 2-10
Max. N ₂ -Anteil (Eingang → Ausgang) [ppm]	-	3-10 → 3-10	3-10.000 → 3-10
Max. CO ₂ -Anteil (Eingang → Ausgang) [ppm]	-	0-100 → 0-100	0-100 → 0-100
Max. CO-Anteil (Eingang → Ausgang) [ppm]	-	-	-
Max. H ₂ S-Anteil (Eingang → Ausgang) [ppm]	Spuren → 0,009	Spuren → 0,009	Spuren → 0,009
C _n H _m (undifferenzierte höhere Kohlenwasserstoffe)	-	3-20 → 3	3-20 → 3
Weitere KW-/ Ölbestandteile	-	0-5 → 0-0,5	0 → 0-0,5

Der Vollständigkeit halber wurde noch ein **Sonderfall für den Verdichter bei der Gaserstbefüllung** mit in die Betrachtung aufgenommen:

Bei der Errichtung der Kavernen durch Solung für die Speicherung des Wasserstoffes steht die fertige Kaverne zunächst unter Sole. Diese Sole wird als letzter Vorgang mittels des einzuspeichernden Gases (hier Wasserstoff) über einen Förderstrang, welcher am tiefsten Punkt (dem späteren Kavernensumpf) endet, herausgedrückt und die jeweilige Kaverne steht komplett befüllt zur Ausspeicherung zur Verfügung. Dazu bedarf es eines Verdichters, der den maximal erforderlichen Druck aufbringen kann, der aber relativ wenig Menge liefert (Tabelle 82).

Tabelle 82: Auslegungsdaten Verdichter zur Gaserstbefüllung

	Einheit	Bezug	Minimum	Maximum
Gasrate, Regelbetrieb	[m ³ /h i. N.]	Verdichter	2.000	20.000
Enddruck, max	[bar]	Bohrlochkopf	170	170
Enddruck, min	[bar]	Bohrlochkopf	40	40

Die für den regulären Speicherbetrieb zur Einspeicherung verwendeten Verdichter sind meist nicht auf so niedrige Fördermengen herunter regelbar, sodass hier ein dafür ausgelegter „Verdichter zur Gaserstbefüllung“ eingeplant werden muss. Bei der Detailplanung kann dann noch einmal überprüft werden, ob ein Einspeiseverdichter (redundant vorhanden) temporär auf kleinere Mengen umgerüstet werden kann. Mögliche Methoden sind hier: Bypassbetrieb, Hydrocom, Zylinderhälftenabschaltung, Schadräume, Drehzahlregelung oder Kombinationen davon.

8.3.3.2 Spezifikation Einspeicherschiene

Der Einlagerungsstrang beinhaltet alle Komponenten, die für die Einspeicherung des Wasserstoffes in die Kaverne notwendig sind. Im Wesentlichen erfolgt hier die Messung/Bilanzierung der einzuspeichernden Gasmenge und die erforderliche Druckerhöhung, um den Wasserstoff in die Kaverne zu speichern. Soweit erforderlich sind vor der Verdichtung unerwünschte Komponenten zu entfernen (z. B. Sauerstoff).

Die Einspeicherschiene besteht aus folgenden Komponenten:

Eingangsarmatur/Sicherheitsabsperrentil (SAV)

Die Eingangsarmatur dient zur Trennung des Speichers von der angeschlossenen Transportleitung bzw. von der Anlage zur hydrolytischen Erzeugung des Wasserstoffes.

Abhängig vom Sicherheitskonzept und den ggf. unterschiedlichen Auslegungsparametern zwischen Versorgungsleitung und Speicheranlage wird diese Armatur als Sicherheitsabsperreinrichtung bzw. auch als Druckstufentrennung ausgeführt. Im Falle einer Betriebsstörung gewährleistet diese Armatur/Armaturengruppe die sichere Trennung des Speichers von der umgebenden Infrastruktur. Als Bauform kommen Kugelhähne bzw. axiale oder vertikale Absperrventile zur Anwendung. Die Ausstattung

ist im Fehlerfall sicherheitsgerichtet schließend mit Federbelastung/Hydraulik- oder Elektroantrieb vorzusehen.

Hinsichtlich des Redundanzkonzeptes empfiehlt sich, bei der Startvariante eine einfache und bei den anderen Ausbauvarianten eine doppelte Ausführung der Armaturen, um im Fehler- oder Wartungsfall den Speicher weiter betreiben zu können.

Desoxidation

Der Prozessschritt der Sauerstoffentfernung ist nur notwendig, wenn der Wasserstoff unmittelbar aus einer Hydrolyse-Anlage stammt und keine weitere Aufbereitung/Reinigung durchlaufen hat.

Verwendet wird z. B. ein Edelmetallkatalysator zur Entfernung von Sauerstoff aus H₂-haltigen Strömen. Bei diesem Katalysator reagiert Sauerstoff mit Wasserstoff zu Wasser. Der H₂-Gehalt des Gasstroms muss mindestens doppelt so hoch sein wie der von Sauerstoff. Der Sauerstoffgehalt kann auf < 1 ppmv reduziert werden. Das bei der Reaktion entstehende Wasser kann mit einem Molekularsieb auf < 1 ppmv reduziert werden.

Auch hier ist mit Rücksicht auf das Redundanzkonzept eine zweiseitige Ausführung der Anlage notwendig, um während des laufenden Betriebes Reparatur und Wartungsarbeiten durchführen zu können.

Sinngemäß gilt diese Beschreibung auch für die Ausspeicherstrecke.

Abscheider

Am Eingang des Speichers kommt in aller Regel ein kombinierter Feststoff-Flüssigkeitsabscheider zum Einsatz. Dieser hat die Aufgabe, die nachgelagerten Komponenten von Verunreinigungen bzw. anfallendem kondensierten Wasser zu schützen. Es wird angenommen, dass der zur Einspeicherung vorgesehene Wasserstoff wassergesättigt auftreten kann. Auch hier kann es bei kondensierten Wassermengen zu einer negativen Beeinflussung der nachgeschalteten Komponenten kommen.

In der Regel kommt ein kombinierter Staub-/Flüssigkeitsabscheider mit Filtereinsätzen zum Einsatz, der geeignet ist, sowohl feste Partikel als auch schwallartig auftretende kondensierbare Flüssigkeiten (Wasser) zurückzuhalten.

Wenn sichergestellt ist, dass alle vorgeschalteten Anlagenteile außerhalb des Speichers neuwertig bzw. nicht durch artfremde Medien verunreinigt sind, kann die Abscheiderstufe für die Feststoffe entfallen.

Die bei vergleichbaren Erdgasanwendungen vorhandene EMSR-Technik ist analog auch bei den Abscheidern für Wasserstoff anzuwenden:

- Temperaturmessung,
- Differenz-/Druckmessung,
- Füllstandsmessung und Ausschleuseeinrichtung,
- ggf. Sumpfbeheizung mit Isolierung (bei Außenaufstellung).

Für den Abscheider ist ein Reparaturbypass bzw. ein genereller Anlagenbypass für die Ausspeisung vorzusehen, wenn keine getrennten Leitungsführungen für Ein- und Ausspeisebetrieb vorgesehen werden sollen.

Fiskalische Gasmengenmessung

Für Energiespeicher, welche dem liberalisierten Markt unterliegen, sind eichpflichtige Verrechnungsmessungen relevant, über die die Abrechnung mit dem jeweiligen Kunden erfolgt. Bei kleineren Speichern, die jeweils nur an einen Kunden angebunden sind bzw. die als eine Einheit in einer größeren technischen Anlage existieren, sind hierfür einzelvertragliche Vereinbarungen maßgebend.

Die technische Ausführung unterscheidet sich in der Regel nicht von herkömmlichen Messungen für Erdgas:

- Zähler unidirektional (Turbinen- oder Corioliszähler) oder bidirektional (Ultraschall),
- Mengenumwerter mit Qualitätsmessung (abhängig von der Gaszusammensetzung, für energetische Abrechnung),
- Auswerteeinheit, DFÜ, Registrierung.

Abhängig vom Messprinzip ist eine Mindestreinheit des Gases erforderlich (z. B. frei von kondensierbaren Flüssigkeiten), um eine fehlerfreie Funktion zu gewährleisten.

Wenn die Messung bidirektional genutzt werden soll, ist ein entsprechender Schaltungsaufwand für die getrennten Fahrwege zur Ein- und Ausspeisung (Umgehung des Eingangsabscheiders) notwendig.

Verdichter

Die Konfiguration der Verdichteranlage sieht eine Redundanz von mindestens einer Maschine vor, d. h., bei Ausfall einer Einheit soll mindestens eine weitere Maschine im Standby verfügbar sein, um die Verfügbarkeit der Speicheranlage zu gewährleisten.

Bei minimalistischen Anforderungen kann auf diese Redundanz verzichtet werden, wobei hier die planmäßige Wartung bzw. ein Defekt des Verdichters gleichbedeutend mit dem Stillstand des Einspeicherbetriebs ist.

Im betrachteten Druck- und Durchsatzbereich sind nicht alle am Markt befindlichen Verdichter-Bauarten geeignet. Abbildung 212 zeigt die typischen Einsatzbereiche und den Arbeitsbereich der Referenzvariante.

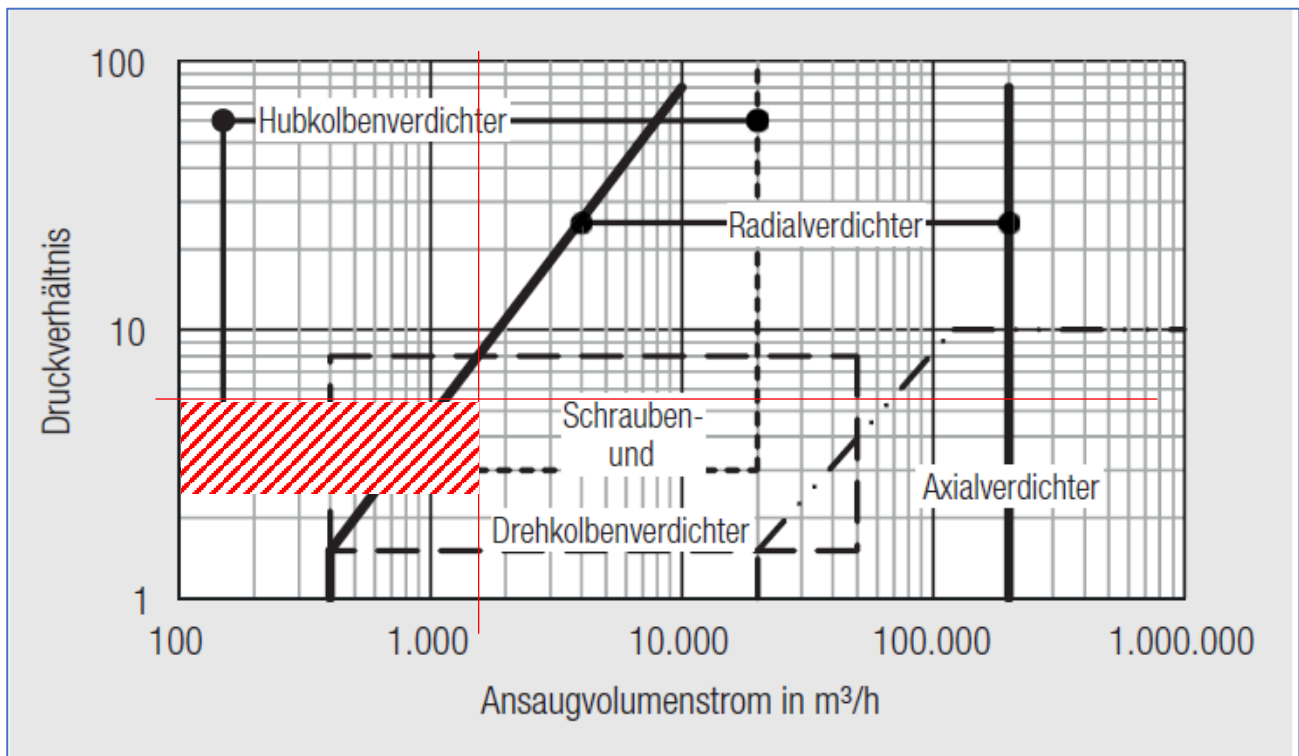


Abbildung 212: Typische Einsatzbereiche verschiedener Verdichter-Bauarten (Lendt & Cerbe, 2016)

Zur Auswahl stehen hier Turbo-, Schrauben- und Kolbenverdichter.

Beim Einsatz von Turboverdichtern (Axial- und Radialbauweise) ist zu beachten, dass einerseits der Durchsatzbereich aufgrund der Kennfelder stärker eingeschränkt ist als beim Kolbenverdichter. Andererseits ist wegen der geringeren Molekülmasse das Verdichtungsverhältnis pro Stufe wesentlich kleiner als bei der Verdichtung von Erdgas. Hier ist der Kolbenverdichter insgesamt besser geeignet und wird deshalb hier ausgewählt.

Es kommt hierbei eine zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung und Abscheidung von Kondensat/Schmieröl zum Einsatz. Als Alternative kommt auch eine ölfreie Verdichtung in Frage, die jedoch abhängig vom Hersteller nur bis zu einem bestimmten Maximaldruck angeboten wird.

Zur effektiven Nutzung der Maschinen kann auch der Parallelbetrieb von Verdichtungsstufen im niedrigeren Druckbereich konzipiert werden, was bei niedrigem Speicherdruck eine schnellere Befüllung der Kavernen ermöglicht. Als Antrieb stehen bei einem herkömmlichen Erdgasspeicher prinzipiell Elektromotoren oder Gasmotoren zur Auswahl, was im Falle der H₂-Speicherung jedoch eindeutig zugunsten des Elektromotors umschlägt, da hier entsprechende regenerative Energie ausreichend verfügbar sein sollte.

Alle übrigen Komponenten entsprechen denen eines Erdgasspeichers.

Der Lieferumfang der Verdichteranlagen sollte folgende Komponenten umfassen:

- Maschine (Aufstellung im Gebäude, OK Fundament),
- Antrieb (E-Motor mit separatem Abgang),
- Einheiten-Steuerung (im EMSR-Raum),

- interne Verkabelung inklusive Tragsysteme,
- Sicherheitseinrichtungen für ESD-System und EX-Schutz,
- internes Piping inklusive Peripherie (Abscheider, Kühler, Armaturen, Stützen),
- Instrumentierung,
- Hilfs- und Nebensysteme (Kühlwasser, Druckluft, Öl, Leckgas usw.),
- Planung, Herstellung, Lieferung, Montage, Inbetriebnahme, Dokumentation.

Die Anfrage bei einem in Deutschland ansässigen Verdichterhersteller ergab beispielhaft folgende Maschinen für die o. a. Varianten (Tabelle 83).

Tabelle 83: Exemplarische Verdichter mit Wellenleistung

Variante	Maschine	
Startvariante	Baugröße Wellenleistung	2 TZL 130 3.43 KW
Referenzvariante	Baugröße Wellenleistung	2 TZL 500 3.700 KW
Maximalvariante	Baugröße Wellenleistung	2 TVL 500 8.900 KW
Erstbefüllung	Baugröße Wellenleistung	2 TZL 500 1.650 KW

Die notwendigen Gebäudeabmessungen ergeben sich aus den beispielhaften Aufstellungsplänen und sind in Tabelle 84 zusammengestellt. Weiterhin werden für die Peripherie und die Bauteile, die eine Außenaufstellung benötigen (Kühler) zusätzliche Flächen benötigt. Diese werden nachfolgend grob abgeschätzt.

Tabelle 84: Exemplarische Flächenbedarfe

Variante	Gebäudeabmessung L x B X H [m]	Außenflächen L x B [m]
Startvariante	16 x 11 x 10	11 x 6
Referenzvariante	15 x 32 x 10	32 x 7
Maximalvariante	38 x 24 x 18	24 x 15
Erstbefüllung	15 x 18 x 10	18 x 7

Rohrleitungen und Armaturen

Für die Auswahl und Auslegung der Rohrleitungen und Armaturen in der OTA gelten die gleichen Prinzipien wie für Erdgasleitungen auf UGS. Hinsichtlich der Materialauswahl wird auf Kapitel 3 verwiesen.

Aufgrund der differierenden Eigenschaften von Erdgas und Wasserstoff könnte die maximale Durchflussgeschwindigkeit von ca. 20 m/s für Speicher-Rohrleitungen für Erdgas im Falle eines H₂-Speichers auch erhöht werden (Mischner, 2021).

Hinsichtlich der geringeren Dichte können höhere Erosionsgeschwindigkeiten und damit höhere Strömungsgeschwindigkeiten angesetzt werden und auch der Druckverlust ist bei vergleichbaren Strömungsgeschwindigkeiten dichte- und viskositätsbedingt geringer als bei Erdgas.

Allerdings ist der transportierbare Normvolumenstrom in gleich durchströmten Rohrleitungen durch die Unterschiede in den Realgasfaktoren bei Wasserstoff deutlich geringer als bei Erdgas.

Auch die transportierte Leistung ist, bedingt durch die geringere Energiedichte, bei Wasserstoff geringer als unter vergleichbaren Strömungsbedingungen bei Erdgas.

Setzt man die Kriterien für die Rohrleitungsauslegung konservativ (also vergleichbar mit Erdgas) an, so ergibt sich bei der Referenzvariante z. B. eine Leitung DN 200, die für den Ein- und Auslagerungsbetrieb mit den fixierten Auslegungsbedingungen (Referenzvariante) ausreichend dimensioniert ist.

Die auf einer OTA eingesetzten Armaturen sollten für 100 % Wasserstoff geeignet sein, sofern die Spezifikation dies fordert. Technisch werden diese Anforderungen bereits von namhaften Herstellern erfüllt. Die entsprechenden notwendigen Prüfungen und Zulassungen der benannten Zertifizierungsstellen werden hier vorausgesetzt.

Für Flanschverbindungen ist im Bereich der UGS die Auslegung nach API oder ASME B16.5 üblich, mit rein metallischen Dichtungen der Form RTJ. Diese gelten als technisch dicht.

In Druckstufen kleiner als 100 bar werden herkömmlicherweise auch kammprofilierte Flach-Dichtungen mit Weichstoffauflage eingesetzt, die gemäß Herstellererklärung eine entsprechende Dichtheit nach dem Stand der Technik aufweisen.

Manifold/Feldleitung/Sondenplätze

Die verschiedenen Konfigurationen der jeweiligen OTA sind in den betrachteten Varianten durch mehrere, baugleiche Komponenten gekennzeichnet, die entweder aus Redundanzgründen oder aufgrund gewünschter Mengenstaffelungen im Durchsatz unabhängig oder parallel miteinander betrieben werden müssen. Die zahlreichen Schaltungsvarianten werden zumeist über ein sogenanntes Manifold realisiert, welches über vordefinierte Fahrwege oder frei wählbare Armaturenstellungen die entsprechende Zusammenschaltung umsetzt. Das Manifold wird in der Regel konstruktiv durch Rohrleitungen mit oberirdischen Armaturengruppen umgesetzt.

Soweit die Bohrlochköpfe der einzelnen Bohrungen zu den Kavernen sich nicht unmittelbar auf dem Gelände der OTA befinden, werden Feldleitungen als erdverlegte Sammelleitungen zu den Sondenplätzen verlegt. In der Regel werden Ringleitungen bzw. redundante sternförmige Leitungen mit mindestens dem 2-fachen der gesamten Ein- bzw. Ausspeisekapazität verlegt, um bei Schäden oder Wartungsarbeiten die Verfügbarkeit des Speichers aufrecht zu erhalten. Die Sondenplätze stellen die

Verbindung der OTA mit den Kavernen und zugehörigen Bohrungsinstallationen dar. Hier sind notwendige Armaturen, Mess- und Sicherheitseinrichtungen installiert, um im regulären Betrieb aber auch im Gefahrenfall die einzelnen Kavernenspeicher von der OTA abtrennen zu können. Sondenplätze können als Einzelplätze oder auch als Clusterplätze konzipiert sein. Auf letzteren befinden sich dann mehrere Bohrlochköpfe/Kavernenanschlüsse. Auf jedem Sondenplatz sind in der Regel folgende Einrichtungen als Schnittstelle zur Feldleitung bzw. zur OTA installiert:

- Bohrlochkopf mit Master- und Wingvalve mit SAV-Funktion und UTSAV,
- Temperatur und Druckmessungen (für Ringräume und Produktionsrohrtour sowie Rohrleitungen),
- Durchflussmessung, ggf. Gaszusammensetzung,
- Absperr- bzw. Mengenregelventil,
- Unterstation für E-/MSR-Technik,
- Platzüberwachung und Sicherheitstechnik, Zaun, Bedienbühnen usw.

8.3.3.3 Spezifikation Ausspeicherschiene

Der Auslagerungsstrang stellt das Pendant zum Einlagerungsstrang dar. Er hat die Aufgabe, den in den Kavernen gespeicherten Wasserstoff anforderungsgerecht bereitzustellen, wenn dieser benötigt wird. Hierzu ist der Druck vom Niveau der jeweiligen Kaverne auf das der Transportleitung, über die der Wasserstoff weiter transportiert wird, anzugleichen. Weiterhin müssen unerwünschte Begleitkomponenten, die aus der Kaverne stammen (z. B. Wasser oder Schwefelwasserstoff) entfernt werden.

Der Strang besteht aus folgenden Komponenten:

Ein- und Ausgangsarmaturen/Sicherheitsabsperrventile (SAV)

Sie dienen der Trennung des Speichers von der angeschlossenen Transportleitung bzw. auch als Druckstufentrennung vor der Druckregelarmatur. Funktionsbedingt werden sie als schnellschließendes Kugelventil oder als Axialventil ausgeführt.

Abscheider

Wenn der Wasserstoff die Kaverne verlässt, wird er im Maximalfall wassergesättigt sein. Bei längeren Distanzen zwischen den einzelnen Bohrungen und der OTA kann er sich von der Bohrloch-Temperatur bis auf Umgebungstemperatur abkühlen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dabei Wasser in flüssiger Form ausfällt und sich dann in der jeweiligen Feldleitung als 2. Phase im Gasstrom mitbewegt. Diese schwallartig anfallende Flüssigkeit kann weitere Anlagenkomponenten schädigen bzw. deren Funktion stören, deshalb ist die Abscheidung erforderlich. Hierzu kommt in aller Regel ein kombinierter Staub-/Flüssigkeitsabscheider zum Einsatz.

Die bei vergleichbaren Erdgasanwendungen vorhandene EMSR-Technik ist analog auch bei den Abscheidern für Wasserstoff anzuwenden:

- Temperaturmessung,
- Differenz-/Druckmessung,
- Füllstandsmessung und Ausschleuseeinrichtung,
- ggf. Sumpfbeheizung mit Isolierung (bei Außenaufstellung).

Für den Abscheider ist ein Reparaturbypass vorzusehen bzw. eine redundante Ausführung zu planen.

Druckregelung

Der aus der Kaverne entnommene Wasserstoff steht unter einem höheren Druck als an der Übergabestelle vom Speicher zur Pipeline bzw. zur nachgeschalteten Anlage. Demzufolge ist eine Druckreduzierung auf das Ausgangsdruckniveau des Speichers (unter Berücksichtigung der Druckverluste durch Reibung in der OTA) notwendig. Hierzu wird eine Gasdruckregelanlage ggf. mit Vorwärmung in Anlehnung an DVGW G 492 eingesetzt.

Die wesentlichen Bestandteile hierbei sind:

- Rohrleitungen und Funktionsleitungen mit Absperreinrichtungen,
- Überwachungseinrichtungen,
- Einrichtungen zur Durchflussregelung und -begrenzung,
- Einrichtungen zur Dämpfung von Pulsationen und Vibrationen,
- Gasvorwärmung (falls erforderlich),
- elektrotechnische Einrichtungen.

Die erforderlichen Messeinrichtungen für Durchfluss und Gasbeschaffenheit sind am Stationsein- bzw. -ausgang installiert und werden hier nicht betrachtet.

Die Notwendigkeit der Vorwärmung ergibt sich aus dem jeweiligen Druckbereich bzw. der Art der Entspannung und muss bei der Planung der Anlagen berücksichtigt werden. Bei isenthalper Entspannung von Wasserstoff kann aufgrund des schwach ausgeprägten Joule-Thomson-Effekts ggf. auf eine Vorwärmung verzichtet werden.

Die Anwendung des DVGW-Regelwerks ergibt sich aus der technischen Ähnlichkeit der Druckregelanlage und der derzeit in Überarbeitung befindlichen technischen Regeln, die dann auch für die Gasart Wasserstoff Gültigkeit haben werden.

Beim Einsatz auf Speicheranlagen ist aufgrund des Druckgefälles in der Regel eine Druckstufentrennung (zusätzliche Druckabsicherung mit in der Regelschiene angeordnet).

Gasreinigung

Das aus der Kaverne entnommene Speichergas besteht aus Wasserstoff und Verunreinigungen in nachfolgenden Größenordnungen:

- 100 ppm CH₄,
- 100 ppm CO₂,
- 200 ppm CO,
- 100 ppm H₂S,
- H₂O gesättigt

Für das Gas aus dem Speicher, das an Dritte abgegeben wird, werden neben Wasserstoff die folgenden Komponenten hinsichtlich der Reinheitsanforderungen betrachtet:

- CO₂ < 2 ppm,
- CO < 0,2 ppm,
- H₂S < 0,004 ppm,
- H₂O < 5 ppm.

Die Technische Regel DVGW G 260 (2020) definiert hier übergreifend den Standard für die Reinheit des Wasserstoffes (Gruppe A: 98,0 %; Gruppe D: 99,97 %).

Nach der Einspeicherung steht das Gas in der Kaverne mit dem Kavernensumpf in Kontakt. Dieser besteht aus Flüssigkeiten, die als Reststoffe nach der Herstellung der Kaverne an deren tiefsten Punkt verblieben sind. Zumeist handelt es sich hier um Sole, Kohlenwasserstoffe (je nach verwendetem Blanket-Medium) und biologische Bestandteile, die aus dem zur Solung verwendeten Rohwasser herühren. Die genauere Zusammensetzung wird in Kapitel 5 beschrieben.

Um diese aus der Kaverne stammenden Verunreinigungen zu entfernen, kommen folgende Verfahren zum Einsatz:

- Adsorption mittels beschichteter Aktivkohle (H_2S),
- selektive katalytische Oxidation (CO),
- Temperatur Swing Adsorption, TSA (CO_2 , H_2O).
- Membranverfahren

Dabei werden die o. a. Komponenten weitestgehend entfernt. Methan wird hierbei nicht beachtet.

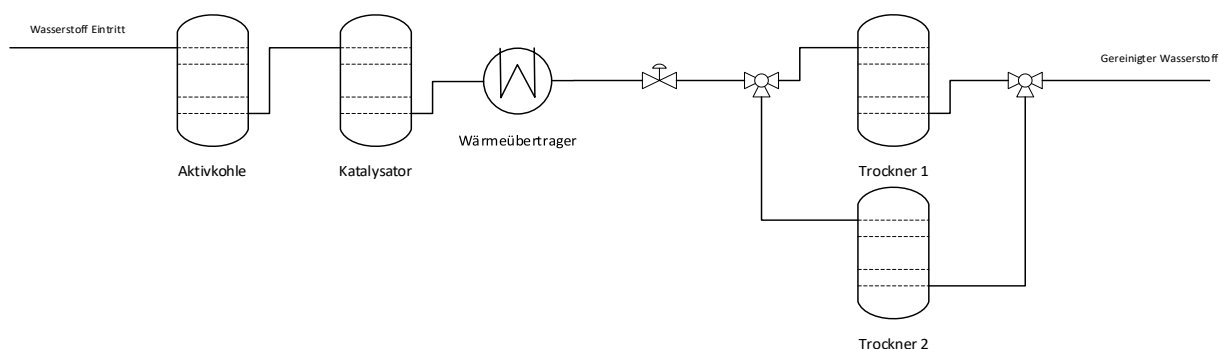


Abbildung 213: Konfiguration der Gasreinigung

Bei relativ unkritischen Reinheitsanforderungen bzw. wenn nur Wasser entfernt werden soll, kann auch auf das bei Erdgas bewährte Verfahren der Absorption an Glykol (TEG) zurückgegriffen werden. Dieses Verfahren ist jedoch nur eingeschränkt zur Entfernung der o. a. Komponenten geeignet.

Eine prinzipielle Darstellung zeigt Abbildung 213.

Im weiteren Verlauf der Ausspeisestrecke gelangt der ausgespeicherte Wasserstoff durch die Gas-mengenmessung unter Umgehung des Eingangsabscheiders wieder zum Ausspeisepunkt bzw. zur Transportleitung.

8.3.4 Modellierung der obertägigen Gesamtanlagenkonzepte

8.3.4.1 Kurzbeschreibung des Modellierungstools

Zur Modellierung der Prozesse in der OTA wurde das Programm Epsilon eingesetzt. Dieses Steady-State-Tool für chemische Anlagen wurde ursprünglich für die Kraftwerksmodellierung entwickelt und ermöglicht darüber hinaus eine breit gefächerte Abbildung vielfältiger thermodynamischer Prozesse.

Dabei erfolgt im ersten Schritt die Auswahl der benötigten Einzelkomponenten des Gesamtprozesses und deren Verbindung über Prozessströme. Nachfolgend werden die Eigenschaften dieser Anlagenkomponenten und ggf. Randbedingungen für Prozessströme spezifiziert. Dies erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche.

Die Berechnung der Werte für die einzelnen Komponenten erfolgt für den vorgegebenen Prozess anhand hinterlegter Funktionen (p, T, c, Enthalpie, Massenstrom, etc.). Dabei kann auf verschiedene Stoffwertemodelle inklusive GERG2008 zurückgegriffen werden. Das Modell ist für eine Einhaltung von Energie- und Massenbilanzen konzipiert.

8.3.4.2 Modellaufbau

Die Modellierung erfolgte für drei prinzipielle Varianten mit folgenden Hauptcharakteristiken:

- **Startvariante** – Einlagerung: ohne Verdichter, mit katalytischer Desoxidationsanlage und 2 Abscheidern; Auslagerung: 2 Abscheider, 1 Wärmetauscher und Adsorber,
- **Referenzvariante** – Einlagerung: 2 Verdichter und 2 Kühler/Abscheider; Auslagerung: wie Startvariante mit höheren Leistungsgrenzen,
- **Maximalvariante** – wie Referenzvariante aber mit höheren Leistungsgrenzen.

Nachfolgend ist beispielhaft der Modellaufbau in Epsilon für den gesamten Kreislauf visualisiert (Abbildung 214).

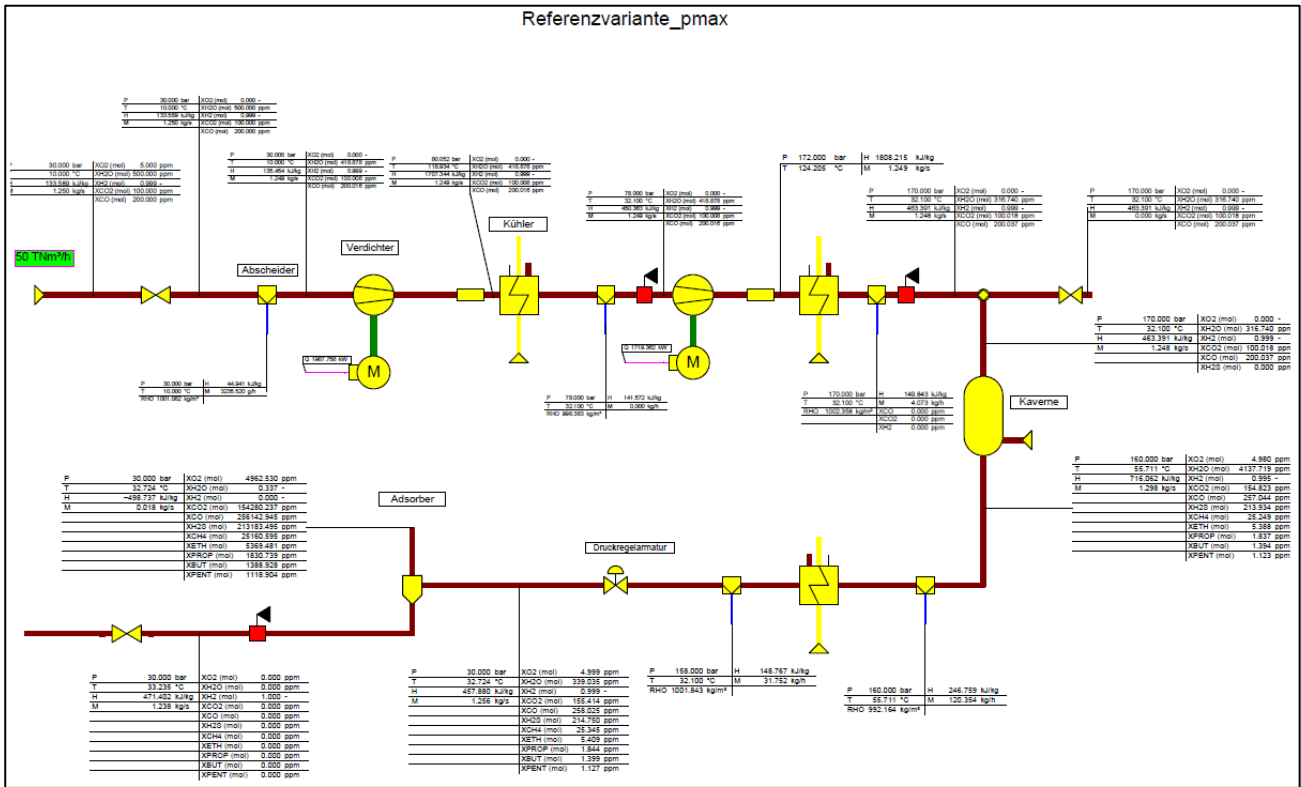


Abbildung 214: Beispielhafte Visualisierung des gesamten Kreislaufs OTA (aus Simulationstool Epsilon)

In den nachfolgenden Kapiteln wird zwischen den verschiedenen Varianten der Einspeicherung und Ausspeicherung als Teilprozess unterschieden. Die betrachteten Teilprozesse sind nachfolgend beispielhaft veranschaulicht (Abbildung 215, Abbildung 216 und Abbildung 217: Darstellung im Simulationstool).

Einspeicherung

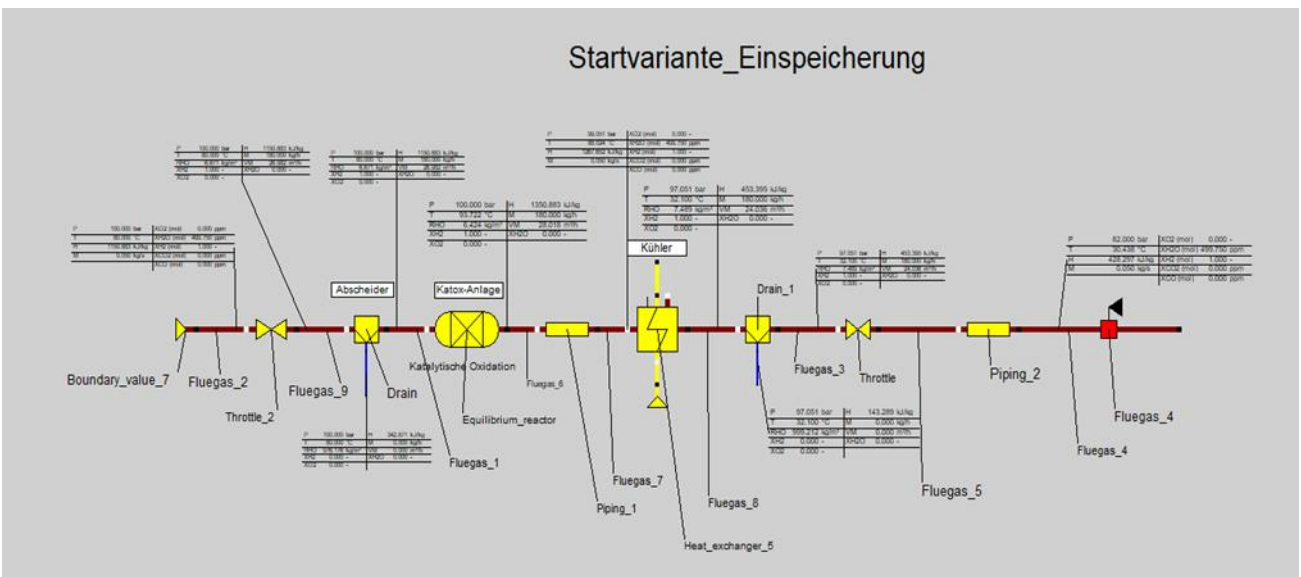


Abbildung 215: Startvariante – Einspeicherung

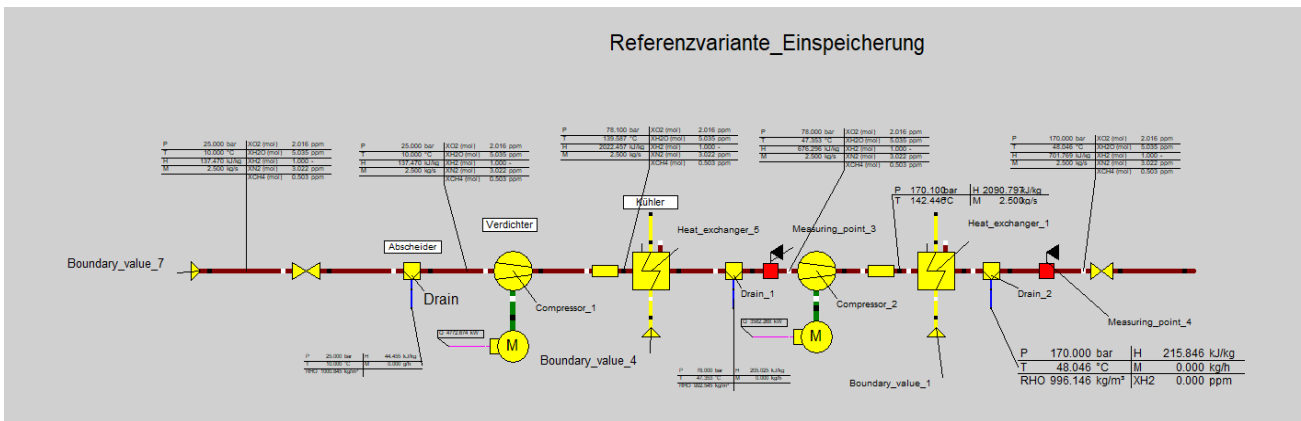


Abbildung 216: Referenzvariante – Einspeicherung

Ausspeicherung

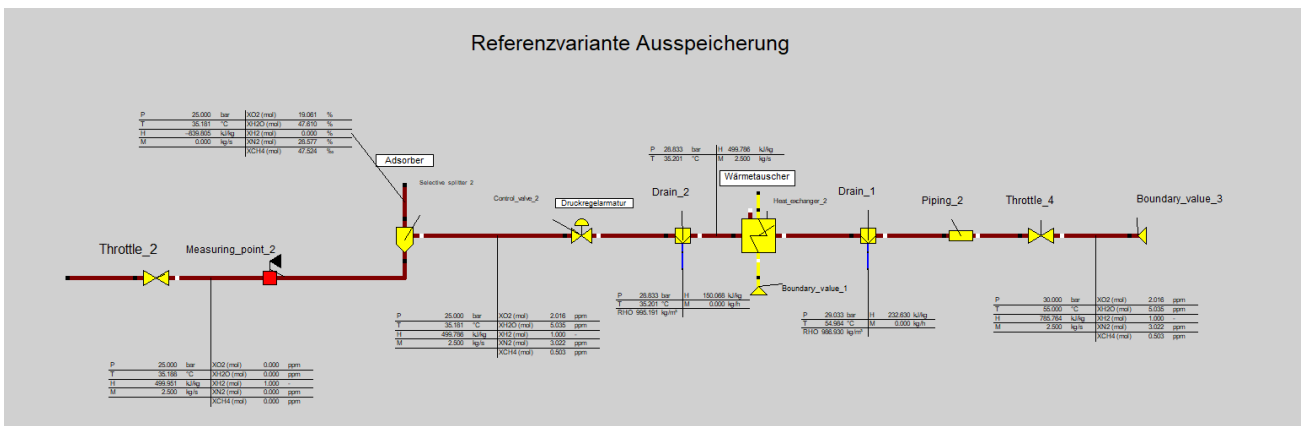


Abbildung 217: Referenzvariante – Ausspeicherung

8.3.4.3 Simulationsmatrix

Die Fallstudie wurde auf die Teilprozessbetrachtung der Ein- bzw. Ausspeicherung eingegrenzt, um die Anzahl der Parametervariationen einzuschränken. Eine Übersicht über die Wertebereiche der einzelnen Parameter ist in Tabelle 85 dargestellt. Die als Grundlage der Prozesssimulation verwendeten H₂-Spezifikationen sind in Tabelle 86 zusammengestellt und wurden teilweise in ihren Konzentrationen erhöht (CO₂, CO, Wassersättigung) bzw. um weitere Parameter ergänzt (H₂S, C_nH_m).

Die neue Fassung des DVGW Arbeitsblattes G 260 von September 2021 mit Definition der 5. Gasfamilie (wasserstoffreiche Gase) lag bei Durchführung der Arbeiten noch nicht vor und konnte daher nicht berücksichtigt werden. Die hier betrachtete Spezifikation nach DIN 17124 entspricht jedoch weitgehend der Gruppe D nach der Neufassung von G 260.

Tabelle 85: Übersicht zu den einzelnen variablen Größen als Grundlage der Variantenmatrix

		Startvariante			Referenzvariante				Maximalvariante			
Einspeicherung												
Zusammensetzung*	vol.%	100 % H2 + H2O gesättigt		99% H2+ 1% O2 + H2O gesättigt	5.0	DIN	DIN + 100ppm CO2 + 200ppm CO + H2Ogesättigt		5.0	DIN	DIN + 100ppm CO2 + 200ppm CO + H2Ogesättigt	
Druck Zuleitung	bar	30	100		25	30			25	30		
Temp. Zuleitung	°C	10	80		10				10			
Volumenstrom	m³/h	800	2000		50.000	100000			50.000	1200000		
Druck KavKopf	bar	26	82		30	170			60	230		
Temp.Umgeb.	°C	0	32		0	32			0	32		
Ausspeicherung												
Zusammensetzung* Kopf	vol.%	100% H2 + 75% H2O-Sätt	H2 + 1% O2 + 75% H2O-Sätt.	H2 + 1% O2 + 75% H2O-Sätt. + H2S(100ppmv) + CnHm(20ppmv)	5.0	DIN	DIN + 100ppm CO2 + 200ppm CO + H2Ogesättigt + H2S(100ppmv) + CnHm(20ppmv)	DIN + 75% H2Ogesättigt	5.0	DIN	DIN + 100ppm CO2 + 200ppm CO + H2Ogesättigt + H2S(100ppmv) + CnHm(20ppmv)	DIN + 75% H2Ogesättigt
Druck KavKopf	bar	30	82	100	30	170			60	230		
Temp. KavKopf	°C	14	25		17	55			27	62		
Volumenstrom	m³/h	1000	5000	10000	50000	100000			50000		1.200.000	
Druck Ausleitung	bar	30	26		25	30			25	30		
Zusammensetzung Ausgang	vol.%	DIN			5.0	DIN			5.0	DIN		
Temp.Umgeb.	°C	0	32		0	32			0	32		
* DIN...DIN17124-Kraftstoff; 5.0...Linde Industriegas 5.0												

Tabelle 86: Wasserstoff – ausgewählte Spezifikationen (jeweilige Obergrenzen)

NebenkompONENTEN [ppm]	Linde-Industriegas 5.0	DIN17124-Kraftstoff	EIGA-Pipeline
H ₂ O	5	5	gesättigt
O ₂	2	5	10.000
CO ₂	0	2	100
CO	0	0,2	200
N ₂	3	300	1.000.000
KW	0,5	2+100 (Methan)	1.000.000
He		300	
Ar		300	
ges-Schwefel		0,004	
Formaldehyd		0,2	
Methansäure		0,2	
Ammoniak		0,1	
Halogenierte KW		0,05	
Schwebstoffe		1 mg/kg	

Insgesamt wurden 364 Simulationen durchgeführt (Tabelle 87).

Die komplette Variantenmatrix mit den einzelnen Parametern ist in der Anlage 10.3 enthalten.

Tabelle 87: Übersicht Anzahl der durchgeführten Simulationen

	Startvariante	Referenzvariante	Maximalvariante
Einspeicherung	32	48	48
Ausspeicherung	108	64	64
Summe	140	112	112

8.3.4.4 Beispielhafte Einzelergebnisse

Zur grafischen Auswertung der Ergebnisse wurden für jede Variante markante Prozessstufen identifiziert und diese anhand des jeweiligen Blockfließbildes veranschaulicht. Die nachfolgenden Abbildungen auch des Folgekapitels beziehen sich auf diese Prozessstufen.

Die Parameter Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie werden für die einzelnen Varianten nachfolgend beispielhaft vorgestellt.

Einspeicherung – Startvariante

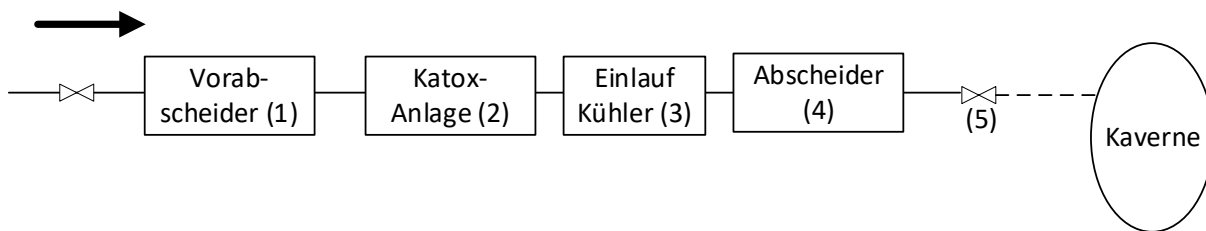


Abbildung 218: Vereinfachtes Blockfließbild für die Startvariante bei Einspeicherung

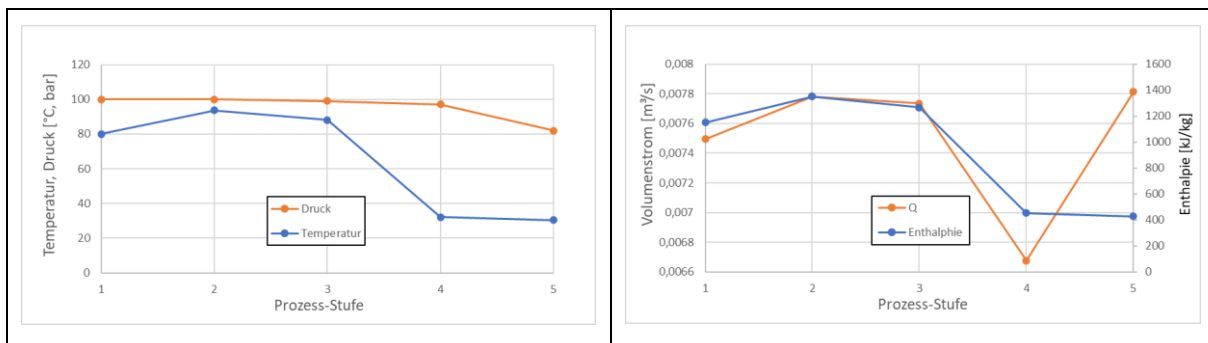


Abbildung 219: Einspeicherung Startvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie

Einspeicherung – Referenz- und Maximalvariante

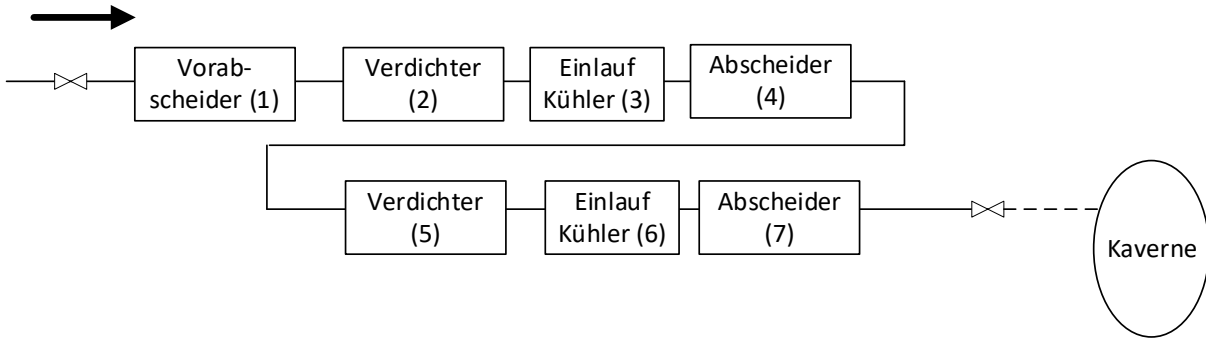


Abbildung 220: Vereinfachtes Blockfließbild für die Referenz- und Maximalvariante bei Einspeicherung

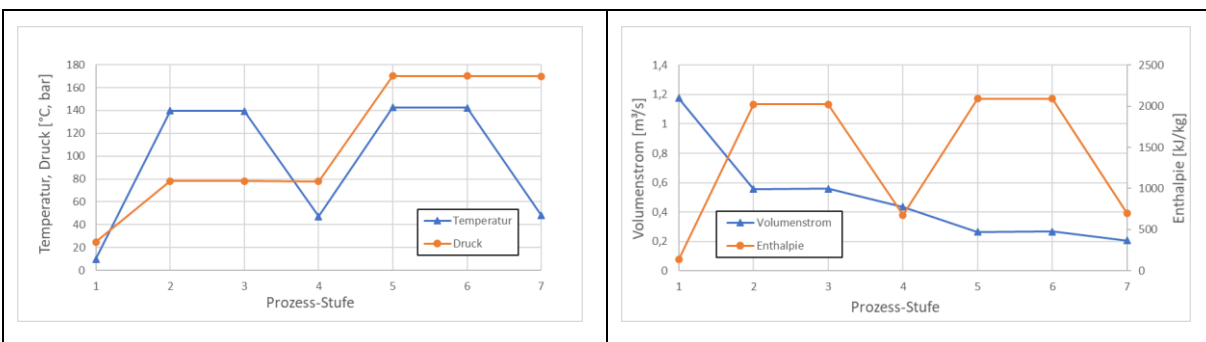


Abbildung 221: Einspeicherung Referenzvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie

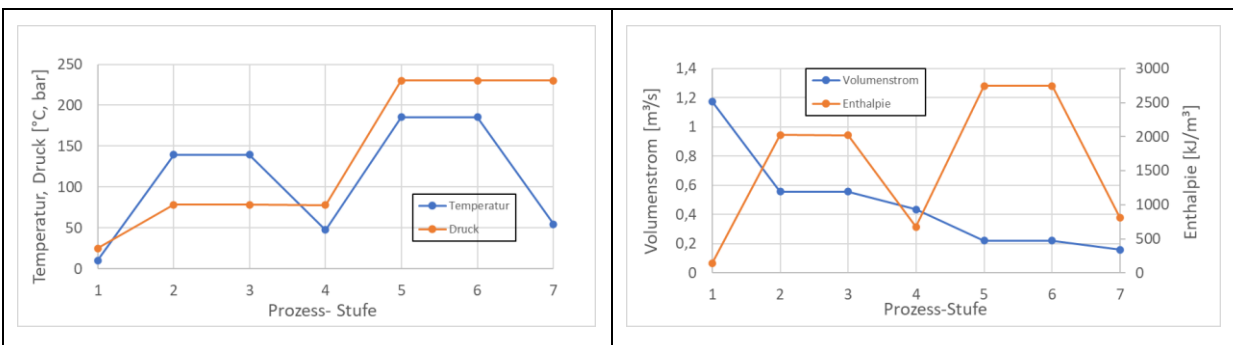


Abbildung 222: Einspeicherung Maximalvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie

Ausspeicherung – Start-, Referenz- und Maximalvariante

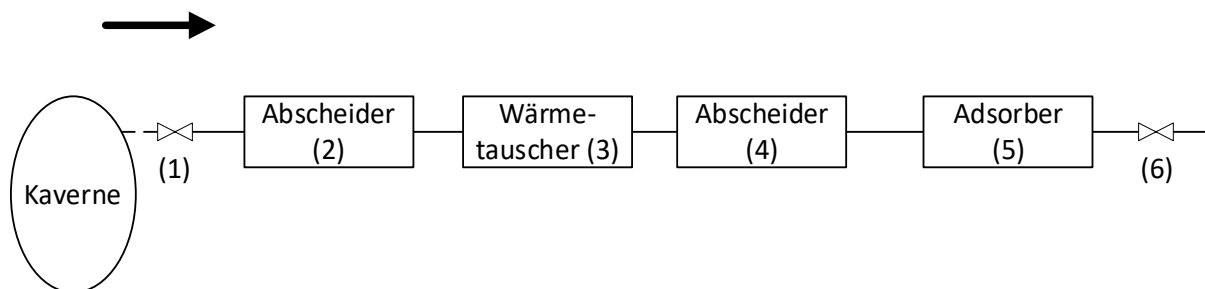


Abbildung 223: Vereinfachtes Blockfließbild für alle Varianten bei Ausspeicherung

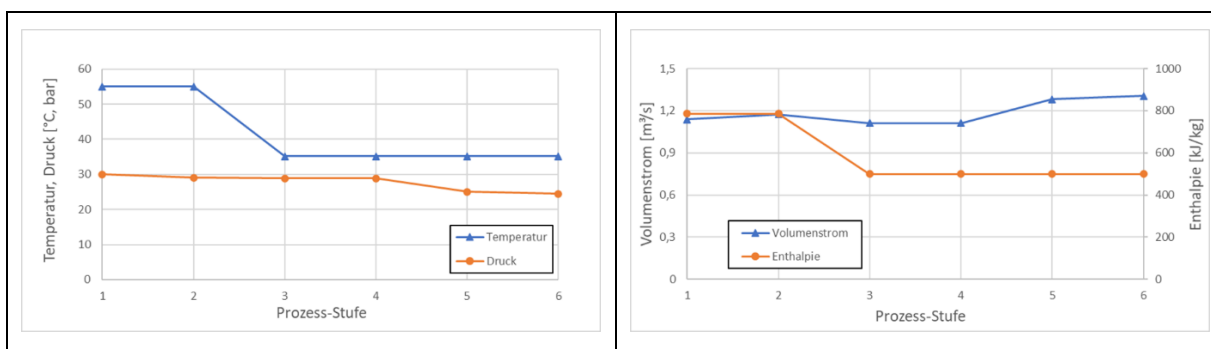


Abbildung 224: Ausspeicherung Startvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie

8.3.4.5 Übersicht Ergebnisse

Einspeicherung

Startvariante

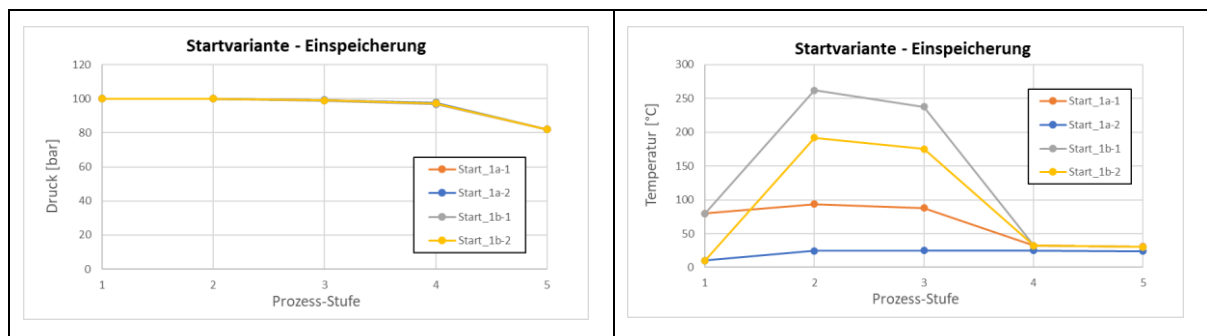


Abbildung 225: Vergleich Startvariante 1a-1 / 1a-2 / 1b-1 / 1b-2 (Einspeicherung)

In der Startvariante mit implementierter katalytischer Desoxidationsanlage (Katox) steigen bei den Varianten 1b-1 und 1b-2 aufgrund des Betriebes die Temperaturen entsprechend hoch an. In den Varianten 1a-1 und 1a-2 bleibt dieser starke Temperaturanstieg aus, die Katox-Anlage wird wesentlich geringer aktiviert. Aufgrund des einzigen Unterschiedes der jeweiligen Varianten 1a und 1b in der

Gaszusammensetzung kann auf die geringe Sauerstoffkonzentration (1 %), als Ursache der unterschiedlichen Temperaturverläufe rückgeschlossen werden. Dies unterstreicht somit die Relevanz dieser Sauerstoffkonzentration auf den Prozess der Einspeicherung.

Referenzvariante

Aus Abbildung 226 lässt sich für drei unterschiedliche Gasmische keine Änderung in den Druck- und Temperaturverläufen für die Referenzvariante feststellen. Dies gilt auch für die unterschiedlichen Druckbereiche 30/170 bar. Da in dieser Variante keine nennenswerten Sauerstoffanteile im Einspeichergas vorhanden sind und damit keine Desoxidationsstufe erforderlich ist, unterbleibt auch der in der Startvariante beobachtete starke Temperaturanstieg.

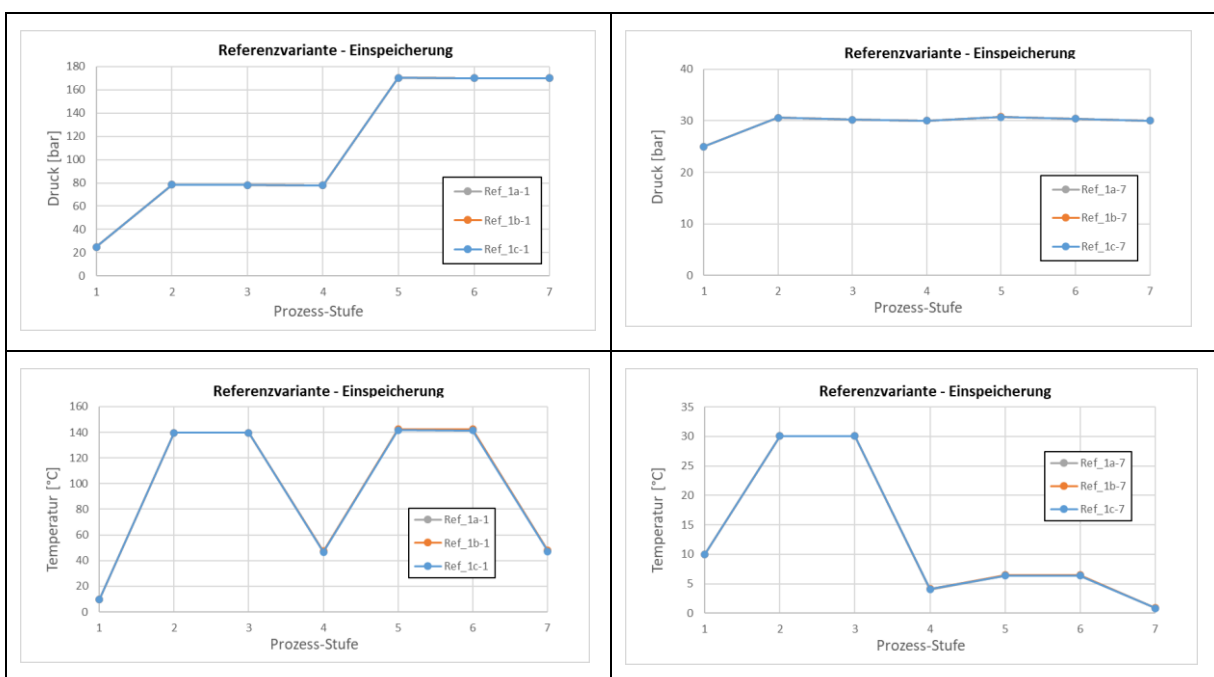


Abbildung 226: Vergleich Referenzvariante 1a-1 / 1b-1 / 1c-1 mit 1a-7 / 1b-7 / 1c-7 (Einspeicherung)

Maximalvariante

Die unterschiedlichen Gasmische mit den gleichen Verläufen zwischen Variante 1a/1b und 1c stimmen mit den Beobachtungen bei der Referenzvariante überein (keinen relevanten Einfluss auf p- und T-Verläufe).

Aus den unterschiedlichen Volumenströmen 100.000 m³/h (1a-1) und 50.000 m³/h (1a-2), unterschiedlichen Umgebungstemperaturen 32 °C (1a-1 / 1a-2) bzw. 0 °C (1a-3 / 1a-4) und unterschiedlichen Zielkopfdriicken 230 bar (1a-1 bis 1a-4) bzw. 60 bar (1a-5 bis 1a-8) resultieren unterschiedliche Temperaturverläufe in Abbildung 227. Dies ist gleichartig für die anderen Gasmische (1b-x und 1c-x) zu erkennen.

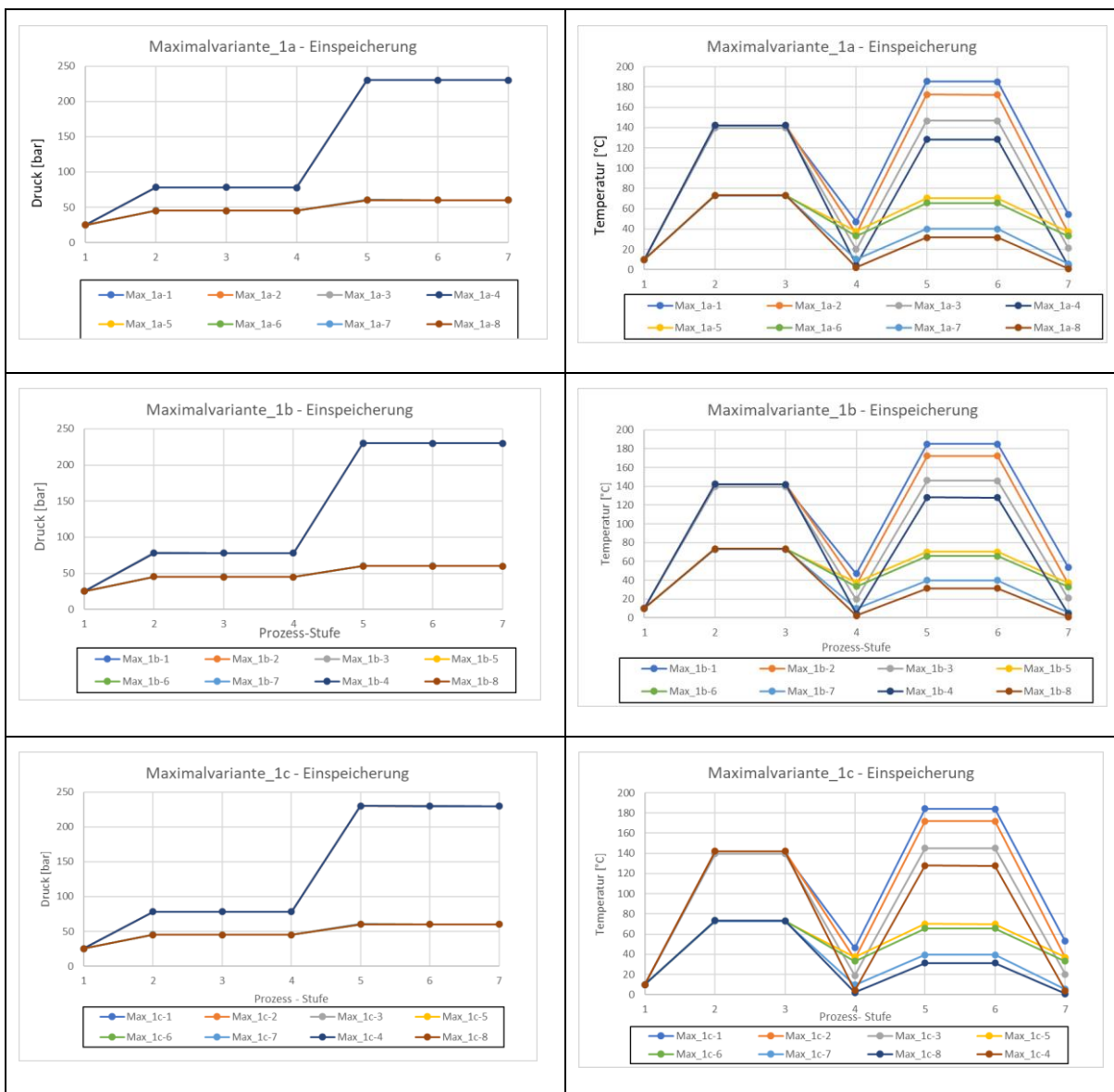


Abbildung 227: Vergleich Maximalvariante 1a-1 bis -8 / 1b-1 bis -8 / 1c-1 bis -8 (Einspeicherung)

Ausspeicherung

Startvariante

Ausgehend von den unterschiedlichen Ausgangsdrücken der Kaverne resultieren die unterschiedlichen Druckverläufe. Dabei scheinen die Gasbeimischungen (Variante 1c- mit 1 % Sauerstoff, 100 ppm Schwefelwasserstoff und 20 ppm C_nH_m) gegenüber dem fast wassergesättigten (75 %) Wasserstoff (Variante 1a-) keinen signifikanten Unterschied darzustellen.

Für die Temperaturverläufe können nahezu äquivalente Aussagen getroffen werden.

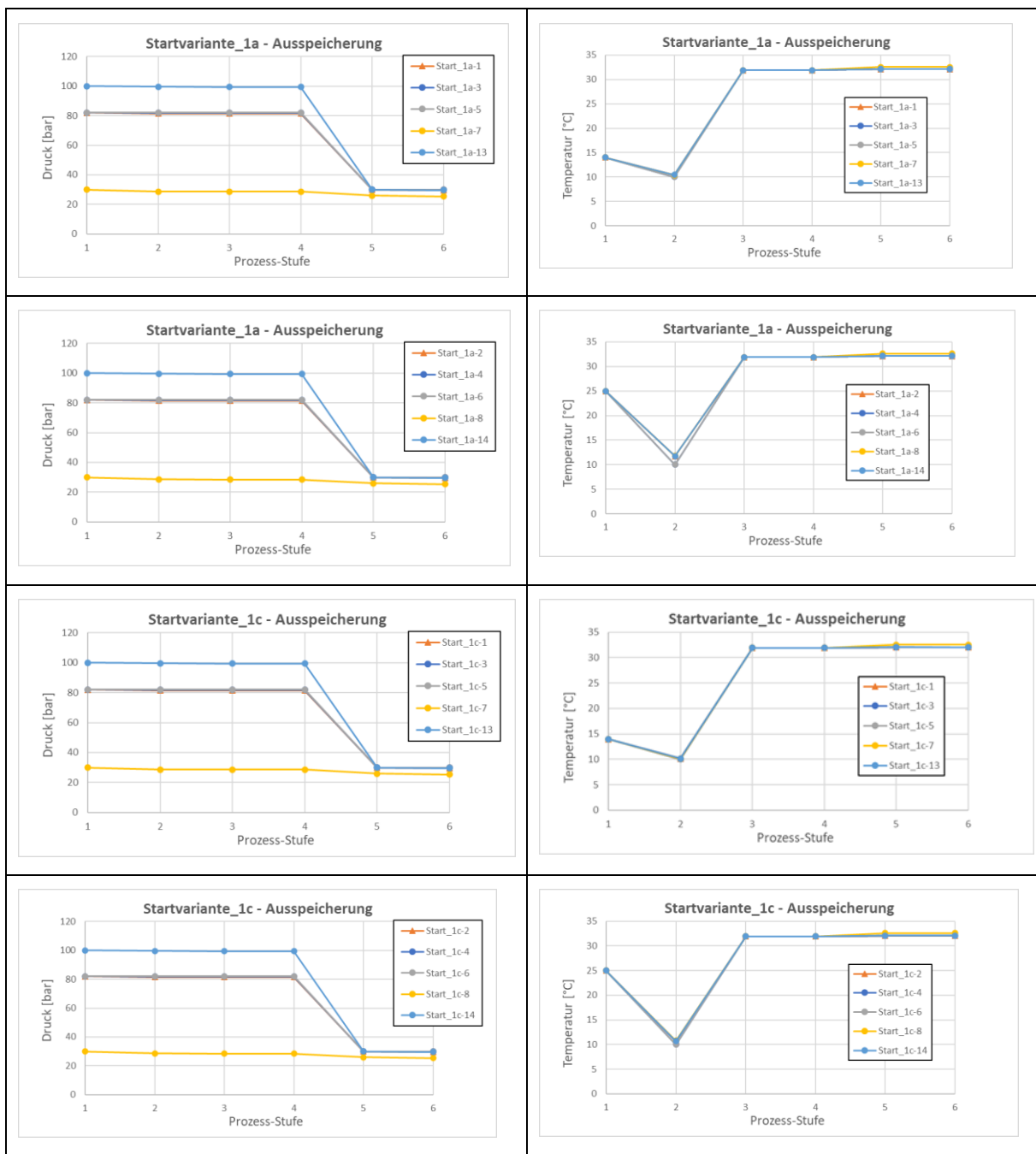


Abbildung 228 Vergleich Startvariante 1a- bzw. 1c -1 bis -8 und -13, -14 (Ausspeicherung)

Referenzvariante

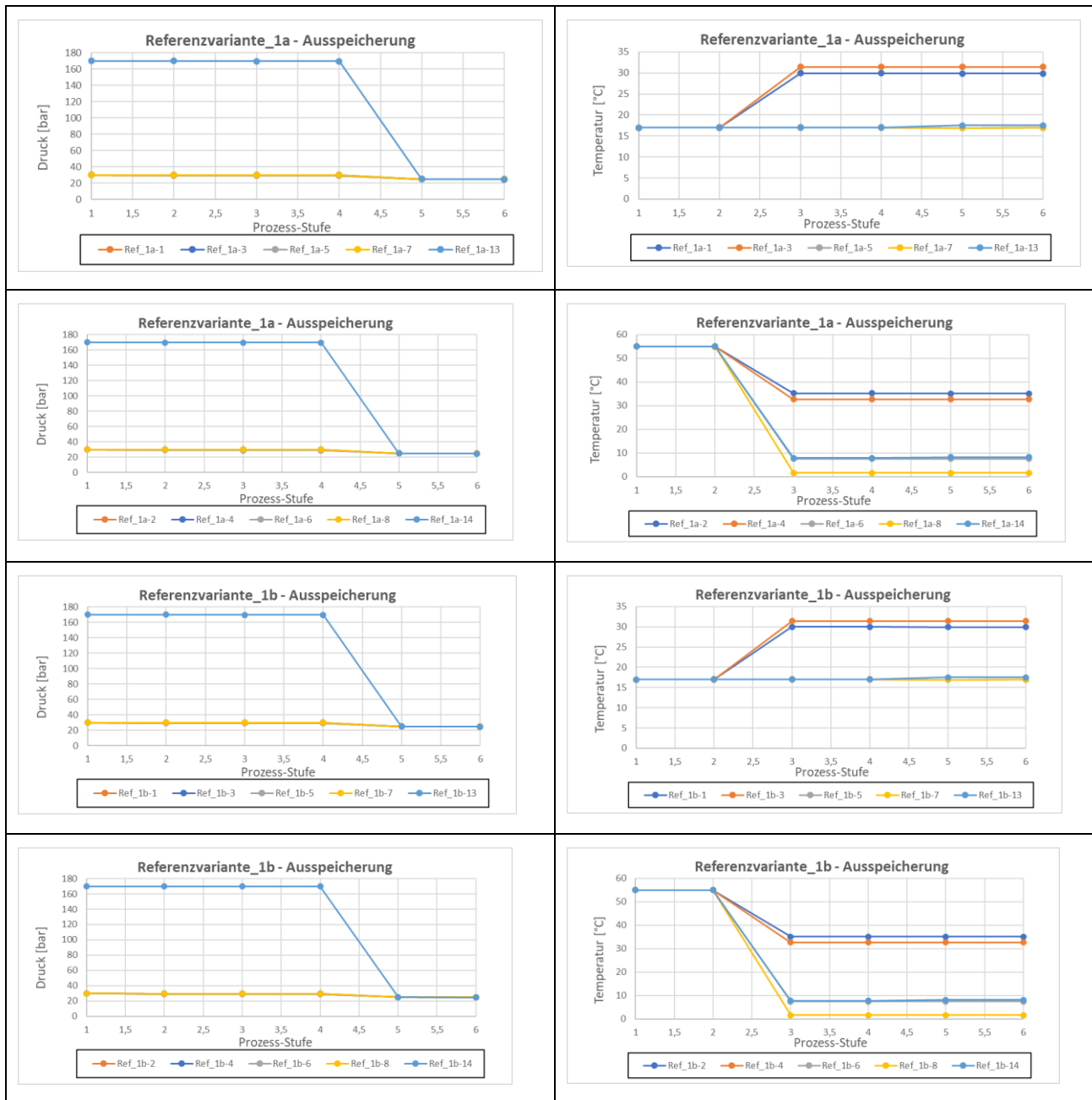


Abbildung 229: Vergleich Referenzvariante 1a- und 1b – 1 bis 7 und 14 (Ausspeicherung)

In der Referenzvariante sind in der Abbildung 229 gleiche Druckverläufe für die Varianten 1a-x und 1b-x zu erkennen. Die Änderungen in den Temperaturkurven resultieren aus den Variationen der Parameter in den Varianten (Prozessstufe 3) und ändern sich bis zum Prozessende kaum noch.

Maximalvariante



Abbildung 230: Vergleich Maximalvariante 1a-, 1b- und 1c – 1 bis 6 (Ausspeicherung)

In der Maximalvariante sind in der Abbildung 230 gleiche Druckverläufe für die Varianten 1a-, 1b- und 1c – 1 bis 6 zu erkennen. Auch hier wird wieder die Aussage des geringen Einflusses der genutzten unterschiedlichen Gasqualitäten unterstrichen. Die Änderungen in den Temperaturkurven resultieren wiederum aus den Einstellungen des Wärmetauschers (Prozessstufe 3) und ändern sich bis zum Prozessende kaum noch.

Fazit

Die modelltechnische Beschreibung der OTA, gegliedert in Einspeicherungs- und Ausspeicherungsstrang, wurde erfolgreich mit dem Simulationstool Epsilon realisiert.

Drei verschiedene Varianten im Aufbau der OTA (Start-, Referenz- und Maximalvariante) konnten nachgebildet werden.

Druck- und Temperaturverläufe konnten für den Gesamtprozess und jede Anlagenkomponente abgebildet werden.

Temperatur- und Druckabhängigkeit waren nicht signifikant von den verwendeten unterschiedlichen Gaskonzentrationen abhängig.

Die Sauerstoffentfernung durch Katox-Anlage (Startvariante) verursacht hohe Temperaturen, welche bei der Auslegung für den Bereich vor dem Kühler berücksichtigt werden müssen.

8.3.5 Sicherheitsbetrachtungen zum Anlagenbetrieb (Normalbetrieb, Dennoch-Störfälle)

8.3.5.1 Sicherheitsrelevante Eigenschaften des Wasserstoffs und technische Grundlagen

Wasserstoff wird seit über 100 Jahren in der chemischen Industrie verwendet. In diesem Bereich existieren fundierte Sicherheitserfahrungen im Umgang mit Wasserstoff. Zusätzlich bestehen seit langem Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff als einem wesentlichen Bestandteil (ca. 50 Vol.-%) von Stadtgas. Sicherheitstechnische Grundlagen für die Anwendung von Wasserstoff finden sich in verschiedenen Lehrbüchern und Berichten (Töpler & Lehmann, 2014), (Godula-Jopek, Jehrle, & Wellnitz, 2012), (Wurster & Schmidtchen, 2011).

Um die sicherheitsrelevanten Anforderungen an die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff im Untergrund im industriellen Maßstab genauer beurteilen zu können, erscheint es sinnvoll, die wesentlichen Gefahrenmerkmale von Wasserstoff genauer zu betrachten. Als Grundlage für diese Betrachtung bietet sich ein Vergleich der Stoffeigenschaften und sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Wasserstoff und Methan an. Methan ist Hauptbestandteil von Erdgas, welches flächendeckend als Energierohstoff eingesetzt, in Pipelinenetzen transportiert und im Untergrund gespeichert wird.

Für den Bau und Betrieb von Erdgasspeichern existiert ein umfangreiches Normen- und Regelwerk, in das auch sicherheitsrelevante Betrachtungen integriert sind.

Gefahrenmerkmale von Wasserstoff

Das Gefährdungspotenzial von Wasserstoff geht einerseits auf seine Brennbarkeit und der damit in Verbindung stehenden Explosionsfähigkeit in Gemischen mit oxidierenden Gasen (Schröder, 2019) und andererseits auf die geringe Molekülgröße sowie die geringe Dichte zurück (Tabelle 88).

Darüber hinaus besteht in den meisten Anwendungsfällen ein Gefahrenpotenzial durch den hohen Gasdruck in den betreffenden Anlagen, was jedoch kein spezifisches Merkmal des Wasserstoffs ist und bereits durch die betreffenden Regelwerke (z. B. Druckgeräterichtlinie) abgedeckt ist.

Tabelle 88: Stoffeigenschaften und sicherheitsrelevante Parameter (IFA, 2021) von Wasserstoff und Methan

	Einheit	Wasserstoff	Methan
CAS Nr.		1333-74-0	74-82-8
Molmasse	[kg/mol]	0,002016	0,016043
Gasdichte Normalzustand	[kg/m ³]	0,090	0,718
Gasdichte 200 bar	[kg/m ³]	17,98	180,37
Heizwert Gas	[kJ/l]	10,8	35,9
Wobbe-Index	[MJ/m ³]	48,34	53,45
Joule-Thomsen Koeffizient μ (Unternehmensberatung Babel, 2021)	[K/bar]	-0,024	0,41
Eigenschaften		Farblos, geruchlos	Farblos, geruchlos
Zündtemperatur	[°C]	560	595
Mindestzündenergie (BG RCI, 2016)	[mJ]	0,016	0,28
Untere Explosionsgrenze (Gemisch mit Luft)	[Vol.-%]	4,0	4,4
stöchiometrisches Gemisch	[Vol.-%]	29,6	9,5
Obere Explosionsgrenze (Gemisch mit Luft)	[Vol.-%]	77,0	17,0
Maximaler Explosionsdruck	[bar]	8,3	8,1
Explosionsgruppe nach IEC 60079-0 (BG RCI, 2016)		IIC	IIA
Temperaturklasse		T1	T1

Aus physiologischer Sicht ist Wasserstoff völlig unbedenklich. Wasserstoff ist nicht giftig hat keine anderen schädlichen Wirkungen (ätzend, krebserregend, fruchtschädigend). Lediglich bei Verdrängung von Sauerstoff aus der Atemluft kann es zu Atemproblemen kommen. Beeinträchtigungen der Umwelt bei unkontrolliertem Freisetzen von Wasserstoff sind nicht zu erwarten.

In Bezug auf die relevanten Prozesse der Unterspeicherung von Wasserstoff (Verdichtung, Entspannung, Abscheidung von Verunreinigungen) sind als wesentliche Gefahrenmerkmale die Brennbarkeit/Explosivität sowie die auf die geringe Molekülgröße zurückzuführenden Eigenschaften wie geringe Dichte, geringe Viskosität, hohe Diffusion näher zu betrachten (Abbildung 231).

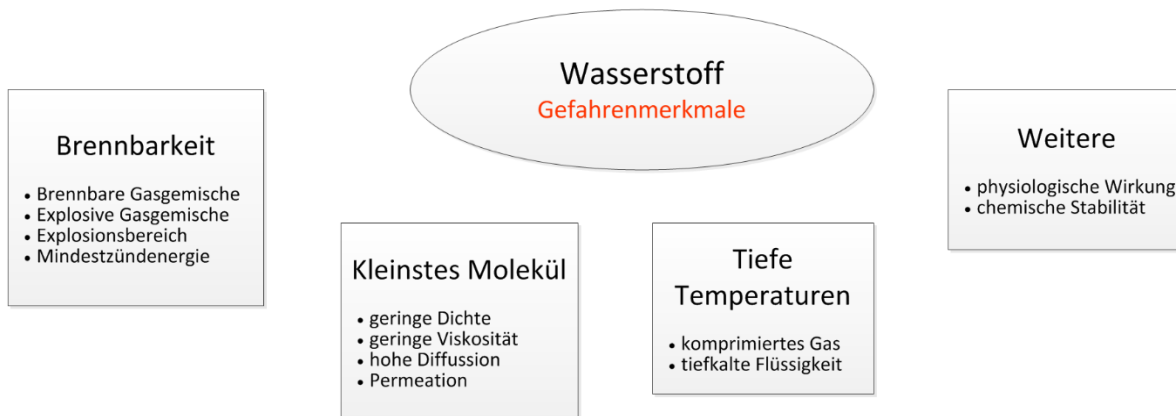


Abbildung 231: Gefahrenmerkmale von Wasserstoff (Töpler & Lehmann, 2014)

8.3.5.2 Explosionsschutz in technischen Anlagen und Unterspeichern

Die Obertageanlage (OTA) eines H₂-Speichers wird sich technisch stark an den Anlagen bereits über Jahrzehnte in Betrieb befindlicher UGS für Erdgas und andere Fluide orientieren. Da Wasserstoffmoleküle im Vergleich zu Molekülen anderer Gase sehr klein sind, ergeben sich u. U. besondere Anforderungen an die Dichtheit von Baugruppen und den dafür gewählten Materialien. Aufgrund des sehr breiten Explosionsbereiches von Wasserstoff-Luft-Gemischen kommt der Gewährleistung des Explosionsschutzes der Anlage sehr große Aufmerksamkeit zu.

Wegen der physiologischen Unbedenklichkeit von Wasserstoff muss dieses Gefahrenmerkmal nicht gesondert betrachtet werden.

Explosionsschutz

Wasserstoff bildet bei der Vermischung mit Luft ein explosionsfähiges Gasgemisch. Deshalb ist bei der Verarbeitung und dem Transport von Wasserstoff für einen umfassenden Explosionsschutz zu sorgen.

Die Festlegung von Explosionsschutzzonen für Gase bzw. Gasgemische erfolgt nach DGUV Regel 113-001 (BG RCI, 2021). Die Zuordnung eines Anlagenbereiches zu einer Explosionsschutzzone hängt von der Häufigkeit und der Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre ab. Diese Einteilung dient als Grundlage für die Festlegung von Maßnahmen, insbesondere zur Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre (BAuA, 2021).

Zone 0 Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist. (Bemerkung: Der Begriff „häufig“ ist im Sinne von „zeitlich überwiegend“ zu verwenden).

- Zone 1** Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden.
- Zone 3** Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt. (Bemerkung: Dies ist gleichbedeutend damit, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphäre nur selten und auch nur kurzzeitig auftritt).

Maßnahmen zum Explosionsschutz werden wiederum in drei Kategorien eingeteilt:

Primärer Explosionsschutz

Der primäre Explosionsschutz beinhaltet in erster Linie die Vermeidung der Entstehung explosionsfähiger Gasgemische. Hierunter fallen alle Maßnahmen, die den ungeplanten Austritt von Gasen (hier: Wasserstoff) aus Rohrleitungen und Behältern verhindern sowie entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten, z. B.:

- regelmäßige Kontrolle der Anlagen,
- planmäßiger Austausch von Dichtungen,
- Verwendung von entsprechend gasdichten Materialien (bei Wasserstoff z. B. metallische Dichtungen, Aluminium-Liner),
- Erkennung von Gasaustritten/(automatisches) Unterbinden der Gaszufuhr,
- Überwachung mit Hilfe von Gasspürsensoren,
- Einsatz von Gaswarnanlagen,
- Belüftung gefährdeter Bereiche bei Gasaustritt (Berücksichtigung des dichtebedingten Auftriebs bei Wasserstoff),
- Einsatz von Rekombinatoren (katalytisch) zur kontrollierten Verringerung des Brenngasanteils vor Erreichen der Zündgrenze,
- regelmäßige Belüftung zur Verhinderung der Entstehung von zünd- bzw. explosionsfähigen Gasgemischen (untere Zünd- bzw. Explosionsgrenze).

Sekundärer Explosionsschutz

Der sekundäre Explosionsschutz umfasst alle Maßnahmen, die die Zündung eines explosionsfähigen Gasgemisches verhindern. Dazu zählen:

- die Vermeidung von Zündquellen (elektrostatische Funken, heiße Oberflächen, mechanische Funken),
- Vermeidung elektrischer Komponenten bzw. Ersatz durch nicht elektrische Komponenten (z. B. pneumatische Ventile),
- Einsatz explosionsgeschützter Betriebsmittel,
- Verhinderung von chemischen Reaktionen, die zur Zündung führen können.

Die Selbstentzündung von mit hoher Geschwindigkeit ausströmendem Wasserstoff, z. B. bei Leckagen ist möglich und wurde in der Realität auch beobachtet (Gummer & Hawksworth, 2008).

Ursächlich liegen dabei folgende Effekte bzw. Mechanismen zugrunde:

- umgekehrter Joule-Thomson-Effekt (Erwärmung bei Expansion),
- elektrostatische Zündung (Funken-, Büschel- und Korona-Entladungen), insbesondere in Verbindung mit der geringen Mindestzündenergie/Zündspannung von Wasserstoff,
- Diffusionszündung,
- plötzliche adiabatische Kompression,
- Zündung an heißen Oberflächen.

Beobachtete Selbstentzündungen von Wasserstoff-Luft-Gemischen sind jedoch häufig nicht eindeutig einer Ursache zuzuordnen. Einzelnen Phänomene liefern keinen ausreichenden Beitrag für eine Selbstentzündung. So liefert z. B. der umgekehrte Joule-Thomson-Effekt bei der Expansion von Wasserstoff (50 MPa) lediglich eine Temperaturerhöhung von 9–18 K. Deshalb wird vermutet, dass sich einzelne Effekte überlagern. Insbesondere elektrostatische Phänomene, die zu einer Selbstentzündung von austretendem Wasserstoff führen, sind noch nicht ausreichend untersucht.

Tertiärer Explosionsschutz

Beim tertiären (konstruktiven) Explosionsschutz liegt das Augenmerk auf der Bauweise von Räumen und Gebäuden. Hierbei geht es im Grunde darum, nicht die Explosion selbst zu verhindern, sondern die Folgen der Explosion durch die Bauart der betreffenden Gebäude zu verringern.

Dies ist u. a. zu gewährleisten durch:

- die Verwendung von Bauteilen (Türen, Fenster, Wandsegmente), die bei Druckerhöhung öffnen bzw. herausfallen (Explosionsdruckentlastung),
- explosionsfeste Bauweise und Verhinderung der Explosionsübertragung (Flammendurchschlagssicherung),
- Explosionsunterdrückung (z. B. durch (automatisiertes) Einblasen von Löschmittel).

Eine Übersicht der sicherheitstechnisch besonders relevanten Vorschriften und Regelwerke ist in Anlage 10.2 aufgeführt.

8.3.5.3 Risiken beim Betrieb eines Wasserstoff-Untergroundspeichers

Im Folgenden sind die wesentlichen Risiken und sicherheitstechnischen Aspekte für einen H₂-UGS zusammengefasst und qualitativ eingeordnet.

Dichte des Wasserstoffs

Wasserstoff weist bei gegebenen Umgebungsbedingungen die geringste Dichte aller Gase auf. In Gebäuden und abgeschlossenen Bereichen kann es daher bei Freisetzung von Wasserstoff zu einer Ansammlung im oberen Bereich kommen. Das Entstehen von zündfähigen Gemischen kann daher grundsätzlich durch den Einsatz von katalytischen Rekombinatoren reduziert werden. Dieser Aspekt ist insbesondere bei der Auslegung von Gebäuden und Einhausungen zu beachten.

Im Freien strömt freigesetzter Wasserstoff zügig nach oben. Dieser Aspekt kommt vor allem bei den Auswirkungsbetrachtungen von Dennoch-Störfällen zum Tragen.

Viskosität und Diffusivität des Wasserstoffs

Wasserstoff ist sehr diffusionsfreudig in verschiedensten Medien/Materialien, was bei der Materialauswahl berücksichtigt werden muss. Weiterhin strömt Wasserstoff aufgrund seiner geringen Viskosität bereits durch kleine Undichtheiten mit größerer Rate als die meisten anderen Gase. Das Risiko zur Freisetzung einer bestimmten Menge Wasserstoff ist daher gegenüber anderen Gasen erhöht. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen (Flanschdesign, etc.) kann dieses Risiko zum Teil reduziert werden.

Wechselwirkung mit metallischen Werkstoffen

Relevante Wechselwirkungsmechanismen sind in Kapitel 3.2 dargestellt. Grundsätzlich stehen geeignete Werkstoffe für H₂-Anwendungen zur Verfügung. Inwieweit diese in einer konkreten Anwendung auch eingesetzt werden (können), ist im Einzelfall zu bewerten. Bestehende Hürden bezüglich fehlender Zertifizierung für bestimmte Einsatzfälle werden seitens der Hersteller nach und nach behoben. Es sollte dennoch verstärktes Augenmerk auf die Vermeidung von Planungsfehlern gelegt werden.

Wechselwirkung mit Elastomeren

Es ist bekannt, dass Wasserstoff bei Elastomeren zu Schädigungen, insbesondere bei schneller Entspannung (Blasenbildung), führen kann. In der Planungsphase ist auf eine genaue Spezifizierung der eingesetzten Elastomere zu achten. Gegebenenfalls sind Einschränkungen insbesondere bei der Druckabsenkungsgeschwindigkeit in verschiedenen Anlagenteilen hinzunehmen.

Joule-Thomson-Effekt

Der negative Joule-Thomson-Koeffizient des Wasserstoffs wird vereinzelt als Sicherheitsrisiko genannt. Dies erscheint bei genauerer Betrachtung jedoch nur schwer nachvollziehbar, da die hierdurch erreichbare Temperaturerhöhung in der Untertagespeicherung bei nur wenigen Kelvin liegt. Darüber hinaus tritt dieser Effekt nur bei isenthalper Entspannung auf (z. B. Rohrströmung oder Drosselventil). Bei einer Leckage trifft dies nur bedingt zu, da hier signifikante Anteile des Ausgangsdrucks isentrop entspannt werden und der Leckagestrom kinetische Energie aufbaut.

Hydratbildung

Eine Bildung von Wasserstoffhydraten ist unter technisch relevanten Bedingungen nahezu ausgeschlossen. Lediglich Verunreinigungen durch Kohlenwasserstoffe oder andere Begleitbestandteile können zur Bildung kleinerer Hydratmengen führen. Damit entfällt die bei Erdgas übliche Inhibierung.

Bildung von Schwefelwasserstoff

Es ist davon auszugehen, dass Schwefelwasserstoff nicht im Einspeichergas enthalten ist und nur im ungünstigen Fall in der Kaverne erzeugt wird und ins Speichergas übergeht. Die Möglichkeiten für eine derartige Kontamination wurden in Kapitel 5 untersucht. Eine Kontamination kann nach aktuellem Stand nicht generell ausgeschlossen werden, sondern muss im Einzelfall neu bewertet werden. Die Eignung der Bohrung und der Prozessanlagen für die erwartete Gasqualität ist durch eine entsprechende Materialauswahl und ein entsprechendes Anlagendesign sicherzustellen.

Zündverhalten

Wasserstoff weist einen sehr weiten Zündbereich und eine geringe Zündenergie auf. Aus diesem Grund ist bei Freisetzung von Wasserstoff von einem höheren Risiko für ein Zünden des Gasgemischs auszugehen. Gleichzeitig ist jedoch der Energieinhalt eines gegebenen Leckagevolumens bei Wasserstoff geringer als bei Erdgas. Im Fall einer Zündung sind die Auswirkungen bei Wasserstoff und Erdgas annähernd vergleichbar, was sich beispielsweise in den ähnlichen Explosionsdrücken (Tabelle 88) oder ähnlichen Sicherheitskreisen (Krause, 2020) äußert.

8.3.5.4 Sicherheitsbetrachtungen und Ableitung von Maßnahmen

Notwendigkeit

Der Betrieb eines UGS (hier: der OTA) ist hinsichtlich der verwendeten technischen Anlagen und sicherheitstechnischen Regeln bei Erdgas und bei Wasserstoff nahezu identisch, wenn man sich der Besonderheiten der jeweiligen stofflichen Besonderheiten der zu speichernden Gase bewusst ist.

Betreiber von Anlagen, die der Störfallverordnung unterliegen, haben besondere Verpflichtungen für die Vermeidung von Vorkommnissen gemäß dieser Verordnung (12. BImSchV):

„(1) Der Betreiber hat die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderlichen Vorkehrungen zu treffen, um Störfälle zu verhindern; ...

(2) Bei der Erfüllung der Pflicht nach Absatz 1 sind

1. betriebliche Gefahrenquellen,
2. umgebungsbedingte Gefahrenquellen, wie Erdbeben oder Hochwasser, und
3. Eingriffe Unbefugter

zu berücksichtigen, es sei denn, dass diese Gefahrenquellen oder Eingriffe als Störfallursachen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können.

(3) Über Absatz 1 hinaus sind vorbeugend Maßnahmen zu treffen, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten.

(4) Die Beschaffenheit und der Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs müssen dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen.“

Der Betreiber von Speicheranlagen, die der Störfallverordnung unterliegen, muss einen Sicherheitsbericht erstellen, in dem u. a. folgende Punkte erfasst sind:

- ein Konzept zur Verhinderung von Störfällen,
- ein Sicherheitsmanagementsystem,
- Ermittlung der Gefahren von Störfällen und mögliche Störfallszenarien,
- alle erforderlichen Maßnahmen zur Verhinderung derartiger Störfälle und zur Begrenzung ihrer Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt,
- die Auslegung, die Errichtung sowie der Betrieb und die Wartung sämtlicher Teile eines Betriebsbereichs, die im Zusammenhang mit der Gefahr von Störfällen im Betriebsbereich stehen,
- interne Alarm- und Gefahrenabwehrpläne,
- erforderliche Informationen zur Erstellung externer Alarm- und Gefahrenabwehrpläne,
- ausreichende Informationen für die zuständige Behörde für Entscheidungen über die Ansiedlung neuer Tätigkeiten oder Entwicklungen in der Nachbarschaft.

Verfahrensweise

Im Verbundvorhaben H₂-UGS erfolgt deshalb die Identifikation von Risiken beim Betrieb eines H₂-Speichers anhand des erarbeiteten Prozessdesigns, der Vergleich mit Erdgasspeicherung und Sicherheitsbetrachtungen zum Anlagenbetrieb für Normalbetrieb und Dennoch-Störfälle. Hierzu bedient man sich allgemein der Methoden HAZOP bzw. PAAG.

Es wird also eine HAZOP-Studie (Hazard and Operability) durchgeführt. In Deutschland ist diese auch als PAAG-Verfahren bekannt. Hierfür existiert die Norm HAZOP-Verfahren (DIN EN 61882).

PAAG steht für:

- **P**rognose (systematische Suche möglicher Abweichungen und Störungen),
- **A**uffinden der Ursachen (Ermitteln der Ursachen innerhalb des untersuchten Systems),
- **A**bschätzen der Auswirkungen (Ermitteln der logischen Folgen der Abweichung),
- **G**egenmaßnahmen (Bewerten vorhandener Maßnahmen und Entscheidung über angemessene weitere Gegenmaßnahmen).

Diese Verfahren werden als ein methodisches, gelenktes Brainstorming in einer Gruppe von Experten verschiedener Fachrichtungen durchgeführt.

Identifikation von Risiken

Im Rahmen der Arbeiten im Verbundvorhaben H₂-UGS wurde für die konzipierte OTA (Referenzvariante) ein „Mini-HAZOP“ in Anlehnung an die gültigen Regelwerke, jedoch auf der Basis einer minimalistischen Planungstiefe, durchgeführt.

Hierzu wurde die technologische Anlage entsprechend der Darstellung im Rohrleitungs- und Instrumentierungs-Diagramm in einzelne Blöcke/technologische Einheiten untergliedert, z. B.:

- Eingangsfilter,
- Gasmengenmessung,
- Verdichter/-bypass
- Feldleitung,
- pTQ-Regler,
- Entschweflung,
- Gastrocknung.

Für diese Einzelkomponenten wurden wiederum mögliche Gefahrenpotenziale/Störungen betrachtet und diese hinsichtlich Ursache, Auswirkung und Gegenmaßnahmen beurteilt:

- Drucküber-/unterschreitung,
- Temperaturüber-/unterschreitung,
- Durchflussüber-/unterschreitung,
- Füllstand zu hoch/zu tief,
- abweichende Zusammensetzung,
- Schwingungen und Wechselbeanspruchung,
- falsche Flussrichtung,
- Spannungen,
- Korrosion (von außen nach innen),

- Erosion,
- Undichtheit nach innen (Apparate, Armaturen, etc.),
- Undichtheit nach außen,
- Ausfall von Energien (Luft, Strom, Wärme, Kälte, etc.),
- Bedienungsfehler,
- Witterung/Frost/Sturm/Hochwasser,
- Fremdeinwirkungen durch Vorsatz,
- äußere Einwirkungen durch Umwelt und Dritte,
- Wechselwirkungen im Störfall.

Diese wurden hinsichtlich Ursache, Auswirkung und Gegenmaßnahmen beurteilt. Dabei sind auch (soweit vorhanden) die Unterschiede zu Erdgasspeichern herausgearbeitet worden. Die Ergebnisse sind tabellarisch in Anlage 10.4 zusammengefasst enthalten. Folgende Unterschiede zu einem Erdgasspeicher sollten beachtet werden:

- Da Wasserstoff unter Speicherbedingungen eine etwa halb so große Wärmekapazität aufweist wie Erdgas, reagiert es entsprechend stärker auf einen festen Wärmeeintrag. Dies kann sich insbesondere bei geschlossenen Armaturen bemerkbar machen.
- Die Dichte und Schallgeschwindigkeit von Wasserstoff unterscheiden sich erheblich von Erdgas, was einen Einfluss auf das Ausbilden von Schwingungen in Bauteilen haben kann.
- Bei Eintrag oder Entfernen von Gasnebenkomponenten (z. B. Wasserdampf, Kohlenwasserstoffe, Stickstoff, Kohlendioxid, Sauerstoff, etc.) erfährt ein H₂-Strom eine stärkere relative Änderung seiner Eigenschaften als ein Erdgasstrom. Dies kann das Regelverhalten entsprechender Anlagenteile (z. B. Verdichter mit Zwischenkühlung und Kondensatausschleusung) beeinflussen und muss auslegungsseitig berücksichtigt werden.
- Das Potenzial für eine Bildung von Schwefelwasserstoff in der Kaverne kann Auswirkungen auf die nachgelagerten Anlagen haben und sollte individuell bewertet werden.

Die wesentlichen Ergebnisse der Risikoanalyse und -bewertung für die zugrunde liegende Referenzvariante lassen sich inhaltlich auch auf die Start- und Maximalvariante übertragen.

Lediglich bei technologischen Abweichungen in der Konfiguration des Ein- und Ausspeicher-Stranges (z. B. andere Reinigungsverfahren) sollte die hier verwendete HAZOP-basierte Bewertung wiederholt bzw. angepasst werden.

Besondere Sicherheitsmaßnahmen bei Wasserstoff

Stofflich bedingte Abweichungen beim H₂-Speicher lassen sich gegenüber Erdgasspeichern in wenigen Punkten charakterisieren.

Die Sicherheitstechnische Maßnahmen entsprechen qualitativ weitgehend denen der Erdgasspeicherung (Feyrer, Jepsen, & Schulz, 2008), (NCSRD, INERIS, 2009).

Zu beachten sind die veränderten Ausdehnungen und Geometrien der EX-Zonen im Vergleich zu Erdgasanlagen, dies rührt aus den bereits beschriebenen Unterschieden in der Molekülgröße und damit dem Diffusionsverhalten. Hier sind jedoch die entsprechenden Einzelfallbetrachtungen am konkreten Objekt bzw. den einzelnen Anlagenkomponenten zur Festlegung der Explosionsgefährdung und der EX-Bereiche in späteren Planungsphasen notwendig.

Besondere Anforderungen an Geräte und Komponenten hinsichtlich der Explosionsklasse sind zu beachten, da sie stofflich abweichend vom Speichermedium Erdgas definiert werden

Besondere Bedeutung kommt auch einem kontinuierlichen Monitoring der tatsächlich auftretenden Drucklastwechsel in allen relevanten Anlagenteilen und regelmäßige Überprüfung der Lebensdauerberechnungen (Rissfortschritt und Erreichen der jeweiligen Bruchfähigkeit (KIC) (vgl. Marewski, Steiner, & Engel, 2020) zu. Dies sollte jedoch bei neu zu errichtenden Anlagen Teil eines guten Engineerings nach dem Stand der Technik sein.

Dennoch-Störfälle

Die Definition von sogenannten Dennoch-Störfällen ergibt sich aus dem „Abschlussbericht Schadensbegrenzung bei Dennoch-Störfällen; Empfehlungen für Kriterien zur Abgrenzung von Dennoch-Störfällen und für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen des Arbeitskreises DENNOCH-STÖRFÄLLE der SFK, verabschiedet auf der 31. Sitzung der SFK am 12. Oktober 1999“ (AK DENNOCH-STÖRFÄLLE, 1999):

„Dennoch-Störfälle stellen die Ausweitung von Betriebsstörungen dar, die trotz störfallverhindernder Maßnahmen, aber aufgrund des Wirksamwerdens einer vernünftigerweise auszuschließenden Gefahrenquelle oder des zeitgleichen Wirksamwerdens mehrerer voneinander unabhängiger Gefahrenquellen (Nr. 3.2.4 der 2. Störfall-VwV) eine ernste Gefahr hervorrufen. Zur Begrenzung der Auswirkung von Störfällen dieser Art sind anlagenbezogene Vorkehrungen und spezielle Gefahrenabwehrmaßnahmen nach § 3 Abs. 3 in Verbindung mit § 5 StörfallV zu treffen.“

Bezüglich der detaillierten Behandlung der Dennoch-Störfälle sei auf den o. a. Abschlussbericht verwiesen.

Es wird hier ein Konzept angewendet (umgebungsbezogene Störfallbeurteilungswerte, Überschreitung derer, Berechnung der freigesetzten Mengen/Massenströme der Störfallstoffe) welches nur anhand einer konkreten Anlagenkonfiguration und gegebener Umgebungsbedingungen umgesetzt werden kann.

Deshalb bezieht sich die nachfolgende Betrachtung auf die Definition der einzelnen Fallbeispiele für Dennoch-Störfälle. Hierzu wird in erster Linie der BVEG-Leitfaden „Auswirkungen von Störfällen im Speicherbetrieb auf die Nachbarschaft“ (09/2017) herangezogen.

Betrachtet wird hier:

- Blowout einer Bohrung,
- Leitungsbruch mit Austritt großer Mengen des Speichermediums,
- Behälterversagen.

Mögliche Auswirkungen dieser Szenarien auf die Nachbarschaft einer Speicherbohrung sind:

- Ausbreitung einer zündfähigen Gaswolke ohne Zündung,
- Wärmebelastung bei Zündung der Gaswolke,
- Druckwelle bei Zündung (anderer Verlauf als bei Erdgas).

8.3.6 Wasserstoff-Verdichtertechnik unter Berücksichtigung von Betriebserfahrungen mit Wasserstoff-Untergroundspeicherung

Im Folgendem werden vorhandene H₂-Verdichterlösungen unter der Berücksichtigung praktischer Betriebserfahrungen in der großvolumigen H₂-Speicherung analysiert. Im Nächsten Schritt soll für die Einspeicherung von Wasserstoff in einem UGS (hier: Salzkaverne) ein geeigneter Verdichter ausgewählt werden. Für diesen Verdichter werden die nachfolgenden Prozessparameter vorgegeben:

- Medium: Wasserstoff (100 %, wassergesättigt und H₂S-Anteile)
- Minimalvariante:
 - Verdichtungsenddruck: 41–141 bar,
 - Verdichtersaugdruck: 31–61 bar,
 - Im Auslegungspunkt beträgt der Durchsatz: 5.000 m³/h i. N. (31 auf 141 bar),
 - Minimaldurchsatz: 2.000 m³/h i. N.
- Referenzvariante:
 - Verdichtungsenddruck: 41–171 bar,
 - Verdichtersaugdruck: 31–61 bar,
 - Im Auslegungspunkt beträgt der Durchsatz 50.000 m³/h i. N. (31 auf 171 bar),
 - Minimaldurchsatz: 20.000 m³/h i. N.
- Maximalvariante:
 - Verdichtungsenddruck: 61–231 bar,
 - Verdichtersaugdruck: 31–61 bar,
 - Im Auslegungspunkt beträgt der Durchsatz 100.000 m³/h i. N. (31 auf 231 bar),
 - Minimaldurchsatz: 20.000 m³/h i. N.

Grundlagen

Zur Auswahl eines geeigneten Verdichters werden zunächst die benötigten Grundlagen der Verdichtungs- und Strömungstechnik erläutert.

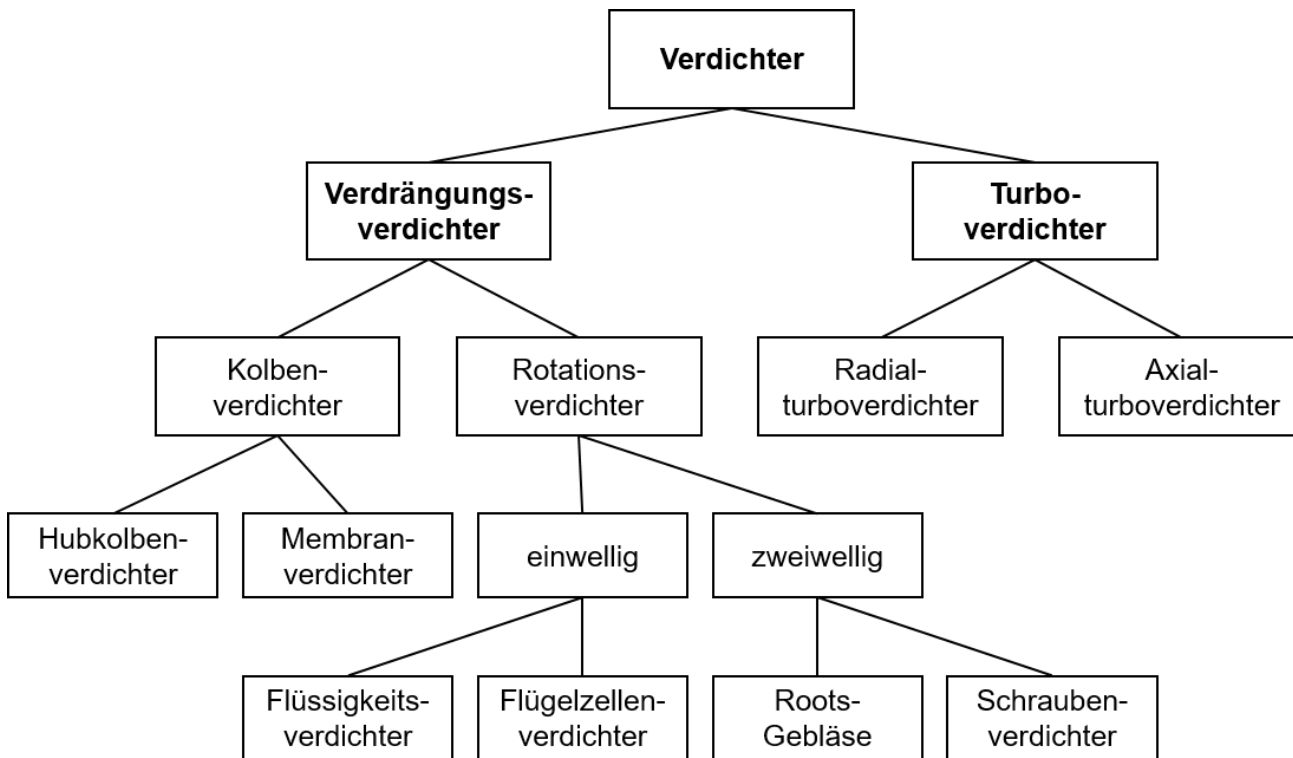


Abbildung 232: Einteilung von Verdichtern nach Funktionsprinzipien (eigene Darstellung nach (Eifler, et al., 2009b))

Grundsätzlich lassen sich Verdichter hinsichtlich zwei unterschiedlicher Funktionsprinzipien unterteilen (siehe Abbildung 232). Dabei gibt es zum einen Verdichter, die nach dem Verdrängerprinzip arbeiten. Hierbei wird durch die Verkleinerung des Raumes, der dem Gas zur Verfügung steht, eine Volumenänderungsarbeit geleistet, welche sich in der Erhöhung des Druckes widerspiegelt. Die am häufigsten eingesetzten Verdrängerkompressoren sind Membran-, Hubkolben- und Schraubenkompressoren (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. P2). Das zweite Funktionsprinzip wird bei den Turbokompressoren umgesetzt, so genannte Strömungsmaschinen. Dabei wird die kinetische Energie des Fluids durch Übertragung eines Drehimpulses mit Hilfe eines rotierenden Laufrades erhöht. Durch die Beschleunigung des Gases und nachfolgende Verringerung der Geschwindigkeit wird eine Kompression erreicht. Es wird grundlegend zwischen Radial- und Axial-Turbokompressoren unterschieden, die für unterschiedliche Anwendungsfälle benutzt werden. Bei Axial-Turbokompressoren tritt das Fluid parallel zur Welle aus dem Kompressor aus. Bei Radial-Turbokompressoren ist der Austritt orthogonal zur Antriebswelle (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R71 - R73).

Jede der Bauarten besitzt spezifische Anforderungen hinsichtlich Druckbereich und realisierbarem Volumenstrom. In Tabelle 89 werden die Bauarten von Verdrängerverdichtern in Bezug auf die Schmierung, die maximalen Volumenströme (bezogen auf Ansaugdruck), den maximalen Enddruck sowie die Druckverhältnisse aufgezählt, die ihre Hauptanwendung im Gasbereich haben (Dubbel,

Grote, & Feldhusen, 2011, S. P28, P31). Für Turboverdichter kann der Arbeitsbereich der Abbildung 232 entnommen werden. Radialverdichter können bis maximal 200.000 m³/h i. N. bzw. 800 bar betrieben werden. Bei Axialverdichtern ist der maximale Druck auf etwa 20 bar beschränkt, jedoch ist ein Volumenstrom von etwa 1.000.000 m³/h i. N. möglich (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R70 - R71).

Tabelle 89: Verdrängungsverdichter für die Gasanwendung (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. P28, P31)

Bauart	Schmierung	\dot{V}_{\max} [m ³ /h i. N.]	p_{\max} [bar]	Stufendruck- verhältnis bis	Stufenzahl bis
Hubkolben- verdichter	Öl	100.000	3.500	3,5 (max. 10)	7
	Trockenlauf	100.000	200	4	4
	Labyrinth-Spalt	11.000	300	4	4
Membran- verdichter	Trockenlauf	100	4.000	10 (max. 20)	4
Schrauben- verdichter	Trocken-Spalt	80.000	40	4...5	4
Vielzellen- verdichter	Öl	5.000	16	12...13	1
Flüssigkeits- ringverdichter	Wasser	10.000	11	1,5...2,2	3
Roots- Gebläse	Trocken-Spalt	84.000	2	2	2

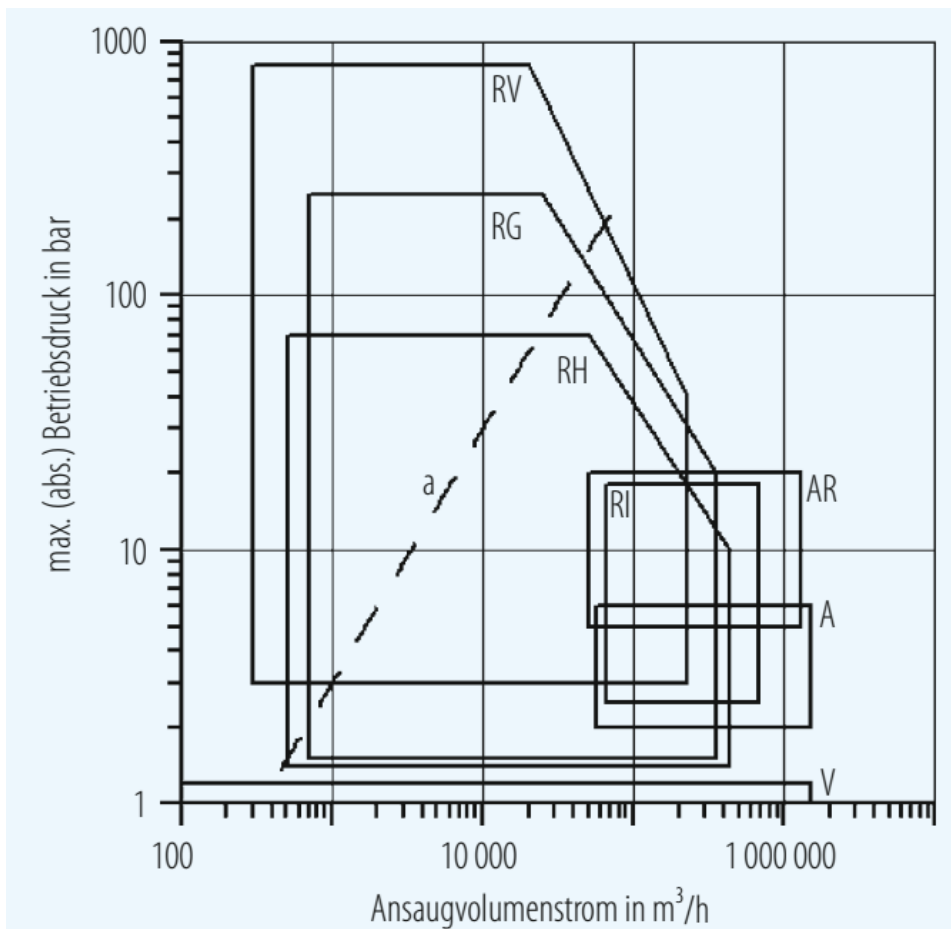


Abbildung 233: Arbeitsbereiche von Turboverdichtern (RV Radialverdichter, vertikal geteiltes Gehäuse; RH Radialverdichter, horizontal geteiltes Gehäuse; RG Radialverdichter, integriertes Getriebe; A Axialverdichter (Druckverhältnis > 8:2 gehäusig); a) maximaler Betriebsdruck für RV und RH für Ansaugdruck 1 bar; b) maximaler Betriebsdruck für RG für Ansaugdruck 1 bar) (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R70)

Eine neuartige Bauart eines Verdrängungsverdichters ist der sogenannte ionische Verdichter. Das besondere hierbei ist, dass Flüssigkeitssäulen statt Kolben eingesetzt werden, welche durch Pumpen auf- und ab bewegt werden. Dadurch ist eine bessere Kühlung möglich, bei gleichzeitig geringeren Energieverlusten und niedrigerem Wartungsaufwand. Der Arbeitsbereich liegt dabei bei etwa 33 kg/h (umgerechnet: 400 m³/h i. N.) bei 900 bar (Bachmeier, 2016, S. 16).

Funktionsweisen von Hubkolben- und Turboverdichter

Nachfolgend werden die beiden ausgewählten Verdichter, Hubkolben- und Radial-Turboverdichter, hinsichtlich der Funktionsweise genauer beschrieben.

Hubkolbenverdichter

Der Hubkolbenverdichter ist eine Verdrängungsmaschine. Das Funktionsprinzip ähnelt dem eines Otto-Motors. Ein hydraulischer Antrieb versetzt die Kurbelwelle in Rotation, wie Abbildung 234 zeigt. Dadurch bewegt sich ein Kolben innerhalb des Zylinders auf und ab. Der Raum, der dem Gas zur

Verfügung steht, verkleinert sich und das Gas wird komprimiert. Kolbenverdichter haben den Vorteil, dass sie sehr robust und zuverlässig sind. Aufgrund des Verdrängerprinzips können sehr hohe Drücke mit wenigen Verdichterstufen erreicht werden. Des Weiteren sind solche Verdichter sehr gut regelbar. Nachteilig sind vor allem der bauartbedingte pulsierende Produktgasstrom, die Totpunktverluste und die hohen Austrittstemperaturen. Bei der Erzeugung hoher Drücke nimmt der maximal komprimierbare Norm-Volumenstrom immer weiter ab. Im niedrigen Volumenstrombereich bei bis zu 50 bar können bis zu 10.000 m³/h i. N. komprimiert werden (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011) (Eifler, et al., 2009b) (Energieagentur NRW).

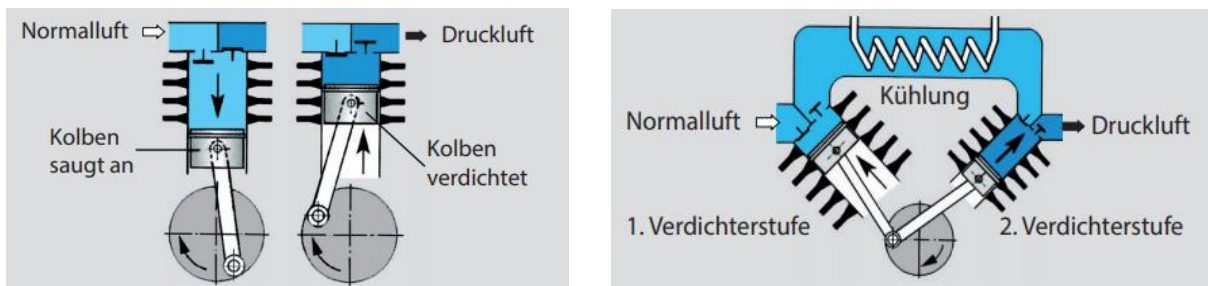


Abbildung 234: Einstufiger (links) und zweistufiger (rechts) Kolbenverdichter (Christiani, S. 1)

Turboverdichter

Für hohe Volumenströme werden Turboverdichter (siehe Abbildung 235) eingesetzt. Diese gehören zu den Strömungsmaschinen und erzeugen, wie bereits erwähnt, den gewünschten Druck durch Übertragung eines Drehimpulses. „[Da] das Gas während der Energieübertragung im Laufrad von innen nach außen strömt, unterliegt es der Änderung des Zentrifugalfelds. Damit wird die statische Enthalpie [...] erhöht, wodurch die erzielbaren Druckverhältnisse wesentlich höher als beim Axialverdichter werden. Die radiale Strömungsrichtung im Laufrad erfordert wiederum radial angeordnete Diffusoren, die den Außendurchmesser des Gehäuses auf etwa das Doppelte des Laufraddurchmessers erhöhen.“ (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R71) „Die Stufenzahlen der Prozess-Radialverdichter in Einwellenbauweise reichen von 1 bis 26 in bis zu drei hintereinandergeschalteten, bis zu fünfmal zwischengekühlten Gehäusen. Maximale Stufenzahl je Gehäuse: zehn; maximale Zwischenkühlungen je Gehäuse: drei, d. h. maximal vier Stufengruppen und maximal acht Stützen je Gehäuse“ (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R71).

Vorteilhaft bei Radial-Turboverdichtern sind die hohen Wirkungsgrade bei hohen Volumenströmen, der ruhige Lauf und die ölfreie Verdichtung. Der Druckregelbereich ist beschränkt und die Verdichter sind für hohe Drücke nicht sehr gut geeignet. Dennoch ist ein Druckbereich von geringem Überdruck bis hin zu mehreren hundert baren Überdrücken möglich. Dabei können Volumenströme von über 100.000 m³/h i. N. erreicht werden (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R71f) (Energieagentur NRW).

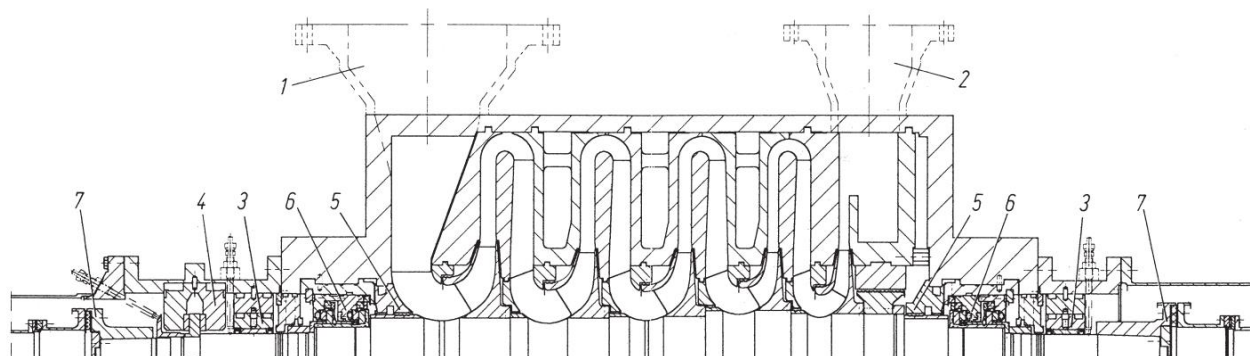


Abbildung 235: Radialer Einwellenverdichter: 1 Saugstutzen, 2 Druckstutzen, 3 Radiallager, 4 Axiallager, 5 Labyrinthdichtung, 6 gasgeschmierte Gleitringdichtung, 7 Kupplung (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R72)

Auswahlkriterien für Verdichter

Die Auswahl des geeigneten Verdichters erfolgt hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien. Nachfolgend werden die wichtigsten Kriterien angeführt (Energieagentur NRW):

- Volumenstrom,
- Druckniveau (Saug- und Ausgangsdruck),
- Medienbeständigkeit,
- Gasqualität,
- Wirtschaftlichkeit,
- Auslastung.

Bei Betrachtung des Volumenstromes und des Druckniveaus wäre für die gegebene Typkaverne (siehe Kapitel 2.2) sowohl eine Verdichtung mit einem Hubkolbenverdichter als auch mit einem Radial-Turboverdichter möglich.

Auch die Medienbeständigkeit hinsichtlich des Wasserstoffs stellt kein Problem dar. Um die gewünschte Reinheit von Wasserstoff (Grade D) zu erreichen, müssen die Verdichter ölfrei ausgeführt werden. Turboverdichter werden immer ölfrei ausgeführt. Bei Kolbenverdichtern besteht ebenfalls die Möglichkeit einer ölfreien Verdichtung. Der Nachteil bei der Verwendung ölgeschmierter Verdichter ist das anfallende Schmieröl, welches anschließend aus dem Gasstrom abgeschieden, aufbereitet und entsorgt werden muss. Es werden dadurch geringere Druckniveaus erreicht.

In (NASA, 1989, S. 2/37) und (Makridis, 2016, S. 17) wird angegeben, dass Wasserstoff üblicherweise mit einem Kolbenverdichter verdichtet wird. Das liegt daran, dass die molare Masse von Wasserstoff so gering ist, dass eine Verdichtung mit Hilfe eines Radial-Turboverdichters eine hohe Anzahl von Verdichtungsstufen benötigen würde. Hubkolbenverdichter und Radial-Turboverdichter werden zudem in (Jordan, 2007, S. 37) und (Amos, 1998, S. 14) als typische Verdichter für Wasserstoff aufgezählt, dabei besonders im Einsatzfeld der chemischen Industrie, sodass die o. g. prinzipielle Eignung für Wasserstoff bestätigt ist. Für geringe Volumenströme (z. B. für 600 m³/h i.N. gemäß (Eichhorn & Rehmer, 2014)) wird zudem noch der Schraubenverdichter als Möglichkeit in (Eichhorn & Rehmer, 2014, S. 71) und (Jordan, 2007, S. 37) benannt. Referenzen oder Erfahrungsberichte in Bezug auf den Einsatz von Verdichtern für H₂-Kavernen sind nur wenige verfügbar, da lediglich vier betriebene

Kavernen weltweit existieren und die Informationslage nicht über die typischen Kennzahlen (Druck, Volumen, Geometrie) hinausgehen. Im nächsten Kapitel werden die Erfahrungen mit H₂-Verdichtern aus aktuellen Herstellerangaben und aus internen Projekten näher erläutert.

Erfahrungen aus aktuellen Herstellerangaben

Die nachfolgenden Informationen zur H₂-Tauglichkeit von Erdgas-Kolbenverdichtern wurden durch Herstelleranfragen eingeholt. Es wurden drei Hersteller befragt:

- Borsig ZM: 19.06.2020 – Verweis auf Quelle (Ziermann, 2020),
- Mehrer Compressors: 26.06.2020 – Verweis auf Quelle (Tändler, 2020),
- Hoerbiger: 30.03.2021 – Verweis auf Quelle (Wustlich, Brandl, & Kornfeld, 2021).

Die befragten Hersteller für Kolbenverdichter besitzen Erfahrungen in der Herstellung von Verdichtern zur Komprimierung von Gasgemischen aus Kohlenwasserstoffen (wie Methan) und Wasserstoff. Weitere Betriebserfahrungen mit einem Kolbenverdichter stammen aus dem Projekt „Wasserstoff-Untergroundspeicher Sandhausen“: Am Standort Sandhausen sind zwei Kolbenverdichter der Firma Borsig ZM vorhanden.

Material

In allen Herstellerinterviews wurde darauf hingewiesen, dass bei Kolbenverdichtern überwiegend die gleichen Materialien unabhängig der Gasart verwendet werden und daher eine grundlegende Materialbeständigkeit gegenüber Wasserstoff zu erwarten ist. „Kolbenverdichter unterliegen auf Grund ihres Arbeitsprinzips einem unvermeidbaren Verschleiß funktionswichtiger Bauteile (unabhängig von der Gasart), der zur Minderung der Förderleistung und sogar zum Ausfall der Maschine führen kann“ (Eifler, et al., 2009a). Verschleißteile bestimmen die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit eines Kolbenverdichters. Nur wenige Bestandteile sind unter Wasserstoff einem erhöhten Verschleiß ausgesetzt. Diese kritischen Bauteile sind Verschleißteile, die auch im Betrieb mit Erdgas in regelmäßigen Abständen (1 bis 3 Jahre) instandgehalten werden. Daher ist der Materialaustausch eine routinemäßige Maßnahme. Zu den kritischen Materialien zählt vor allem Polytetrafluorethylen (PTFE) (für Erdgas) als Dichtungsmaterial in Kolbenringen, Führungsringen und Stopfbuchsen. Bei einem Austausch können PTFE-Dichtungen ausgewählt werden, welche unter den vorliegenden Betriebsbedingungen eine H₂-Beständigkeit aufweisen. Da der Verdichter im Baukastenprinzip aufgebaut ist, können vor allem Verschleißteile mit geringem Aufwand instandgehalten werden (Borsig GmbH). Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn Anpassungsmaßnahmen erforderlich sind, um den Verdichter für die H₂-Anwendung zu modifizieren. Hier können die Verschleißteile ebenso wie die kritischen Bauteile von einer möglichen H₂-Versprödung oder Undichtheit betroffen sein.

Funktion

Das Funktionsprinzip des Kolbenverdichters bleibt bei reinem Wasserstoff erhalten. Unabhängig vom Molgewicht des Gases wird der Kolbenverdichter ein konstantes Verdichtungsverhältnis erbringen, insofern sich die Betriebsbedingungen nicht verändern (Ziermann, 2020). Als kritischste Bauteile, die für eine sachgerechte Funktion notwendig sind, wurden vor allem die Saug- und Druckventile, Kolben- und Zylindergeometrien und die Verdichterantriebsleistung identifiziert. Die Ventile sind abhängig vom Molgewicht des Gases und werden daher durch den Einsatz von Wasserstoff direkt beeinflusst. Die Kolben und Zylinder sind unter gleichbleibenden Bedingungen vernachlässigbar, jedoch bei Erhöhung

der Transportkapazität genauer zu untersuchen, da diese die Fördermenge u. a. limitieren. Die Verdichterantriebsleistung erhöht sich mit steigendem H₂-Anteil geringfügig. Insofern die gleiche Energie transportiert werden soll, muss die Fördermenge erhöht werden. Da die Leistung technisch begrenzt ist, muss diese im Zusammenhang mit der Liefermenge untersucht werden.

Sollten sich die Anforderungen an den Verdichter ändern (Erhöhung des Volumenstroms oder des Betriebsdrucks), müssen durch den Hersteller Nachberechnungen zur Bauteildimensionierung und Materialfestigkeit der Bauteile erfolgen und dementsprechend Anpassungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Neben der reinen Funktionsweise ist zu beachten, dass der Kolbenverdichter als Maschine an Regelwerke und Normen gebunden ist (Ziermann, 2020). Überwiegend kommt der amerikanische Standard API 618 für Kolbenverdichter zu tragen (ISO-Äquivalent ist vorhanden). Dieser schreibt beispielsweise eine geringere maximale Gastemperatur für Wasserstoff als für Erdgas vor oder sieht den Einsatz eines Zwei-Kammer-Distanzstückes für Wasserstoff vor.

Kolbenverdichter sind nach dem aktuellen Stand der Technik die beste Lösung zur H₂-Verdichtung bis zu einem Volumenstrom von 750.000 m³/h i. N. (Adam, Engelshove, & Heunemann, 2020). Der Wirkungsgrad ist bei der Verdichtung von Wasserstoff bei Kolbenverdichtern um ca. 15 % höher als bei Turboverdichtern (Siemens Energy, 2020).

Empfehlung

Für die Auswahl eines Verdichters sollten folgende Handlungsempfehlungen beachtet werden:

1. Festlegen der angestrebten Betriebsszenarien

Es ist durch den Anlagenbetreiber zu bewerten, ob die aktuellen Volumenströme und Betriebsdrücke beibehalten werden sollen oder ob eine Erhöhung als Ausgleich der geringeren Energiedichte von Wasserstoff angestrebt wird. Es ist demzufolge die angestrebte Liefermenge zu definieren. Anhand dieser festgelegten Kriterien muss für den Verdichter erneut im Detail (durch den Hersteller) untersucht werden, ob:

- der angestrebte Volumenstrom durch die baulichen Gegebenheiten zu realisieren ist oder
- bauliche und/oder regelungstechnische Änderungen vorgenommen werden können, um den angestrebten Volumenstrom zu bewerkstelligen (wie z. B. Vergrößerung der Zylinder- und Kolbengeometrien).

2. Detailbetrachtungen und Austausch von Saug- und Druckventilen

In den Herstellerinterviews wurde darauf verwiesen, dass die Auslegung der Saug- und Druckventile vom Molgewicht des Gases abhängt, und diese daher schon bei geringen H₂-Anteilen überprüft werden sollten. Daher sind Nachberechnungen bei allen H₂-Anteilen durch den Hersteller durchzuführen und dadurch der entsprechende Anpassungsbedarf abzuleiten. Ein Austausch der Ventile erscheint jedoch als notwendig.

3. Detailbetrachtungen zum Einsatz und Austausch der Dichtungen

- Bei reinem Wasserstoff wird empfohlen, die Dichtungen durch H₂-verträgliche PTFE-Dichtungen (andere Compounds) zu ersetzen. Zudem ist durch den Hersteller zu beurteilen, ob Flachdichtungen ggf. durch O-Ringe zu ersetzen sind.

4. Austausch der Kolbenstangen-Packungen bei höheren H₂-Anteilen

- Es sind die vorhandenen Packungen (ohne Sperrgaseinrichtung) durch Packungen mit Sperrgaseinrichtung auszutauschen. Der Austausch ist mit geringem Aufwand durchführbar. Allerdings erfordert das Sperrgassystem eine Stickstoffversorgung. Laut Hersteller kann Stickstoff z. B. durch eine Absorptionsanlage bereitgestellt werden (insofern keine Stickstoffversorgung vorliegt). Der Umbau wird bei höheren H₂-Anteilen empfohlen, kann jedoch auch schon bei geringen H₂-Anteilen umgesetzt werden.

5. Umbau des Zwischenstücks

Laut Hersteller kann es erforderlich sein, bei der H₂-Verdichtung das Ein-Kammer-Zwischenstück auf ein Zwei-Kammer-Zwischenstück umzubauen (API 618 konform). Diese Maßnahme ist mit erhöhtem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verbunden. Es ist durch den Hersteller zu bewerten (Risikoanalyse), ob das Distanzstück auszutauschen ist.

6. Detailuntersuchungen zum Verdichterantrieb

Unter Einbeziehung des angestrebten Volumenstroms und der baulichen Gegebenheiten, muss die Verdichterantriebsleistung durch den Hersteller nachberechnet werden. Der Einsatz ist jedoch durch den Hersteller zu überprüfen und freizugeben.

Um die Eignung des Hauptmotors bewerten zu können, muss die erforderliche Schwungmasse durch den Hersteller nachgerechnet werden.

7. Detailuntersuchungen zu den Nebenanlagen des Verdichters

Weitere Komponenten wie Kühler und Pulsationsbehälter sind stark von den Betriebsparametern des Verdichters abhängig. Wird z. B. eine Druckerhöhung angestrebt, müssen die bestehenden assoziierenden Anlagen (Regelanlagen, Armaturen, etc.) mit ihren entsprechenden Kenndaten für eine Druck- und Kapazitätserhöhung überprüft werden. Vor allem weist der Hersteller Borsig ZM auf eine Untersuchung des Pulsationsbehälters (Größe und Pulsation) hin. Zwar ist laut Hersteller von einer geringeren Pulsation mit steigendem H₂-Anteil zu rechnen. Es empfiehlt sich dennoch die Erstellung einer neuen Pulsationsstudie, um Resonanzen im Rohrleitungssystem auszuschließen.

8. Überprüfung der Materialverträglichkeit

Da Wasserstoff zu einer H₂-Versprödung von Metallen führen kann, ist die Materialverträglichkeit durch den Hersteller im Detail zu verifizieren. Dies kann z. B. durch bruchmechanische Untersuchungen unter dem Kriterium Wasserstoff erfolgen. Zusätzlich kann es notwendig sein, erneute Festigkeitsuntersuchungen der Bauteile durchzuführen, insofern ein Betrieb außerhalb der Auslegungsgrenzen angestrebt wird. Die Notwendigkeit ist durch den Hersteller zu bewerten.

Zusammenfassung/Ergebnis

Aufgrund der o. g. Aussagen und der Marktrecherche zu verfügbaren H₂-Verdichtern, wird für die gegebene Typkaverne ein Hubkolbenverdichter zur Verwendung vorgeschlagen. Es gibt eine Vielzahl von Herstellern, die solche Verdichter anbieten. In diesem Leitfaden wird beispielhaft der Verdichter der „B-Line Premium & TCO-Optimiert“-Reihe der Firma Burckhardt Compressors AG herangezogen. Dieser ist ein ölfrei oder ölgeschmiert verdichtender, mechanisch angetriebener Prozessgas-Hubkolbenverdichter. Abbildung 236 zeigt dabei den Druck und Volumenstrombereich dieses speziellen Verdichters im ölgeschmierten und ölfreien Betrieb. Der für die Typkaverne gegebene Betriebspunkt befindet sich in einem Bereich, welcher ölfrei ausführbar ist, wodurch die Anforderungen an die Reinheit erreicht werden können (Burckhardt Compression AG, kein Datum).

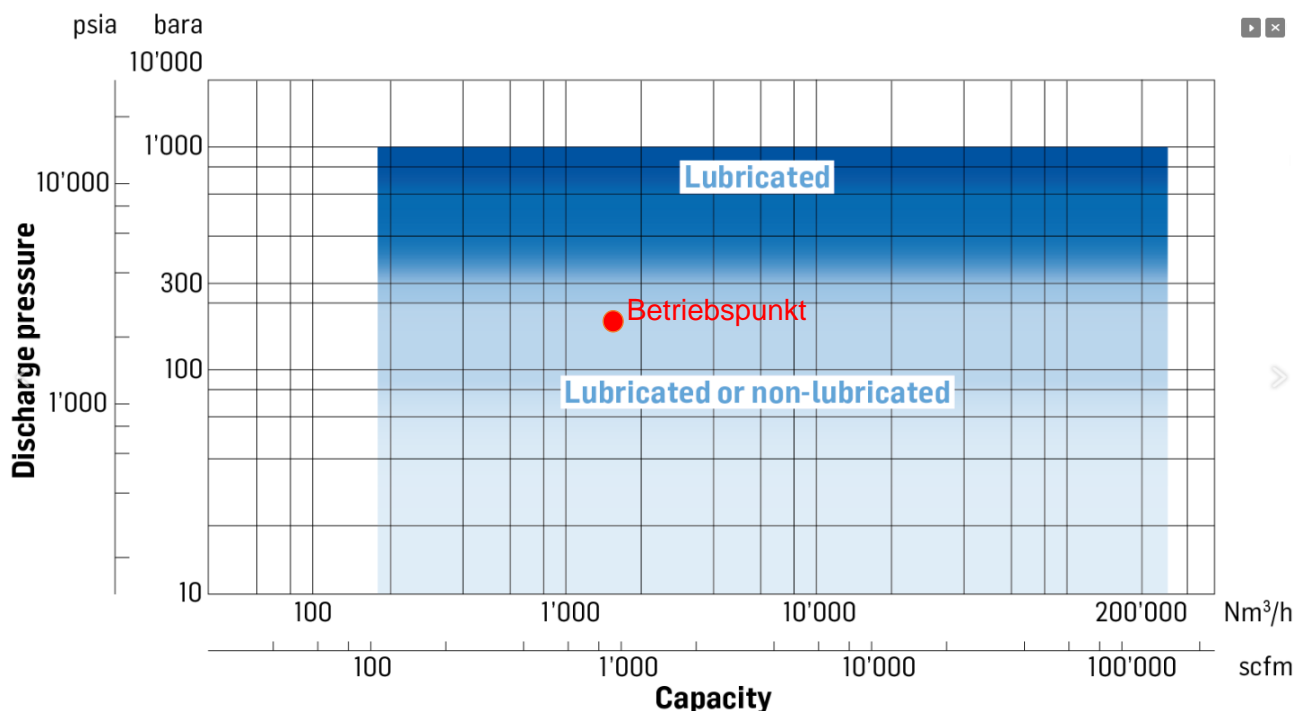


Abbildung 236: Einsatzbereich „B-Line-Premium“ (Burckhardt Compression AG, kein Datum)

Weitere mögliche Verdichter sind:

- 4SVL190 von NEA Compressors (Neumann & Esser (NEA Group), S. 4),
- PV422 von Borsig ZM Compressions (Borsig ZM Compression, kein Datum, S. 4),
- API 618 Compressors von SIAD Machine Impianti (Siad Macchine Impianti, S. 1).

8.4 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Speicherbetrieb und Fahrweisen

Als Basis für die Betrachtung der Speichergesamtanlage wurden die betrieblichen Randbedingungen mithilfe einer Literaturanalyse und einer Befragung der Projektstakeholder untersucht. Hierbei wurde insbesondere auch die zeitliche Entwicklung der Speichieranforderungen berücksichtigt. Es wurden jedoch keine eigenen Szenarien berechnet, sondern die betriebsrelevanten Parameter aus bestehenden Szenarien zur zukünftigen H₂-Wirtschaft in der Literatur extrahiert und mit dem Feedback der Stakeholder abgeglichen. Insbesondere hinsichtlich der Speicherkapazität und der Ein-/Ausspeicherleistung ist ein kontinuierlicher Hochlauf mit zunehmendem H₂-Marktvolumen zu erwarten. Bis spätestens 2050 erwarten die meisten der einbezogenen Autoren und Stakeholder einen H₂-Speicherbedarf, der mit den heutigen Erdgasspeichern vergleichbar ist. Es bestanden jedoch zum Zeitpunkt der Bearbeitung erhebliche Unsicherheiten über den zeitlichen Verlauf.

Seit dem Beginn des Verbundvorhabens H₂-UGS hat sich die Entwicklung des H₂-Marktes weiter konkretisiert. Ausschlaggebend hierfür sind politische Weichenstellungen (z. B. Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (BMWi, 2020)), aber auch verschiedene Initiativen aus der Industrie. Mit der Grüngasvariante des Netzentwicklungsplans Gas (Ohlen, 2021) steht inzwischen eine Quelle zur Verfügung, die konkrete, von Unternehmen gemeldete H₂-Bedarfe und -erzeugungen enthält. Somit können nun auch die potenziellen Bedarfe für H₂-Speicher lokationsspezifisch besser abgeschätzt und entsprechende Planungen auf der Basis der geologischen Bedingungen vor Ort aufgestellt werden.

Aufbauend auf den hier durchgeführten Untersuchungen erscheint es plausibel, dass in ersten H₂-Verbrauchszentren bereits in den nächsten Jahren in geringerem Umfang Bedarf für H₂-Speicher bestehen wird (entsprechend der Startvariante, siehe Kapitel 8.3.1.3). Um diesem Bedarf zu entsprechen und den Hochlauf der angeschlossenen Erzeuger und Verbraucher zu unterstützen, sollte bei Speicherprojekten im Idealfall frühestmöglich ein Teil der Speicherkapazität zur Verfügung gestellt werden. Für den Vollausbau des Speicherstandortes steht dann ein längerer Zeitraum zur Verfügung, wie bei bisherigen Erdgasspeichern üblich.

Hinsichtlich der Speicherfahrweise kann davon ausgegangen werden, dass kleinere Kavernen in eher kürzeren Zyklen betrieben werden können (z. B. Wochenzyklen), während bei größeren Kavernen eher mit jährlichen oder halbjährlichen Zyklen zu rechnen ist, welche durch kurzfristige Fluktuationen überlagert werden. Dieser Überlagerungsanteil wird voraussichtlich stärker ausgeprägt sein, als dies bei den aktuellen Erdgasspeichern der Fall ist.

Für die weiteren Gesamtanlagenbetrachtungen wurden drei in Größe und Teufenlage unterschiedliche Varianten von Kavernen zur H₂-Speicherung zur Abbildung unterschiedlicher Anwendungs- bzw. Skalenbereiche definiert. Die Startvariante wird durch eine relativ kleine Flachkaverne repräsentiert. Bei Referenz- und Maximalvariante handelt es sich dagegen um deutlich größere Tiefkavernen, die durch Vervielfachung als Kavernenpool weiter hochskaliert werden könnten.

Die Simulation aller drei Varianten erfolgt jedoch zunächst in Form einer Einzelkaverne. Bei allen Varianten wurden verschiedene technische bzw. thermodynamische Randbedingungen variiert. Konkret waren das der Wärmeübertragungskoeffizient, die Dimension der Förderrohrtour sowie die Injek-

tionstemperatur. Der für jede Variante vorgegebene Raten-Schedule wurde im Rahmen der Simulation dahingehend angepasst, dass der jeweilige Druckbereich in der Kaverne möglichst gut ausgefüllt wurde, ohne kavernenbezogene Restriktionen dauerhaft zu überschreiten.

Relevant für die Modellierung der obertägigen Prozesse sind dabei neben den Förder- bzw. Injektionsraten die Druck- und Temperaturverläufe am Bohrlochkopf. Diese wurden im Rahmen der Simulationsrechnungen bestimmt und dienen als Randbedingungen für die Modellierung der obertägigen Prozessstufen.

Gesamtanlagendesign

Das Design der Obertageanlage (OTA) erfolgte weitgehend in Anlehnung an übliche Erdgasspeicherdesigns. Die jeweiligen Einzelkomponenten sind mit Blick auf die H₂-spezifischen Betriebsanforderungen auszulegen und müssen für den Kontakt mit Wasserstoff geeignet sein. Im Bereich der obertägigen Installationen sind entsprechende Komponenten grundsätzlich am Markt verfügbar. Während dem Markthochlauf muss jedoch auch mit Kapazitätsengpässen bei Anlagenbauern und angrenzenden Gewerken gerechnet werden. Es empfiehlt sich daher für eine Speicherrealisierung entsprechende Vorlaufzeiten einzuplanen.

Die hier betrachteten Besonderheiten im Speicherdesign umfassen:

- **Notwendigkeit der Verdichtung bei Einspeicherung:** Die Möglichkeit einer direkten Einspeicherung aus einer Hochdruck-Wasserstoffversorgung (z. B. Hochdruck-Elektrolyseur) ohne eigenen Verdichter auf der OTA wurde mit betrachtet. Ein derartiges Design erscheint grundsätzlich möglich, sofern nur geringe Speicherkapazitäten und Speicherdrücke (entsprechend Startvariante) benötigt werden und eine geeignete Hochdruck-Wasserstoffversorgung besteht. Da während der Projektlaufzeit kein weiterer Fortschritt bei der Entwicklung von Hochdruck-Elektrolyseuren im Druckbereich bis 100 bar und Leistungsbereich bis 2.000 m³/h i. N. beobachtet werden konnte, erscheint diese Option aktuell allerdings fraglich.
- **Notwendigkeit einer Sauerstoffentfernung bei Einspeicherung:** Da Elektrolysewasserstoff grundsätzlich erhöhte Sauerstoffkonzentrationen aufweisen kann, muss bei direkter Kopplung des Speichers an einen Elektrolyseur die genaue Spezifikation des Wasserstoffs am Übergabepunkt vereinbart werden. Sofern keine vollständige Sauerstoffentfernung seitens der Elektrolyse vorgenommen wird, sollte diese vor Einspeicherung auf Seiten des Speichers erfolgen. Hierbei ist insbesondere die Schwankungsbreite des Sauerstoffanteils im Teillastbetrieb und dessen Auswirkung auf die Reinigungsstufe zu beachten.
- **Notwendigkeit einer Schwefelwasserstoffentfernung bei Ausspeicherung:** Das Potenzial für die Entstehung von Schwefelwasserstoff in den Speicherkavernen (siehe Kapitel 5) sollte individuell bewertet werden. Als mögliche Maßnahme kommt hierbei auch eine prozesstechnische Entfernung des Schwefelwasserstoffs an einem frühen Punkt im Ausspeicherzweig in Frage. Vorgelagerte Komponenten sollten in diesem Fall mit resistenten Materialien ausgelegt werden (siehe Kapitel 7).

Die Detailmodellierung der OTA kann mit einem der üblichen Simulationstools (hier: Epsilon) vorgenommen werden. Hierbei ist auf eine korrekte Implementierung der H₂-Kennwerte zu achten. Einzelne vorinstallierte Bibliotheken beinhalten nur eine vereinfachte Darstellung des Verhaltens des Wasser-

stoffs (z. B. Taupunkte), was zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann. Die Modellierung der Wechselwirkung des Wasserstoffs mit anderen Stoffen (z. B. Ad-/Absorption) muss gegebenenfalls über eine Softwareschnittstelle extern erfolgen.

Für die hier definierten Speichervarianten wurden alle relevanten Betriebsgrößen, wie Druck- und Temperaturverläufe, Stoffströme, etc., modelliert.

Anlagensicherheit

Zu den Grundlagen eines sicheren Betriebs von Anlagen zur Verarbeitung von Wasserstoff existieren inzwischen eine Reihe verschiedener Quellen, z. B. (Wurster & Schmidtchen, 2011). Ebenso hat es zuletzt Fortschritte bei den Auswirkungsbetrachtungen zur Freisetzung größerer H₂-Mengen gegeben (Krause, 2020). Im Verbundvorhaben H₂-UGS wurden die Sicherheitsbetrachtungen für die definierten Speichervarianten in Analogie zum in der Industrie etablierten HAZOP-Verfahren durchgeführt. Hierbei wurden vereinzelt geringfügige Unterschiede in möglichen Ursache-Wirkungs-Ketten zur Erdgasspeicherung als Referenz festgestellt und dokumentiert. Diese Änderungen ergaben sich direkt aus den spezifischen Stoffeigenschaften des Wasserstoffs (z. B. geringere molare Wärmekapazität als Erdgas, stärkerer Einfluss von Nebenkomponenten auf die Eigenschaften des Mischgases). Grundsätzlich hat sich die Anwendbarkeit des Verfahrens bestätigt, weshalb das HAZOP-Verfahren (oder PAAG-Verfahren) auch für die H₂-Speicherung weiterhin empfohlen wird. Die Teams, die das Verfahren durchführen, setzen sich für gewöhnlich aus erfahrenen Experten für alle beteiligten Gewerke zusammen. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass auch hinreichende Erfahrung in der Anwendung von Wasserstoff im Team vorhanden ist.

Grundsätzlich sind die bei der Erdgasspeicherung angewendeten Instrumente und Mechanismen auch bei H₂-Speichern geeignet.

8.5 Ausblick – Risiken und Chancen

Angesichts der Vielzahl an Initiativen zur Nutzung von Wasserstoff erscheint die Entwicklung eines Bedarfs an großtechnischer H₂-Speicherung innerhalb der nächsten Jahrzehnte sehr wahrscheinlich. Im Gegensatz zur Anfangsphase des Projekts, in der der Schwerpunkt der Betrachtungen auf der inländischen Erzeugung von grünem Wasserstoff lag, ist zuletzt vermehrt auch der Import von Wasserstoff und die Entwicklung eines internationalen H₂-Marktes in den Fokus gerückt. Im Folgenden eine nicht abschließende Aufzählung entsprechender Initiativen:

- Inländische Erzeugung:
 - Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung,
 - Energiepark BL,
 - GreenHydroChem,
 - AquaVentus,
 - Westküste100,
 - GET-H₂.
- Wasserstoffimport:
 - H₂Global,
 - European Hydrogen Backbone,
 - H₂ Brunsbüttel,

- Kooperation E.ON – Fortescue Future Industries (Australien),
- Kooperation Deutschland – Saudi-Arabien.

Sofern diese Initiativen erfolgreich umgesetzt werden und noch einige weitere hinzukommen, wird sich tatsächlich auf absehbare Zeit Wasserstoff als wesentlicher Energieträger etablieren. In diesem Fall wird sich auch der Speicherbedarf eher im oberen Bereich der ermittelten Bandbreite entwickeln (siehe Kapitel 8.3.1.1). Sofern die inländische Erzeugung vorherrscht, wird auch die Fahrweise der Speicher entsprechend den hier dargestellten Untersuchungen vorwiegend saisonal bzw. halbjährlich verlaufen. Beim vorrangigen Import von Wasserstoff müssen die bisherigen Überlegungen zur Speicherfahrweise angepasst werden. Da hierbei vorerst mit einem Engpass bei den Transport- und Anlandemöglichkeiten zu rechnen ist, werden diese voraussichtlich möglichst konstant ausgelastet werden, was zu einer Verstetigung des Importstroms führen sollte. Ein Ausgleich von saisonalen Erzeugungsschwankungen muss in dem Fall eher erzeugungsnah im Ausland erfolgen. Inwieweit hierbei Salzkavernenspeicher zum Einsatz kommen, hängt im Wesentlichen von den lokalen geologischen Gegebenheiten ab. Erst wenn eine Überkapazität bei den Transportwegen entsteht, kann ein Ausgleich saisonaler Erzeugungsschwankungen auch mittels Speicher in Deutschland erfolgen. Nichtsdestotrotz werden Speicher in Deutschland auch bei einem vorwiegenden Import dringend benötigt, um eine Bevorratung vor Ort zu ermöglichen und Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Wie diese Kapazitäten sinnvoll zu bemessen sind, ist derzeit noch offen und bedarf weiterer Untersuchungen.

Für die technische Umsetzung der hier erarbeiteten Ergebnisse war ursprünglich innerhalb der HYPOS-Initiative das Projekt H₂-Forschungskaverne bzw. Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt vorgesehen. Hinsichtlich der Demonstration der untertägigen Speicheraspekte sind inzwischen jedoch andere Projekte weiter fortgeschritten (H2CAST unter Konsortialführung der STORAG Etzel am Standort Etzel/Deutschland, HyStock der Gasunie in Zuidwending/Niederlande, HyPSTER der Storengy in Etrez/Frankreich, HyCavMobil der EWE in Rüdersdorf). Da alle genannten Projekte zunächst umfangreiche Untersuchungen an den untertägigen Komponenten vornehmen, ist derzeit nicht ersichtlich, ob dieser Vorsprung auch hinsichtlich der hier dargestellten obertägigen Aspekte erhalten bleiben wird. In jedem Fall ist bei der Erprobung der untertägigen H₂-Speicherung in Salzkavernen in den letzten Jahren eine erhebliche Dynamik zu beobachten gewesen, die voraussichtlich weiter anhalten wird. Schwer abzusehen ist derzeit jedoch, inwieweit es durch die jüngsten Entwicklungen hinsichtlich Energie- und Rohstoffknappheit und die kurzfristige Fokussierung auf die Sicherung bzw. Diversifizierung der Erdgasversorgung zu Verzögerungen bei den Lieferzeiten für Komponenten von H₂-Speichern kommen kann.

Einen weiteren Einfluss auf die technische Ausgestaltung der zukünftigen H₂-Infrastruktur wird beim vorwiegenden Import von Wasserstoff dessen Lieferform ausüben. Bisher sind für den internationalen Schiffstransport vor allem Flüssigwasserstoff (Liquid Hydrogen), Ammoniak und die sogenannten Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) in der Diskussion. Jede dieser Transportformen wird durch ihre eigenen Vor- und Nachteile charakterisiert, wobei der Transport in Form von Ammoniak aktuell die höchste technische Reife aufweist. Sollte sich diese Transportform durchsetzen, muss auch die Frage nach der Speicherform für eine Bevorratung neu gestellt werden, wobei auch hier die untertägige Speicherung in Salzkavernen aus Kapazitäts- und Sicherheitsgründen attraktiv erscheint. Auch hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Insgesamt sind die Aussichten für eine großtechnische Nutzung der hier erarbeiteten Technologien sehr positiv. Eine Nutzung der Projektergebnisse im Rahmen von Demonstrationsprojekten ist absehbar.

8.6 Literaturverzeichnis

- 50Hertz. (2016). 50Hertz Energiewende Outlook 2035. Berlin: 50Hertz Transmission GmbH.
- Adam, P., Engelshove, S., & Heunemann, F. (September 2020). Siemens Energy. Abgerufen am 14. September 2020 von <https://assets.siemensenergy>.
- Adamek, F., Aundrup, T., Glaunsinger, W., Kleinmaier, M., Landinger, H., Leuthold, M., Wellßow, W. (2012). Energiespeicher für die Energiewende. Frankfurt: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
- Adler, I. (2017). PtG-Potenziale im ONTRAS-Netzgebiet. Leipzig: Ontras Gastransport GmbH.
- Adolf, J., Balzer, C., Louis, J., Schabla, U., Fishedick, M., Arnold, K., & Schüwer, D. (2017). Shell Wasserstoff-Studie – Energie der Zukunft? Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH.
- Agricola, A.-C., Seidl, H., Mischinger, S., Rehtanz, C., Greve, M., Häger, U., & Teuwsen. (2014). dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- AK DENNOCH-STÖRFÄLLE. (1999). Abschlußbericht Schadensbegrenzung bei Dennoch-Störfällen; Empfehlungen für Kriterien zur Abgrenzung von Dennoch-Störfällen und für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen. Störfallkommission.
- Amos, W. A. (1998). Costs of Storing and Transporting Hydrogen. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL). Abgerufen von <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25106.pdf>
- Ausfelder, F. (2013). Hydrogen in the Chemical Industry. Paris: IEA Hydrogen Roadmap Europe Workshop.
- Ausfelder, F. (2015). Positionspapier Energiespeicher – Der Beitrag der Chemie. Frankfurt: Koordinierungskreis Chemische Energieforschung.
- Ausfelder, F., Beilmann, C., Bertau, M., Bräuninger, S., Heinzel, A., Hoer, R., & Ziegahn, K.-F. (2015). Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. *Chemie Ingenieur Technik*, S. 17-89.
- Bachmeier, M. (18. 10 2016). H2 Fuelling Infrastructure and Technologies. Abgerufen am 27.05.2019 von https://www.emove360.com/wp-content/uploads/2016/11/03_2016-10-18-World-Mobility-Summit-München_Linde_Bachmeier.pdf
- BAuA. (Februar 2021). TRBS 2152 Teil 2: Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre (inhaltsgleich: TRGS 722). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Abgerufen von https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-722.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bettgenhäuser, K., Grözinger, J., Petersdorff, C., & John, A. (2018). Die Rolle von Gas im zukünftigen Energiesystem. Köln: Ecofys Germany GmbH.
- BG RCI. (August 2016). T 033 – Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie. Abgerufen von https://downloadcenter.bgrci.de/resource/downloadcenter/downloads/T033_Gesamtdokument.pdf

- BG RCI. (Januar 2021). Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) DGUV Regel 113-001. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie. Abgerufen von https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL_Praevention/Explosionsschutzportal/Dokumente/EX_RL_Beispielsammlung/2021_DGUV_Regel_113-001_Titel_Inhalt_Vorbemerkungen.pdf
- BMWi. (2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Borsig GmbH. (kein Datum). Borsig Kolbenverdichter. Berlin: Borsig GmbH.
- Borsig ZM Compression. (kein Datum). Reciprocating Compressors for process gases. Abgerufen am 21.05.2019 von <https://www.borsig.de/produkte-services/verdichter/api-618-kolbenverdichter/book/pageflip/borsig-zm-compression-gmbh-reciprocating-compressors-for-process-gases/>
- Bothe, D. (2019). Power-to-X – Hype in Deutschland oder bald weltweit ein Anlagenbau-Markt? Frontier Economics Ltd.
- Bothe, D., Janssen, M., Poel, S. v., Eich, T., Bongers, T., Kellermann, J., & Kuhn, J. (2017). Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland. Brüssel, Dublin, Köln, London, Madrid: Frontier Economics Ltd.
- BP. (2016). BP Energy Outlook 2016 edition. BP p.l.c.
- Bründlinger, T., König, J. E., Frank, O., Gründig, D., Jugel, C., Kraft, P., Wolke, M. (2018). Leitstudie – Integrierte Energiewende. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- Burckhardt Compression AG. (kein Datum). B-Line - Premium und TCO-Optimiert. Abgerufen am 20.05.2019 von <https://www.burckhardtcompression.com/de/solution/kompressorsysteme/prozessgas-kompressoren-api-618/b-line/>
- BVEG-Leitfaden, „Auswirkungen von Störfällen im Speicherbetrieb auf die Nachbarschaft“, 09/2017.
- Christiani (kein Datum). Hubkolbenverdichter. Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH & Co. KG. Abgerufen am 07.06.2019 von http://www.christiani.de/pdf/77363_leseprobe.pdf
- DIN, DKE, DVGW, VDI. (2021). Deutsche Normungsroadmap Energiespeicher Version 2. Deutsches Institut für Normung e. V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- DIN, DKE, DVGW, VDI. (Februar 2016). Deutsche Normungsroadmap Energiespeicher Version 1. Deutsches Institut für Normung e. V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Verein Deutscher Ingenieure e.V. S. 72-104.
- DIN EN 61882, „HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) – Anwendungsleitfaden (IEC 61882:2016); Deutsche Fassung EN 61882:2016“, 02/2017.
- DIN EN 17124, „Wasserstoff als Kraftstoff – Produktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran (PEM)-Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge“, 07/2019.
- Doetsch, C., Grevé, A., & Rohrig, K. (2014). Abschlussbericht Metastudie „Energiespeicher“. Oberhausen, Kassel: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES.

- Christiani (kein Datum). Hubkolbenverdichter. Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH & Co. KG. Abgerufen am 07.06.2019 von http://www.christiani.de/pdf/77363_leseprobe.pdf
- Dubbel, H., Grote, K.-H., & Feldhusen, J. (2011). Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- DVGW G 260, Arbeitsblatt Gasbeschaffenheit, 09/2021.
- DVWG 492 (A), Technische Regel – Arbeitsblatt, 07/ 2020.
- Ecke, J., Klein, S., Klein, S. W., & Steinert, T. (2017). Klimaschutz durch Sektorenkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten. Berlin: enervis energy advisors GmbH.
- Eichhorn, A., & Rehmer, K.-P. (2014). Roadmapstudie Wasserstoffkaverne – Lokation Bad Lauchstädt. Mittenwalde: Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH.
- Eifler, W., Schlücker, E., Spicher, U., & Will, G. (2009a). Kolbenverdichter. *Küttner Kolbenmaschinen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 147-230.
- Eifler, W., Schlücker, E., Spicher, U., & Will, G. (2009b). *Küttner Kolbenmaschinen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- EIGA. (2014). HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS - IGC Doc 121/14. Brüssel: European Industrial Gases Association AISBL.
- Energieagentur NRW. (kein Datum). Druckluft - Störungsfreie, kostengünstige und energieeffiziente Bereitstellung. Abgerufen am 20.05.2019 von <http://www.energie-im-unternehmen.de/downloads/druckluft.pdf>
- Feyrer, J., Jepsen, J., & Schulz, T. (2008). Wasserstoff und dessen Gefahren – Ein Leitfaden für Feuerwehren. Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren.
- Fichtner. (2014). Erstellung eines Entwicklungskonzeptes Energiespeicher in Niedersachsen. Stuttgart: Fichtner GmbH & Co. KG.
- Fischer, T., Verse, B., & Fuchs, N. (2013). dena-Marktanalyse 2013 – Status und Ausblick für die weltweite Entwicklung Erneuerbarer Energien. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- Fürstenwerth, D., & Waldmann, L. (2014). Stromspeicher in der Energiewende. Berlin: Agora Energiewende.
- Gammer, D. (2015). The role of hydrogen storage in a clean responsive power system. Loughborough: Energy Technologies Institute.
- Ganz, K., Kern, T., Hübner, T., & Pichlmaier, S. (2019). Studie zur Regionalisierung von PtG-Leistungen für den Szenariorahmen NEP Gas 2020-2030. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH.
- Gas Infrastructure Europe (GIE). (13. 06 2022). Aggregated Gas Storage Inventory. Abgerufen von <https://agsi.gie.eu/#/>
- Gerbert, P., Herhold, P., Burchardt, J., Schönberger, S., Rechenmacher, F., Kirchner, A., & Wünsch, M. (2018). Klimapfade für Deutschland. München, Berlin, Hamburg, Basel: The Boston Consulting Group, Prognos AG.

- Godula-Jopek, A., Jehrle, W., & Wellnitz, J. (2012). *Hydrogen Storage Technologies*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Gummer, J., & Hawksworth, S. (2008). *Spontaneous ignition of hydrogen – Literature Review*. Health and Safety Executive, Health and Safety Laboratory. Buxton: HSE Books.
- Hecking, H., Hintermayer, M., Lencz, D., & Wagner, J. (2017). *Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO₂-Minderung*. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH.
- Hobohm, J., Falkenberg, H., Klotz, E.-M., Koziel, S., Mellahn, S., Graf, A., & Meyer-Ohlendorf, N. (2018). *Low Low Carbon Options and Gas Infrastructure*. Basel: Prognos AG.
- Hüttenrauch, J., Zöllner, S., Müller-Syring, G., Steffens, P., Stötzel, M., Zdrallek, M., Moser, A. (2015). Nutzen der Power-to-Gas Technologie. *energie wasser praxis*, S. 44-49.
- Hydrogen Europe. (2019). *Hydrogen Roadmap Europe*. Luxembourg: Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking.
- IFA. (2021). *GESTIS-Stoffdatenbank*. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Abgerufen von <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>
- Jentsch, M. (2015). *Potenziale von Power-to-Gas Energiespeichern – Dissertation*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Jordan, T. (2007). *Skript zur Vorlesung über Wasserstofftechnologie*. Karlsruhe. Abgerufen von http://www.hysafe.org/download/1206/Wasserstofftechnologie_160707.pdf
- Kirchner, A., Koziel, S., Mayer, N., & Kunz, C. (2016). *Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung*. Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Klein, S., Klein, S. W., Steinert, T., Fricke, A., & Peschel, D. (2017). *Erneuerbare Gase – Ein Systemupdate der Energiewende*. Berlin: enervis energy advisors GmbH.
- Kohler, S., Agricola, A.-C., & Seidl, H. (2010). *dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- Krause, U. (2020). *Auswirkungsbetrachtung von unbeabsichtigten Freisetzungen von Wasserstoff aus obertägigen Anlagen eines Kavernenspeichers*. Schlussbericht HYPOS-INES.
- Krieg, D. (2012). *Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung – Dissertation*. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek Verlag.
- KYOCERA AVX. (25. April 2022). *Geschäftsfelder – Wasserstoff*. Abgerufen von <https://www.kumatec.com/wasserstoff/>
- Landing, H., Bünger, U., Raksha, T., Weindorf, W., Simón, J., Correas, L., & Crotagino, F. (2014). *Update of Benchmarking of large scale hydrogen underground storage with competing options*. Ottobrunn, Cuarte (Huesca), Hannover: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Foundation for Hydrogen in Aragon, KBB Underground Technologies GmbH.
- LBEG. (2021). *Untertage Gasspeicherung in Deutschland*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. *Erdöl Erdgas Kohle*, 11/2021, S. 21-26.

- Lendt, B., & Cerbe, G. (2016). Grundlagen der Gastechnik: Gasbeschaffung – Gasverteilung – Gasverwendung. Carl Hanser Verlag.
- Lux, B., Sensfuß, F., Kiefer, C., Bernath, C., & Deac, G. (2021). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Energieangebot. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
- Makridis, S. (2016). Hydrogen storage and compression. *Methane and hydrogen for energy storage* (Bd. 1). Patras. Abgerufen von https://www.researchgate.net/publication/313704619_Hydrogen_storage_and_compression
- Marewski, U., Steiner M., & Engel, C. (2020). Umstellung von bestehenden Erdgasleitungen zum Transport von Wasserstoff. *energie wasser praxis*, 10/2020.
- Michalski, J., Altmann, M., Bünger, U., & Weindorf, W. (2019). WASSERSTOFFSTUDIE NORD-RHEIN-WESTFALEN. Düsseldorf: Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Mischner, J. (2021). Zur Frage der Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen. *gwf Gas + Energie*, 5/2021.
- Moser, A., Marjanovic, I., & Stein, D. v. (2018). Bewertung der Netzsicherheit bei einem „Fuel Switch“ von Braunkohle zu Erdgas in Deutschland in 2020. Aachen: Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- Mühleck, R. (2015). Konzeption und Simulation eines Wasserstoffspeichers in einem Stromverteilnetz – Masterarbeit. Dortmund: Technische Universität Dortmund.
- Müller-Syring, G., Henel, M., Poltrum, M., Wehling, A., Dannenberg, E., Glandien, J., & Ortloff, F. (2018). Transformationspfade zur Treibhausgasneutralität der Gasnetze und Gasspeicher nach COP 21. *energie wasser praxis*, 10/2018, S. 32-34.
- NASA. (1989). The hydrogen technology assessment. Abgerufen am 20.05.2019 von <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930003206.pdf>
- NCSR, INERIS. (2009). Initial Guidance for Using Hydrogen in Confined Spaces – Results from InsHyde. HySafe Network.
- Neumann & Esser (NEA Group). (kein Datum). Prozessgas-Verdichter. Abgerufen am 21.05.2019 von https://www.neuman-esser.de/fileadmin/user_upload/Broschueren/Prozessgas_DE-2014-09.pdf
- Nicolosi, M. (2014). Leitstudie Strommarkt - Arbeitspaket Optimierung des Strommarktdesigns. Berlin: Connect Energy Economics GmbH.
- Nikogosian, V., Özalay, B., & Kaltschnee, J. (2018). Wasserstoffherzeugung in Kombination mit Offshore-Windausbau. Bonn: E-Bridge Consulting GmbH.
- Nitsch, J. (2008). Leitstudie 2008 – Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

- Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Sterner, M., Gerhardt, N., & Wenzel, B. (2010). Leitstudie 2010 – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Stuttgart, Kassel, Teltow: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE).
- Ohlen, N. v. (2018). Netzentwicklungsplan Gas 2018–2028. Berlin.
- Ohlen, N. v. (2021). Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030. Berlin: Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V.
- Peter, M., Bertschmann, D., & Lückge, H. (2017). Metastudie nationale Energieszenarien und deutsche Energiepolitik. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Posch, I., & Mellahn, S. (2019). Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030 – Szenariorahmen Konsultationen. Berlin: Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V., Prognos AG.
- Reitenbach, V., & Albrecht, D. (2014). Influence of Hydrogen on Underground Gas Storage – Literature Study. Hamburg: DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe e.V.
- Repenning, J., Emele, L., Blanck, R., Cook, V., Harthan, R., Hermann, H., & Steinbach, J. (2018). Politikszenerarien für den Klimaschutz VII. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Repenning, J., Schumacher, K., Bergmann, T., Blanck, R., Böttcher, H., Bürger, V., & Wirz, A. (2019). Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung. Freiburg, Karlsruhe, Berlin, Frankfurt: Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, Prognos, M-FIVE GmbH, IREES GmbH, FiBL.
- Richwien, M., Baums, B., Rehfeldt, K., Simmering, J., Remmers, K.-H., Krömke, F., & Große. (2018). Erneuerbare Energien-Vorhaben in den Tagebauregionen. IFOK GmbH, Deutsche WindGuard GmbH, Solarpraxis Engineering GmbH, Prognos AG, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH (gemeinnützig), Becker Büttner Held PartGmbH.
- Rippel, K. M., Wiede, T., Meinecke, M., & König, R. (2019). Netzentwicklungsplan Strom 2030. Berlin, Dortmund, Bayreuth, Stuttgart: 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH.
- Schenuit, C., Heuke, R., & Paschke, J. (2016). Potenzialatlas Power to Gas. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- Schlesinger, M., Lindenberger, D., & Lutz, C. (2010). Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Basel, Köln, Osnabrück: Prognos AG, EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH.
- Schlesinger, M., Lindenberger, D., & Lutz, C. (2014). Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Basel, Köln, Osnabrück: Prognos AG, EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH.
- Schmitz, S., Kleinickel, C., Barsch, M., Schulz, P., Keßler, B., Pumpa, M., & Rockmann, R. (2018). Abschlussbericht – Wissenschaftliche Forschung zu Windwasserstoff Energiespeichern – Teilprojekt DBI „Gaseinspeisung und Untergrundspeicherung“. Freiberg.

- Schmitz, S., Kleinickel, C., Barsch, M., Schulz, P., Keßler, B., Pumpa, M., & Rockmann, R. (2018). Schlussbericht WESpe – Teilprojekt Gaseinspeisung und Untergrundspeicherung. Freiberg: DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH.
- Schraubenkompressor. (kein Datum). Schraubenkompressor Funktionsweise. Abgerufen am 20.05.2019 von <http://www.kompressor.one/07-seiten/5150-schraubenkompressor.php>
- Schröder, V. (2019). Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen – Auswirkungen auf den Explosionsschutz. Köln: DVGW-Kongress gat/wat 2019.
- Siad Macchine Impianti. (kein Datum). API618 Reciprocating Compressors for Hydrogen. Abgerufen am 21.05.2019 von https://www.siadmi.com/documents/56460/99047/174uk04_14_cpr+H2+general_low.pdf/3dbaabb6-775f-3a26-8358-bf9dfb555bab
- Siemens Energy (2020). Wasserstoffverdichter. Interview, 09/2020.
- Smolinka, T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A., Lehner, F., Jansen, M., Zimmermann, F. (2018). Studie IndWEDe - Industrialisierung der Wasserelektrolyse Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH.
- Smolinka, T., Günther, M., & Garche, J. (2011). Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Berlin: NOW GmbH – Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.
- Sterner, M., & Stadler, I. (2014). Energiespeicher. Springer Vieweg: Berlin, Heidelberg.
- Sterner, M., Thema, M., Eckert, F., Lenck, T., & Götz, P. (2015). Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Regensburg, Hamburg, Berlin: Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool, Studie im Auftrag von Greenpeace Energy.
- Stolzenburg, K., Hamelmann, R., Wietschel, M., Genoese, F., Michaelis, J., Lehmann, J., & Horvath, P.-L. (2014). Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Tändler, L. (26. Juni 2020). Wasserstoffverträglichkeit von Erdgas-Kolbenverdichtern (Mehrere Compression).
- Tanguy, P. A. (2019). The Role of Hydrogen in the Energy Transition and Beyond. Montreal: Polytechnique Montreal.
- Töpler, J., & Lehmann, J. (2014). Wasserstoff und Brennstoffzelle. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Tröster, E., Kuwahata, R., & Ackermann, T. (2011). Battle of the Grids. Amsterdam: Greenpeace International.
- Unternehmensberatung Babel. (2021). Van der Waal konstanten und Joule Thomson Koeffizienten. Abgerufen von <https://www.unternehmensberatung-babel.de/industriegase-lexikon/industriegase-lexikon-a-bis-m/joule-thomson-effekt/van-der-waal.html>

- Wallasch, A.-K., Lüers, S., & Rehfeldt, K. (2015). Weiterbetrieb von Windenergieanlagen nach 2020. Varel: Deutsche Windguard.
- Wietschel, M., Arens, M., Dötsch, C., Herkel, S., Krewitt, W., Markewitz, P., & Scheufen, M. (2010). Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Wurster, R., & Schmidtchen, U. (2011). DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium. Berlin: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.
- Wustlich, M., Brandl, A., & Kornfeld, M. (30. März 2021). Technisch-wirtschaftliche Betrachtung zur Wasserstofftauglichkeit eines Erdgas-Kolbenverdichters.
- Ziermann, A. (19. Juni 2020). Wasserstoffverträglichkeit von Erdgas-Kolbenverdichtern (Borsig ZM).

9 Bewertungsmethoden und Genehmigungsverfahren

Claudia Abdel Haq²⁰, Dr. Thomas Faber²⁰, Jörg Fröbe¹, Clemens Fröde²⁰, Benjamin Keßler²², Konrad Pfeifer²⁰, Dr. Klaus-Peter Rehmer²⁰, Monika Rockenschaub²¹, Dr. Maurice Schlichtenmayer²¹, Lina Zelter²⁰, Dr. Jochen Zemke²⁰

9.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird das geeignete Betriebsführungskonzept für den realitätsnahen Speichereinsatz einschließlich der Gesamtanlagenauslegung sowie der Sicherheits- und Genehmigungsaspekte beschrieben. Darüber hinaus wird der Anpassungsbedarf der Genehmigungsunterlagen für den Bau und Betrieb eines Kavernenspeichers für Wasserstoff dargestellt.

Im ersten Teil des Kapitels werden die Grundlagen für den Bau und Betrieb eines H₂-Kavernenspeichers vorgestellt. Hierzu gehören Nachweis- und Monitoringverfahren, Bewertungsmethoden sowie die Methodik zur Eignungsprüfung, beispielhafte Betriebsführung, Steuerungs- und Überwachungsregime der Untertage- und Obertageanlagen eines H₂-Kavernenspeichers. Im zweiten Teil werden die wesentlichen Bestandteile des Genehmigungsverfahrens diskutiert und näher erläutert. Die Ergebnisse werden abschließend als Bewertung und Handlungsempfehlungen zusammengefasst und ein Ausblick auf die Zukunft und damit verbundene Risiken und Chancen dargestellt.

9.2 Grundlagen für den Bau und die Betriebsführung einer Kavernenspeicheranlage für Wasserstoff

9.2.1 Nachweis- und Monitoringverfahren

Der Nachweis der Gasdichtheit eines Untergrundgasspeichers (UGS) unter Zuhilfenahme von Test- und Messverfahren sowie Monitoringprogrammen ist im Lebenszyklus eines Speichers von großer Relevanz. Im Rahmen des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden drei Themenblöcke untersucht:

- Loggingverfahren,
- Dichtheitstest,
- Monitoringverfahren.

Das Hauptziel der Forschungsarbeiten war, die anerkannten und erprobten Nachweis- und Monitoringverfahren aus der Erdgasspeicherung auf die H₂-Speicherung zu übertragen bzw. wenn dies nicht möglich ist, alternative Verfahren zu untersuchen und zu bewerten. Zunächst wurde eine Eignungsprüfung bisheriger Standard-Loggingverfahren im Cased-/Open-Hole- und Kavernenbereich sowie Standard-Testverfahren hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit bei der H₂-Speicherung untersucht und bewertet. Unter Einbeziehung der Ergebnisse einer Umfrage unter renommierten Serviceunternehmen wurden anschließend mögliche Unterschiede zwischen der Erdgas- und H₂-Speicherung hinsichtlich

²⁰ Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH, Berliner Chaussee 2, D-15749 Mittenwalde

²¹ ESK GmbH, Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg

²² DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Karl-Heine-Straße 109/111, D-04229 Leipzig

Mess- und Testausrüstungen, Mess- und Testanforderungen, Arbeitsabläufen und Auswerteprozessen analysiert. Weiterhin wurde geprüft, ob zusätzliche, alternative Messungen und Tests in der Errichterphase eines H₂-Speichers bzw. zu Monitoringzwecken während der H₂-Speicherung notwendig sind. Im Anschluss erfolgte die Festlegung eines Mindeststandards für auszuführende Messungen und Tests.

9.2.2 Logging

Über die gesamte Lebensdauer einer Bohrung/Kaverne ist der Zustand der Rohrtour, die Zementation der Rohrtour sowie die Kaverne selbst messtechnisch zu untersuchen, um einen sicheren und stets beherrschbaren Betrieb sicherzustellen. Der unkontrollierte Austritt von Fluiden und Gasen ist zu keiner Zeit zulässig. Dazu ist sicherzustellen, dass sich Betriebsparameter innerhalb von definierten Leistungsgrenzen befinden und somit eine Beschädigung von Barriere-Elementen ausgeschlossen werden kann. Maßnahmen zur messtechnischen Überwachung der Bohrung erfolgen in Anlehnung an geltende Regeln und Richtlinien und dienen der Aufrechterhaltung der Integrität aller Barriere-Elemente im Betrieb. Hier sei insbesondere auf den BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ (07/21) verwiesen.

Im Folgenden wird der Aspekt Logging für die für den vorliegenden Leitfaden definierten Bohrungstypen I, II und III (siehe Kapitel 2.2) sowie die verschiedenen Stadien der Bohrungs- und Kavernenhistorien I, II, III und IV (siehe Kapitel 2.2) beschrieben.

Stadium I: Basismessung nach Errichtung der Neubohrung (zutreffend für Typ II),

Stadium II: Messungen nach der Solung und vor der Umrüstung zum Gasbetrieb/zur Gaserstbefüllung mit Wasserstoff (neu errichtete Kaverne) bzw. vor Beginn der Umrüstung/ Gaswiederbefüllung (Umwidmung einer Bestandsbohrung für das Speichermedium Wasserstoff),

Stadium III: Messungen während der Gas(erst)befüllung/Soleentleerung,

Stadium IV: Messungen im H₂-Speicherbetrieb.

Stadium I: Basismessung nach Errichtung der Neubohrung (zutreffend für Typ II)

Loggingverfahren im Stadium I erfolgen zeitlich nach der Errichtung einer Speicherbohrung und vor Beginn der Solphase. Sie dienen der Erfassung der Ausgangssituation sowie dem Nachweis von der Eignung der Rohrtour für die nachfolgenden Betriebsphasen bzw. Funktionsfähigkeit der zu vermessenden Barriere-Elemente letzte zementierte Rohrtour sowie der Zementation der letzten zementierten Rohrtour. Grundsätzlich können die Messungen/Messverfahren aus der Erdgasspeicherung auch für die H₂-Speicherung übernommen werden. Es ist eine Basismessung zur Erfassung der Hinterrohrsituation (Gassättigungsmessung) durchzuführen. Vergleichsmessungen zur Überprüfung möglicher Veränderungen werden im Betrieb zyklisch und situationsabhängig wiederholt.

Barriere-Element – Zementation letzte zementierte Rohrtour

Die Zementqualität ist messtechnisch mit einer Mindestforderung von 30 m MD bzw. durch Verdrängungsberechnungen mit einer Mindestforderung von 50 m MD zu belegen. Durch Kombination verschiedener Messverfahren ist eine vollständige Zementmessung vom Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour bis zur Ackersohle durchzuführen. Es sind Verfahren zur hochauflösenden Erfassung der Zementation Casing/Zement (Zementbild) und der mittleren Zementation Casing/Zement/Gebirge einzusetzen.

Barriere-Element – letzte zementierte Rohrtour

Die letzte zementierte Rohrtour stellt in der Regel einen wesentlichen Teil der sekundären Barriere im Bohrungsausbau für den H₂-Speicherbetrieb dar. Die Rohrtour inklusive aller Rohrverbinder muss allen anzunehmenden Belastungen standhalten, welche im Zuge aller Lebenszyklen der Bohrung auftreten können. Die Rohrtour und die Rohrverbindungen müssen gasdicht sein.

Die Basismessung der letzten zementierten Rohrtour ist der Erstnachweis der Eignung der Rohrtour für den Solprozess. Die Basismessung umfasst mindestens die folgenden Positionen:

Innen- und Außenradien

Zur Überprüfung der Bohrungsintegrität sind die Innen- und Außenradien über die gesamte Bohrung mittels hochauflösenden Ultraschallverfahren zu erfassen. Die Innenradien können auch mittels eines modernen mechanischen Multifinger-Kalibers hochauflösend erfasst werden. Insbesondere die Außenradien dienen zum Nachweis möglicher Ovalitäten, welche eine Relevanz für die Außendruckfestigkeit einer Rohrtour aufweist. Der Erstnachweis dokumentiert den Ausgangszustand für nachfolgende Vergleichsmessungen und erbringt den Nachweis für die Befahrbarkeit der Rohrtour.

Wanddicken

Die Auswertung der Wanddickendaten ist ein essenzieller Bestandteil der Bohrungsbewertung. Diese Daten werden zur Berechnung der Festigkeiten für den triaxialen Spannungszustand genutzt. Zur detaillierten Aufnahme der Wanddicke werden hochauflösende Ultraschallverfahren eingesetzt. Summarische Wanddickenverfahren spielen hier eine untergeordnete Rolle.

Rohrverbindungen

Bei der H₂-Speicherung können entweder verschweißte Rohrverbinder bzw. gasdichte Verbinder zum Einsatz kommen. Zur Erfassung der Verschraubqualität ist bei gasdichten Schraubverbindern eine Basisaufnahme des Verschraubzustands mittels Kalibermessungen durchzuführen. Bei Überschreitungen von ausgewiesenen Parametern, wie vertikale Muffenlänge, Innendurchgang der Rohrverbindung oder Spaltweiten, kann der Rohrverbinder beschädigt sein.

Gassättigungsmessung

Zum Nachweis möglicher Gasmigrationen ist eine Nullmessung der anstehenden Hinterrohrsituation ohne Medium Gas hinter der Rohrtour als Basismessung durchzuführen. In Korrelation möglicher Wiederholungsmessungen lassen sich etwaige Gasmigrationen bzw. Gasakkumulationen im Hinterrohrbereich belegen.

Rechnerischer Nachweis der Festigkeiten Rohr-Zement für zukünftige Betriebszustände

Auf der Basis der Bohrlochmessdaten erfolgt ein rechnerischer Erstnachweis für die Eignung der eingebauten Rohrtour für den zukünftigen Betrieb (Solung und H₂-Speicherbetrieb). Auf Basis der real gemessenen Wanddicken und Radienwerte und unter Berücksichtigung der geplanten Betriebsparametern (z. B. Druck/Temperatur bei Ein- und Ausspeicherung) sind Trendanalysen durchzuführen. Im Ergebnis liegt ein Funktionsnachweis vor, der lokationsspezifische (Geologie), gebirgsmechanische und betriebliche Parameter berücksichtigt. Der Erstnachweis stellt die Basisdokumentation für die Eignung der Bohrung für die Solphase und den späteren H₂-Speicherbetrieb dar.

Weiterhin empfiehlt es sich, bereits im Erstnachweis eine Zementsteinbewertung auf der Basis der vorhandenen Zementationsmessung durchzuführen. Hier werden für die geplanten Lastfälle im weiteren Bohrungsbetrieb die Belastungen auf den Zementstein rechnerisch ermittelt. Sofern vorhanden sind die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen aus Laboruntersuchungen (z. B. gesteinsmechanische Laborversuche an Kernmaterial, Permeabilitätsmessungen an Salz-/Zementstein bzw. an Verbundproben aus Casing-Zement) zu vergleichen.

Stadium II: Nach Solung, vor Gaserstbefüllung mit Wasserstoff

Grundsätzlich ist nach Abschluss der Solung (bei Neulage) bzw. nach Flutung (bei Bestandskavernen) eine Endvermessung in Sole der Kaverne und des Kavernenhalsbereiches durchzuführen, um die Planungsgrundlagen für die Gas(erst)befüllung zu schaffen. Weiterhin ist die Bohrung/Bohrungskomplettierung messtechnisch zu erfassen. Hierfür sind zwei unterschiedliche Ausgangszustände für das Bohrlochmessprogramm möglich:

- die Komplettierung ist ausgebaut, letzte zementierte Rohrtour steht direkt an oder
- die Komplettierung ist eingebaut.

Barriere-Element – Zementation letzte zementierte Rohrtour

Die Zementation der letzten zementierten Rohrtour ist vor Gaserstbefüllung mit Wasserstoff erneut zu vermessen (Betriebsfall Bohrung ohne eingebaute Komplettierung). Die eingesetzten Messverfahren aus Stadium I sind zu wiederholen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

Die Ergebnisse der Basismessung nach der Solung sind als Ausgangszustand vor dem H₂-Speicherbetrieb zu betrachten.

Barriere-Element – letzte zementierte Rohrtour Basismessung vor Gaserstbefüllung

Vorausgesetzt die Bohrung ist ohne flexible Komplettierung wird die Bohrung vor der Befüllung mit Wasserstoff erneut vermessen. Die in Stadium I durchgeführten Loggingverfahren sind zu wiederholen und die Ergebnisse entsprechend miteinander zu vergleichen:

- Rohrgeometrie/Wanddicke,
- Zementationsqualität,
- Hinterrohrsituation.

Die Basismessung vor Gasbetrieb hat die Zielstellung, den Ausgangszustand nach abgeschlossener Solung (Neuanlage) bzw. nach Nutzung mit bisherigem Speichermedium (Bestandsbohrungen) zu

dokumentieren. Weiter- bzw. Neuentwicklungen von Messgeräten und/oder Loggingverfahren sind bei Eignung in das Messprogramm aufzunehmen. Hier wird darauf hingewiesen, dass die entsprechenden Messgenauigkeiten und Auflösungen bei Vergleich mit den durchgeführten Basis- Bohrlochmessungen berücksichtigt werden müssen.

Vermessung des Kavernenhalses

Der Erstnachweis des Innendurchgangs, der Geometrie, der Kontur und des vertikalen Ausmaßes des Kavernenhalses sowie des Bereiches unterhalb des Rohrschuhs ist wichtig für den laufenden Speicherbetrieb und die Berechnung von Betriebsdrücken.

Barriere Element – Förderrohrtour Basismessung vor Gaserstbefüllung

Vor Gaserstbefüllung mit Wasserstoff wird ein Erstnachweis der Förderrohrtour durch Basismessungen mittels Bohrlochmessungen durchgeführt. Dies dokumentiert den Ausgangszustand der Förderrohrtour und bei Eignung auch der letzten zementierten Rohrtour (summarische Erfassung):

Innenradien/Außenradien

Der Nachweis der Innenradien und Außenradien über die gesamte Förderrohrtour dient dem Nachweis des Barriere-Elements Förderrohrtour. Im Grunde ist die Bohrlochmesskampagne der Förderrohrtour vor Gaserstbefüllung der Erstnachweis und auch die Aufnahme des Ausgangszustandes für nachfolgende Vergleichsmessungen im H₂-Speicherbetrieb. Es sind die für Stadium I benannten Verfahren zu nutzen.

Wanddicken

Die Auswertung der Wanddickendaten ist ein essenzieller Bestandteil der Bohrungsbewertung. Diese Daten werden zur Berechnung der Festigkeiten für die triaxialen Spannungszustände genutzt. Zur detaillierten Aufnahme der Wanddicke werden hochauflösende Ultraschallverfahren eingesetzt. Elektromagnetische Wanddickenverfahren werden unter der Maßgabe eingesetzt, den summarischen Zustand der Förderrohrtour und der letzten zementierten Rohrtour als Basismessung aufzunehmen.

Rohrverbindungen

Bei der H₂-Speicherung können entweder verschweißte Rohrverbinder oder gasdichte Verbinder zum Einsatz kommen. Es sind die Messverfahren analog zu Stadium I anzuwenden.

Rechnerischer Nachweis Förderrohrtour

Auf der Basis der Bohrlochmessdaten erfolgt ein rechnerischer Erstnachweis für die Eignung der eingebauten Förderrohrtour für den zukünftigen Betrieb (H₂-Speicherbetrieb). Hier werden die unmittelbar vor Beginn des Gasspeicherbetriebes real gemessenen Wanddicken und Radienwerte genutzt und wiederum auf der Basis der geplanten Betriebsparameter Trendanalysen durchgeführt. Im Ergebnis liegt ein Funktionsnachweis vor, der lokationsspezifische (Geologie), gebirgsmechanische und betriebliche Parameter berücksichtigt. Bereits im Erstnachweis wird eine Trendbewertung für den Lebenszyklus des H₂-Speicherbetriebs durchgeführt.

Gassättigungsmessung

Sofern messtechnisch umsetzbar ist eine erste Wiederholungsmessung der Gassättigung zur Überprüfung der anstehenden Hinterrohrsituation durchzuführen. Diese Messung gilt dementsprechend wiederum als Basismessung zur Korrelation möglicher Wiederholungsmessungen im Betrieb unter Gas.

Gleichzeitiger Einbau – Förderrohrtour und letzte zementierte Rohrtour

Förderrohrtour

Bei der Installation eines Doppelrohrschuhes ist die Förderrohrtour ebenfalls ein Element der zukünftigen primären Barriere. Die Anforderungen entsprechen den in Kapitel 7 (Barriere-Elemente) dargestellten Bedingungen.

Zementation letzte zementierte Rohrtour

Für die zeitgleich installierte letzte zementierte Rohrtour ist die Zementqualität messtechnisch zu belegen mit einer Mindestforderung von 30 m MD. Voraussetzung ist, dass die Zementation der letzten zementierten Rohrtour als Barriere-Element gelten soll. Eine Zementmessung muss den Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour erfassen.

Letzte zementierte Rohrtour

Bei der Installation eines Doppelrohrschuhes ist die letzte zementierte Rohrtour ein Element der zukünftigen sekundären Barriere. Die Rohrtour inklusive aller Rohverbinder muss allen anzunehmenden Belastungen standhalten, welche im Zuge aller Lebenszyklen der Bohrung auftreten können. Die Rohrtour und die Rohrverbindungen müssen gasdicht sein.

Stadium III: Messungen während der Gas(erst)befüllung/Soleentleerung

Analog der Gas(erst)befüllung mit Erdgas wird bei Befüllungsprozessen mit Wasserstoff ebenfalls von einem temporären Betrieb ausgegangen. Die Messungen des Stadium III beziehen sich daher auf die Kaverne und den Entleerungsprozess, z. B. die Durchführung von Gas-Sole-Messungen zum Abgleich zwischen vermessenem und entleertem Volumen. Messungen an Entleerungsrohr Touren während des Entleerungsprozesses sind bei H₂-Anwendungen nicht vorgesehen.

Stadium IV: Messungen im Wasserstoffspeicherbetrieb

Im Lebenszyklus der H₂-Speicherung sind Messverfahren zur Überwachung des Bohrungszustands durchzuführen. Sie dienen der Vorbeugung des Versagens von Barriere-Elementen. Wiederholungsmessungen sollten zyklisch unter Berücksichtigung eines sinnvollen zeitlichen Abstandes oder ereignisorientiert erfolgen (siehe BVOT, 2022). Zum besseren Vergleich der Messergebnisse sind die im Stadium II angewandten Logging-Verfahren mit den gleichen Zielparametern zu verwenden.

Grundsätzlich sind zwei unterschiedliche Ausgangspunkte bei der Durchführung von Loggingverfahren zu berücksichtigen:

- Komplettierung ist ausgebaut, letzte zementierte Rohrtour steht an,
- Komplettierung ist eingebaut, Kaverne ist gasgefüllt (Wasserstoff).

Barriere Element – Zementation letzte zementierte Rohrtour Wiederholungsmessung

Die Zementation der letzten zementierten Rohrtour ist, sofern die Komplettierung zu Wiederholungsmessungen ausgebaut wurde, mindestens mit den in Stadium I eingesetzten Messverfahren zu vermessen. Dabei ist zu gewährleisten, dass die eingesetzten Messverfahren in dem eingesetzten Bohrlochmedium eine auswertbare Ergebnisantwort liefern. Der Einsatz von akustischen Messverfahren ist in gasförmigen Medien nicht möglich, sodass für deren Einsatz die Bohrung mit Flüssigkeit zu füllen ist. Die erhaltenen Ergebnisse sind mit den Ergebnissen der Basismessung zu vergleichen.

Barriere Element – letzte zementierte Rohrtour Wiederholungsmessungen

Die letzte zementierte Rohrtour ist ein Element der sekundären Barriere im H₂-Betrieb. Für die Vermessung der letzten zementierten Rohrtour in Stadium IV sind zwei unterschiedliche Ausgangszustände möglich:

- Messung in flüssigkeitsgefüllter Bohrung,
- Messung unter Gas.

In flüssigkeitsgefüllten Bohrungen sind mindestens die Verfahren nach Stadium II zu wiederholen. Bei gasgefüllten Bohrungen müssen die eingesetzten Messverfahren die Tauglichkeit zur Bewertung des Zustandes erfüllen. Dabei müssen alle untertägigen Ausrüstungsteile wie Messgerät/Kombitool, Messkabel, Schleuse, Verbindungen für den Einsatz in Wasserstoff geeignet sein („H₂-ready“). Zudem müssen die eingesetzten Messverfahren ein auswertbares Messergebnis in gasförmigem Medium Wasserstoff liefern.

Weiter- bzw. Neuentwicklungen von Messgeräten bzw. Loggingverfahren sind bei Eignung in das Messprogramm (Nachweis der Eignung für Gasbetrieb) zu berücksichtigen. Hier wird darauf hingewiesen, dass die entsprechenden Messgenauigkeiten und Auflösungen beim Vergleich mit den im Stadium II durchgeführten Messverfahren berücksichtigt werden müssen. Nur Änderungen außerhalb der Messgenauigkeiten können als Abweichung von den in den Basismessungen ermittelten Parametern bestimmt werden.

Im Rahmen der Interpretation und Bewertung der Messergebnisse ist ein Vergleich zwischen den bisherigen durchgeführten Messungen und den aktuellen Messungen durchzuführen. Ein wesentlicher Bewertungsschwerpunkt ist eine mögliche Änderung im Bohrungsausbau. Wird diese nachgewiesen, so sind die Ursachen sowie die Auswirkungen der Veränderungen auf den zukünftigen Betrieb zu bewerten. Hier werden Einflüsse wie Korrosion/Abrasion, Materialbeanspruchungen durch Wasserstoff aber auch mögliche Gasakkumulationen im Hinterrrohrbereich gesehen. Diese Bewertung ist Bestandteil eines Funktionsnachweises.

Funktionsnachweis

Im Nachgang zu jeder Wiederholungsmessung im H₂-Betrieb ist ein Funktionsnachweis zu erstellen. Er enthält einerseits den rechnerischen Nachweis des Integritätsstatus (inklusive Trendanalyse) der vermessenen Rohrtour und andererseits eine Bewertung und Risikoanalyse möglicher messtechnisch erfasster Veränderungen im Bohrungsausbau basierend auf den aktuell vorliegenden Messergebnissen. Jegliche Berechnungen und Bewertungen erfolgen in Anlehnung an die aktuell geltenden Regeln, Normen und Leitlinien.

Der daraus folgende Funktionsnachweis wird auf Basis der aktuellen Messergebnisse aktualisiert. Dieser gibt den Integritätszustand für die aktuellen In-Situ-Bedingungen an. Die Trendrechnungen für die folgende Betriebszeit sind ebenfalls auf Basis der aktuellen Daten zu wiederholen bzw. zu aktualisieren.

In Stadium IV werden zur Überwachung der Zementation der letzten zementierten Rohrtour Zementsteinbewertungen durchgeführt, insbesondere wenn Änderungen in den Belastungszuständen im Betrieb vorliegen. Dadurch ist es möglich, gegebenenfalls unzulässige Beanspruchungen des Zements im Ringraum aufzeigen. Diese können zu Undichtheiten im Bohrungsbetrieb führen.

Barriere Element – Förderrohrtour Wiederholungsmessungen

Die Förderrohrtour ist ein Barriere-Element der zukünftigen primären Barriere. Sie steht direkt mit dem Speichermedium Wasserstoff in Kontakt.

Für die Vermessung der Förderrohrtour sind zwei unterschiedliche Ausgangszustände möglich:

- Messung in flüssigkeitsgefüllter Bohrung,
- Messung unter Gas.

In flüssigkeitsgefüllten Bohrungen sind mindestens die Verfahren nach Stadium II zu wiederholen.

Bei gasgefüllten Bohrungen müssen die eingesetzten Messverfahren die Tauglichkeit zur Bewertung des Zustandes erfüllen. Dabei müssen die Messgeräte/Kombitools sowie Ausrüstungsteile wie Messkabel, Schleuse, Verbindungen für die Messung unter Wasserstoff geeignet sein („H₂-ready“). Zudem müssen die eingesetzten Messverfahren ein auswertbares Messergebnis in gasförmigem Medium liefern.

Ein wichtiger Aspekt bei turnusmäßiger Vermessung von Barriere-Elementen, welche direkten Kontakt mit dem Speichermedium Wasserstoff aufweisen, ist die Detektion und Überwachung von Mikrorissen und Risswachstum. Die verwendeten Messverfahren müssen eine hohe Messgenauigkeit aufweisen, damit Risswachstum außerhalb von Messgenauigkeiten nachgewiesen werden kann. Das Risswachstum ist besonders bei einer häufigen Beanspruchung durch Wechsellasten (Ein- und Ausspeisevorgänge) zu beobachten.

Weiter- bzw. Neuentwicklungen von Messgeräten bzw. Loggingverfahren sind bei Eignung in das Messprogramm (Nachweis der Eignung für Gasbetrieb) zu berücksichtigen. Hier wird darauf hingewiesen, dass die entsprechenden Messgenauigkeiten und Auflösungen beim Vergleich mit den in Stadium II durchgeführten Messverfahren berücksichtigt werden müssen. Nur Änderungen außerhalb der Messgenauigkeiten können als Abweichung von den in den Basismessungen ermittelten Parametern bestimmt werden.

Funktionsnachweis

Im Nachgang zu jeder Wiederholungsmessung im H₂-Betrieb ist ein Funktionsnachweis zu erstellen. Er enthält einerseits den rechnerischen Nachweis des Integritätsstatus (inklusive Trendanalyse) der vermessenen Rohrtour und andererseits eine Bewertung und Risikoanalyse möglicher messtechnisch erfasster Veränderungen im Bohrungsausbau basierend auf

den aktuell vorliegenden Messergebnissen. Jegliche Berechnungen und Bewertungen erfolgen in Anlehnung an die aktuell geltenden Regeln, Normen und Leitlinien.

9.2.2.1 Well-Logging-Verfahren

Multifinger-Kaliber

Messparameter (siehe Tabelle 90)

Mit Hilfe des Multifinger-Kalibers können die Innenradien/Innendurchmesser der Rohrtour bestimmt werden. Zusätzlich sind lokale Innenradienbeschädigungen detektierbar. Es ist weiterhin möglich, die verschraubten Rohrverbindungen zu vermessen. Für eine solche Bewertung müssen Parameter wie vertikale Ausdehnung, Innendurchgang und Auffälligkeiten im Vorfeld analysiert werden. Die Rohrverbinderanalyse der verschraubten Verbinder wird primär mit dem Multifinger-Kaliber durchgeführt. Dazu ist eine angemessene Messgeschwindigkeit (nach internen Erfahrungen mindestens 7 m/min) und eine vertikale Abtastrate von 0.1" notwendig. Hier stehen moderne High-Resolution-Verfahren zur Verfügung. Mit geringeren Messgeschwindigkeiten wird die Wahrscheinlichkeit eines Hängenbleibens der Kaliberarme im Bereich des Verbinders erhöht. Bei einer verringerten vertikalen Abtastrate kann es zu Problemen bei der Ansprache der Verbinder kommen. Dieses Messverfahren hat für die oben genannten Messparameter die höchste vertikale Abtastrate.

Tabelle 90: Messgenauigkeiten Multifinger-Kalibermessung (Beispiel)

Messgerät (Firma)		Multifinger-Tool		
		MSC60 (Weatherford)	PMCT-G (Schlumberger, InWaTec Com- bined)	MFC 60 (Multiline, ANTARES)
Abtastrate	vertikal (HighRes)	2,5 mm	2,54 mm	2 mm
	azimutal	6° / 60 Arme	6,4° / 56 Arme	6° / 60 Arme
Messgenauigkeit absolut	Innenradius	± 0,3 mm	± 0,762 mm (0,03")	± 0,762 mm (0,03")
	Innendurchmesser	± 0,6 mm	± 1,524 mm (0,06")	± 1,524 mm (0,06")
Armform		rechteckig	„L-förmig“	„L-förmig“

Vor- und Nachteile des Messverfahrens

Das Multifinger-Kaliber gibt einen sehr detaillierten Überblick über die Rohrinnegeometrie. Jedoch kann nicht die gesamte Innenwand der Rohrtour mit diesem Gerät abgebildet werden, da zwischen den Fingern ein „toter Blickpunkt“ ist. Aufgrund fehlender Orientierung bei den meisten Multifinger-Kalibern kann es zu unterschiedlichen Orientierungen der Messungen kommen. Die vertikale Abtastrate des Multifinger-Kalibers ist zumeist von der Übertragungsrate der Telemetrie an den Messwagen abhängig. Dies beeinflusst dementsprechend auch die Messgeschwindigkeit des Geräts. Eine hohe

Auflösung resultiert daher zumeist in geringeren Messgeschwindigkeiten. Eine hohe vertikale Abtastrate erfasst mehr Punkte der Bohrung. Die Darstellungen der Servicefirmen zeigen für alle Messkurven einen kontinuierlichen Verlauf. Jedoch findet im Intervall zwischen zwei Messpunkten keine Datenaufnahme statt. Das Multifinger-Kaliber reagiert empfindlich auf Ablagerungen an der Bohrlochwand. Bei Messgenauigkeiten von bis zu 0,5 mm radial, verfälschen Beaufschlagungen auf der Innenkontur der Rohrtour die erhaltenen Messergebnisse. Eine Einschränkung bezüglich des Messmediums besteht theoretisch nicht. Die Arme des Multifinger-Kalibers können in jedem Messmedium ausgefahren werden. Bei der Interpretation der Messergebnisse sind immer die Messgenauigkeiten, die verfahrensgerechte Zentrierung und die kalibrierten Messbereiche zu beachten. Die üblichen Messgenauigkeiten bei hochauflösenden Multifinger-Kalibermessungen bewegen sich in vertikaler Richtung im Bereich von 2,5 mm (0,1“) bis 25 mm (1“). Die radialen Messgenauigkeiten betragen zumeist 0,4 mm bis 0,7 mm Auflösung für die Innenradienmessung.

Ultraschallmessung

Messparameter (siehe Tabelle 91)

Mit einer Ultraschallmessung werden die Parameter der Wanddicke, der Innenradien sowie die Impedanz bestimmt. Aus der Impedanz kann die Zementation zwischen Rohr/Zement abgeleitet werden.

Tabelle 91: Messgenauigkeiten Ultraschallmessverfahren (Beispiele)

Messgerät (Firma)		Ultraschall-Tool	
		URS (Weatherford)	USI (Schlumberger, InWaTec Combined)
Abtastrate	vertikal	2,5 cm (ca. 1“)	1,5" oder 0,5"
	azimutal	5°	5° / 10°
Messgenauigkeit absolut	Innenradius	± 1 %	± 2 mm
	Innendurchmesser	± 2 %	± 4 mm
	Wanddicke	± 5 %	± 2 %
	Impedanz („Zementbindung“)	± 0,5 MRayl	± 0,5 Mrayl

Einschränkungen/Messbeeinträchtigungen

Die Ultraschallmessungen gibt n Einzelwerte pro Teufenschritt für die Impedanz, die Wanddicke und die Innenradien aus. Mit der Impedanz kann nur die Zementbindung zwischen Rohr/Zement bestimmt werden. Eine Zentrierung des Messgerätes ist von wesentlicher Bedeutung: Eine Dezentralisierung führt zu verfälschten Messwerten, da der Laufweg zur Casingwand nicht mehr für alle Messpunkte gleich ist. Das Messgerät kann in wasserbasierten Spülungen mit Dichten bis 1,92 g/cm³ (16 lb/gal) eingesetzt werden. Bei ölbasierten Spülungen liegt der Grenzwert bei 1,4 g/cm³ (11,6 lb/gal). Die

Randbedingungen für den Einsatz von Ultraschallverfahren sind eine saubere Rohrwand, durchgehend homogene Fluidbedingungen vom Rohrschuh bis Ackersohle. Die Messgenauigkeiten für die Ultraschallverfahren sind zumeist ± 2 mm für die Innenradialmessung. Die Genauigkeiten für die Wanddickenmessung ist mit 2 % angegeben und die Impedanzmessung hat eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ Mrayl. Bei Wanddicken, welche deutlich von den erwarteten Messwerten abweichen, ist eine Ermittlung der Messwerte nicht möglich. Dies ist begründet durch die Analyse des reflektierten Messsignals, welche nur in einem Wertebereich Messwerte ausgeben kann. In gasgefüllten Speicherbohrungen bzw. Kavernen ist eine Ultraschallmessung nicht möglich.

CBL-VDL (Cement Bond Log-Variable Density Log)

Messparameter (siehe Tabelle 92)

Das CBL-VDL-Messgerät ist ein akustisches Verfahren zur Bestimmung der mittleren Zementbindung zwischen dem Verbund Rohr/Zement/Gebirge.

Tabelle 92: Messgenauigkeiten Zementlog-Messverfahren

Messgerät (Firma)		Zementlog-Tool		
		HBC (Weatherford) SBT (Weatherford)	ASLT / DSLT (Schlumberger, InWaTec Combined)	RSBT (Multiline, ANT-ARES)
Abtastrate	vertikal	2,5 cm	15,24 cm	2 cm
	azimutal	keine azimutale Auflösung, um den Umfang mittelndes Messprinzip		
Messgenauigkeit	Laufzeit	$\pm 3 \mu\text{s}$	$\pm 2 \mu\text{s}$	$\pm 3 \mu\text{s}$
	Amplituden	$\pm 5 \%$ von Free-Pipe	$\pm 5 \%$ von Free-Pipe	$\pm 5 \%$ von Free-Pipe
Zementbild		Nein (HBC) Ja (SBT)	Nein	Ja

Einschränkungen/Messbeeinträchtigungen

Das CBL-VDL-Messgerät kann nur gemittelte Aussagen über den Zement treffen. Es ist nicht möglich, Kanäle oder einseitige Zementation mit diesem Gerät zu detektieren. Ebenso können keine Aussagen über die Dichtheit der Zementation getroffen werden. Eine Dezentralisierung des Messgeräts beeinflusst die Messergebnisse negativ, da das Signal einseitig einen kürzeren Laufweg zum Empfänger hat. Die Signalantwort ist dementsprechend abgeschwächt und die Zementation erscheint besser. Das CBL-VDL-Gerät kann theoretisch bei allen Bohrlochfluiden zum Einsatz kommen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass eine hydrostatische Säule für eine Signalübertragung gegeben sein sollte. Bei zu geringem Druck kommt es zu einem Signalverlust aufgrund von Dämpfung. Als Randbedingung für eine Zementlogmessung müssen möglichst homogene Fluidbedingungen vorherrschen. Die Wiederholbarkeit der CBL-VDL-Messungen ist gegeben durch einen Beleg der CBL-Amplitude in gleicher

Teufe mit einer Abweichung von bis zu 5 % vom „Free Amplitude“-Wert. Ebenso ist die Laufzeit ein Indikator für die Messqualität. Diese muss bei gleichen Messbedingungen den gleichen Wert zeigen. Ebenso sollte sie im Bereich des Erwartungswerts für die Dichte des Bohrlochfluids liegen. Die Messgenauigkeit für die Laufzeit liegt bei den üblichen verwendeten Geräten im Bereich von zwei bis vier Mikrosekunden. In gasgefüllten Speicherbohrungen bzw. Kavernen ist eine CBL-VDL-Messung nicht möglich.

Gamma Ray

Messparameter

Mit dem Gamma-Ray-Messgerät wird die radial mittlere radioaktive Strahlung aufgezeichnet. Damit können Rückschlüsse auf die Geologie gezogen werden oder eine Teufeneinhängung an radioaktiven Marken (RAM) wird vereinfacht.

Einschränkungen/Messbeeinträchtigungen

Das Gamma-Ray-Messgerät ist für Einsätze im Cased-Hole-Bereich sowie im Open-Hole-Bereich geeignet. Es zeichnet die mittlere radioaktive Strahlung je Teufenschritt auf. Das Gamma Ray kann theoretisch bei allen bekannten Bohrlochfluiden zum Einsatz kommen.

Kamerafahrt

Messparameter

Die Kamerabefahrung dient der Bewertung der Innenkontur der Rohrtour, ebenso können die Rohrverbindungen mit einer Kamerafahrt betrachtet werden. Der Messparameter der Kamerafahrt ist die radiale und axiale, teufenkorrelierte Aufzeichnung (Film).

Einschränkungen/Messbeeinträchtigungen

Die verwendeten Bohrlochfluide während der Kamerafahrt beeinträchtigen die Qualität des Bildmaterials. Kamerafahrten können nur in gasgefüllten Speicherbohrungen sowie in Bohrungen mit wasserbasierter Spülung eingesetzt werden. Die verwendeten Untertagekameras sollten eine Aufzeichnung bei kontinuierlicher Fahrt erlauben. Zudem sollten die Kamera eine vertikale sowie eine radiale Sicht zu lassen.

Elektromagnetische Wanddickenverfahren

Messparameter (siehe Tabelle 93)

Mit dem elektromagnetischen Wanddickenverfahren können Wanddickenmesswerte von hintereinander liegenden Rohrtouren sowie Risse in Rohrtouren gemessen werden. Die Rissdetektion ist über die elektromagnetischen Verfahren vereinfacht, da die induzierten Wirbelströme in Bereiche, welche verringertes Metallvolumen (Risse bzw. Wanddickenverschwächungen, Ansätze von Rissen) aufweisen, abgeschwächt werden.

Bei den gewonnenen Informationen über dahinterliegenden Rohrtouren sind die Messgenauigkeiten jedoch verringert.

Tabelle 93: Messgenauigkeiten elektromagnetische Messverfahren (Beispiele)

Messgerät (Firma)		Elektromagnetische Tools		
		EM-Pipescanner (Schlumberger)*	EMDS (z. B. BLM)	MDT (BPC / READ)
Räumliche Auflösung / Mindestdefektgröße		signifikante Defektausdehnung für die Detektion notwendig (ca. 1/9 – 1/3 des Umfangs, je nach Defektyp und Orientierung)		keine Rissdetektion
	azimutal	keine azimutale Auflösung, um den Umfang mittelndes Messprinzip*		
Messgenauigkeit	Wanddicke	± 15 %	± 10 % / 15 % (1 Rohr / 2 Rohre)	± 0,19 mm / 0,254 mm / ± 1,254 mm (1 Rohr / 2 Rohre / 3 Rohre)

Einschränkungen /Messbeeinträchtigungen

Der Einsatz von elektromagnetischen Verfahren ist grundsätzlich unabhängig vom Bohrlochfluid, in welchem sie eingesetzt werden. Bohrlochfluide mit großen Anteilen an metallischen Zusätzen (z. B. Frässpäne, o. Ä.) können zu Problemen beim Auswerten der Messung führen. Eine gute Zentrierung ist für den Einsatz von elektromagnetischen Messverfahren erforderlich. Die Messgeräte geben zumeist einen Messfehler in Prozent aus, sodass die realen Messfehler und auch die realen Messwerte nicht exakt sind. Sofern ein Rohr eine nominelle Wanddicke hat, kann diese nach API-Herstellertoleranz um -12,5 % abweichen. Die elektromagnetischen Verfahren messen zumeist keine realen Wanddicken bzw. Innenradien, sondern nur Abweichungen vom angenommenen Nominalwert. Bei vielen elektromagnetischen Messverfahren ist eine Messdatenaufzeichnung nur im „Memory Modus“ möglich. Das bedeutet, dass während der Messung keine Echtzeit-Informationen ausgegeben werden können. Kritische Bereiche innerhalb der Bohrung können erst nach der Auswertung der Daten detektiert und genauer untersucht werden. Die Daten, welche in Echtzeit angezeigt werden, dienen zur Qualitätskontrolle der Messung. Über elektromagnetische Verfahren lassen sich nur große Risse oder Defekte messen. Eine Ausdehnung von ca. 20 bis 25 % des Rohrumfangs müssen den entsprechenden Defekt aufweisen, ehe dieser detektiert werden kann.

Molchmessung

Messparameter (siehe Tabelle 94)

Über den Einsatz eines Molchs können einige der oben genannten Messverfahren ebenfalls durchgeführt werden. Es gibt Molcharten, welche über Ultraschall eine Wanddickenmessung ermöglichen, ebenso gibt es Kalibermolche zur Erfassung der Rohrinnegeometrie und Molche zur Detektion von Rissen („Magnetic Flux Leakage“-Molche, kurz MFL-Molche). Der MFL-Molch dient zur Detektion von Rissen innerhalb der Rohrtour sowie zur Bestimmung der Spaltweiten von Rohrverbindungen. Der Kalibermolch und Ultraschallmolch entspricht letztendlich den oben beschriebenen Messverfahren des Multifinger-Kalibers bzw. des Ultraschallverfahrens.

Tabelle 94: Messgenauigkeiten MFL-Molch

Messgerät (Firma)		MFL-Molch (ROSEN-Group)
Abtastrate	vertikal	1 mm dokumentiert
	azimutal	112 Sensoren, 100 % Abdeckung des Rohrumfangs azimutale Auflösung ~ Wanddicke
Messgenauigkeit	Wanddicke	± 1 mm oder ± 10 % der Umgebungswanddicke (größerer Wert zutreffend), mit 80 % Sicherheit

Einschränkungen/Messbeeinträchtigungen

Die eingesetzten Molche sind speziell für bestimmte Rohrgrößen und Durchmesser hergestellt. Daher sind nur übliche Rohrdimensionsgrößen wie 13 3/8“ Rohrtouren mit dem Molch befahrbar. Bei dem Einsatz in einer Rohrtour einer anderen Dimension kann es dazu kommen, dass ein neuer Molch gebaut werden muss. Aufgrund dieser Beschränkungen der Dimension ist vor der Befahrung mit einem Molch eine Information über die Innendurchmesser notwendig. Die Molche zeichnen alle Messdaten im „Memory Modus“ auf, sodass die Daten nicht in Echtzeit während der Messung betrachtet werden können. Eine Auswertung der Daten ist zumeist erst innerhalb von 24 Stunden nach Beendigung der Messung zu erwarten. Somit ist die Geschwindigkeit der Betrachtung bzw. Detektion von Problemstellen mittels Molch langsamer als vergleichbare Verfahren wie Multifinger-Kaliber. Die Rissdetektion mit dem MFL-Molch detektiert aufgrund von Induktion des magnetischen Flusses parallel zur Fahrtrichtung sehr gut Risse entlang der Längsachse des Rohres. Bei Rissen, welche radial zur Fahrtrichtung des Molches auftreten, ist die Auflösung deutlich verringert. Eine Anpassung der Rotationsrichtung der Induktion des magnetischen Flusses während der Messung ist nicht möglich. Die Aussagen der Firma ROSEN-Group zur Detektion von Rissen und Wanddickenänderungen werden in Aussagesicherheit und Art des Defektes unterschieden. Eine Übersicht ist in Tabelle 95 dargestellt. Bei schmalen, azimutal orientierten Rissen ist die Mindestöffnungsspaltweite von 1 mm zur Detektion notwendig. Die räumliche Ausdehnung muss in diesem Fall jedoch größer 25 mm sein. In diesem Fall ist die Detektierungssicherheit mit 90 % angegeben. Die angegebenen Detektierungsszenarien zeigen, dass eine Rissdetektion mit dem MFL-Molch möglich ist. Die Teufenreferenz der MFL-Molchmessung weicht aufgrund einer kontinuierlichen Teufenzählung von den realen Teufenwerten ab. Eine relative Korrelation mit einem Multifinger-Kaliber ist für die Teufenreferenz durchgehend zu empfehlen. Markante Punkte innerhalb der Bohrung (z. B. Rohrverbindungen, Installationselemente

wie Packer o. Ä.) können relativ miteinander verglichen werden und die MFL-Molchmessung auf die Kalibermessung korreliert werden.

Table 95: Übersicht Defektoskopie MFL-Molch (Beispiele)

Mindesttiefe, damit Defekt mit 90 % Wahrscheinlichkeit gesehen wird (bezogen auf mittlere Wanddicke des Einzelrohres)		Defektart				
		Allgemeiner Metallverlust	Lochfraß	Längsriefe	Querriefe	Querschlitz
		10 %	10 %	10 %	10 %	15 %
Aussage-sicherheit	Defekt-dimension					
80 %	Tiefe	±10 %	±10 %	±15 %	±10 %	±10 %
	Breite [mm]	±15	±12	±12	±12	±15
	Länge [mm]	±15	±10	±10	±10	±10
90 %	Tiefe	±13 %	±13 %	±20 %	±13 %	±13 %
	Breite [mm]	±19	±15	±15	±15	±19
	Länge [mm]	±19	±13	±13	±13	±13

Gassättigungsmessung

Messparameter (siehe Tabelle 96)

Eine Gassättigungsmessung kann in einem verrohrten Bereich sowie im offenen Bohrloch eingesetzt werden. Sie ermittelt durch das Aussenden von Neutronen und deren Interaktion mit dem Gestein Informationen über die petrophysikalischen Eigenschaften des Gesteins. Die Zielgröße der Puls-Neutron-Gamma-Verfahren ist der makroskopische Wirkungsquerschnitt. Mit diesem Parameter kann man petrophysikalische Größen, wie Porosität, Sättigung u. Ä. ableiten. Bei bekannten Porositäten lässt sich aus dem makroskopischen Wirkungsquerschnitt direkt die Gassättigung ableiten.

Tabelle 96: Messgenauigkeiten Gassättigungsmessung (Beispiele)

Messgerät (Firma)		Puls-Neutron-Gamma-Verfahren		
		ING (BLM Gommern)	CRE –B Tool (z. B. Weatherford)	Pulsed Neutron Tool PND (Multiline)
Auflösung	vertikal	0,1 m	38,1 cm	0,1 m
Messgenauigkeit	Sigma (makroskopischer Wirkungsquerschnitt)	± 5 %	± 2 %	± 2 %

Einschränkungen

Ein Puls-Neutron-Gamma-Verfahren kann zur Bestimmung von petrophysikalischen Eigenschaften wie Porosität und Sättigung eingesetzt werden. Ebenso können Parameter wie Gassättigung, Salzgehalt u. Ä. bestimmt werden, wenn die entsprechenden Rahmenparameter gegeben sind. Das Messverfahren kann in allen Bohrlochfluiden eingesetzt werden.

Lichtleiterwellenkabel

Messparameter (siehe Tabelle 97)Tabelle 97

Mit dem Lichtleiterwellenkabel können kontinuierliche Messungen zur Temperatur innerhalb eines Bohrloches gemacht werden. Die Datenaufzeichnung findet dabei nahezu zeitgleich für alle Teufen statt, sodass die Messung als statische Temperaturmessung angesehen werden kann. Bei Wiederholung dieser Messung erhält man eine statische Temperaturverteilung über die Zeit.

Mit dem Lichtleiterwellenkabel der Firma GESO wird ein vertikales Temperaturprofil über die Zeit aufgenommen. Somit kann eine kontinuierliche Temperaturmessung im gesamten Bohrloch durchgeführt werden.

Tabelle 97: Messgenauigkeiten Lichtleiterwellenkabel

Messgerät (Firma)		Lichtleiterwellenkabel
		GESO
Auflösung	vertikal	12,5 cm (für Kabellängen unter 5 km)
	Temperatur	0,1 K
Messgenauigkeit	Temperatur	0,5 K
Messbereich	Temperatur	-40 bis 300 °C

Einschränkungen/Beeinträchtigungen

Für die statische Temperaturmessung muss eine ausreichende Beruhigungszeit vorausgegangen sein, da Ein- und Ausspeisevorgänge das Temperaturprofil beeinflussen. Dieses Messverfahren ist in allen Bohrlochmedien einsetzbar. Da dieses Verfahren eine statische Temperaturverteilung misst, können darüber Fließwege von Medien nachgewiesen werden. Die Ausdehnung von Gas erzeugt aufgrund des Joule-Thomson-Effektes eine Abkühlung, welche mit dem Lichtleiterwellenkabel detektierbar ist.

9.2.2.2 Logging-Verfahren in Kavernen

Analog zur Erdgasspeicherung ist der Zustand von H₂-Kavernenspeichern zyklisch messtechnisch zu erfassen. Die Messintervalle ergeben sich entweder aus dem jeweiligen Prozess bzw. Betrieb (z. B. Entleerung, Speicherbetrieb), werden durch den jeweiligen Gebirgsmechaniker und der Bergbehörde vorgegeben oder werden ereignisbasierend durchgeführt. Grundsätzlich ergibt sich für die H₂-Speicherung keine Notwendigkeit, Messintervalle für Kavernenvermessungen zu intensivieren. Mit Bezug auf die verschiedenen Stadien der Kavernenhistorie können die üblichen Messungen angesetzt werden:

- Stadium I: nur bohrungsbezogene Messungen,
- Stadium II: einmalige Sonarvermessung (Kaverne, Kavernenhals) in Sole nach Einstellung des Solbetriebs (bei Neuanlage) bzw. nach Abschluss einer Flutung (bei Bestandskavernen) als Grundlage für die Umrüstung und darauffolgende Entleerung,
- Stadium III: Gas-Sole-Messungen entsprechend der Kavernenspezifik und des Entleerungsfortschrittes; ggf. Soleprobenahme mittels Wireline in einer bzw. verschiedenen Teufen als Grundlage für mikrobiologische Untersuchungen; einmalige Sonarvermessung nach Abschluss der Gas(erst)befüllung als Grundlage für die gebirgsmechanischen Festlegungen zum und als Basismessung für Wiederholungsmessungen im H₂-Speicherbetrieb,
- Stadium IV: Wiederholungsmessungen (Kaverne, Kavernenhals) zur Erfassung des jeweils aktuellen Zustands (Fokus: Konvergenz, Konturentwicklung, Auftreten von Abschalungen, Volumenumverteilung, Sumpfungwicklung) – neben ereignisorientierten Messungen gelten die üblichen Messzyklen: 1. Sonarvermessung in Gas nach fünf Jahren Speicherbetrieb, jede Folgevermessung nach weiteren fünf bis zehn Jahren Speicherbetrieb, ggf. Soleprobenahme aus dem Sumpf/Kavernentiefsten mittels Wireline gemäß den Empfehlungen der Mikrobiologen bzw. in Abhängigkeit der Reinheitsanforderungen des Speichermediums Wasserstoff.

Aufgrund der Eigenschaften von Wasserstoff können bei Ultraschallmessungen in Wasserstoff größere Reichweiten als bei Stickstoff oder Erdgas erzielt werden, da die Dämpfung des Ultraschallsignals geringer ist (Schallgeschwindigkeit ca. dreimal höher als in Erdgas). Die erzielbaren Messgenauigkeiten sind mindestens so gut wie in Erdgasumgebung. Die Messabläufe sind wie auf einem Erdgas-Kavernenspeicher. Für das obertägige Handling der Ausrüstung sind Gefährdungsanalysen durchzuführen und gesonderte Sicherheitskonzepte zu erstellen (z. B. Umgang beim Fluten und Entlasten von Schleusentechnik).

9.2.2.3 Umfrage Servicefirmen

Die Speicherung von reinem Wasserstoff in Kavernen oder anderen untertägigen Speichern steht zum Zeitpunkt der Umfragen (03/2019–03/2022) noch am Anfang der Entwicklung. Auf umfangreiche Erfahrungen von Messeinsätzen aus bestehenden H₂-Speicherprojekten kann nicht zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund sollten bestehende Loggingverfahren, sofern auswertbar, welche auf Gas- und Ölspeicherbohrungen standardmäßig zum Einsatz kommen, hinsichtlich der Einsatzmöglichkei-

ten in H₂-Umgebung geprüft werden. Im Rahmen der Laufzeit des Verbundvorhabens H₂-UGS wurden zwischen Mai 2019 und März 2022 mehrere Umfragen durchgeführt, letztmalig im März 2022. Die Ergebnisse sind in Tabelle 98 zusammengefasst.

Tabelle 98: Informationsstand, Stand März 2022

Servicefirma	Zustand Ausrüstung	Messerfahrung in Wasserstoff
InWaTec Combined	Schleuse und Kabel laut Lieferant „H ₂ -tauglich“	keine
Multiline GmbH	Schleuse und Kabel laut Lieferant „H ₂ -tauglich“, regelmäßiger Einsatz von Messgeräten und Bohrlochsicherungsequipment in korrosiven Umgebungen (Sauggasbohrungen); keine durchgeführten Messungen; Pläne zu Testständen für H ₂ -Umgebung; Dichtungsrichtung der Geräte nach Herstelleraussage jeweils „H ₂ -fest“; Zertifizierung für den Einsatz in H ₂ -Umgebung in Vorbereitung	keine
Weatherford	nicht „H ₂ -ready“	keine
BLM Storkow	nicht „H ₂ -ready“	keine
BLM Gommern	nicht „H ₂ -ready“	keine
Baker Hughes	nicht „H ₂ -ready“	keine
ROSEN-Group	teilweise „H ₂ -tauglich“, Einsatz im Bohrloch in Kombination mit der Firma Multiline	Messerfahrungen in horizontalen Pipeline-Systemen
SOCON Sonar Control Kavernenvermessung GmbH	zertifiziertes Messequipment (inklusive Schleusentechnik) vorhanden auf Basis durchgeführter Gefährdungsbeurteilung; grundsätzlich sind alle Sondentypen für den H ₂ -Einsatz geeignet	erfolgreicher Einsatz der SoMIT® und BSF2-Sonde in H ₂ -Umgebung im September 2021 (Kaverne Zuidwending ZWA8A/N.V. Nederlandse Gasunie)

InWaTec Combined

Druckausrüstung (Firma NOV)

Die Druckausrüstung ist geeignet für den Einsatz in H₂-Umgebung. Das verwendete Material ist HNBR, welches bei sauerstofffester (H₂S) Druckausrüstung zum Einsatz kommt.

Messgeräte (Firma Schlumberger)

Es bestehen keine Erfahrungen mit dem Einsatz der Messgeräte in Wasserstoff. Es gibt Ansätze zur Vermeidung des Eindringens des Wasserstoffs in die Messgeräte. Theoretisch sollten Messungen unter den Temperatur-Druck-Bedingungen von Wasserstoff möglich sein, wenn die Geräte durch V-91K-Dichtung vor dem Eindringen von Wasserstoff geschützt sind. Bezüglich des Messkabels gibt es keine Erfahrungen bzw. Informationen über die Auswirkungen von Wasserstoff.

Kabel (Firma Goes)

Es bestehen keine Erfahrungen und keine Zertifizierungen für den Einsatz in H₂-Umgebung. Nach Aussage der Firma ist das Einsatzrisiko des Kabels gering

Multiline GmbH

Es bestehen keine Erfahrungen mit dem Einsatz der Ausrüstung in Wasserstoff. Es laufen Zertifizierungsprozesse und Tests zur H₂-Tauglichkeit der Ausrüstung. Die Ausrüstung ist grundsätzlich H₂S-fest. Laut Zulieferern eignen sich die entsprechenden Druckausrüstungskomponenten und Kabel zum Einsatz unter H₂-Bedingungen.

Weatherford

Es bestehen keine Erfahrungen mit dem Einsatz der Ausrüstung in Wasserstoff. Es sind auch keine Informationen über Zertifizierungen von Bestandteilen der Druckausrüstung (z. B. Schleusenrohre) vorhanden.

BLM Storkow

Es bestehen keine Erfahrungen mit dem Einsatz der Ausrüstung in Wasserstoff. Die elektromagnetischen Wanddickenmessungen werden in Zusammenarbeit mit der Firma SOCON durchgeführt. SOCON sagt, dass ihre Ausrüstung „H₂-ready“ sei.

BLM Gommern

Es bestehen keine Erfahrungen mit dem Einsatz der Ausrüstung in Wasserstoff.

Baker Hughes

Es bestehen keine Erfahrungen mit dem Einsatz der Ausrüstung in Wasserstoff.

ROSEN-Group

Es bestehen keine Erfahrungen mit dem Einsatz der Ausrüstung in Wasserstoff in Cased-Hole-Messungen. Im Bereich der Rohrleitungsuntersuchungen wurden bereits Erfahrungen mit Wasserstoff als Treibmedium gemacht. Dabei wurden spezielle MFL-A ATEX zertifizierte Molche verwendet.

Nach Rücksprache mit den Messfirmen für Well Logging im März 2022 ist bei der überwiegenden Anzahl der Firmen keine Entwicklung auf dem Gebiet der Bohrlochmessungen in H₂-Umgebung zu erkennen. Die Firma Multiline ist mit dem Bohrlochsicherungsequipment nach Herstellerangaben für den Einsatz in H₂-Umgebung gerüstet. Der Einsatz unter korrosiven Bohrlochbedingungen ist nach Firmenaussage durch den regelmäßigen Einsatz der Messgeräte und der Schleusenausrüstung auf Sauer gasbohrungen gegeben. Des Weiteren sind die Installation und der Aufbau eines Teststandes zur Durchführung von Bohrlochmessungen unter H₂-Bedingungen mit Kunden der Firma im Gespräch. Die Umsetzung für den Aufbau und die Durchführung entsprechender Teste befindet sich in der Planungsphase. Eine Realisierung wird im Verlaufe des Jahres 2022 angestrebt.

Für den Logging-Einsatz in Kavernen gibt es für den H₂-Einsatz geeignete und zertifizierte Messausrüstungen. Die Firma SOCON bietet alle erforderlichen Messungen an und konnte bereits während eines Messeinsatzes in Zuidwending, Niederlande, erste Ergebnisse unter realen Bedingungen erzielen. Es wurden die SoMIT- und BSF2-Sonde getestet. Wichtige Erkenntnisse aus dem Realeinsatz in H₂-Umgebung waren (ECHONews 2021, Roordink & Hydl, 2021):

- Die volle Funktionsfähigkeit der getesteten Sonden in H₂-Umgebung konnte nachgewiesen werden;
- Die Ankoppelung des ausgesendeten Ultraschallsignals an das Medium Wasserstoff ist besser als an Stickstoff (während Testarbeiten);
- Die erzielbaren Reichweiten in Wasserstoff sind größer und die Dämpfung des ausgesandten Ultraschallsignals ist geringer als in Stickstoff;
- Die gemessene Schallgeschwindigkeitsmessstrecke (BSF2) ist erheblich höher als in Stickstoff oder Erdgas;
- Der Taupunkt konnte gemessen werden, sodass auf den Feuchtigkeitsgehalt zurückgerechnet werden könnte;
- Im Vergleich zu Erdgas waren andere Messfrequenzen erforderlich;
- Für Ultraschallmessungen in Wasserstoff konnten extrem große Reichweiten erzielt und die Ergebnisse, die schon mit der SoMIT-Sonde festgestellt wurden, konnten bestätigt werden.

Die französische Firma Flodim, die über eine vergleichbare Messausrüstung verfügt bzw. vergleichbare Serviceleistungen wie SOCON anbietet, hat zurzeit keine für den H₂-Einsatz zertifizierte Ausrüstung. Etwaige Messungen in H₂-Umgebung haben noch nicht stattgefunden.

9.2.2.4 Logging in Wasserstoffumgebung

Wie bei Einsätzen im Rahmen der Erdgasspeicherung können akustische Messverfahren wie CBLVDL oder Ultraschallmessungen nicht in Gas durchgeführt werden. Für die Untersuchung der Speicherbohrung mit diesen Verfahren muss die Bohrung mit Flüssigkeit gefüllt werden. Eine Alternative ist der Einsatz von Messverfahren mit gleichen Zielparametern. Ersetzende Verfahren für die Ultraschallmessverfahren sind primär elektromagnetische Messverfahren. Diese weisen zumeist eine ge-

ringere Auflösung auf oder die entsprechenden Messfehler werden in einem prozentualen Wert angegeben. Dabei werden die Innenradien bzw. Wanddicken als nominell angenommen. Somit können die erhaltenen Messwerte verfälscht sein. Zumeist erfolgt bei den elektromagnetischen Verfahren auch keine Echtzeitdatenübertragung, sodass eine Auswertung nachträglich erfolgen kann. Bei turnusmäßigen Wiederholungsmessungen ist dies zumeist akzeptierbar. Bei ereignisorientierten Messungen ist eine sofortige Auswertung jedoch unabdingbar.

Eine Alternativmessung für das Zementlog ist auf dem Markt nicht bekannt.

Die weiteren untersuchten Messverfahren (z. B. Multifinger-Kaliber, Kamera, MFL-Molch usw.) funktionieren unter theoretischer Berücksichtigung im Medium Wasserstoff.

Da, wie oben bereits erwähnt, die Speicherung von reinem Wasserstoff oder auch teil-H₂-gesättigter Medien noch in den Anfangsstadien der Entwicklung steht, sind die entsprechenden Logging-Verfahren, wie aus den Antworten der angefragten Servicefirmen zu entnehmen war, nahezu durchgehend nicht in Wasserstoff erprobt. Ebenso sind die Messfirmen nicht durchgehend vorbereitet auf einen Messeinsatz mit Wasserstoff als Medium. Die Firmen InWaTec Combined und Multiline weisen bei ihren Schleusenausrüstungen auf eine Eignung im sauerstofffesten Bereich hin. Nach Angaben des Herstellers sollten die entsprechend verwendeten Materialien auch in der Umgebung von Wasserstoff einsetzbar sein. Die Firma Multiline befindet sich bereits in Zertifizierungsabläufen für den Einsatz in H₂-Umgebung für die entsprechende Druckausrüstung. Die Firma ROSEN-Group hat im Zuge der Vermessung von Rohrleitungssystemen bereits Erfahrung im Umgang mit Wasserstoff. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die in Bohrlöchern verwendeten Molche durchaus von den in Rohrleitungssystemen eingesetzten Molchen abweichen können. Die durchgeführten Molchmessungen in Speicherbohrungen und Kavernen werden zudem mit der Messfirma Multiline durchgeführt. Diese befinden sich, wie bereits erwähnt, im Zertifizierungsprozess.

Fazit

Die Messverfahren, welche im Zuge der Errichtung, Solung und des Betriebes einer H₂-Kaverne eingesetzt werden, sind grundsätzlich bekannt. Der Kontakt der Messgeräte und zugehörigen Druckausrüstungskomponenten mit dem Speichermedium Wasserstoff geschieht grundsätzlich nur in der Betriebsphase. In den Phasen der Errichtung und Solung stehen Flüssigkeiten als Medium in der Bohrung. Das Messen innerhalb dieser Medien ist für die oben aufgeführten Messverfahren durchgängig möglich, sodass eine vollständige Basismessung durchgeführt werden kann. Diese wird als Grundzustand für die folgenden Basismessungen im H₂-Betrieb verwendet. Wiederholungsmessungen während des H₂-Betriebes sollten turnusmäßig durchgeführt werden. Bei diesen Wiederholungsmessungen sollten mindestens die während der Basismessungen durchgeführten Messungen wiederholt werden oder es sollten Verfahren verwendet werden, welche die gleichen Zielparameter aufweisen wie die Verfahren zur Erfassung des Ausgangszustandes. Zusätzlich können ereignisorientierte Messungen durchgeführt werden. Diese sollten Ergebnisse liefern, welche einen Vergleich zu den Basismessungen zu lassen. Des Weiteren sollten diese Verfahren zusätzliche Informationen bereitstellen. Hierbei können interessante Bereiche gesondert untersucht werden, ohne eine vollständige Wiederholungsmessung durchführen zu müssen. Jedoch sollte eine ereignisorientierte Messung nicht die turnusmäßige Basismessung ersetzen, sofern nur bestimmte Bereiche untersucht wurden.

Während des H₂-Betriebs gibt es zwei unterschiedliche Ausgangszustände. Eine gasgefüllte Förderrohrtour bzw. letzte zementierte Rohr tour und eine flüssigkeitsgefüllte Förderrohr tour bzw. letzte zementierte Rohr tour. Im Falle der flüssigkeitsgefüllten Bohrung kann ein analoges Messprogramm zu den Basismessungen durchgeführt werden. Bei der Ausführung der Arbeiten in Flüssigkeit sind alle angefragten Bohrlochmessfirmen geeignet, sofern sie die entsprechenden Messgeräte bereitstellen können. Im Falle einer gasgefüllten Rohr tour (Wasserstoff) können die üblichen akustischen Messverfahren nicht angewandt werden. Zur Bestimmung von Wanddicken muss in diesem Fall primär auf elektromagnetische Messverfahren zurückgegriffen werden. Eine mechanische Erfassung der Innenkontur ist zudem weiterhin möglich. Die Vermessung in H₂-reiche Umgebung ist zumeist unerprobt. Die Firmen InWaTec Combined und Multiline verweisen über die Hersteller ihrer Druckausrüstung auf die Tauglichkeit zum Einsatz in Wasserstoff. Die Firma Multiline befindet sich zudem nach derzeitigem Kenntnisstand in Zertifizierungsprozessen der Druckausrüstung. Die Auswirkungen des Wasserstoffs auf die Messergebnisse und Messgeräte sind weitgehend unerprobt.

Zur Detektion von Rissen und Risswachstum ist der MFL-Molch zu empfehlen. Die Möglichkeit der Detektion von Rissen ist mit diesem Verfahren am besten. Die Detektierungswahrscheinlichkeit für Längsrisse mit 25 mm Länge und 1 mm Breite liegt bei ca. 90 %. Des Weiteren ist auch die Detektion von anders gerichteten Rissen und Defekten möglich. Der Wanddickenverlust im Vergleich zu umliegenden Wanddicken muss in einem Bereich von über 10 % liegen. Diese Parameter für die Detektion von Rissen zeigen, dass der MFL-Molch für diese Festmachung geeignet ist. Der Vorteil gegenüber dem Multifinger-Kaliber ist die Insensitivität gegenüber Ablagerungen und Verschmutzungen. Die genaue Lokalisierung der Fraktur muss in Kombination mit einem Multifinger-Kaliber geschehen. Aufgrund der geringen lateralen Ausdehnung und der hohen Teufenfehler des MFL-Molches ist zu empfehlen, eine Teufenzuordnung relativ zu Bezugspunkten innerhalb der Bohrung (Rohrverbindungen, Installationselemente, o. Ä.) zu machen. Für diese Korrelation ist ein Multifinger-Kaliber zu empfehlen.

Andere Messverfahren sind aufgrund der hohen Fehlertoleranzen oder der nicht geeigneten Schallphysik nicht zur Detektion von Mikrorissen geeignet. Die elektromagnetischen Messverfahren sind nicht sensitiv gegenüber kleinen Deformationen bzw. Rissen. Die Messverfahren können diese erst ab einer Ausbreitung von über 20 % des Umfanges erfassen. Eine Möglichkeit der indirekten Detektion von Rissen oder Mikrorissen geschieht über den Einsatz des Lichtleiterwellenkabels. Dort wird die zeitliche Veränderung einer statischen Temperaturverteilung über die gesamte Bohrung aufgezeichnet. Bei Fließwegen, welche durch Risse oder Mikrorisse hervorgerufen werden, ist eine zeitliche Änderung dieses statischen Systems zu erwarten. Daraus können Rückschlüsse über mögliche Risse bzw. Mikrorisse gezogen werden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Bohrlochmessverfahren bei dem Einsatz in einer H₂-Kaverne nur beeinträchtigt werden, wenn das Speichermedium während der Messung in der Bohrung verbleibt. Bei anderen möglichen Zuständen sind die Bedingungen ähnlich zu bekannten Bedingungen bei Bohrlochmessverfahren. In Tabelle 99 findet sich eine Übersicht, welche die Bohrlochmessverfahren aus Kapitel 9.2.2.1 zeigt und in welcher Phase des Lebenszyklus der Bohrung diese eingesetzt werden sollten, um die qualitativ besten Informationen zu erhalten.

Tabelle 99: Eignung Einsatz Bohrlochmessverfahren in Wasserstoff-Speicherbohrung

Stadium	Eignung Einsatz Bohrlochmessverfahren in Wasserstoff-Speicherbohrung							
	Multifinger-Kaliber	Ultraschallverfahren	Zementlog	Gamma Ray	Kamera	Elektromagnetische Verfahren	MFL-Molch	Gas-sättigung
Stadium I	+	+	(+) Ohne Ultraschallverfahren zusätzlich Zementbild zu empfehlen	+ für zukünftige Teufenkorrelation	-	-	+	+
Stadium II	+	+	+	+	-	-	+	+
Stadium IV solegefüllt	+	+	(+) Bei ausgebauter FRT (-) bei eingebauter FRT	+	(+) ereignisorientiert	-	+	+
Stadium IV gasgefüllt	++	-	-	+	(+) ereignisorientiert	+	++ zur Erfassung von Mikrorissen und Risswachstum	+

9.2.3 Teste

9.2.3.1 Grundlagen

Auf der Grundlage der bergrechtlichen Anforderungen (Bundesberggesetz, Allgemeine Bergverordnung, Bergverordnungen der Länder (BVOT, 2022) und des BVEG-Leitfadens „Bohrungsintegrität“ (2021) ist vor der Inbetriebnahme eines Kavernenspeichers der Nachweis der technischen Gasdichtheit im Rohrschuhbereich der letzten zementierten Rohrtour und der jeweiligen Rohrtouren (Produktionsrohrtour, Förderrohrtour) zu erbringen. Bei der untertägigen Erdgasspeicherung ist der Nachweis der technischen Gasdichtheit im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour unter Anwendung eines Dichtigkeitsteste (DHT, auch MIT) Stand der Technik. Prüfkriterien, Prüfzeiten sowie die Auswertungs- und Berechnungsverfahren sind aufgrund der langjährigen Testpraxis akzeptiert. Die Kriterien der technischen Dichtheit sind für Barriere-Elemente zu definieren. Gemäß des BVEG-Leitfadens „Bohrungsintegrität“ ist eine Komponente technisch dicht, wenn: „bei einer Dichtigkeitsprüfung ein definierter Grenzwert der Leckagerate eingehalten wird.“ Weiterhin sind zum Nachweis der Integrität der Bohrung bzw. der Dichtheit des Zwei-Barrieren-Systems alle weiteren Barriere-Elemente

wie z. B. die Bohrlochkopfverflanschung, das Untertagesicherheitsventil (UTSAV), Casings inklusive der Verbindungen und gegebenenfalls eingebaute Produktionspacker auf Dichtheit zu prüfen. Für die H₂-Speicherung im Untergrund fehlen bisher jedoch anwendbare Untersuchungsergebnisse, Erfahrungen und Akzeptanzkriterien.

9.2.3.2 Stand der Technik

Der Nachweis der Dichtheit eines Kavernenspeichers bezieht sich auf die letzte zementierte Rohrtour der Kaverneninstallation und auf den Verbund Rohr/Zement/Gebirge. Der Bereich des letzten zementierten Rohrschuhs stellt die Verbindung zwischen Steinsalz und der letzten zementierten Rohrtour dar und muss bei der Integritätsbewertung gesondert betrachtet werden, da er von entscheidender Bedeutung für die Integrität der Gesamtinstallation ist.

Folgende Testverfahren werden weltweit angewandt und akzeptiert:

- Above-Ground-Balance-Methode,
- In-situ-Balance-Methode,
- In-situ-Kompensationsmethode.

Alle genannten Verfahren basieren auf dem Prinzip der Massenbilanz. Ein möglicher Verlust (Leckage) wird dabei methodisch aus der Differenz der Masse des Testmediums (Stickstoff, N₂) zu Beginn und zum Ende des Testzeitraums mit Formel 46 ermittelt:

$$\Delta m_{N_2} \text{Verlust} = m_{N_2} \text{Anfang} - m_{N_2} \text{Ende} \quad \text{Formel 46}$$

Above-Ground-Balance-Method

Die Methode stellt das technisch einfachste Verfahren zur Überprüfung der technischen Gasdichtheit einer Bohrung dar. Die Masse des Prüfgases wird zum Beginn und zum Ende durch eine Volumensmessung ermittelt. Geometrische Verhältnisse im Prüfraum unterhalb des Rohrschuhes der letzten zementierten Rohrtour, Temperatureffekte und konvergenzbedingte Volumenänderungen der Kaverne werden nicht bzw. nur ungenügend berücksichtigt. Aufgrund der Ungenauigkeiten und geringeren Aussagekraft gegenüber den im Folgenden beschriebenen Verfahren wird diese Methode in Deutschland nicht mehr angewendet und wird somit auch für die H₂-Speicherung ausgeschlossen.

In-situ-Balance-Methode

In Abbildung 237 ist die In-situ-Balance-Methode schematisch dargestellt. Zur Durchführung wird zunächst ein Absperrlement, in der Regel ein Testpacker, verbunden mit einem Teststrang unmittelbar oberhalb des letzten zementierten Rohrschuhs eingebaut. Diese Anordnung schützt die Zementation der Rohrtour während der Maßnahme vor Schädigung durch zu hohen Druck. Weiterhin wird dadurch das Testvolumen minimiert, was zu einer erhöhten Genauigkeit der Messungen führt. Danach wird die Kaverne mit Sole vorgepuffert, bis der hydrostatische Testdruck erreicht ist. Dabei ist die durch das Testgas noch zu verdrängende Solemenge zu berücksichtigen. Anschließend wird das inerte Testgas, in der Regel Stickstoff, in den Teststrang eingepumpt und ein Gas-Sole-Spiegel im Kavernehals unterhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour eingestellt. Mittels einer festverankerten Spiegelmesssonde (SoMIT[®]-Messsonde der Firma SOCON) werden neben der Teufe

des Gas-Sole-Spiegels, der Druck und die Temperatur in situ während des gesamten Testzeitraums erfasst. Aus den während der Ein- und Ausfahrt der Messsonde erfassten Druck- und Temperaturprofilen (P/T) können die entsprechenden P/T-Bedingungen im gesamten Prüfraum während des Tests rekonstruiert werden. Im Falle der Dichtheit bleibt der Gas-Sole-Spiegel unter Berücksichtigung der Druck- und Temperaturänderungen über die gesamte Testdauer konstant. Im Falle einer Undichtheit entweicht das Testgas im Bereich des Rohrschuhs und führt zu einem Gasverlust im gesamten Testraum, was zu einem Anstieg des Spiegelstandes führt. Dieser Anstieg wird in Echtzeit von der Logging-Sonde gemessen. Da Volumen, Druck und Temperatur zu jedem Zeitpunkt bekannt sind, kann die entsprechende Verlustmenge jederzeit ermittelt werden. Die Verlustmenge wird durch das Einpumpen zusätzlichen Testgases kompensiert und der Spiegel wieder auf die initiale Teufe eingestellt. Dieser Vorgang wird bis zum Ende des Testintervalls wiederholt und die dabei zugeführten Gasmengen kumuliert. Die Massenbilanzierung erfolgt zwischen der Gasmenge im Testraum zu Beginn der Untersuchung und am Ende des Testes zuzüglich der Kompensationsmengen.

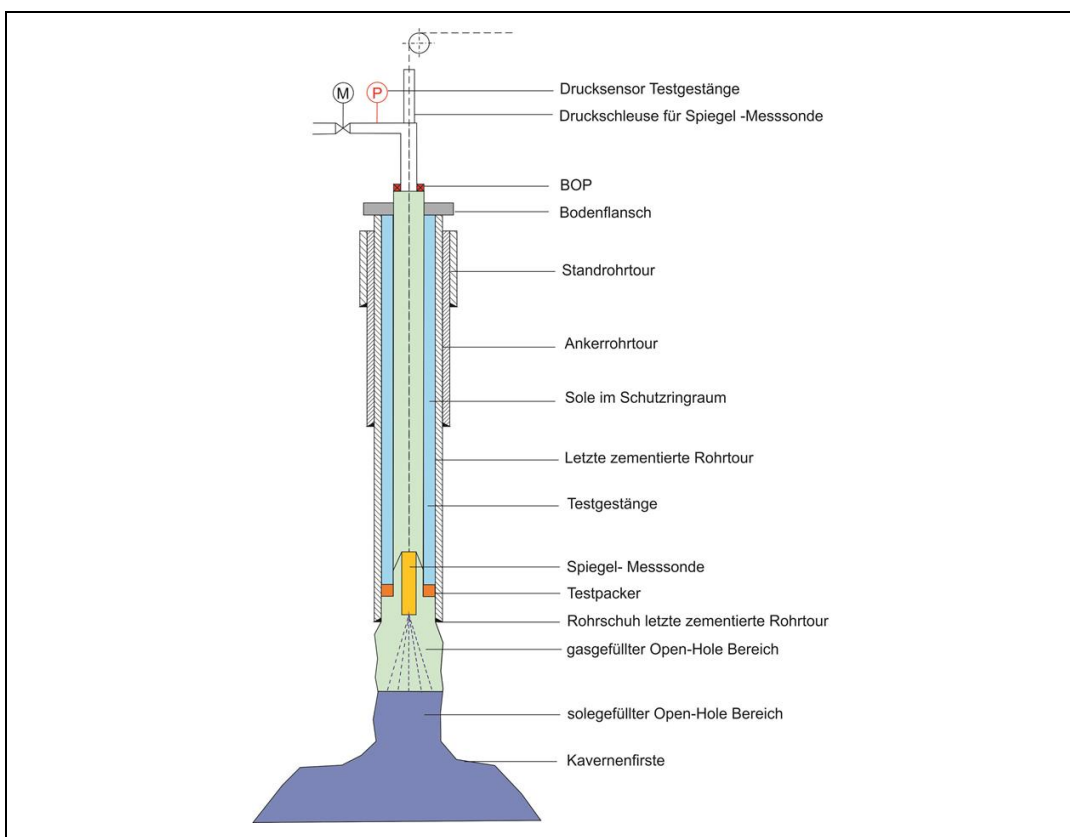


Abbildung 237: Schematische Darstellung der In-situ-Balance-Methode (SoMIT®-Verfahren)

In-situ-Kompensationsmethode

Abbildung 238 zeigt schematisch die In-situ-Kompensationsmethode. Auch hier wird unmittelbar oberhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour ein Absperrerelement gesetzt, um die Zementation vor Schädigung durch den Testdruck zu schützen und das Testvolumen zu minimieren. In den Teststrang wird ein Tubingstrang mit Perforation eingebaut (positioniert unterhalb des Rohrschuhs). Durch die Perforation kann die Tiefe des Stickstoff-Sole-Spiegels während der gesamten Maßnahme definiert eingestellt und überwacht werden; der Einsatz einer Messsonde ist nicht erforderlich. Nach Einbau des Tubingstrangs wird die Kaverne mit Sole vorgepuffert, bis der Zieldruck erreicht wird. Danach wird das Testgas in den Steigraum zwischen Test- und Tubingstrang eingepumpt und der Gas-Sole-Spiegel bis zum Erreichen der Perforation verdrängt. Der Umstieg des Gases vom Steigraum in den Tubingstrang resultiert in einem abrupten Druckanstieg am Bohrlochkopf. Dies garantiert einen definierten Spiegelstand. Bei dieser Methode werden die Druck- und Temperaturwerte am Testkopf gemessen. Mittels der ständig überwachten Werte kann die Testgasmenge zu jedem Zeitpunkt ermittelt werden. Im Verlauf der Maßnahme wird mehrfach eine definierte Menge des Testgases in den Testringraum eingepumpt. Anhand des Druckverlaufes vom Prüfringraum und Tubingstrang sowie der eingepumpten Stickstoffmenge wird für jeden Stickstoffnachschub eine separate Massenbilanz erstellt. Im Falle der Dichtheit steigt dieselbe Menge des Testgases in den Tubingstrang um und resultiert in einem Druckanstieg. Dieser Wert ist bei jeder Kompensationsphase konstant. Im Falle einer Undichtheit entweicht das Testgas im Bereich des Rohrschuhs und führt zu einem Gasverlust im gesamten Testraum, was zu einem Anstieg des Spiegelstandes führt. Während der Kompensationsphase sinkt der Spiegelstand in dem Falle wieder auf die Tiefe der Perforation ab. Die überschüssige Menge steigt in den Tubingstrang um und führt zu einem geringeren Druckanstieg am Tubingkopf.

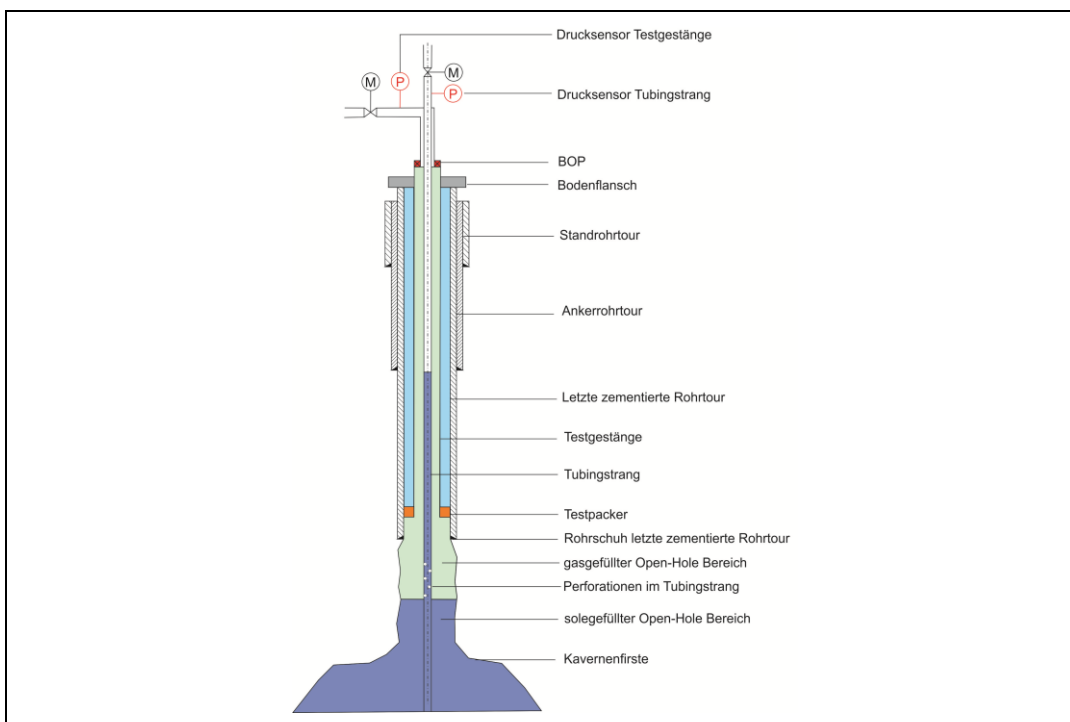


Abbildung 238: Darstellung der In-situ-Kompensationsmethode

Funktionstest Kavernenkomplettierung

Ebenso wie in der Erdgasspeicherung muss auch vor Beginn des H₂-Betriebes ein Funktionstest durchgeführt werden. Er erbringt den Nachweis zur Funktionssicherheit/Dichtheit der gesamten Komplettierung und erfolgt nach dem Abschluss der Komplettierungsarbeiten zum Beginn der Gaserstbefüllung. Im Rahmen des Funktionstestes besteht ebenfalls die Möglichkeit die Dichtheit zum Verbund Gebirge/Zementation/Casing zu überprüfen. Falls dabei Undichtheiten am Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour durch Leckageraten oberhalb des Akzeptanzkriteriums ermittelt werden, muss jedoch bei dieser Variante die gesamte Komplettierung ausgebaut werden, um gegebenenfalls Arbeiten an der letzten zementierten Rohrtour vornehmen zu können. Abbildung 239 zeigt den prinzipiellen Aufbau während des Funktionstestes. Nach Abschluss der Komplettierungsarbeiten wird die gesamte verbaute Bohrloch- und Komplettierungsstruktur einem Dichtheitstest (Funktionstest) mit dem maximal zulässigen Betriebsdruck unterzogen. Dazu wird die Sole in der Kaverne bis zum Prüfdruck vorgespannt. Anschließend erfolgt die Druckbeaufschlagung mit dem Prüfgas, in der Regel Stickstoff, im Komplettierungsringraum zwischen Soleentleerungsstrang und Förderrohrtour. Der Gas-Sole-Spiegel wird unterhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour eingestellt. Für den Fall, dass zusätzlich der zementierte Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour geprüft werden soll (kombinierter Funktions- und Dichtheitstest), erfolgen die erforderlichen Spiegelmessungen mit Impuls-Neutron-Gamma-Sonden im Steigraum des Soleentleerungsstranges. Vor der Gaserstbefüllung kann der Funktionsnachweis für die eingebaute Komplettierung auch als integraler Dichtheitstest durchgeführt werden. Durch einen mehrstufigen Ansatz mit Variation der Spiegelteufe ergibt sich so die Möglichkeit, die verschiedenen Elemente der Komplettierung und der sonstigen Installationskomponenten im Verlauf einer Testprozedur hinsichtlich ihrer Dichtheit zu prüfen. Auf diese Weise können exponierte Positionen für Undichtheiten, wie z. B. die Komplettierung, der Packer oder ein zementierter Doppelrohrliner, getrennt von anderen Funktionselementen der Komplettierung und des Bohrlochausbaus bewerten werden und die erhaltenen Ergebnisse als Basis bzw. Referenz für die Leckage- und Druckanstiegsmessungen während des Betriebes dienen.

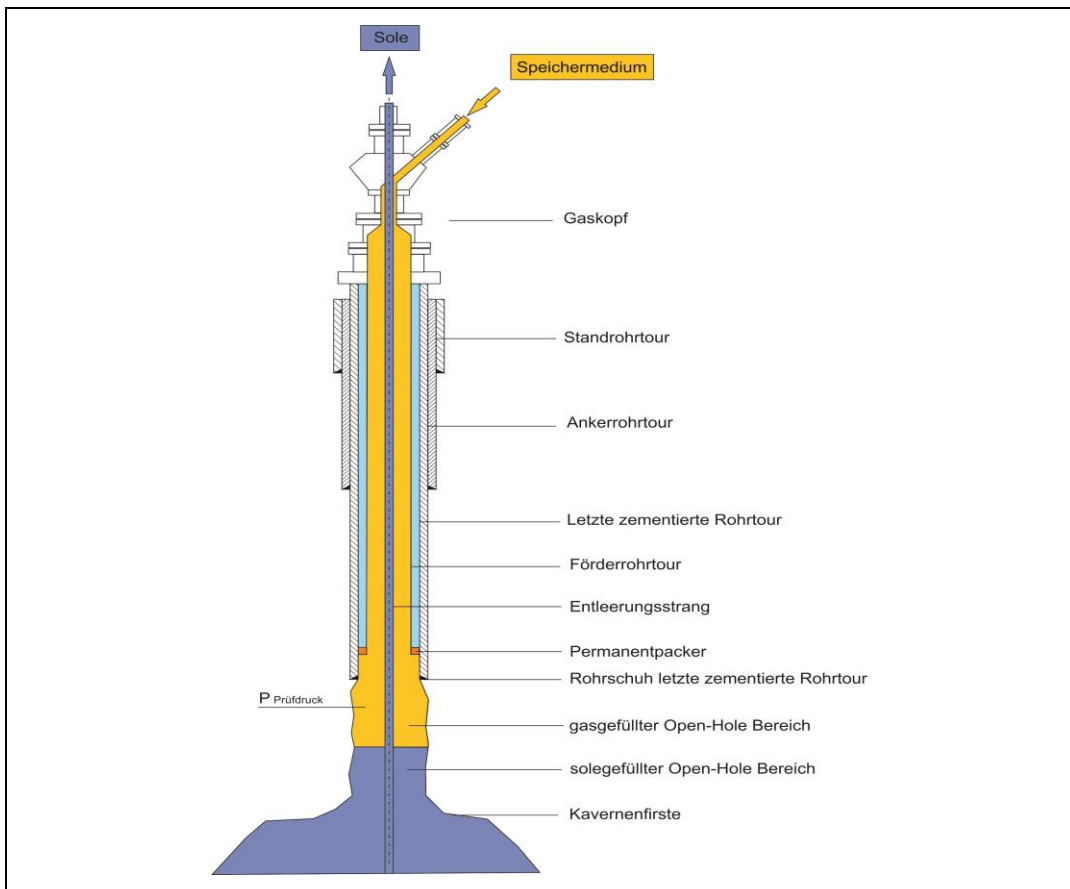


Abbildung 239: Schematische Darstellung des Funktionstestes

9.2.3.3 Allgemeine Anforderungen an Dichtheitsteste bei Wasserstoffkavernen

Testanforderungen für das SpeichermEDIUM Wasserstoff

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften gilt Wasserstoff als ein leicht zündbares Gas. Im Vergleich zu Methan liegt ein breit gefächerter Explosionsbereich mit Grenzen von 4 und 75 % vor. Gegenwärtig finden Untersuchungen zum Explosions- und Abbrennverhalten von Wasserstoff statt. In Analogie zum Umgang mit Erdgas-Kavernenspeichern und aufgrund der Kenntnislage zum Explosionsverhalten von Wasserstoff ist in der Anfangsphase der H₂-Speicherung für die Ausführung von Gasdichtheitstesten der Einsatz eines inerten Gases, z. B. Stickstoff, zu bevorzugen. Dadurch wird die Sicherheit während der Testdurchführung gewährleistet und berücksichtigt, dass das Testmedium nach Abschluss des Verfahrens in die Atmosphäre abgelassen werden kann.

Der Einsatz von Stickstoff als Testmedium für H₂-Kavernen setzt experimentell ermittelte Vergleichsparameter für Wasserstoff voraus. Dazu wurden im Verbundvorhaben H₂-UGS experimentelle Untersuchungen im Labor und unter realen Bedingungen durchgeführt (siehe Kapitel 4.4 und 7.3.3). Derzeit liegen nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. Teilweise konnten aufgrund der Randbedingungen im Labor (Versuchsaufbau) oder im Feld (geologische Einflussfaktoren im Untertageuntersuchungsgebiet) keine bzw. keine eindeutigen Ergebnisse erzielt werden, die zum gegenwärtigen Zeit-

punkt die Ableitung von verbindlichen Dichtheitskriterien für einen Wasserstoff-Dichtheitstest zulassen. Die Laborergebnisse aus dem Verbundvorhaben H₂-UGS (siehe Kapitel 7.3.3 sowie Kapitel 4.4.1, 4.5.2 und 4.6) haben jedoch gezeigt, dass Verbundproben aus Futterrohr und Zementstein die gleiche effektive Permeabilität aufweisen können wie der reine Zementstein. Nach den Untersuchungen hat der Effektivdruck (Differenz zwischen Gebirgs-/Manteldruck und Porenraumdruck/Gasdruck) einen großen Einfluss auf die effektive Permeabilität. Bei einem Effektivdruck von 6 MPa wurde eine maximale effektive Permeabilität von ca. $3 \cdot 10^{-20}$ m² ermittelt, bei einem Druck von 10 MPa ein Wert von ca. $4 \cdot 10^{-21}$ m². Diese Werte liegen deutlich unterhalb jener für Anhydrit (ein typischer Caprock) ermittelten Werte, welche im Bereich zwischen ca. $4 \cdot 10^{-19}$ bis $1,6 \cdot 10^{-19}$ m² liegen. Es lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der im Verbundvorhaben H₂-UGS untersuchten Proben im Bereich der theoretischen Grenzwerte der technischen Dichtheit liegen.

Zum Abschluss der Komplettierungsarbeiten bzw. vor dem Beginn der Gaserstbefüllung mit Wasserstoff ist der Test mit dem Speichermedium Wasserstoff durchzuführen.

Sicherheitsanforderungen bei der Testausführung

Bei der Testausführung auf H₂-Kavernen im Verlauf der Komplettierungsarbeiten, der Gaserstbefüllung und im Betrieb gelten die Bestimmungen nach dem Bundesberggesetz, der Allgemeinen Bergverordnung, der BVOT der Länder, sowie den API- und BVEG-Richtlinien. Folgende Sicherheitsanforderungen sind im Anwendungsfall zu berücksichtigen:

- API-Konformität der verwendeten Ausrüstungen,
- Einsatz geprüfter Ausrüstungen, Testkreuz, Testpacker, Drillpipe, Messequipment,
- Einsatz von EX-zertifizierten Sensoren,
- angepasste Druckauslegung und Anschlusskonformität von Testflanschen und Armaturen,
- Verwendung von Sicherungsseilen für Druckschläuche,
- Freimesseinrichtungen für anstehende gefährliche Medien,
- Testpersonal: Nachweis der Fachkunde und falls erforderlich zertifiziert nach IWCF/L4.

Es ist eine Gefährdungsanalyse für die Ausführung der geplanten Testarbeiten zu erstellen, in der die Risiken im Umgang mit Wasserstoff als Prüfmedium explizit zu adressieren sind.

Dichtheitskriterien

Die Ableitung und Festlegung von verbindlichen Dichtheitskriterien für die H₂-Speicherung (z. B. zulässige Verlustraten) ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Daher wird empfohlen, vergleichend zu testen, zunächst mit Stickstoff und anschließend mit Wasserstoff. Die genauen Festlegungen zu den Testmedien und Testabläufen richtet sich immer nach den verfügbaren Informationen zur Lokation (z. B. anerkannte H₂-Speicherung am Standort, gebirgsmechanische Untersuchungen an Kernmaterial), etwaigen vorangegangenen Teste sowie den gebirgsmechanischen Vorgaben zum Dichtheits-test. Sollten keine bis wenige Informationen zur Lokation bzw. zum Stand der Technik von H₂-Testen vorliegen, wird die Durchführung eines Dichtheitstestes mit Stickstoff und vergleichend dazu ein Dichtheitstest mit Wasserstoff empfohlen, um Rückschlüsse auf mögliche Unterschiede hinsichtlich der erreichten technischen Dichtheit zu ziehen. Ziel ist es, die aus der langjährigen Betriebserfahrung bei der Gasspeicherung abgeleiteten Prozeduren und Kriterien für die Dichtheitsteste mit Stickstoff auch für H₂-Anwendungen unter Berücksichtigung entsprechender (Sicherheits)aufschläge zu übernehmen. Um eine realistische Einschätzung zur Übertragbarkeit der Methoden und der Ergebnisse der Testprozeduren von Stickstoff auf Wasserstoff zu geben, wird zusätzlich der Abgleich zu vorhandenen Laboruntersuchungen und Ergebnissen an potenziellen Forschungskavernen (Reallabore) empfohlen. In diesem Rahmen wird auch eine ständige Überprüfung der angenommenen Akzeptanzkriterien erfolgen müssen, um für einen späteren regulären Betrieb verlässliche Grenzparameter für einen langfristig sicheren H₂-Speicherbetrieb festlegen zu können.

9.2.3.4 Testprozeduren im Ablauf der Komplettierungsarbeiten

Vorbemerkung

Bei der Neuerrichtung einer Kaverne zur H₂-Speicherung sind ausgehend von den folgenden zu testenden Barrieren bzw. Konstruktionsteilen der dazu abgeteufte Speicherbohrung vor der Inbetriebnahme (Gaserstbefüllung, Stadium III) die nachstehenden Testprozeduren durchzuführen:

- Dichtigkeitstest Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour (Nachweis der Eignung des Verbunds Gebirge/Zementation/Casing),
- Funktionstest in Verbindung mit Prüfverfahren, Zertifikaten für Einbauten (primäre Barriere: Casing Förderrohrtour, sekundäre Barriere: Casing letzte zementierte Rohrtour),
- Funktions-/Dichtigkeitstest Bohrlochkopf,
- Funktions-/Dichtigkeitstest UTSAV.

Dichtigkeitstest Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour

Die Vor- und Nachteile möglicher Testverfahren sind in Tabelle 100 gegenübergestellt.

Tabelle 100: Verfahren zum Dichtigkeitstest Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour

Testverfahren	Vorteile	Nachteile
In-situ-Balance (SoMIT®)	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Spiegelmessung, • kann ohne Work-Over Winde durchgeführt werden, • sehr schnelle Feststellung von Undichtheiten, • hohe Genauigkeit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stickstoffverluste an Hochdruckschleuse, • eingeschränkte Verfahrensänderung bei Undichtheit, • bei Unregelmäßigkeiten kostenaufwendig durch die Kosten der Messsonde, • nicht für Stufendichtigkeitstest geeignet, • größeres Prüfvolumen erforderlich.
In-situ-Kompensation	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Spiegelkontrolle, • sehr schnelle Feststellung von Undichtheiten, • sehr hohe Genauigkeit, • sehr gute Verfahrensänderung bei Undichtheit, • keine Messsonde notwendig, • für Stufendichtigkeitstest geeignet, • weniger verfahrensbedingte Leckstellen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tubingstrang notwendig • Temperatur kann nicht berücksichtigt werden

Auf Grund der dargelegten Vorteile wird bis zur endgültigen Verifizierung der Akzeptanzkriterien für den Test einer geplanten H₂-Kaverne die Anwendung des In-situ-Kompensationsverfahrens empfohlen. Damit wird auch ein kostenintensiver Einsatz, der für die In-situ-Balance-Methode erforderlichen Messtechnik, insbesondere bei ungeplanten Verfahrensanpassungen oder beim Umbau für einen Stufendichtheitstest, vermieden. Zum weiteren Abgleich der Prüfparameter sind dabei sowohl Tests mit Stickstoff als auch mit dem späteren Speichermedium Wasserstoff vorzusehen.

Akzeptanzkriterium

Belastbare Werte für die Akzeptanzkriterien von Dichtheitstests mit dem Prüfmedium Wasserstoff liegen auf der Basis von praktischen Felddaten nicht vor. Daher sind die für die Erdöl- und Erdgaskavernen bewährten Prüfparameter anzuwenden (Crotogino, 1996). Für Dichtheitstests mit dem Prüfmedium Stickstoff (aktueller Stand der Technik) gelten folgende Akzeptanzkriterien:

- ein abflachender Verlauf der Verlustrate über den Zeitraum des Dichtheitstestes,
- eine maximale Verlustrate ≤ 150 l/d (unter Prüfbedingungen) während des Dichtheitstestes,
- keine Druck- oder Gasaktivitäten in nachgeschalteten, vollzementierten oder abgepackerten Ringräumen,
- ein stabiler und gut interpretierbarer Druckverlauf an den Ring- und Steigräumen.

Für die jetzt vorgesehene Prüfung mit dem neuen Speichermedium Wasserstoff sollten die bisher verwendeten Prüfkriterien zunächst beibehalten und im Rahmen weiterer Untersuchungen bzw. betrieblicher Überwachungsmaßnahmen, wie z. B. kontinuierlicher Druckkontrolle aller Steig- und Ringräume, genauer evaluiert werden.

Prüfmedium

Die Verwendung eines inerten Gases (Stickstoff) als Prüfmedium ist mit dem Vorteil einer deutlichen Reduzierung der sicherheitstechnisch erforderlichen Maßnahmen verbunden. Langzeiterfahrungen zur Dichtheit bei Speicherung von reinem Wasserstoff fehlen ebenso wie die praktischen Erfahrungen bei der Durchführung von Dichtheitstest mit Wasserstoff. Für Wasserstoff als neues Speichermedium wird der Nachweis der Dichtheit sowohl in der öffentlichen als auch in der behördlichen Wahrnehmung nicht zweifelsfrei akzeptiert werden, wenn als Prüfmedium nicht auch das spätere Speichermedium verwendet wird. Allein aus diesem Grund sind die höheren Aufwendungen und Sicherheitsvorkehrungen für die Dichtheitsnachweise mit Wasserstoff bereits zu rechtfertigen.

Die Skalierbarkeit der Methoden und der Akzeptanzkriterien ist über vergleichende Betrachtungen bei der wechselweisen Verwendung von Stickstoff und Wasserstoff als Prüfmedium sowohl im Labormaßstab als auch in Feldversuchen bis spätestens zum Markteintritt der H₂-Technologie zu evaluieren. Für den langfristigen Einsatz bleibt so die Möglichkeit erhalten, später wieder ein inertes Gas unter den neu ermittelten Randbedingungen für die Prüfung der Dichtheit auch von H₂-Kavernen einzusetzen.

Prüfdruck

Der Prüfdruck ist wie in der bisherigen Praxis bei der unterirdischen Gasspeicherung auch in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckbelastbarkeit im Speicherhorizont auf der Basis eines gebirgsmechanischen Gutachtens festzulegen.

Testdauer

Jede Kavernenbohrung bzw. Kaverne hat eine eigene geometrische und thermodynamische Charakteristik. Es ist daher nicht möglich, für alle Kavernensysteme einheitliche Kriterien für Druck- und Temperaturänderungen infolge eines Testes festzulegen, da unter anderem die Dauer der Ausgleichsprozesse sehr stark variieren kann. Dies führt zu unterschiedlichen Sensibilitäten der Messungen und somit zu unterschiedlichen Fehlern bei der Ermittlung der Verlustrate. Während eines Dichtigkeitstests kommt es in Abhängigkeit von der Größe des Kavernensystems und des Drucks des umgebenden Gebirges zu unterschiedlichen Druckänderungen. Diese können auch im Prüfraum im Verlauf der Testdurchführung auftreten. Dabei kann entsprechend der Charakteristik des Kavernensystems der Druck sowohl steigen als auch fallen. Mögliche Verlustraten sind unter Berücksichtigung der beschriebenen Druckverläufe auszuwerten.

Für die Berechnungen der Prüfgasmasse müssen die aktuellen thermodynamischen Zustandsgrößen bestimmt werden. Bei der Ermittlung dieser Parameter tritt jeweils ein Messfehler auf, wodurch die berechnete Prüfgasmasse auch fehlerbehaftet ist. Grundsatz ist, dass die Mitwirkung nicht ausschließbarer, systematischer Fehler nur die Berechnung des maximal möglichen Fehlers erlaubt. Die gegenseitige Kompensation unterschiedlich gerichteter Einzelfehler kann im Ergebnis nicht berücksichtigt werden. Damit die ermittelten Verlustraten als Nachweis der technischen Dichtigkeit angesehen werden können, sollte der maximale Fehler 1/5 der maximal zulässigen Verlustrate nicht überschreiten. Bei einer maximal zulässigen Verlustrate von 150 l/d ist die Dichtigkeitsprüfung so durchzuführen, dass ein maximaler Fehler der Verlustrate über den Testzeitraum den Wert von 30 l/d nicht überschreitet. Die systematischen Fehler sind vor allem vom Prüfvolumen abhängig. Gleichzeitig führt eine Steigerung der Prüfgasmasse (Druck und/oder Volumen) zu einer Steigerung des Einflusses der systematischen Fehler auf die Verlustrate. Da die systematischen Fehler während der Testdurchführung konstant bleiben, verändert sich der Fehlbetrag bei der Ermittlung der Prüfgasmasse auch nicht. Durch eine Verlängerung des Testzeitraumes wird erreicht, dass der Fehlbetrag der Stickstoffmasse umgerechnet in eine Verlustrate sinkt. Aus diesem Grund muss für jeden Dichtigkeitstest die minimale Testdauer unter Berücksichtigung des Prüfvolumens berechnet werden. Zu den systematischen Fehlern bei der Ermittlung der Verlustraten treten zusätzlich nicht systematische Fehler auf. Diese Fehler werden vor allem durch Änderungen des Kavernensystems hervorgerufen. Vor allem zu Beginn der Testdurchführung findet eine Stabilisierung des Systems statt. Die hauptsächlichen Veränderungen im Kavernensystem sind wie folgt:

- thermische Angleichung des Prüfgases sowie der eingepumpten Sole an das umliegende Gebirge,
- Lösung von Prüfgas in Sole im Bereich des Spiegels,
- Anpassung des Salzgebirges an den Prüfdruck innerhalb der Kaverne.

Die Stabilisierung eines vorgepufferten Kavernensystems mit eingepumptem Stickstoff ist spätestens nach drei Tagen vollständig abgeschlossen. Aus diesem Grund ist eine Überprüfung der technischen Dichtigkeit im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour über mindestens drei Tage

durchzuführen. Dadurch wird gewährleistet, dass der Einfluss der nicht systematischen Fehler auf die ermittelte Massenbilanz im Verlauf des Testzeitraums abnimmt und keine Fehlinterpretation der Verlustatenkurve erfolgt. Durch das langsame Entstehen von Wegsamkeiten aufgrund des Prüfdruckes kann es jedoch zu einer deutlichen Verzögerung von Druckaktivitäten im vollzementierten Ringraum kommen. Ein Testzeitraum von mindestens 72 Stunden, während dessen der Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour mit dem Prüfdruck beaufschlagt ist, stellt sicher, dass mögliche Druckaktivitäten während der Testdurchführung festgestellt und das Auftreten zu einem späteren Zeitpunkt ausgeschlossen werden können.

Ausrüstung/Testequipment

Für die Durchführung eines Dichtheitstests werden in Abhängigkeit von der gewählten Testprozedur im Wesentlichen die Installationselemente Testpacker/Testgestänge, Tubingstrang und Testkopf eingebaut. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt existiert keine für die H₂-Speicherung zertifizierte Testausrüstung.

Bei herkömmlicher Gaskomplettierung (ohne Doppelrohrtour) wird der Einsatz eines Testpackers empfohlen. Dadurch ist sichergestellt, dass die letzte zementierte Rohrtour durch den Prüfdruck nicht belastet wird.

Für die Durchführung eines Dichtheitstests nach der In-situ-Kompensationsmethode wird ein spezieller Tubingstrang benötigt. Der Einsatz einer Messsonde wird überflüssig. Ein entscheidendes Kriterium für die Funktionsfähigkeit des Tubingstrangs ist seine Gasdichtheit. Da es sich bei dem Teststrang um eine temporäre Installation handelt, können weiterhin gasdicht verschraubte Verbindungen eingesetzt werden.

Bei der Auslegung des Testkopfes ist darauf zu achten, dass mögliche Verbindungen zwischen den Ringräumen und dem Steigraum als potenzielle Leckagestellen sicher identifiziert und unterbunden werden können.

Für die Rohrschuhdichtheitsteste mit Wasserstoff sind die Messleitungen elektrisch zu entkoppeln und das Testequipment so anzupassen, dass es in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden kann. Es sind EX-Drucksensoren mit dazugehöriger elektrischer Trennung der Datenerfassung und Datenauswertung sowie flexible Druckschläuche in H₂-beständiger Ausführung einzusetzen. Entsprechende EX-Zonen sind vor dem Beginn der Testarbeiten festzulegen und während des Tests zu überwachen.

Die Pump- und Entlastungsanschlüsse sollten entsprechend den geplanten Volumenströmen beim Sole-/Stickstoffpumpen ausgelegt sein, um sehr hohe Fließdrücke und Kavitation in den Anschlüssen zu vermeiden.

Testablauf

Der Dichtheitstest nach der In-situ-Kompensationsmethode umfasst grob die folgenden Arbeitsschritte:

- Einbau Testequipment und Anschluss zur Drucküberwachung/Datenaufzeichnung,
- vor Testbeginn Vorpuffern der Kaverne durch Einpumpen von Sole (Steigraum Tubing) auf einen zuvor berechneten hydrostatischen Vordruck,

- Beruhigungszeit, Einpumpen Prüfmedium in den Ringraum Tubing-Teststrang bis der Prüfgas-Sole-Spiegel die Perforationen im Tubing erreicht hat,
- Gasumschluss vom Ringraum in das Tubing zur Sicherstellung, dass Prüfgas den Bereich des letzten zementierten Rohrschuhs komplett überdeckt,
- Herstellen konstanter Prüfbedingungen (konstante Spiegelteufe), Erfassung der Nachpumpmenge,
- Testzeitraum von mindestens 72 Stunden,
- Entlastung des Prüfmediums aus dem Tubing und Ringraum Tubing-Testgestänge,

Abbildung 240 zeigt beispielhaft die Druckverläufe im Tubing und im Ringraum Tubing-Teststrang bei einem Dichtheitstest nach der In-situ-Kompensationsmethode.

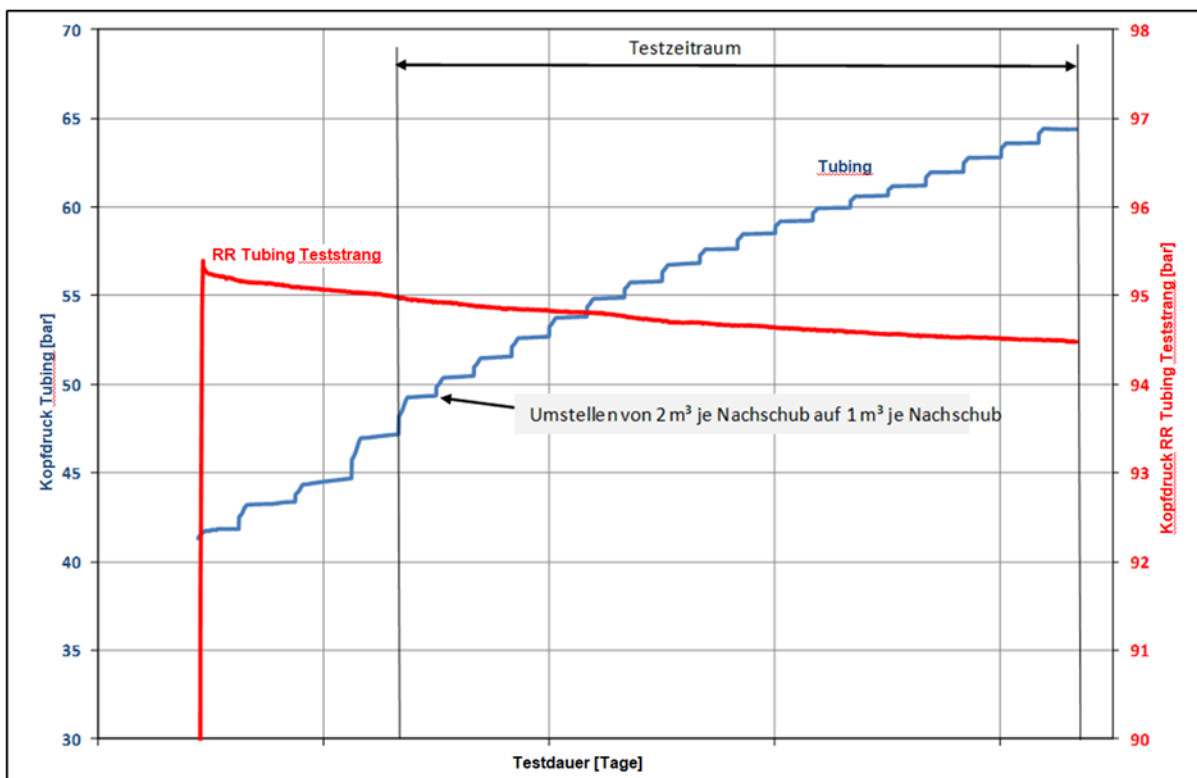


Abbildung 240: Druckverläufe im Tubing und im Ringraum Tubing-Teststrang beim Dichtheitstest

Die Entlastungsgeschwindigkeit ist bei Verwendung von Wasserstoff als Prüfmedium und bei vorhandenen permanenten Elastomerdichtungen im Prüfsystem in Abhängigkeit von den verwendeten Werkstoffen anzupassen. Da Wasserstoff aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften eine hohe Diffusionsneigung aufweist und bei hohen Drücken in diese Werkstoffe eindringen kann, besteht bei zu schneller Entlastung die Gefahr, dass bei Expansion des eingeschlossenen Gases in den Installationselementen dessen Struktur zerstört wird oder es zumindest zu Materialermüdung führt.

Bei Entlastung von Wasserstoff aus dem Prüfraum in die Atmosphäre wird wegen der damit einhergehenden besonderen Gefahren unter Berücksichtigung des Brand- und Explosionsverhalten des

Prüfmediums die Verwendung einer Heißfackel empfohlen. Damit wird gleichzeitig den Anforderungen entsprochen, wie sie z. B. in der geplanten Neufassung der BVOT für Niedersachsen (BVOT, 2022) formuliert sind. Danach ist beim Test oder Freiförden anfallendes entzündbares Gas über eine Fackelanlage gefahrlos zu verbrennen, wenn es nicht in ein vorhandenes Rohrleitungssystem abgeführt werden kann.

Für einen Dichtheitstest vor der Gaserstbefüllung kann nach der Fertigstellung der Komplettierung auch ohne den zusätzlichen Einbau des Testgestänges in analoger Weise getestet werden.

Beim Test von bereits vorhandenen Altbohrungen ist gegebenenfalls ein Stufendichtheitstest vorzusehen, um mögliche Leckagen wegen eingeschränkter Druckbelastbarkeit im Bereich von Auflockerungszonen bzw. vermindertem Kriechvermögen des die Bohrung umgebenden Salzes am zementierten Rohrschuh rechtzeitig zu detektieren und nicht mit dem vollen Prüfdruck zu beaufschlagen.

Auswertung

Die Analyse der beim Dichtheitstest aufgenommenen Daten beginnt mit der Bewertung der Entwicklung des Druckes im Ringraum zwischen Tubing und Teststrang. Hier sollten sich beim Herstellen der Prüfbedingungen, also beim gleichmäßigen Anfahren des Testdrucks durch das Einpumpen von Prüfgas aus der Druckkurve und auch aus der vorausberechneten Prüfgasmenge, keine Indikationen für Unregelmäßigkeiten innerhalb des Bohrlochs ergeben.

Für die Ermittlung der Massenbilanz werden dann die in einem vierstündigen Abstand jeweils nachgepumpten Prüfgasmengen sowie die zugehörige Druckentwicklung ausgewertet. Mit Hilfe der Zustandsgleichung für Gas wird unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung für verschiedene vertikale Diskretisierungen des Bohrlochs jeweils die Masse an Prüfgas berechnet und über die Teufe aufsummiert. Auf diese Weise ergibt sich im vierstündigen Abstand ein Wert für die Masse an Prüfgas im Prüfraum unter Berücksichtigung der jeweiligen Druck- und Temperaturbedingungen, während der Spiegel immer wieder auf die exakt gleichen Prüfbedingungen eingestellt wird (konstante Teufe).

Die Verlustraten ergeben sich dann aus der Differenz der Prüfgasmasse zwischen den verschiedenen Pumpintervallen. Um die Leckrate pro Tag für den gesamten Testzeitraum zu ermitteln, werden die einzelnen Werte addiert und dann wieder auf das Tagesintervall bezogen.

Da sowohl die einzelnen Leckageraten, insbesondere am Anfang des Testzeitraums nach dem vollständigen Abklingen aller Störeffekte, zurückgehen und der berücksichtigte Testzeitraum sich gleichzeitig vergrößert, wird die kumulative Leckrate mit fortschreitender Testdauer immer kleiner, wenn die Installation in Ordnung ist. Die Entwicklung der kumulativen Verlustrate unter Berücksichtigung von Druck- und Temperaturbedingungen ist für einen Dichtheitstest mit positivem Ergebnis beispielhaft in Abbildung 240 wiedergegeben. Neben der ermittelten Leckrate sind darin, unter Berücksichtigung einer Fehlerbetrachtung (-/+), auch die Werte für eine minimale und eine maximale Leckrate dargestellt. Auch diese Daten konvergieren zu immer kleiner werdenden absoluten Beträgen, da die Gesamtgröße der nicht ausschließbaren systematischen Fehler des Testverfahrens zwar gleich bleibt, der Einfluss auf die berechnete kumulative Leckagerate pro Tag mit fortschreitender Testdauer aber immer kleiner wird. Für das angegebene Beispiel ergibt sich über die Testdauer von 72 Stunden eine Leckagerate von $\sim 2 \text{ l/d} \pm 23 \text{ l/d}$ unter Prüfbedingungen, womit das Akzeptanzkriterium Leckagerate $< 150 \text{ l/d}$ deutlich erfüllt ist. Als weitere Kriterien für die Beurteilung des Dichtheitstests sind die durchschnittliche Druckreduzierung im Ringraum zwischen Tubing und Testgestänge und die Druckverläufe

in den nachgeschalteten Ringräumen während der Dauer des Tests zu sehen. Auch hier sollten sich für ein positives Ergebnis des Tests keinerlei Auffälligkeiten oder größere Druckschwankungen zeigen.

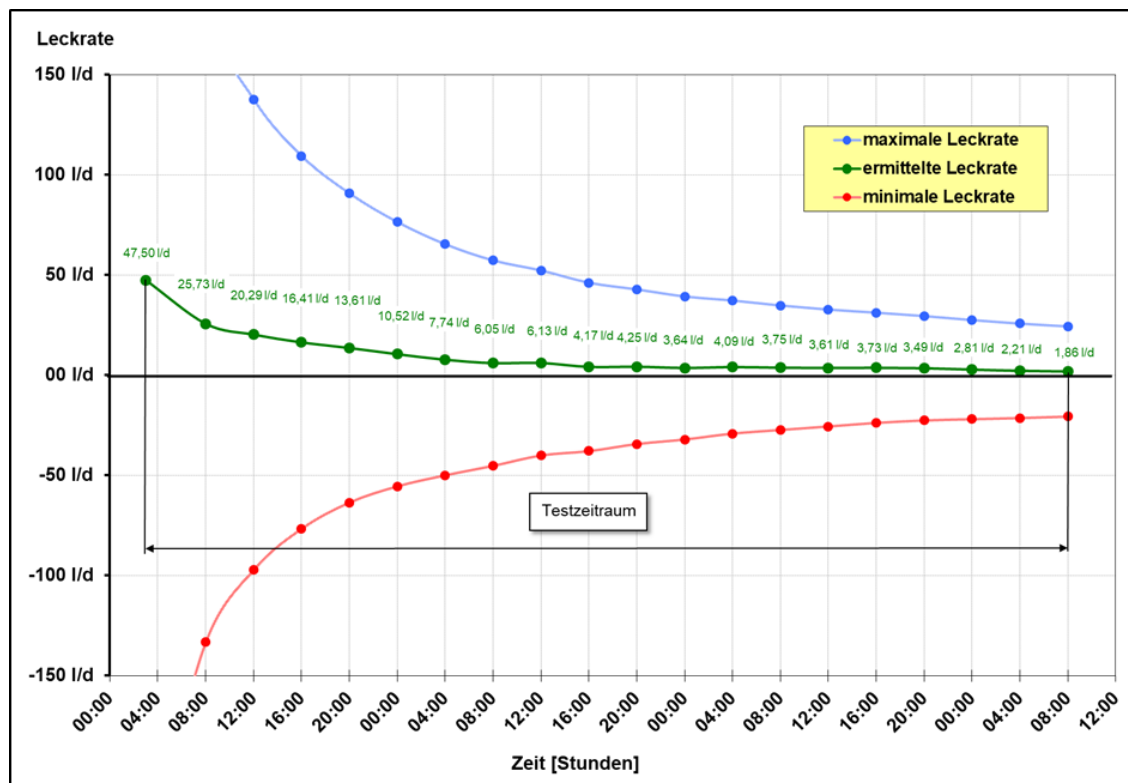


Abbildung 241: Entwicklung kumulierte Verlustrate unter Prüfdruck über den Testzeitraum

Funktionstest

Akzeptanzkriterium

Hier gilt in Analogie zu den Ausführungen zum Dichtheitstest, dass in Ermangelung von Erfahrungswerten belastbare Daten für die Akzeptanzkriterien von Funktionstests mit dem Prüfmedium Wasserstoff derzeit nicht vorliegen und so zunächst auf die langjährig erprobte Praxis bei der Untergroundgasspeicherung zurückgegriffen wird.

Prüfmedium

Wasserstoff

Prüfdruck

Maximaldruck der Kavernen gemäß gebirgsmechanischer Vorgabe.

Testdauer

Zwölf Stunden für Stickstoff; für Wasserstoff eventuell länger um die Anfangseffekte infolge der starken Diffusionsneigung von Wasserstoff zu brechen; oder die Stabilisierungsphase vor Testbeginn ist

entsprechend zu verlängern. Eine Anpassung im Verlauf des Tests ist in Abhängigkeit vom beobachteten Druckverlauf möglich.

Ausrüstung/Testequipment

Es gelten die Anforderung des Dichtheitstests Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour.

Testablauf

Für einen Funktionstest der eingebauten Endkomplettierung wird die Kaverne bis auf einen dem maximalen Kavernendruck entsprechenden hydrostatischen Kopfdruck hydraulisch vorgepuffert. Dazu wird wie beim Dichtheitstest Sole über den eingebauten Soleentleerungsstrang eingepumpt. Nach einer vorgeschalteten Beruhigungsphase von mehreren Stunden zum Abklingen der durch das Einbringen von Sole und Prüfgas verursachten Störeffekte kann mit dem eigentlichen Funktionstest begonnen werden. Während der Testarbeiten wird der Druck im Entleerungsstrang und im Ringraum zwischen dem Entleerungsstrang und der Förderrohrtour sowie in allen nachgeschalteten abgepackerten bzw. vollzementierten Ringräumen durchgehend aufgezeichnet und überwacht.

Für Altbohrungen ist im Gegensatz zur Vorgehensweise für Neubohrungen gegebenenfalls ein Stufendichtheitstest vorzusehen, um einer potenziell eingeschränkten Druckbelastbarkeit von Auflockerungszonen bzw. dem vermindertem Kriechvermögen des Salzes im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour Rechnung zu tragen.

Bei einem positiven Testergebnis muss grundsätzlich keine Entlastung vom Prüfmedium erfolgen, da unmittelbar danach die Gaserstbefüllung erfolgt. Besteht die Notwendigkeit einer Druckentspannung ist die Entlastungsgeschwindigkeit bei vorhandenen permanenten Elastomerdichtungen im Prüfsystem in Abhängigkeit von den verwendeten Werkstoffen entsprechend anzupassen. Beim Test mit brennbaren Medien ist nach Testende gemäß den Vorschriften der BVOT die Entlastung über eine Heißfackel vorzunehmen. Dies ist beim H₂-Test zu berücksichtigen.

Auswertung

Bei Einhaltung der zuvor genannten Testprozedur ergeben sich mehrere Stufen und unterschiedliche Kriterien zur Bewertung der Ergebnisse des Drucktestes. Erste Hinweise auf das Testergebnis sind bereits während der Stabilisierungsphase abzuleiten. Mit fortschreitender thermischer Anpassung des Systems sollte dabei sowohl der jeweils nach einer Haltezeit von zwei Stunden registrierte Druckabfall als auch das zur Druckanpassung benötigte Prüfgasvolumen (Nachpumpmenge) mit zunehmender Stabilisierungszeit stetig abnehmen. Damit lässt sich ein ursächlicher Zusammenhang der registrierten Druckverluste mit den thermischen Ausgleichsprozessen belegen. Eine ausbleibende Stabilisierung bzw. zunehmende Druckverluste geben frühzeitig Hinweise auf unzureichende Testbedingungen (z. B. Packer, Kopfabdichtung undicht) oder ein negatives Testergebnis. Ein wesentlicher Punkt zum Nachweis der technischen Dichtheit der gesamten letzten zementierten Rohrtour ist, dass nach dem Abklingen der oben beschriebenen Ausgleichsprozesse die Druckverluste im Prüfraum unter Berücksichtigung der Fehlertoleranz des Verfahrens auf Null zurückgehen. Zur Veranschaulichung der Auswertekriterien ist die Druckaufzeichnung eines hydraulischen Funktionstestes vor der Endkomplettierung beispielhaft in der Abbildung 242 dargestellt.

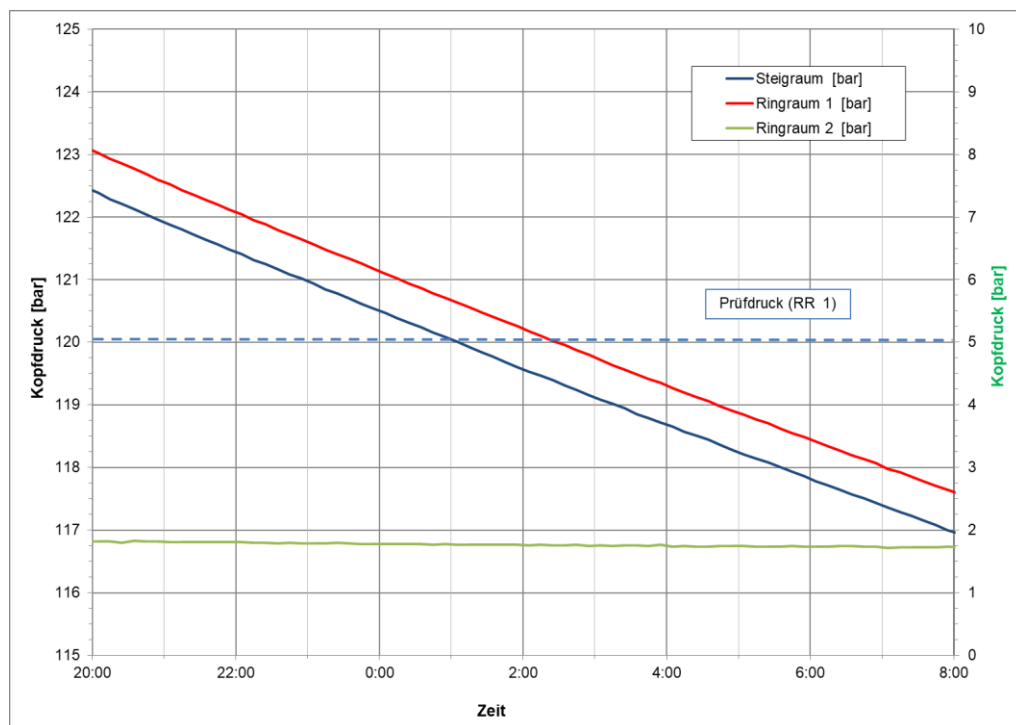


Abbildung 242: Druckverlauf Steigraum Ringräume während des Funktionstests

Das bedeutet, dass der über die Testphase aufgezeichnete Druckverlauf sich asymptotisch einem konstanten Wert nähern muss, ab dem dann konstante Druckverhältnisse ohne weiteren Druckverlust im Prüfraum herrschen. Bei einer undichten Installation würde sich aufgrund der Leckage eine gleichbleibende Druckabnahme ergeben. Der aufgezeichnete Druck fällt weiter linear ab, ohne dass sich ein konstanter Druck (> 0 bar) einstellt. Druckteste werden in der Regel nicht so lange ausgeführt bis sich der Druck asymptotisch einem konstanten Wert genähert hat bzw. die Druckabnahme unendlich klein geworden ist. Meist ist eine Testdauer von zwölf Stunden ausreichend, um aus der Extrapolation der Druckdaten eine gesicherte Aussage zur Dichtheit der Installation abzuleiten. Die visuelle Begutachtung der Druckkurve liefert erste Hinweise über den Druckverlauf wie er beispielhaft in Abbildung 243 wiedergegeben ist. In dem Diagramm ist auf der linken Seite der anfängliche Druckverlust ($\Delta P/\Delta t$) als Steigungsdreieck dargestellt. Bei der Verschiebung dieses Dreiecks nach rechts entlang des Kurvenverlaufs zeigt sich, dass die Abweichungen zur Druckkurve immer größer und damit die Druckverluste immer kleiner werden, bis sich letztlich das rechte kleinere Steigungsdreieck ergibt.

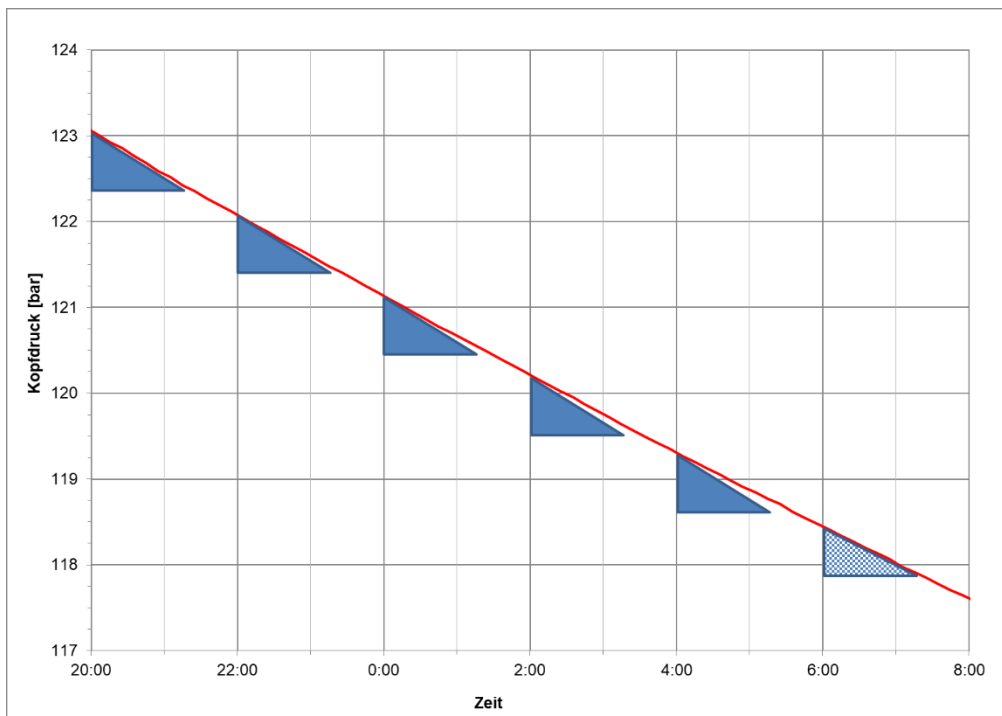


Abbildung 243: Visuelle Auswertung hydraulischer Drucktest

Eine klarere Interpretation der Druckdaten während der Testphase wird bei der expliziten Betrachtung der Druckänderungsrate erreicht. Für die Darstellung in Abbildung 244 wurden jeweils die Druckänderungsraten in 10-Minuten-Intervallen entlang der Druckkurve ermittelt und gleitende Mittelwerte über einen Zeitraum von einer halben Stunde gebildet, um größere, zufällige Variationen der Messwerte herauszufiltern. Im Ergebnis ist klar erkennbar, dass unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite infolge der Messungenauigkeit bereits nach einigen Stunden eine Druckänderungsrate von 0,5 bar/h erreicht wurde und im Testintervall dann eine klare lineare Tendenz für die weitere Abnahme der Druckverluste erkennbar ist. Für das gewählte Beispiel ergibt die Extrapolation der Werte, dass nach weiteren etwa 48 Stunden eine Druckänderungsrate von 0 und damit die asymptotische Annäherung an einen konstanten Druckwert zu erwarten ist. Mit der Druckänderungsrate am Ende der Testphase und der aus dem Nachpumpen ermittelten Kompressibilität kann für die Daten aus dem vorliegenden Beispiel eine theoretische Verlustrate ermittelt werden. Diese Rate repräsentiert nicht notwendigerweise eine tatsächliche Leckage, sondern beschreibt den Fehlerbereich der Messung zum Dichtheitstest.

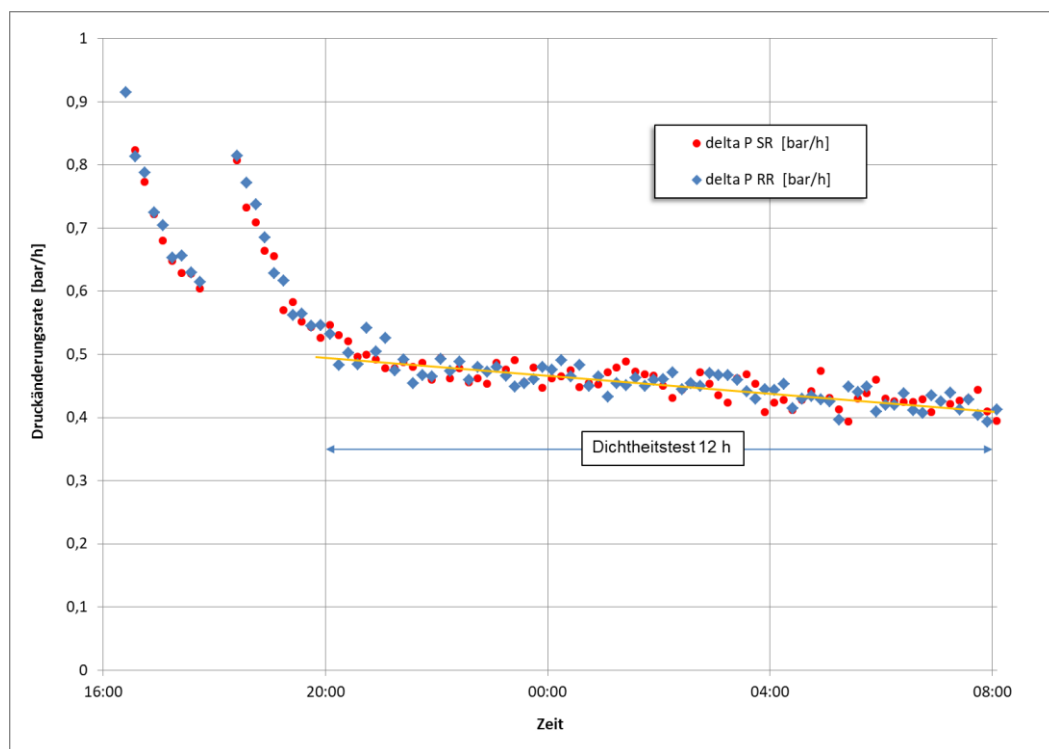


Abbildung 244: Druckänderungsrate zur Auswertung hydraulischer Druckteste

Nach Auswertung der untersuchten Testdaten kann empirisch ein weiteres Kriterium für einen positiven Test abgeleitet werden. Die für die Tests ermittelte theoretische tägliche Verlustmenge sollte kleiner als 1 ‰ des Prüfvolumens sein und somit der Fehlerbereich einer Messung über 24 Stunden weniger als 1 ‰ betragen. Bei Berücksichtigung der vorgenannten Bedingungen und aufgeführten Grenzwerte sind im Rahmen des Fehlerbereichs keine Anzeichen für eine Undichtheit der letzten zementierten Rohrtour gegeben und der Drucktest ist mit einem positiven Ergebnis zu bewerten. Die aufgezeichneten Druckreduzierungen während des Testverlaufs sind keine Indikationen einer Undichtheit an der letzten zementierten Rohrtour, sondern ausschließlich auf die besonders am Anfang stark wirkenden äußeren Einflüsse (Temperatenausgleich) auf den Druckverlauf zurückzuführen.

Funktions-/Dichtheitsprüfung Bohrlochkopf

Die technischen Anforderungen für die Konstruktion und den Einsatz von Bohrlochkopf- und Eruptionskreuz-Ausrüstungen sind in den folgenden spezifischen Richtlinien bzw. Normen beschrieben:

- DIN EN ISO 10423, „Erdgasindustrie, Erdöl- und Bohr- und Förderausrüstung – Bohrlochkopf- und Eruptionskreuz-Ausrüstung“, 2009.
- API Spezifikation 6A, 21st Edition, „Wellhead and Tree Equipment“, American Petroleum Institute Washington, 11/2019.

In diesen Normen werden die Auslegungskriterien für die einzelnen Bestandteile des Bohrloches anhand der Vorgaben für den Druck, die Temperatur und die Werkstoffklasse sowie der Festlegung der Einsatzbedingungen definiert. Mit der Zuordnung der einzelnen Ausrüstungen für Bohrlochkopf und Eruptionskreuz zu unterschiedlichen Qualitätsstufen werden auch die Anforderungen an einen Test für das Equipment definiert.

Auswahl der Qualitätsstufe

In den oben genannten Normen sind fünf Qualitätsstufen festgelegt. Sie definieren unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen unterschiedliche Stufen von Anforderungen an die technische Qualität. Die Auswahl der Qualitätsstufe wird nach der in Abbildung 245 wiedergegebenen Matrix vorgenommen. Jeder Qualitätsstufe sind auch spezifische Anforderungen für die durchzuführenden Tests zugeordnet. Mit größer werdender Qualitätsstufe bzw. steigendem Product Specific Level (PSL) nehmen auch die Testanforderungen zu. Die Zuordnung bzw. Ermittlung des PSL-Levels erfolgt entweder in der Auswahlmatrix nach den Druckstufen und unterschiedlichen Einsatzbereichen oder vor Ort mit Hilfe der Typenschilder an den Ausrüstungen.

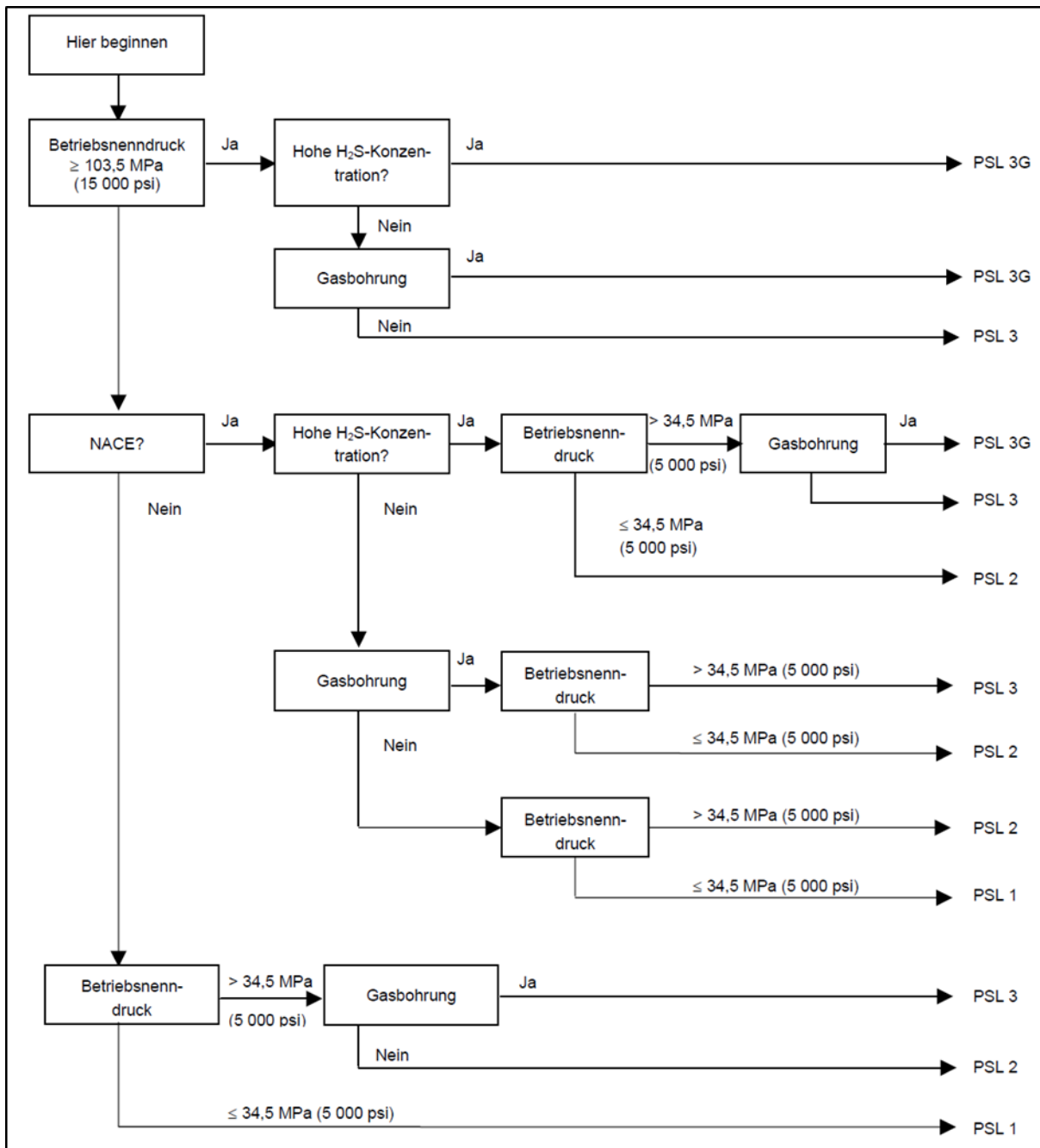


Abbildung 245: Auswahlmatrix zu den Qualitätsstufen; Product Specific Level (PSL)

Verfahrensbeschreibung

Die Festigkeits- bzw. Dichtheitsprüfung der zusammengebauten Ausrüstung erfolgt durch einen hydrostatischen Festigkeitstest. Als Prüf­flüssigkeit wird Wasser oder Wasser mit Zusätzen verwendet. Falls ein Anstrich aufzubringen ist, werden die Teste vor dem finalen Beschichten abgeschlossen; falls die Gehäuse sowie andere drucktragende Teile aus warm geformtem Werkstoff hergestellt wurden, dürfen die Teste jedoch auch nach der Schichtaufbringung durchgeführt werden. Der hydrostatische Drucktest des Gehäuses besteht für zusammengebaute Ausrüstungen aus drei Teilen:

- der primären Druck-Haltedauer,
- der Verringerung des Druckes auf Null,
- der sekundären Druck-Haltedauer.

Beide Druck-Haltezeiten müssen über eine Dauer von mindestens drei Minuten eingehalten werden. Die Zeitmessung ist erst dann zu starten, wenn der Prüfdruck erreicht ist sowie die Ausrüstung und das Manometer zur Druckbeobachtung von der Druckquelle abgetrennt wurden und die Außenflächen der Ausrüstung sorgfältig abgetrocknet wurden. Ab PSL3 gelten für den hydrostatischen Festigkeitstest des Gehäuses die gleichen Anforderungen wie für PSL1. Allerdings wird bei diesem hydrostatischen Drucktest gefordert, dass die Haltezeit auf eine Dauer von mindestens 15 Minuten verlängert wird. Der Druck beim hydrostatischen Drucktest wird durch den Betriebsnenn­druck der Ausrüstung bestimmt. Die hydrostatischen Prüfdrücke sind in Tabelle 101 für unterschiedliche End- und Auslassanschlüsse dargestellt. Die Dichtheitsprüfungen werden in der Regel während des Aufbaus der Verflansung und zwischen der Primär- und der Sekundärabdichtung der Kopfausrüstung durchgeführt.

Tabelle 101: Prüfdrücke für den hydrostatischen Drucktest

Betriebsnenn­druck		End- und Auslassanschlüsse											
		Nennweite des Flansches [mm (Zoll)]				Rohrgewinde und Steigrohr­gewinde		Futterrohrgewinde [mm (Zoll)]					
		346 ≤(13 5/8)		425 ≥(16 3/4)				114,3 – 273,1 (4 1/2 – 10 3/4)		298,5 – 339,7 (11 3/4 – 13 3/8)		406,5 – 508,0 (16 – 20)	
[MPa]	[psi]	[MPa]	[psi]	[MPa]	[psi]	[MPa]	[psi]	[MPa]	[psi]	[MPa]	[psi]		
13,8	2.000	27,6	4.000	20,7	3.000	27,6	4.000	27,6	4.000	27,6	4.000	15,5	2.250
20,7	3.000	41,5	6.000	31,0	4.500	41,5	6.000	41,4	6.000	31,0	4.500	--	--
34,5	5.000	51,7	7.500	51,7	7.500	51,7	7.500	51,4	7.500	--	--	--	--
69,0	10.000	103,5	15.000	103,5	15.000	103,5	15.000	--	--	--	--	--	--
103,5	15.000	155,0	22.500	155,0	22.500	--	--	--	--	--	--	--	--
138,0	20.000	207,0	30.000	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Test- und Akzeptanzkriterium

Der Prüfdruck muss entsprechend den in der grundlegenden Norm DIN EN ISO 10423 und API Spezifikation 6A, 21st Edition festgelegten Kriterien und zugeordneten Qualitätsstufen über eine dort ebenfalls definierte Haltezeit eingehalten werden. Die Ausrüstung darf unter Einwirkung des Prüfdrucks keine sichtbare Undichtheit aufweisen. Während des hydrostatischen Drucktests von mit Gewinde

versehenen Teilen des Bohrlochkopfes, die mit einer Gewindeprüfeinrichtung verbunden sind, ist eine Undichtheit durch das Gewinde oberhalb des Betriebsdruckes für das Gewinde zulässig.

Prüfmedium

Als Prüfmedium für alle Verbindungen oberhalb der Abhängung der letzten zementierten Rohrtour sollte zunächst Stickstoff verwendet werden, da die abschließende Prüfung mit Wasserstoff dann während des Funktionstestes erfolgt. Die Prüfung der Abhängung der letzten zementierten Rohrtour hat mit Wasserstoff zu erfolgen, um verlässliche Ergebnisse für den anschließenden Betrieb mit diesem Medium zu erhalten.

Prüfdruck

Der Prüfdruck für die einzelnen Ausrüstungskomponenten ist unter Berücksichtigung des Maximaldrucks der Kaverne (Betriebsnenndruck) gemäß Tabelle 101 zu ermitteln. In der Ausrüstung wird der hydrostatische Druck allmählich erhöht, bis etwa der halbe erwartete Betriebsdruck erreicht ist. Danach wird der Prüfdruck in Schritten von höchstens einem Zehntel des Betriebsnenndruckes erhöht, bis der für das Prüfverfahren geforderte Druck erreicht ist. Für Ausrüstungen mit Komponenten, die für unterschiedliche Betriebsdrücke ausgelegt sind, wird zur Festlegung des Prüfdrucks für den hydrostatischen Drucktest der niedrigste Betriebsnenndruck einer Einzelkomponente angewendet.

Testdauer

Der vorgeschriebene Testdruck ist zweimal mindestens über eine Haltezeit von jeweils drei Minuten zu halten. Für die Prüfungen ab Level PSL3G ist neben dem hydrostatischen Drucktest der Ausrüstung ein Gas-Festigkeitsstest vorgesehen. Die Prüfung wird bei Umgebungstemperatur mit Stickstoff als Prüfmittel durchgeführt. Für die zusammengebaute Ausrüstungen muss der Gas-Festigkeitsstest des Gehäuses aus einer einzigen Druck-Haltezeit bestehen, die mindestens 15 Minuten dauert. Die Zeitmessung ist erst dann zu starten, wenn der Prüfdruck erreicht ist und die Ausrüstung und das Manometer zur Druckbeobachtung von der Druckquelle abgetrennt wurden.

Testablauf

Für die H₂-Speicherung in Kavernen mit Kavernendrücken im Bereich unterhalb von 5.000 psi und ohne das Vorhandensein von H₂S-Anteilen liegt das Level für die Druckteste zumeist im Bereich von PSL1. Es sind daher keine Festigkeits- bzw. Dichtheitsteste mit Gas vorgeschrieben. Das zweimalige Abdrücken mit Wasser jeweils über einen Zeitraum von drei Minuten ist gemäß der Norm für den Drucktest der Ausrüstung ausreichend. Kriterium für die Dichtheit ist dabei kein sichtbarer Wasseraustritt während der Testzeit. Bei der UGS GmbH wurde zur Vereinfachung der Prozeduren ein einheitlicher Standard für den Dichtheitstest der Kopfausrüstung eingeführt. Der Test ist dabei mit Stickstoff bei dem 1,1-fachen des maximalen Betriebsdrucks über eine Testdauer von 30 Minuten auszuführen. Dabei sind das Top Valve und das Wing Valve bzw. SAV geschlossen und ein Back Pressure Valve (BPV) im Casinghänger oder ein Stopfen im Packoff. Für den Test wird dann Stickstoff als Testmedium über Druckminderer und Stickstoffbündel an der Schnittstelle am Y-Stück eingebracht.

Funktions-/Dichtheitsprüfung Untertagesicherheitsventil (UTSAV)

Verfahrensbeschreibung

Beim Testen der Untertagesicherheitseinrichtung ist zu unterscheiden zwischen:

- (1) Test an neuen UTSAV (auch SSSV, Subsurface Safety Valve) beim Lieferanten/Hersteller; Gemäß API 14A muss der Lieferant/Hersteller an jedem neuen SSSV eine Funktionsprüfung durchführen. Die Ergebnisse der Funktionsprüfung müssen sich auf das geprüfte Ventil zurückführen lassen und sind zu dokumentieren. Des Weiteren werden beim Hersteller verschiedene Validierungsprüfungen mit unterschiedlichen Testmedien durchgeführt. Die Schritte des Prüfverfahrens sind in API 14A Anhang B beschrieben. Ein Test mit Wasserstoff ist darin nicht vorgesehen bzw. beschrieben.
- (2) Test an auszuliefernden Systemen oder bereits vorhanden Installationen; Installierte UTSAV werden auf der Lokation auf Funktion und Dichtheit getestet. Laut API 14B gelten folgende Anforderungen:

SCSSV (Surface controlled)

sind bei der Installation und in Abständen von höchstens sechs Monaten gemäß den Anforderungen zu prüfen. Es sei denn, die örtlichen Vorschriften, Bedingungen und/oder dokumentierte historische Belege lassen ein anderes Prüfintervall, nicht mehr als 12 Monate, zu.

SSCSV (Subsurface controlled)

SSCSV (und SSISV), die an Ort und Stelle geprüft werden können, werden gemäß den Anforderungen in API 14B/Anhang A in einem maximalen Intervall alle sechs Monate geprüft. Es sei denn, örtliche Vorschriften, Bedingungen und/oder dokumentierte historische Beweise lassen eine andere Prüfhäufigkeit von höchstens 12 Monaten zu. Leckageraten, die die in API 14B/Anhang A angegebenen Werte überschreiten, sind Grund für die Ablehnung der Prüfung.

Test- und Akzeptanzkriterien

Nach API 14B/Anhang A ist ein UTSAV als dicht anzusehen, wenn die Leckrate $\leq 25,8 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt.

Prüfmedium

Als Prüfmedium für alle Verbindungen oberhalb der Abhängung der letzten zementierten Rohrtour sollte zunächst Stickstoff verwendet werden, da die abschließende Prüfung mit Wasserstoff dann während des Funktionstests erfolgt. Die Prüfung der Abhängung der letzten zementierten Rohrtour hat mit Wasserstoff zu erfolgen, um verlässliche Ergebnisse für den anschließenden Betrieb mit diesem Medium zu erhalten.

Prüfdruck

Der Prüfdruck entspricht dem Maximaldruck der Kaverne.

Testdauer

Für die Testdauer wird mindestens ein Zeitraum von 60 Minuten empfohlen. Eine Verlängerung der Testzeit darüber hinaus sichert eine größere Genauigkeit der Testergebnisse ab.

Ausrüstung/Testablauf/Auswertung

Die UTSAV-Systeme werden nach Erstinstallation, Eingriffen in das Bohrloch (z. B. für Sonarmessung) und Wartung bzw. Redress in ihrer Funktion getestet und auf technische Dichtheit geprüft. Mit dem Funktions- und Dichtheitstests im eingebauten Zustand auf der Lokation werden grundlegend folgende Baugruppen des UTSAV erfasst:

- primäre interne Dichtelemente des UTSAV (Klappe, Dichtsitz, interne Verbindungen),
- sekundäre Elemente (inneres/äußeres Lockmandrel inklusive Dichtelemente und dazugehörige Landenippleprofile).

Wesentliche Angaben zur Ausrüstung und zum Ablauf sowie zur Bewertung der Teste sind in Tabelle 102 für verschiedene UTSAV-Typen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 102: Funktionsprüfung und Testablauf für installierte UTSAV

	Wireline-retrievable		Tubing-retrievable
	Veloctiy valve	WLRSV	TRSV
Veranlassung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstinstallation, • Eingriffe in das Bohrloch (z. B. für Vermessung) siehe auch Besonderheiten/Well Intervention, • Wartung/Redress. 		
Situation	<ul style="list-style-type: none"> • Die Landenippelsektion wurde im Zusammenhang mit der Komplettierung im Förderstrang installiert; • Die Steuerleitung (nur WLRSV) ist getestet und dicht. 	<ul style="list-style-type: none"> • Das TRSV wurde im Zusammenhang mit der Komplettierung im Förderstrang installiert; • Die Steuerleitung ist getestet und dicht. 	
Serviceleistungen	<ul style="list-style-type: none"> • Wireline Truck (WL) und Equipment, • qualifiziertes Servicepersonal, • Bauüberwachung, • Testequipment, • Kran, • Mitwirkung Speicherbetreiber. 	<ul style="list-style-type: none"> • Wireline Truck (WL) und Equipment, • qualifiziertes Servicepersonal, • Bauüberwachung, • Testequipment, • Kran, • Mitwirkung Speicherbetreiber. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifiziertes Servicepersonal, • Bauüberwachung, • Testequipment, • Kran, • Mitwirkung Speicherbetreiber.
Funktionsprüfung UTSAV	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamischer Schließtest durch stufenweises Anfahren der Schließrate nur bei Erstinstallation, • ggf. Anpassung der Gewichtsbestückung. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrolle Steuerleitung, • Entlasten Steuerleitung, • Schließen UTSAV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrolle Steuerleitung, • Entlasten Steuerleitung, • Schließen UTSAV.

	Wireline-retrievable		Tubing-retrievable
Dichtheitstest UTSAV	<ul style="list-style-type: none"> • Druckaufbaumessung, d. h., der Druck wird oberhalb des zu prüfenden Ventils abgesenkt (Druckdifferenz) und ein evtl. Druckaufbau erfasst und ausgewertet. 		
Prüfdruck	<ul style="list-style-type: none"> • Die Höhe der Druckdifferenz ist in API 14B nicht vorgegeben, sie sollte aber in einem Druckbereich liegen, welcher eine Aussage über die Dichtheit des UTSAV ermöglicht. 		
Testablauf	<ul style="list-style-type: none"> • Kaliberfahrt WL, • Schließen UTSAV mit WL, • Druckabsenkung Testraum, • Beruhigung, • Abscheren, • Test. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entlasten Steuerleitung, Schließen UTSAV, • Druckabsenkung Testraum, • Beruhigung, • Test. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entlasten Steuerleitung, Schließen UTSAV, • Druckabsenkung Testraum, • Beruhigung, • Test.
Testende	<ul style="list-style-type: none"> • Bespannen Prüfraum bis Ventil öffnet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bespannen Prüfraum bis Druckausgleich, • dann Ventil hydraulisch öffnen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bespannen Prüfraum bis Druckausgleich, • dann Ventil hydraulisch öffnen.
Druckregistrierung	<ul style="list-style-type: none"> • Digitales Manometer, Mess- und Steuerwarte 		
Dauer	<ul style="list-style-type: none"> • > 60 Minuten; Empfehlung: Eine längere Testzeit führt zu höherer Genauigkeit der Ergebnisse. 		
Kriterien/ Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> • Nach API 14B Anhang A ist ein UTSAV als dicht anzusehen, wenn die Leckrate $\leq 25,8 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt. 		
Besonderheiten/ Well Intervention	<ul style="list-style-type: none"> • Das Velocity Valve besitzt bauartbedingt keinen freien Durchgang und muss für eine Befahrung komplett oder teilweise ausgebaut werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Befahrung des Bohrlochs kann über das geöffnete UTSAV erfolgen; • Bei Arbeiten, die das Ventil beschädigen können, muss das Ventil ausgebaut und das Landenipple durch eine Schutzhülse überdeckt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Befahrung des Bohrlochs kann über das geöffnete UTSAV erfolgen; • Bei Arbeiten, die das Ventil beschädigen können, muss das Ventil durch eine Schutzhülse/Hold Open Sleeve überdeckt werden.

Wiederholungsdichtheitstest UTSAV

Wiederholungsprüfungen an den UTSAV sind insbesondere im Zusammenhang mit Eingriffen in das Bohrloch (Well Intervention) bzw. nach einer Wartung oder einem Redress der Ausrüstung durchzuführen. Das gewartete/redresste Equipment muss beim Wiedereinbau der aktuellen Ausgabe der anwendbaren nationalen oder internationalen Norm entsprechen oder der Ausgabe, die zum Zeitpunkt der ursprünglichen Herstellung gültig war. Laut API 14B wird der Redress des Equipments durchgeführt:

- in Übereinstimmung mit den Anforderungen und Anweisungen des Lieferanten/Herstellers, einschließlich der Verwendung von speziellen Montageausrüstungen und Werkzeugen,
- mit qualifiziertem(n) Teil(en), das/die von qualifizierter(n) Person(en) installiert wurde(n),
- mit vom Lieferanten/Hersteller definierten Prüfungen, einschließlich Abnahmekriterien und Dokumentation.

Im Rahmen des Monitoringprogramms ist die kontinuierliche oder in kurzen Zeitintervallen stattfindende Drucküberwachung aller Ringräume einzuplanen.

9.2.3.5 Teste in Wasserstoffumgebung, Zusammenfassung

Die Wirksamkeit eines Barrieren-Systems zur Gewährung der Dichtheit einer Speicherbohrung für Wasserstoff und zur Reduzierung des Risikos eines unkontrollierten Austritts des Speichermediums ist u. a. durch Dichtheits- und Funktionsprüfungen an den unterschiedlichen Elementen des Barrieren-Systems nachzuweisen. In Tabelle 103 sind diese Elemente mit den zugehörigen Akzeptanzkriterien für eine Dichtheit sowie dem für den Test einzusetzenden Prüfmedium, dem Prüfdruck und der Prüfdauer zusammenfassend wiedergegeben.

Tabelle 103: Verfahren zum Dichtigkeitstest Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour (IzRT)

	Dichtigkeitstest IzRT	Funktionstest Installation	Dichtheitsprüfung Bohrlochkopf	Dichtheitsprüfung UTSAV
Akzeptanzkriterium	Leckrate < 150 l/d, Reguläre abflachende Druckverläufe im Steigraum und den Ringräumen.	Reguläre abflachende Druckverläufe im Steigraum und den Ringräumen.	Keine sichtbare Undichtheit, (kein akustisch wahrnehmbarer, visuell sichtbarer Gasaustritt (Lecksuchspray)).	Leckrate $\leq 25,8 \text{ m}^3/\text{d}$
Prüfmedium	Stickstoff Wasserstoff	Wasserstoff	Stickstoff Wasserstoff	Wasserstoff
Prüfdruck	Maximaler Betriebsdruck	Maximaler Betriebsdruck	Maximaler Betriebsdruck, (1,1-fache des max. Betriebsdrucks).	Druckdifferenz nicht vorgegeben. Druckbereich muss Aussagen zur Dichtheit UTSAV zulassen.
Prüfdauer	72 Stunden	12 Stunden	2 x 3 Minuten (30 Minuten)	> 60 Minuten

9.2.4 Monitoringverfahren

9.2.4.1 Grundlagen

Mit dem Monitoring von verschiedenen Parametern soll ein sicherer und stets beherrschbarer Zustand für den Betrieb von Speicherbohrungen sichergestellt werden, d. h., es treten keine Fluide und Gase aus der Bohrung unkontrolliert aus. Dazu ist sicherzustellen, dass sich Betriebsparameter innerhalb von definierten Leistungsgrenzen befinden und somit eine Beschädigung von Barriere-Elementen (siehe Abbildung 246) ausgeschlossen werden kann. Maßnahmen zum Monitoring erfolgen in Anlehnung an geltende Regeln und Richtlinien und dienen der Aufrechterhaltung der Integrität aller Barriere-Elemente im Betrieb. Hier sei insbesondere auf den BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ verwiesen.

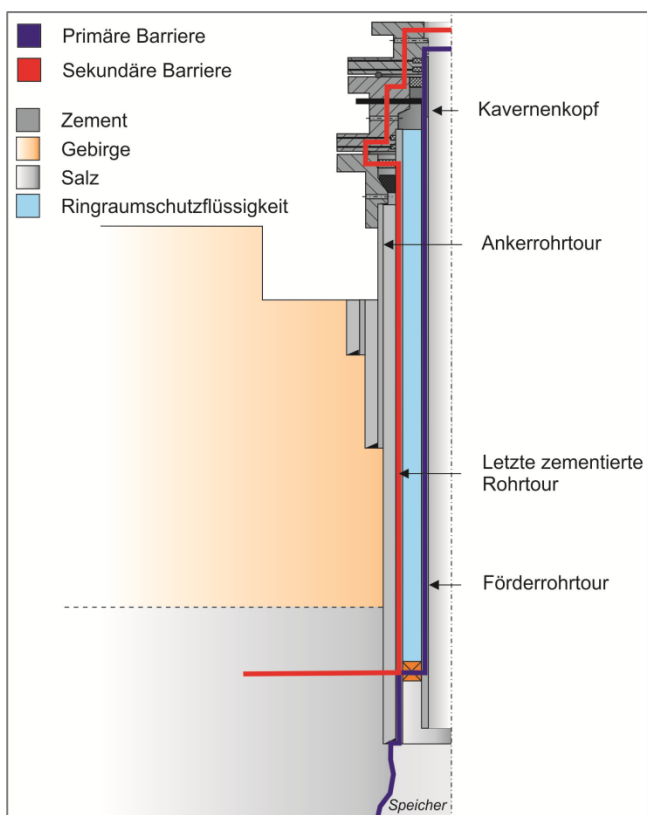


Abbildung 246: Schematisch Darstellung der Barrieren im Bohrloch

9.2.4.2 Bestandteile des Monitorings

Die Sicherstellung der Integrität einer Bohrung ist in den verschiedenen Lebenszyklen einer Bohrung zu gewährleisten. Für den Gesamtzyklus einer Speicherbohrung lassen sich unter dem Aspekt des Monitorings zwei Phasen beschreiben:

- Phase 1: Planung,
- Phase 2: Betrieb H₂-Speicherung.

Im Nachfolgenden werden einzelne Aspekte, die der jeweiligen Phase zuzuordnen sind, erläutert.

Phase 1: Planung

Die Planungsphase beschreibt Maßnahmen, die vor Errichtung einer Speicherbohrung oder Umrüstung einer bestehenden Bohrung zu einer H₂-Speicherbohrung erfolgen.

Planung von Monitoringsystemen im Bereich Bohrlochkopf

Bereits vor Errichtung einer Speicherbohrung sind Maßnahmen zur Realisierung von Monitoringsystemen vorzusehen. Dazu gehört die konstruktive Schaffung von Druckmessstellen im Bereich des Bohrlochkopfes für alle eingebundenen Ringräume. Ebenfalls ist eine Temperaturmessung des Steigraumes und der Umgebungstemperatur vorzusehen. Des Weiteren ist bei der Planung des Bohrlochkopfes für alle Dichtbereiche der Rohrtoureinbindung (Keil- oder Hangersystem) eine separate Dichtheitsprüfung der Dichtungen durch entsprechende Testanschlüsse vorzusehen. Nachaktivierbare Dichtungen sind konstruktiv bei der Auslegung zu bevorzugen.

Festlegung von Grenzwerten

Durch die Festlegung und Einhaltung von maximal zulässigen Grenzwerten für einzelne Betriebsparameter wird ein sicherer und beherrschbarer Zustand für den Betrieb gewährleistet. Für die zu überwachenden Parameter werden in der Regel MAASP/Schwellwerte festgelegt, die im Regelbetrieb nicht überschritten werden dürfen. Für den Fall einer Überschreitung ist die Einleitung von festgelegten Maßnahmen vorgesehen. Bei einer Überschreitung besteht die Gefahr von Schäden an Gesundheit, Anlagen (Maschinen) und der Umwelt. Sicherheitsrelevante Parameter, wie z. B. Drücke in Steig- und Ringräumen (MAASP), sind vor Ort sichtbar anzuzeigen und kontinuierlich in Leitwarten zu überwachen. Im Falle einer Grenzwertannäherung- oder -überschreitung sind diese Parameter mit einem Alarm zu versehen.

Elektrotechnische Planung

Neben der allgemeinen Planung, stellt die Erstellung eines Überwachungskonzeptes für die Überprüfung des EX-Bereiches im Speicherbetrieb für Wasserstoff einen besonderen Schwerpunkt dar. Hier soll durch den Einsatz von kontinuierlich messenden Sensoren diffundierender Wasserstoff aus dem Bohrlochkopf detektiert werden.

Ebenfalls ist der EX-Bereich hinsichtlich elektrischer Gefährdungen unter dem Aspekt der wesentlich niedrigeren Zündenergie des Wasserstoffes im Vergleich zu anderen Speichermedien, wie z. B. Methan, zu gestalten. Augenmerk liegt hier auf der Realisierung von Potenzialausgleich bzw. Erdungen.

Gefährdungen durch auftretende Spannungen im kathodischen Korrosionsschutz (KKS) sind zu bewerten und ggf. daraus Maßnahmen abzuleiten.

Phase 2: Betrieb Wasserstoffspeicherung

Die Phase 2 beschreibt Aspekte des Monitorings, die sich auf den Zeitraum der regulären H₂-Speicherung beziehen. Hier sind Maßnahmen beschrieben, die kontinuierlich oder zyklisch durchzuführen sind und somit ein vorhersehbares Versagen von Barriere-Elementen verhindern sollen.

Visuelle Prüfung der Anlagen

Betreiber von Speicherbohrungen müssen mit regelmäßigen Befahrungen ihrer Bohrlochköpfe eine visuelle Prüfung durchführen und dokumentieren. Folgende Aspekte können bei einer visuellen Überprüfung dokumentiert werden:

Ablesen Druckmessstellen

Erfassung von Druckdaten mittels Digital- oder Analogmanometer; Ziel: Identifizierung von Übertragungsfehlern und Gefährdungen.

Verschmutzungen durch Medienaustritt

Sofern kleine Leckagen an druckführenden Bauteilen auftreten, die mit einem Medienaustritt einhergehen, sind die Spuren des Austrittes zu begutachten und im Leckagefall Maßnahmen einzuleiten.

Korrosion

Sichtprüfung potenzieller Korrosionsschäden (z. B. erkennbare Rostspuren, sich abhebende Farbbeschichtung) und Einleitung von entsprechenden Korrosionsschutzmaßnahmen bzw. Gegenmaßnahmen, Ursachenanalyse von ungewöhnlichen Korrosionserscheinungen

Positionsveränderung

Zyklische, geometrische Positionsüberwachung von Bohrlochköpfen zur frühzeitigen Identifizierung einer möglichen unplanmäßigen Belastungssituation, die zu einer „Verschiebung“ in Form von Kippen von Bohrlochköpfen führen kann und Einleitung von Gegenmaßnahmen.

Sensorische Prüfung

Drucküberwachung

Alle Ringräume, die durch das Einbinden von Rohrtouren in den Bohrlochkopf entstehen, mit einer kontinuierlichen Druckmessung sind zu überwachen:

- SR = Steigraum,
- RR1 = abgepackter Ringraum (Schutzringraum) zwischen Förderrohrtour und letzter zementierter Rohrtour,
- RR2 = Ringraum letzte zementierte Rohrtour zwischen letzter zementierter und folgender (technischer) Rohrtour.

Zur Auswertung des Ringraumdruckes RR1 ist eine zyklische Prüfung der Spiegelhöhe der Ringraumschutzflüssigkeit erforderlich.

Temperaturüberwachung

Die Überwachung der Temperatur dient der Erfassung unzulässiger Betriebszustände hinsichtlich der thermischen Randbedingungen. Eine Überschreitung von thermischen Auslegungsgrenzen kann zu einer Beschädigung von Barriere-Elementen führen. Zum Abgleich mit Umgebungseinflüssen ist eine Temperaturmessung in freier Umgebung empfehlenswert.

Zusätzlich ermöglicht die Überwachung der Temperatur im Steigraum einen Rückschluss auf Belastungen auf die Förderrohrtour, die in Abhängigkeit des Temperatureinflusses eine Lastzunahme oder Abnahme erfährt. In Zusammenarbeit mit einem Spannungsmesssystem können somit auch Lastveränderungen auf Betriebsfahrweisen zurückgeführt werden.

Fließ- bzw. Strömungsgeschwindigkeiten

Diese Parameter dienen der Berechnung geförderter Volumen (Massebilanz) und der Sicherstellung eines möglichst effektiven, reibungsarmen Strömungszustandes. Dies ist der Fall, wenn sich das Medium laminar bewegt. Bei Überschreitung einer kritischen Geschwindigkeit wechselt die laminare in eine turbulente Strömung, was mit erhöhten Reibungsverlusten einhergeht. Folgen sind z. B. Druckverluste in den Rohrleitungen. Eine Überwachung dieses Parameters ist in der Regel nicht unmittelbar am Bohrlochkopf, sondern in den nachgelagerten Leitungen vorgesehen.

Prüfung und Überwachung EX-Bereich unter dem Aspekt der H₂-Speicherung

Aufgrund der hohen Diffusionsneigung von Wasserstoff und fehlenden Erfahrungen im Bereich des Bohrlochkopfes wird eine kontinuierliche Messung und Überwachung des EX-Bereiches empfohlen. Eine Begründung einer kontinuierlichen Überwachung ist durch die wesentlich niedrigere benötigte Zündenergie von Wasserstoff (0,017 mJ, Methan: 0,23 mJ) und des größeren Explosionsbereiches (4–77 Vol.-%; Methan: 4–17 Vol.-%) und des somit erhöhten Risikos im Vergleich zu Erdgasspeichern gegeben.

Mechanische Prüfungen/Überwachungen

Überwachung Axiallasten

Förderrohrtour

Die direkte Überwachung der Lastveränderungen an der Förderrohrtour ermöglicht eine unmittelbare Abbildung der Spannungssituation in der Rohrtour. Somit lassen sich Lastwechsel sowohl durch Betriebsfahrweisen als auch durch äußere, z. B. geologische Einflüsse wie Konvergenzeffekte, erfassen. Voraussetzung dazu wären eine feste Einspannung im Packerbereich und Bohrlochkopf.

Durch die Festlegung von Grenzwerten für zulässige Belastungen lassen sich kritische Betriebszustände vorzeitig erkennen und durch die Einleitung von Gegenmaßnahmen sichere Betriebszustände wiederherstellen.

Letzte zementierte Rohrtour

Aussagen zu Laständerungen der letzten zementierten Rohrtour im Bereich des Rohrschuhs können für bestehende Bohrungen mit einer summarischen Auswertung der Belastungsänderung der Förderrohrtour erfolgen. Bei Neubohrungen ist die Installation eines teufenunabhängigen Messsystems möglich.

Ankerrohrtour

Über die Ankerrohrtour werden alle axialen Lasten aus Eigengewicht und Betriebszuständen der im Bohrlochkopf eingebunden Rohrtouren aufgenommen und abgefangen. Demzufolge lassen sich auch durch Messsysteme an der Ankerrohrtour auf veränderte Belastungszustände der inneren Rohrtouren schließen.

Wanddickenmessung/Korrosionsschäden der Ankerrohrtour

Im Vergleich zu sichtbaren Korrosionserscheinungen können auch visuell nicht erkennbare Korrosionserscheinungen, z. B. im Bereich der Ankerrohrtour, auftreten. Hier kann es durch elektrochemische Prozesse zu einer großflächigen oder punktuellen Abnahme der Wandstärke kommen. Zur Prüfung auf Korrosionsschäden sollte daher in regelmäßigen Abständen ein Screening auf Korrosionsschäden der Ankerrohrtour erfolgen. Oberhalb des Zementkopfes kann dies mit einer Ultraschallwanddickenmessung erfolgen. Unterhalb des Zementkopfes können durch den Einsatz von Schallverfahren Korrosionserscheinungen detektiert werden.

Chemisch-physikalische Prüfung

Durch eine Beprobung der in den Steig- und Ringräumen anstehenden Medien werden die chemischen Zusammensetzungen ermittelt. Für den Fall, dass es in den Ringräumen Indikationen für Druckanomalien gibt, können durch den Abgleich der chemischen Zusammensetzung ggf. Rückschlüsse auf die Herkunft geschlossen werden. In diesem Zusammenhang ist die Überwachung des Spiegels der Ringraumschutzflüssigkeit relevant.

Regelmäßige Wartungsmaßnahmen

Im Bereich des Bohrlochkopfes müssen in regelmäßigen Abständen Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen stattfinden. Dazu ist ein Wartungs- und Instandhaltungsplan zu erstellen. Bereiche, die einer Prüfung unterzogen werden, sind u. a. Armaturen, Abdichtungen der Rohrtoureneinbindungen und UTSAV-Komponenten. Wartungen der Armaturen umfassen u. a. die Prüfung der allgemeinen Funktionstüchtigkeit und eine Dichtheitsprüfung. Vor Beginn der Dichtheitsprüfung erfolgt für einzelne Dichtungsbereiche eine Überprüfung eines vorhandenen Druckaufbaus zwischen den Dichtungen. Im Anschluss sind die einzelnen Dichtbereiche der Rohrtoureneinbindungen (Primärdichtung und Sekundärdichtung) mit entsprechend festgelegten Prüfdrücken auf Dichtheit zu testen. Im Falle von Undichtigkeiten sind diese, soweit technisch möglich, nachzudichten. Die durchgeführten Wartungsarbeiten sind zu dokumentieren.

Elektrotechnische Überprüfungen

Zur Vermeidung von Potenzialunterschieden von verschiedenen Bauteilen und Komponenten im Bereich des Bohrlochkopfes sollten neben den regelmäßigen Wartungsarbeiten am Bohrlochkopf ebenfalls die Potenzialausgleichseinrichtungen geprüft werden. Das kann z. B. im Rahmen einer elektrischen Überprüfung nach Elektro-Bergverordnung (EIBergV) oder anderen gültigen DIN VDE-Normen für andere auf dem Kavernenplatz befindlichen Anlagen erfolgen.

Zyklische Druckteste

Nach bestehenden Regelungen der BVEG sind vor dem Betrieb und nach Änderungen an der Installation barriererelevante Bereiche einer Dichtheitsprüfung zu unterziehen. Dazu gehört u. a. die Dichtheitsprüfung des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour und der Funktionstest der Förderroh-

tour. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung relevanter Arbeitspakete des Verbundvorhabens H2-UGS (Abschluss in 12/2021) waren weitere zyklische Druckprüfungen der Bohrlochverrohrung nicht gefordert. Zukünftig durchzuführende Druckteste sollten grundsätzlich in Anlehnung an jeweils bestehende, gültige Regelwerke erfolgen. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit wurden einzelne Regelwerke hinsichtlich einer zyklischen Überprüfung der Dichtheit von Rohrtouren überarbeitet (BVOT Niedersachsen, 2022). Die Umsetzungsregelungen zur Erfüllung der neuen Anforderungen hinsichtlich zyklischer Prüfungen durch „externe Sachverständige“ sind zum Teil noch nicht bekannt bzw. es existieren teilweise noch keine technisch technologischen Verfahren für die geforderten Prüfungen (z. B. Dichtheitsprüfungen von in Betrieb befindlichen Tiefbohrungen). Daher sind die Prüfungsanforderungen und Umsetzungsregelungen mit der zuständigen Bergbehörde festzulegen.

Tracermonitoring – Möglichkeit zum Nachweis und zur Überwachung von bohrlochnahen Undichtheiten

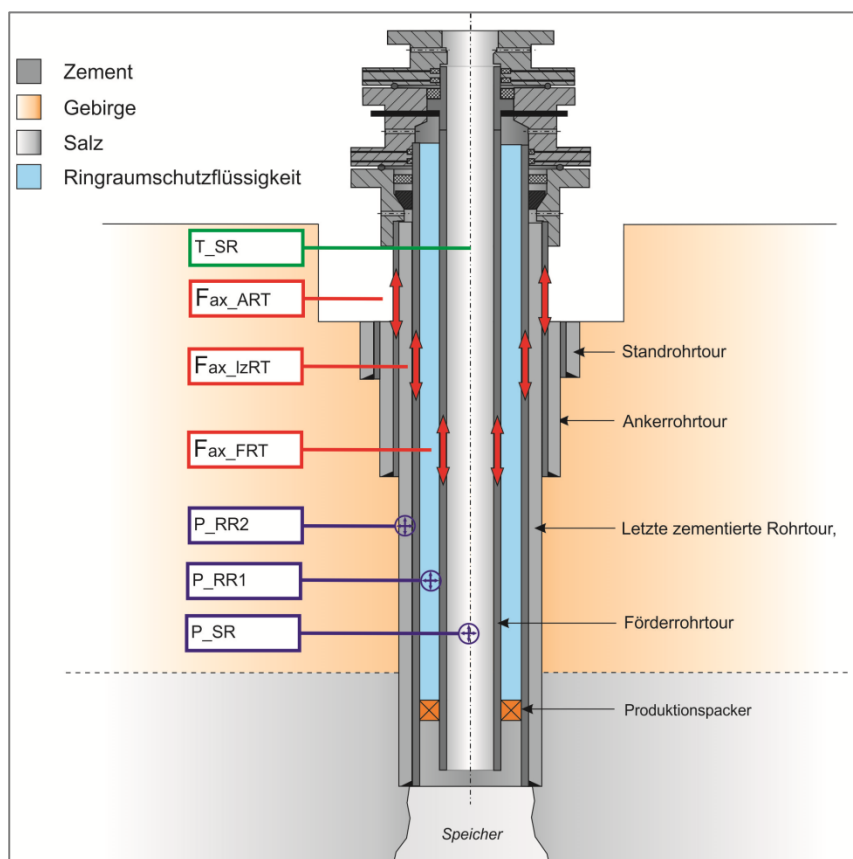
Wenn eine Undichtheit an der Kavernenbohrung vorliegt bzw. vermutet wird, kann neben dem messtechnischen Nachweis oder Test ein Leckagenachweis mittels Tracersubstanzen erfolgen. Dafür wird ein definierter Tracertyp in der erforderlichen Nachweiskonzentration in die betreffende Kaverne bzw. Kavernenbohrung injiziert und im Rahmen eines obertägigen Monitorings (Überwachung der Ringräume, Beobachtungspegeln) überwacht. Sind mehrere Kavernen betroffen bzw. ist die Quelle der Undichtheit nicht eindeutig, können verschiedene Tracersubstanzen zur Leckageidentifizierung eingesetzt werden. Im Rahmen der Planung ist fallabhängig eine geeignete Tracersubstanz zu ermitteln sowie ein entsprechendes Überwachungsnetz und Monitoringkonzept zu entwickeln. Für die einzusetzende Tracersubstanz ist neben der grundsätzlichen Eignung die Umweltverträglichkeit (z. B. wasserrechtlich unbedenklich, kein Gefahrstoff), Langlebigkeit und chemische Stabilität nachzuweisen. Aus der Erdgasspeicherung als auch Gasproduktion liegen sehr gute Erfahrungen für den Einsatz gasförmiger Tracersubstanzen vor. Die Maßnahmen sind über einen Sonderbetriebsplan der zuständigen Behörde anzuzeigen.

9.2.4.3 Auslegung von Monitoringsystemen im Bereich des Bohrlochkopfes für die Wasserstoffspeicherung

In den folgenden Kapiteln werden die zuvor zusammenfassend dargelegten Monitoringsysteme näher beschrieben und für den Anwendungsfall der H₂-Speicherung spezifiziert.

Übersicht relevanter zu überwachender Betriebsparameter

In der folgenden schematischen Darstellung sind alle relevanten „Belastungen“ bzw. zu überwachenden Parameter, die einen Einfluss auf die Betriebssicherheit haben, aufgeführt.



Bez.	Benennung	Bez.	Benennung
T _{SR}	Temperatur Steigraum	P _{RR2}	Druck zementierter Ringraum
F _{ax_ART}	Axiallast Ankerrohrtour	P _{RR1}	Druck abgepackter Ringraum
F _{ax_lzRT}	Axiallast letzte zementierte Rohrtour	P _{SR}	Druck Steigraum

Abbildung 247: Übersicht zu überwachender Kräfte und Drücke im Bereich der Bohrlochinstallation

Hinweis zu F_{ax_lzRT}

Der Parameter der Axialbelastung der letzten zementierten Rohrtour ist als Barriere-Element der sekundären Barriere für die Integrität einer Bohrung von Bedeutung (Abbildung 247). Aktuell ist mit bestehenden Systemen eine Ermittlung von Dehnungserscheinungen im Bereich des Rohrschuhs bzw.

des Packersetzbereiches summarisch möglich. Existierende Systeme befinden sich derzeit in der Weiterentwicklung.

Übersicht Einbindungen der Rohrtouren in den Bohrlochkopf

Systeme zum Abfangen von Rohrtouren

Abbildung 248 zeigt exemplarisch die Einbindungen verschiedener Rohrtouren im Bohrlochkopf.

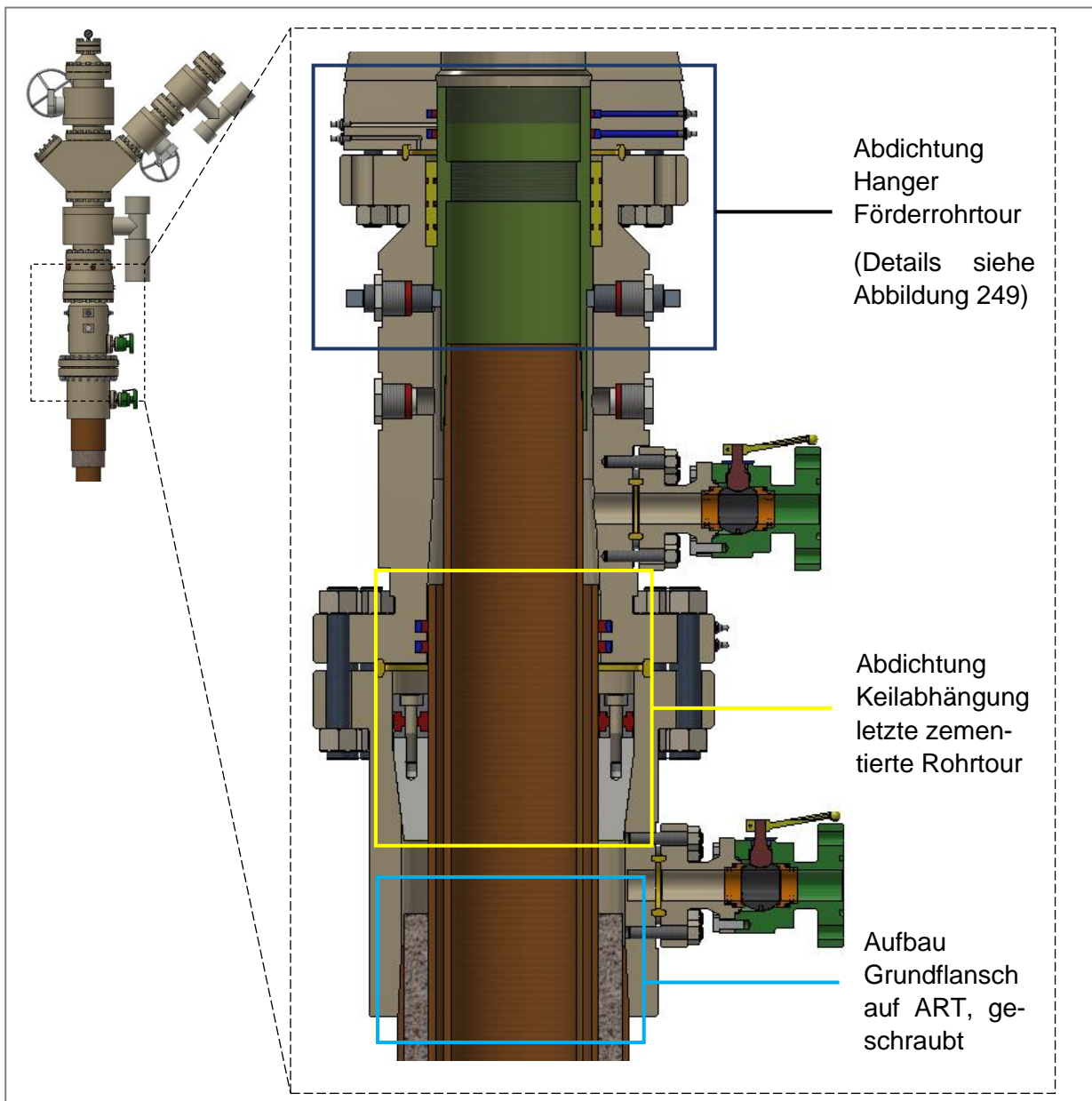


Abbildung 248: Übersicht Einbindungen verschiedener Rohrtouren in den Bohrlochkopf

Abdichtung und Überwachungsmöglichkeiten von Rohrtoureinbindungen

Unabhängig von der Ausführung der Abhängung ist ein doppeltes Abdichtungssystem in Form einer Primär- und Sekundärdichtung vorzusehen. Die Ausführungen variieren dabei und sind ggf. auch herstellerabhängig. Für den üblichen Einsatzfall der Gasspeicherung besteht die Primärdichtung aus weichen Elastomer-Dichtelementen, z. B. O-Ringe, die entweder mit einer separat zu installierenden Hülse (siehe Abbildung 249) montiert oder direkt auf der Hangeraußenkontur vorgesehen werden. Die Ausführung der Sekundärdichtung kann ebenfalls durch Elastomerdichtung erfolgen. Eine gängige Realisierung erfolgt dabei durch P-Seals. Dieses System kann im Betrieb durch zusätzliches Einpressen von Aktivierungsmasse (Abbildung 249 – blau) nachaktiviert bzw. nachgedichtet werden. Ein Alternativsystem besteht in der Ausführung von metallisch dichtenden Systemen. Dabei wird die Dichtfunktion durch das Anziehen der Verflanschungsbolzen mit gleichzeitiger plastischer Verformung von metallischen Dichtelementen realisiert (Abbildung 249). Eine reguläre Nachdichtung im Betrieb ist nicht vorgesehen. Für die Speicherung von Wasserstoff existieren H₂-kompatible Dichtsysteme für Bohrlochköpfe (z. B. Firma Hartmann Valves & Wellheads).

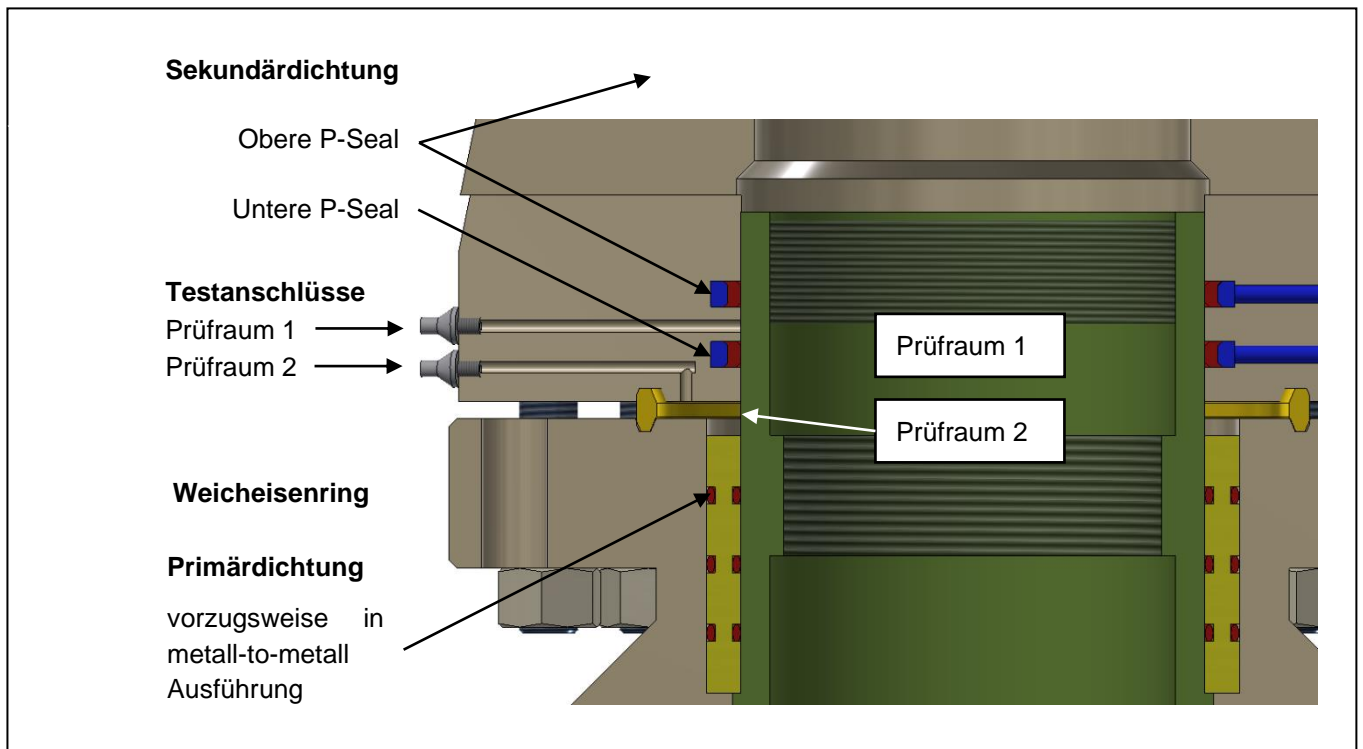


Abbildung 249: Bestandteile einer Rohrtourabdichtung im Bohrlochkopf

9.2.4.4 Monitoringsysteme zur Erfassung von Axiallaständerungen

Theoretische Lastsituation der Rohrtouren (siehe Abbildung)

Neben dem Monitoren von Druck- und Temperaturwerten in einer Bohrung für den Betriebszustand, liegt für eine Überwachung der Fokus auch auf der Erfassung von Lastsituationen einzelner Rohrtouren. Veränderliche Axiallasten treten durch thermische Effekte während des Ein- und Ausspeisevorgangs und durch das Speicherdruckspiel auf. Die Größenordnung der Axiallaständerung durch thermische Effekte hängt u. a. von der chemischen Zusammensetzung des Speichermediums ab. Die Ankerrohrtour nimmt alle aus den abgefangenen Rohrtouren resultierenden Gewichts-, geologisch- sowie prozessbedingten Kräfte auf. Folgender Zusammenhang gilt dabei (Formel 47):

$$\sum F_{ART} = f \left(\sum F_{FRT} + \sum F_{LZRT} \right) \quad \text{Formel 47}$$

Ist die letzte zementierte Rohrtour bis übertage zementiert, so werden abgesehen von der Absetzlast infolge des Eigengewichtes keine zusätzlichen Lasteinträge auf die Ankerrohrtour übertragen. Sollte der Zementkopf tiefer liegen, kann durch die „freie“ Länge zwischen Zementkopf und Einspannlänge (Keile) infolge Temperatur- und Druckänderungen eine zusätzliche Belastungskomponente entstehen ($\Delta F_{\Delta T_LZRT}$).

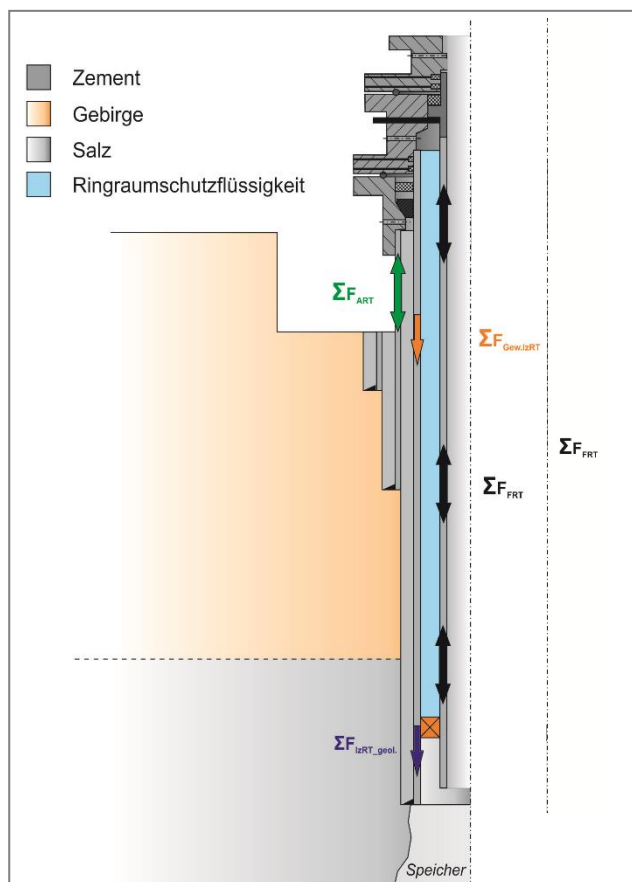


Abbildung 250: Kräfteverlauf in Rohrtouren

Es gelten dabei Formel 48 und Formel 49:

$$\sum F_{LzRT} = f(F_{Gew_{LzRT}} + \Delta F_{\Delta T_{LzRT}}) \quad \text{Formel 48}$$

Die Belastungen in der Förderrohrtour ΔF_{FRT} sind dabei maßgeblich durch die Betriebsparameter wie Innendruck P_{SR} und der Temperaturveränderungen ΔT_{STR} infolge Ein- und Ausspeisevorgänge beeinflusst. Um Wechselwirkungen auf den Produktionspacker bzw. Bewegungen der Dichtungen der Seal Unit zu vermeiden, wird der Förderstrang bei Erdgas-Kavernenspeichern üblicherweise mit einer zusätzlichen Vorspannung ($F_{FRT_Vorsp.}$) abgehängt, sodass der Packer stets mit einer Zugspannung belastet wird. Im Fall einer auftretenden geologischen Komponente durch z. B. Konvergenz ist dieser Faktor ΣF_{LzRT_geol} als lasterhöhend zu berücksichtigen.

$$\sum F_{FRT} = f(F_{FRT_Eigengew.} + F_{FRT_Vorsp.} + \Delta F_{FRT_Betrieb} + \Delta F_{LzRT_Geol.}) \quad \text{Formel 49}$$

Systeme zur Erfassung der Axiallastbelastung

Technische Möglichkeiten zur Ermittlung von Axiallast bestehen in der Messung von Dehnungen oder der direkten Messung von Gewichtslasten der Rohrtouren.

Dehnungsmessung

Über die Ermittlung von Dehnungen können Rückschlüsse auf wirkende Kräfte und somit auch auf Materialspannungen in den untersuchten Rohrtouren getroffen werden.

Es gilt: $F \sim \varepsilon$ und $\sigma \sim \varepsilon$

Zum Abgleich von Dehnungswerten mit den dazugehörigen Kraftwerten ist bei der Installation des Systems ein Kalibriervorgang erforderlich. Dieser sollte im Zuge einer Komplettierung erfolgen, um die tatsächlich wirkenden Gewichtslasten als Randbedingungen einfließen zu lassen.

Kraftmessung

Mit derartigen Systemen erfolgt eine direkte Überwachung der Gewichtslasten. Dazu werden in oder an den Abfangsystemen der Rohrtouren (Verflansungen) entsprechende Messsysteme integriert. Durch den Einsatz von Dehn- und Kraftmesssystemen lassen sich für folgende Bereiche der Bohrlochverrohrung Messwerte ermitteln:

Förderrohrtour (FRT)

Für die Erfassung von Laständerungen muss die Förderrohrtour an zwei Punkten eingespannt sein. Dies ist in der Regel durch den unteren Einspannpunkt in Form des Permanentpackers und einem oberen Einspannpunkt durch einen Hanger zum Ablenden im Bohrlochkopf gegeben.

Letzte zementierte Rohrtour (LzRT)

Für eine bereits eingebaute LzRT besteht derzeit die Möglichkeit, die Dehnungsänderungen für den Packersetzbereich (Rohrschuh) summarisch bzw. indirekt über Lastveränderungen der

FRT zu messen. Für den Fall, dass eine IzRT neu eingebaut wird, kann durch ein an der Rohraußenseite installiertes Messsystem (z. B. Glasfasertechnologie) auch eine Überwachung der Rohrtour über die komplette Einbauteufe erfolgen. Dehnungen lassen sich somit über den gesamten Teufenbereichen erkennen.

Ankerrohrtour (ART)

Über die ART werden alle Gewichtslasten, die durch das Abfangen der im Bohrlochkopf eingebundenen Rohrtouren entstehen, aufgenommen und in den Untergrund abgeleitet. Zusätzlich wirkt das Gewicht des Bohrlochkopfes. Im Normalfall steht die ART unter einer Druckspannung. Verändert sich die Lastsituation der im Bohrlochkopf abgefangenen Rohrtouren, speziell die der FRT, hat dieses unmittelbare Folgen für die Belastungssituation der ART. Nimmt die Last in der FRT zu, erhöht sich die Druckspannung in der ART und umgekehrt.

Tabelle 104 gibt einen Überblick über aktuell verfügbare Axiallast-Monitoringsysteme.

Tabelle 104: Übersicht verfügbare Axiallast-Monitoringsysteme

Systeme	Prinzip der Messung	Manipulation der Lastsituation	Anbieter/ Patentinhaber
Dehnmessstreifen	Dehnung	-	Verschiedene
Faseroptische Dehnungsmessung (Glasfaser)	Dehnung	-	Verschiedene
TMS – Tension Monitoring System	Kraftmessung	-	Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH
TCMS – Tension Controlled Monitoring System	Kraftmessung	Variation der Vorspannlänge möglich	Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH
Landeboizen mit integrierter Lastermittlung – hydraulisch	Kraftmessung	-	Exal-Technology

Empfehlung für die Konfiguration einer axialen Spannungsmessung

Nach den beschriebenen Möglichkeiten zur Ermittlung von Axiallast-Beanspruchung ist eine Kombination von Systemen zu empfehlen. Dabei bezieht sich der Ausdruck der Kombination auf den Einsatz eines Systems für die Erfassung der Laständerung der Förderrohrtour und eines weiteren Systems für den Einsatz im Bereich der Ankerrohrtour.

9.2.4.5 Details zur Ausführung der sensorischen Überwachung

Im Bereich des Bohrlochkopfes müssen alle zu überwachenden Rohrtouren (ART, IzRT, FRT und ggf. noch weitere technische Rohrtouren) abgefangen und abgedichtet sein. In diesem Bereich sollten zur Vergleichbarkeit der Messdaten die entsprechenden Messstellen vorgesehen werden. Tabelle 105 gibt eine Empfehlung für die Dimensionierung der einzelnen Messstellen.

Tabelle 105: Dimensionierung einzelner Messstellen

Messstelle	Einheit	Min.	Max.
Druckmessung SR	[bar]	0	Druckstufe Bohrlochkopf, z. B. 3000 psi
Druckmessung RR1	[bar]	0	maximal zulässiger RR1-Druck
Druckmessung RR2	[bar]	0	maximal zulässiger RR2-Druck
Temperaturmessung	[°C]	-25	100

Die Messstellen sollten eine Datenerfassung zur Weiterleitung an eine Leitwarte sowie eine Vor-Ort-ablesung ermöglichen. Druck- und Temperatursensoren sollten an absperrbare Blocknadelventile montiert sein, die ggf. einen Austausch eines Sensors ermöglichen. Die Beständigkeit gegenüber Wasserstoff und eventuell auftretender Begleitelemente muss gegeben sein. Elektrische Bauteile, die für eine sensorische Überwachung in EX-Bereichen installiert sind, müssen eine ATEX-Zertifizierung haben. Hier ist das neue Regelwerk für H₂-Anwendungen zu berücksichtigen. Die Daten installierter Axiallast-Messsysteme sollten kontinuierlich erfasst und gespeichert werden. Eine Auswertung der Daten kann zyklisch erfolgen.

9.2.4.6 Überwachung UTSAV/Controlline

Der Einbau eines controllinegesteuerten UTSAV gehört zu den etablierten Sicherheitseinrichtungen in einer Speicherbohrung und ist bei einer H₂-Speicherung vorzusehen. Verschiedene Komponenten des UTSAV werden im Speicherbetrieb dem Wasserstoff und ggf. kritischen Begleitstoffen ausgesetzt. Insofern keine H₂-resistenten UTSAV auf dem Markt verfügbar sind, sind regelmäßige Prüfungen vorzusehen. Neben der Durchführung von Schließtests und Ermittlung von Leckagemengen steht auch die Prüfung der Controlline im Focus. Zu untersuchen ist insbesondere die Controlline-Durchführung durch den Bohrlochkopf und die Untersuchung des Hydrauliköls auf eventuelle Verunreinigung mit diffundiertem Wasserstoff.

9.2.4.7 Überwachung Dichtheit Kavernenbohrung

Sind Undichtheiten an der Kavernenbohrung bekannt bzw. werden vermutet, sind diese soweit möglich durch Messungen, Tests und/oder Traceranwendungen zu analysieren, zu belegen und zu überwachen. Die jeweiligen Überwachungskonzepte sind fallabhängig zu planen und umzusetzen.

9.2.4.8 Anwendung für die Wasserstoffspeicherung

Auf umfängliche Erfahrungen aus bestehenden H₂-Speicherprojekten kann nicht zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund soll der aktuelle Stand von Monitoringprozessen auf Gas- und Ölspeicherbohrung (in Anlehnung an die BVEG) als Grundlage mit den Mindestanforderungen dienen. Punktuell sind für die Speicherung von Wasserstoff zusätzliche Vorkehrungen zu treffen um eine sichere Speicherung zu ermöglichen.

Wegen der geringen Molekülgröße, der geringen dynamischen Viskosität und der damit verbundenen Diffusionsneigung von Wasserstoff sollten Bereiche, die unmittelbar mit dem Wasserstoff in Kontakt kommen, durch einen nachgelagerten, überwachbaren und beprobaren (Ring-)Raum umgeben werden. Es sind geeignete Maßnahmen zu treffen, um auftretende Leckagemengen zu erfassen und dem Speicherprozess wieder zuführen zu können. Alternativ kann der Wasserstoff z. B. durch eine Heißfackel abgeleitet werden. In Ausnahmefällen ist auch der Einsatz einer Kaltfackel möglich. Die Explosionsgrenzen des Wasserstoffes sind dabei zu beachten und ggf. durch das Zuführen von „sauberer“ Umgebungsluft unterhalb der unteren Explosionsgrenze zu halten.

Zusätzliche Herausforderungen auf Grund der Diffusionsneigung bestehen in der Auslegung von Abdichtungselementen. Der Einsatz von reinen oder faserdurchmischten Elastomerdichtungen ist möglich und muss auf die jeweiligen Randbedingungen, wie z. B. auftretende Begleitelemente, abgestimmt werden. Probleme durch chemische Beständigkeiten bei Kontakt mit reinem Wasserstoff sind nicht gegeben. Vielmehr sind die eventuell entstehenden Begleitstoffe wie z. B. Schwefelsäure als kritisch einzustufen. Alternativ zu Elastomeren können metallische Dichtungen (metall-to-metall) zum Einsatz kommen. Die Materialauswahl ist auf den Einsatzfall abzustimmen.

Für den Grundwerkstoff der Verflansungen sind weniger die Undichtheiten infolge von Diffusion als problematisch anzusehen, als vielmehr die unter dem allgemeinen Begriff bekannten Effekte der „Wasserstoffversprödung“. Hierbei kann sich durch die Einlagerung von Wasserstoff im Metallgitter oder in Hohlräumen die Duktilität des Werkstoffes reduzieren und als Ergebnis zu einem spröden, verformungsarmen Werkstoffversagen führen. Geeignete Nachweisverfahren (Messungen, ggf. Ausbau von flexiblen Bauteilen) sind zu planen und in das Monitoringprogramm des Speichers einzubeziehen.

9.2.5 Bewertungsmethodik

9.2.5.1 Grundlagen

Die technische Bewertung von H₂-Speichern dient der Erfassung des Gesamtzustandes und der Integrität der Speicherbohrung. Sie beinhaltet die in der Bewertungsmatrix, siehe Abbildung 251, dargestellten Grundlagen zur Integritätsanalyse, Bohrungsbewertung und Lebenszyklusbetrachtung. Die technische Bewertung berücksichtigt mit Bezug auf das nach dem BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ definierten Zwei-Barrieren-System (siehe Kapitel 7.3.1.5) die im Folgenden definierten Hardware-Barrieren, betrieblichen Barrieren und Bewertungskomplexe für die Barriere-Elemente. Des Weiteren berücksichtigt die technische Bewertung den definierten Stand der Technik, Regelwerke, gültigen Normen und Richtlinien. In der technischen Bewertung werden die für Wasserstoff spezifizierten Materialien sowie die besonderen Anforderungen an die verwendeten Materialien berücksichtigt (siehe Kapitel 7.3.1). Die technische Bewertung beinhaltet die in der exemplarischen Bewertungsmatrix dargestellten Punkte (Abbildung 251).

BEWERTUNGSKOMPLEXE	Territoriale Aspekte	Geologie, Gebirge, Gebirgsmechanik	H ₂ -Kavernen Speicherregime	H₂-Porenspeicher, Reservoirmechanik	Bohrungsausbau, Komplettierung
VORHANDENE BASISDATEN	Technische Primärdokumentation	Betriebsdaten (vorherige Nutzung)	Analysen, Materialuntersuchungen	Bohrlochmessungen, Inspektionen, Tests	Thermodynamische Berechnungen
BEWERTUNGSMETHODEN	Allgemeines Vorgehen, Standards, Normen	Spezifische Methoden	Annahmen und Basisdaten für Berechnungen	Berechnungsalgorithmen	Software
BEWERTUNGSDOKUMENTATION	Bewertung Integritätsstatus	Risikoanalyse	Empfehlungen für den Betrieb, Messungen, Monitoring, Reparaturen	Genehmigungspapiere, Sicherheitsvorschriften	Berichtslayout, Datendarstellung

Abbildung 251: Exemplarische Bewertungsmatrix

Die Bewertungskomplexe und die vorhandenen Basisdaten ergeben sich aus der Bohrungsdokumentation und den Betriebsdaten. Sie sind im weiteren Sinne als Hardware-Barrieren bezeichnet. Im Folgenden ist die Bewertungsmethodik für die technische Bewertung einer H₂-Kaverne erläutert.

9.2.5.2 Stand der Technik, Regelwerke, Richtlinien, Normen

Integritätsbewertungen sind auf der Grundlage der jeweils gültigen Fassung der entsprechenden Normen, Regeln, Richtlinien und Verordnungen auszuführen. Nachfolgend aufgeführte Normen, Regeln, Richtlinien und Verordnungen sind zu berücksichtigen:

- API-Richtlinien,
- BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ (07/2021),
- DIN EN ISO 16530-1 Lebenszykluslenkung und 16530-2 Bohrungsintegrität,
- Bundesberggesetz (BBergG),
- Allgemeine Bundesbergverordnung,
- BVOT der jeweiligen Bundesländer,
- weitere Normen nach DIN, EN, ISO,
- Umweltschutzgesetze und Vorgaben,
- Arbeitsanweisungen und Richtlinien der entsprechenden Auftraggeber.

Der BVEG-Leitfaden „Bohrungsintegrität“ (07/2021) definiert den Stand der Technik für die Integrität von neuen Tiefbohrungen auf dem Festland in Deutschland. Er steht ergänzend zu den bestehenden gesetzlichen und behördlichen Vorgaben, technischen Regelwerken und unternehmensinternen Vorgaben. Für die H₂-Speicherung gelten die Festlegungen zur Gasspeicherbohrung. Bei Bestandsbohrungen erfolgt die technische Bewertung/Integritätsbewertung in Anlehnung an die geltenden Regeln,

Richtlinien und den BVEG-Leitfaden nach festgelegten Akzeptanzkriterien, mit denen die Schutzziele gewährleistet werden können.

Hardware-Barrieren

Hardware-Barrieren sind physische/mechanische Bohrungsbarrieren, d. h. ausgelegte, eingebaute und geprüfte Ausrüstungen sowie geologische Bedingungen.

Bohrungsdaten

Die Bohrungsdaten enthalten folgende Informationen:

- Unterlagen zum gesamten Verrohrungsschema mit Rohreinbaudaten, Dimension, Wanddicke, Güte, Rohrschuhteufen, ggf. realisierte Absetzlasten, Zementationsprotokolle,
- Angaben zu den Speichermedien sowie Sole und Brauchwasser,
- Bohrlochkopfausrüstung mit Stücklisten,
- Komplettierungselemente (z. B. Permanentpacker, Absperrelemente, Doppelrohrschuh).

Angaben zur Kaverne

- Gesamtvolumen der Kaverne,
- Länge Salzüberdeckung der Produktionsrohrtour,
- Länge des Kavernenhalses,
- Kavernenkontur,
- ggf. Temperatur in der Kaverne,
- Hohlraumvermessung und Kavernenentwicklung,
- Solraten.

Geologie

Die Angaben zur geologischen Datenbasis beinhalten:

- Unterlagen zur Stratigraphie und Schichtenfolge,
- Angaben zur Mächtigkeit/Teufenlage,
- Angaben zu den abdichtenden Gebirgsschichten mit Abdecker (Salinar).

Gebirgsmechanik

Die Angaben zur Gebirgsmechanik stellen einen grundlegenden Bewertungsfaktor für die Barriere-Diskussion dar:

- Teufendruckgradient Deckgebirge,
- Teufendruckgradient Salinar,
- Konvergenz.

Betriebliche Barrieren

Die Integrität der Hardware-Barrieren muss durch betriebliche Maßnahmen (betriebliche Barrieren) wie Überwachungssysteme, Praktiken und Prozeduren sichergestellt werden. Allgemein gilt, dass für die Integritätsbewertung im Schwerpunkt die aktuellen bzw. aktuell geltenden Daten herangezogen werden. Liegen Einzeldaten nicht vor bzw. sind die erforderlichen Datenqualitäten nicht vorhanden, werden Analogieschlüsse gezogen bzw. Empfehlungen für den Betrieb gegeben.

Betriebsdaten

Angaben zum Betrieb der Bohrungen sind für die Beschreibung der Belastungshüllkurve erforderlich. Diese beinhaltet alle Lastzustände mit Standardbetrieb, Arbeiten im Zusammenhang mit Reparatur- bzw. Umrüstungsarbeiten und für Worst-Case-Szenarien und beschreibt somit die Betriebsgrenzen:

- Einlagerung, Auslagerung, Umlagerung mit Angaben zu den maximalen/minimalen Raten und maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeiten,
- minimale und maximale Temperaturen im Bereich Bohrlochkopf, am Rohrschuh der Produktionsrohrtour/Steigrohrstrang,
- maximale und minimale mittlere Bohrlochtemperaturen,
- Angaben zu maximalen und minimalen Kopfdrücken im Steigraum und dem ersten zementierten Ringraum sowie maximal zulässige Kopfdrücke bei den stehenden Kavernen,
- Monitoringdaten im Rahmen der Überwachung der Ringräume im Bohrungsbetrieb,
- Angaben zu betriebsbedingten Druckbeaufschlagungen.

Angaben zur Betriebshistorie

Daten aus der Betriebshistorie – wenn vorhanden – beschreiben mögliche geologische und technische Probleme, ggf. Havarien im vergangenen Betrieb und stellen eine Analyse- bzw. Nachweisbasis für den aktuellen Integritätszustand der Bohrung dar.

Messungen, Teste, Funktionsnachweise und Monitoring

Die Daten aus Messungen (z. B. Bohrlochmessungen, Ankerrohrtourvermessungen), Dichtheits- und Funktionstest sowie aus dem Monitoring bilden die Grundlage für die Bewertung des aktuellen Betriebszustandes sowie für mögliche Prognosen bzw. Trendaussagen für den Betrieb. Es wird unterschieden in:

- Altdaten – Basis- bzw. Ausgangsstatus als Bewertungsgrundlage sowie zur vergleichenden Betrachtung von Änderungen im Bohrungszustand.
- Aktuelle Datenbasis – Aktueller Zustand der Bohrung, Entscheidungsgrundlage für den weiteren Betrieb.
- Monitoringdaten, Überwachungssysteme sowie zyklische Messungen und Funktionsteste bilden das Überwachungssystem für den Betrieb, eine Nachweisdokumentation für die Behörden, die Basis für das Erkennen technischer Probleme bzw. zur Havarietryphylaxe.

- Die Betriebsphase hat innerhalb der aktuellen Betriebsgrenzen zu erfolgen. Es sind Arbeiten zum Monitoring der Wirksamkeit der Bohrungsbarrieren und zur Wartung und Instandhaltung der Bohrungsbarrieren vorzunehmen.
- Mess- und Testverfahren bilden hier, unabhängig von der Art der betrachteten Bohrung, eine entscheidende Grundlage.

9.2.5.3 Bewertungskomplexe für Barriere-Elemente

Die folgenden Bewertungskomplexe der Barriere-Elemente gelten für die betrachtete Speicherbohrung.

Bohrlochkopf, Armaturen und Verflanschung

Der Bohrlochkopf bildet den oberen Abschluss der UT-Komplettierung und steht über Tage an. Die Kopfausrüstung muss die abgefangenen Rohrtouren sicher tragen, eine angemessene Druckstufe aufweisen, die Dichtheit der verschiedenen Räume untereinander und die Dichtheit gegenüber der Umwelt gewährleisten. Mittels Sicherheitsarmaturen muss ein Absperren des Steigrohrstranges zu jeder Zeit möglich sein.

Bewertungsschwerpunkte

- Bohrlochkopfverflanschung: Bewertung der Kopfaufbauten, Armaturen, Verflanschungen, Druckstufe, Dichtsysteme,
- Übergang Verflanschung/Ankerrohrtour: technischer Zustand Konstruktion, Axiallastfestigkeit glattes Rohr der Ankerrohrtour, Verbinderfestigkeit Ankerrohrtour zum Bodenflansch,
- Ringräume: zulässige Ringraumkopfdrucke.

Ankerrohrtour

Auf die Ankerrohrtour wird der Bohrlochkopf aufgebaut. Die wirkenden Kräfte auf die Bohrlochverflanschung müssen von der Ankerrohrtour sicher aufgenommen werden.

Bewertungsschwerpunkte

- Technischer Zustand/Konstruktion,
- Axiallastfestigkeit glattes Rohr der Ankerrohrtour,
- Verbinderfestigkeit Ankerrohrtour zum Bodenflansch,
- Innendruckfestigkeit,
- Zementation.

Technische Rohrtouren/Zwischenrohrtouren

Die technischen Rohrtouren sind in der Betriebszeit der Bohrung im engeren Sinne ohne Relevanz für die sicherheitstechnische Ansprache von Speicherbohrungen. In Ausnahmefällen wird die technische Rohrtour bei Korrosions-, Dichtheits- und Festigkeitsbetrachtungen mit

Bezug auf die letzte zementierte Rohrtour zur sicherheitstechnischen Betrachtung einbezogen.

Bewertungsschwerpunkte

- Technischer Zustand, Dichtheit,
- Innen- und Außendruckfestigkeit,
- Zementsteinbeanspruchung,
- Axiallastfestigkeit Keilabsetzbereich.

Produktionsrohrtour/Letzte zementierte Rohrtour

Die Produktionsrohrtour stellt den letzten Abschluss zwischen Gebirge und Bohrloch dar. An die Produktionsrohrtour und deren Zementation werden hohe Anforderungen hinsichtlich der Dichtheit und mechanischen Festigkeit gestellt. Dabei muss die Produktionsrohrtour sicher Belastungen aus dem Gebirge und dem Bohrloch (Betriebsregime) aufnehmen. Die Produktionsrohrtour muss als mögliche sekundäre Barriere für einen H₂-Speicherbetrieb geeignet sein.

Bewertungsschwerpunkte

- Technischer Zustand, Dichtheit,
- Innen- und Außendruckfestigkeit,
- Zementsteinbeanspruchung,
- Axiallastfestigkeit.

Keilabsetzbereich

Beim Abfangen von Rohrtouren in keilförmigen Abfangvorrichtungen wirken Radial- und Tangentialkräfte im Rohrmaterial. Diese Kräfte überlagern sich mit der axialen Zugbelastung durch das Stranggewicht und eine ggf. eingebrachte Vorspannung. In der Umgebung der Abfangvorrichtung entsteht ein dreiachsiger Spannungszustand, der die zulässige Axialbelastung des glatten Rohres reduziert. Es wird ein von den Auslegungsstandards unabhängiger allgemeingültiger Bewertungsansatz zur Bewertung des Keilabsetzbereiches angewendet.

Bewertungsschwerpunkte:

- Druckkraft zwischen Rohr und Keil,
- Außendruck,
- Innendruck,
- Axialspannung,
- Tangentialspannung,
- Vergleichsspannung,
- Sicherheitsfaktor.

Tubingstrang/Förderrohrtour

Der Steigrohrstrang erfüllt die Anforderungen zum Austrag des Speichermediums und Schutz der Produktionsrohrtour. Belastungen aus dem Speicherbetrieb, wie Temperatur-, Druck- und Zugbeanspruchungen, Erosion und Korrosion sind durch den Steigrohrstrang aufzunehmen. Entsprechend bestehen hohe Anforderungen an die Materialeigenschaften. Der Steigrohrstrang geht in die Festigkeitsbewertung mit dem Eigengewicht unter Berücksichtigung des Auftriebs ein.

Bewertungsschwerpunkte

- Technischer Zustand, Dichtheit,
- Innen- und Außendruckfestigkeit,
- Axiallastfestigkeit,
- Beanspruchung Produktionspacker.

Absperrelemente/Packer/Doppelrohrtour

Absperrelemente wie der Packer oder der Doppelrohrschuh dienen primär als Absperrelemente, um u. a. Drücke und Druckschwankungen innerhalb des Steigrohrstranges von der Produktionsrohrtour fernzuhalten. Des Weiteren sind sie auch ein Festpunkt, um einen Steigrohrstrang in Spannung ziehen zu können. Sie sind außerdem integraler Bestandteil der primären Abdichtung für die Bohrlochintegrität.

Bewertungsschwerpunkte

- Temperaturbeständigkeit,
- Eignung für Bohrlochmedien, insbesondere Wasserstoff,
- Gasdichtheit,
- Aussagen zur zyklischen Beanspruchung (optional),
- zulässige mechanische Belastungen.

Untertagesicherheitsventile (UTSAV)

UTSAV sind selbstständig wirksame Bohrabsperrereinrichtungen, die im Falle eines Kontrollverlust über den Untergrundspeicher (Havarie) den sicheren Bohrlochabschluss gewährleisten sollen. Es muss sichergestellt werden, dass die Rohrtour, in welcher das UTSAV verbaut ist, für den Fall des Schließens ausgelegt ist und die dabei entstehenden Kräfte aufnehmen kann. Zur Bewertung der technischen Situation der Untertageförderinstallation nach dem Schließen des UTSAV sind die jeweiligen Extremsituationen zu betrachten. Ausgehend von der Belastungssituation im Speicherbetrieb sind die maximal wirkenden Axiallasten auf die Komplettierung und Verrohrung zu erfassen. Extremsituationen sind damit beim Schließen der UTSAV bei maximalen und minimalen Temperaturen sowie beim jeweiligen Lastzustand unter zu bestimmenden Drücken zu erwarten.

Bewertungsschwerpunkte

- Axiallastfestigkeit der Förderrohrtour,

- Änderung der Vorspannungssituation in der Förderrohrtour,
- Beanspruchung des Produktionspackers,
- Beanspruchung Landennippelprofil,
- Axialstfestigkeit Ankerrohrtour/Verflanschung.

9.2.5.4 Verschleiß, Korrosion

Korrosionsraten werden in die Festigkeitsberechnung als flächenhafter Abtrag eingeführt. Zur Beurteilung des Korrosionseinflusses für Bohrungen im Betrieb über die Zeit wird ein Bewertungszeitraum von bis zu 15 Jahren zugrunde gelegt. Für Neubohrungen wird zur Beurteilung der Korrosion üblicherweise ein Zeitraum von 30 Jahren angesetzt. Die vorgegebenen Zeiträume ermöglichen hinreichend genaue Aussagen für die Langzeitbewertung der technischen Sicherheit unter Berücksichtigung zeitabhängiger Einflussfaktoren. Auf der Grundlage vorliegender Ergebnisse aus umfangreichen Korrosionsuntersuchungen von vergleichbaren Objekten werden entsprechende Abschlagswerte an der Rohrrinnen- und Rohraußenkontur festgelegt. Die Summe beider Abtragsraten stellt eine Berechnungsgrundlage für die Bewertung des zeitabhängigen Materialverschleißes dar.

Ohne Berücksichtigung der geologischen und technischen Situation der Bohrungen im Einzelnen, lassen sich folgende grundsätzliche Aussagen zur Korrosionsansprache treffen:

Ankerrohrtour

Die Ankerrohrtour trägt die Bohrlochkopflasten und stellt die äußere Rohrtour einer Bohrung dar. Korrosion kann insbesondere im Übergangsbereich zum Bohrkeller und im Übergangsbereich zum Bodenflansch auftreten.

Technische Rohrtouren

Die technischen Rohrtouren decken grund- und schichtwasserführende geologische Formationen ab und stellen einen Korrosionsschutz für die Produktionsrohrtour dar. Korrosionserscheinungen an den technischen Rohrtouren führen hinsichtlich der Bohrlochsicherheit zu keinen Gefährdungen, da die Rohrtour im Rahmen der Speichersicherheit nicht den Anforderungen zur Festigkeit unterliegt. Dem Stand der Technik entsprechend erfolgt der Bohrlochkopfaufbau bei neuabgeteuften Bohrungen auf die technische Rohrtour. Lasten, die von der Bohrlochkopfkonstruktion ausgehen, werden auf die technische Rohrtour übertragen. In diesem Zusammenhang gilt es, Korrosionseinflüsse im oberen Bereich der Rohrtour zu berücksichtigen.

Produktionsrohrtour

Die Produktionsrohrtour gewährleistet als wichtiges Barriere-Element den sicheren Abschluss zwischen Gebirge und Bohrloch. Entsprechend bestehen Anforderungen zur Rohrfestigkeit und Dichtheit. Korrosionserscheinungen an der Produktionsrohrtour führen zu Materialschwächungen und damit zur Verringerung der Belastbarkeit. Über lange Zeiträume betrachtet, können Einschränkungen in der Funktionssicherheit auftreten.

Tabelle 106 zeigt die anzusetzenden Korrosionsraten an den Bohrlochverrohrungen.

Tabelle 106: Ankerrohrtour/Produktionsrohrtour

Korrosionsansätze – Rohraußenkontur	Einheit	
Rohrtour überdeckt durch süßwasserhaltige Schichten, Sauerstoffführung nicht ausgeschlossen (Übergangsbereich Ankerrohrtour)	[mm/a]	0,014
Rohrtour überdeckt durch technische Rohrtour	[mm/a]	0,002
Rohrtour überdeckt durch Schichten mit gering mineralisierten Schichtwässern (Buntsandstein)	[mm/a]	0,006
Rohrtour überdeckt durch Schichten mit gesättigten Schichtwässern (Zechstein)	[mm/a]	0,002
Rohrtour überdeckt durch Salzschieben		keine Korrosion
Korrosionsansätze – Rohrinnekontur		
Rohrtour überdeckt durch technische Rohrtour	[mm/a]	0,002

Steigrohrstrang

Belastungen aus dem Speicherbetrieb (Druck, Temperatur) wirken sich unmittelbar auf den Steigrohrstrang aus. Entsprechend bestehen analog zu der Produktionsrohrtour Forderungen zur Festigkeit und Dichtheit. Korrosionseinflüsse bedingt durch die Speichermedien können zu Materialschwächungen führen. Tabelle 107 beinhaltet die Korrosionsansätze mit Bezug auf einen Steigrohrstrang.

Tabelle 107: Steigrohrstrang/Schutzrohrtour

Korrosionsansätze – Rohraußenkontur	Einheit	
Rohrtour abgepackert, Ringraum mit Schutzflüssigkeit (mit Inhibitor) gefüllt	[mm/a]	0,002
Rohrtour unterhalb Packer Öl/Schutzflüssigkeit mit Inhibitor	[mm/a]	0,002
Korrosionsansätze – Rohrinnekontur		
Sole	[mm/a]	0,002

Materialkennwerte

Die Integritätsbewertung basiert auf der vorliegenden Anlagendokumentation und den definierten Ansätzen. Dazu zählen neben den Materialzertifikaten und Einbauprotokollen (Bohrloch- und Sondendokumentation) auch Ergebnisse von Bohrlochmessungen (z. B. Casinginspektion). Tabelle 108 fasst die Festlegungen der Materialkennwerte für die technische Bewertung zusammen.

Tabelle 108: Festlegung der Materialkennwerte für die technische Bewertung

Streckgrenze	Mindeststreckgrenze nach API laut Zertifikat bzw. Rohreinbauprotokoll oder entsprechend der Vorgaben für die H ₂ -Speicherung.
Wanddicke	Liegen Messwerte aus Casinginspektionsmessungen vor, sind die diskreten Messwerte abzüglich Messtoleranz zu verwenden. Liegen keine Messwerte vor, sind die zertifizierten bzw. im Rohreinbauprotokoll dokumentierten Nominalwanddicken anzusetzen.
Ovalität	Toleranz nach API: $\pm 0,75\%$ zum Außenradius Liegen Messwerte aus Casinginspektionsmessungen vor, gilt folgender Bewertungsmodus: Ovalität $> 1,5\%$ – Reduktion kritische Außendruckfestigkeit um Faktor 0,9 Ovalität $> 3\%$ – Reduktion kritische Außendruckfestigkeit um Faktor 0,8 Relevantes Minimumteufenintervall 1 m

9.2.5.5 Lastannahmen und Berechnungsansätze

Die nachfolgenden Berechnungsansätze und Lastannahmen dienen zur Beschreibung der Auslegung bzw. der Auslegungsgrundlagen zum Schutz der Umwelt und dem Umfeld an der Oberfläche, zum Grundwasserschutz, zum Schutz von Deckgebirge (Barriere-Formation), für den Speicherhorizont, für den Bohrungsausbau und von Kavernenbohrungen. Sie definieren die Leistungsnormen und beinhalten die Betriebsgrenzen der Barrieren und definieren somit die Grundlagen für die Bewertung der Wirksamkeit der Barriere-Elemente.

- Konvergenz: Konvergenzrate in %/a
- Innendruckberechnung – Verrohrung: Berechnung der kritischen Innendruckfestigkeit und Innendruckbelastung nach BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“

Geforderter Sicherheitsbeiwert $S_i \geq 1,1$

Produktionsrohrtour

Zur Berechnung des wirkenden Innendruckes ist der maximale Speicherdruck abzüglich des Eigengewichts der Fluidsäule anzusetzen (Bezug aktuelle Rohrschuh-Teufe). Der hydrostatische Druck der Ringraumschutzflüssigkeit ist als Überlagerungsdruck zu berücksichtigen. Als wirksamer Außendruck wird ein Flüssigkeitsgradient entsprechend der Dichte einer Flüssigkeit hinter den Rohren von 1.150 kg/m^3 angenommen.

Steigrohrstrang/Schutzrohrtour

Die Berechnung des wirkenden Innendruckes berücksichtigt den hydrostatischen Druck der Steigraumflüssigkeit bzw. den maximalen Speicher- bzw. Einpressdruck zuzüglich des Eigengewichts der Fluidsäule. Als wirksamer Außendruck wird der hydrostatische Druck der Ringraumflüssigkeit an der Außenkontur der Rohrtour als Überlagerungsdruck berücksichtigt.

- Außendruckfestigkeit und Außendruckbelastung: Ermittlung der kritischen Außendruckfestigkeit und Außendruckbelastung nach BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“.

Geforderter Sicherheitsbeiwert $S_a \geq 1,0$

Als Außendruckbelastung wird ein gleichmäßig über den Rohrumfang wirkender Druck angenommen. Dieser ergibt sich aus dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeit hinter den Rohren oder in Salzstrecken mit plastischem Verhalten – aus dem analog zu Flüssigkeiten wirkenden Druck des Salzes. Der sich auf die Außendruckfestigkeit reduzierend auswirkende biaxiale Spannungszustand beim gleichzeitigen Auftreten von Zug- und Außendruck wird berücksichtigt. Die Zugspannung resultiert aus dem Eigengewicht der Rohrtour sowie Spannungsänderungen durch Druck- und Temperaturvariationen. Eine Spannungsminderung durch den Auftrieb beim Einbau der Rohre bleibt unberücksichtigt, da sich Reibungskräfte überlagern können. Im Rahmen der technischen Bewertung wird der spannungsmindernde Innendruck entsprechend der Betriebssituation berücksichtigt.

Produktionsrohrtour

Die Außendrucksituation an der Produktionsrohrtour ist gekennzeichnet durch Gebirgsdruckbelastungen im Bereich plastischer Schichten und dem Druck der Schichtmedien. Der „eingefrorene“ biaxiale Spannungszustand bedingt durch das Eigengewicht bzw. die Absetzlast der Produktionsrohrtour zum Zeitpunkt der Zementation wird berücksichtigt.

- *Außendruckansatz im nicht plastischen Gebirge*

Im nicht plastischen Gebirge kann Spülung oder mineralisierte Schichtflüssigkeit mit Dichten bis 1.300 kg/m^3 anstehen. Für die Ermittlung des Außendruckes wird eine Flüssigkeit der Dichte 1.300 kg/m^3 angenommen.

- *Außendruckansatz im plastischen Salinar*

Die anzusetzenden Gebirgsdruckgradienten für den Speicherort sind nach den Ergebnissen entsprechender gebirgsmechanischer Untersuchungen oder gemäß BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“ anzusetzen.

- *Betriebszustand*

Die Integritätsbewertung schließt den gegebenen Betriebszustand ein. Abweichend zum BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“ wird der jeweilige Spannungszustand unter Betriebsbedingungen erfasst und bewertet. Für die Produktionsrohrtour gilt, dass im Betriebszustand der hydrostatische Druck der Ringraumschutzflüssigkeit dem Außendruck entgegenwirkt.

Steigrohrstrang/Schutzrohrtour

Die Außendrucksituation der Steigrohrstrang/Schutzrohrtour ist gekennzeichnet durch den hydrostatischen Druck der Ringraumschutzflüssigkeit im freien Strangteil, der durch den zulässigen Ringraumkopfdruk überlagert werden kann.

- *Außendruckansatz im freien Strangteil*

Der wirkende Außendruck berechnet sich aus dem hydrostatischen Druck der Ringraumschutzflüssigkeit zuzüglich dem zulässigen Ringraumkopfdruk. Entsprechend den Druckverhältnissen liegt der kritische Querschnitt im Verbindungsbereich Packer/Steigrohrstrang bzw. Packer/Schutzrohrtour. Der biaxiale Spannungszustand durch das gleichzeitige Auftreten von Außendruck und axialer Beanspruchung wird berücksichtigt.

- *Betriebszustand*

Im Betriebszustand (siehe Abbildung 252) steht an der Innenkontur der Steigrohrstrang/Schutzrohrtour im ungünstigsten Fall der minimale zulässige Betriebsdruck an, der dem Außendruck entgegenwirkt. Eine extreme Speicherfahrweise (minimale Innendrucke und maximale Temperaturen bzw. umgekehrt) und eine gleichzeitige Entlastung des Stranges auf atmosphärischen Innendruck (Steigrohrstrang mittels Stopfen abgesperrt) ist ausgeschlossen.

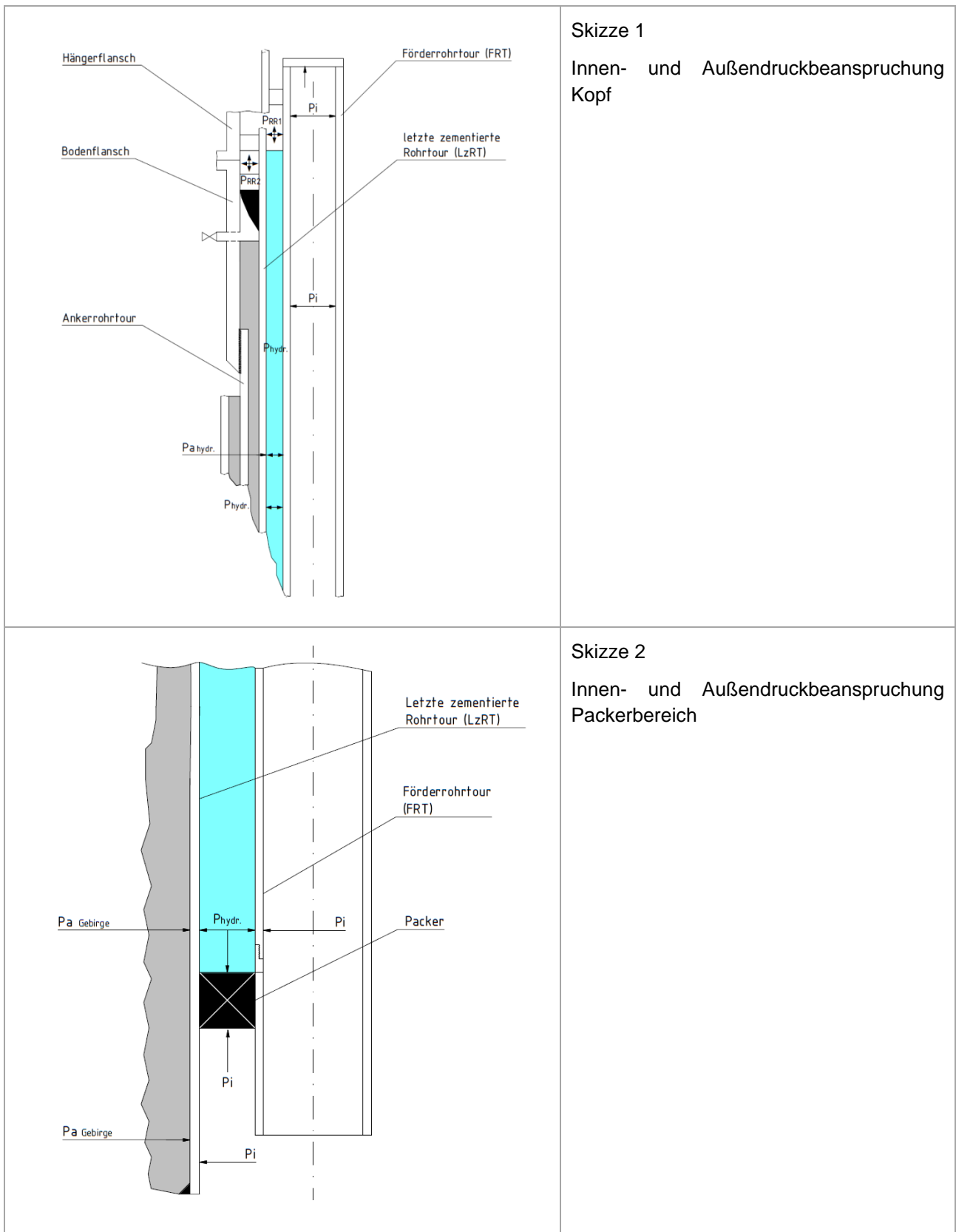


Abbildung 252: Lastfallanalyse Drucksituation Gasspeicherbohrung

Symbol	Bezeichnung	Beanspruchung
p_i	Steigraumdruck, teufenabhängig	Innendruck FRT, Druck Packerunterkante, Flächendruck Bohrlochkopf ($p_i \cdot A_i$ FRT), Innendruck IzRT unterhalb Packer
p_{RR}	Ringraumkopfdruck	Flächendruck Bohrlochkopf $p_{RR} \cdot A_i$, Innendruck IzRT (Überlagerung mit $p_{hyd.}$), Außendruck FRT (Überlagerung mit $p_{hyd.}$), Druck Packeroberkante
$p_{hyd.}$	Hydrostatischer Druck einer Flüssigkeitssäule, teufenabhängig	Innendruck IzRT (Überlagerung mit p_{RR}), Außendruck FRT (Überlagerung p_{RR}), Druck Packeroberkante (Überlagerung mit p_{RR})
$p_{a\ Geb.}$	Gebirgsdruck	Außendruck IzRT
$p_{a\ hyd.}$	Hydrostatischer Druck einer anzunehmenden Flüssigkeitssäule im zementierten Bereich gemäß BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“	Außendruck IzRT

- Axiallastberechnung – Verrohrung: Die Berechnung der kritischen Zugbelastungen und Axiallasten erfolgt nach BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“. Es ist die Gesamtlast der Rohrtour zu erfassen und im Hinblick auf Belastbarkeit der Rohrverbindungen und des Rohrquerschnittes zu berücksichtigen. Der BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“ trifft keine Festlegungen zu den Lastansätzen. Für die kritischen Zuglasten gilt der Berechnungsansatz nach API auf der Grundlage der minimalen Streckgrenze laut Herstellerangabe.

Sicherheitsbeiwerte gemäß BVEG-Leitfaden „Futterrohrberechnung“:

Glattes Rohr (Zug)	$S_z \geq 1,25$
Schweißverbindungen	$S_{zV} \geq 1,25$
Schraubverbinder (Zug) < 13 ³ / ₈ "	$S_{zV} \geq 1,60$
Schraubverbinder (Zug) ≥ 13 ³ / ₈ "	$S_{zV} \geq 1,80$
Rohrkörper Ankerrohre (Druck)	$S_{zART} \geq 1,1$
Verbinder Ankerrohre (Druck)	$S_{zART} \geq 1,1$

- Ankerrohrtour – Übergang Bodenflansch

Aufgrund der Anordnung der Einspannungen der Rohrtour im Grundflanschniveau oder darüber wirkt auf die Ankerrohrtour eine Druckkraft entsprechend der Absetzlast der Rohrtouren, gemindert um die Zugkraft, hervorgerufen durch die Druck beaufschlagte Schattenfläche des Steigrohrstranges und Ringräume im Bohrlochkopf.

- Ankerrohrtour – unterhalb Bodenflansch

o *Ankerrohrtour zementiert im Standrohr*

Im zementierten Teil der Ankerrohrtour werden die wirkenden Axiallasten über den zementierten Querschnitt abgefangen (siehe Abbildung 253). Die Tragfähigkeit der Zementation wird dabei durch die Scherfestigkeit und Haftreibung zwischen Rohr und Zement bestimmt. Da eine Scherfestigkeit nicht unbedingt vorausgesetzt werden kann, wird nur die Haftreibung betrachtet. Die Haftreibung entspricht einer Kraft, die erforderlich ist, um die Rohrtour gegen die Zementation zu bewegen. Der Haftreibungskoeffizient für den Verbund Zement/Rohr liegt bei 0,25 MPa. Mittels nachstehender Beziehung berechnet sich die erforderliche Kraft zur Überwindung der Haftreibung zu

$$F_{\text{krit Verbund Zement/Rohr}} = \pi \cdot \text{OD Casing} \cdot \mu_{\text{Ze/RT}} \quad [\text{N/m}]$$

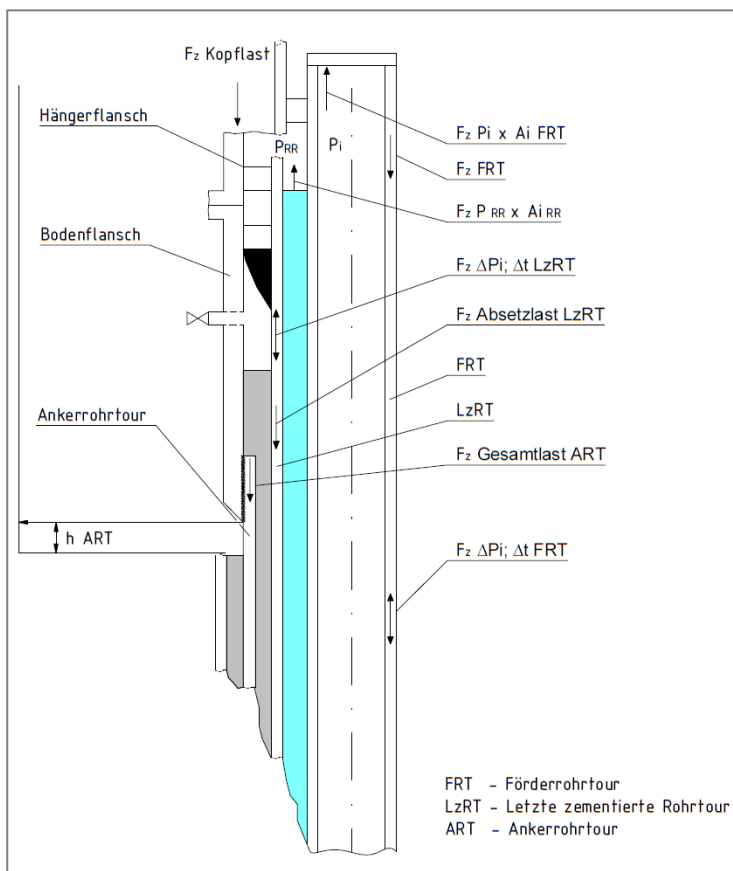


Abbildung 253: Lastsituation Übergang ART/Bodenflansch

Symbol	Bezeichnung	Beanspruchung
Fz Kopflast	Gewichtskraft Bohrlochkopf	Druckkraftkomponente ART/Bodenflansch
Fz $\pi \cdot A_i$ FRT	Flächenkraft Bohrlochkopf (Innenquerschnitt FRT)	Zugkraftkomponente ART/Bodenflansch
Fz p RR, A_i RR	Flächenkraft Bohrlochkopf (Innenquerschnitt Ringraum)	Zugkraftkomponente ART/Bodenflansch
Fz Absetzlast	maximale Hakenlast einer Rohrtour beim Absetzen	Zugkraftkomponente FRT, IzRT beim Absetzen (Vorspannung, Eigengewicht, Auftrieb), Druckkraft ART/Bodenflansch
Fz Δt , Δp_i	Kraftänderung in vorgespannten Strängen durch Druck- und Temperaturänderungen	Druck-/Zugkraftkomponente FRT/DRL, IzRT Druck-/Zugkraftkomponente ART/Bo- denflansch/Druck/ Zugkraftkomponente Packer
Fz Vorspannung	Kraftkomponente zum Ausgleich von Tem- peratureffekten	Zugkraftkomponente FRT, IzRT Druckkraftkomponente ART/Boden- flansch, Zugkraftkomponente Packer
Fz Konvergenz	Axiale Kraftkomponente, induziert durch Konvergenz im Bereich der IzRT	Zugkraftkomponente FRT Druckkraftkomponente ART/Boden- flansch
h ART	Freie Rohrlänge ART	Knicken

Die Zugkraft (+) ist positiv und die Druckkraft (-) negativ definiert.

- Keilabsetzbereich

Für alle Keile (außer Cameron) wird als Grundlage der Berechnungsalgorithmus der Vergleichsspannungshypothese nach „von Mises“ angesetzt. Es werden geometrische und physikalische Einflüsse berücksichtigt. Die Keilabsetzproblematik wird durch den BVEG-Leitfaden „Futterrohrtourberechnung“ nicht erfasst. Zur Ermittlung von Materialspannungen in Keilabsetzbereichen, siehe Abbildung 254, von Rohrtouren infolge Axialbelastung wird der allgemeingültige Bewertungsansatz angewendet. Es wird die Triaxialfestigkeit bewertet.

Sicherheitsbeiwert für Triaxialfestigkeit $Sz_{TAX} = Sz_K \geq 1,25$

Grundsätzlich sind bei der Berechnung von Materialspannungen im Keilabsetzbereich die entsprechenden Daten aus zur Verfügung stehenden Dokumentationen zu verwenden.

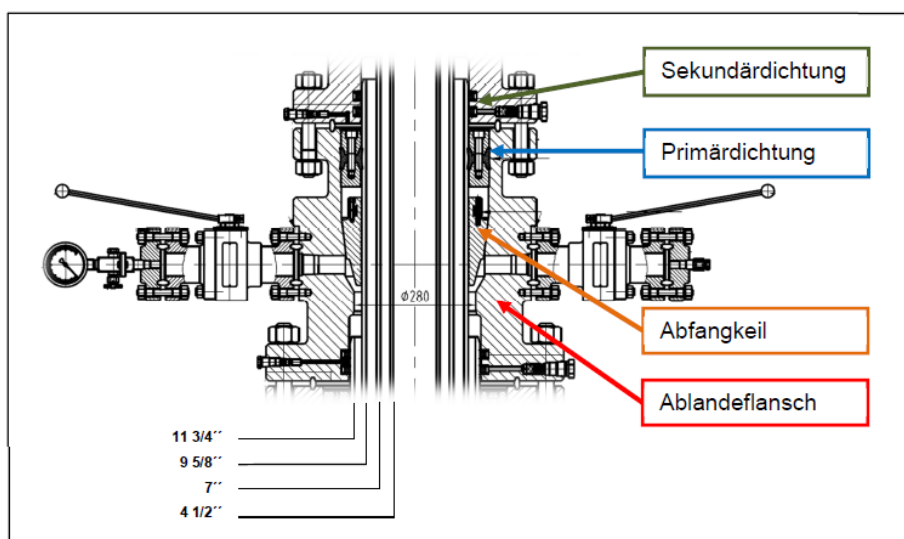


Abbildung 254: Keilabhängung einer Rohrtour

- Rohrtour zementiert

Die Beanspruchung der zementierten Rohrtour auf Zug (axiale Beanspruchung) erfolgt nur durch das Eigengewicht der Rohrtour. Im Verhältnis zur Zugfestigkeit ist die Zugbeanspruchung vernachlässigbar gering. Über die Zementation besteht eine kraftschlüssige Bindung zwischen Gebirge/Zement/Rohrtour. Axiale Lasten werden über den zementierten Querschnitt aufgenommen und führen somit nur zu geringen Beanspruchungen der Rohrtour. Die axiale Lastsituation der Produktionsrohrtour im zementierten Bereich wird aufgrund der genannten Bedingungen nicht berücksichtigt.

- Rohrtour nicht zementiert

Die Bewertung der axialen Lastsituation baut auf den Regeln des BVEG-Leitfadens „Futterrohrberechnung“ auf. Die axiale Lastsituation ist gekennzeichnet durch:

- Vorspannung der Rohrtour zum Ausgleich von Druck- und Temperaturspannungen,

- Eigengewicht der Rohrtour,
- Druckänderungen in der Rohrtour (Kontraballooning und Ballooning),
- Temperaturänderungen,
- Kolbkräfte bedingt durch Querschnittsänderungen,
- Entlastungskraft (Auftrieb der Rohrtour im flüssigkeitsbefüllten Bohrloch),
- Spiralknickwirkung.

- Casing- und Tubingverbinder

Schraubverbindungen

Sie sind hinsichtlich der Festigkeiten gegenüber dem glatten Rohr gesondert zu bewerten, soweit die Abstreiffestigkeiten kleiner als die Rohrfestigkeiten sind, z. B. Verbinder mit kurzen API-Muffen. Entsprechend der verwendeten Verbindertypen sind Aussagen zur Dichtheit zu treffen. Schraubverbindungen nach API-Standard können bei der Innendruck- und Axiallastfestigkeit abweichende Festigkeiten zu den glatten Rohren aufweisen. Die Außendruckfestigkeit wird für das glatte Rohr und die Verbinder nach API als konstant angegeben. Generell gilt, dass für die Integritätsbewertungen von Rohrtouren die jeweils geringsten Werte der glatten Rohre oder Verbinder für die Innendruck- und Axiallastfestigkeit nach API und anderen Normen anzusetzen sind.

Schweißverbindungen

Für Schweißverbindungen gilt, dass die Materialeigenschaften denen der verschweißten Rohre gleich zu setzen sind. Es ist für die Festigkeitsberechnung die minimale Streckgrenze laut Zertifikat bzw. Rohreinbauprotokoll anzusetzen. Die Herstellung der Schweißverbindungen erfolgt in der Regel durch konventionelle Schweißtechnik und einer zerstörungsfreien Schweißnahtprüfung. Anschließend ist ein Drucktest und eine zerstörungsfreie Werkstoffprüfung durchzuführen.

- Absperrelemente Packer/Doppelrohrschuh

Generell gilt, dass eine dauerhafte Wechselbelastung am Packer/Doppelrohrschuh auszuschließen ist, da dies zur Schädigung der Dichtelemente führen kann und somit Undichtheiten im Packerbereich entstehen können. Zu bewerten sind die Differenzdruck- und die Axiallastsituation am Packer/Doppelrohrschuh.

Differenzdrucksituation

Der maximale Differenzdruck, der auf die Unterkante der Manschetten wirkt, stellt sich bei $p_i \text{ SR} = \text{max.}$ und $p_i \text{ RR} = 0 \text{ bar}$ ein.

Der maximale Differenzdruck, der auf die Oberkante der Manschetten wirkt, stellt sich bei $p_i \text{ SR} = \text{min.}$ und $p_i \text{ RR} = p_i \text{ SR}$ ein.

- Axiallastsituation

Entsprechend den Betriebsbedingungen stellen sich maximale Zuglasten am Packer/Doppelrohrschuh bei

$$t = t_{\min.} \text{ und } p_{i \text{ SR}} = p_{i \text{ min.}} \text{ ein.}$$

Entsprechend den Betriebsbedingungen stellen sich minimale Zuglasten am Packer/Doppelrohrschuh bei

$$t = t_{\max.}; p_{i \text{ RR}} \text{ und } p_{i \text{ SR}} = p_{i \text{ max.}} \text{ ein.}$$

Die ermittelten Belastungspunkte (siehe Abbildung 255) sind für die Bewertung von Produkionspackern mit der vom Hersteller zur Verfügung gestellten Belastungshüllkurve (Envelope) zu vergleichen.

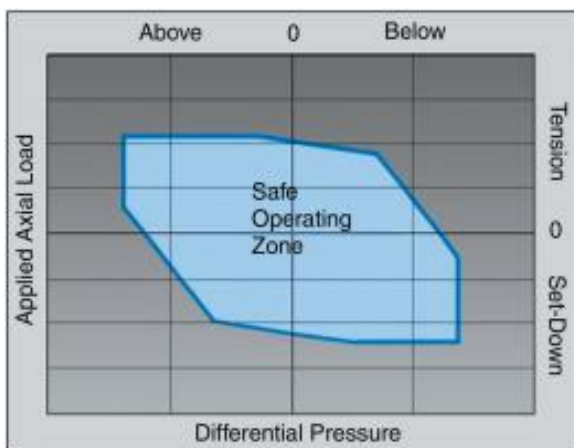


Abbildung 255: [Belastungshüllkurve \(petrowiki.org\)](http://petrowiki.org)

- Funktionalität

Wenn Einschränkungen hinsichtlich der Funktionalität dokumentiert sind, müssen diese grundsätzlich in der technischen Bewertung erfasst und beurteilt werden.

- Zementsteinbewertung – Verrohrung

Im Rahmen von Integritätsbewertungen ist die Berechnung von Spannungen im Zementstein von zementierten Rohrtouren ein Bewertungsbestandteil in Bereichen plastischer und nicht plastischer Gebirgsformationen. Die Spannungsberechnung erfolgt für den Bohrungsabschnitt Gebirge/Zementstein/zementierte Rohrtour an der Innenkontur des Zementsteins. Bei der Bewertung der Zementation der Produktionsrohrtour, die die technische Dichtheit zum Speicher gewährleisten soll, wird von dem Grundsatz ausgegangen, dass tangentielle oder radiale Zugspannungen im Zementstein unzulässig sind. Die Zugfestigkeiten von Zementen liegen zwischen 7 bis 12 % der einachsigen Zugfestigkeit und damit zwischen 2 bis 3 MPa. Aufgrund der niedrigen Festigkeiten können bereits geringe Zugspannungen im Zementstein zu Schäden führen, die letztlich die Dichtheit einschränken. Aus diesem Grund wird im Bewertungsansatz davon ausgegangen, dass Zugspannungen nicht auftreten sollten. Ausgangs- und somit Vergleichssituation sind die Bedingungen zum Zeitpunkt der Zementation.

Die Annahmen sind:

- Der Zementmantel erhärtet spannungslos.
- Die Spannungen und Verschiebungen in der Rohrtour werden durch die Wirkung des Innendruckes durch die Flüssigkeit in der Rohrtour (Nachpumpflüssigkeit) „eingefroren“.
- Die Kontaktflächen sind spannungslos.

Druckänderungen im Ringraum zum Zeitpunkt der Komplettierung der Bohrung und danach werden durch sich ändernde Betriebsparameter (p , T) als Druck- und Temperaturdifferenzen Δp_i und ΔT_i aufgeprägt.

Variierende Belastungsarten durch veränderbare Betriebsparameter *Innendruck, Porenwasserdruck bzw. Gebirgsdruck und Temperatur* werden berücksichtigt.

Die nachstehende Abbildung 256 zeigt schematisch die tangentielle (Index φ) und radiale (Index r) Spannungssituation an der Kontur Rohr/Zement/Gebirge.

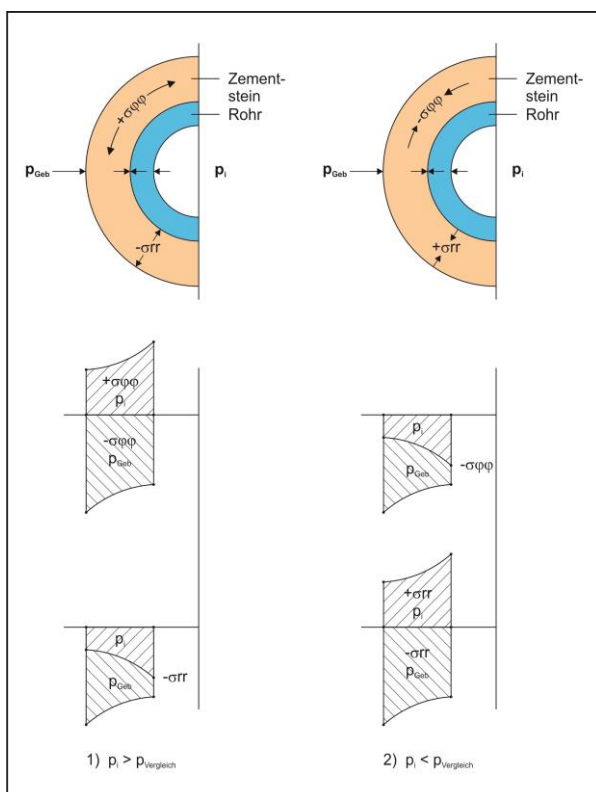


Abbildung 256: Tangentiale- und Radiale-Spannungssituation an der Kontur Rohr/Zement/Gebirge

- Außendruckwirkung im nicht plastischen Gebirge
 - o Wirkung an der Kontur Gebirge/Zementstein,
 - o zeitunabhängig,
 - o teufenabhängig.

- Außendruckwirkung im plastischen Gebirge
 - o Wirkung an der Kontur Gebirge/Zementstein,
 - o mit zeitabhängigen Gebirgsdruckaufbau,
 - o teufenabhängig,
 - o temperaturabhängig.

- Innendruck- und Temperaturänderungen

Die Änderungen in den Betriebsbedingungen rufen Innendruck- und Temperaturänderungen im Steigraum der Produktionsrohrtour hervor und beanspruchen somit den Zementmantel. Es wird ein ebener Verzerrungszustand angenommen, d. h., es wird vorausgesetzt, dass infolge der Zementation keine Verschiebung in axialer Richtung auftreten kann. Die durch die feste Einspannung behinderte Verschiebung führt zu einer zusätzlichen Spannung in axialer Richtung. Die nachfolgende Abbildung 257 beschreibt die Geometrie des Verbundsystems Rohr/Zement/Gebirge sowie die Angriffskontouren für den Außen- bzw. Innendruck. Weiter ist im oberen Teil der Abbildung mit Hilfe der Dreiecke schematisch die feste Einspannung der Rohrtour in Axial-Richtung (ebener Verzerrungszustand) dargestellt.

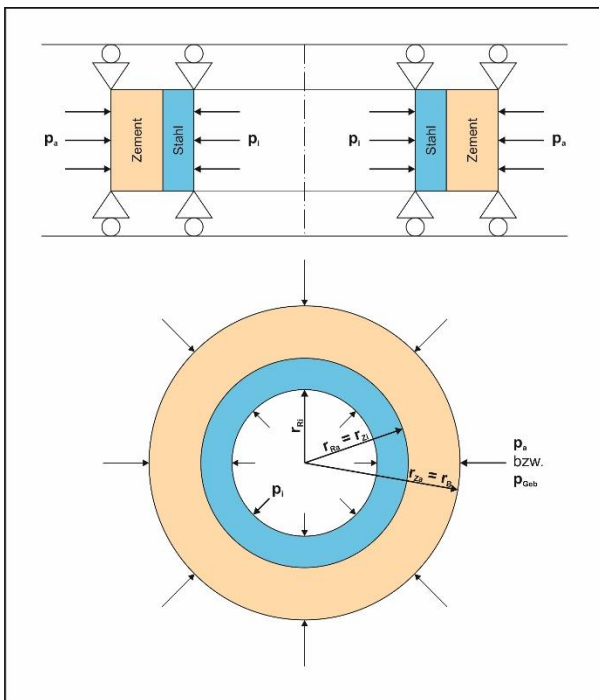


Abbildung 257: Geometrie des Verbundsystems Rohr/Zement/Gebirge sowie die Angriffskonturen für den Innen- bzw. Außendruck

Verwendete Kurzzeichen

$p_{i,\text{effektiv}}$ [bar]	Effektiv aus dem betrachteten Lastfall in der betrachteten Teufe vorhandener Druck (Kopfdruck und hydrostatischer Druck)
Δp_i [bar]	Druckdifferenz aus Lastfalldruck (Effektivdruck) und Vergleichsdruck (Druck während bzw. unmittelbar nach der Zementation)
ΔT [°C]	Temperaturdifferenz aus Lastfalltemperatur und Vergleichstemperatur (Temperatur während des Rohreinbaus bzw. Zementation)
$\sigma_{r,Zi}$ [MPa]	Aus Temperatur und Druck berechnete Spannung in Radial-Richtung in der betrachteten Teufe
$\sigma_{\varphi,Zi}$ [MPa]	Aus Temperatur und Druck berechnete Spannung in Tangential-Richtung in der betrachteten Teufe
$\sigma_{z,Zi}$ [MPa]	Aus Temperatur und Druck berechnete Spannung in Axial-Richtung in der betrachteten Teufe

Bei der Betrachtung der Zementsteinbeanspruchung/-belastbarkeit (Tabelle 109) werden folgende Extremfälle betrachtet:

Tabelle 109: Lastfälle Zementsteinbewertung

Lastfall	Druckbedingungen Innenkontur Produktionsrohrtour	Mittlere Bohrlochtemperatur	Beanspruchung Kontur Zementsteininnenkante
1	p_{MAX} Kopf RR 1	Minimum	Ausbildung tangentialer Zugspannungen – Rissbildung im Zementstein?
2	p_{MAX} Kopf RR1	Maximum	Ausbildung tangentialer Zugspannungen – Rissbildung im Zementstein?
3	p_{MIN} Kopf ohne Druck	Minimum	Haftzugspannungen bzw. Ablösen der Rohrtour vom Zementstein
4	p_{MIN} Kopf ohne Druck	Maximum	Haftzugspannungen bzw. Ablösen der Rohrtour vom Zementstein

9.2.5.6 Bewertung Ringräume

Analog zur Erdgasspeicherung sind auch bei der H₂-Speicherung Ringraumaktivitäten an den Bohrungen zu beobachten und im Rahmen der Bewertung gesondert zu betrachten.

Ringraumaktivitäten – Analyse

Zur Bewertung von Ringraumaktivitäten sind nachstehende Positionen zu erfassen:

- Druckverlauf in Abhängigkeit des Speicherregimes,
- Ringraumspiegel,
- Medienzufuss.

Es gilt der Grundsatz: Die Ringraumdruckbewertung der Kavernenbohrungen ist hinsichtlich der zulässigen Druckbeanspruchung durchzuführen.

Bewertungsalgorithmus abgepackter Ringraum

Die Ermittlung des zulässigen Ringraumdrucks für einen abgepackerten Ringraum setzt sich aus den folgenden Positionen zusammen:

- Innendruckfestigkeit der äußeren Rohrtour
zulässige Innendruckfestigkeit äußere Rohrtour abzüglich hydrostatischer Säule (RRSF);
- Außendruckfestigkeit innere Rohrtour
zulässige Außendruckfestigkeit der inneren Rohrtour; als wirksamer Außendruck steht der hydrostatische Druck der Ringraumflüssigkeit abzüglich dem minimalen Speicherdruck an;

- Verflanschung
Druckstufe und zulässige Axiallastbelastbarkeit am Übergang Bodenflansch/ART;
- Packerequipment
Differenzdrucksituation in Packerteufe und zulässige Axiallastbelastbarkeit;
- Zementstein äußere Rohrtour.

Der jeweils kleinste ermittelte zulässige Ringraumdruck stellt den Grenzwert dar.

Bewertungsalgorithmus zementierter Ringraum

Nach technischer Definition gemäß EN ISO 10423 und API ist die Rohrtour, auf welcher der Bohrlochkopf aufgebaut ist, als Ankerrohrtour zu bezeichnen. Nach dem Stand der Technik ist die Ankerrohrtour die technische Rohrtour. Somit ist der zu überwachende zementierte Ringraum eingebunden. Die Ermittlung des zulässigen Ringraumdrucks des zementierten Ringraums setzt sich aus den folgenden Positionen zusammen:

- Innendruckfestigkeit der äußeren Rohrtour,
- Außendruckfestigkeit der inneren Rohrtour,
- Verflanschung,
- Gebirge im Rohrschuhbereich äußere Rohrtour.

Der jeweils kleinste ermittelte zulässige Ringraumdruck stellt den Grenzwert dar.

Grundlegend ist bei Aktivitäten im zementierten Ringraum zunächst zu prüfen, ob ein Umstieg vom vorgelagerten Steig- und Ringraum möglich ist. Treten im zementierten Ringraum Aktivitäten auf, sind sowohl der Zustand der Zementation der zementierten Rohrtour zu bewerten als auch die möglichen Zirkulationen an der Außenkontur des Bohrungsausbaus und in der anstehenden Formation abzuschätzen.

Ansatz Bereich Gebirge/Rohrschuh Technische Rohrtour

Für zementierte oder teilweise zementierte Ringräume mit Zementationslängen > 50 m in der technischen Rohrtour kann davon ausgegangen werden, dass die Zementation hydraulisch dicht ist. Zur Vermeidung möglicher Fluidabwanderungen ins Gebirge muss in Rohrschuhteufe der Ankerrohrtour eine Drucksituation abgesichert werden, die einen Medienumstieg ins Gebirge bei einer möglichen Undichtheit der Zementation ausschließt. Der anstehende Ringraumdruck am Rohrschuh der Ankerrohrtour/technischen Rohrtour sollte den Flüssigkeitsdruckkoeffizienten des Gebirges nicht überschreiten. Bezugsteufe für die Berechnung des zulässigen Ringraumkopfdruckes ist die Rohrschuhteufe der Ankerrohrtour/technischen Rohrtour abzüglich eines Sicherheitsabstandes von 50 m. Bei der Berechnung des zulässigen Ringraumkopfdruckes wird weiterhin das Eigengewicht der Mediensäule in Abhängigkeit der zu betrachtenden Teufe und die Druckdifferenz zum hydrostatischen Druck der Ringraumflüssigkeit berücksichtigt. Bei Ringräumen, die zum Gebirge offen anstehen oder deren Zementationsstrecke in der technischen Rohrtour unter 50 m liegt, ist das Erreichen des Fracdrucks am Rohrschuh und im darunter anstehenden offenen Gebirge auszuschließen. Neben dem Verlust der Ringraumflüssigkeit soll auch eine mögliche Medienabwanderung vermieden werden. Zur Berechnung des zulässigen Ringraumkopfdruckes wird der kleinste ermittelte Gradient am Rohrschuh der

zu bewertenden Rohrtour zugrunde gelegt. Der Sicherheitsabschlag beträgt 5 bar. Der Sicherheitsabschlag erhöht sich auf 10 bar, wenn die Bezugsteufe (Zementkopfteufe) mehr als 50 m unterhalb des Rohrschuhs der zu bewertenden Rohrtour liegt. Der Sicherheitsabschlag von 10 bar berücksichtigt nicht erfasste Inhomogenitäten im offenen Gebirgsintervall.

Zulässige Ringraumdrücke

Die technisch zulässigen Ringraumkopfdrücke für zementierte Ringräume werden getrennt betrachtet. Im Ergebnis der technischen Bewertung liegen technisch zulässige Ringraumkopfdrücke (MAASP) für alle Ringräume vor. Diese maximal zulässigen Drücke (MAASP) stellen den Korrelationswert für gemessene und analysierte Werte aus der Drucküberwachung dar.

9.2.5.7 Lastfallanalysen

Auch bei der H₂-Speicherung sind die Lastfallanalysen bohrungsspezifisch zu betrachten. Grundsätzlich gilt unabhängig vom Bohrungstyp, dass die Belastungsenvelope einer Bohrung abgefahren wird. Dazu werden die Extrembedingungen (Druck, Temperatur) im Normalbetrieb, basierend auf thermodynamischen Betrachtungen, denen eine Bohrung während ihres Betriebes unterliegen kann, definiert.

9.2.5.8 Ergebnisdarstellung, Dokumentation und Empfehlungen

Die Integritätsbewertungen erfolgen auf der Basis der geltenden Normen, Regeln, Richtlinien und Verordnungen und werden zyklisch unter Berücksichtigung aller vorhandenen Bohrungs- und Betriebsdaten sowie Mess- und Testergebnisse aktualisiert. Für Bestandsbohrungen sollten Verfahren und Bedingungen, in Anlehnung an die BVEG, beschrieben werden, mit denen das Ziel Integritätsnachweis einer H₂-Speicherbohrung erreicht werden kann.

Die Bewertung der Festigkeiten (u. A. Innendruck, Außendruck, Axiallast) für Bestandsbohrungen sowie für Bohrungen in der Planungsphase ist mittels der hauseigenen Software der UGS GmbH SEW – Safety Evaluation of Wells – möglich (siehe Abbildung 258). Die Software kann fallbezogen auf unterschiedliche Gegebenheiten (beispielsweise unterschiedliche Speichermedien) angepasst werden. Für das Verbundvorhaben H₂-UGS wurde die Software für den Anwendungsfall „H₂-Speicherung“ angepasst. Durch die Eingabe unterschiedlicher Lastfallparameter und die Abgrenzung von Lebenszyklen ist eine Bewertung der Sicherheiten für den Istzustand sowie für Trendbetrachtungen möglich.

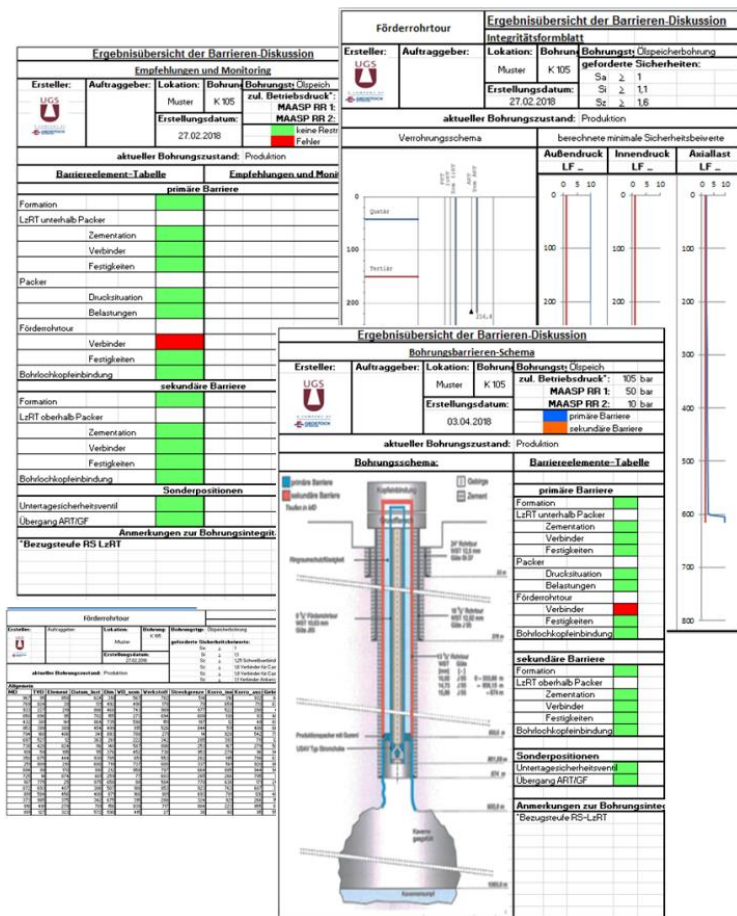





Abbildung 258: Beispielhafte Ergebnisdarstellung des SEW-Programms

Nachfolgend wird eine Ergebnisdarstellung exemplarisch dargelegt.

Bewertete Bereiche	Wasserstoff-Speicherbohrung
<u>Primäre Barriere</u>	
Formation RS-Bereich LzRT	✓
Letzte zementierte Rohrtour unterhalb Packer	
Festigkeiten	✓
Zementation	✓
Verbinder	✗
Packer	✓
Förderrohrtour	
Festigkeiten	✓
Verbinder	✓
UTSAV	✓
Bohrlochkopfeinbindung Förderrohrtour	✓
<u>Sekundäre Barriere</u>	
Formation oberhalb Packer	✓
Letzte zementierte Rohrtour	
Festigkeiten	✓
Casingverbinder	✓
Zementation	✓
Bohrlochkopfeinbindung LzRT	✓
<u>Übergang Ankerrohrtour/ Grundflansch</u>	✓
 keine Restriktionen  Restriktionen  Barriere-Fehler, keine Restriktionen kein Integritätsfehler	

Daten zur Bohrung und Informationen die im Zuge der technischen Bewertung einer Bohrung berücksichtigt wurden, sollten entsprechend aufbewahrt werden und verfügbar sein.

Für einen sicheren Betrieb der Bohrung werden Empfehlungen für erforderliche Maßnahmen getroffen. Die Empfehlungen erfolgen in Anlehnung an die BVEG und sollen dauerhaft die Wirksamkeit der Bohrung belegen. Empfehlungen sind entsprechend der Ergebnisse und unter Berücksichtigung der einzelnen Barriere-Elemente zu erstellen. Des Weiteren sollten Empfehlungen zu Wartungen und Mo-

monitoring sowie Bohrlochmessungen/Teste enthalten sein. Es wird empfohlen, die technischen Bewertungen in definierten Intervallen oder bei Ereignissen, die die betrachteten Bedingungen verändern, zu aktualisieren.

In Anlehnung an die BVEG Bohrungsintegrität (07/2021) muss der Betreiber bei Abweichung integritätsrelevanter Designparameter vom Normalzustand die Gefährdung und ggf. Risiken in Zusammenhang mit einer Einschränkung oder des Ausfalls von Bohrungsbarrieren bewerten und beherrschen. Um auf einen Ausfall der Integrität eines Barriere-Elementes schnell und angemessen reagieren zu können, sind folgende Punkte üblich:

- Durchführung einer Risikoanalyse zum Ausfall der Integrität der in der Bohrung vorhandenen Barriere-Elemente und
- Festlegung von Reaktionszeiten und Reparaturprioritäten gemäß Analyseergebnis.

Es wird empfohlen, eine Risikoanalyse sowie darauf aufbauend einen Maßnahmenplan zu erstellen.

9.2.5.9 Bewertungsgliederung für Wasserstoffspeicher

Aus der exemplarischen Bewertungsmatrix und unter Berücksichtigung des Zwei-Barrieren-Systems sowie der Bewertungsmethodik ergibt sich eine folgende Struktur als Grundlage für Integritätsanalysen, Lebensdauerbetrachtungen und Bohrungsbewertungen untertägiger H₂-Speicher.

1	Allgemeines
2	Datengrundlage, Datenqualität
	Einschätzung Qualität Bohrungsdokumentation
3	Ausgangsdaten zur technischen Bewertung
3.1	Bohrungsdaten
3.2	Stratigraphie
3.3	Angaben zur Kaverne
3.4	Betriebsdaten
3.5	Ergebnisse aus Messungen, Teste, Funktionsteste, Monitoring
3.6	Betriebshistorie
3.7	Lastfälle Festigkeitsanalyse Rohrtouren
3.8	Lastfälle Zementsteinbewertung
4	Barrieren-System H₂-Kavernenspeicher
	Bild Barrieren H ₂ -Kaverne
4.1	Primäre Barriere
4.1.1	Barriere-Element Kavernenhals, Formation Bereich unterhalb Produktionspacker
	Kontur Kaverne, Kavernenhals
	Max. zulässiger Gebirgsdruck – max. zulässiger Betriebsdruck – aufgezeichnete Betriebsdrücke
4.1.2	Barriere-Element IzRT unterhalb Packer
	Festigkeitsanalyse der Rohrtour auf Innendruck, Außendruck, Axiallastanteil
	Rohrverbinder
4.1.3	Barriere-Element Zementation
	Zementsteinbewertung
	Ergebnisse auf Messungen/Teste
4.1.4	Barriere-Element Produktionspacker
	Belastungsenvelope
	Differenzdruck
4.1.5	Barriere-Element Steigrohrstrang
	Festigkeitsanalyse der Rohrtour auf Innendruck, Außendruck, Axiallastanteil
	Rohrverbinder
	Ringraumdruckbewertung, max. zulässiger Ringraumkopfdruk

	Testdaten
4.1.6	Barriere-Element Bohrlochkopf/Bohrlochkopfeinbindung Absperrreinrichtungen Dichtelemente Ringraumüberwachung
4.2	Sekundäre Barriere
4.2.1	Barriere-Element Formation oberhalb Produktionspacker Max. zulässiger Gebirgsdruck – max. zulässiger Betriebsdruck – aufgezeichnete Betriebsdrücke (Ringraumdrücke)
4.2.2	Barriere-Element IzRT oberhalb Packer Festigkeitsanalyse der Rohrtour auf Innendruck, Außendruck, Axiallastanteil Rohrverbinder Ringraumdruckbewertung, max. zulässiger Ringraumkopfdruck Testdaten
4.2.3	Barriere-Element Zementation Zementsteinbewertung Ergebnisse auf Messungen/Teste
4.2.4	Barriere-Element Bohrlochkopf/Bohrlochkopfeinbindung Absperrreinrichtungen Dichtelemente Ringraumüberwachung
4.3	Sonderposition
4.3.1	Ankerrohrtour-Grundflansch Übergang ART-Grundflansch Unterhalb Grundflansch
4.3.2	UTSAV
5	Einordnung, Bewertung und Diskussion der Ergebnisse auf die Wirksamkeit der einzelnen Barriere-Elemente
5.1	Bewertung potenzieller Auswirkungen von Barriere-/Integritätsfehlern
5.2	Bewertung von Barriere-Elementen mit Hilfe von Akzeptanzkriterien
5.3	Risikoanalyse
6	Empfehlung/Maßnahmen zur Instandsetzung/Monitoringstrategien
	Abkürzungsverzeichnis
	Quellenverzeichnis
	Anlagenverzeichnis

Sobald neue Erkenntnisse zu Materialverhalten in H₂-Umgebung und betriebliche Erfahrungen aus Forschungsprojekten unter Realbedingungen (Reallabore, Realtests) oder H₂-Speicherbetrieben vorliegen, sind diese bei der Bewertung mit einzubeziehen. Voraussetzung ist zudem die Prüfung und ggf. Anpassung geltender Regelwerke, beispielsweise der Erweiterung des BVEG-Leitfadens „Bohrungsintegrität“ um H₂-Bohrungsstandards.

9.2.6 Methodik zur Eignungsprüfung: Beispielhafte Betriebsführungs-, Kontroll- und Überwachungsregime der UT- und OT-Anlagen eines Wasserstoff-Kavernenspeichers

Die untertägige Speicherung von gasförmigen Energieträgern wird in Kavernen seit über 50 Jahren weltweit praktiziert, wobei der größte Anteil auf Erdgas entfällt. In Deutschland wird Erdgas in Porenspeichern, d. h. in ehemaligen Lagerstätten, Aquiferen und Salzstrukturen, gespeichert. In Deutschland werden seit den frühen 1950er Jahren Untergrundgasspeicher (UGS) betrieben. Die Erkundung und Errichtung von Erdgas-UGS erfolgt nach einem gesicherten Stand der Technik. Dafür liegen zahlreiche Erfahrungen hinsichtlich Speicherdesign, technischen Ausführungen, Nachweis- und Monitoringverfahren bis hin zur eigentlichen Eignungsprüfung und technischen Bewertung vor und können in ihren generellen Ansätzen für die H₂-Speicherung verwendet werden. Eine Umstellung der Speicher auf Wasserstoff führt zu veränderten Anforderungen, welche sich in verschiedenen Bereichen auswirken. Die wichtigsten sind im Folgenden dargestellt:

- Degradationsmechanismen bei Werkstoffen durch Wasserstoff,
- thermodynamische, strömungsmechanische, sowie bio- und geochemische Prozesse im Reservoir,
- Anforderungen an die Gasaufbereitung,
- Anforderungen an die sicherheitstechnische Ausrüstung,
- genehmigungsrechtliche Auswirkungen.

Die veränderten Anforderungen führen u. a. zu Materialanpassung bzw. veränderter Werkstoffauswahl und Einbautechniken bei Verrohrung und Zementation, veränderte Speicherfahrweisen und Speicherzyklen sowie Ein- und Ausspeicherraten.

So muss bei H₂-Beimischung im Erdgas bis hin zur Speicherung von 100 Vol.-% Wasserstoff geprüft werden, ob die Bohrung und alle anderen gasberührenden Anlagenteile oder obertägigen Anlagen geeignet sind. Durch einen Eingriff in die bestehende Anlageninfrastruktur müssen für die neuen Anlagenteile Nachweise der Betriebssicherheit (Konformitätsnachweis/Gutachten) aufweisen sowie Genehmigungsverfahren durchlaufen werden. Alle oben genannten Punkte haben einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Speichers.

- Bestandsaufnahme der vorhandenen Anlageninfrastruktur (verbaute Materialien (OTA und UTA), Reservoir/Kaverne,
- Bewertung der verbauten Materialien hinsichtlich der Verwendung in einer H₂-Umgebung,
- Auslegung der zu ergänzenden Neuanlagen,
- Anpassung der Betriebsführung, EX-Zonen, usw.

In der Studie von (Bültemeier, et al., 2022), die im Auftrag der Verbände INES, BVEG und DVGW durchgeführt wurde, sind die Auswirkung von Wasserstoff auf die Materialien zusammengefasst (siehe Abbildung 259). Des Weiteren wird definiert, ab welchem Prozentsatz Wasserstoff im Erdgas welche technisch notwendigen Anpassungen zu machen sind inklusive deren Kostenschätzung.



Abbildung 259: Wasserstoffverträglichkeit der Beispielporen- und Kavernenspeicher (ESK, DBI)

Betriebsführung der Obertageanlage

Grundlage der Betriebsführung der Obertageanlage (OTA) sind unabhängig von der Art des Speichermediums die jeweiligen Betriebspläne (siehe Abschnitt 9.3.1.1), die im Rahmen des Genehmigungsverfahrens bei der zuständigen Behörde einzureichen sind. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Kapitel der Ansatz verfolgt, die wesentlichen Aspekte der Betriebsführung eines H₂-Kavernenspeichers in Abgrenzung zu einem entsprechenden Erdgasspeicher zu beschreiben. Neben der Beschreibung der betroffenen Anlagen enthalten die Betriebspläne sowohl technische als auch organisatorische Angaben zu den Details der Betriebsführung.

Zur Betriebsführung zählen unter anderem einige organisatorische Festlegungen, die teilweise bereits rechtlich vorgeschrieben sind. Zum Teil stellen auch die jeweiligen Bergbehörden unterschiedliche Anforderungen an die betriebliche Organisation. Unter diese Charakteristika fallen im Wesentlichen:

- Bestellung verantwortlicher Personen,
- Risswerkführung,
- Betriebsanweisungen, z. B.:
- Überprüfung von Arbeits- und Betriebsmitteln, z. B. gemäß

- BetrSichV
- DVGW-Regelwerk „Prüfung von Arbeitsmitteln“
- BVOT „Untersuchung, Prüfung, Überprüfung von Betriebsmitteln“
- Betriebsplänen und -genehmigungen
- Bereitschaftsdienst,
- Inspektions- und Wartungspläne,
- regelmäßige Funktionsprüfung der Sicherheitseinrichtungen.

Wesentliche Änderungen durch die Verwendung von Wasserstoff als Speichermedium bestehen vor allem bei allen sicherheitsbezogenen Dokumenten. Auch bei den wiederkehrenden Prüfungen sind grundsätzlich Unterschiede zur Erdgasspeicherung zu erwarten. Grundsätzlich sind die meisten Unterschiede eher redaktioneller Natur bzw. ergeben sich direkt aus der spezifischen Anlagenauslegung für die H₂-Speicherung und den damit verbundenen Sicherheitsbetrachtungen (siehe Kapitel 8.3.2 und 8.3.4).

Betriebsführung – allgemeine Anforderungen

Nachfolgend wird ausschließlich die technische Betriebsführung betrachtet. Diese umfasst hier auch die genehmigungsrechtlichen Belange, jedoch keine steuerlichen und rein ökonomischen Themen.

Die allgemeine Verwaltung und Organisationsverantwortung eines Speicherbetriebes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Überwachung und Beaufsichtigung der Anlage entsprechend den gesetzlichen Regelungen (z. B. Bergrecht, Gefahrstoffrecht, Umweltrecht),
- Havarie- und Notfallmanagement,
- Koordinierung von Fremdfirmen und Dienstleistern,
- Sicherstellung der vorgeschriebenen wiederkehrenden Prüfungen und Abnahmen von Anlagenteilen und Arbeitsmitteln,
- Unterweisungen von Personal und Ausstellung von Arbeitserlaubnissen und -Arbeitsfreigabeverfahren,
- laufende Prozessoptimierung (technologisch und energetisch),
- Materialwirtschaft sowie Ver- und Entsorgung (Abfallwirtschaft),
- Erstellung und Laufendhaltung von Gefährdungsbeurteilungen sowie Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokumenten,
- internes und externes Berichtswesen,
- Pflege und Laufendhaltung der Betriebs- und Anlagendokumentation,
- Risswerkführung,
- Arbeit auf der Grundlage von Betriebsanweisungen, z. B. für:

- Definition bestimmungsgemäßer Betrieb,
- Betriebsmanagement-Handbuch,
- meldepflichtige Ereignisse,
- Alarmplan,
- Betriebssicherheitsunterweisung,
- Verhalten bei einem Störfall,
- Change Management,
- verantwortliche Personen.

Die tägliche Prozessführung der Anlagentechnik und der Kavernen umfasst folgende Schwerpunkte:

- Durchgehendes Schichtsystem bzw. Remote-Zugriff im 24/7-System zur Prozesssteuerung sowie Bedien- und Kontrolltätigkeiten,
- Überwachung des Speicherbetriebes vor Ort (Unter- und Obertage bzw. Anlagentechnik, Feldleitungen, Sondenplätze),
- Durchführung von An- und Abfahrprozessen sowie von Instandhaltungs-, Wartungs- und Reparaturtätigkeiten,
- Eingriff in die Anlage bei außerplanmäßigen Zuständen, z. B. Sollwertabweichungen, Grenzwertüberschreitungen und Havarien,
- Kommunikation mit zuständigen Stellen (Behörden, Dispatching, Vertragspartner) im Rahmen der Betreiberfunktion,
- Anlaufstelle und Auslösung von betrieblich festgelegten Prozeduren bei Unfällen, Störfällen und Naturereignissen.

Für die Wartung und Instandhaltung der Anlage ist DIN EN 13306 relevant, welche die Begriffe Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung definiert.

Auf den Speicherbetrieb bezogen sind die folgenden Schwerpunkte in der täglichen Arbeit maßgeblich:

- Instandhaltungsmanagement (Termine für Anlagenkomponenten definieren und durchführen, die in der Jahresplanung bzw. in wiederkehrenden Zyklen der Wartung/Instandhaltung unterliegen),
- Durchführung von Zustandsbewertungen von Anlagenkomponenten,
- Zyklusverwaltung einzelner Anlagenkomponenten, insbesondere überwachungsbedürftiger Anlagen,
- Arbeitserlaubnis-/Arbeitsfreigabeverfahren sowie Durchführung von Risikoanalysen (LMRA) und Überwachung der Einhaltung von Vorschriften durch Dienstleister,

- Erstellung von Inertisierungs- und Begasungsplänen für Anlagenteile sowie Einrichtung von Sperrstrecken während der Wartungsarbeiten,
- Instandsetzungsarbeiten, Fehlersuche und Störungsbeseitigung,
- Durchführung von In- und Außerbetriebnahmen, inklusive Wartungssicherungen (Sicherungen gegen Wiedereinschalten/-Inbetriebnehmen),
- Durchführung von Funktionsprüfungen als Sachkundige,
- Durchführung von Schalthandlungen an E-Anlagen (Schaltberechtigung),
- Koordination von Sonderwartungen (z. B. Brandmelde- und Gaswarnanlagen),
- Koordination von Sachverständigenprüfungen,
- Transportarbeiten und betriebliche Logistik inklusive Hebezeuge und Krananlagen,
- Ersatzteilmanagement und Lagerhaltung.

Kontrollcharakteristika

Kennlinien

Für die verschiedenen Betriebsweisen eines Unterspeichers können für jeden einzelnen Speicher typische Eigenschaften (Charakteristika) herangezogen werden. Diese können sowohl bauteil- als auch anlagenbezogen oder in Relation zur jeweiligen Betriebsart definiert sein.

Einfachstes Beispiel ist die Kennlinie eines Ventils oder eines Wärmeübertragers, welche abhängig vom jeweiligen Durchflussmedium aber auch von dessen Zustandsgrößen (p , T , chemische Zusammensetzung) sind. Weiterhin sind die Betriebskennfelder von Verdichtern oder auch von Absorptionskolonnen charakteristisch für die jeweilige Betriebsart des Speichers (Ein- oder Ausspeicherung). Kombiniert man die Kennlinien (oder Kennfelder) der einzelnen Komponenten, so kann man eine „Anlagenkennlinie“ generieren, die das Verhalten der Anlage (z. B. maximale Durchflussrate abhängig vom Druck) darstellt.

Auch für die Speicherkaverne und die zugehörige installierte Komplettierung in der Bohrung lassen sich solche Kennlinien ermitteln. Mit den o. a. Werkzeugen ist ein Kriterium verfügbar, auf dessen Basis der ordnungsgemäße Betrieb der Speicheranlage mit gegebenen Randbedingungen (Drücke, Temperaturen, Medium) dargestellt werden kann, der dann anhand von typischen Messwerten für Prozessparameter verifiziert wird.

Auch die Abweichung des Förder- oder Einspeiseverhaltens der einzelnen Kavernen kann auf diese Art verifiziert werden. Auf Basis der ermittelten Abweichungen vom Soll-Zustand kann eine Aussage über Verschleiß oder fehlerhafte bzw. defekte Bauteile getroffen werden oder es können kritische Zustände identifiziert werden.

Diagnosesysteme

Eine andere Möglichkeit der Kontrolle von technischen Anlagen ist die Verfolgung und Diagnose von typischen Prozessgrößen an Maschinen und Anlagen

Hier gibt es Systeme am Markt, die automatisierte Echtzeit-Diagnosen z. B. von rotierenden Maschinen durchführen und die auf der Grundlage von neuronalen Netzen oder Fuzzy-Logik auftretende Fehlermuster selbstständig erkennen. Solche selbstlernenden und selbstoptimierenden Systeme sind derzeit Stand der Technik.

Der Nutzen derartiger Diagnosesysteme ist eine vom Betreiber unabhängige musterbasierte Fehlererkennung und im Extremfall eine Stillsetzung der Anlage zur Vermeidung von gravierenden Schäden.

Aber auch die Zustandsorientierte Instandhaltung ist mit diesen Tools aufgrund einer gesicherten und stetig aktuellen Datenbasis auf einem sehr hohen Genauigkeitslevel durchführbar. Dazu können Ausfallwahrscheinlichkeiten auf Grundlage von bisherigen Betriebserfahrungen ermittelt werden bzw. ein Ranking für anstehende Wartungsmaßnahmen.

Sicherheitsgerichtete Funktionen

Im Bereich der Unterspeicher sind sicherheitsgerichtete Funktionen im Rahmen der Prozesssteuerung des Gesamtspeichers aber auch in den Sicherheitssteuerungen der einzelnen Maschinen implementiert.

Diese Funktionalitäten verhindern unerlaubte Betriebszustände, welche durch kritische Über- oder Unterschreitung von Prozessparametern oder Freisetzung von Gefahrstoffen entstehen können. Die dafür verwendete Steuerungstechnik muss bestimmte Anforderungen hinsichtlich Hardware und Programmierung erfüllen, welche sich in der Maschinenrichtlinie und den mitgeltenden europäischen Normen widerspiegeln.

Betrachtet man den Speicher als Ganzes, so ist im Rahmen der Planung und Errichtung eine Sicherheitsbetrachtung (PAAG bzw. HAZOP) durch ein Expertengremium durchzuführen. Die inhaltlichen Schwerpunkte hierbei sind:

- Prognose von Abweichungen,
- Auffinden der Ursachen,
- Abschätzen der Auswirkungen,
- Gegenmaßnahmen.

Ziel ist es, mögliche Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb eines Systems aufzudecken, die jeweiligen Ursachen und Auswirkungen zu benennen und geeignete Maßnahmen zur Verhinderung dieser Szenarien festzulegen. Die auf diese Art und Weise errichteten Sicherheitssysteme werden aufgrund wesentlicher zu überwachender Prozessparameter gesteuert, für die zumeist Grenzwerte in der Form von Alarmschwellen und Auslöseschwellen prozessabhängig definiert wurden.

Ein besonderes Augenmerk liegt auf den betrieblichen Messungen und der Sensorik der Anlage. Hierbei wird unterschieden zwischen den betrieblichen und den sicherheitsgerichteten Messungen. Ersterer dienen im Wesentlichen dem geregelten Betrieb der Anlage. Letztere müssen besonderen Anforderungen hinsichtlich Ausfallsicherheit und Zuverlässigkeit erfüllen und sind Teil von sogenannten Sicherheitsketten. Sie müssen im Fall eines unzulässigen Zustandes im technologischen Prozess (Drucküberschreitung, Grenzwertüber- oder -unterschreitung) die Auslösung von sicherheitsgerichteten Aktionen (Stillsetzung/Abschaltung, Entspannung) gewährleisten, sodass die Anlage in einen sicheren Zustand gebracht wird.

Die betrieblichen Messungen und Sensorik umfassen vor allem:

- Maximaldruck in allen Anlagenteilen,
- Minimaldruck an allen Bohrlochköpfen (relevant für UT),
- Druckänderungsrate an allen Bohrlochköpfen (relevant für UT), alternativ auch maximale Strömungsraten,
- Maximale Strömungsgeschwindigkeit in allen Rohrleitungen (indirekte Bestimmung),
- Durchflussmessung/-überwachung in relevanten Anlagen (Verdichter, Filter, etc.),
- Temperaturgrenzen in einzelnen relevanten Anlagenteilen,
- Gasqualität in einzelnen relevanten Anlagenteilen (ggf. zusätzlich zu Betriebsmessungen auch periodische Laboranalytik),
- Füllstände von Sammelbehältern,
- Endlagenüberwachung relevanter Armaturen.

Die sicherheitsgerichteten Messstellen/Aktoren umfassen typischerweise vor allem:

- Not-Aus-Taster,
- Ausfall fehlersichere Steuerung,
- Brandmeldealarme,
- Ausfall Gebäudebelüftung,
- Gasalarme,
- Fahrwegesteuerung,
- Min-Füllstände HD-Abscheider,
- Temperaturbereich nach Druckreduzierung Ausspeicherstrecke,
- Maximaldruck nach Druckreduzierung Ausspeicherstrecke,
- Maximaldruck Feldleitung,
- Max-/Min-Füllstand Stationseingangfilter,
- Max-Füllstank Sloptank,
- Temperaturbereich Eigengasschiene,
- Druckbereich Instrumentenluft,
- Bei Einsatz einer Glykoltrocknung außerdem:
- Min-Füllstand Frischglykoltank,
- Füllstandsbereich Nassglykoltank,
- Max-Temperatur Glykolregeneration/Frischglykol,
- Min-Füllstand Glykol-Reboiler,
- Maximaldruck Brennkammer;
- Füllstandsbereich Kondensatabscheider am Verdichter,
- Saugdruckbereich Verdichter(-stufen),
- Max-Enddruck Verdichter(-stufen),
- Max-Temperatur Austritt Verdichter-Zylinder,
- Min-Füllstand Verdichteröl.

Die individuelle Ausprägung der einzelnen Grenzwerte hängt immer von der jeweiligen Anlage ab und unterscheidet sich nicht nur hinsichtlich des eingesetzten Speichermediums (Wasserstoff/Erdgas), sondern auch hinsichtlich der eingesetzten Anlagenteile, Materialien, des Speicherstandortes und weiterer Aspekte. Die Methodik zur jeweiligen Festlegung der Werte kann jedoch aus Sicht der Auto-

ren für einen H₂-Speicher in Analogie zu einem Erdgasspeicher unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs angewendet werden. Exemplarische Werte für die regulären Betriebsgrenzen von verschiedenen Speichervarianten finden sich in Kapitel 8.3.3.

Einzelne bei der H₂-Speicherung zu beachtende Besonderheiten umfassen:

- **Außentemperatur:**
Bei der Materialauswahl für Anlagenteile im Außenbereich ist vor allem für Stillstandsphasen der gesamt relevante Temperaturbereich zu beachten, da Metalle insbesondere bei tiefen Temperaturen leichter zu Sprödbrüchen neigen und damit auch H₂-induzierte Schädigungen zunehmen können. Dies ist vor allem relevant, solange noch keine umfassende Zertifizierung der Werkstoffe vorgenommen wurde.
- **Sauerstoffanteil:**
Sofern die Speicheranlagen eine katalytische Sauerstoffentfernung beinhalten (z. B. bei direkter Kopplung des Speichers an einen Elektrolyseur), ist in allen Betriebszuständen (insbesondere bei Teillast des Elektrolyseurs) der Sauerstoffanteil kontinuierlich zu überwachen.
- **Schwefelwasserstoffanteil:**
Die Notwendigkeit für eine Überwachung bzw. Behandlung des Anteils an Schwefelwasserstoffen im Ausspeichergas ist jeweils im Einzelfall zu bewerten und hängt von der ggf. existenten mikrobiellen Bildung im Kavernensumpf ab.

Weiterhin ist zu beachten, dass mit Neufassung der BVOT von 2021 verschiedene Änderungen bei der Überwachung von Speicherbohrungen in Kraft getreten sind (z. B. hinsichtlich Ringraumüberwachung der Bohrungskomplettierung und wiederkehrenden Prüfungen). Diese gelten jedoch allgemein, unabhängig von der Art des gespeicherten Gases.

Zwischenfazit

Relevante Rechtsgrundlagen (Störfall-VO etc.) gelten weiterhin.

Unterschiede zur Erdgasspeicherung gibt es z. B. bei Mengenschwellen für Betriebsbereiche.

Ausstattung und Messkonzept für die Prozesstechnik kann weitgehend von Erdgasspeicherung übernommen werden.

Betriebsanweisungen und für die Betriebsführung verbindliche Dokumente sind zum Teil anzupassen, es sind jedoch keine substanziellen Änderungen zu erwarten.

Aktuelle Entwicklungen hinsichtlich Modifizierung der Unbundling Regelungen, etc. (z. B. Wer darf eigentlich einen H₂-Speicher betreiben?) sind nicht Teil des Untersuchungsrahmens.

9.3 Wesentliche Bestandteile des Genehmigungsverfahrens

Die HYPOS-Initiative unterstützt den Aufbau einer H₂-Wirtschaft und fördert insbesondere die umfassende Nutzung von temporärem Stromüberschuss aus Wind und Sonne zur wirtschaftlichen Wasserstoffelektrolyse, -transport/-speicherung und -verwertung. Die Tätigkeiten reichen von der Grundlagenforschung zu Fragestellungen der H₂-Speicherung in Salzkavernen und dem Transport in ehemaligen Erdgasleitungen bis hin zu Genehmigungsverfahren. Für den Leitfaden wurde neben offenen Punkten in der H₂-Kavernenspeicherung auch die zugehörigen Genehmigungsverfahren untersucht. Nachfolgend werden die wesentlichen Bestandteile und benötigte Dokumente zusammengefasst.

9.3.1 Beschreibung des Genehmigungsverfahrens

Für die Beschreibung des Genehmigungsverfahrens liegt der Fokus der Betrachtung auf dem Neubau einer Anlage, wobei auch auf einzelne Aspekte bei der Änderung einer bestehenden Anlage eingegangen wird. Für die folgenden Ausführungen wird für die H₂-Speicherung das Vorliegen einer bestehenden Bergbauberechtigung, die eine entsprechende Nutzung ermöglicht, vorausgesetzt.

Die Errichtung und Führung von Bergbaubetrieben, so auch das Vorhaben zur Speicherung von Erdgas in einem Untergrundspeicher (UGS), fällt in das Bergrecht bzw. alle damit verbundenen Aktivitäten werden im Bundesberggesetz (BBergG) geregelt. Als „Untergrundspeicher“ sind gemäß § 4 Abs. 9 BBergG alle Anlagen zur unterirdischen behälterlosen Speicherung von Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen mit Ausnahme von Wasser zu verstehen. Die Errichtung und der Betrieb von Untergrundspeichern fallen in den bergrechtlichen Geltungsbereich des § 2 Abs. 2 BBergG:

- Nr. 1: Untersuchen des Untergrundes auf seine Eignung zur Errichtung von Untergrundspeichern

und/oder

- Nr. 2: Errichten und Betreiben von Untergrundspeichern, sowie der Einrichtungen, die überwiegend dem Betrieb eines Untergrundspeichers dienen oder zu dienen bestimmt sind.

Der § 126 Abs. 1 BBergG regelt hierbei, welche Vorschriften des BBergG für die Untergrundspeicherung anzuwenden sind.

9.3.1.1 Betriebsplanverfahren

Nach § 51 Abs. 1 in Verbindung mit § 126 Abs. 1 S. 1 BBergG ist die Errichtung und Führung von Untergrundspeichern nur auf der Basis von Betriebsplanverfahren gestattet. Die verschiedenen Betriebsplanarten sind in § 52 BBergG geregelt. Dabei ist die jeweilige Landes-Bergbehörde federführend im gesamten Genehmigungsprozess und koordiniert ggf. die Zusammenarbeit mit weiteren zuständigen Behörden und Ämtern. Generell ist eine frühzeitige Abstimmung mit der Bergbehörde über die Art und den Inhalt des Betriebsplanverfahrens zu empfehlen.

Rahmenbetriebsplan (RBP)

Rahmenbetriebspläne beschreiben bergbauliche Vorhaben im Allgemeinen und dienen dazu, der zuständigen Behörde einen Überblick über ein längerfristiges Gesamtvorhaben, wie z. B. den Betrieb von Kavernen, zu geben. So können mögliche negative Auswirkungen auf die Umwelt und öffentliche Belange frühzeitig erkannt und ggf. Gegenmaßnahmen ergriffen werden. I. d. R. ist dieser nicht kürzer als fünf Jahre und auf bis zu 30 Jahre begrenzt.

Die Genehmigung eines Rahmenbetriebsplanes gestattet noch nicht die Durchführung eines Vorhabens. Die Ausführungen von konkreten Arbeiten bedürfen der Zulassung der Haupt- und Sonderbetriebspläne.

Fakultativer Rahmenbetriebsplan

Der fakultative Rahmenbetriebsplan (§ 52 Abs. 2 Nr. 1 BBergG) kann nach Ermessen von der zuständigen Behörde verlangt werden. Neben den allgemeinen Angaben über das beabsichtigte Vorhaben und dessen technische Durchführung definiert dieser einen den jeweiligen Umständen entsprechenden Zeitraum für das Vorhaben. Ein fakultativer Rahmenbetriebsplan kann auch ohne behördliches Verlangen vom Unternehmer aufgestellt werden, wenn er dies für erforderlich hält. Die zuständige Bergbehörde hat über fakultative Rahmenbetriebspläne ebenso zu entscheiden wie über die Zulassung obligatorischer Rahmenbetriebspläne.

Obligatorischer Rahmenbetriebsplan

Im Gegensatz zum fakultativen (einfachen) Rahmenbetriebsplan muss die zuständige Behörde den sogenannten obligatorischen Rahmenbetriebsplan nach §§ 52 Abs. 2a–2c BBergG verlangen, sobald eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erforderlich ist. Für dessen Zulassung ist ein Planfeststellungsverfahren gemäß §§ 57a (Planfeststellungsverfahren, UVP) und 57b (Vorzeitiger Beginn, Vorbescheide, Teilgenehmigungen) BBergG i. V. m. § 2 ([Entscheidungserhebliche] Angaben) UVP-V Bergbau durchzuführen.

Hauptbetriebsplan (HBP)

Die Voraussetzung für die Errichtung und Führung eines Betriebes ist ein zugelassener Hauptbetriebsplan. Er beinhaltet ausführliche Beschreibungen der Anlagen sowie der Betriebsführung und ist in der Regel bis zu zwei Jahre gültig.

Sonderbetriebsplan (SBP)

Die Behörde kann für bestimmte Teile des Vorhabens einen Sonderbetriebsplan verlangen. Beispielsweise handelt es sich hierbei um Arbeiten und Anlagenbetriebe, die sich nicht auf zwei Jahre begrenzen lassen und deshalb nicht in den Hauptbetriebsplan mitaufgenommen werden können oder um besondere Maßnahmen, wie z. B. Erweiterungen oder Umbauten am Speicher.

Abschlussbetriebsplan (ABP)

Soll ein Bergbaubetrieb auf Dauer eingestellt werden, ist ein Abschlussbetriebsplan zu erstellen. Inhalt des Abschlussbetriebsplanes ist in § 53 Abs. 1 geregelt. Die Bergaufsicht endet gemäß § 69 Abs. 2 nach der Durchführung des Abschlussbetriebsplanes und wenn nach allgemeiner Erfahrung keine bergbautypischen Gefahren mehr gegeben sind.

Die Art des Betriebsplanverfahrens entscheidet maßgeblich über den Aufwand und die Dauer des Genehmigungsprozesses. Demnach gilt beispielsweise, nicht UVP-pflichtige Vorhaben i. d. R. beantragt über das Hauptbetriebsplanverfahren, werden deutlich schneller eine Genehmigung nach sich ziehen als Rahmenbetriebsplan-/Planfeststellungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung.

9.3.1.2 Planfeststellungsverfahren

Die Durchführung der Planfeststellungsverfahren sind im Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) geregelt. In einem Planfeststellungsverfahren werden alle weiteren Verfahren durch die zuständige Behörde – im Fall von Bergbauvorhaben durch die Bergbehörde – miteinbezogen.

Charakteristisch für ein Planfeststellungsverfahren sind die Öffentlichkeitsbeteiligung, die Miteinbeziehung von Naturschutzvereinen und in der Regel eine Umweltverträglichkeitsprüfung. Sobald der Vorhabenträger einen Plan und ggf. eine Umweltverträglichkeitsstudie und einen landschaftspflegerischen Begleitplan bei der Behörde eingereicht hat, informiert bzw. beteiligt die Behörde weitere betroffene Behörden, Gemeinden und Naturschutzvereine. Die Gemeinde organisiert die Information der Betroffenen und die öffentliche Auslegung des Planes. Innerhalb festgelegter Fristen können Einwände erhoben bzw. Stellungnahmen abgegeben werden. In einem anschließenden Erörterungstermin werden die Pläne mit allen Beteiligten und Betroffenen diskutiert (erörtert). Unter Berücksichtigung aller Belange und Interessen führt die Behörde die Umweltverträglichkeitsprüfung durch und gibt das Ergebnis neben dem Vorhabenträger auch allen Beteiligten bekannt.

Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung

Seit 2013 ist die frühe Öffentlichkeitsbeteiligung im § 25 Abs. 3 VwVfG gesetzlich vorgeschrieben und gilt i. V. m. § 5 BBergG auch für alle bergbaulichen Vorhaben/Verfahren mit vorgeschriebener Öffentlichkeitsbeteiligung (z. B. Planfeststellung oder BImSchG). Der Antragsteller informiert möglichst vor der förmlichen Einreichung der Antragsunterlagen betroffene Kommunen, Landkreise und die interessierte Öffentlichkeit über die Ziele, Mittel und Auswirkungen und gibt ihr damit die Gelegenheit zur Äußerung (= vorgezogene „Erörterung“). Begründete Einwände können bereits bei der Antragserstellung berücksichtigt werden. Damit ist eine frühzeitige Konfliktvermeidung möglich, u. a. mit dem Ziel der Entlastung und Beschleunigung des eigentlichen Genehmigungsverfahrens. Der Bergbehörde kommt die Rolle einer befriedenden und koordinierenden Moderation zu. Zudem ist ihre Aufgabe, Zugriff auf geeignete Informationsmöglichkeiten wie Internetseiten der Behörde oder Mitteilungsblätter zu bieten.

9.3.1.3 Voraussetzungen für Art und Umfang des Betriebsplanverfahrens

Voraussetzungen für eine Betriebsplanzulassung sind im § 55 BBergG geregelt und betreffen im Wesentlichen die erforderliche Vorsorge und den Schutz gegen Gefahren für Leben, Gesundheit und Sachgütern, den Schutz der Oberfläche, usw. Darüber hinaus dürfen nach § 48 Abs. 2 BBergG einer Genehmigung keine überwiegenden öffentlichen Interessen entgegenstehen. Dabei kann es sich z. B. um wasser-, bodenschutz-, denkmalschutz- oder bauplanungsrechtliche Belange handeln.

Im Folgenden werden die üblichen Einstufungen von Erdgas-Untergrundspeichern und die daraus resultierenden Betriebsplanverfahren beschrieben. Des Weiteren werden Ansätze zur Einstufung von H₂-Untergrundspeichern bei Neuerrichtung und Umwidmung diskutiert, da es aktuell keine klare Gesetzesgrundlage zur Einstufung von H₂-Speichern gibt. Bisher wurden in Deutschland noch keine Betriebsgenehmigungen für die Speicherung von Wasserstoff im Untergrund erteilt.

9.3.1.4 Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVPG/UVPG-V Bergbau)

Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) regelt die Prüfung der Umweltverträglichkeit bei Vorhaben, die aufgrund ihrer Art, ihrer Größe oder ihres Standortes erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben können. Bei einigen Vorhaben wird im UVPG auf die UVPG der Länder verwiesen (hier z. B. das UVPG des Landes Sachsen-Anhalt), in denen weiterführende Regelungen getroffen werden können. Durch UVP sollen die Auswirkungen auf die Umwelt frühzeitig erkannt und bei allen behördlichen Entscheidungen über die Zulässigkeit von Vorhaben so früh wie möglich berücksichtigt werden.

Die Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) regelt hierbei, welche betriebsplanpflichtigen Vorhaben einer UVP bedürfen. Die Notwendigkeit einer UVP für Utergrundgasspeicher ist gemäß § 1 Nr. 6a UVP-V Bergbau abhängig von der Art des Speichermediums sowie vom Fassungsvermögen. Für Erdgasspeicher bedeutet dies:

„Der Umweltverträglichkeitsprüfung bedürfen [...] *Untergrundspeicher für*

a) **Erdgas** mit einem Fassungsvermögen von

- 1 Milliarde Kubikmeter oder mehr auf Grund einer allgemeinen Vorprüfung [...],
- 100 Millionen Kubikmeter bis weniger als 1 Milliarde Kubikmeter auf Grund einer standortbezogenen Vorprüfung [...].“

Da Untergrundspeicher für Wasserstoff in Deutschland bisher noch nie beantragt wurden und es aktuell keine eindeutige Gesetzesgrundlage gibt, werden folgende Einstufungen nach UVP-V in Betracht gezogen (Abbildung 260).

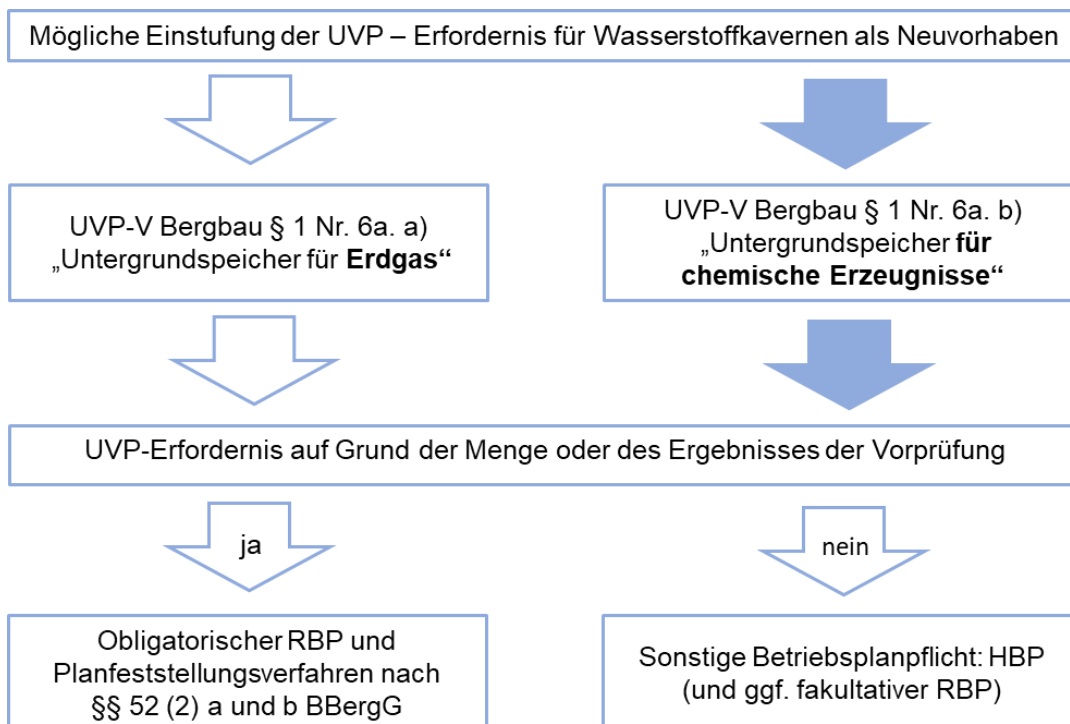


Abbildung 260: Einstufung des Genehmigungsverfahrens eines Wasserstoff-Kavernenspeichers als Neuvorhaben

Unter § 1 Nr. 6a UVP-V wird als Speichermedium für Untergrundspeicher der Begriff „Wasserstoff“ nicht direkt erwähnt. Grundsätzlich könnte die Einordnung von Wasserstoff als chemisches Erzeugnis in Betracht gezogen werden. Da es sich jedoch bei § 1 Nr. 6a a) sinngemäß um gasförmige und b) um flüssige Stoffe handelt, ist hier eine Zuordnung von Wasserstoff zu „Erdgas“ wesentlich geeigneter.

Im Falle der Umwidmung einer Kaverne von Erdgas auf Wasserstoff könnte § 9 UVPG in Betracht gezogen werden. Hier ist zu beachten, ob Größen- oder Leistungswerte erreicht oder überschritten werden. Die hier erwähnten Werte entsprechen den Angaben des Anhanges 2 der 4. BlmSchV.

Sollten bestimmte Grenzwerte überschritten werden oder UVP-Vorprüfungen eine UVP-Pflicht ergeben, ist ein obligatorischer Rahmenbetriebsplan zu erstellen und mit einem Planfeststellungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung zu rechnen.

9.3.1.5 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BlmSchG)

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BlmSchG) ist ein Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen im Zuge der Errichtung und des Betriebs verschiedener Anlagen. Die 4. BlmSchV regelt dabei, welche Anlagen einer Genehmigung nach BlmSchG bedürfen.

Nach § 4 BlmSchG Abs (2) bedürfen Anlagen des Bergwesens oder Teile dieser Anlagen der Genehmigung nach Abs. (1) nur, soweit sie über Tage errichtet und betrieben werden. Obertageanlagen sind in der 4. BlmSchV namentlich nicht erwähnt. In der Regel benötigen aber Anlagenteile wie z. B. Feuerungsanlagen oder die Brennkammern der Glykolregeneration, abhängig von Ihrer Feuerungsleistung und dem eingesetzten Brennstoff, eine Genehmigung nach BlmSchG. Die Antragsunterlagen werden im Rahmen des Betriebsplanverfahrens mit eingereicht bzw. erteilt.

Abhängig davon, ob in der geplanten Betriebsanlage störfallrelevante Mengen an Stoffen i. S. d. Anhangs 1 der Zwölften Verordnung zur Durchführung des BlmSchG (Störfall-Verordnung – 12. BlmSchV) umgeschlagen, zwischengelagert oder anderweitig eingesetzt werden, entscheidet darüber, ob im Zuge des bergrechtlichen Verfahrens ein BlmSchG-Verfahren nötig ist. Siehe dazu auch § 57 d BBergG. Maßgeblich dafür ist beispielsweise, ob es sich bei einem Vorhaben um einen sogenannten Betriebsbereich handelt. Dazu ist Anhang 1 der 12. BlmSchV zu prüfen. Des Weiteren spielen hier die Unterschreitung von Sicherheitsabständen und weitere sicherheitstechnische Betrachtungen eine Rolle.

9.3.1.6 Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Selbsteinstufung und Anzeige prüfpflichtiger Anlagen

Alle Stoffe, die in der Betriebsanlage eingesetzt werden, sind i. S. v. § 4 i. V. m. der Anlage 1 der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) hinsichtlich der Wassergefährdungsklasse (WGK) einzustufen. Dies betrifft alle Ausgangsstoffe, Hilfsstoffe und Reststoffe.

Einrichtungen, in denen mit wassergefährdenden Stoffen umgegangen wird, stellen prüfpflichtige Anlagen i. S. d. AwSV dar. Eignungsfeststellungen bzw. Bauartzulassungen nach AwSV für den Bau und Betrieb derartiger Anlagen sind separat bei der zuständigen Behörde zur Genehmigung zu beantragen.

Niederschlagswässer

Im Zuge der Errichtung der geplanten Betriebsanlage kommt es zur Versiegelung mit der Folge einer Verminderung der Grundwasserneubildungsrate. Aus diesem Grund ist in der Regel geplant, das anfallende Niederschlagswasser ins Grundwasser versickern zu lassen, soweit es die hydrogeologischen Gegebenheiten im Untergrund zulassen.

Die Beantragung der wasserrechtlichen Erlaubnis für die Einleitung der Niederschlagswässer in das Grundwasser kann parallel zu den Betriebsplananträgen bei dem dafür zuständigen Amt erfolgen. Die Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis erfolgt gemäß § 19 Absätze 2 und 3 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) durch die Bergbehörde im Einvernehmen mit der zuständigen Wasserbehörde (Landkreis).

Bauzeitliche Wasserhaltung

Die Notwendigkeit zur Grundwasserentnahme für die Trockenlegung von Baugruben, beispielsweise im Rahmen der Errichtung baulicher Anlagen, ist zu prüfen und bei Bedarf eine wasserrechtliche Erlaubnis zu beantragen.

Ebenfalls ist für die Grundwassereinleitung aller während der Bauphase anfallenden Niederschlagswässer, beispielsweise in den Baugruben der geplanten Gebäude, eine wasserrechtliche Erlaubnis zu beantragen. Diese bauzeitliche Wasserhaltung bzw. die Erlaubnis für die Einleitung der Niederschlagswässer in das Grundwasser kann wieder parallel zum Betriebsplanverfahren bei der dafür zuständigen Behörde eingereicht werden. Die Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis erfolgt gemäß § 19 Absätze 2 und 3 WHG durch die Bergbehörde im Einvernehmen mit der zuständigen Wasserbehörde (Landkreis).

9.3.1.7 Allgemeine Vorprüfungen

Standortauswahlgesetz (StandAG)

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) regelt die einzelnen Verfahrensschritte zur Auswahl eines Standortes zur Endlagerung für hochradioaktive Abfälle in Deutschland (Inkraftgetreten 2017). Ziel ist es, einen Standort in Deutschland zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahren für ein Endlager gewährleistet. Bis 2031 soll ein Standort für die Endlagerung feststehen. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) ist die Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren.

Im Zuge des Standortauswahlverfahrens kann es zu Einschränkungen/Behinderungen bergbaulicher Vorhaben kommen, die im § 21 StandAG Abs. 1 geregelt sind: „Gebiete, die als bestmöglich sicherer Standort für die Endlagerung in Betracht kommen, sind vor Veränderungen zu schützen, die ihre Eignung als Endlagerstandort beeinträchtigen können.“ Da es sich bei der Standortauswahl um bergbaulich unberührte Gebiete handelt, sind Vorhaben wie z. B. die Umrüstung von bestehenden Erdgaskavernen auf H₂-Kavernen von dem Gesetz nicht betroffen (§ 21 Abs. 2).

Offen ist hier die Frage, welche Bedeutung § 12 Abs. 3 Satz 2 im Hinblick auf Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse hat: „Soweit für die Erkundung und den Standortvergleich Geodaten, insbesondere geowissenschaftliche und hydrogeologische Daten, die bei den zuständigen Landesbehörden vorhanden sind, benötigt werden, sind diese Daten dem Vorhabenträger unentgeltlich für die Zwecke

des Standortauswahlverfahrens zur Verfügung zu stellen; dies gilt auch für Daten, an denen Rechte Dritter bestehen.“

Umweltrelevante Vorprüfungen

Vor der Antragstellung (Betriebsplan) sind in der Regel folgende umweltrelevante Fragestellungen abzuklären bzw. Gutachten zu erstellen:

- Fauna-Flora-Habitat (FFH)-Verträglichkeitsprüfungen nach § 34 BNatSchG,
- landschaftspflegerischer Fachbeitrag,
- Artenschutzfachbeitrag,
- Emissionsgutachten,
- Lärmgutachten,
- hydrogeologische Gutachten,
- Bodengutachten.

9.3.1.8 Weitere gesetzliche Regelungen und Normwerke

Für den Leitfaden werden am Beispiel der Regelungen des Landes Sachsen-Anhalt weitere Regelungen und Normwerke aufgelistet. Grundlage ist die Planung für das Reallabor Bad Lauchstädt.

Folgende auf Bundesebene nach § 68 Abs. 2 BBergG erlassene Bergverordnungen regeln den Arbeits- und Gesundheitsschutz und sind zu berücksichtigen:

- Allgemeine Bundesbergverordnung (ABBergV),
- Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV),
- Markscheider-Bergverordnung (MarkschBergV),
- Einwirkungsbereichs-Bergverordnung (EinwirkungsBergV),
- Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau).

Zu berücksichtigen sind auch alle von den Landes-Bergbehörden (hier am Beispiel Sachsen-Anhalt) erlassenen Bergverordnungen nach §§ 65 BBergG und bergrechtlichen Richtlinien, welche den Arbeits- und Gesundheitsschutz betreffen:

- Bergverordnung für elektrische Anlagen – Elektro-Bergverordnung (EIBVO)
- Technische Verfügung Nr. 1/2004 mit Hinweisen und Erläuterungen zur Elektro-Bergverordnung,
- Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (Tiefbohrverordnung – BVOT).

Neben den bergrechtlichen Regelungen sind außerdem nachfolgend aufgeführte Gesetze und Verordnungen hinsichtlich ihrer Relevanz für das Vorhaben zu überprüfen:

Arbeits- und Gesundheitsschutz:

- Persönliche Schutzausrüstung-Benutzungsverordnung (PSA-Benutzungsverordnung),
- Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG),
- Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV),
- Arbeitsstätten-Richtlinien (ASR),
- Gesetz über Betriebsärzte, Sicherheitsingenieure und andere Fachkräfte für Arbeitssicherheit (ASiG).

Betriebssicherheit:

- Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV),
- Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS),
- Empfehlungen zur Betriebssicherheit (EmpfBS),
- Gashochdruckleitungsverordnung (GasHDrLtgV).

Weitere Regelungen:

- Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG),
- Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG),
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG),
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG),
- Wassergesetz des Landes Sachsen-Anhalt (WG LSA),
- Produktsicherheitsgesetz (ProdSG),
- Elfte Verordnung zum ProdSG (Explosionsschutzverordnung – 11. ProdSV),
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG),
- Zwölfte Verordnung zur Durchführung des BImSchG (Störfall-Verordnung – 12. BImSchV),
- Verordnung über Emissionserklärungen (11. BImSchV),
- Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen (13. BImSchV),
- Gefahrstoffverordnung (GefStoffV),
- Technische Regeln für Gefahrenstoffe (TRGS),
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV),
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG),
- Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG),
- Naturschutzgesetz des Landes Sachsen-Anhalt (NatSchG LSA),

- Denkmalschutzgesetz des Landes Sachsen-Anhalt (DenkmSchG LSA),
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG),
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV),
- Ausführungsgesetz des Landes Sachsen-Anhalt zum Bundes-Bodenschutzgesetz (BodSchAG LSA),
- Sprengstoffgesetz (SprengG),
- Landesplanungsgesetz des Landes Sachsen-Anhalt (LPIG),
- Regionale Entwicklungspläne,
- Baustellenverordnung (BaustellV),
- Straßengesetz für das Land Sachsen-Anhalt (StrG LSA),
- Bauordnung des Landes Sachsen-Anhalt (BauO LSA),
- Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft),
- International Organization for Standardization (ISO),
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI),
- Chemikalien Verbotverordnung (ChemVerbotsV),
- Leitungsanlagen Richtlinie (LAR),
- Technische Regeln für Anlagensicherheit (TRAS),
- Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit (TAA) (Leitfäden),
- Kommission für Anlagensicherheit (KAS).

Neben den vorgenannten gesetzlichen Regelungen sind weiterhin zu beachten:

- Berufsgenossenschaftliches Vorschriften- und Regelwerk bzw. allgemeine Unfallverhütungsvorschriften (DGUV-Vorschriften) für den Arbeits- und Gesundheitsschutz, z. B.:
 - DGUV 1 – Grundsätze der Prävention,
 - DGUV 3 – Elektrische Anlagen und Betriebsmittel,
 - DGUV-R 113 – 001 Explosionsschutz-Regeln,
 - DGUV-I 209-011 – Gasschweißen,
 - DGUV-I 205-001 – Arbeitssicherheit durch vorbeugenden Brandschutz,
 - DGUV-I 209-072 – Wasserstoffsicherheit in Werkstätten,
 - BG-Regel 500 Teil 2.33: Umgang mit Gasen.
- Hinweise der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemischen Industrie, z. B.:
 - Merkblatt T 055 – „Mess- und Warngeräte für den Explosionsschutz“ BGI 8617,
 - Merkblatt T 023 – „Gaswarneinrichtungen für den Explosionsschutz“ BGI 518.

- Normen des Deutschen Instituts für Normung (DIN), Europäische Normen (EN) oder Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE), z. B.:
 - DIN VDE 0833-1 und -2 i. V. m. DIN 14675 – Brandmeldeanlage – Aufbau und Betrieb,
 - DIN EN 62305 VDE 0185 bzw. DIN EN 62561 – Blitzschutzanlage,
 - DIN EN 60079 VDE 0170 – Explosionsgefährdete Bereiche.
- Richtlinien des Bundesverbandes Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG), z. B. für die:
 - Festlegung von explosionsgefährdeten Bereichen,
 - Planung, Errichtung und Betrieb von Blitzschutz-, Erdungs- und Potentialausgleichsanlagen,
 - Prüfung elektrischer Anlagen und elektrischer Betriebsmittel u. a. in Untergrundspeicherbetrieben.
- Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), z. B.:
 - Arbeitsblatt GW 10 – Kathodischer Korrosionsschutz (KKS) erdüberdeckter Rohrleitungen, Rohrleitungen in komplexen Anlagen und Lagerbehälter aus Stahl; Planung, Einrichtung, Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung,
 - Arbeitsblatt GW 350 – Schweißverbindungen an Rohrleitungen aus Stahl in der Gas- und Wasserversorgung – Herstellung, Prüfung und Bewertung,
 - Arbeitsblatt G 462 – Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck – Errichtung.
- Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung (CLP) von Stoffen und Gemischen:
 - CLP,
 - GHS,
 - REACH.

9.3.1.9 Zeitplan für den Genehmigungsprozess

Der zeitliche Aufwand des Betriebsplanverfahrens ist abhängig von der Größe des Vorhabens und der Art des Genehmigungsverfahrens. Im unten angeführten exemplarischen Zeitplan (Abbildung 261) ist eine Einschätzung für ein Betriebsplanverfahren mit UVP und Öffentlichkeitsbeteiligung dargestellt.

Exemplarischer Zeitplan Genehmigungsprozess für Untergrundspeicher									
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	
Rahmenbetriebsplan (RBP)	█								
Vorplanung und Abstimmung mit Behörde	█								
ggf. UVP-Bericht		█	█						
allgemeine und standortspezifische Gutachten		█	█						
Basic Engineering		█	█						
Antrag auf Wasserrechtliche Bewilligung			█	█	█				
Antrag auf Genehmigung nach BImSchG				█	█				
Einreichung/Genehmigung					█	█			
Hauptbetriebsplan Errichtung						█	█	█	
Sonderbetriebsplanverfahren								...	
Hauptbetriebsplan Betrieb								...	

Abbildung 261: Exemplarischer Zeitplan für den Genehmigungsprozess

9.3.2 Leitlinien für die Erstellung der notwendigen Antragsunterlagen für die Wasserstoffspeicherung

Nachfolgend wird auf die Spezifik der erforderlichen Unterlagen eingegangen, insbesondere, wenn inhaltliche Unterschiede zwischen der Speicherung von Erdgas und Wasserstoff bestehen.

Prinzipiell ist jedoch zu beachten, dass es regional unterschiedliche Herangehensweisen bzw. auch unterschiedliche Umfänge und Inhalte der notwendigen Antragsunterlagen gibt, die im jeweiligen Fall zu Beginn der Planung und Genehmigung mit der zuständigen Behörde abzustimmen sind.

Tabelle 110: Übersicht über die notwendigen Antragsunterlagen

Kategorie:	Notwendige Anlagen/Gutachten	Kommentar	Unterschied Wasserstoff/ Erdgas (Ja/Nein)
Genehmigung Inbetriebnahme Betrieb Sonstiges			
Rahmenbetriebsplan (RBP)			
G		Je nach H ₂ -Menge obligatorisch oder fakultativ	J
S	Schallimmissionsprognose	Anlage zum RBP	J
S	UVP-Bericht	Anlage zum RBP (nur bei obligatorischem RBP erforderlich)	J
S	Fauna-Flora-Habitat VP	Anlage zum RBP	N
S	Hydrogeologisches Gutachten	Anlage zum RBP/HBP	N
S	Bodengutachten	Anlage zum RBP	N
S	Verkehrstechnisches Gutachten	Anlage zum RBP	N
S	Artenschutzprüfung	Anlage zum RBP	N
I/B	Lagepläne, geologische Dokumentation, technische Anlagenbeschreibung (Verrohrungsschema, Fließbilder, etc.)	Anlage zum RBP	J
I/B	Zeitplan, Bau und Betrieb	Anlage zum RBP	N
G	Antrag auf Wasserrechtliche Bewilligung	Anlage zum RBP	N
G	Antrag auf Genehmigung nach BImSchG	Anlage zum RBP	J

Kategorie: Genehmigung Inbetriebnahme Betrieb Sonstiges	Notwendige Anlagen/Gutachten	Kommentar	Unterschied Wasserstoff/ Erdgas (Ja/Nein)
Hauptbetriebsplan (HBP)			
G			J
S	Landschaftspflegerischer Begleitplan	Anlage zum HBP	N
S	Kampfmittelfreigabe	Anlage zum HBP	N
S	Archäologische Prospektion	Anlage zum HBP	N
S	Sicherheitsbericht (12. BImSchV § 9)	Anlage zum HBP	J
S	Immissionsschutzgutachten	Anlage zum HBP	J
I/B	Alarmplan	Anlage zum HBP	J
I/B	Lagepläne mit EX-Zonen	Anlage zum HBP	J
I/B	Betriebssicherheitshandbuch	Anlage zum HBP	J
I/B	Konzept zur Verhinderung von Störfällen (12. BImSchV § 8)	Anlage zum HBP	J
I/B	Alarm- und Gefahrenabwehrplan (12. BImSchV § 10)	Anlage zum HBP	J
I/B	Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokument	Anlage zum HBP	j
I/B	Risswerk	Anlage zum HBP	N

Kategorie: Genehmigung Inbetriebnahme Betrieb Sonstiges	Notwendige Anlagen/Gutachten	Kommentar	Unterschied Wasserstoff/ Erdgas (Ja/Nein)
I/B	Abfallwirtschaftskonzept	Anlage zum HBP	N
I/B	Konzept für Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen	Anlage zum HBP	N
I/B	Weitere Betriebs- und Dienstanweisungen	Anlage zum HBP	J
I/B	Lageplan, Organigramm, Umweltorganisation, Arbeitssicherheitsorganisation	Anlage zum HBP	N
Sonderbetriebspläne (SBP)			
G			-
Sonderbetriebsplan Gaserstbefüllung und benötigte technische Anlagen			
G			J
Sonderbetriebsplan Snubbing (Ausbau Entleerungsstrang und finale Komplettierung)			
G			J
Sonderbetriebsplan Errichtung der Obertageanlage inklusive Feldleitung			
G		ggf. auch Aufteilung einzelner Gewerke in eigene SBP	J
Sonderbetriebsplan gastechnische Kavernenkomplettierung und Anschluss an Feldleitung			
G		ggf. auch Aufteilung einzelner Gewerke in eigene SBP	J
Sonderbetriebsplan Betrieb Untertage			

Kategorie:	Notwendige Anlagen/Gutachten	Kommentar	Unterschied Wasserstoff/ Erdgas (Ja/Nein)
Genehmigung Inbetriebnahme Betrieb Sonstiges			
G		(Geomechanische Randbedingungen, Monitoring Hohlraum, etc.)	J
Weitere SBP, z. B. für nachträgliche Speichererweiterungen, Anpassungen, Vermessungskampagnen, etc.			
G			-
S	Fremdleitungserkundung	Anlage zum SBP	N
Abschlussbetriebsplan			
G			N
Wasserrechtliche Erlaubnis			
G		Inkludierung in SBP ist mit Behörde im Einzelfall abzustimmen	J
G	Antrag auf Genehmigung nach LStrG (Landesstraßengesetz) ²		N

Nachfolgende Erläuterungen zu den H₂-spezifischen Unterlagen der o. a. Tabelle 110 beziehen sich auf die Anlagen zum Rahmenbetriebsplan (RBP).

Mit dem untersetzenden Hauptbetriebsplan und den nach Erfordernis einzureichenden Sonderbetriebsplänen werden weitere, vertiefende Planungsdokumente (als Anlagen) zur Einreichung fällig, die zumeist von spezialisierten Experten bzw. Ingenieurunternehmen standortspezifisch und mit zunehmender Planungstiefe in der Detailplanung der jeweiligen technologischen Anlagen erarbeitet werden. Deshalb wird an dieser Stelle in Bezug auf den HBP auf eine inhaltliche Beschreibung verzichtet.

1. Rahmenbetriebsplan (RBP)

Für einen bestimmten längeren, nach den jeweiligen Umständen bemessenen Zeitraum kann die zuständige Behörde verlangen, dass Rahmenbetriebspläne aufgestellt werden, die allgemeine Angaben über das beabsichtigte Vorhaben, dessen technische Durchführung und voraussichtlichen zeitlichen Ablauf, enthalten müssen.

Im Gegensatz dazu gilt gemäß BbergG für die Hauptbetriebspläne: „Für die Errichtung und Führung eines Betriebes sind Hauptbetriebspläne für einen in der Regel zwei Jahre nicht überschreitenden Zeitraum aufzustellen.“

Insofern umfasst der Rahmenbetriebsplan einen zeitlich größeren Zeitraum.

Allein schon aus der Beschreibung der beiden unterschiedlichen Stoffe (Wasserstoff/Erdgas) ergeben sich hier notwendige Unterschiede in deren Eigenschaften und Verhalten im Prozess, welche in den Genehmigungsunterlagen erfasst sein müssen.

1.1. Schallimmissionsprognose

In der Schallimmissionsprognose ist zu prüfen, ob schädliche Umwelteinwirkungen in Form von erheblichen Belästigungen durch Geräusche vom geplanten Vorhaben in dessen Umfeld zu erwarten sind. Dazu sind geeignete Schallschutzmaßnahmen aufzuzeigen, die einen angemessenen Schutz vor Lärmbelästigungen erfüllen. Inhaltlich sind z. B. folgende Punkte relevant:

- Festlegung der zu betrachtenden Immissionsorte,
- Ermittlung der schalltechnischen Kenndaten relevanter Geräuschquellen,
- Ermittlung der im Gebiet bestehenden Vorbelastung,
- Erstellung eines digitalen Geländemodells mit immissionsortrelevanten Geräuschemittenten,
- Ausbreitungsrechnung und Erstellung von Rasterlärmkarten unter Berücksichtigung des betrachteten Objektes,
- Berechnung der Beurteilungspegel nach TA Lärm
- Ermittlung von Minderungsmaßnahmen,
- Erstellung eines schalltechnischen Gutachtens.

Bei der Speicherung von Wasserstoff wird die **Ermittlung der schalltechnischen Kenndaten relevanter Geräuschquellen** Unterschiede zum Erdgas beinhalten, da einerseits weniger Erfahrungswerte für Prognosen vorliegen könnten und andererseits die physikalischen Eigenschaften (Dichte, Viskosität, Schallgeschwindigkeit) andere Intensitäten der Schallentstehung in Maschinen und Anlagenteilen bedingen werden.

1.2. UVP-Bericht

Der UVP-Bericht ist entsprechend § 16 UVP-Gesetz zu erstellen.

Er beinhaltet „die voraussichtlichen Umweltauswirkungen des Vorhabens“ und soll folgendes enthalten:

1. eine Beschreibung des Vorhabens mit Angaben zum Standort, zur Art, zum Umfang und zur Ausgestaltung, zur Größe und zu anderen wesentlichen Merkmalen des Vorhabens,
2. eine Beschreibung der Umwelt und ihrer Bestandteile im Einwirkungsbereich des Vorhabens,
3. eine Beschreibung der Merkmale des Vorhabens und des Standorts, mit denen das Auftreten erheblicher nachteiliger Umweltauswirkungen des Vorhabens ausgeschlossen, vermindert oder ausgeglichen werden soll,
4. eine Beschreibung der geplanten Maßnahmen, mit denen das Auftreten erheblicher nachteiliger Umweltauswirkungen des Vorhabens ausgeschlossen, vermindert oder ausgeglichen werden soll, sowie eine Beschreibung geplanter Ersatzmaßnahmen,
5. eine Beschreibung der zu erwartenden erheblichen Umweltauswirkungen des Vorhabens,
6. eine Beschreibung der vernünftigen Alternativen, die für das Vorhaben und seine spezifischen Merkmale relevant und vom Vorhabenträger geprüft worden sind, und die Angabe der wesentlichen Gründe für die getroffene Wahl unter Berücksichtigung der jeweiligen Umweltauswirkungen sowie
7. eine allgemein verständliche, nicht technische Zusammenfassung des UVP-Berichts.

Soweit dieser Bericht zu erstellen ist, sind die Ergebnisse der Entwurfs- bzw. Genehmigungsplanung zu berücksichtigen, wobei die Umweltauswirkungen sich durch das unterschiedliche Emissionsverhalten von Wasserstoff oder Erdgas bzw. die unterschiedlichen verfahrensbedingten Prozessmedien und Hilfsstoffe unterscheiden dürften.

Die höhere Permeabilität und Mobilität von Wasserstoff gegenüber Erdgas beeinflusst die Leckageverluste und auch die Ausbreitung bzw. die Größe von EX-Zonen, die hinsichtlich Emissionen und Umweltauswirkungen betrachtet werden müssen.

1.3. Fauna-Flora-Habitate Verträglichkeitsprüfung

Im Rahmen einer Flora-Fauna-Habitat-(FFH)-Vorprüfung ist zunächst die Frage nach der Notwendigkeit einer FFH-Verträglichkeitsprüfung zu beantworten. Diese ergibt sich aus der Richtlinie 92/43/EWG, im Folgenden FFH-Richtlinie genannt. Nach § 34 (1) BNatSchG sind „Projekte vor ihrer Zulassung oder Durchführung auf ihre Verträglichkeit mit den Erhaltungszielen eines Natura-2000-Gebiets (Natura-2000 umfasst sowohl Schutzgebiete nach FFH-Richtlinie als auch Vogelschutzgebiete) zu überprüfen, wenn sie einzeln oder im Zusammenwirken mit anderen Projekten oder Plänen geeignet sind, das Gebiet erheblich zu beeinträchtigen, und nicht unmittelbar der Verwaltung des Gebiets dienen“.

Ergibt die Vorprüfung die Notwendigkeit einer FFH-Verträglichkeitsprüfung, so kann im Ergebnis der Prüfung das Projekt als unzulässig eingestuft werden.

„Ergibt die Prüfung der Verträglichkeit, dass das Projekt zu erheblichen Beeinträchtigungen des Gebiets in seinen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen führen kann, ist es unzulässig“ (§ 34 (2) BNatSchG).

Betrachtet man die unterschiedlichen zu speichernden Medien Wasserstoff und Erdgas, so werden an dieser Stelle kaum Unterschiede relevant, d. h., das Verfahren und dessen Ergebnisse sollten die Gleichen sein.

1.4. Artenschutzprüfung und Landschaftspflegerischer Begleitplan

Rechtliche Grundlage zum Schutz der Tierarten und ihrer Lebensstätten in Deutschland ist das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG).

Im Europarecht ist der Artenschutz in den Artikeln 12, 13 und 16 der FFH-Richtlinie verankert. Im deutschen Naturschutzrecht ist der besondere Artenschutz in den Bestimmungen der §§ 44 und 45 BNatSchG umgesetzt. Der § 44 Abs. 5 definiert die bei Durchführung eines Eingriffs oder Vorhabens relevanten Arten. Diese sind die in Anhang IV der Richtlinie 92/43/EWG aufgeführten Arten, sämtliche wildlebende europäische Vogelarten nach Art. 1 der Vogelschutz-Richtlinie oder solche Arten, die in einer Rechtsverordnung nach § 54 Abs. 1 Nr. 2 aufgeführt sind.

Im Rahmen des artenschutzrechtlichen Fachbeitrages wird geprüft, inwieweit die o. a. geschützten Arten durch das Vorhaben beeinträchtigt werden können.

Auf der Genehmigungsebene des Hauptbetriebsplanes ist neben der Artenschutzprüfung in der Regel auch ein landschaftspflegerischer Begleitplan zu erstellen. Dieser erfasst Eingriffe in Natur und Landschaft nach § 14 Abs. 1 BNatSchG, die Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels, welche die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können.

Grundsätzlich sind derartige Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft vom Verursacher zu vermeiden.

Ein Eingriff, der zu unvermeidbaren Beeinträchtigungen oder der Gefährdung der Schutzgüter nach § 14 Abs. 1 BNatSchG führt, kann zugelassen werden, wenn die Folgen des Eingriffs in angemessener Frist ausgeglichen oder in sonstiger Weise kompensiert werden können oder bei einer Abwägung den mit dem Eingriff verbundenen Belangen Vorrang vor den Belangen des Naturschutzes und der Landschaftspflege einzuräumen ist (§ 15 Abs. 5 BNatSchG).

Laut § 15 Abs. 2 ist der Verursacher verpflichtet, unvermeidbare Beeinträchtigungen durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege auszugleichen (Ausgleichsmaßnahmen) oder zu ersetzen (Ersatzmaßnahmen). Ausgeglichen bzw. ersetzt ist eine Beeinträchtigung, wenn und sobald die beeinträchtigten Funktionen des Naturhaushaltes in gleichartiger Weise am Ort des Eingriffs bzw. in gleichwertiger Weise im betroffenen Naturraum wiederhergestellt sind und das Landschaftsbild landschaftsgerecht wiederhergestellt oder neu gestaltet ist. Bei der Festsetzung von Art und Umfang der Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen sind die Programme und Pläne nach den §§ 10 und 11 BNatSchG zu berücksichtigen.

In einem Landschaftspflegerischen Begleitplan werden die gemäß § 17 erforderlichen Angaben zur Beurteilung des mit dem Vorhaben verbundenen Eingriffs gemacht, um die Rechtsfolgen gemäß den §§ 13, 14 und 15 BNatSchG im Verfahren bestimmen zu können.

1.5. Hydrogeologisches Gutachten, Bodengutachten, Verkehrstechnisches Gutachten

Die hier genannten Gutachten sind Spezialgutachten, die durch Gutachter entsprechend dem jeweiligen Projektinhalt angefertigt werden. Spezifische Aspekte für einen Untergrundspeicher sind hier für Erdgas und Wasserstoff im Wesentlichen gleich.

Schwerpunkte hierbei können sein:

- Bewertung der Grundwassersituation hinsichtlich Schutzgebiete und Dargebot,
- Bereitstellung von Löschwasser,
- Standfestigkeits- und Baugrunduntersuchungen,
- Nivellement zur Senkungserkennung,
- Verkehrsanbindung und Zufahrten für regelmäßige und Schwerlasttransporte.

Auf notwendige geophysikalische und geologische Gutachten zur Charakterisierung der untertägigen Speicherformationen wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

1.6. Lagepläne, geologische Dokumentation, technische Anlagenbeschreibung (Verrohrungsschema, Fließbilder, etc.)

Die hier genannten Dokumente sind entsprechend dem vorliegenden Planungsstand (Genehmigungsplanung) vorhanden bzw. zu erstellen und dienen der technischen Beschreibung des Standortes und der zu errichtenden technischen Anlagen. Mit zunehmender Genehmigungstiefe (Hauptbetriebsplan, Sonderbetriebspläne) werden bei diesen Dokumenten die Anforderungen an die Detailliertheit höher. Teilweise werden auch durch Sachverständige vorgeprüfte Unterlagen von den Bergbehörden gefordert. Dabei erfolgt dann im Nachgang die Prüfung vor Inbetriebnahme bzw. die Abnahmeprüfung der Sachverständigen nach den jeweiligen Verordnungen bzw. Prüfgrundlagen.

1.7. Zeitplan Bau und Betrieb

Die Zeitplanung für die Errichtung eines Untergrundspeichers ist stark abhängig von der aktuellen Marktsituation, der Auftragsdeckung der Lieferanten und insbesondere von den Rohstoffpreisen und deren Verfügbarkeit. Nachfolgend ist eine sehr grobe Schätzung einer Ablaufkette gegeben, wie sie zur Laufzeit des Verbundvorhabens H₂-UGS darstellbar gewesen wäre (Abbildung 262). Die zum Zeitpunkt der Erstellung des Leitfadens existierenden globalen/europäischen Entwicklungen lassen derzeit keine konsistente Vorausschau zur Terminplanung zu.

Die Termine und Zeitspannen sind im Rahmen der Planung eines neuen Speichers zu verifizieren und anzupassen.

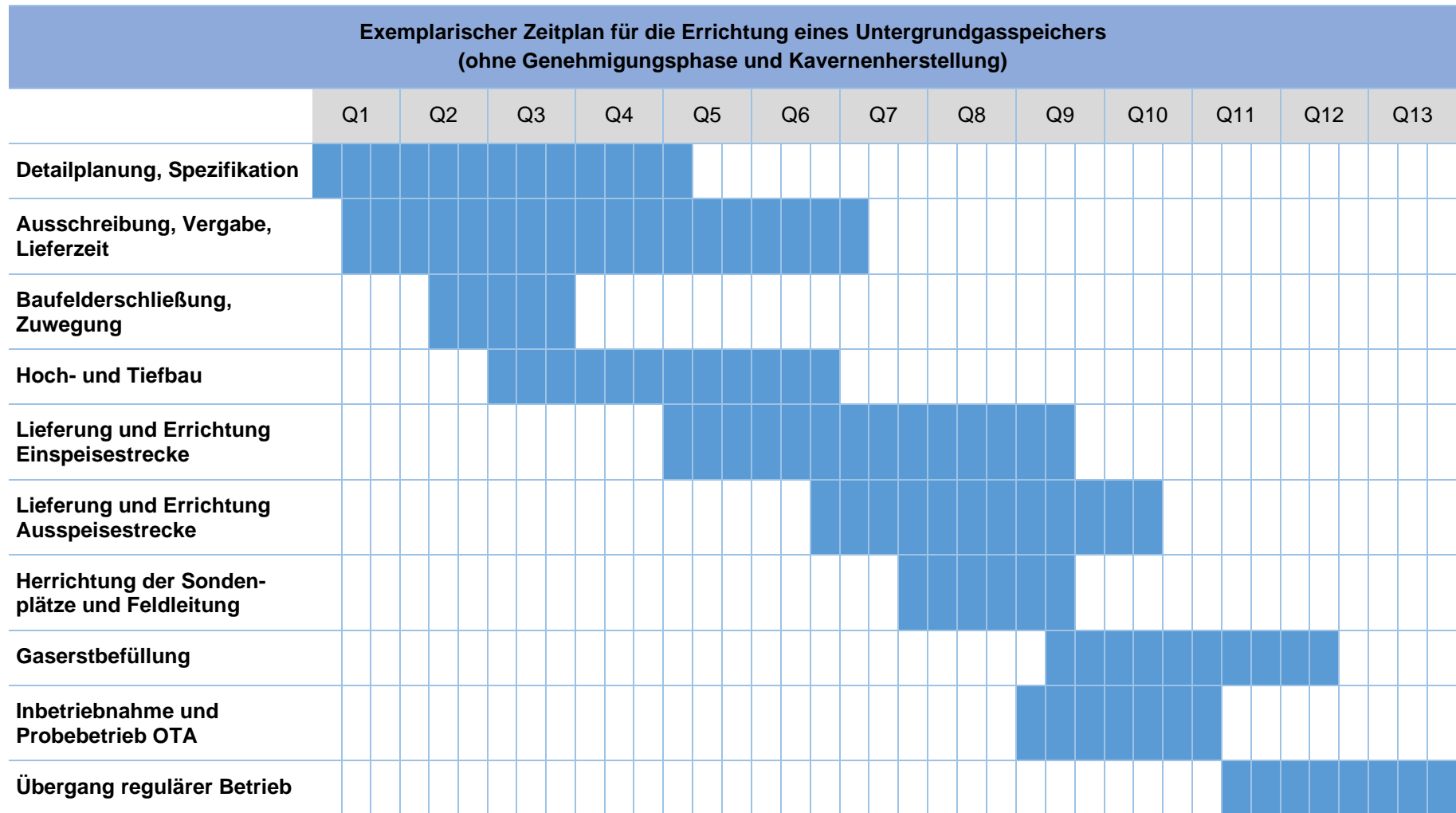


Abbildung 262: Zeitplan für die Errichtung eines Untergrundspeichers

1.8. Antrag auf Wasserrechtliche Bewilligung

Während der Errichtung des Betriebes oder der Stilllegung eines Untergrundspeichers sind verschiedene Arten der Benutzung von Gewässern im Sinne des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) möglich. Dort ist definiert:

„§ 9 Benutzungen

(1) Benutzungen im Sinne dieses Gesetzes sind

- 1. das Entnehmen und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern,*
- 2. das Aufstauen und Absenken von oberirdischen Gewässern,*
- 3. das Entnehmen fester Stoffe aus oberirdischen Gewässern, soweit sich dies auf die Gewässereigenschaften auswirkt,*
- 4. das Einbringen und Einleiten von Stoffen in Gewässer,*
- 5. das Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten und Ableiten von Grundwasser.*

(2) Soweit nicht bereits eine Benutzung nach Absatz 1 vorliegt, gelten als Benutzungen auch

- 1. das Aufstauen, Absenken und Umleiten von Grundwasser durch Anlagen, die hierfür bestimmt oder geeignet sind,*
- 2. Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen,*
- 3. das Aufbrechen von Gesteinen unter hydraulischem Druck zur Aufsuchung oder Gewinnung von Erdgas, Erdöl oder Erdwärme, einschließlich der zugehörigen Tiefbohrungen,*
- 4. die untertägige Ablagerung von Lagerstättenwasser, das bei Maßnahmen nach Nummer 3 oder anderen Maßnahmen zur Aufsuchung oder Gewinnung von Erdgas oder Erdöl anfällt.“*

Während der Errichtung der obertägigen Anlagen eines Untergrundspeichers sind demnach folgende Arbeiten im Fokus einer wasserrechtlichen Erlaubnis/Bewilligung:

- Baugrunduntersuchungen und Erkundungen, in denen Grundwasser zu Tage gefördert wird,
- Wasserhaltung und Grundwasserabsenkung für Tiefbaumaßnahmen,
- Brunnenbohrungen zur Wasserversorgung oder Löschwasserbereitstellung,
- Fassung und Versickerung oder Einleitung von Niederschlagswasser von befestigten Flächen oder Dächern.

Weiterhin gelten für „Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen und Behandeln wassergefährdender Stoffe sowie Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe im Bereich der gewerblichen Wirtschaft und im Bereich öffentlicher Einrichtungen“ ebenfalls besondere genehmigungsrechtliche Vorschriften, damit „eine nachteilige Veränderung der Eigenschaften von Gewässern nicht zu besorgen ist“ (WHG, 31.07.2009).

Für die Planung und Errichtung von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen werden die Regeln ebenfalls durch §§ 62 und 63 des WHG definiert. Die konkrete technische Ausgestaltung einer Anlage und die Pflichten eines Betreibers einschließlich erforderlicher Anzeige- und Eignungsfeststellungsverfahren sind in der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) festgelegt.

Technische Anlagen eines Speicherbetriebes, die unter diese Regel fallen, sind z. B.:

- Anlagen zur Solung von Kavernen sowie zur Erstbefüllung,
- Tankläger für wassergefährdende Stoffe, z. B. (Diesel, Öle, Abscheiderinhalte),
- Befüllflächen für die Ver- und Entsorgung von wassergefährdenden Flüssigkeiten,
- Dosieranlagen für Odormittel.

Die Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb der o. a. Anlagen ist im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren inkludiert.

Bestandteil des Genehmigungsbescheides sind aber auch spezifische Auflagen und Festlegungen zur wiederkehrenden Überprüfung derartiger Anlagen.

1.9. Antrag auf Genehmigung nach BImSchG

Im aktuellen Bundesberggesetz (BBergG) heißt es im § 54 „Zulassungsverfahren“:

„(1) [...]

(2) Wird durch die in einem Betriebsplan vorgesehenen Maßnahmen der Aufgabenbereich anderer Behörden oder der Gemeinden als Planungsträger berührt, so sind diese vor der Zulassung des Betriebsplanes durch die zuständige Behörde zu beteiligen.“

Hierbei regelt das BBergG im weiteren Wortlaut auch die Einzelheiten des Verfahrens. Auf Landesebene sind dann auch unterschiedliche Zuständigkeiten durch Verordnungen festgelegt, so dass hier keine universell gültige Verfahrensvorschrift beschrieben werden kann. Wichtig für den Ablauf und den Umfang des Verfahrens ist die Unterscheidung, ob es sich um eine genehmigungsbedürftige Anlage gemäß BImSchG bzw. BBergG handelt oder nicht sowie, ob es sich um einen Neu- oder Umbau handelt und ob die Anlage Teil eines störfallrechtlichen Betriebsbereiches ist bzw., ob hierfür eine Störfallrelevanz besteht oder nicht. Weiterhin kann in den o. g. Verfahren eine UVP stattfinden. Die Einreichung von weiteren SBP oder Nachträge zum eingereichten HBP können abhängig vom Verlauf des Verfahrens notwendig werden.

9.3.3 Einbeziehung von Sachverständigen

Damit die technische Betriebssicherheit der Gasanlagen während der gesamten Nutzungsdauer gewährleistet ist, sind verschiedene Prüfungen und Nachweise erforderlich, die im Rahmen des bergrechtlichen Zulassungsverfahrens nach Art und Umfang festgelegt werden. Jegliche Prüfungen müssen durch Sachverständige unter eigenverantwortlicher Heranziehung geeigneter Prüfgrundlagen begleitet werden.

Als Grundlage dieser Prüfungen dienen verschiedene Regelwerke, wie z. B. die des DVGW, VDE oder DIN.

Da Wasserstoff im Energiesektor bisher nur untergeordnet eine Rolle spielte, wurde dieser in den Regelwerken auch kaum berücksichtigt. Deshalb laufen derzeit bei den Regelsetzern zahlreiche Aktivitäten, um bestehende Regelwerke entsprechend anzupassen oder zu erweitern (DIN, et al., 2021).

Vor diesem Hintergrund ist eine vollständige Auflistung der Prüfgrundlagen für einen H₂-Untergrundspeicher aktuell nicht oder nur bedingt möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der überwiegende Teil der Anforderungen der bisherigen Regelwerke anwendbar ist, wenn H₂-spezifische Ergänzungen beachtet werden. Somit wird auch der Umfang der notwendigen Prüfungen weiterhin Bestand haben.

Mit der Novelle des Energiewirtschaftsgesetzes im Juni 2021 wurde die leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Wasserstoff in das Energierecht aufgenommen und gleichzeitig der DVGW als Regelsetzer für die technische Sicherheit von Energieanlagen zur Erzeugung, Fortleitung und Abgabe von Wasserstoff benannt.

Das bereits aktualisierte DVGW-Merkblatt G 221 ist von besonderer Bedeutung, da es die Anwendung des bestehenden DVGW-Regelwerks auf H₂-reiche Gase und Wasserstoff beschreibt und somit die Grundlage für die erforderlichen Prüfungen zur Inbetriebnahme sowie deren Nachweis darstellt. Das gesamte DVGW-Regelwerk soll bis 2024 so angepasst sein, dass die Nutzung von Wasserstoff vollständig abgedeckt ist.

Im Folgenden sind die inhaltlichen Schwerpunkte des Merkblatts G 221 zusammengefasst:

Eignungsnachweise

Um nachzuweisen, dass der Einsatz von Bauteilen, Komponenten und Baugruppen für den konkreten Anwendungsfall geeignet ist, gibt es die Herstellerbescheinigung/-erklärung oder ein vergleichbares Dokument. Sollten die Bescheinigungen nicht verfügbar sein, werden dem Betreiber alternative Handlungswege aufgezeigt.

Gefährdungsbeurteilung

Durch den Einsatz von Wasserstoff können neue Gefährdungen auftreten oder bestehende Risiken erhöht werden. Die Gefährdungsbeurteilungen der betroffenen Anlagen sind daher auf die Spezifika von Wasserstoff anzupassen. Das Merkblatt gibt hierfür eine Übersicht zu Sachthemen und resultierenden Schutzmaßnahmen sowie Hinweise zu hilfreichen Normen und Regelwerken.

Qualifikation der Beteiligten

Die bei der Planung, Errichtung, Inbetriebnahme und beim Betrieb beteiligten Personen und Unternehmen müssen bestimmte Kompetenzen vorweisen. Die genaue Definition der Anforderungen an die Kompetenz und wie diese festgestellt bzw. wie sie über Schulungen erlangt werden kann, wird ebenfalls in dem Merkblatt aufgezeigt.

Werkstoffe

Von besonderer Bedeutung ist die H₂-Tauglichkeit verschiedenster Materialien. Im Vordergrund steht hier der Stahl; es werden jedoch auch Hinweise zu Rohren und Formteilen aus Kunststoffen gegeben. Auch eingesetzte Hilfsstoffe (Schmierstoffe) werden bei der Feststellung der Eignung berücksichtigt.

Gasdichtheit

Im Vergleich zu Luft oder Stickstoff hat Wasserstoff eine geringere Molekülgröße. Daher ist der Nachweis der Dichtheit mit Luft oder Sauerstoff nicht (immer) ausreichend. Es werden Verfahren aufgezeigt, die die Gasdichtheit gegenüber Wasserstoff nachweisen und entsprechende Anforderungen an die Prüfung definiert.

Explosionssicherheit

Da Wasserstoff weitere Zusatzanforderungen an die Explosionssicherheit stellt, sind die Explosionsschutzdokumente daher neu zu bewerten bzw. zu beschreiben. Das Merkblatt spezifiziert zudem die Anforderungen, die aus der H₂-Anwendung resultieren.

Umstellung von Anlagen auf wasserstoffhaltige Gase

Im Zuge einer Umstellung der vorhandenen Infrastruktur auf Wasserstoff müssen die Anlagenteile auf ihre H₂-Tauglichkeit überprüft werden. Die Verantwortung, die notwendigen Prüfungen durchzuführen, liegt dabei beim Betreiber. Die Art der Prüfungen, wie z. B. „betriebliche Prüfungen“, „Prüfung auf technische Sicherheit des Soll-Zustandes“ und „Nachweis der Prüfungen“ sowie die Vorgehensweise werden im Merkblatt benannt und erläutert. Ebenfalls ist vermerkt, welche gutachterlichen Äußerungen eines Sachverständigen bei anzeigenpflichtigen Umstellungen oder Umrüstungen erforderlich sind. Auch werden die Anforderungen an den Sachverständigen und die zu prüfenden Sachthemen im Merkblatt definiert.

Planung und Neubau

Wasserstoffrelevante Anforderungen an die Prüfungen zur Inbetriebnahme sind im Merkblatt G 221 angegeben, sofern diese nicht bereits im relevanten DVGW-Regelwerk spezifiziert sind. Nach der Bescheinigung der erfolgreichen Prüfung durch den Sachverständigen erfolgt die Inbetriebnahme unter H₂-kundiger Aufsicht.

Betrieb und Instandhaltung:

Im Merkblatt werden zusätzliche H₂-spezifische Anforderungen und Empfehlungen für den Betrieb und die Instandhaltung benannt.

Wesentliche Prüfungen und Grundlagen

In der nachfolgenden Tabelle 111 sind die wesentlichen Prüfungen sowie deren Grundlagen dargestellt. Hier wird besonders auf Änderungen bei der Verwendung von Wasserstoff hingewiesen.

Bei den notwendigen Prüfungen ist grundsätzlich zwischen erforderlichen Vorprüfungen im Rahmen von Antragstellungen, Abnahmeprüfungen im Rahmen von Inbetriebnahmen und wiederkehrenden Prüfungen während des Speicherbetriebs zu unterscheiden. Wiederkehrende Prüfungen finden in Verantwortung des Anlagenbetreibers bzw. nach Auflage der Genehmigungsbehörden auf Grundlage der einschlägigen Regelwerke statt.

Weitere Prüfungen sind in Zusammenhang auf untertägige Anlagen (Geomechanisches Gutachten zur Bewertung der Integrität und Festlegung der Betriebsbereiche und Dichtheitsteste) erforderlich und werden in Kapitel 7.3.1 beschrieben.

Tabelle 111: Übersicht der wesentlichen Sachverständigenprüfungen

Zu prüfende Anlagen bzw. Bauteile	Prüfgrundlagen	Änderungen auf Grund des Speichermediums Wasserstoff
Vorprüfung von Planungsunterlagen		
EMSR-Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesberggesetz (BBergG) • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • Elektro-Bergverordnung (ElBergV) • relevante DIN und EN-Normen 	Änderungen zu erwarten, z. B. Qualitätsmessung, Anforderungen an den EX-Schutz
Maschinentechnische Ausrüstungen und Anlagentechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesberggesetz (BBergG) • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • relevante DIN und EN-Normen 	Änderungen zu erwarten, z. B. Nachweis der H ₂ -Eignung, Qualifikation von Unternehmen
Feldleitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Verordnung über Gashochdruckleitungen (GasHDrLtGv) • Rohrfernleitungsverordnung (RohrFLtGv) • Technische Regeln für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL) • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • DIN-Normen, DIN-EN-Normen, EN-Normen; • AD-Merkblätter und VdTÜV-Merkblätter; • Technische Normen und Empfehlungen für MSR-, E- und Prozessleittechnik sowie für KKS-Anlagen (DIN-VDE-Normen) • AfK-Empfehlungen und Unfallverhütungsvorschriften • DVGW-Regelwerk 	DIN- und DVGW-Regelwerk aktuell in Überarbeitung

Zu prüfende Anlagen bzw. Bauteile	Prüfgrundlagen	Änderungen auf Grund des Speichermediums Wasserstoff
Prüfungen während der Errichtung		
Zerstörungsfreie Prüfungen	<ul style="list-style-type: none"> • DIN-Normen, DIN-EN-Normen, EN-Normen • AD-Merkblätter und VdTÜV-Merkblätter 	DIN- und DVGW-Regelwerk aktuell in Überarbeitung
Festigkeits- und Dichtheitsprüfungen	<ul style="list-style-type: none"> • DIN-Normen, DIN-EN-Normen, EN-Normen • AD-Merkblätter und VdTÜV-Merkblätter 	DIN- und DVGW-Regelwerk aktuell in Überarbeitung, ggf. geänderte Anforderungen an Dichtheitsprüfungen mit gasförmigen Medien
Prüfung vor Inbetriebnahme		
Sicherheitstechnik bzw. sicherheitsgerichtete Funktionen in der Sicherheitssteuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesberggesetz (BBergG) • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • EN 61508/VDE 2180 	
Elektrischen Anlagen und EX-Schutz	<ul style="list-style-type: none"> • Elektro-Bergverordnung (EIBergV) • Tiefbohrverordnung (BVOT) • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • Betriebsplanzulassung (SBP) 	Erweiterte Anforderungen an den EX-Schutz
Gaswarnanlage, sicherheitsgerichtete Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • Bundesberggesetz (BBergG) • EN 61508/VDE 2180 	Angepasste Anforderungen an die Detektion von Wasserstoff
Brandmeldeanlagen in Verdichtertalle, Gasmengenmessung bzw. Gasreinigung	<ul style="list-style-type: none"> • Verordnung über technische Anlagen und Einrichtungen nach Bauordnungsrecht (TAnIVO) 	Keine grundsätzlichen Änderungen zu erwarten

Zu prüfende Anlagen bzw. Bauteile	Prüfgrundlagen	Änderungen auf Grund des Speichermediums Wasserstoff
	<ul style="list-style-type: none"> • VDE 0800, VDE 0833, DIN 14675 	
Lüftungstechnische Anlagen, im Zusammenhang mit Gaswarn- und Brandmeldeanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Bauordnung des jeweiligen Landes 	Grundsätzlich Änderungen zu erwarten, bisher keine Aktivität bekannt
(Äußerer) Blitzschutz und Erdungsanlage sowie Schutzpotential und Funktionspotentialanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Elektro-Bergverordnung (EIBergV) • Tiefbohrverordnung (BVOT) • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • Betriebsplanzulassung (SBP) • DIN EN 62305 (VDE0185-305) 	Keine Änderungen zu erwarten
Drucktragende Anlagenteile (Rohrleitungen, Armaturen, Apparate, etc.) und Feldleitungen (Schlussbescheinigung gemäß § 6 Abs. 1 GasHDrLtgV)	<ul style="list-style-type: none"> • Verordnung über Gashochdruckleitungen (GasHDrLtgV) • Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) • Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) • DIN-Normen, DIN-EN-Normen, EN-Normen; • AD-Merkblätter und VdTÜV-Merkblätter; • AfK-Empfehlungen und Unfallverhütungsvorschriften • DVGW-Arbeitsblätter 	DIN- und DVGW-Regelwerk aktuell in Überarbeitung

Eine weitere wichtige Prüfung, die gegebenenfalls den Umfang und die Art den Genehmigungsverfahrens beeinflusst, ist die Bestimmung von Sicherheitsabständen zu benachbarten Schutzobjekten gemäß § 3 Abs. 5c BImSchG. Im Abschlussbericht des HYPOS-Projektes H₂-INES (Abbas, et al., 2021) wurde ein entsprechendes Vorgehen beschrieben. Dazu wurden vier Störfallszenarien herangezogen (Leckage/Abriss Feldleitung und Abriss Bohrlochkopf über vollen/halben Durchmesser) und mittels der Open-Source-Software ALOHA CAMEO, welches ein Äquivalent zu den kommerziellen Softwarepaketen PHAST und ProNuSs darstellt, ausgewertet. Es wurden zwar Unterschiede zwischen Erdgas und Wasserstoff festgestellt, grundsätzlich wird jedoch eine „erhebliche Gefahrenerhöhung“ (vgl. § 57d Abs. 1 BBergG) durch die Speicherung von Wasserstoff verneint. Unterschiede zwischen Erdgas und Wasserstoff lassen sich bei den Wärmekreisen feststellen, die bei Wasserstoff geringfügig kleiner ausfallen, wohingegen der Zündbereich gegenüber Erdgas geringfügig höher ist. Neu hinzu kommt bei Wasserstoff eine Gefährdung durch Überdruck, welcher bei Erdgas als vernachlässigbar ermittelt wurde und welcher hinsichtlich seiner Ausdehnung zwischen den Wärmekreisen und den Zündbereichen angesiedelt ist.

9.4 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Logging

Bisher haben nur vereinzelt Messungen in H₂-Umgebung stattgefunden. Hinsichtlich der messtechnisch zu erfassenden Cased-Hole- und Open-Hole-Bereiche können grundsätzlich die Messverfahren aus der Erdgasspeicherung für die H₂-Anwendung übertragen werden. Für die Messverfahren, die bisher keine Anwendung in Wasserstoff hatten, sind zusammen mit der Servicefirma das Handling während der Messung, etwaige Messeinflüsse, die Messanforderungen und erzielbaren Genauigkeiten zu betrachten.

Es wird für die H₂-Speicherung empfohlen, nach der Bohrung (für Neuanlagen), nach der Solung und vor der Komplettierung zum Gasbetrieb (bei fertiggesolten Kavernen) oder nach Flutung und vor der Rekomplettierung eine Gassättigungsmessung durchzuführen. Damit wird vor H₂-Einlagerung der Basiszustand aufgenommen. Wird zu einem späteren Zeitpunkt (im H₂-Speicherbetrieb) die technische Dichtheit in Frage gestellt (z. B. Leckage) kann mittels des Vergleiches zwischen der Basis- und Wiederholungsmessung eine Aussage zur Ist-Situation erfolgen.

Dichtheitsteste

In Kapitel 4.6 wird eingeschätzt, dass aufgrund der im Verbundvorhaben H₂-UGS durchgeführten Labor-, In-situ- und Modelluntersuchungen die H₂-Speicherung in Untergrundspeichern mit Bezug auf die gebirgsmechanischen Aspekte der Integrität und Stabilität möglich ist. Generell können bei der Anlage des Untergrundspeichers die Richtlinien bzw. Bewertungsmaßstäbe aus der Erdgasspeicherung angewendet werden. Für Standorte, an denen erstmalig eine H₂-Speicherung vorgesehen ist, empfiehlt es sich, die Dichtheitsteste als vergleichende Untersuchungen zunächst mit Stickstoff und danach mit Wasserstoff durchzuführen. Der H₂-Test ist basierend auf den Testergebnissen mit Stickstoff auszuführen. Das mittelfristige Ziel ist es, bei diesen Rohrschuhdichtheitstesten (MIT) unter ansonsten vergleichbaren Randbedingungen die Kriterien für die technische Dichtheit im Einsatz beider Medien zu vergleichen und die unterschiedlichen Ergebnisse zu bewerten. Gegebenenfalls kann dabei ein Anpassungsfaktor bzw. „Sicherheitsfaktor“ abgeleitet werden, der bei der Übertragung der Ergebnisse der Stickstoffteste auf die Dichtheitsteste für Wasserstoff zu berücksichtigen wäre. Sofern

möglich, können ergänzend Ergebnisse aus Laboruntersuchungen zum Dichtheitsverhalten an vorhandenem Kernmaterial bei der Festlegung der Dichtheitskriterien berücksichtigt werden.

Begründet durch das bessere Handling der Testarbeiten ist langfristig anzustreben, dass die Rohr-schuldichtheitsteste bevorzugt mit Stickstoff durchgeführt und die ermittelten Ergebnisse unter Anwendung entsprechender Sicherheitszuschläge auch für die Kavernen zur H₂-Speicherung genutzt werden. Wenn seitens des Betreibers die Forderung besteht, Tests ausschließlich mit Wasserstoff durchzuführen, ist das ebenfalls möglich, wenn die Dichtheitskriterien bekannt sind. Der Funktionstest der gesamten Komplettierung zum Beginn der Gaserstbefüllung ist mit Wasserstoff vorzusehen. Bei den geplanten Arbeiten an potenziellen Forschungskavernen (Reallabor) aber auch bei zukünftigen Laborexperimenten ist der parallele Einsatz von einem inerten Gas (Stickstoff) und dem späteren Speichergas Wasserstoff tiefergehend zu untersuchen, um weitere Erfahrungen zur Übertragbarkeit der Methoden und der Ergebnisse der Testprozeduren zu gewinnen. In diesem Rahmen wird auch eine ständige Überprüfung der angenommenen Akzeptanzkriterien erfolgen müssen, um für einen späteren regulären Betrieb verlässliche Grenzparameter für einen langfristig sicheren Betrieb festlegen zu können. Zur Stützung zukünftiger Akzeptanzkriterien können, sofern möglich, ergänzende Laboruntersuchungen (z. B. gesteinsmechanische Laborversuche an Kernmaterial, Permeabilitätsmessungen an Salz-/Zementstein bzw. an Verbundproben aus Casing/Zement) durchgeführt werden.

Zyklische Prüfungen

Mit der Presse-Information vom 29.06.2022 wurde die Neufassung der Tiefbohrverordnung (BVOT) Niedersachsen vom 17.05.2022 bekanntgegeben. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Verbundvorhabens H₂-UGS galt noch die Vorfassung der BVOT. Es wird empfohlen, die in der BVOT enthaltenen Neuregelungen hinsichtlich der Anwendung bei der Neuauslegung bzw. Umwidmung von Kavernenbohrungen für die H₂-Speicherung zu prüfen. Auch bei Speicherlokalationen, die bisher nicht gemäß der neuen BVOT behandelt werden müssten, sollten die geplanten Vorhaben zur H₂-Speicherung frühzeitig mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden. Es ist im Besonderen zu klären, inwieweit und in welchem Stadium der sogenannte Bohrloch-TüV, d. h. die regelmäßige Überprüfung von Bohrungen und Leitungen durch externe Sachverständige, Anwendung finden muss bzw. kann. Etwaige Umsetzungsregelungen sind von der zuständigen Bergbehörde festzulegen.

9.5 Literaturverzeichnis

- Abbas, Z., Krüger, D., & Krause, U. (2021). Integrative Erhöhung des Sicherheitsniveaus in der Wertschöpfungskette von Wasserstoff – HYPOS-INES: Teilprojekt 2: Systematische Risikoanalysen für neue Technologien der Wasserstofferzeugung und Nutzung. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- API Spezifikation 6A, 21st Edition, „Wellhead and Tree Equipment“, American Petroleum Institute Washington, 11/2019.
- API Specification 14A, 12th Edition, “Subsurface Safety Valve Equipment”, American Petroleum Institute Washington, 01/2015.
- API Recommended Practice 14B, 6th Edition, “Design, Installation, Operation, Test, and Redress of Subsurface Safety Valve Systems”, American Petroleum Institute Washington, 09/2015.
- Bültemeier, H., Keßler, B., Hüttenrauch, J., Sperlich, J., Kühn, M., Schlichtenmayer, M., Wagler, T., Kruck, O., Schneider, G.-S., Abdel Haq, C., Bayer, T., Faatz, K., Faber, T., Frommhold, A., Miersch, D., Schwabe, M., Städtke, L., & Zemke, J. (2022). Wasserstoff speichern – soviel ist sicher – Transformationspfade für Gasspeicher. Hrsg. v. INES Initiative Energien Speichern e.V., Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- BVEG-Leitfaden, „Bohrungsintegrität – Technische Regel“; Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., 07/2021.
- BVEG-Leitfaden, „Futterrohrberechnungen – Technische Regel; Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., 06/2006
- Crotogino, F. (1996). SMRI Reference for External Well Mechanical Integrity Testing/Performance, Data Evaluation and Assessment, Solution Mining Research Institute, Hannover.
- DIN e.V., DKE, DVGW e.V., VDI e.V. (2021). Deutsche Normungsroadmap Energiespeicher Version 2, Deutsches Institut für Normung e. V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- DIN EN ISO 10423, „Erdgasindustrie, Erdöl- und Bohr- und Förderausrüstung - Bohr-lochkopf- und Eruptionskreuz-Ausrüstung“, 2009.
- ECHONews. 2021. Zeitschrift der Firma SOCON, Ausgabe 09/2021.
- Roordnik, P., & Hydl, R. (2022). Hydrogen testing well A8 Zuidwending, SOCON Seminar 25.11.2021.
- Tiefbohrverordnung – BVOT, Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen, in der Neufassung vom 17.05.2022.
- Wasserhaushaltsgesetz – WHG, Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts vom 31.07.2009.

10 Anlagen

10.1 Anlage 1: Variantenmatrix zur Modellierung der Obertageanlage

Startvariante, Einspeicherung

		Startvariante Ein_1a															
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	100%H2/H2Oges.															
Druck Zuleitung	bar	100	100	100	100	100	100	100	100	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10
Volumenstrom	m³/h	2000	2000	800	800	2000	2000	800	800	2000	2000	800	800	2000	2000	800	800
Druck Kopf	bar	82	82	82	82	82	82	82	82	26	26	26	26	26	26	26	26
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0
		Startvariante Ein_1b															
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	99%H2/1%O2/H2Oges.															
Druck Zuleitung	bar	100	100	100	100	100	100	100	100	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10	80	10
Volumenstrom	m³/h	2000	2000	800	800	2000	2000	800	800	2000	2000	800	800	2000	2000	800	800
Druck Kopf	bar	82	82	82	82	82	82	82	82	26	26	26	26	26	26	26	26
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0

Startvariante, Ausspeicherung

Startvariante AUS_1a																			
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Zusammensetzung	vol. %	100% H ₂ /75 % H ₂ Oges.																	
Druck KavKopf	bar	82	82	82	82	82	82	30	30	30	30	30	30	100	100	100	100	100	100
Temp. KavKopf	°C	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25
Volumenstrom	m ³ /h	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000
Druck Ausleitung	bar	30	30	30	30	30	30	26	26	26	26	26	26	30	30	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Startvariante AUS_1b																			
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Zusammensetzung	vol. %	100% H ₂ / 1% O ₂ / 75 % H ₂ Oges.																	
Druck KavKopf	bar	82	82	82	82	82	82	30	30	30	30	30	30	100	100	100	100	100	100
Temp. KavKopf	°C	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25
Volumenstrom	m ³ /h	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000
Druck Ausleitung	bar	30	30	30	30	30	30	26	26	26	26	26	26	30	30	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
VARIANTE		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Zusammensetzung	vol. %	100% H ₂ / 1% O ₂ / 75 % H ₂ Oges.																	
Druck KavKopf	bar	82	82	82	82	82	82	30	30	30	30	30	30	100	100	100	100	100	100
Temp. KavKopf	°C	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25
Volumenstrom	m ³ /h	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000
Druck Ausleitung	bar	30	30	30	30	30	30	26	26	26	26	26	26	30	30	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Leitfaden Planung, Genehmigung und Betrieb von Wasserstoff-Kavernenspeichern

		Startvariante AUS_1c																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Zusammensetzung	vol. %	100%H2/1% O2 / 75 % H2Oges. + 100 ppmH2S + 20 ppm CnHm																	
Druck KavKopf	bar	82	82	82	82	82	82	30	30	30	30	30	100	100	100	100	100	100	100
Temp. KavKopf	°C	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25
Volumenstrom	m³/h	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000
Druck Ausleitung	bar	30	30	30	30	30	30	26	26	26	26	26	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
VARIANTE		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Zusammensetzung	vol. %	100%H2/1% O2 / 75 % H2Oges. + 100 ppmH2S + 20 ppm CnHm																	
Druck KavKopf	bar	82	82	82	82	82	82	30	30	30	30	30	100	100	100	100	100	100	100
Temp. KavKopf	°C	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25	14	25
Volumenstrom	m³/h	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000	10000	10.000	5.000	5.000	1.000	1.000
Druck Ausleitung	bar	30	30	30	30	30	30	26	26	26	26	26	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Referenzvariante, Einspeicherung

Referenzvariante Ein_1a																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	Linde 5.0															
Druck Zuleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Volumenstrom	m³/h	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000
Druck Kopf	bar	170	170	170	170	30	30	30	30	170	170	170	170	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0
Referenzvariante Ein_1b																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN															
Druck Zuleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Volumenstrom	m³/h	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000
Druck Kopf	bar	170	170	170	170	30	30	30	30	170	170	170	170	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0
Referenzvariante Ein_1c																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN+100ppmCO2+200ppmCO+H2Ogesättigt															
Druck Zuleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Volumenstrom	m³/h	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000
Druck Kopf	bar	170	170	170	170	30	30	30	30	170	170	170	170	30	30	30	30
Temp. Umgeb.	°C	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0

Referenzvariante, Ausspeicherung

Referenzvariante AUS_1a																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	Linde 5.0															
Druck KavKopf	bar	30	30	30	30	30	30	30	30	170	170	170	170	170	170	170	170
Temp. KavKopf	°C	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0
Referenzvariante AUS_1b																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN															
Druck KavKopf	bar	30	30	30	30	30	30	30	30	170	170	170	170	170	170	170	170
Temp. KavKopf	°C	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0
Referenzvariante AUS_1c																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN + 100ppm CO2 + 200ppm CO + H2O gesätt. + 100ppm H2S, + 20 ppm CnHm															
Druck KavKopf	bar	30	30	30	30	30	30	30	30	170	170	170	170	170	170	170	170
Temp. KavKopf	°C	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0
Referenzvariante AUS_1d																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN + 75% H2O Sättigung															
Druck KavKopf	bar	30	30	30	30	30	30	30	30	170	170	170	170	170	170	170	170
Temp. KavKopf	°C	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55	17	55
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0

Maximalvariante, Einspeicherung

Maximalvariante Ein_1a																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol.%	Linde 5.0															
Druck Zuleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Volumenstrom	m³/h	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000
Druck Kopf	bar	230	230	230	230	60	60	60	60	230	230	230	230	60	60	60	60
Temp. Umgeb.	°C	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0
Maximalvariante Ein_1b																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol.%	DIN															
Druck Zuleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Volumenstrom	m³/h	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000
Druck Kopf	bar	230	230	230	230	60	60	60	60	230	230	230	230	60	60	60	60
Temp. Umgeb.	°C	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0
Maximalvariante Ein_1c																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol.%	DIN+100ppmCO2+200ppmCO+H2O gesättigt															
Druck Zuleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. Zuleitung	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Volumenstrom	m³/h	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000	100.000	50.000
Druck Kopf	bar	230	230	230	230	60	60	60	60	230	230	230	230	60	60	60	60
Temp. Umgeb.	°C	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0	32	32	0	0

Maximalvariante, Ausspeicherung

Maximalvariante AUS_1a																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	Linde 5.0															
Druck KavKopf	bar	60	60	60	60	60	60	60	60	230	230	230	230	230	230	230	230
Temp. KavKopf	°C	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0
Maximalvariante AUS_1b																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN															
Druck KavKopf	bar	60	60	60	60	60	60	60	60	230	230	230	230	230	230	230	230
Temp. KavKopf	°C	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0
Maximalvariante AUS_1c																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN + 100ppm CO2 + 200ppm CO + H2O gesätt. + 100ppm H2S, + 20 ppm CnHm															
Druck KavKopf	bar	60	60	60	60	60	60	60	60	230	230	230	230	230	230	230	230
Temp. KavKopf	°C	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0
Maximalvariante AUS_1d																	
VARIANTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zusammensetzung	vol. %	DIN + 75% H2O Sättigung															
Druck KavKopf	bar	60	60	60	60	60	60	60	60	230	230	230	230	230	230	230	230
Temp. KavKopf	°C	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62	27	62
Volumenstrom	m³/h	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000	100.000	100.000	50.000	50.000
Druck Ausleitung	bar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Temp. Umgeb.	°C	32	32	32	32	0	0	0	0	32	32	32	32	0	0	0	0

10.2 Anlage 2: Übersicht der sicherheitstechnisch besonders relevanten Normen und Regelwerke

Der Explosionsschutz wird geregelt durch die EU-Richtlinien:

- **2014/34/EG (ATEX 114)** (Nachfolger von 94/9/EG (ATEX 95) / ExVO):
 - befasst sich mit Beschaffenheitsanforderungen;
 - Aufgaben: Baumusterprüfung, Gerätekategorien und Kennzeichnung, Qualitätssicherung, Fertigungskontrolle;
 - Dokumentation: CE-Konformitätserklärung;
 - Ist in Deutschland umgesetzt durch die *Explosionsschutzprodukteverordnung (11. ProdSV)*.
- **1999/92/EG (ATEX 137)**:
 - befasst sich mit Betriebsanforderungen;
 - Aufgaben: Gefährdungsbeurteilung, Zoneneinteilung, Konformitätsprüfung, Maßnahmen;
 - Dokumentation: Explosionsschutzdokument;
 - Ist in Deutschland umgesetzt durch die *Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)*.

Konkrete Regelungen erfolgen in *Technischen Regeln* und *Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften*. Hierzu zählen u. a.:

- Gefahrstoffverordnung (GefStoffV),
- TRbF „Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten“,
- TRGS 72x „Gefährliche explosionsfähige Gemische“,
- TRBS 1203 „Befähigte Personen“,
- TRBS 2154 „Explosionsschutzdokument“,
- BGR 104 „Explosionsschutzregeln“,
- BGR 132 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“.

Im Jahr 2016 wurde eine Normungsroadmap Energiespeicher (DIN e.V., DKE, DVGW, VDI e.V Hrsg., 2016) verabschiedet und sukzessive umgesetzt. Bestandteil diese Roadmap sind auch chemische Energiespeicher (Power to X) zu denen auch H₂-Untergrundspeicher gehören.

Der Betrachtungsbereich der chemischen Energiespeichertechnologien in der Normungsroadmap umfasst folgende Aspekte (DIN e.V., DKE, DVGW, VDI e.V Hrsg., 2016):

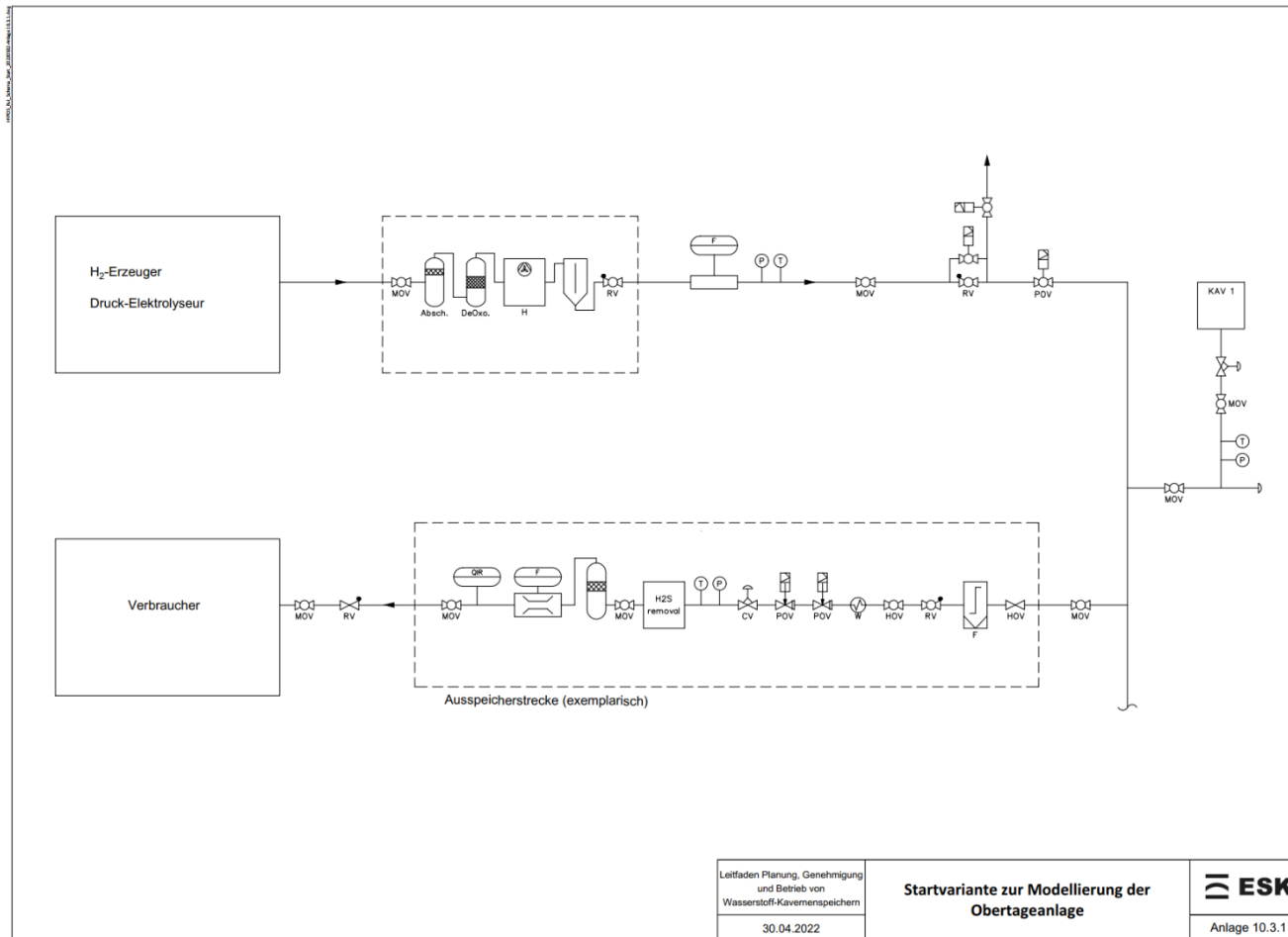
- die Netzanschlüsse (z. B. Pipelines, Stromnetze) der Power-to-X-Anlagen,
- den Gasnetzanschluss der Biogasanlagen,

- die Anlagentechnik zur Gaserzeugung (Transformation, Speicherung), zur Aufbereitung, zur Konditionierung und zur Einspeisung der erzeugten Produktgase Wasserstoff und Methan,
- die Weiterverarbeitung dieser Gase in flüssige Energieträger,
- die Speichermöglichkeiten von Gasen und Flüssigkeiten
 - im Gasnetz,
 - in Untertagegasspeicher,
 - in (Druck-)Behälter,
 - in chemische Speicher (wie z. B. Metallhydride),
 - in Tanks.

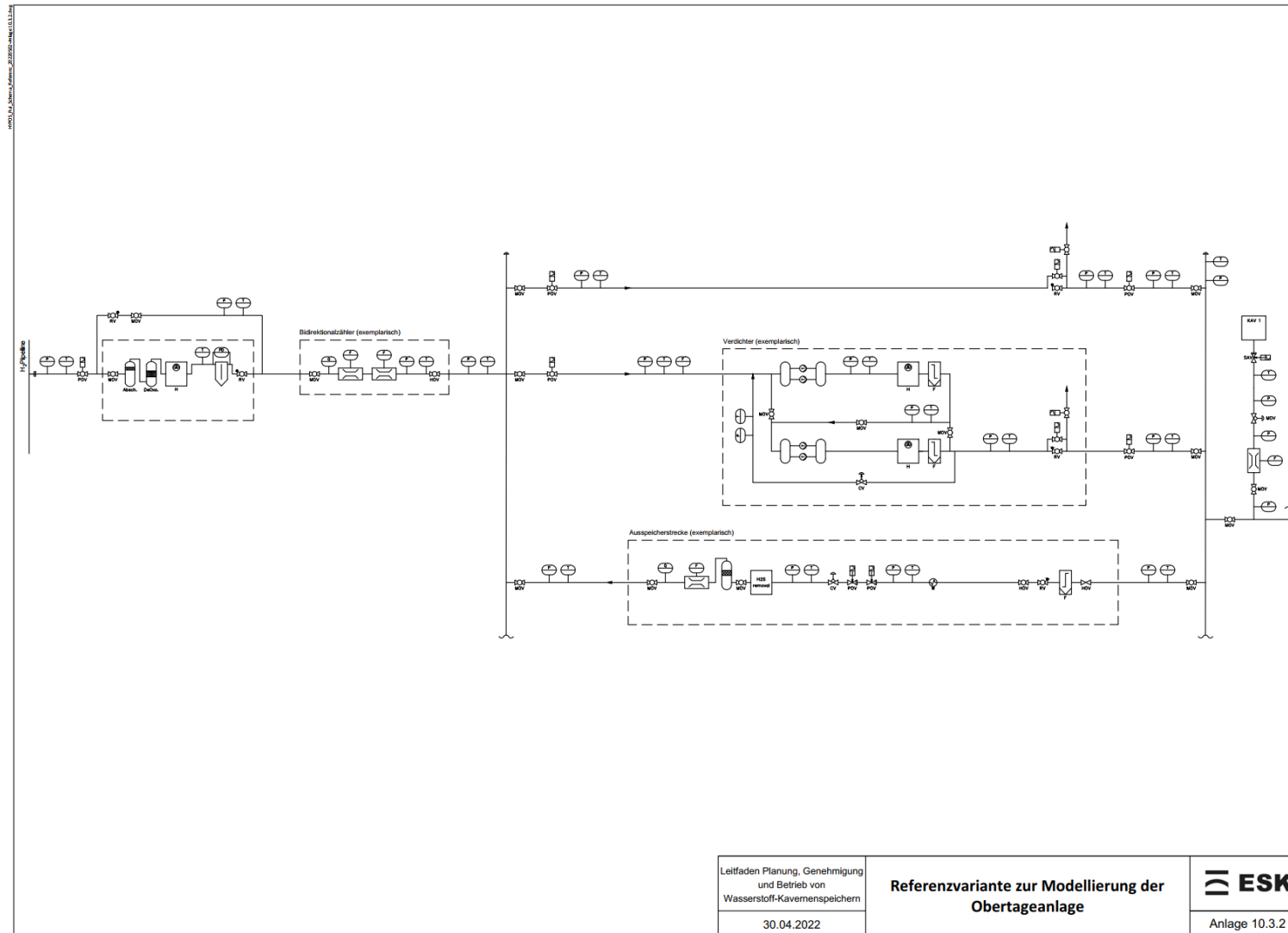
Die Roadmap enthält eine umfangreiche Auflistung relevanter Normen und Standards für *Chemische Energiespeicher* ((DIN e.V., DKE, DVGW, VDI e.V Hrsg., 2016) S.84 ff.).

10.3 Anlage 3: Varianten zur Modellierung der Obertageanlage

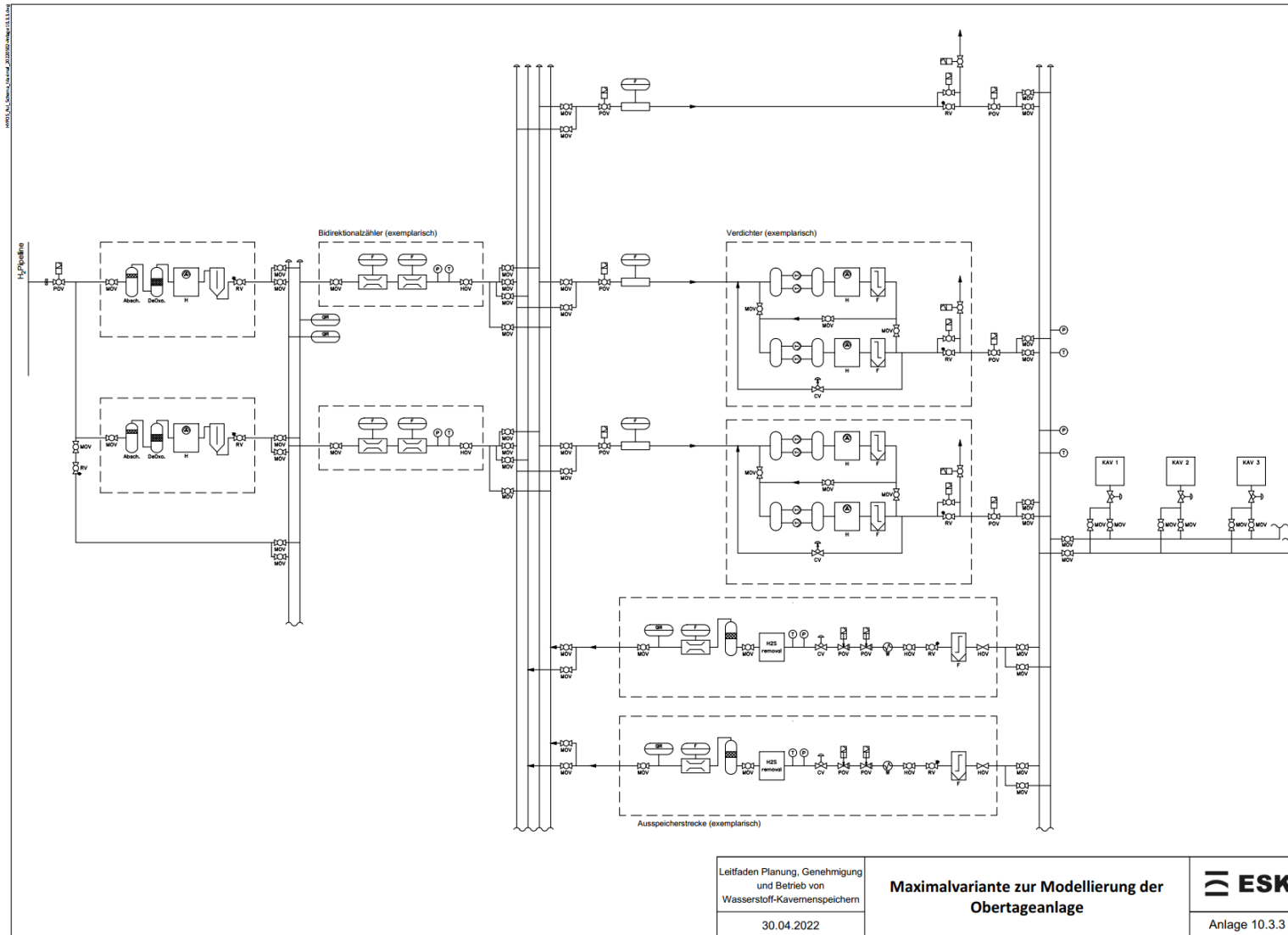
Startvariante



Referenzvariante



Maximalvariante



10.4 Anlage 4: Matrix Risikobewertung

HAZOP - Hypos-H2-UGS (Referenz-Variante)

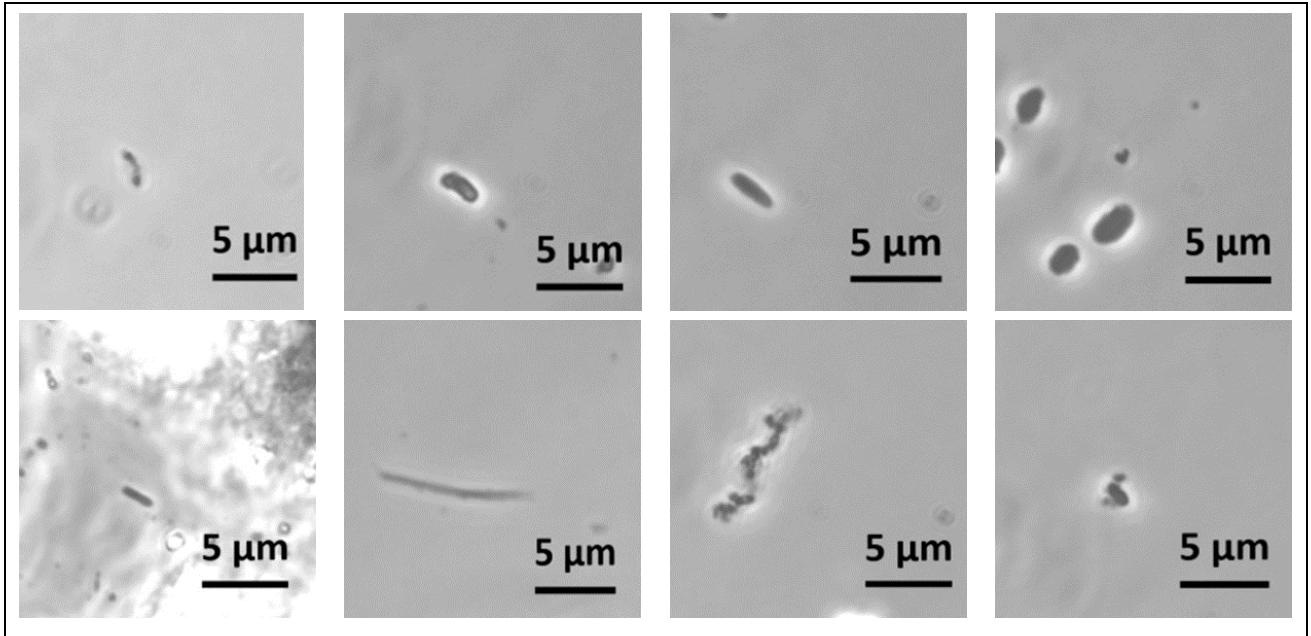
EingangsfILTER

1 Ifd. Nr.	2 Gefahrenpotenzial / Störung	3 Ursache der Störung	4 Auswirkung	5 Gegenmaßnahmen	10 Fragen	11 Bemerkungen
1.	Drucküberschreitung					
	Bei H2 höherer Druckgradient bei gleicher Wärmezufuhr	Wärmezufuhr bei geschlossenen Armaturen	Bauteilversagen, Gasaustritt, Ex-/Brandgefahr (Personenschaden)	Druckabsicherung/SBV		
		Überdruck Fernleitung	Bauteilversagen, Gasaustritt, Ex-/Brandgefahr (Personenschaden)	Fernleitung gegen Überdruck abgesichert		
2.	Druckunterschreitung					
		Unterdruck Fernleitung	Unterschreitung zulässiger Betriebsbereich	AMV durch Drucküberwachung		
		Fehlstellung Armaturen	Erzeugung von Unterdruck durch Verdichter	AMV durch Drucküberwachung		
		Niedrige Aussentemperaturen (Frost) bei geschlossenen Armaturen	Unterschreitung zulässiger Betriebsbereich	AMV durch Drucküberwachung/Druckausgleich		
		Verstopfter Filter/Abscheider	Niedriger Durchfluss/Druckabfall durch Verdichter	Differenzdrucküberwachung		
		Leitungsbruch/Undichtigkeiten	Austritt von Gas	Gaswarnanlage/Drucküberwachung		
3.	Temperaturüberschreitung					
		Sonneneinstrahlung	Druckerhöhung s.o.			Sonneneinstrahlung bei Auslegung berücksichtigt
4.	Temperaturunterschreitung					
		Unkontrollierte Entspannung	Bauteilversagen aufgrund Temperatur	Geeignete Materialauswahl, Temperaturauslegung		
		Außentemperatur (Klima)	Bauteilversagen aufgrund Temperatur	Geeignete Materialauswahl, Temperaturauslegung		
5.	Durchflussüberschreitung					
		Leitungsbruch	Bauteilversagen, Gasaustritt, Ex-/Brandgefahr (Personenschaden)	AMV durch Drucküberwachung		

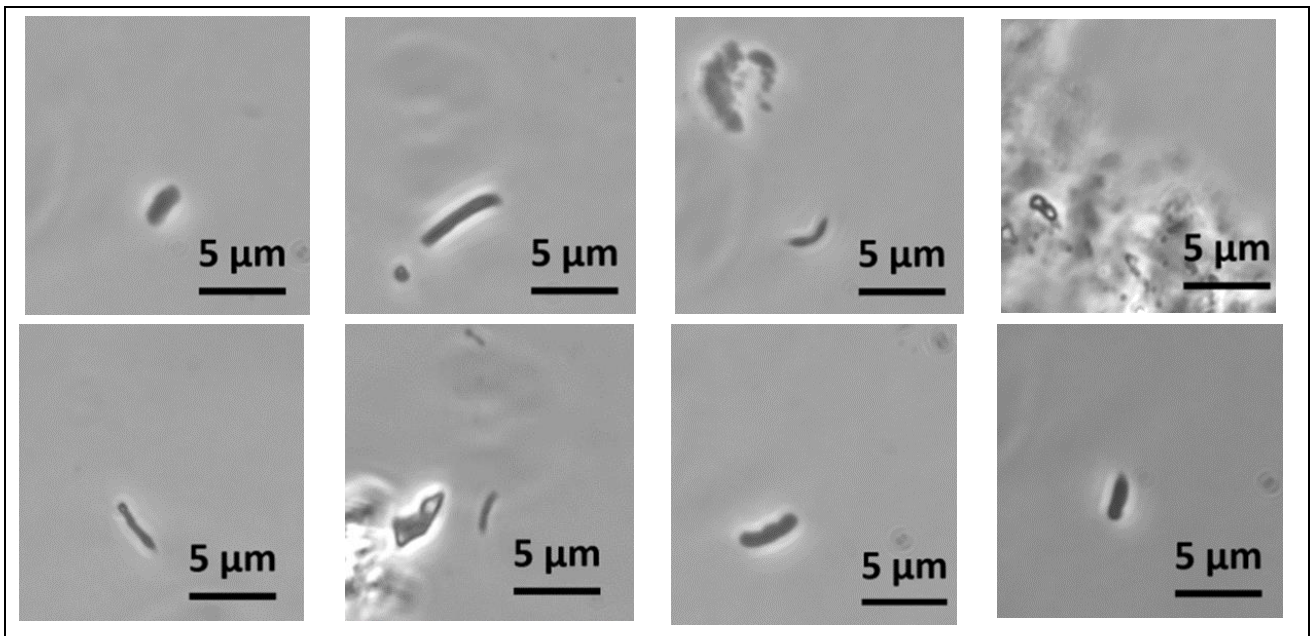
Ausschnitt aus „Matrix Risikobewertung“, hier: Beispiel EingangsfILTER

10.5 Anlage 5: Phasenkontrast-Mikroskopie der Kavernensolen aus Tiefenprobenahme

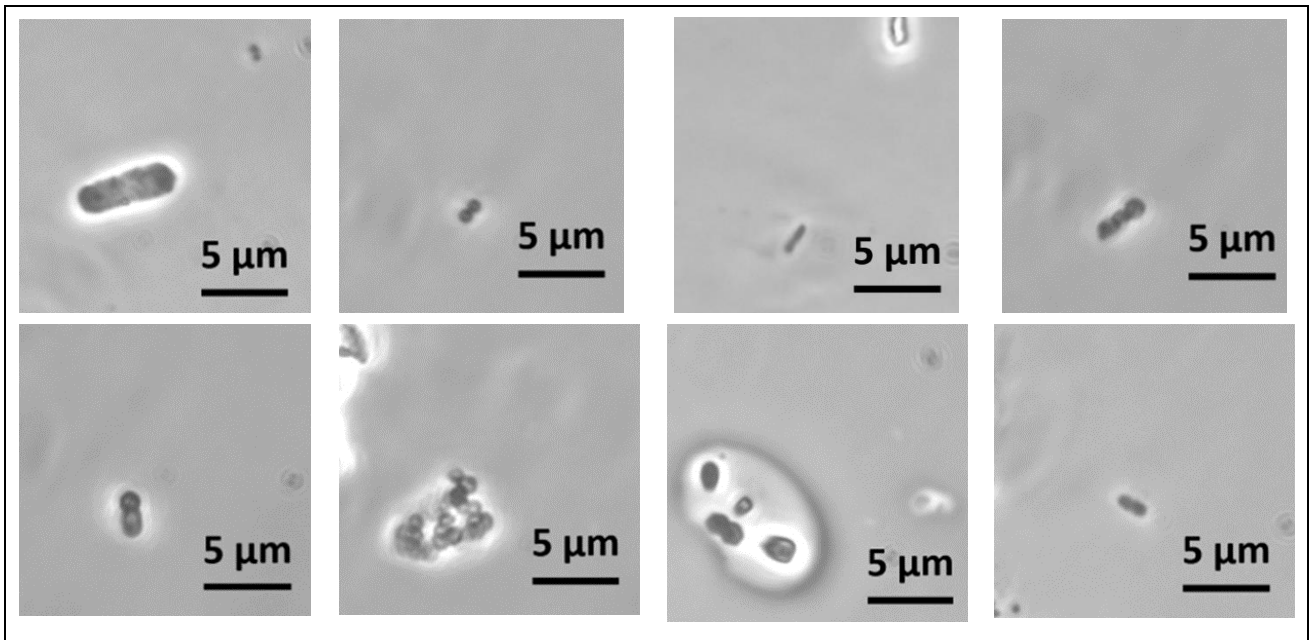
Die Originalproben wurden mikroskopisch mittels Phasenkontrast-Mikroskopie (Zeiss AxioScope A.1; Vergrößerung 1.600-fach) analysiert. In Abhängigkeit von der Kaverne wurde eine morphologisch vielfältige Besiedlung mit Stäbchen, Vibrionen und kokkoiden Zellformen nachgewiesen.



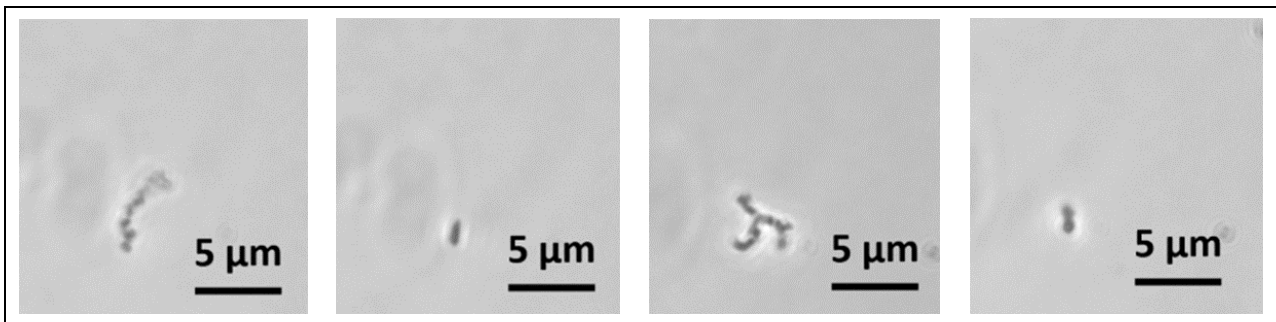
Mikroskopische Aufnahmen der Sole Kaverne F



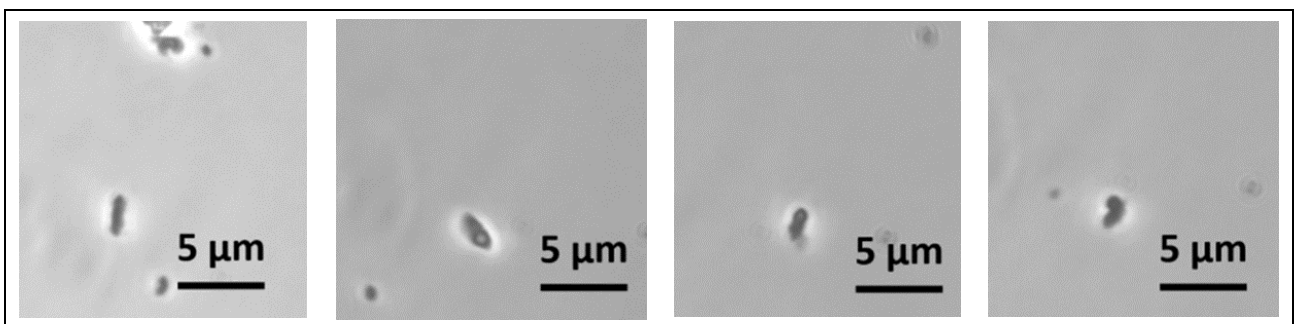
Mikroskopische Aufnahmen der Sole Kaverne H



Mikroskopische Aufnahmen der Sole Kaverne L



Mikroskopische Aufnahmen der Sole Kaverne M



Mikroskopische Aufnahmen der Sole Kaverne N

10.6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwurfskonzept für eine Typkaverne zur H ₂ -Speicherung (Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig)	21
Abbildung 2:	Mechanische Eigenschaften des Werkstoffes ermittelt in Kerbschlagbiegetests	39
Abbildung 3:	Längsschliff des Grundwerkstoffes, bainitisches Grundgefüge mit geringen Anteilen an Ferrit und Perlit	40
Abbildung 4:	Querschliff des Grundwerkstoffes	40
Abbildung 5:	HFI-Naht Übersicht und Detailbilder	41
Abbildung 6:	Wärmeeinflusszone der HFI-Naht.....	41
Abbildung 7:	Rundschweißnaht Übersichtsbild.....	42
Abbildung 8:	Rundschweißnaht Grobkornzone.....	43
Abbildung 9:	Rundschweißnaht Feinkornzone.....	43
Abbildung 10:	Rundschweißnaht Übergangzone	43
Abbildung 11:	Härtemessungen an der Rundschweißnaht	44
Abbildung 12:	Lage der Kerbschlagbiegeproben in der Rundschweißnaht	45
Abbildung 13:	Ergebnisse der Kerbschlagbiegetests an der Rundschweißnaht	45
Abbildung 14:	HIC-Prüfgefäß mit Proben	46
Abbildung 15:	SSC-Prüfgefäß mit vorgespannten Vierpunktbiegeproben.....	46
Abbildung 16:	Schematische Darstellung der Kavernenverrohrung (Darstellung: UGS GmbH) ..	50
Abbildung 17:	Darstellung eines Miniatur-Autoklaven in Form eines Rohrs zur Beladung von kleinen Stahlproben mit Druckwasserstoff	50
Abbildung 18:	Entnahmestellen der Proben aus der Schweißnaht in Rot	51
Abbildung 19:	Elektrochemische Permeations-Doppelzelle mit Gegen- und Referenzelektroden (links), elektrisch kontaktierte Probe zwischen zwei Elektrolytbehältern zur elektrochemischen Permeationsmessung (rechts).....	52
Abbildung 20:	Zu verschweißende Proberohre (links), aufgepunktete Thermoelemente an den Schweißnahtkanten vor dem Schweißen (rechts)	53
Abbildung 21:	An Stativ montiertes Röntgendiffraktometer.....	54
Abbildung 22:	Im Bereich der Wärmeeinflusszone angebrachte Bohrspindel und Dehnmessstreifen (links), Messung von Eigenspannungen an der Innenseite des Rohrs (rechts)	54
Abbildung 23:	1.000 bar Autoklav zur mechanischen Probenbelastung in Wasserstoffatmosphäre.....	55

Abbildung 24:	Probekörper mit erodiertem Kerb in Grundwerkstoff (links), schematische Darstellung der Kerbeinbringung in Wurzellage und Wärmeeinflusszone (WEZ) (rechts).....	56
Abbildung 25:	Skizze einer typischen Hohlprobe.....	56
Abbildung 26:	Querschliff der Schweißnaht (links) im Vergleich mit der Modellierung (rechts) ...	57
Abbildung 27:	Ultraschallauswertung der HIC-Tests am Grundwerkstoff.....	58
Abbildung 28:	Blistering an Probe 714-1 (Grundwerkstoff).....	58
Abbildung 29:	Ultraschallauswertung der HIC-Tests an der Rundschweißnaht.....	59
Abbildung 30:	Blistering an Probe ZR2-1 (Rundschweißnaht).....	59
Abbildung 31:	Blistering an Probe ZR2-3 (Rundschweißnaht).....	59
Abbildung 32:	SSC-Testprotokoll für Grundwerkstoff und HFI-Naht.....	60
Abbildung 33:	SSC-Testprotokoll für Rundnaht.....	61
Abbildung 34:	Kerbschlagenergien gemessen am Grundwerkstoff im Vergleich mit und ohne Wasserstoffvorbeladung.....	62
Abbildung 35:	Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests gemessen am Grundwerkstoff	64
Abbildung 36:	Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests gemessen an der HFI-Naht.....	64
Abbildung 37:	Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests gemessen an der Rundnaht.....	64
Abbildung 38:	Spannungs-Dehnungs-Kurve der SSRT-Tests am Grundwerkstoff des X52 Sauer gaswerkstoffs.....	65
Abbildung 39:	Relative Duktilitätskennwerte und Verhältnis der Zugfestigkeiten gemessen in Wasserstoff gegenüber inertem Medium (Stickstoff), E_pR : relative Bruchdehnung, RAR: relative Brucheinschnürung, $TS/TS(H_2)$: Verhältnis der Zugfestigkeiten.....	65
Abbildung 40:	Relative Duktilitätskennwerte und Verhältnis der Zugfestigkeiten gemessen in Wasserstoff-Schwefelwasserstoff-Gasgemisch mit Testlösung gegenüber inertem Medium (Stickstoff), E_pR : relative Bruchdehnung, RAR: relative Brucheinschnürung, $TS/TS(H_2)$: Verhältnis der Zugfestigkeiten.....	66
Abbildung 41:	Gemessene Wasserstoffgehalte im Grundwerkstoff, der Wurzellage und der Fülllage nach Wasserstoffbeladung bei unterschiedlichen Temperaturen und Partialdrücken.....	70
Abbildung 42:	Gemessene Desorptionspeaks bei Variation der Aufheizrate.....	71
Abbildung 43:	Gemessener Temperatur-Zeit-Verlauf für einen Durchgang der Wärmequelle.....	72
Abbildung 44:	Temperatur-Zeit-Verläufe beim Schweißen der Wurzelnaht.....	72
Abbildung 45:	Temperatur-Zeit-Verläufe beim Schweißen der letzten Decklage.....	73
Abbildung 46:	An zwei Positionen entnommene Querschliffe der Schweißnaht.....	73

Abbildung 47:	Metallische Einschlüsse (links) und vereinzelte Eisenkarbide (rechts) im Grundwerkstoff	74
Abbildung 48:	Einzelne Titankarbonitride (links) und gestreckte Körner durch den Walzprozess (rechts)	74
Abbildung 49:	Härteverläufe an Wurzel- und Fülllage an den zwei entnommenen Positionen der Probeschweißung	75
Abbildung 50:	Gemessene Eigenspannungsverläufe im ersten Millimeter des Rohrs für Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone mittels XRD-Verfahren an der Oberfläche und Bohrlochmethode in der Tiefe	76
Abbildung 51:	Hauptspannungen im ersten Millimeter der Rohraußenseite	76
Abbildung 52:	Hauptspannungen im ersten Millimeter der Rohrrinnenseite	77
Abbildung 53:	Gemessene Bearbeitungsspannungen durch mechanische Bearbeitung während des Schweißens	78
Abbildung 54:	Mittels Hohlprobentechnik ermittelte Unterschiede im Spannungs-Dehnungsdiagramm am untersuchten Stahl (Luft/100 bar Wasserstoff) (eigene Veröffentlichung in (Michler, et al., 2021))	78
Abbildung 55:	Bruchflächen des untersuchten Stahls: a) an Luft, b) bei 100 bar Wasserstoff; eigene Veröffentlichung in (Michler, et al., 2021)	79
Abbildung 56:	Bei 200 bar getestete Single Edge Notched Bending- (SENB-)Probe	79
Abbildung 57:	Berechnete Wärmeverteilung in einem Rohrabschnitt beim Schweißen der Wurzellage (links), Vergleich von Thermoelementmessung mit Simulation (rechts)	80
Abbildung 58:	Ausdehnung der Wärmeeinflusszone beim Schweißen (links) im Vergleich mit dem Querschliff der realen Naht (rechts)	81
Abbildung 59:	Hydrostatische Spannungen nach dem Schweißen (links) und berechnete plastische Vergleichsdehnungen nach dem Schweißen (rechts)	82
Abbildung 60:	Wasserstoffverteilung zu Beginn einer Wasserstoffeinspeicherung (links) und spannungsbeeinflusste Wasserstoffverteilung 1 Stunde nach Beginn der Wasserstoffeinspeicherung (rechts)	83
Abbildung 61:	Typkaverne zur Wasserstoffspeicherung in einer Teufe zwischen 880 und 1.100 m. Die Typkaverne dient als Grundlage für die Errichtung und das Betreiben einer Wasserstoffkaverne.	92
Abbildung 62:	Schematische Darstellung der Zwei-Kammer-Anlage (links); typischer Messverlauf (rechts)	94
Abbildung 63:	Permeabilität in Abhängigkeit des Effektivdrucks	98

Abbildung 64:	Übersichtsbild des Versuchsstandortes im Bereich des unteren Kaliabbaus und des im Hangenden befindlichen Werra-Steinsalzes mit den in die Firste gestoßenen Bohrungen	99
Abbildung 65:	Spannungsprofile der minimalen Hauptspannung aus hydraulischen Aufreißversuchen im Mittleren Werra-Steinsalz im Bereich der gestoßenen Versuchsbohrungen.....	101
Abbildung 66:	Versuchsdruckkurven der beiden Bohrungen B2 und B4 über die Zeit.	102
Abbildung 67:	Ortungsergebnisse der AE-Messung während der Druckerhöhung – 4. Druckstufe – in Bohrung B2 (linkes Bild); Ereignisse sind lediglich am Übergang des offenen Hohlraums zur Bohrlochzementation zu erkennen. Der Gasdurchschlag über den Kontakt Zement/Salz und die Wegsamkeit in eine firstnahe horizontale Schichtung nach Überfahren des Druckes sind rechts dargestellt. Ereignisse an der Bohrung B4 treten lediglich an der Bohrlochkontur auf. Ein Abströmen des Wasserstoffs in der Bohrung B4 ist nicht zu erkennen.	103
Abbildung 68:	Permeabilitätsanstieg des Salzgesteins im hydromechanisch gekoppelten Laborversuch (blau) und das daraus abgeleitete In-situ-Verhalten (rot).....	105
Abbildung 69:	Eindimensionaler Perkolationstest. Druckgetriebenes Fortschreiten der Perkulationsfront wenn der Gasdruck größer ist als die minimale Hauptspannung.	106
Abbildung 70:	Darstellung der Viertelraummodelle der Bohrung B2 und B4	107
Abbildung 71:	Lage der Profilspur als Anpassungsgrundlage für den Vergleich mit der in situ gemessenen Minimalspannung (links) und Ergebnis des Vergleiches nach Anpassung (rechts).....	107
Abbildung 72:	In situ und modellierter Druckverlauf im Bohrloch B2 (links) sowie Gasausbreitung in Beton und Bohrlochkontur (rechts, rote Bereiche) nach 250 Tagen	108
Abbildung 73:	In situ und modellierter Druckverlauf im Bohrloch B4 (unten) sowie Gasausbreitung in Bohrlochkontur (rote Bereiche) für die Druckstufen 5,1 und 9,5 MPa.	109
Abbildung 74:	Erstellung eines Kavernenmodells: a) Kavernenkontur im Steinsalzhorizont, b) und c) Zerlegung des Modells in Blöcke, d) Vernetzung im Bereich der Kavernenkontur	113
Abbildung 75:	Schematische Darstellung der simulierten jährlichen Wasserstoffdruckregime. Der abgebildete volle Gasumschlag für Variante A (rot) und Variante B (blau) wurde in beiden Fällen mit einer Einspeicherrate von 10.000 m ³ /h i. N. gerechnet. Die maximale Standzeit bei minimalen Betriebspeicherdruck beträgt bei beiden Varianten 30 Tage.....	114

Abbildung 76:	Gasdruckverteilung nach 30 Zyklen bei einem Maximaldruck von 140 bar (links) und bei einem Maximaldruck von 174 bar (rechts). Für beide Fälle sind eine halbtransparente Vertikalansicht und ein horizontaler Querschnitt in einer Tiefe von 950 m abgebildet.	116
Abbildung 77:	Stratigraphische Schichtung und Modellgeometrie im kontinuumsmechanischen 3D-Modell	117
Abbildung 78:	Bewertung des maximalen Speicherbetriebsdruckes. Minimalspannungskriterium zur Bewertung der geologischen Dichtheit (links) und horizontale Einspannung zur Bewertung der technischen Dichtheit (rechts)	119
Abbildung 79:	Bewertung des minimalen Speicherbetriebsdruckes. Ausnutzung der Dilatanzgrenze zur Bewertung der Standsicherheit.	119
Abbildung 80:	Vergleich der Kriechraten von Salzgestein in Abhängigkeit der Deviatorspannung zwischen dem BGRa- und PLLC-Materialmodell und realen Messdaten (abgewandelt von (Bérest, et al., 2019)).....	121
Abbildung 81:	Beispiel für Kavernendruckverlauf während des Entstehungsprozesses.....	122
Abbildung 82:	Exemplarischer Vergleich der Kavernenkonvergenz bei statischem Druck zwischen BGRa- und PLLC-Modell.....	123
Abbildung 83:	Exemplarischer Vergleich der Horizontalverschiebung an der Kavernenkontur (x = 40m) und in 1 km Entfernung zwischen BGRa- und PLLC-Modell	123
Abbildung 84:	Exemplarische Kavernenkonvergenz bei verschiedenen Minimal- und Maximaldrücken, Zyklen pro Jahr und Verweildauer bei Minimaldruck	124
Abbildung 85:	Exemplarische Absenkung über der Kaverne bei verschiedenen Minimal- und Maximaldrücken, Zyklen pro Jahr und Verweildauer bei Minimaldruck	125
Abbildung 86:	Exemplarische Darstellung der in die Kavernenwand infiltrierten Fluidmasse in Prozent einer Kavernenfüllung bei Maximaldruck, für drei verschiedene Permeabilitätsmodelle	126
Abbildung 87:	Exemplarische Darstellung der mittleren Permeabilität über den Abstand zur Kavernenwand zu verschiedenen Zeitpunkten eines Be- und Entladezyklus einer Kaverne	127
Abbildung 88:	Exemplarische Darstellung der mittleren Permeabilität in zwei Metern Abstand zur Kavernenwand über den Kavernendruck während der zyklischen Be- und Entladung einer Kaverne	128
Abbildung 89:	Exemplarische Darstellung der Ausdehnung der Dilatanzzone (Min. und Max. pro Zyklus) bei y = -1.000 m	129
Abbildung 90:	Ausschnitt des Kavernenmodells mit exemplarischer Darstellung der Dilatanzzone und des Fluiddrucks nach einem halben Jahr zu vier Zeitpunkten während eines Zyklus (v.l.n.r.): (1) vor Entnahme, (2) nach Entnahme, (3) vor Auffüllen, (4) nach Auffüllen.....	130

Abbildung 91:	Übersicht Bohrplatz Kaverne C, Bohrlochkopf (links), Entnahmestellen Sole (rechts)	138
Abbildung 92:	Tiefenprobenahme: a) Probenbehälter (Firma SOCON), b) Trägermodul mit eingesetzten Probenbehältern, c) Einbringung der Probenahmebehälter	139
Abbildung 93:	Kernprobe Kaverne B	145
Abbildung 94:	Labormikrokosmos Niederdruckkavernenmodell	146
Abbildung 95:	Hochdruckreaktoren BR-500	147
Abbildung 96:	Wasserstoffverbrauch im Kulturansatz mit Sole Kaverne L unter H ₂ -CO ₂ -Atmosphäre	153
Abbildung 97:	Labormikrokosmen der Kaverne H unter Wasserstoff mit Kohlendioxid, Acetat, Laktat, Trimethylamin (links v.l.n.r.) und Kaverne L unter Wasserstoff/Kohlendioxid sowie mit Acetat und Laktat (rechts v.l.n.r.).....	154
Abbildung 98:	Zellformen Kaverne HCF	156
Abbildung 99:	Gasverbrauch Probe HCF in Abhängigkeit vom Salzgehalt	156
Abbildung 100:	Gasverbrauch mit Probe HCF bei 300 g/l NaCl im SRP-Mineralmedium	157
Abbildung 101:	Zusammensetzungen der mikrobiellen Gemeinschaften der fünf beprobten Salzkavernen basierend auf Amplikon-Sequenzierung der 16S-V4-Region; gezeigt sind Familien mit einer relativen Häufigkeit > 3 %. DNA-Extraktion, Amplifikation und Sequenzierung wurden in Duplikaten durchgeführt. Die Read-Zählung für H.1 war signifikant niedriger als bei allen anderen Proben. Im Gegensatz zu konsistent ausfallenden Doppelproben der Kavernen F, L, M und N unterschieden sich die Sequenzierungsergebnisse der Replikate von H voneinander: Probe H.1 wurde von Firmicutes und Bacteroidota dominiert, während die andere Wiederholung (H.2) von Moraxellaceae dominiert wurde. Türkistöne: Phylum Halobacterota; gelb: Stamm Halanaerobiaeota; Flieder: Desulfobacterota; rot: Firmicutes; blau: Bacteroidota; orange: Actinobacteriota; grün: Proteobakterien; grau: ASV mit < 2 % relativer Häufigkeit (aus: (Schwab et al., 2022)).	158
Abbildung 102:	Korrelation von mikrobieller Gemeinschaft und hydrochemischer Zusammensetzung in den Kavernensumpfproben (jeweils Doppelbestimmungen). Die Ergebnisse zeigen an, dass die mikrobiellen Gemeinschaften der Kavernen unterschiedlich zusammengesetzt sind (aus: (Schwab et al., 2022))......	159
Abbildung 103:	Maximum-Likelihood-Baumdarstellung der mikrobiellen Kerngemeinschaft der Kavernensumpfproben. Die Farben repräsentieren die Herkunft der jeweiligen Organismen: ■ F, ■ H, ■ L, ■ M, ■ N. Die Symbole repräsentieren Phyla, von oben nach unten: Desulfobacterota, Bacteroidota, Proteobacteria, Halanaerobiaeota, Halobacterota.	160

Abbildung 104:	Parameter der Flüssigphase, H ₂ /CO ₂ = rot, H ₂ /CO ₂ /Acetat = grün, H ₂ /CO ₂ /Laktat = lila, H ₂ /CO ₂ /Methanol = blau; Salzgehalt: links = 150 g/l, Mitte = 200 g/l, rechts = 260 g/l NaCl	163
Abbildung 105:	Parameter der Gasphase, H ₂ /CO ₂ = rot, H ₂ /CO ₂ /Acetat = grün, H ₂ /CO ₂ /Laktat = lila, H ₂ /CO ₂ /Methanol = blau; Salzgehalt: links = 150 g/l, Mitte = 200 g/l, rechts = 260 g/l NaCl	164
Abbildung 106:	Sulfatkonzentration Versuchsreihe 3 (links) und 4 (rechts)	166
Abbildung 107:	Kohlendioxidkonzentration in der Gasphase Versuchsreihe 3 (links) und 4 (rechts)	166
Abbildung 108:	Wasserstoffumsatz Versuchsreihe 3 (links) und 4 (rechts).....	167
Abbildung 109:	Chloratkonzentration in Versuchsreihen (VR) mit Sole der Kaverne M (links) und Kaverne C (rechts).....	168
Abbildung 110:	Versuchsreihen 3 (oben) und 4 (unten) mit Solen F, H, L, M, N, C (v.l.n.r.) nach 220 Tagen Inkubation	168
Abbildung 111:	Wasserstoffverbrauch (links) und gebildetes Sulfid (Sulfid in Sole = grün, Sulfid im Gas = blau) in Labormikrokosmen nach 220 Tagen	170
Abbildung 112:	Ergebnisse der nanoSIMS-Analysen der mikrobiellen Gemeinschaften der Solen aus den Kavernen L (links) und H (rechts). Auf der y-Achse ist der Einbau von ¹³ C-HCO ₃ dargestellt, auf der x-Achse der Einbau von Deuterium (jeweils in Atomprozent). Einzelne Symbole repräsentieren den Einbau in einzelne Zellen. Rote Symbole: Zellen inkubiert mit Wasserstoff, aber ohne Isotopentracer; orange Symbole: Zellen inkubiert mit Isotopentracern (¹³ CO ₃ ²⁻ , D ₂ O), aber ohne Wasserstoff; graue Symbole: Zellen inkubiert mit Wasserstoff und Isotopentracern (¹³ CO ₃ ²⁻ , D ₂ O). Insbesondere einzelne Zellen der Kaverne H zeigen bei Inkubation mit Wasserstoff und Isotopentracern einen Einbau von markiertem Kohlenstoff und Deuterium.	171
Abbildung 113:	Ähnlichkeitsanalyse der untersuchten Anreicherungskulturen mittels Hauptkomponentenanalyse nach Bray-Curtis. Die Mikroorganismengemeinschaften der Herkunft HCF und einiger angereicherter Gemeinschaften der Herkunft MK unterscheiden sich deutlich von den restlichen Gemeinschaften.	173
Abbildung 114:	Kladogramm der in den 27 Anreicherungskulturen identifizierten Phyla und Familien.....	174
Abbildung 115:	Heatmap der relativen Häufigkeit der 20 am häufigsten vorkommenden Gattungen, die in 27 verschiedenen halophilen mikrobiellen Anreicherungskulturen gefunden wurden (einschließlich doppelter Probenanalysen/-messungen), gruppiert nach dem Ursprung der Anreicherungskultur/des Inokulums. Anreicherungskulturen wurden in Medien mit einem Salzgehalt im Bereich von 150 bis 320 g/l NaCl und verschiedenen Kohlenstoffquellen (Kohlendioxid, Laktat, Acetat, Methanol) angezogen.	175

Abbildung 116:	Relative Häufigkeit von Gattungen in Anreicherungskulturen der Herkunft HCF. Kulturen wurden bei Salzgehalten im Bereich von 150 g/l bis 310 g/l NaCl angereichert. Alle Kulturen wurden auf Medien mit Kohlendioxid als einziger Kohlenstoffquelle und Wasserstoff als einzigem Elektronendonator angezogen. Zellzahlen und Wasserstoffverbräuche nehmen mit zunehmendem Salzgehalt ab (Daten nicht gezeigt).....	177
Abbildung 117 A, B: Relative Häufigkeit von Gattungen in Anreicherungskulturen der Herkunft MK. Die Kulturen wurden bei Salzgehalten zwischen 150 g/l und 260 g/l NaCl angereichert mit Wasserstoff als Elektronendonator und verschiedenen Kohlenstoffquellen (Kohlendioxid, Acetat, Laktat oder Methanol). Die Zellzahlen nahmen mit zunehmendem Salzgehalt ab (Daten nicht gezeigt). Methan wurde in Proben gemessen, die mit einem roten Punkt gekennzeichnet sind.....	178
Abbildung 118:	Änderungen der ² H-Isotopensignatur [in ‰] von Wasserstoff in Ansätzen mit <i>D. halophilus</i> in sulfat- und salzhaltigem Mineralmedium und inkubierten Eisenprüfkörpern. Die Änderungen der Signaturen von ca. -220 ‰ auf ca. -690 ‰ weisen die Verwertung von Wasserstoff durch <i>D. halophilus</i> nach.....	180
Abbildung 119:	Oberfläche des Eisenprüfkörpers nach Inkubation mit dem Modellorganismus <i>D. halophilus</i> und Beaufschlagung durch Wasserstoff, visualisiert durch heliumionenmikroskopische Aufnahmen (links: 10 µm-Maßstab; rechts: 1 µM-Maßstab). Durch mikrobiell gebildetes Sulfid (HS ⁻) und im Medium vorhandenem Bicarbonat entstehen Krusten aus Eisensulfid und Eisencarbonat auf der Oberfläche des Metalls. Daran angehaftet/eingebettet sind Zellen von <i>D. halophilus</i> (rechts).....	180
Abbildung 120:	Änderungen der ² H-Isotopensignatur [in ‰] von Wasserstoff in Ansätzen mit Kavernensole, Eisenprüfkörper und zugesetztem Wasserstoff. Die Änderungen der Signaturen von ca. -300 ‰ (Ausgangswert) auf ca. -380 ‰ bzw. -420 ‰ sind ein Indikator für die Verwertung von Wasserstoff durch Organismen der Kavernensole.	181
Abbildung 121:	Oberfläche des Eisenprüfkörpers nach Inkubation mit Wasserstoff und Kavernensole, visualisiert durch heliumionenmikroskopische Aufnahmen (links: Maßstab 10 µm; rechts: Maßstab 500 nm).	182
Abbildung 122:	Änderung der ² H-Isotopensignatur [in ‰] von Wasserstoff in Ansätzen mit sterilisierter Kavernensole und Eisenprüfkörper. Die unveränderte Signatur ist ein Indikator für die ausgebliebene mikrobielle Verwertung von Wasserstoff aufgrund der vorherigen Abtötung der Mikroorganismen.	182
Abbildung 123:	Druckdifferenz in Abhängigkeit vom pH mit 200 g/l und 300 g/l NaCl.....	185
Abbildung 124:	pH-Wert der Kavernensolen in Abhängigkeit vom zugesetzten Natriumhydroxid	186

Abbildung 125:	Gegenüberstellung der Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotopenverhältnissen der Solefluide ($\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - Werte) aus dem Kavernensumpf von fünf Bestandskavernen der Erdgasspeicherung. Mit eingezeichnet sind die mittleren $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - und $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte im Niederschlagswasser auf der globalen Niederschlagsgeraden (Global Meteoric Water Line, GMWL) und lokalen Niederschlagsgeraden (LMWL für die Stadion Artern).	187
Abbildung 126:	Schwefel- und Sauerstoff-Isotopenverhältnissen des gelösten Sulfates ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) in Erdgaskavernen und einer Kaverne in Solung. Charakteristischer Isotopenbereich für evaporitisches Sulfat wurde aus (Aravena and Mayer, 2009) entnommen.....	188
Abbildung 127:	Änderung der Wasserstoffkonzentration und -Isotopenverhältnisse (als $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2}$) in Anreicherungskulturen während einer Methanogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 150 g/l NaCl mit Wasserstoff und Methanol.....	190
Abbildung 128:	Änderung der Kohlendioxidkonzentration und -Isotopenverhältnisse (als $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) in Anreicherungskulturen während einer Methanogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 150 g/l NaCl mit Wasserstoff und Trimethylamin.....	191
Abbildung 129:	Änderung der Kohlendioxidkonzentration und -Isotopenverhältnisse (als $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) in Anreicherungskulturen während einer Acetogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 250 g/l NaCl unter Wasserstoff-Kohlendioxid-Atmosphäre. Nach 120-tägiger Inkubation wurde eine Sulfidbildung verzeichnet, was auf die Aktivität von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zurückzuführen ist.	192
Abbildung 130:	Änderung der Methankonzentration und Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse (als $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) in Anreicherungskulturen während einer Methanogenese. Die Kultivierung der Anreicherungskulturen erfolgte bei 150 g/l NaCl mit Wasserstoff und Trimethylamin.....	193
Abbildung 131:	Potenzielle mikrobielle Wasserstoff-Umsetzungsprozesse und Folgereaktionen in Salzkavernen.....	194
Abbildung 132:	Konzept zur Überwachung mikrobieller Prozesse während der Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen	200
Abbildung 133:	GC-Fingerprint-Analyse eines eingesetzten Blankets (schwarz) und einem Standard (magenta) bis zu einer Kohlenstoffanzahl von C40.....	215
Abbildung 134:	Versuchsaufbau zur Messung von Gaslöslichkeiten	216
Abbildung 135:	Löslichkeit von Methan in Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken (Mao, et al., 2011), (Liège, 2006), (Wang, 2003)	217
Abbildung 136:	Löslichkeit von Methan in NaCl-Lösungen bei 50 °C in Abhängigkeit vom Druck und verschiedenen NaCl-Konzentrationen (O'Sullivan & Smith, 1970)	217

Abbildung 137:	Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken; eigene Messungen und Literaturdaten (Gordon, et al., 1977), (Crozier & Yamamoto, 1974)	218
Abbildung 138:	Einfluss der Temperatur auf die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser bei verschiedenen Drücken (Chabab, et al., 2020)	219
Abbildung 139:	Einfluss des Drucks auf die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser bei verschiedenen Temperaturen (Chabab, et al., 2020)	219
Abbildung 140:	Löslichkeit von Wasserstoff in NaCl-Lösungen bei 50 °C in Abhängigkeit vom Druck und verschiedenen NaCl-Konzentrationen (Chabab, et al., 2020)	220
Abbildung 141:	Löslichkeit von Wasserstoff in NaCl-Lösungen bei 100 °C in Abhängigkeit vom Druck und verschiedenen NaCl-Konzentrationen (Chabab, et al., 2020)	221
Abbildung 142:	Schematischer Aufbau des Versuchstandes zur Messung von Wassergehalten und Taupunkten	222
Abbildung 143:	Experimentell bestimmte Wassergehalte von Wasserstoff in Abhängigkeit der vorgegebenen Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken.....	222
Abbildung 144:	Experimentell bestimmte Wassergehalte von Methan in Abhängigkeit der vorgegebenen Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken.....	223
Abbildung 145:	Experimentell bestimmte Wassergehalte von Methan und Wasserstoff bei Drücken von 40 und 80 bar im Vergleich	223
Abbildung 146:	Vergleich der experimentell bestimmten Wassergehalte von Wasserstoff mit den berechneten Werten in Abhängigkeit der vorgegebenen Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken	226
Abbildung 147:	Berechneter Wassergehalt von Wasserstoff in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen Drücken im relevanten Speicherbereich (rot)	227
Abbildung 148:	Berechneter Wassergehalt von Wasserstoff in Abhängigkeit des Drucks bei verschiedenen Temperaturen im betrachteten relevanten Speicherbereich (rot).....	227
Abbildung 149:	Berechneter Taupunkt von Wasserstoff in Abhängigkeit des Drucks bei verschiedenen Wassergehalten.....	228
Abbildung 150:	Vergleich der berechneten Wassergehalte von Methan, Wasserstoff und einem Gemisch von 50 Mol-% Wasserstoff und 50 Mol-% Methan in Abhängigkeit des Taupunktes.....	229
Abbildung 151:	Gesamtmodell	230
Abbildung 152:	Darstellung Bohrung und Übergang zur Kaverne.....	230
Abbildung 153:	Randbedingungen des Simulationsmodells	232
Abbildung 154:	Vernetzung im Bereich Kaverne und Gebirge	234

Abbildung 155:	Vernetzung im Bereich Bohrung, Kaverne und Gebirge.....	235
Abbildung 156:	Verfügbare Strömungsmodule innerhalb von COMSOL.....	236
Abbildung 157:	Strömungsbereich an einer Wand (Frei, 2017)	237
Abbildung 158:	Reales Strömungsfeld und berechnetes Strömungsfeld mittels Wandfunktion (Frei, 2017).....	237
Abbildung 159:	Beispiel für die Kopplung des Strömungs- und des Wärmetransport Moduls (Carasi, 2016).....	245
Abbildung 160:	Variante 1 – Verteilung des Volumenanteils nach der Injektion bei einem Druck von 140 bar	248
Abbildung 161:	Variante 1 – Übergangs- bzw. Vermischungszone beim maximalen Arbeitsdruck von 140 bar	248
Abbildung 162:	Variante 2 – Entwicklung der Strömung beim Eintritt von Wasserstoff in die Kaverne bei einer Einstömgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Druck von 34 bar	249
Abbildung 163:	Variante 2 – Strömungsverhältnisse und Verhalten der Übergangszone bei der Injektion von Wasserstoff und einer Einstömgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Druck von 34 bar.....	249
Abbildung 164:	Variante 2 – Strömungsverhältnisse und Verhalten der Übergangszone beim Erreichen des maximalen Arbeitsdrucks von 140 bar und einer Einstömgeschwindigkeit von 20 m/s	249
Abbildung 165:	Variante 8 – Vermischungszone als Log-Diagramm	250
Abbildung 166:	Variante 8 – Darstellung des Wasserstoffgehaltes oberhalb der Vermischungszone im Detail	251
Abbildung 167:	Variante 8 – Ergebnis der analytischen Berechnung (1 Jahr)	253
Abbildung 168:	Variante 8 – Vergleich der analytischen Lösung nach einem Jahr zur numerischen Simulation (7 Tage)	253
Abbildung 169:	Variante 9 – Reinheit des ausgespeicherten Wasserstoffs bei der Ausspeicherung vom maximalen zum minimalen Arbeitsdruck.....	254
Abbildung 170:	Variante 9 – Volumenanteil an Wasserstoff im verbleibenden Kissengas bei Erreichen des minimalen Arbeitsdrucks nach dem erstmaligen Ausspeichern von Wasserstoff.....	255
Abbildung 171:	Druckbelastung Tubing.....	258
Abbildung 172:	Standard-Bohrlochkopf	296
Abbildung 173:	Kugelhahn mit Double-Pisten Design in Blockfertigung	297
Abbildung 174:	Variante 1 – Einfachpackerkomplettierung mit Zwei-Barrieren-System.....	300
Abbildung 175:	Variante 2 – Linerkomplettierung mit Zwei-Barrieren-System	300

Abbildung 176:	Variante 3 – Doppelpackerkomplettierung mit Zwei-Barrieren-System.....	302
Abbildung 177:	Variante 4 – Sonderlösung einfache lösbare Verbindung mit Zwei-Barrieren-System	302
Abbildung 178:	Variante 5 – Sonderlösung doppelte lösbare Verbindung mit Zwei-Barrieren-System	304
Abbildung 179:	Verbundproben Futterrohr/Zementstein	306
Abbildung 180:	Permeabilität der Verbundproben in Abhängigkeit des Effektivdrucks	307
Abbildung 181:	Vergleich der Durchlässigkeit Verbundproben – Vollzylinder-Proben.....	308
Abbildung 182:	Einfluss des Innendrucks auf die Permeabilität.....	309
Abbildung 183:	Forschungskaverne B, Vertikalschnitt 330°–150°, Sonarvermessung 05.02.2016	314
Abbildung 184:	Exemplarische Entwicklung der Betriebsparameter bei diskontinuierlicher Befüllung der Forschungskaverne B, Soleaustrag 30 m ³ /h, Gasrate 10.000 m ³ /h i. N.....	316
Abbildung 185:	Exemplarische Entwicklung der Betriebsparameter bei diskontinuierlicher Befüllung einer Typkaverne, Startvariante: Soleaustrag 60 m ³ /h (mit Pausen), Gasrate 2.000–5.000 m ³ /h i. N.....	318
Abbildung 186:	Exemplarische Entwicklung der Betriebsparameter bei diskontinuierlicher Befüllung einer Typkaverne, Referenzvariante: Soleaustrag 120 m ³ /h, Gasrate 20.000 m ³ /h i. N.....	319
Abbildung 187:	Übersicht der laut Quellen ausgewiesenen Wasserstoff-Marktvolumina oder entsprechender Vergleichsgrößen (sofern das Marktvolumen nicht explizit beifiziert wurde aber entsprechende Rückschlüsse möglich sind, z. B. wurde bei Nutzung von Wasserstoff als Zwischenprodukt die angegebene Vergleichsgröße in Wasserstoffäquivalente umgerechnet).	329
Abbildung 188:	Übersicht der ausgewiesenen Überschussleistungen im deutschen Stromnetz bzw. der installierten Elektrolyseleistung.....	330
Abbildung 189:	Übersicht der ausgewiesenen Gesamtspeicherbedarfe in 2050	332
Abbildung 190:	Gesamtspeicherbedarf für Wasserstoff nach Stakeholderbefragung	336
Abbildung 191:	Dauer der Speicherperiode nach Stakeholderbefragung	337
Abbildung 192:	Speicherganglinien der Startvariante (links, Wochenzyklus) und der Referenz- und Maximalvariante (rechts, saisonaler Speicherzyklus).....	342
Abbildung 193:	KavPool – Prozessübersicht (Darstellung: ESK GmbH).....	344
Abbildung 194:	KavPool – Programmfunktionen (Darstellung: ESK GmbH)	345
Abbildung 195:	Startvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Rate	351
Abbildung 196:	Startvariante – Verlauf der Kavernentemperatur.....	352

Abbildung 197:	Startvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Gastemperatur bei Einspeisung.....	353
Abbildung 198:	Startvariante – Kopftemperatur bei Ausspeisung in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension sowie Ratenbereich	354
Abbildung 199:	Startvariante – Kopfdruck in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension	355
Abbildung 200:	Referenzvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Rate .	357
Abbildung 201:	Referenzvariante – Verlauf der Kavernentemperatur	358
Abbildung 202:	Referenzvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Gastemperatur bei Einspeisung.....	358
Abbildung 203:	Referenzvariante – Verlauf von Rohrschuhdruck und Kavernentemperatur in Abhängigkeit von der Tubingdimension	359
Abbildung 204:	Referenzvariante – Verlauf von Rohrschuhdruck und Kavernentemperatur in Abhängigkeit vom Wärmeübertragungskoeffizient α	360
Abbildung 205:	Referenzvariante – Kopftemperatur bei Ausspeisung in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension	360
Abbildung 206:	Referenzvariante – Kopfdruck in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension	361
Abbildung 207:	Maximalvariante – Druckverlauf am Rohrschuh in Abhängigkeit von der Rate...	363
Abbildung 208:	Maximalvariante – Verlauf der Kavernentemperatur (Injektionstemperatur 10 °C)	364
Abbildung 209:	Maximalvariante – Verlauf der Kavernentemperatur (Injektionstemperatur 50 °C)	365
Abbildung 210:	Maximalvariante – Kopftemperatur bei Ausspeisung in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension	366
Abbildung 211:	Maximalvariante – Kopfdruck in Abhängigkeit von Wärmeübertragungskoeffizient, Injektionstemperatur und Tubingdimension	367
Abbildung 212:	Typische Einsatzbereiche verschiedener Verdichter-Bauarten (Lendt & Cerbe, 2016)	374
Abbildung 213:	Konfiguration der Gasreinigung	379
Abbildung 214:	Beispielhafte Visualisierung des gesamten Kreislaufs OTA (aus Simulationstool Epsilon)	381
Abbildung 215:	Startvariante – Einspeicherung.....	381
Abbildung 216:	Referenzvariante – Einspeicherung	382
Abbildung 217:	Referenzvariante – Ausspeicherung	382

Abbildung 218:	Vereinfachtes Blockfließbild für die Startvariante bei Einspeicherung	385
Abbildung 219:	Einspeicherung Startvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie	385
Abbildung 220:	Vereinfachtes Blockfließbild für die Referenz- und Maximalvariante bei Einspeicherung	386
Abbildung 221:	Einspeicherung Referenzvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie	386
Abbildung 222:	Einspeicherung Maximalvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie	386
Abbildung 223:	Vereinfachtes Blockfließbild für alle Varianten bei Ausspeicherung	387
Abbildung 224:	Ausspeicherung Startvariante – 1a, Verläufe Druck, Temperatur, Volumenstrom und Enthalpie	387
Abbildung 225:	Vergleich Startvariante 1a-1 / 1a-2 / 1b-1 / 1b-2 (Einspeicherung)	387
Abbildung 226:	Vergleich Referenzvariante 1a-1 / 1b-1 / 1c-1 mit 1a-7 / 1b-7 / 1c-7 (Einspeicherung)	388
Abbildung 227:	Vergleich Maximalvariante 1a-1 bis -8 / 1b-1 bis -8 / 1c-1 bis -8 (Einspeicherung)	389
Abbildung 228:	Vergleich Startvariante 1a- bzw. 1c-1 bis -8 und -13, -14 (Ausspeicherung)	390
Abbildung 229:	Vergleich Referenzvariante 1a- und 1b – 1 bis 7 und 14 (Ausspeicherung)	391
Abbildung 230:	Vergleich Maximalvariante 1a-, 1b- und 1c – 1 bis 6 (Ausspeicherung)	392
Abbildung 231:	Gefahrenmerkmale von Wasserstoff (Töpler & Lehmann, 2014)	395
Abbildung 232:	Einteilung von Verdichtern nach Funktionsprinzipien (eigene Darstellung nach (Eifler, et al., 2009b))	404
Abbildung 233:	Arbeitsbereiche von Turboverdichtern (RV Radialverdichter, vertikal geteiltes Gehäuse; RH Radialverdichter, horizontal geteiltes Gehäuse; RG Radialverdichter, integriertes Getriebe; A Axialverdichter (Druckverhältnis > 8:2 gehäusig); a) maximaler Betriebsdruck für RV und RH für Ansaugdruck 1 bar; b) maximaler Betriebsdruck für RG für Ansaugdruck 1 bar) (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R70)	406
Abbildung 234:	Einstufiger (links) und zweistufiger (rechts) Kolbenverdichter (Christiani, S. 1) ..	407
Abbildung 235:	Radialer Einwellenverdichter: 1 Saugstutzen, 2 Druckstutzen, 3 Radiallager, 4 Axiallager, 5 Labyrinthdichtung, 6 gasgeschmierte Gleitringdichtung, 7 Kupplung (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. R72)	408
Abbildung 236:	Einsatzbereich „B-Line-Premium“ (Burckhardt Compression AG, kein Datum) ..	412
Abbildung 237:	Schematische Darstellung der In-situ-Balance-Methode (SoMIT®-Verfahren) ...	451
Abbildung 238:	Darstellung der In-situ-Kompensationsmethode	452

Abbildung 239:	Schematische Darstellung des Funktionstestes.....	454
Abbildung 240:	Druckverläufe im Tubing und im Ringraum Tubing-Teststrang beim Dichtheitstest.....	461
Abbildung 241:	Entwicklung kumulierte Verlustrate unter Prüfdruck über den Testzeitraum.....	463
Abbildung 242:	Druckverlauf Steigraum Ringräume während des Funktionstests	465
Abbildung 243:	Visuelle Auswertung hydraulischer Drucktest	466
Abbildung 244:	Druckänderungsrate zur Auswertung hydraulischer Druckteste	467
Abbildung 245:	Auswahlmatrix zu den Qualitätsstufen; Product Specific Level (PSL)	469
Abbildung 246:	Schematisch Darstellung der Barrieren im Bohrloch.....	477
Abbildung 247:	Übersicht zu überwachender Kräfte und Drücke im Bereich der Bohrlochinstallation.....	483
Abbildung 248:	Übersicht Einbindungen verschiedener Rohrtouren in den Bohrlochkopf.....	484
Abbildung 249:	Bestandteile einer Rohrtourabdichtung im Bohrlochkopf.....	485
Abbildung 250:	Kräfteverlauf in Rohrtouren.....	486
Abbildung 251:	Exemplarische Bewertungsmatrix.....	491
Abbildung 252:	Lastfallanalyse Drucksituation Gasspeicherbohrung.....	502
Abbildung 253:	Lastsituation Übergang ART/Bodenflansch	504
Abbildung 254:	Keilabhängung einer Rohrtour	506
Abbildung 255:	Belastungshüllkurve (petrowiki.org)	508
Abbildung 256:	Tangentiale- und Radiale-Spannungssituation an der Kontur Rohr/Zement/Gebirge	509
Abbildung 257:	Geometrie des Verbundsystems Rohr/Zement/Gebirge sowie die Angriffskonturen für den Innen- bzw. Außendruck	511
Abbildung 258:	Beispielhafte Ergebnisdarstellung des SEW-Programms.....	515
Abbildung 259:	Wasserstoffverträglichkeit der Beispelporen- und Kavernenspeicher (ESK, DBI)	521
Abbildung 260:	Einstufung des Genehmigungsverfahrens eines Wasserstoff- Kavernenspeichers als Neuvorhaben	532
Abbildung 261:	Exemplarischer Zeitplan für den Genehmigungsprozess	539
Abbildung 262:	Zeitplan für die Errichtung eines Untergrundspeichers.....	548

10.7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Allgemeine Einflussfaktoren bei der Umwidmung von Kavernen zur Wasserstoffspeicherung	23
Tabelle 2:	Einflussfaktoren	24
Tabelle 3:	Allgemeine Auswirkungen der Einflussfaktoren bei der Umwidmung von Kavernen auf die Wasserstoffspeicherung.....	25
Tabelle 4:	Geologische Basisparameter.....	26
Tabelle 5:	Kenndaten Kaverne und gebirgsmechanische Parameter	27
Tabelle 6:	Grundlegende technische Bohrlochsituation/Bohrlochkomplettierung.....	28
Tabelle 7:	Solausrüstung für Kavernentyp II.....	29
Tabelle 8:	Prüfungen für Untertageanlagen.....	30
Tabelle 9:	Erhebung von Speicherparametern für den Betrieb	31
Tabelle 10:	Allgemeine Auslegungsparameter Feldleitung	32
Tabelle 11:	Art der möglichen Verunreinigung.....	33
Tabelle 12:	Rohrleitungsprüfungen	34
Tabelle 13:	Parameter Prozessüberwachung Soleentleerung und Gaserstbefüllung.....	34
Tabelle 14:	Allgemeine Vorprüfungen für Erweiterung eines Speichers bzw. Neuerrichtung ..	35
Tabelle 15:	Parameter Sole Analytik	36
Tabelle 16:	Chemische Analyse des Werkstoffes, alle Werte in Massenanteil-%.....	38
Tabelle 17:	Mechanische Eigenschaften des Werkstoffes ermittelt in Zugversuchen	39
Tabelle 18:	Zugversuchsergebnisse an „all weld tensile“ Rundzugproben	44
Tabelle 19:	Gemessener Wasserstoffgehalt der Kerbschlagbiegeproben nach Temperierung im Kältebad.....	62
Tabelle 20:	Bruchdehnung, Brucheinschnürung und Verhältnis der maximalen Festigkeiten aller SSRT-Tests, E_pR : relative Bruchdehnung, RAR: relative Brucheinschnürung, TS/TS(H ₂): Verhältnis der Zugfestigkeiten	67
Tabelle 21:	Seitenansicht sowie Bruchflächen der im SSRT-Test gezogenen Proben	68
Tabelle 22:	Lebensdauerberechnungen nach ASME B31.12 und ASME BPVC.....	69
Tabelle 23:	Betriebsparameter der Wasserstoffspeicherung, welche als Randbedingungen in das gebirgsmechanische Berechnungsmodell eingeflossen sind.	114
Tabelle 24:	Übersicht potenzieller mikrobieller Prozesse infolge einer Wasserstoff-Untergroundspeicherung	135
Tabelle 25:	Mikrobiologisch relevante Kavernenparameter	136

Tabelle 26:	Probenmaterial Bad Lauchstädt für mikrobiologische Untersuchungen.....	140
Tabelle 27:	Analyseparameter und verwendete Analysevorschriften.....	141
Tabelle 28:	Herkunft der Kulturensammlung	143
Tabelle 29:	Herkunft methanogener Testkulturen.....	144
Tabelle 30:	Versuchsmatrix Kulturansätze für Isotopenchemie der Wasserstoffverwertung .	145
Tabelle 31:	Versuchsmatrix Wasserstoffeinlagerung unter Niedrigdruck	146
Tabelle 32:	Hydrochemische Analysen der Kavernensumpfsproben und Abscheiderprobe ...	152
Tabelle 33:	Wachstum unter Wasserstoff mit verschiedenen Kohlenstoffquellen und mit Methan	154
Tabelle 34:	Wachstum nach Zellanreicherung.....	155
Tabelle 35:	Maximale Gasumsatzraten mit Probe HCF nach Supplementierung.....	157
Tabelle 36:	Versuchsmatrix zur Charakterisierung von Anreicherungen.....	162
Tabelle 37:	Sulfidkonzentrationen in Gas- und Flüssigphase Versuchsreihe 4 der Wasserstoffeinlagerung	169
Tabelle 38:	Wirkmatrix der getesteten Biozide	184
Tabelle 39:	Wirkmatrix Zinkchlorid	184
Tabelle 40:	Wirkmatrix pH-Wert	185
Tabelle 41:	Ermittelte Schwankungsbreiten für die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte der Speichergaskomponenten Methan und Kohlendioxid	190
Tabelle 42:	Mikrobiologisch relevante Parameter und Untersuchungsmethoden zur Beurteilung mikrobieller Risiken zur Konzeption einer Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen	196
Tabelle 43:	Mikrobiologisch relevante Parameter und Untersuchungsmethoden – Monitoring mikrobieller Risiken während der Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen.....	201
Tabelle 44:	Hauptkomponenten von Stadt- und Erdgas in Vol.-% (Schmitz, et al., 2018, S. 81).	209
Tabelle 45:	Eingestellte Qualität des ausgespeicherten Gases der Kaverne K nach Umstellung von Stadtgas auf Erdgas (ohne Verfasser, Interner Bericht, S. 2) ...	212
Tabelle 46:	Entwicklung des mittleren Brennwertes des ausgespeicherten Gases der Kavernen der VNG Gasspeicher GmbH im Zeitraum von 1993 bis 1998 (ohne Verfasser, Gasbeschaffenheit im Winter 1997–98 – Interner Bericht, 1998, S. 53)	213
Tabelle 47:	Parameter der Typkaverne Simulation.....	231
Tabelle 48:	Randbedingungen der Simulation.....	233

Tabelle 49:	Anzahl der Elemente und Elementqualität des Netzes.....	235
Tabelle 50:	Zusammenfassung der verschiedenen Turbulenzmodule	239
Tabelle 51:	Zusammenfassung der Kompressibilitäts- und Strömungsoptionen (Carasi, 2016)	242
Tabelle 52:	Simulationsmatrix mit den jeweiligen Anfangsbedingungen	247
Tabelle 53:	Parameter des verwendeten analytischen Modells	262
Tabelle 54:	Sicherheitsfaktoren nach Mises in den Szenarien Injektion und Produktion	263
Tabelle 55:	Beschreibung und Funktion der Barriere-Elemente.....	281
Tabelle 56:	Akzeptanzkriterien	283
Tabelle 57:	Überwachung/Monitoring der Barriere-Elemente	290
Tabelle 58:	Charakterisierung Variante 1 – Einfachpackerkomplettierung.....	299
Tabelle 59:	Charakterisierung Variante 2 – Linerkomplettierung	301
Tabelle 60:	Charakterisierung Variante 3 – Doppelpackerkomplettierung	301
Tabelle 61:	Charakterisierung Variante 4 – Rohrschuhkomplettierung „Einfachausführung“	303
Tabelle 62:	Charakterisierung Variante 5 – Rohrschuhkomplettierung „Doppeltausführung“ ..	303
Tabelle 63:	Übersicht Bewertung der Varianten nach dem Zwei-Barrieren-Konzept.....	305
Tabelle 64:	Berechnungsgrundlage Gaserstbefüllung Forschungskaverne	315
Tabelle 65:	Berechnungsgrundlage Gaserstbefüllung Typkaverne.....	317
Tabelle 66:	Übersicht Vorgaben und Berechnungsergebnisse Varianten diskontinuierliche Gaserstbefüllung	320
Tabelle 67:	Wiederkehrende Prüfung von Bohrungsausrüstung.....	321
Tabelle 68:	Erwartetes Marktvolumen	329
Tabelle 69:	Definition der Startvariante	339
Tabelle 70:	Definition der Referenzvariante.....	341
Tabelle 71:	Definition der Maximalvariante.....	342
Tabelle 72:	Kaverneneigenschaften	346
Tabelle 73:	Bohrungseigenschaften	347
Tabelle 74:	Materialeigenschaften.....	347
Tabelle 75:	Parametersätze	348
Tabelle 76:	Startdrücke (am Rohrschuh) für die Simulationsrechnung	349
Tabelle 77:	Ergebnisse Simulationsrechnungen – Startvariante.....	350
Tabelle 78:	Ergebnisse Simulationsrechnungen – Referenzvariante	356

Tabelle 79:	Ergebnisse Simulationsrechnungen – Maximalvariante	362
Tabelle 80:	Unterscheidung der obertägigen Speichervarianten	369
Tabelle 81:	Auslegungsdaten für die Ausspeicherstrecken	370
Tabelle 82:	Auslegungsdaten Verdichter zur Gaserstbefüllung	371
Tabelle 83:	Exemplarische Verdichter mit Wellenleistung	375
Tabelle 84:	Exemplarische Flächenbedarfe	375
Tabelle 85:	Übersicht zu den einzelnen variablen Größen als Grundlage der Variantenmatrix	383
Tabelle 86:	Wasserstoff – ausgewählte Spezifikationen (jeweilige Obergrenzen)	384
Tabelle 87:	Übersicht Anzahl der durchgeführten Simulationen	384
Tabelle 88:	Stoffeigenschaften und sicherheitsrelevante Parameter (IFA, 2021) von Wasserstoff und Methan	394
Tabelle 89:	Verdrängungsverdichter für die Gasanwendung (Dubbel, Grote, & Feldhusen, 2011, S. P28, P31)	405
Tabelle 90:	Messgenauigkeiten Multifinger-Kalibermessung (Beispiel)	434
Tabelle 91:	Messgenauigkeiten Ultraschallmessverfahren (Beispiele)	435
Tabelle 92:	Messgenauigkeiten Zementlog-Messverfahren.....	436
Tabelle 93:	Messgenauigkeiten elektromagnetische Messverfahren (Beispiele)	438
Tabelle 94:	Messgenauigkeiten MFL-Molch	439
Tabelle 95:	Übersicht Defektoskopie MFL-Molch (Beispiele).....	440
Tabelle 96:	Messgenauigkeiten Gassättigungsmessung (Beispiele)	441
Tabelle 97:	Messgenauigkeiten Lichtleiterwellenkabel	442
Tabelle 98:	Informationsstand, Stand März 2022	444
Tabelle 99:	Eignung Einsatz Bohrlochmessverfahren in Wasserstoff-Speicherbohrung	449
Tabelle 100:	Verfahren zum Dichttest Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour	457
Tabelle 101:	Prüfdrücke für den hydrostatischen Drucktest.....	470
Tabelle 102:	Funktionsprüfung und Testablauf für installierte UTSAV	473
Tabelle 103:	Verfahren zum Dichttest Rohrschuh letzte zementierte Rohrtour (IzRT).....	476
Tabelle 104:	Übersicht verfügbare Axiallast-Monitoringsysteme	488
Tabelle 105:	Dimensionierung einzelner Messstellen.....	489
Tabelle 106:	Ankerrohrtour/Produktionsrohrtour.....	498
Tabelle 107:	Steigrohrstrang/Schutzrohrtour	498

Tabelle 108:	Festlegung der Materialkennwerte für die technische Bewertung	499
Tabelle 109:	Lastfälle Zementsteinbewertung	512
Tabelle 110:	Übersicht über die notwendigen Antragsunterlagen.....	540
Tabelle 111:	Übersicht der wesentlichen Sachverständigenprüfungen.....	553

10.8 Abkürzungsverzeichnis

A	Axialverdichter
ABergV	Allgemeine Bundesbergverordnung
ABP	Abschlussbetriebsplan
AE-Messung	Akustische Emissions-Messung
AGV	Arbeitsgasvolumen
API	American Petroleum Institute
ART	Ankerrohrtour
ASV	Amplikon-Sequenzvariante
at.-%	Atomprozent
ATP	Adenosinriphosphat
AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
BBergG	Bundesberggesetz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi, BMWK	Bis Dezember 2021: BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; ab Dezember 2021: BMWK Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetzes
BVEG	Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V.

BVOT	Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen; Tiefbohrverordnung
C-Quelle	Kohlenstoffquelle
CAR	Crack Area Ratio
CaSO ₄	Anhydrit
CBL-VDL	Cement Bond Log-Variable Density Log
CEV	Carbon Equivalent Value, Kohlenstoffäquivalent
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH ₄	Methan
C _n H _m	Undifferenzierte höhere Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
D ₂ O	Deuteriumoxid, ‚schweres‘ Wasser
DEM	Distinct Element Method
DFÜ	Datenfernübertragung
DHT	Dichtheitstest
DN	Diamètre Nominal, Nennweite
DNA, DNS	Deoxyribonucleic Acid, Desoxyribonukleinsäure
DOC	Dissolved Organic Carbon, gelöster organischer Kohlenstoff
DTT	Direkt Tension Test; direkter Zugversuch
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EE	erneuerbare Energien
EIGA	European Industrial Gases Association

E-Kreuz	Eruptionskreuz
EIBergV	Elektro-Bergverordnung
ESD	Emergency Shut Down
ESMR	Elektro-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
FEM	Finite Element Method
FeS	Eisensulfid
FFH	Fauna-Flora-Habitat
Frac	hydraulische Risserzeugung
FRT	Förderrohrtour
GPa	Gigapascal
GW	Grundwerkstoff
H ₂	Wasserstoff
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HAZOP	Hazard and Operability Studies, Sicherheitsbetrachtung; siehe auch PAAG
HBP	Hauptbetriebsplan
HFI-Verfahren	Hochfrequenz-Induktions-Verfahren
HIC	Hydrogen Induced Cracking, H ₂ -induzierte Rissbildung
HNBR	Hydrogenated Nitrile-Butadiene Rubber
HYPOS	Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany e. V.
i. N.	im Normzustand
IRMS	Isotopenverhältnis-Massenspektrometer
k	Rohrrauhigkeit (Rohreigenschaft)
K	Kelvin

KKS	kathodischer Korrosionsschutz
KW	Kohlenwasserstoff
LzRS	letzter zementierter Rohrschuh
LzRT	letzte zementierte Rohrtour
M	Molare Masse
Ma	Mach-Zahl
MAASP	Maximum Allowable Annulus Surface Pressure
MB-Mineralmedium	sulfatfreies Nährmedium für Methanbildner
MD	Measure Depth
MFL-Molch	Magnetic Flux Leakage-Molch
MIT	Mechanical Integrity Test
MPa	Megapascal
MTD	Magnetic Thickness Detector
N ₂	Stickstoff
nanoSIMS	nano-scale Sekundärionen-Massenspektrometer
NaOH	Natriumhydroxid
O ₂	Sauerstoff
OD	Outer Diameter, Außendurchmesser
OT	Obertage
OTA	Obertageanlage
P	Pressure, Druck
PAAG	Prognose, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen; methodisches Sicherheitsverfahren; siehe auch HAZOP

pCS	Rohrschuhdruck
PFD	Process Flow Diagramm; Prozessfließbild
PLLC-Modell	Power-Law-Linear-Creep-Modell
PN	Pressure Nominal, Nenndruck
POV	Pressure Operated Valve
PV	Photovoltaik
wppm	parts per million by weight
ppmv	parts per million by volume
PSL	Product Spezifikation Level
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PtL	Power-to-Liquid
PV	Photovoltaik
qPCR	quantitative Polymerasekettenreaktion
RBP	Rahmenbetriebsplan
RG	Radialverdichter, integriertes Getriebe
RH	Radialverdichter, horizontal geteiltes Gehäuse
rRNA	ribosomale Ribonucleic Acid, Ribonukleinsäure
RR	Ringraum
RS	Rohrschuh
RV	Radialverdichter, vertikal geteiltes Gehäuse
SAV	Sicherheitsabsperrventil
SBP	Sonderbetriebsplan
SIP	Stable Isotope Probing
SNG	Synthetic Natural Gas, synthetisches Methan

SPF	Speicherforschungsplattform
SR	Steigraum
SRP-Mineralmedium	Nährmedium für Sulfat reduzierende Prokaryoten
SCC	Sulfide Stress Cracking
SRT	Soleentleerungsrohrtour
SSRT	Slow Strain Rate Tensile
StandAG	Standortauswahlgesetz
T	Temperature
TGH	Trägergasheißextraktion
Th. El.	Thermoelement
TC	Triaxial Compression Test; triaxialer Kompressionsversuch
TCC	Triaxial Compression CreepTest; triaxialer Kompressionskriechversuch
TCMS	Tension Controlled Monitoring System
TE	Triaxial Extension Test; triaxialer Extensionsversuch
T_{Geograd}	Temperatur laut geothermischen Gradient
TIC	Total Inorganic Carbon; gesamter anorganischer Kohlenstoff
TMA	Trimethylamin
TMS	Tension Monitoring System
TOC	Total Organic Carbon; gesamter organischer Kohlenstoff
TR	technische Rohrtour
TUBAF	TU Bergakademie Freiberg
TVD	True vertical depth

UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
UGS	Untergrundgasspeicher
URS	Ultrasonic Radial Scanner
US	Ultraschall
USIT	Ultrasonic Imager Tool
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
UVP-V Bergbau	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben
UT	Untertage
UTA	Untertageanlage
UTSAV	Untertagesicherheitsventil
V	Volumen
VR	Versuchsreihe
VwVfG	Verwaltungsverfahrensgesetz
WD	Wanddicke
WEZ	Wärmeeinflusszone
WGK	Wassergefährdungsklasse
WHG	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts, Wasserhaushaltsgesetz