

# Integrität geotechnischer Barrieren

Teil 2

## Vertiefte Nachweisführung

Bericht zum Arbeitspaket 9.2

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Erstellt von:

**DBE-TEC**  
DBE TECHNOLOGY GmbH

The logo for GRS, consisting of the letters 'G', 'R', and 'S' in a stylized, rounded font. The 'G' and 'R' are connected, and the 'S' is separate.



## **Integrität geotechnischer Barrieren**

Teil 2

### **Vertiefte Nachweisführung**

Bericht zum Arbeitspaket 9.2

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Nina Müller-Hoeppe (DBETEC)  
Micheal Breustedt (DBETEC)  
Johanna Wolf (DBETEC)  
Oliver Czaikowski (GRS)  
Klaus Wieczorek (GRS)

Oktober 2012

#### **Anmerkung:**

Das FuE-Vorhaben UM10R03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

## **Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)**

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

### **Ursprüngliche Zielsetzung**

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnisstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

### **Aktualisierte Zielsetzung**

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

### **Aktualisierte Projektplanung**

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

### **Projektpartner**

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

### **Arbeitspakete**

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

**Deskriptoren:**

Gorleben, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, vertiefte Nachweisführung: mechanische, thermische, hydraulische

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung/Aufgabenstellung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen für die vertiefte Nachweisführung .....</b>	<b>3</b>
2.1	Endlagerspezifische Randbedingungen und Stilllegungskonzept.....	3
2.2	Beschreibung des Verschlussystems (Baubeschreibung) .....	6
2.2.1	Schachtverschluss für den Schacht Gorleben 1 .....	6
2.2.2	Streckenverschlüsse .....	9
2.2.3	Bauablauf .....	11
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Nachweisführung.....</b>	<b>15</b>
3.1	Einwirkungen und Beanspruchungen .....	18
3.2	Bemessungssituationen .....	20
3.3	Nachweiskriterien .....	21
3.4	Modellbildung, Substrukturen und zugeordnete Rechenfälle.....	22
3.5	Verwendete Rechenprogramme .....	29
<b>4</b>	<b>Vertiefte Nachweisführung für den Schachtverschluss als Ganzes .....</b>	<b>31</b>
4.1	Charakterisierung der Verschlusslokationen.....	32
4.2	Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ .....	36
4.3	Berechnungsmodelle .....	39
4.4	Rechenfälle .....	46
4.4.1.1	Anfangs- und Randbedingungen .....	49
4.4.1.2	Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf .....	52
4.4.1.3	Berechnungsvarianten zur „Kalibrierung Kriechklassen“ .....	53
4.4.2	Rechenfälle „kalter Schacht“ .....	54
4.4.2.1	Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ .....	56

4.4.2.2	Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ .....	59
4.4.3	Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ .....	64
4.4.3.1	Anfangs- und Randbedingungen .....	65
4.4.3.2	Berechnungsablauf .....	67
4.4.4	Rechenfälle „heißer Schacht“ .....	68
4.4.4.1	Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“ .....	69
4.4.4.2	Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“ .....	71
4.5	Stoffmodelle und Materialparameter .....	74
4.6	Berechnungsergebnisse zum „Schachtverschluss als Ganzes“ .....	76
4.6.1	Ergebnisse des Rechenfalls „Kalibrierung Kriechklassen“ .....	77
4.6.1.1	Auswertelokationen .....	77
4.6.1.2	Ergebnisse zur Kalibrierung der Kriechklassen .....	77
4.6.1.3	Zulässigkeit der Verwendung des effektiven Kompressionsmoduls .....	87
4.6.2	Ergebnisse des Rechenfalls „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ .....	88
4.6.2.1	Auswertelokationen .....	88
4.6.2.2	Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „Validierung thermomecha- nischer Randbedingungen“ .....	90
4.6.3	Ergebnisse der Rechenfälle „kalter Schacht“ .....	97
4.6.3.1	Auswertelokationen .....	98
4.6.3.2	Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ .....	99
4.6.3.3	Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ .....	107
4.6.4	Ergebnisse der Rechenfälle „heißer Schacht“ .....	114
4.6.4.1	Auswertelokationen .....	114
4.6.4.2	Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“ .....	114
4.6.4.3	Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“ .....	125
4.6.5	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für den „Schachtverschluss als Ganzes“ .....	132

<b>5</b>	<b>Substruktur: 1. Dichtelement (Bentonit)</b> .....	<b>133</b>
5.1	Charakterisierung der Verschlusslokation.....	133
5.2	Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ ...	135
5.3	Berechnungsmodell .....	139
5.3.1	Diskretisierung .....	142
5.3.2	Anfangs- und Randbedingungen .....	143
5.3.3	Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf .....	144
5.4	Stoffmodelle und Materialparameter .....	147
5.4.1	Mechanisches Verhalten .....	147
5.4.2	Hydraulisches Verhalten .....	148
5.4.3	Hydromechanische Kopplung .....	149
5.4.4	Quellen des Bentonits .....	150
5.4.5	Poissonzahl .....	155
5.5	Berechnungsergebnisse zum 1. Dichtelement.....	155
5.5.1	Vorlaufende Berechnung zur Überprüfung der Modellgüte.....	155
5.5.2	Vorlaufende Berechnung zur Überprüfung der Ergebnisse der Vorbemessung zur ALZ .....	156
5.5.3	Vorlaufende Berechnung zur Anpassung an Schachtverschluss Salzdetfurth .....	157
5.5.4	Hydromechanisch gekoppelte Berechnung des Aufsättigungs- prozesses .....	161
5.5.4.1	Auswertelokationen .....	161
5.5.4.2	Berechnungsergebnisse .....	165
5.5.5	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für das 1. Dichtelement (Bentonit).....	181
<b>6</b>	<b>Substruktur: 2. und 3. Dichtelement und Langzeitdichtung</b> .....	<b>185</b>
6.1	Charakterisierung der Verschlusslokation.....	185
6.2	Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ ...	186
6.3	Berechnungsmodelle .....	190
6.3.1	Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell .....	191

6.3.1.1	Modellgebiet .....	191
6.3.1.2	Diskretisierung .....	192
6.3.1.3	Anfangs- und Randbedingungen .....	192
6.3.1.4	Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf .....	193
6.3.2	Berechnungsmodell im ebenen Verzerrungszustand (Langzeitdichtung).....	195
6.3.2.1	Modellgebiet und Diskretisierung .....	195
6.3.2.2	Anfangs- und Randbedingungen .....	195
6.3.2.3	Belastungsgeschichte/ Berechnungsablauf .....	196
6.4	Stoffgesetze und Materialparameter .....	196
6.5	Berechnungsergebnisse für das 2. und 3. Dichtelement .....	198
6.5.1	Auswertelokationen .....	198
6.5.2	Berechnungsergebnisse zum 2. Dichtelement (Salzbeton) .....	199
6.5.3	Berechnungsergebnisse zum 3. Dichtelement (Sorelbeton).....	204
6.6	Berechnungsergebnisse zum Langzeitdichtelement.....	209
6.6.1	Auswertelokationen .....	209
6.6.2	Rechenfälle Kriechklasse 2, 4 und 5.....	209
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	212
<b>7</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung für den Schachtverschluss .....</b>	<b>215</b>
<b>8</b>	<b>Exemplarische Nachweisführung für den Streckenverschluss.....</b>	<b>225</b>
8.1	Charakterisierung der Verschlusslokation.....	225
8.2	Auswahl des abdeckenden fiktiven Streckenverschlusses .....	227
8.3	Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ ...	228
8.4	Bemessungssituation „Schachtverschlussversagen“ .....	231
8.5	Berechnungsmodelle für den Streckenverschluss .....	233
8.5.1	Berechnungsmodell im ebenen Verzerrungszustand .....	233
8.5.1.1	Anfangs- und Randbedingungen .....	234
8.5.1.2	Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf .....	234

8.5.2	Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell .....	235
8.5.2.1	Anfangs- und Randbedingungen .....	235
8.5.2.2	Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf .....	236
8.6	Berechnungsergebnisse für den Streckenverschluss .....	239
8.6.1	Auswertelokationen.....	239
8.6.2	Vorlaufende Berechnung zur Ermittlung der Nachschnitttiefe.....	240
8.6.3	Rechenfall Gebirgsdruck (Bewertung einseitiger Lösungsdruck).....	240
8.6.4	Rechenfall Gasdruck.....	245
8.6.5	Plausibilitätsbetrachtung zur Einwirkungskombination einseitiger Lösungs- und Gasdruck.....	247
<b>9</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung für den Streckenverschluss .....</b>	<b>249</b>
<b>10</b>	<b>Bewertung des Gesamtsystems .....</b>	<b>255</b>
<b>11</b>	<b>Optimierung .....</b>	<b>265</b>
<b>12</b>	<b>Zusammenstellung identifizierter notwendiger FuE-Arbeiten .....</b>	<b>269</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>275</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>277</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>289</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>297</b>
<b>A</b>	<b>Anhang A: Verknüpfung der Einzelnachweise zum Gesamtnachweis .....</b>	<b>299</b>
<b>B</b>	<b>Anhang B: Verwendete Stoffmodelle .....</b>	<b>303</b>
B.1	Thermoelastizität.....	303
B.2	Stationäres Kriechen $BGRa$ .....	305

<b>C</b>	<b>Anhang C: Erläuterungen zu Porositäts- Permeabilitätsbeziehungen.....</b>	<b>309</b>
<b>D</b>	<b>Anhang D: Temperatur- und Gasdruckentwicklungen zur Auswahl des fiktiven Streckenverschlusses .....</b>	<b>311</b>
D.1	Temperaturentwicklung.....	311
D.2	Gasdruckentwicklung .....	312
<b>E</b>	<b>Anhang E: Beschreibung des Nachweises der Filter-stabilität .....</b>	<b>319</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis der Anhänge .....</b>	<b>321</b>
	<b>Tabellenverzeichnis der Anhänge .....</b>	<b>323</b>

# 1 Einleitung/Aufgabenstellung

Vorrangiges Ziel der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist eine umfassende und nachvollziehbar dokumentierte Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben mit dem Schwerpunkt Langzeitsicherheit. Das beinhaltet unter anderem die Planung des Verschlusses der technisch unvermeidbaren Perforation der geologischen Barriere. Bei den Planungen für den Verschluss eines Endlagers für wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente dient das im VSG-Vorhaben erarbeitete Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ als Leitlinie.

Zielsetzung der Planung ist, die das Verschlussystem bildenden geotechnischen Barrieren Schacht- und Streckenverschlüsse so zu gestalten und anzuordnen, dass im Referenzszenarium /BEU 12/ und den damit verbundenen als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen ein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen über die Schachtverschlüsse und die mit Schotter versetzten Infrastrukturbereiche sowie die Streckenverschlüsse und die mit Salzgrus versetzten Strecken zu den endgelagerten Abfällen und die anschließende Auspressung kontaminierter Salzlösungen über den gleichen Pfad mindestens im Referenzszenarium und den damit verbundenen als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen nicht zu besorgen ist.

In Bezug auf die Alternativszenarien /BEU 12/ ist zu prüfen, ob und inwieweit das Verschlussystem so beeinträchtigt werden kann, dass eine Freisetzung von gelösten Radionukliden in die Biosphäre nicht ausgeschlossen werden kann. In diesem Fall soll eine Optimierung des Verschlussystems soweit durchgeführt werden, dass das Entwurfsziel nicht nur für das Referenzszenarium, sondern auch für die Alternativszenarien erreicht wird. Ist das nicht möglich, sind als Eingangsdaten für die Konsequenzenanalyse Art und Ort der Beeinträchtigung zu ermitteln sowie deren zeitliche Einordnung vorzunehmen.

Aufgrund des möglicherweise erforderlichen iterativen Prozesses ist das Verschlussystem dabei frühzeitig in seiner Entwurfsphase soweit zu konkretisieren, dass seine relevanten hydraulischen Kenngrößen für die begleitende Integritätsanalyse der geologischen Barriere und die nachfolgende Konsequenzenanalyse genutzt werden können. Aus diesem Grund wurde für den Entwurf eine Vorbemessung durchgeführt, deren Ergebnis bereits eine grundsätzliche Einschätzung der Funktionsfähigkeit des Verschlussystems zuließ /MÜL 12a/.

Im Rahmen der vertieften Nachweisführung werden die Ergebnisse der Vorbemessung mittels nachstehend aufgeführter numerischer Modellierungen überprüft und um Fragestellungen ergänzt, in denen nichtlineares Verhalten und gekoppelte Prozesse berücksichtigt werden müssen, die im Rahmen der Vorbemessung nicht erfasst werden konnten. Die vertiefte Nachweisführung umfasst:

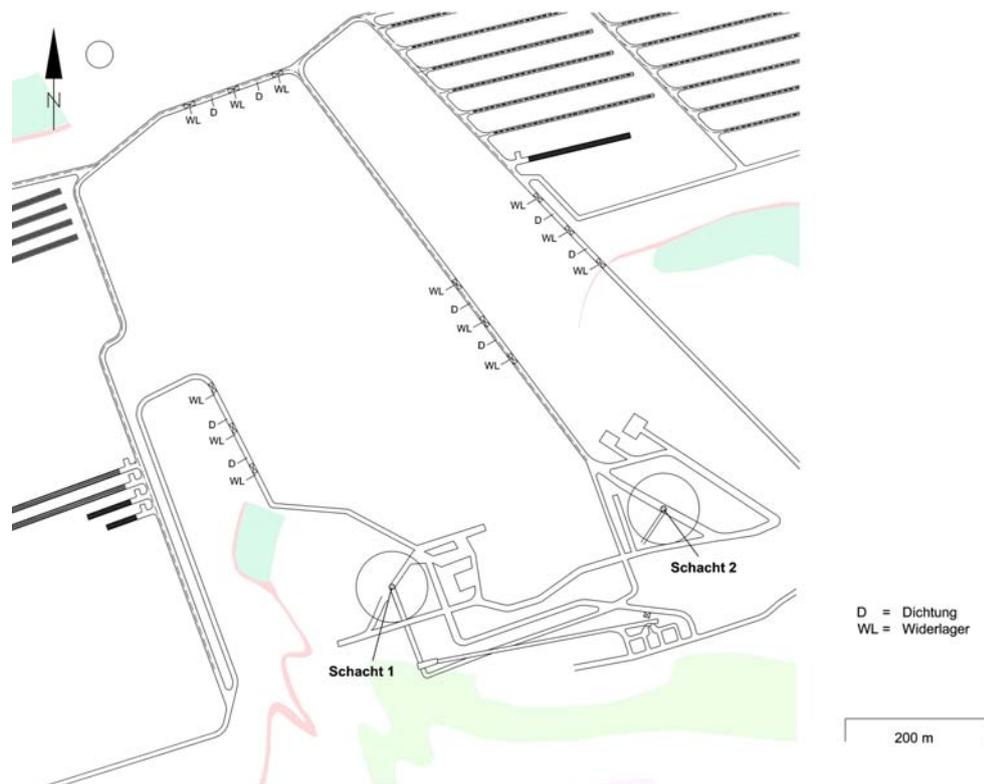
1. Untersuchungen zur Auswirkung der Konvergenz bzw. des Spannungsaufbaus (Gebirgsdruck) auf die Verschlusselemente, um die hydraulischen Annahmen der Vorbemessung für die Auflockerungszone durch numerische Berechnungen zu stützen. Die sich aus dem damit verknüpften Alternativszenarium ergebende außergewöhnliche Bemessungssituation mit einer geringen Konvergenz bedingt durch eine Kriechklasse unterhalb der erwarteten Bandbreite (ungünstiger Fall) wird in diesem Kontext mit behandelt.
2. Untersuchung zu Auswirkungen der thermischen Einwirkungen infolge der eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle auf den Schachtverschluss und der dadurch verursachten Zwangsverformungen/Zwangsspannungen durch die thermische Expansion und Kontraktion. Dieser Fall deckt die geologisch induzierte Zwangsverformung durch Diapirismus mit ab.
3. Untersuchung zur Auswirkung von Strömungskräften am 1. Dichtelement aus Bentonit durch hydromechanisch gekoppelte Modellierungen. Das Quellen des Bentonits ist in diese Untersuchung integriert.
4. Untersuchungen zur Auswirkung eines Gasdruckaufbaus im Endlager auf die Streckenverschlüsse
5. Untersuchung der hydromechanischen Einwirkungen auf die Streckenverschlüsse für das Alternativszenarium Schachtverschlussversagen

Die Bearbeitung der Arbeitspakete erfolgte aufgrund des engen Zeitrahmens zur Bearbeitung der VSG zeitlich parallel, so dass sich in einigen Fällen im Nachhinein Modifikationen ergaben. Auf diese wird im Bericht hingewiesen und sie werden nachträglich in Bezug auf ihre Relevanz bewertet.

## 2 Grundlagen für die vertiefte Nachweisführung

### 2.1 Endlagerspezifische Randbedingungen und Stilllegungskonzept

Das Endlagerbergwerk wird durch 2 Schächte – Schacht 1 und Schacht 2 – erschlossen. Schacht 1 dient als einziehender Wetterschacht und wird für Personenfahrt und Materialtransport genutzt. Schacht 2 ist ausziehender Wetterschacht und für den Abfallgebinde-transport vorgesehen, der gegen den Wetterstrom erfolgt, vgl. Abb. 2.1. Für die Erschließung des Endlagerbergwerkes sollen die bereits existierenden Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2, die zum Zweck der Erkundung bisher bis in eine Teufe von 933 m (Schacht 1) und 840 m (Schacht 2) abgeteuft wurden, genutzt werden. Während sich die Erkundungssohle in 840 m Teufe befindet, ist die Einlagerungssohle planungsgemäß in 870 m Teufe vorgesehen und in 880 m Teufe an den Schacht Gorleben 1 angeschlossen.



**Abb. 2.1** Position der Schächte und der vier Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord auf der Einlagerungssohle /BOL 11/

Die beiden Schächte sind überwiegend im jüngeren Steinsalz der Leinefolge (z3) angeordnet, während sich der Einlagerungsbereich und damit auch der Erkundungsbereich im älteren Hauptsalz der Staßfurtfolge (z2) befinden. Das jüngere Steinsalz der Leinefolge (z3) weist gegenüber dem älteren Hauptsalz der Staßfurtfolge (z2) im Allgemeinen eine geringere Kriechfähigkeit auf und ist damit im bergmännischen Sinne „standfester“. Der Einlagerungsbereich ist im höher kriechfähigen älteren Hauptsalz vorgesehen, um einen möglichst schnellen Einschluss der endgelagerten radioaktiven Abfälle zu erzielen.

Für die Einlagerungssohle wurden drei Einlagerungskonzepte vertieft untersucht /BOL 11/. Sie sind wie folgt definiert:

Einlagerungsvariante A: Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern

Einlagerungsvariante B1<sup>1</sup>: Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in selbstabschirmenden Endlagerbehältern in horizontalen Strecken

Einlagerungsvariante C: Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs)

Die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle (Einlagerungsvariante B1 oder C) ist im Ostflügel der Einlagerungssohle geplant, die Einlagerung der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Einlagerungsvariante A) im Westflügel, vgl. Abb. 2.1. Im Rahmen der vertieften Nachweisführung wird ausschließlich die Kombination der Einlagerungsvarianten A und B1 betrachtet, für die zuerst eine ausreichende Datenlage für die vertiefte Nachweisführung vorhanden war. Sie wird im Folgenden als Einlagerungsvariante AB1 bezeichnet.

---

<sup>1</sup> Im Rahmen einer Differenzbetrachtung wurde auch eine Einlagerungsvariante B2, die Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern, untersucht. Sie wird hier nicht betrachtet.

Für die Stilllegung und den Verschluss des Endlagerbergwerkes sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

1. Das Versetzen aller Einlagerungsstrecken und Querschläge der Einlagerungssohle mit naturtrockenem Salzgrus.
2. Das Versetzen der Erkundungsstrecken und Richtstrecken auf der Einlagerungssohle mit geringfügig angefeuchtetem Salzgrus (Zielgröße für den Lösungsgehalt maximal 0,6 Gew.%).
3. Der direkte Kontakt von naturtrockenem und angefeuchtetem Salzgrus wird durch Dichtpfropfen vermieden, die sich im Kreuzungsbereich Querschlag – Richtstrecke in den Querschlägen befinden.
4. Im Anschluss an die mit Salzgrus versetzten Streckenbereiche werden in den Zugangsstrecken zu den Infrastrukturbereichen der Einlagerungssohle und Erkundungssohle im höher kriechfähigen älteren Hauptsalz (z2HS) Streckenverschlüsse angeordnet. Auf der Einlagerungssohle befinden sich die Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbereichen, d. h. in Querschlag West, Mitte und Ost. Weiterhin trennt auf der Einlagerungssohle ein Streckenverschluss in der Richtstrecke Nord die Einlagerungsbereiche Ost für wärmeentwickelnde Abfälle und West für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Die Position der Streckenverschlüsse auf der Einlagerungssohle ist in Abb. 2.1 mit dargestellt.
5. Die Infrastrukturbereiche werden jeweils mit Hartgesteinschotter verfüllt, um als Porenspeicher einen relevanten hydraulischen Druckaufbau auf die Streckenverschlüsse durch ggf. zutretende Lösungen zu vermeiden oder wenigstens zu verzögern. Weiterhin wird in diesen Bereichen die Aufsättigung untersättigter Salzlösungen sichergestellt.
6. In den beiden Schächten sind Schachtverschlüsse vorgesehen.

Für eine weitergehende Beschreibung der endlagerrelevanten Randbedingungen und des Stilllegungskonzepts wird auf /BOL 11/, /BOL 12/ und /MÜL 12a/ verwiesen.

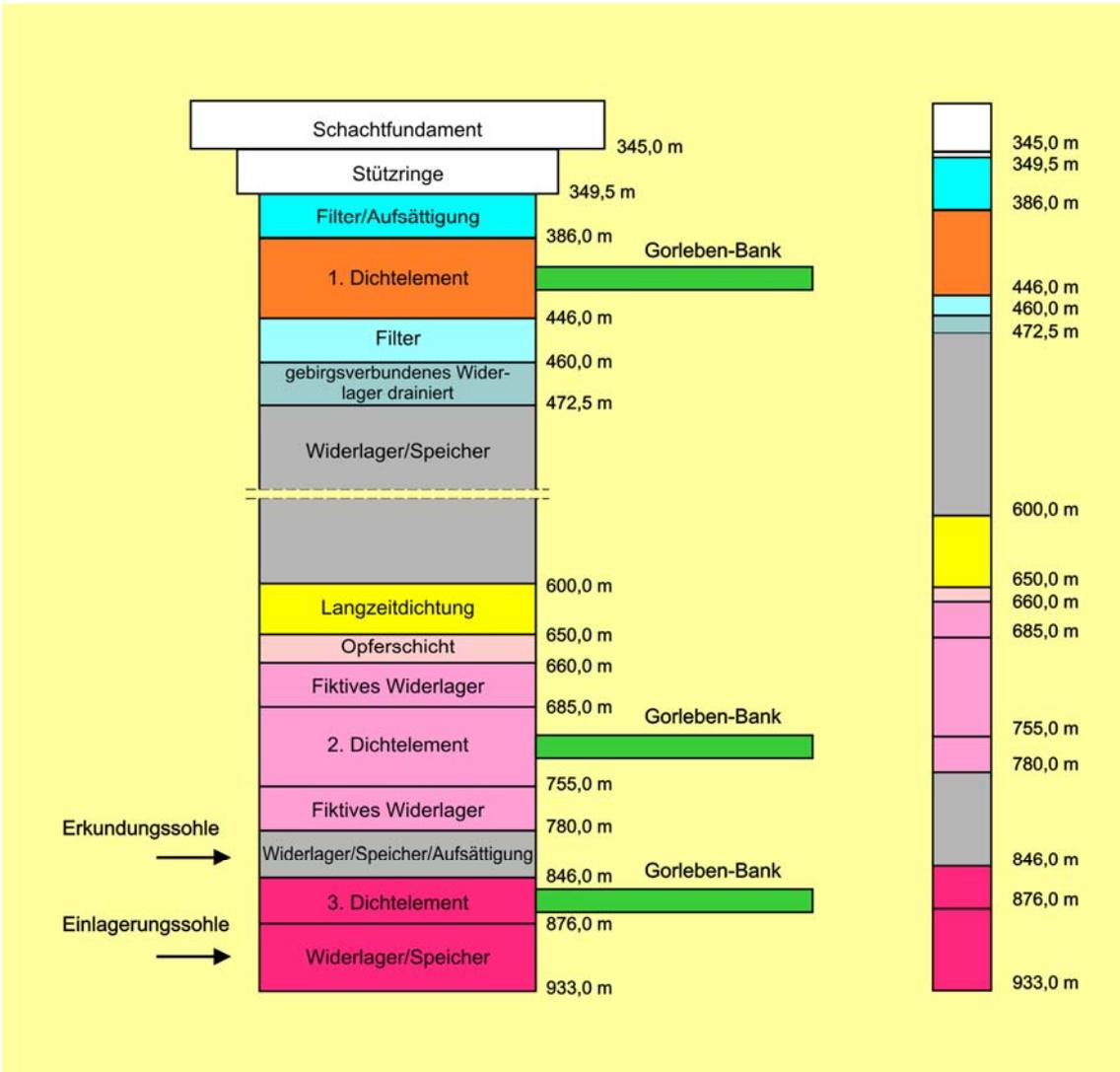
## **2.2 Beschreibung des Verschlusssystems (Baubeschreibung)**

Wie unter 2.1 erwähnt, besteht das Verschlusssystem aus den Schachtverschlüssen, den Porenspeichern bzw. Aufsättigungszonen, den Streckenverschlüssen sowie dem Salzgrusversatz in den Strecken und Hohlräumen des Endlagers. Die in Reihe angeordneten Schacht- und Streckenverschlüsse sind durch „Porenspeicher“ bzw. Aufsättigungszonen voneinander getrennt. Der Salzgrusversatz soll im Laufe der zeitlichen Entwicklung des Endlagersystems die Dichtfunktion der Verschlussbauwerke übernehmen.

Es wird von einer Dauer der Funktionsfähigkeit der Verschlüsse von ca. 50.000 Jahren ausgegangen /MÜL 12a/, obwohl der Salzgrusversatz prinzipiell in der Lage ist, bereits nach 1.000 Jahren die Dichtfunktion zu übernehmen /POP 12/, /CZA 12/.

### **2.2.1 Schachtverschluss für den Schacht Gorleben 1**

Der Aufbau des Schachtverschlusses entsprechend den Ergebnissen der Vorbemessung ist in Abb. 2.2 dargestellt. Die gewählten Materialien und die geometrischen Angaben sind in Tab. 2.1 aufgeführt. Wie Tab. 2.1 zu entnehmen ist, wird die Schachtkontur im Bereich der Dichtelemente und im Einzelfall auch im Bereich der Widerlager nachgeschnitten, woraus ein vergrößerter Schachtdurchmesser resultiert.



**Abb. 2.2** Funktionsentwurf Schachtverschluss Gorleben 1 (nach Vorbemessung) /MÜL 12a/

Funktionselemente (links) und ihre maßstäblichen Längen (rechts)

**Tab. 2.1** Materialien, geometrische und wirksame Größen des Funktionsentwurfes nach Vorbemessung /MÜL 12a/

Funktionselement	Material	Geom. Länge	Wirks. Länge	Geom. Ø	Wirks. Ø	Anmerkungen
Filter/Aufsättigung	Sand/Kies/Basaltsplitt	36,5 m	36,5 m	7,63 m	7,63 m	–
1. Dichtelement	Bentonit	60 m*	50 m*	8,63 m	8,83 m	10 cm Rest-ALZ, 1 % Porosität
Filter	Sand/Kies/Basaltsplitt	14 m	14 m	7,63 m	7,63 m	–
Gebirgsverbundenes Widerlager dräniert	Salzbeton	12,5 m	12,5 m	8,63 m	8,63 m	Kein hydraulischer Widerstand
Widerlager/Speicher	Basaltschotter	127,5 m	127,5 m	7,63 m	7,63 m	–
„Langzeitdichtung“	Feuchter Salzgrus	50 m	50 m	7,63 m	7,63 m	–
Opferschicht	Salzbeton	10 m	10 m	7,63 m	7,63 m	Ansatz erhöhter Permeabilität
Fiktives Widerlager	Salzbeton	25 m	25 m	8,83 m	8,83 m	10 cm Rest-ALZ, o. A.
2. Dichtelement	Salzbeton	70 m*	60 m*	8,83 m	9,03 m	10 cm Rest-ALZ, 1 % Porosität
Fiktives Widerlager	Salzbeton	25 m	25 m	8,83 m	8,83 m	10 cm Rest-ALZ, o. A.
Widerlager/Speicher/ Aufsättigung/ ggf. Behelfswiderlager	Basalt-/Serpentinit-schotter, techn. Bischoffit	66 m	66 m	fiktiv 7,63 m	–	Anschluss Infrastruktur
3. Dichtelement	Sorelbeton	30 m*	20 m*	9,23 m	9,43 m	10 cm Rest-ALZ, 1 % Porosität
Widerlager	Sorelbeton	57 m	57 m	fiktiv 7,63 m	–	Anschluss Infrastruktur

o. A. = ohne hydraulische Anforderungen, Nachschnitt erfolgt aus Gründen der Tragfähigkeit

\* Berücksichtigung der Gorleben-Bank bei der wirksamen Länge

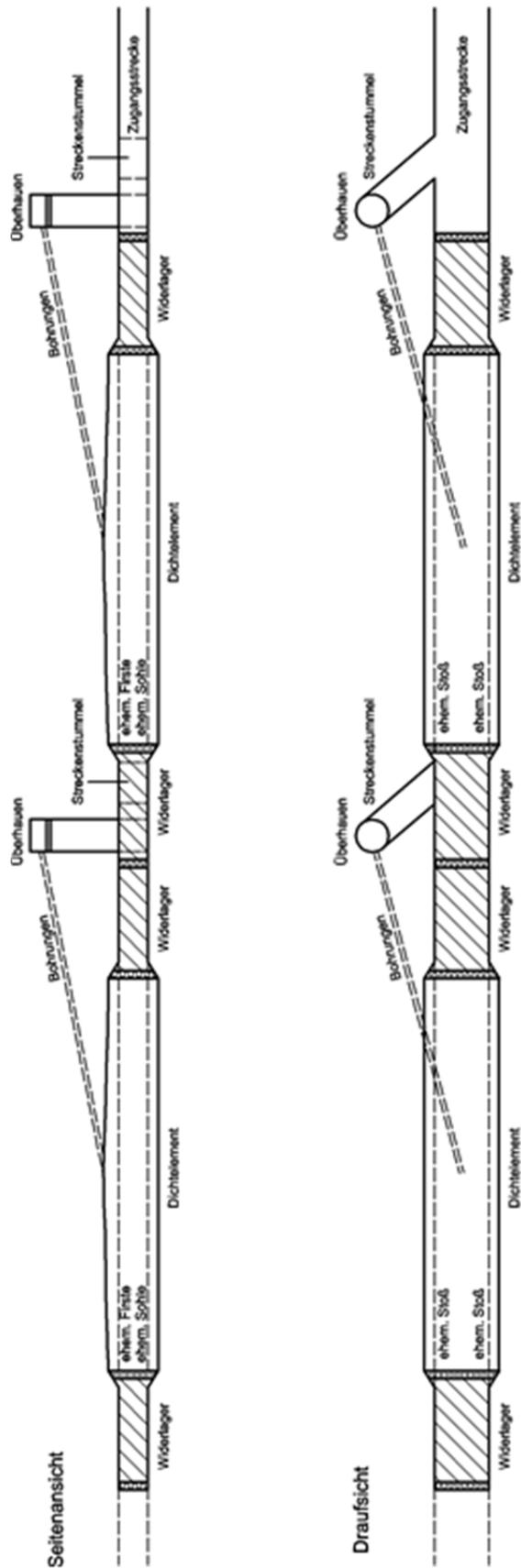
### 2.2.2 Streckenverschlüsse

Die Streckenverschlüsse sind Bestandteil des Verschlusssystems. Ihre Dichtfunktion wird mit zunehmender Zeit durch den kompaktierenden Salzgrusversatz ergänzt, der schließlich in der Lage ist, die Dichtfunktion allein zu übernehmen.

Gemäß Planung zur Stilllegung des Endlagerbergwerkes besteht jeder vorgesehene Streckenverschluss aus zwei jeweils 50 m langen Dichtelementen aus Sorelbeton A1, die zwischen Widerlagern eingebracht werden. Die Widerlager mit einer Länge von ca. 15 m werden ebenfalls aus Sorelbeton A1 hergestellt und sind zwischen 0,75 m dicken Schalungsmauern angeordnet, vgl. Abb. 2.3 als Prinzipdarstellung. Die Schalungsmauern werden vorzugsweise aus Mauerziegeln errichtet, aber auch die Verwendung von Kalksandsteinen ist aus bautechnischer Sicht<sup>2</sup> möglich.

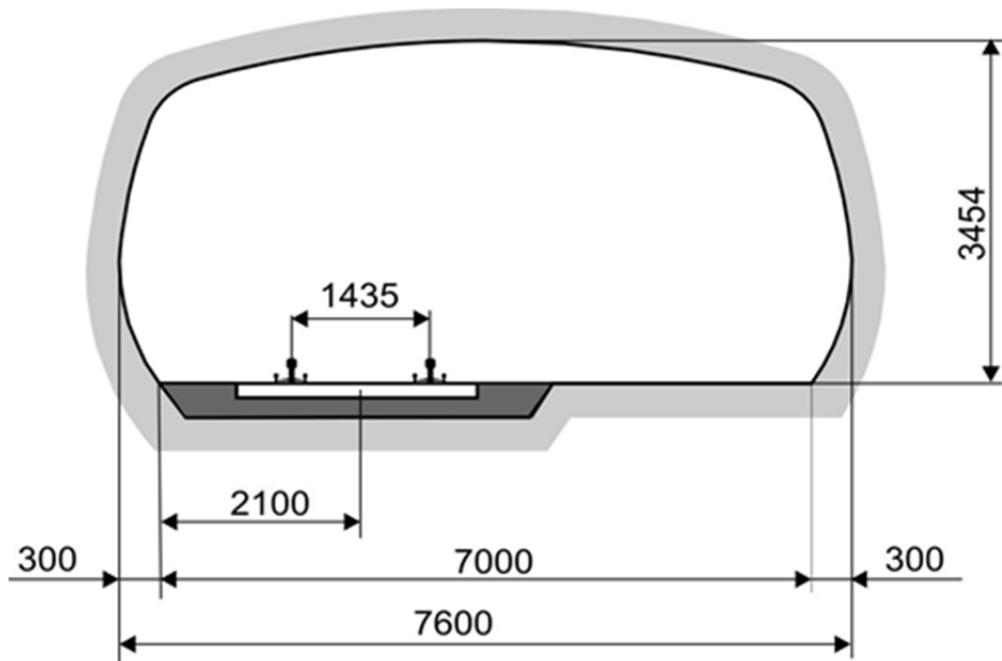
---

<sup>2</sup> Die geochemische Verträglichkeit ist noch zu bewerten, allerdings wird die Fragestellung aufgrund der geringen Menge an Mauerziegeln nicht als relevant eingestuft.



**Abb. 2.3** Konstruktive Gestaltung der Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord /HER 12/

Wie /BOL 11/ zu entnehmen ist, weisen die Richtstrecken und Querschläge, in denen Streckenverschlüsse angeordnet werden, zwei geringfügig voneinander abweichende Querschnittsprofile auf. Für die vertiefte Nachweisführung wurde der Querschnitt der Richtstrecke Nord bzw. Mitte gemäß Abb. 2.4 gewählt, da sein etwas ungünstigeres Verhältnis von Breite zu Höhe tendenziell eine größere Tiefe der Auflockerungszone begünstigt. Dieser Querschnitt wurde konservativ für die vertiefte Nachweisführung zugrunde gelegt.



**Abb. 2.4** Streckenquerschnitt (Mindestprofile) Richtstrecke Nord (Streckenverschluss Nord und Mitte) /BOL 11/

### 2.2.3 Bauablauf

Für das Verschlussystem ergibt sich eine Bauzeit von insgesamt ca. 6,5 Jahren. Der geplante Bauablauf ist in Tab. 2.2 angegeben. Dieser ist hier für die vertiefte Nachweisführung zusammengestellt.

**Tab. 2.2** Erstellung Verschlussystem – Bauablauf

Datum	Dauer (Monate)	Ereignis	Anmerkungen
01.01.2035	480,00	Beginn Einlagerungsbetrieb	–
01.01.2075	24,00	Ende Einlagerungsbetrieb, Beginn Rückbau	Rückbau Einbauten ca. 1 a Streckenversatz (Salzgrus in Strecken) ca. 1 a
30.09.2076	3,00	Beginn Erstellung des letzten Streckenverschlusses	Freie Standzeit der nachgeschnittenen Strecke $\leq 3$ Monate
31.12.2076	18	Beginn Verfüllung Infrastrukturbereich	–
02.07.2078	5,5	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	–
24.12.2078	0,25	Widerlager (Sorelbeton)	Beginn Errichtung des Schachtverschlusses in Schacht Gorleben 1
24.12.2078	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit $\leq 3$ Monate
25.03.2079	2,75	3. Dichtelement (Sorelbeton)	–
23.09.2080	18,00	Widerlager/Speicher/Aufsättigung (Basalt-/ Serpentinitschotter, techn. Bischoffit)	–
23.09.2080	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	–
09.03.2081	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit $\leq 3$ Monate
09.06.2081	2,75	Widerlager (Salzbeton)	–
09.06.2081	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit $\leq 3$ Monate
08.09.2081	2,75	2. Dichtelement (Salzbeton)	–
08.09.2081	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit $\leq 3$ Monate
08.12.2081	2,75	Widerlager (Salzbeton)	–
16.12.2081	0,25	Opferschicht (Salzbeton)	–
16.12.2081	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	–
01.11.2082	5,00	Langzeitdichtung (Feuchter Salzgrus)	–

**Tab. 2.2** Erstellung Verschlussystem – Bauablauf (Fortsetzung)

Datum	Dauer (Monate)	Ereignis	Anmerkungen
01.11.2082	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	–
17.10.2083	6,00	Widerlager/Speicher (Basaltschotter)	–
17.10.2083	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	–
01.04.2084	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit ≤ 3 Monate
01.07.2084	2,75	Gebirgsverbundenes Widerlager dräniert (Salzbeton)	–
16.08.2084	1,50	Filter (Sand/Kies/ Basaltsplitt)	–
16.08.2084	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	–
30.01.2085	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit ≤ 3 Monate
09.05.2085	3,00	1. Dichtelement (Bentonit) 1. Bauabschnitt	–
09.05.2085	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit ≤ 3 Monate
16.08.2085	3,00	1. Dichtelement (Bentonit) 2. Bauabschnitt	–
01.12.2085	3,50	Filter/Aufsättigung (Sand/Kies/ Basaltsplitt)	Oberhalb des Bentonitdichtelementes und unterhalb des Schachtfundamentes erfolgt die Aufsättigung möglicherweise an Steinsalz unter-sättigter Tages- und Deckgebirgs-wässer
31.12.2085	1,00	Beginn Druckaufbau	Druckaufbau durch gezieltes Einbringen von NaCl-Lösung

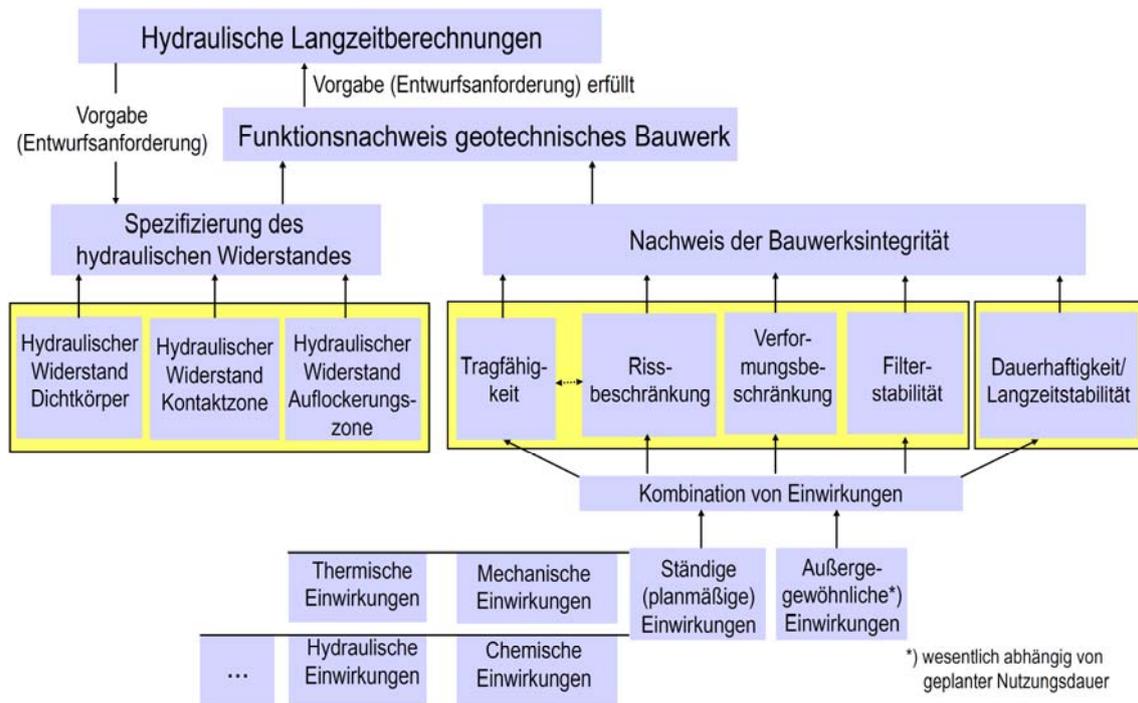


### **3 Beschreibung der Nachweisführung**

Für die vertiefte Nachweisführung kommt das im Rahmen der Vorbemessung und in /MÜL 12a/ dargestellte ingenieurtechnische Nachweiskonzept zur Anwendung. Gemäß Abb. 3.1 ist dabei für das Verschlussystem sowohl die Bauwerksintegrität als auch der hydraulische Widerstand zu bewerten, d. h., im Grundsatz sind zwei Nachweise zu führen. Die Integrität des Verschlussystems ist Voraussetzung für den Erhalt des ausreichenden hydraulischen Widerstands.

Schacht- und Streckenverschluss können aufgrund ihrer räumlichen Entfernung in Bezug auf die Nachweisführung getrennt behandelt werden. Auch im Falle des Schachtverschlusses sind die drei Dichtelemente und ihre Widerlager im Ergebnis der Vorbemessung konstruktiv voneinander entkoppelt /MÜL 12a/. Die Einzelnachweise können daher an Substrukturen geführt werden, die die Dichtelemente und die ihnen zugeordneten Widerlager beinhalten. Die Anfangs- und Belastungsbedingungen der Substrukturen ergeben sich jedoch aus dem Zusammenwirken aller Elemente des gesamten Verschlussystems.

In Bezug auf die Spezifizierung des hydraulischen Widerstandes (Abb. 3.1) ist zusätzlich zu beachten, dass die Dichtelemente in Realität aus den drei parallel angeordneten Elementen Abdichtungskörper, der Kontaktzone zur Wirtsgesteinskontur und der Auflockerungszone im Gebirge bestehen.



**Abb. 3.1** Struktur des technischen Funktionsnachweises für die Dichtelemente und Widerlager des Verschlusssystems

hydraulische Einwirkungen = hydromechanische Einwirkungen,

thermische Einwirkungen = thermochemische und thermomechanische Einwirkungen

/MÜL 12a/

In Abb. 3.1 ist dargestellt, dass zum Nachweis der Funktionsfähigkeit für die Dichtelemente und Widerlager des Verschlusssystems folgende ingenieurtechnische Einzelnachweise rechnerisch oder versuchsgestützt zu erbringen sind:

1. Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes (hier: für Salzlösung und Gase)
2. Nachweis der Tragfähigkeit (oftmals abgedeckt durch den Nachweis der Rissbeschränkung)
3. Nachweis der Rissbeschränkung
4. Nachweis der Verformungsbeschränkung (Lagestabilität, Beschränkung der Auflockerung)
5. Nachweis der Filterstabilität (Erosionssicherheit, Suffosionssicherheit)

## 6. Nachweis der Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit

## 7. Nachweis der Herstellbarkeit<sup>3</sup>

Die ingenieurtechnischen Nachweise zur Bauwerksintegrität sind Voraussetzung für den Nachweis der Funktionsfähigkeit. Bei anforderungsgerechter Materialwahl und Bauausführung ist der hydraulische Widerstand dann automatisch gegeben. Auf die Einzelnachweise zur Bauwerksintegrität wird deshalb zuerst eingegangen.

Die o. g. Nachweise zur Bauwerksintegrität erfordern folgende Einzelschritte:

- Zusammenstellung möglicher/relevanter Einwirkungen bzw. daraus resultierender Beanspruchungen
- Auflistung der Bemessungssituationen und dafür Entwicklung von Gefährdungsbildern (abgeleitet aus einer möglichen Beeinträchtigung) und Definition des zugehörigen Grenzzustandes zur Ableitung von maßgeblichen Einwirkungskombinationen unter Nutzung der Gefährdungsbilder für ein Rechenmodell (Ableitung von Rechenfällen)
- Durchführung der Berechnungen
- Bewertung der Ergebnisse der Rechenfälle für die Rechenmodelle anhand von Kriterien, die den Grenzzustand beschreiben

Werden für die Verschlüsse die in Abb. 3.1 aufgeführten ingenieurtechnischen Einzelnachweise mit hinreichender Zuverlässigkeit erbracht, ist gezeigt, dass die in den hydraulischen Langzeitbetrachtungen getroffenen Annahmen hinsichtlich der geotechnischen Barriere (i. d. R. der hydraulische Widerstand bzw. die erforderliche Länge und querschnittsgemittelte Permeabilität) zuverlässig gegeben sind.

Nachstehend sind Einwirkungen und Bemessungssituationen aufgeführt. Die Gefährdungsbilder und die den Grenzzustand beschreibenden Kriterien (Nachweiskriterien) werden den Rechenmodellen und Rechenfällen individuell zugeordnet.

---

<sup>3</sup> Hier nur der Vollständigkeit wegen aufgeführt, durch Prototypen praktisch gewährleistet.

### 3.1 Einwirkungen und Beanspruchungen

Gemäß Vorbemessung muss zwischen chemischen und mechanischen Einwirkungen<sup>4</sup> unterschieden werden, wobei die thermischen und hydraulischen Einwirkungen nach Abb. 3.1 über die gekoppelten Berechnungen erfasst werden. Für das Verschlusssystem ergeben sich die folgenden Einwirkungen aus den standortspezifischen/lokations-spezifischen Verhältnissen sowie dem gewählten Planungskonzept /MÜL 12a/:

#### (1) Chemische Einwirkungen

- Chemischer Angriff durch Lösungen und Gase, deren Zusammensetzung jeweils zu spezifizieren ist
- Durch Temperaturänderungen ausgelöste chemische Einwirkungen (z. B. Löslichkeitsänderungen)

#### (2) Mechanische Einwirkungen

- Einwirkungen aus Kräften und Spannungen
  - Eigengewicht
  - Gebirgsdruck
  - Fluiddruck
  - Strömungskräfte
  - Zwangsspannungen (z. B. aus Steifigkeitsdifferenzen)
  - Massenkräfte (aus Erdbeben)
- Einwirkungen aus eingprägten Verzerrungen
  - Temperaturänderungen/-differenzen in Verbindung mit thermischer Expansion/Kontraktion
  - Quellen/Schwinden
  - Kriechen/Relaxation

---

<sup>4</sup> Der Abgleich zwischen Szenarien und Einwirkungen erfolgte im Vorfeld der Vorbemessung /MÜL 12a/.

- Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrundwechselwirkungen (z. B. Verformungsbehinderungen, Setzungen)

Zu (1):

Der Nachweis der Langzeitstabilität gegenüber chemischem Angriff durch Lösungen für das Verschlussystem wurde bereits im Rahmen der Vorbemessung geführt. Im Einzelnen gilt: Die Langzeitstabilität für das Salzbetondichtelement wird gemäß /XIE 12/, /MÜL 12a/ durch die Anordnung einer Opferschicht aus Salzbeton gewährleistet. Die Opferschicht ist in der Lage, das Korrosionspotential ggf. zutretender Deckgebirgslösungen und schachtinterner Lösungen, für die Obergrenzen abgeschätzt wurden, abzubauen bzw. zu puffern. Unterhalb des Salzbetondichtelementes ist ein Bischofit-Depot eingebracht, das die Sorelbetonstabilität der sich darunter befindlichen Dichtelemente aus Sorelbeton durch  $MgCl_2$ -Aufsättigung gewährleistet. Da der Lösungsspiegel der  $MgCl_2$ -reichen Salzlösung im Speichervolumen des Infrastrukturbereichs das Salzbetondichtelement bzw. Widerlager im Nachweiszeitraum nicht erreicht /BUH 12b/, ist durch die verbleibende Luftschicht die Salzbetonstabilität im Referenzszenarium für den Funktionszeitraum gesichert. Bei Schachtverschlussversagen setzt Korrosion am Salzbetondichtelement ein. Jedoch wird in diesem Fall von einer ohnehin stark eingeschränkten Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses ausgegangen, so dass der zusätzliche Einfluss der Korrosion als langsamer Prozess auf die bereits vorhandene eingeschränkte Funktionsfähigkeit als vernachlässigbar eingestuft wird. Chemische Einwirkungen sind somit abgedeckt, sie werden im Rahmen der vertieften Nachweisführung deshalb nicht mehr betrachtet.

Zu (2):

Mit Ausnahme des deckgebirgsseitigen Lösungsdruckaufbaus werden die Fluiddrücke bzw. die zeitlichen Verläufe des Fluiddruckaufbaus aus der Vorbemessung (Lösungsdrücke) bzw. aus Anhang D (Gasdrücke) als zeitlich veränderliche Einwirkung übernommen. Die angesetzten Druck-Zeitverläufe werden bei der entsprechenden Modellierung mit angegeben. Dieser Ansatz ist konservativ, da im Rahmen der Vorbemessung von einem instantanen Lösungsdruckaufbau auf das 1. Dichtelement ausgegangen wurde und sich weiterhin die hydraulischen Widerstände mit wachsender Standzeit aufgrund der Gebirgskonvergenz erhöhen.

Bezüglich der Einwirkung Erdbeben erfolgt keine vertiefte Nachweisführung, d. h. Massenkräfte bleiben unberücksichtigt. Es bleibt der Status der Vorbemessung bestehen, die in Bezug auf den untersuchten Sachverhalt, wie die aus dem Erdbeben resultierenden Setzungen der Filterschicht und die damit verbundene mögliche Auflockerung des Bentonitdichtelementes, konservativ ist. Die Auflockerung des Dichtelementes bleibt hinreichend beschränkt. Qualitativ wird die Einwirkung Erdbeben in den Kapiteln 7 und 9 zusammenfassend bewertet.

Eingeprägte Spannungen bzw. Verzerrungen infolge der wärmeentwickelnden Abfälle werden in der vertieften Nachweisführung entweder über Randbedingungen berücksichtigt oder es erfolgen Plausibilitätsbetrachtungen. Die Art der Berücksichtigung wird bei den jeweiligen Modellierungen mit angegeben.

Bauzustände werden rechnerisch nicht betrachtet, diese sind versuchsgestützt über die Prototypen abgehandelt (vgl. /MÜL 12a/). Dementsprechend werden Einwirkungen aus den Bauzuständen ebenso nicht betrachtet. Das betrifft z. B. Temperaturerhöhungen infolge Abbindewärme sowie autogenes Quellen und Schwinden der Betone, die nach kurzer Zeit abgeklungen sind und über die vorliegenden Ergebnisse an den Prototypen versuchsgestützt erfasst sind. Alle anderen Einwirkungen werden in den Modellen – soweit erforderlich – berücksichtigt oder sind über Kopplungen automatisch enthalten.

### **3.2 Bemessungssituationen**

Im Ergebnis der Vorbemessung /MÜL 12a/ wurden in Bezug auf das Verschlussystem als Ganzes die ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ und die Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“ sowie die drei außergewöhnlichen Bemessungssituationen – Schachtverschlussversagen, Streckenverschlussversagen und schnelleres/langsameres Kriechen des Salzgebirges infolge einer Kriechklasse unterhalb bzw. oberhalb der wahrscheinlichen Bandbreite – als maßgebend identifiziert. In Bezug auf die geotechnische Barriere Streckenverschluss ist dabei eine Besonderheit zu beachten. Der Streckenverschluss ist eine zum Schachtverschluss redundante Barriere, deren Hauptaufgabe darin besteht, beim Versagen des Schachtverschlusses die Dichtfunktion zu übernehmen. Damit ist die außergewöhnli-

che Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ gerade die „ständige“, weil planmäßige Bemessungssituation<sup>5</sup> für den Streckenverschluss. Daraus folgt, dass die drei ständigen Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, „Referenzszenarium mit Erdbeben“ und „Versagen des Schachtverschlusses“ für den Streckenverschluss zu behandeln sind, aber nur die zwei außergewöhnlichen Bemessungssituationen „Versagen des Streckenverschlusses“ und das Vorliegen einer Kriechklasse unterhalb bzw. oberhalb der wahrscheinlichen Bandbreite. Bei der Bemessungssituation schnelleres/langsameres Kriechen infolge einer Kriechklasse unterhalb bzw. oberhalb der wahrscheinlichen Bandbreite handelt es sich im technischen Funktionsnachweis um eine modifizierte Einwirkung, die im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation zu behandeln ist.

Die Bemessungssituation „Bauzustände“ ist prinzipiell natürlich auch zu berücksichtigen, wird aber im Rahmen der VSG nicht vertieft untersucht, da die Beherrschbarkeit der Bauzustände, wie bereits erwähnt, über den Nachweis der Herstellbarkeit und die ausgeführten Prototypen praktisch gesichert ist.

Für die Bemessungssituationen „Erdbeben“ und „Streckenverschlussversagen“ erfolgt keine vertiefte Nachweisführung. Es bleibt der Stand der Vorbemessung bestehen, der besagt, dass die Bemessungssituation „Streckenverschlussversagen“ bei funktionsfähigem Schachtverschluss ohne Bedeutung ist. Für die Bemessungssituation „Erdbeben“ gelten die gleichen Anmerkungen wie zur Einwirkung Erdbeben (Kapitel 3.1).

### **3.3 Nachweiskriterien**

Die Nachweiskriterien, die den Grenzzustand beschreiben und die in der vertieften Nachweisführung zur Anwendung kommen, beziehen sich auf Materialkennwerte, die einen Spannungs- oder Verformungsbezug aufweisen. Dabei ist zu beachten, dass den Dichtelementen die drei parallel angeordneten Elemente Auflockerungszone im Salz, Kontaktzone zwischen Baukörper und Salzkontur sowie den Baukörper selbst

---

<sup>5</sup> Das erforderliche Zuverlässigkeitsniveau für den Streckenverschluss ist noch nicht abschließend geklärt. Im vorliegenden Fall wurde für den Schachtverschluss und den Streckenverschluss je eine Versagenswahrscheinlichkeit  $<10^{-4}$ /Funktionszeitraum angesetzt, so dass das kombinierte Versagen eine Wahrscheinlichkeit von  $<10^{-8}$ /Funktionszeitraum besitzt und nicht mehr zu betrachten ist. Durch Abbau von Konservativitäten ist prinzipiell eine Reduktion der Anforderungen denkbar.

zugeordnet sind. Dementsprechend sind für die Auflockerungszone im Salz, die Kontaktzone und den Baukörper eigenständige Nachweiskriterien zu verwenden.

Für die Bewertung der Auflockerungszone im Salz werden das Dilatanzkriterium und das Fluidruckkriterium als Nachweiskriterien herangezogen.

Für die Kontaktzone werden im Falle der kohäsiven Baustoffe die Bemessungswerte der Haftzugfestigkeit und der Scherfestigkeit für Rissbeschränkung als Nachweiskriterien genutzt. Auf die Angabe des Bemessungswertes für die Haftzugfestigkeit wird verzichtet, wenn keine Zugspannungen auftreten. Für den Bentonit wird das Fluidruckkriterium (abdeckend für die effektive Kontaktspannung normal zur Salzkontur) angewendet sowie die Beschränkung der lokalen Auflockerung überprüft.

Für die Baukörper werden im Falle der kohäsiven Baustoffe die materialspezifischen Bruchfestigkeitsgrenzen verwendet. Die Bemessungswerte sind in diesem Fall so gewählt, dass auch die Grenze für Rissbeschränkung eingehalten wird. Für den Baukörper aus Bentonit wird das Fluidruckkriterium verwendet. Dabei kann es während des Aufsättigungsprozesses aufgrund des sich erst während der Aufsättigung ausbildenden Quelldruckes zur Verletzung des Fluidruckkriteriums kommen. Diese Verletzung ist jedoch nicht von Bedeutung, solange sie lokal beschränkt bleibt und gleichzeitig die Auflockerung beschränkt ist. Die Beschränkung der lokalen Auflockerung wird ebenfalls überprüft.

Die quantitative Angabe der Nachweiskriterien erfolgt erst in Zusammenhang mit der Beschreibung der Berechnungsmodelle bzw. Rechenfälle. Diese späte Zuordnung ist damit begründet, dass in Abhängigkeit der verwendeten Berechnungsmodelle und Rechenprogramme die Nachweiskriterien unterschiedlich implementiert sind und ausgewertet werden, so dass die Verwendung gleicher Nachweiskriterien unterschiedliche Parametersätze bedingen kann.

### **3.4 Modellbildung, Substrukturen und zugeordnete Rechenfälle**

Bei den Berechnungen zur vertieften Nachweisführung war der Schwierigkeit zu begegnen, dass für die Aussagen zur Funktionsfähigkeit des Verschlussystems sehr unterschiedliche Skalen bzgl. der geometrischen Auflösung erforderlich sind, da auf kleiner Skala stattfindende Rissbildungen die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen kön-

nen, während die räumlich und zeitlich veränderlichen Randbedingungen infolge der thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers aufgrund der Entfernung insbesondere der Schächte vom Einlagerungsbereich auf der großen Skala eines Fernfeldmodells beschrieben werden. Zur Bearbeitung der Fragestellung wurde deshalb die auf Substrukturen basierende Submodelltechnik eingesetzt, d. h., verschiedene Modelle für unterschiedliche Skalen verwendet. Die Anfangs- und Randbedingungen der den Substrukturen zugeordneten Submodelle basieren dabei auf Ergebnissen anderer Modelle oder werden aus ihnen abgeleitet. Deshalb dienen einige Submodelle und zugeordnete Rechenfälle vorrangig dem Ziel, die Anfangsbedingungen und die zeitlich veränderlichen Randbedingungen für das Submodell auf einer anderen Skala zu bestimmen oder einer Entscheidungsfindung über die weiter zu betrachtenden Rechenfälle und nicht oder nur nachrangig dem Zweck der Nachweisführung. Die Hierarchie der Modelle bzw. Submodelle ist in Abb. 3.2 und Abb. 3.3 am Beispiel des Schachtverschlusses dargestellt.

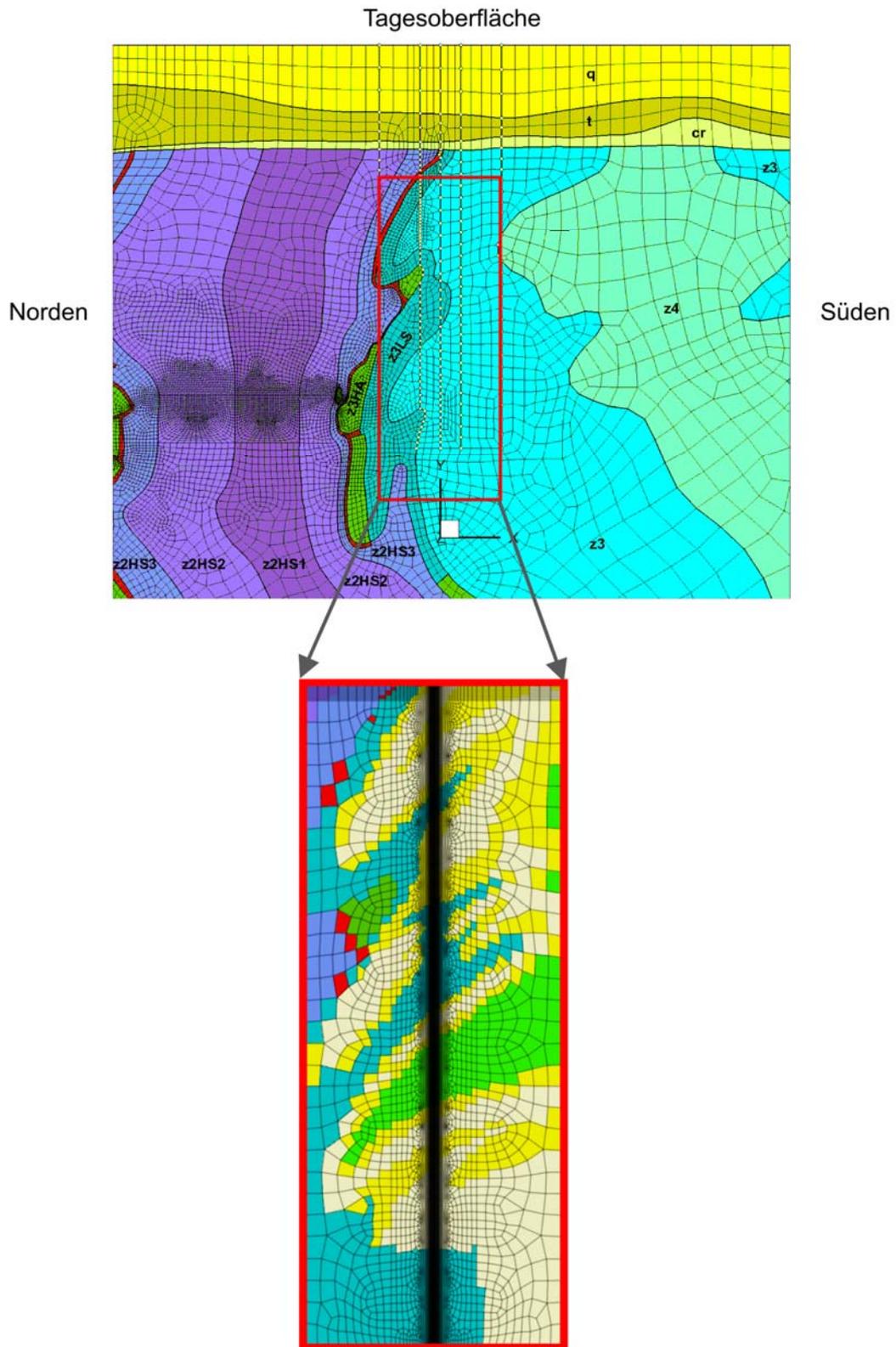
Folgende Submodelle werden betrachtet:

- Schachtverschluss als Ganzes
- Bentonitdichtelement mit Widerlager
- Untere Dichtelemente (Salzbeton und Sorelbeton) einschließlich ihrer Widerlager
- Langzeitdichtung
- ein fiktiver Streckenverschluss, der die vier geplanten Streckenverschlüsse abdeckt<sup>6</sup>

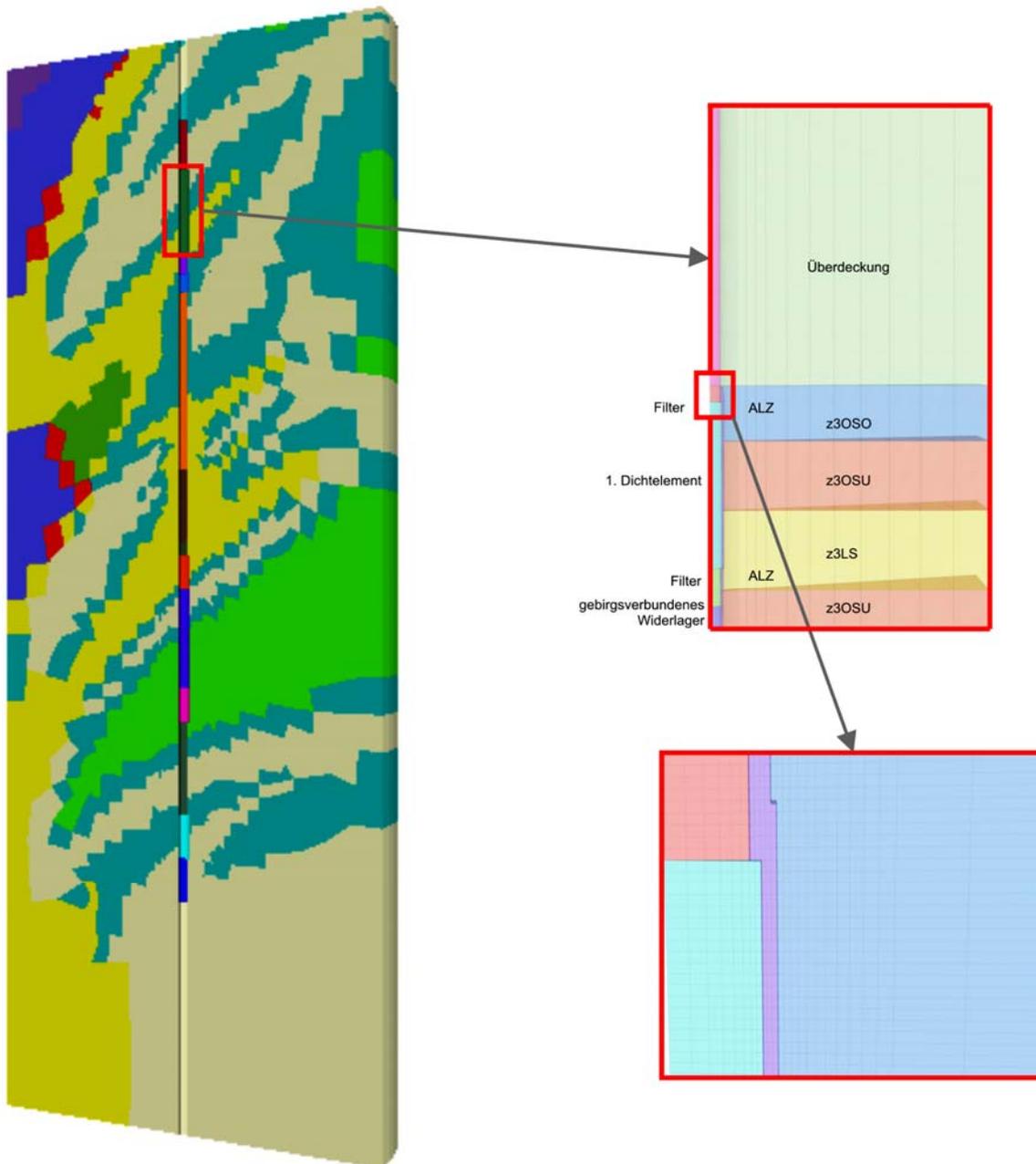
Die geotechnische Charakterisierung der Abdichtungslokationen, die Beschreibung der lokationsspezifischen Randbedingungen sowie die Beschreibung der Einwirkungen, Gefährdungsbilder, Grenzzustände, Nachweiskriterien und Rechenmodelle wird für jedes Modell individuell vorgenommen, da der notwendige Detaillierungsgrad für die einzelnen Submodelle unterschiedlich ist.

---

<sup>6</sup> Ausführliche Erläuterungen zur Ableitung des fiktiven Streckenverschlusses finden sich in Kapitel 8.2.



**Abb. 3.2** Ausschnitt des Submodells „Schacht als Ganzes“ (unten) im Fernfeldmodell (oben) und Darstellung der gegenüber dem Fernfeldmodell erhöhten Auflösung von Detailstrukturen im Submodell



**Abb. 3.3** Dichtelemente und Widerlager im Schacht und beispielhaft Submodell Bentonitdichtelement mit Widerlager sowie Auflösung des Submodells Bentonitdichtelement in Baukörper, Kontaktzone und Auflockerungszone

In Ergänzung zur Vorbemessung werden im Rahmen der vertieften Nachweisführung ausgewählte Rechenfälle betrachtet, die darauf abzielen, den Nachweis der Integrität des Verschlusssystems für die zu betrachtenden Systemzustände mit möglichst geringem Rechenaufwand zu führen und gleichzeitig sicherzustellen, dass der Gültigkeitsbereich für die Berechnungen, der durch die Annahmen der Vorbemessung und der jeweiligen Modellbildung beschränkt ist, nicht verlassen wird. Die Rechenfälle dienen

dementsprechend verschiedenen Zielsetzungen, wobei ein Rechenfall mehrere Zielsetzungen haben kann oder umgekehrt mehrere Rechenfälle eine Zielsetzung. Folgende Zielsetzungen sind dabei zu nennen:

- Absicherung von Annahmen der Vorbemessung
- Absicherung von Modellen, d. h.
  - Zulässigkeit von Modellvereinfachungen
  - Überprüfung von Modellparametern
  - Korrekte Übernahme von zeitabhängigen Anfangs- und Randbedingungen einander zugeordneter Modelle und Submodelle
- Ermittlung von zeitabhängigen Anfangs- und Randbedingungen für Submodelle
- Reduktion der Zahl der Rechenfälle bzw. Berechnungsvarianten
- Vergleich der Ergebnisse verschiedener Modellierungswerkzeuge
- Führung der jeweiligen Einzelnachweise

Die Modelle und Rechenfälle sind daher eng miteinander verknüpft und in einigen Fällen besteht sogar eine Rückkopplung. Die Verknüpfung der Modelle miteinander und ihre vorrangige Zielsetzung innerhalb der Nachweisführung für das gesamte Verschlussystem ist in Anhang A gegeben. Das Verständnis der unterschiedlichen Zielsetzungen der Berechnungsmodelle und Rechenfälle ist deshalb von Bedeutung, da Rechenfälle, die nicht der Nachweisführung dienen, sondern der Ermittlung des wahrscheinlichen Verhaltens i. d. R. auf Mittelwerten und best estimates beruhen, während bei Rechenfällen, die der Nachweisführung dienen, Bemessungswerte, die Ungewissheiten mit abdecken, zur Anwendung kommen.

Die betrachteten Rechenfälle sind nachstehend aufgeführt.

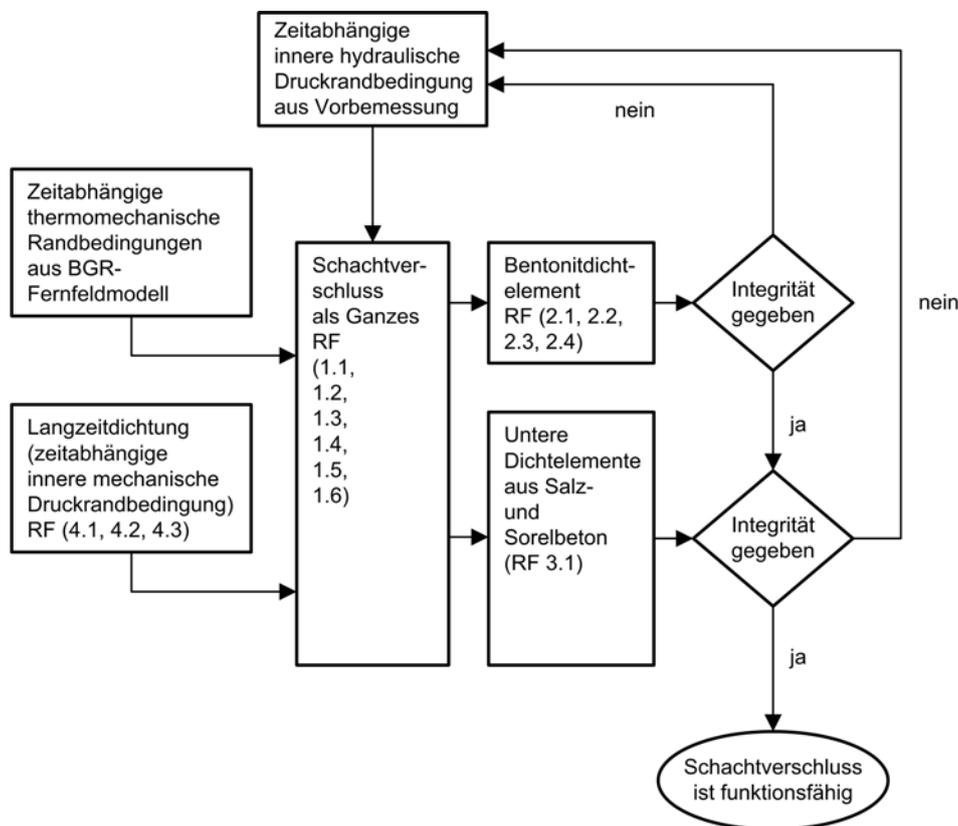
#### 1. Rechenfälle für den Schachtverschluss als Ganzes:

- 1.1. Kalibrierung der Kriechklassen an lokationsspezifischen Standortdaten, Überprüfung der Zulässigkeit des für Komponenten des Schachtverschlusses genutzten effektiven Kompressionsmoduls

- 1.2. Rechenfall „kalter Schacht“, d. h. ohne thermomechanische Einwirkungen des Endlagers auf den Schachtverschluss, ohne Porendruck (entspricht lange trockenem Fall)
- 1.3. Rechenfall „kalter Schacht“ mit Porendruck (Salzlösung)
- 1.4. Validierung thermomechanischer Randbedingungen
- 1.5. Rechenfall „heißer Schacht“, d. h. mit thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers auf den Schachtverschluss ohne Porendruck (entspricht lange trockenem Fall)
- 1.6. Rechenfall „heißer Schacht“ mit Porendruck (Salzlösung)
2. Rechenfälle für das Bentonitdichtelement einschließlich Widerlager und Filterschichten:
  - 2.1 Überprüfung der Modellgüte anhand der Ergebnisse von Konvergenzmessungen
  - 2.2 Überprüfung von Ergebnissen der Vorbemessung zur Ausdehnung der Auflockerungszone
  - 2.3 Modellprüfung anhand der Ergebnisse des in situ Versuchs „Schachtverschluss Salzdetfurth“
  - 2.4 Rechenfall „kalter Schacht“, hydromechanisch gekoppelte Berechnung des Aufsättigungsprozesses mit Salzlösung
3. Rechenfälle für die unteren Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton im Schacht:
  - 3.1. Rechenfall „kalter Schacht“ ohne Porendruck mit Kriechklasse 2
4. Rechenfälle für die Langzeitdichtung:
  - 4.1. Rechenfall „kalter Schacht“ ohne Porendruck mit Kriechklasse 2
  - 4.2. Rechenfall „kalter Schacht“ ohne Porendruck mit Kriechklasse 4
  - 4.3. Rechenfall „kalter Schacht“ ohne Porendruck mit Kriechklasse 5
5. Rechenfälle für einen abdeckenden, aber fiktiven Streckenverschluss:
  - 5.1. Rechenfall „kalte Strecke“ nur Gebirgsdruck (ohne Porendruck), Kriechklasse 3
  - 5.2. Rechenfall „kalte Strecke“ mit Porendruck (Gasdruck), Kriechklasse 3

In Abb. 3.4 ist eine grobe Übersicht über die Zuordnung der Rechenfälle zu den Berechnungsmodellen und ihrer Einordnung in der vertieften Nachweisführung am Beispiel des Schachtverschlusses gegeben. Eine detailliertere Darstellung findet sich in Anhang A. Die Rechenfälle für einen fiktiven Streckenverschluss orientieren sich maßgeblich daran, abdeckende Rechenfälle für die vier geplanten Streckenverschlüsse zu generieren, um den Rechenaufwand beherrschbar zu halten und trotzdem eine belastbare Aussage zur Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse zu erzielen.

Die o. g. Rechenfälle umfassen nach derzeitigem Kenntnisstand (z. B. /DAF 04/) die auslegungsbestimmenden Rechenfälle. Absichernde, zusätzliche Berechnungsfälle und Variantenbetrachtungen wurden im Rahmen des Vorhabens aus terminlichen Gründen nicht berücksichtigt.



**Abb. 3.4** Verknüpfung der Randbedingungen und Submodelle zum Gesamtnachweis am Beispiel des Schachtverschlusses

Die Zusammenführung der Ergebnisse aller dieser Rechenfälle zur vertieften Nachweisführung erfolgt unter Einbeziehung der Ergebnisse zur Vorbemessung dann zunächst für den Schacht- und Streckenverschluss und abschließend für das gesamte

Verschlusssystem. Aus der Gesamtheit der erzielten Ergebnisse wird dann unter Einbeziehung der Ergebnisse der Vorbemessung eine Prognose zur Funktionsfähigkeit des Verschlusssystems abgeleitet, wobei zusätzlich auf Plausibilitätsbetrachtungen und Tendaussagen zurückgegriffen wird.

### **3.5            Verwendete Rechenprogramme**

Die Berechnungen wurden mit dem Rechenprogramm FLAC3D Version 4.0 /ITA 09/ und dem Rechenprogramm CODE\_BRIGTH /COD 02/ durchgeführt.

FLAC3D /ITA 09/ verwendet die Methode der Finiten Differenzen mit einem expliziten Verfahren sowie eine gemischte Diskretisierungstechnik, die eine Vernetzung mit unstrukturierten – also der realen geometrischen und geologischen Situation angepassten – Gittern erlaubt. Es ergeben sich bei gleicher Diskretisierung die gleichen Gleichungssysteme wie bei einer Diskretisierung mit finiten Elementen mit linearen Verschiebungsansätzen.

Bei dem Rechenprogramm FLAC3D handelt es sich um ein kommerziell verfügbares Rechenprogramm. Seine Funktionalität und sein Qualifizierungsstatus können /ITA 09/ entnommen werden. Auf eine weitergehende Erläuterung seiner Funktionalität wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

CODE\_BRIGTH /COD 02/ ist ein Finite-Element-Programm zur gekoppelten Berechnung thermisch-hydraulisch-mechanischer Prozesse mit enger Kopplung, d. h. das gekoppelte Gleichungssystem wird geschlossen in jedem Zeitschritt gelöst. Verschiedene Diskretisierungstechniken (strukturiert, unstrukturiert) sind möglich und können ebenfalls gemischt werden. CODE\_BRIGTH wurde von der Technischen Universität Barcelona ursprünglich zur thermomechanischen Modellierung von Salzgestein entwickelt und später stark erweitert. Hinsichtlich der Fragestellungen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen wurde es bereits in zahlreichen FuE-Projekten eingesetzt, z. B. BAMBUS /BEC 99/, BAMBUS II /BEC 04/, THERESA /WIE 09/, /WIE 10/. Während die Materialansätze für das schädigungsfreie Verhalten von Steinsalz als gesichert angesehen werden können, sind die hier ebenfalls eingesetzten Stoffmodelle zur Beschreibung von Dilatanz und Rekompaktion des festen Steinsalzes sowie der Salzgruskompanktion noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung /HAM 12/.

Für die Beschreibung der Kompaktion von Salzgrus bis in die Größenordnung von wenigen Prozent unter Einwirkung von Feuchtigkeit und Temperatur liegen keine ausreichenden experimentellen Datensätze vor. In der Konsequenz fehlen bisher auch darauf basierende, allgemein akzeptierte Stoffmodelle zur Beschreibung der Kompaktion von Salzgrus. Deshalb werden die in CODE\_BRIGTH implementierten Ansätze zur Beschreibung des Materialverhaltens von Salzgrus und geschädigtem Steinsalz als verfügbares Werkzeug genutzt.

## **4 Vertiefte Nachweisführung für den Schachtverschluss als Ganzes**

Gemäß Tab. A.1 im Anhang A dienen die Berechnungen zum „Schachtverschluss als Ganzes“ überwiegend dem Ziel, die Zahl der Rechenfälle für die nachgeordneten Submodelle zu reduzieren bzw. die Zulässigkeit von Vereinfachungen abzusichern. Die Reduktion der Zahl der Rechenfälle erfolgt im Wesentlichen dadurch, dass Rechenfälle, deren Ergebnisse am Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ bereits zeigen, dass sie nicht auslegungsbestimmend oder sich von den für die Auslegung gewählten nicht wesentlich unterscheiden, im Rahmen der weiterführenden Untersuchungen an den Submodellen nicht mehr betrachtet werden. Zur Überprüfung der Relevanz einzelner Rechenfälle für die Auslegung erfolgen orientierende Auswertungen, ob ausgewählte Nachweiskriterien erfüllt sind. Die abschließende Überprüfung der Nachweiskriterien für die Einzelnachweise im Sinne der Nachweisführung erfolgt an den detaillierteren Submodellen.

Da Kapitel 4 sehr umfangreich ist, wird sein Aufbau im Folgenden erläutert.

Zuerst erfolgt die Charakterisierung der Verschlusslokationen. Sie beinhaltet die Beschreibung der an den Verschlusslokationen vorhandenen für die vertiefte Nachweisführung maßgebenden gebirgsmechanischen Eigenschaften. Anschließend werden die für den „Schachtverschluss als Ganzes“ betrachtete Bemessungssituation, die Einwirkungen, das abgeleitete Gefährdungsbild und der ihm zugeordnete Grenzzustand aufgeführt. Die Nachweiskriterien, auf deren Basis der Grenzzustand bewertet wird, werden angegeben. Im nächsten Schritt erfolgt die Beschreibung aller Berechnungsmodelle und der ihnen zugeordneten Rechenfälle mit ihren jeweiligen Anfangs-, Rand- und Belastungsbedingungen und der Belastungsgeschichte, die sich im Berechnungsablauf widerspiegelt. Dieses Vorgehen wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit gewählt, da die Modelle und Rechenfälle aufeinander aufbauen. In Abhängigkeit der Rand- und Belastungsbedingungen und der sich daraus ergebenden Kopplungen erfolgt dann die Zuordnung der verwendeten Stoffmodelle und Materialparameter. Es schließt sich die Darstellung der Berechnungsergebnisse an, die zum Schluss zusammengefasst werden.

#### 4.1 Charakterisierung der Verschlussloktionen

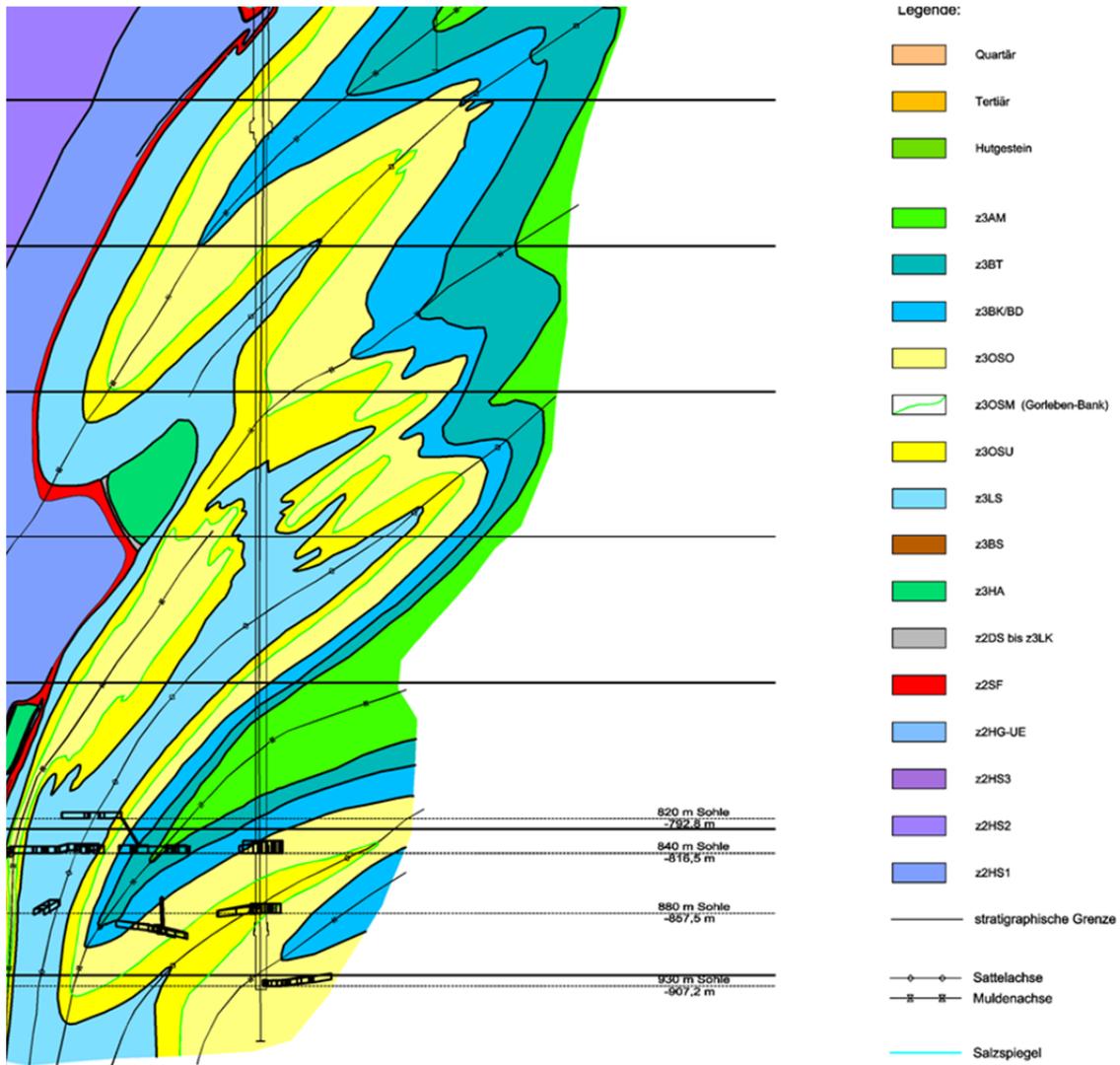
Da der Schacht Gorleben 1 bereits abgeteuft ist, ist eine geologische Detailaufnahme des Schachtes vorhanden /DBE 09/. Im Bereich des Schachtes, in dem der Schachtverschluss geplant ist, sind folgende stratigrafische Einheiten der Leinefolge aufgeschlossen (vgl. Abb. 4.1).

- z3HA (Hauptanhydrit)
- z3AM (Anhydritmittelsalz)
- z3BT (Buntes Salz)
- z3BK/BD (Bank/Bändersalz)
- z3OSO (Oberes Orangesalz)
- z3OSM (Gorleben-Bank)
- z3OSU (Unteres Orangesalz)
- z3LS (Liniensalz)

Weitere zu berücksichtigende stratigrafische Einheiten der Staßfurtfolge sind

- z2SF (Kaliflöz Staßfurt)
- z2HS3 (Kristallbrockensalz)
- z2HS2 (Streifensalz)

Mit Ausnahme des Hauptanhydrits sind die o. g. Salzgesteine kriechfähig. Ihre Kriechfähigkeit wird z. B. wie folgt klassifiziert; für weitergehende Informationen siehe Anhang B.



**Abb. 4.1** Schacht Gorleben 1

Für den Entwurf des Schachtverschlusses wesentliche lokationsspezifische Randbedingungen und lokaler Aufschluss der Gorleben-Bank.

Gl. (4.1) beschreibt die häufig als Referenzansatz für die Temperatur und die Spannungsabhängigkeit des stationären Kriechens genutzte und als Kriechgesetz BGRa bezeichnete Form, die als Basis für die Klassifizierung genutzt wird.

$$\dot{\varepsilon}_{eff}^{cr} = V \cdot A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*}\right)^n \quad (4.1)$$

mit

- V = 1
- A = 0,18 d<sup>-1</sup>
- n = 5
- σ\* = 1 MPa Bezugsspannung (Normierung)
- Q = 54 kJ/mol
- R = 8,314 · 10<sup>-3</sup> kJ/(mol · K)

Die Kriecheigenschaften von Salzgesteinen zeigen eine erhebliche, zumeist lithologische Streuung (z. B. infolge von Unterschieden der Größe und Verteilung von Nebengemengteilen, der Korngröße der Steinsalzmatrix) um mehrere Größenordnungen. Zur Beschreibung dieser Streuung sind von der BGR die sogenannten Kriechklassen eingeführt worden, um das Kriechverhalten einfach zu quantifizieren. Dabei wird der Vorfaktor V in Gl. (4.1) gemäß Gl. (4.2) modifiziert:

$$V = 2^K/32 \quad \text{mit } K = \text{Kriechklasse} \quad (4.2)$$

In Tab. 4.1 ist die Zuordnung der Kriechklassen K zum Vorfaktor V aufgelistet. Der Vorfaktor beschreibt die für die jeweilige stratigrafische Einheit und das angesetzte Stoffmodell empfohlene Kriechklasse, vgl. Tab. 4.1 und Tab. 4.2.

**Tab. 4.1** Relation zwischen Vorfaktoren und Kriechklassen

Kriechklasse Kkl	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vorfaktor V	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4	6	8

Durch die Einführung eines weiteren, zusätzlichen Multiplikationsfaktors wird die Bandbreite der Kriechfähigkeit für schnelles und langsames Kriechen innerhalb einer Kriechklasse berücksichtigt, vgl. Tab. 4.2.

Der Hauptanhydrit (z3HA) ist nicht kriechfähig, er wird als elastisch angenommen. Weiterhin sind das Hutgestein sowie tertiäre und quartäre Deckgebirgsschichten durchteuft, die ebenfalls als elastisch angenommen werden.

**Tab. 4.2** Bandbreite der Kriechfähigkeit der stratigrafischen Einheiten und empfohlenes Stoffmodell /HEU 11/. Die Stoffmodelle sind im Anhang in Tab. B.2, Tab. B.3 und Tab. B.4 ausführlich dargestellt.

Stratigrafische Einheiten		Stoffmodell	Kkl	V	Bandbreite der Kriechklassen (Multiplikationsfaktor)	
					Schnelles Kriechen	Langsames Kriechen
Anhydrit-mittelsalz	z3AM	BGR <sub>a</sub>	1	1/16	1-fach	½-fach
Buntes Salz	z3BT		1	1/16	./.	./.
Bank-/ Bändersalz	z3BK/BD		3	1/4	2-fach	¼-fach
Oberes Orangesalz	z3OSO		2	1/8	4-fach	½-fach
Unteres Orangesalz	z3OSU		3	1/4	4-fach	½-fach
Liniensalz	z3LS		5	1	2-fach	¼-fach
	z2DS bis z3LK	BGR <sub>SF</sub>	./.	./.	./.	./.
Kaliflöz Staßfurt	z2SF					
Kristallbrockensalz	z2HS3	BGR <sub>EB1</sub>	2	1/8	2-fach	½-fach
Streifensalz	z2HS2		6	2	2-fach	½-fach

Im Schacht Gorleben 1 wurden beim Schachtabteufen fünf Erkundungshorizonte eingerichtet: Erkundungshorizont EH-350, EH-450, EH-550, EH-650 und EH-720. EH steht für Erkundungshorizont, die folgende Zahl gibt das Niveau des Erkundungshorizontes in m mit Bezug NN an. In den Erkundungshorizonten sind Messdaten von langdauernden Konvergenzmessungen vorhanden. Diese werden zur Kalibrierung der Kriechklassen herangezogen und so die Kriechfähigkeit der Salzgesteine an den Verschlussloktionen genauer bestimmt.

Der ungestörte Gebirgsdruck ergibt sich teufenspezifisch, die angesetzte Dichte beträgt für Salzgesteine und Deckgebirgsschichten einheitlich 2.240 kg/m<sup>3</sup> (Wichte

0,022 MN/m<sup>3</sup>) /HEU 11/. Diese Annahme basiert auf Messungen der BGR, aus denen gefolgert wurde, dass in Gorleben ein isotroper Primärspannungszustand vorliegt und dass die vertikale Spannungsverteilung der theoretischen Auflast durch die Überdeckung entspricht /BGR 03/.

Als initiales Temperaturfeld wird der Temperaturlog der Schachtvorbohrung Go5001 /BOR 91/ angesetzt. Daraus ergibt sich vereinfacht ein Wert von 26 °C in 300 m Teufe und 36 °C in 950 m Teufe, was einem konstanten Teufengradienten von 1,54 K/100 m entspricht.

#### **4.2 Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“**

Für die ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ werden die nachfolgend dargestellten Einwirkungen, ein Gefährdungsbild und ein zu betrachtender Grenzzustand identifiziert. Die den Grenzzustand beschreibenden Widerstände, die auch als Nachweiskriterien dienen, werden im Anschluss aufgeführt.

##### **Betrachtete mechanische Einwirkungen**

Eigengewicht, Gebirgsdruck, Lösungsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen, Kriechen des Salzbetons und des Sorelbetons, temperaturinduzierte Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge thermischer Expansion und Kontraktion

##### **Nicht betrachtete mechanische Einwirkungen**

Strömungskräfte: Für das großräumige Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ erfolgt keine hydromechanisch gekoppelte Betrachtung. Strömungskräfte werden deshalb nicht erfasst. Ihr Einfluss wird an detaillierten Submodellen untersucht.

Massenkräfte: Die Einwirkung Erdbeben wird im Rahmen der vertieften Nachweisführung rechnerisch nicht behandelt, siehe Vorbemessung.

Quellen und Schwinden: Quellen wird in ausgewählten Submodellen erfasst oder konservativ vernachlässigt, (autogenes) Schwinden ist den Bauzuständen zuzurechnen und wird deshalb nicht betrachtet.

## Betrachtete Gefährdungsbilder

Da im Gesamtmodell wesentliche Einwirkungen, die aber einen höheren Detaillierungsgrad erfordern, nicht erfasst werden, wird nur das Gefährdungsbild Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone betrachtet<sup>7</sup>.

## Betrachteter Grenzzustand

Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone

## Nachweiskriterien

Um die Rissbeschränkung in der Salzkontur nachzuweisen, kommen nachstehend aufgeführte Nachweiskriterien zur Anwendung.

## Dilatanzbedingung (Mikrorissgrenze) nach /CRI 98/

$$\frac{\tau}{\sigma^*} \leq -0,01697 \cdot \left( \frac{\sigma_0}{\sigma^*} \right)^2 + 0,8996 \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma^*} \quad (4.3)$$

mit

$$\tau = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \text{Oktaederschubspannung [MPa]}$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{mittlere Spannung (oder auch hydrostatischer Druck) [MPa]}$$

$$\sigma^* = 1 \text{ MPa} \quad \text{Bezugsspannung}$$

Die Einhaltung der Dilatanzbedingung im Steinsalz stellt sicher, dass es bei einer mechanischen Beanspruchung (z. B. bei Auffahrung eines Grubenhohlraums) zu keiner schädigungsbedingten Zunahme der Permeabilität, d. h. Ausbildung einer Auflockerungszone kommt. Die Dilatanzbedingung ist in der Invariantendarstellung nur für mittlere Spannungen  $\sigma_0 \geq 0$  definiert. Da es beim Auftreten von Zugspannungen auch unterhalb einer Zugfestigkeitsgrenze  $\sigma_t$  zur Schädigung kommen kann, wird das

---

<sup>7</sup> Ergänzend werden Spannungsverläufe im Kontaktbereich ausgewertet, die zum Vergleich von Berechnungsergebnissen herangezogen werden.

Dilatanzkriterium zusätzlich durch eine Überprüfung ergänzt, ob Zugspannungen auftreten.

In der Auswertung wird der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung angegeben. Der Ausnutzungsgrad stellt das Verhältnis zwischen vorhandenem Spannungszustand und dem Grenzspannungszustand, der zu Dilatanz führt, dar.

### Fluiddruckkriterium

Zur Bewertung der hydraulischen Beanspruchung wird der Nachweis der Rissbeschränkung zusätzlich über die Einhaltung des Fluiddruckkriteriums nach Gleichung (4.4a) und (4.4b) geführt. Das Fluiddruckkriterium wird konservativ für die kleinste Hauptspannung betrachtet:

$$\sigma_3 > p_{fl} \quad (4.4a)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - p_{fl} > 0 \quad (4.4b)$$

mit

$\sigma_3$ :	kleinste totale Hauptspannung
$p_{fl}$ :	Fluiddruck (Porendruck)
$\sigma'_3$ :	kleinste, effektive Hauptspannung

In den Gleichungen (4.4a) und (4.4b) erhalten Druckspannungen positive Vorzeichen, und es wird für die Hauptspannung die Konvention  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  verwendet<sup>8</sup>.

Das Fluiddruckkriterium wird im Falle rein (thermo-)mechanischer Berechnungen ohne explizite Berücksichtigung des Porendrucks für den fiktiven Porendruck ausgewertet, d. h. mit einem hypothetisch anstehenden hydraulischen Druck verglichen (Gl. (4.4a)). Erfolgt eine gekoppelte Betrachtung bzw. wird in der Berechnung ein Porendruckfeld berücksichtigt, wird das Fluiddruckkriterium in Bezug auf die effektiven Spannungen lokal ausgewertet (Gl. (4.4b)).

---

<sup>8</sup> Für die kleinste Hauptspannung werden im Folgenden die beiden Bezeichnungen  $\sigma_3$  und  $\sigma_{\min}$  verwendet, für die kleinsten effektiven Hauptspannungen  $\sigma'_3$  und  $\sigma'_{\min}$ .

## Verformungsbeschränkung

Im Rahmen der Untersuchungen zum Schachtverschluss als Ganzes wird weiterhin überprüft, ob die thermomechanisch induzierten Verformungen den FEP *Diapirismus* abdecken. Dies ist gegeben, wenn die thermomechanisch induzierten Hebungen im Bereich des Schachtes 1 m überschreiten.

### 4.3 Berechnungsmodelle

Für die in Kapitel 3.4 aufgelisteten Rechenfälle 1.1 bis 1.6 und die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ sollen möglichst wenig unterschiedliche Rechenmodelle verwendet werden. Jedoch müssen sie wegen ihrer Nutzung als Submodell zum BGR-Fernfeldmodell die Übergabe von zeitlich veränderlichen Randbedingungen erlauben. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an das Berechnungsmodell für den „Schachtverschluss als Ganzes“.

Das Berechnungsmodell muss in der Lage sein

- die thermomechanischen Randbedingungen aus dem Fernfeldmodell der BGR<sup>9</sup> /KOC 12a/ (2D-Modell, ebener Verzerrungszustand) einschließlich der geologischen Modellstrukturen sinnvoll und nachprüfbar zu übernehmen,
- zur Überprüfung gewählte Referenzlinien zur Datenkontrolle abzubilden,
- die kreisförmige Schachtgeometrie abzubilden,
- das Modellgebiet so aufzulösen, dass eine Anpassung (Kalibrierung) der Berechnungsergebnisse an die Konvergenzdaten der Erkundungshorizonte erfolgen kann.

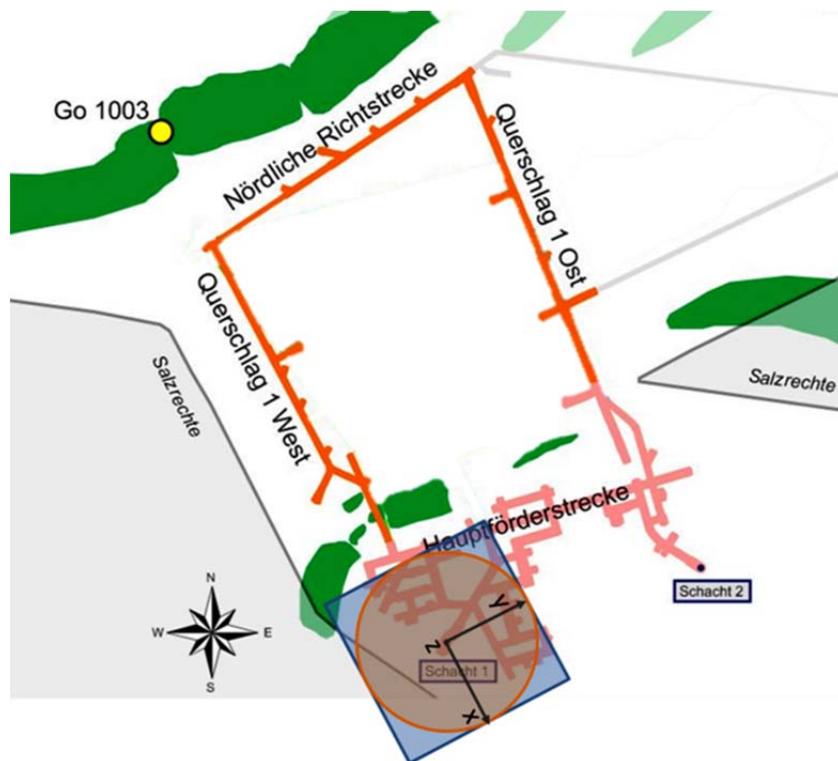
Aus den Anforderungen an das Berechnungsmodell ergibt sich die Notwendigkeit, ein 3D-Modell mit in die 3. Raumrichtung extrudierter Geologie „Querschlag 1 West“ zu erzeugen, da der geologische Vertikalschnitt „Querschlag 1 West“ auch als Basismodell für die Fernfeldmodellierung der BGR diene /KOC 12a/.

---

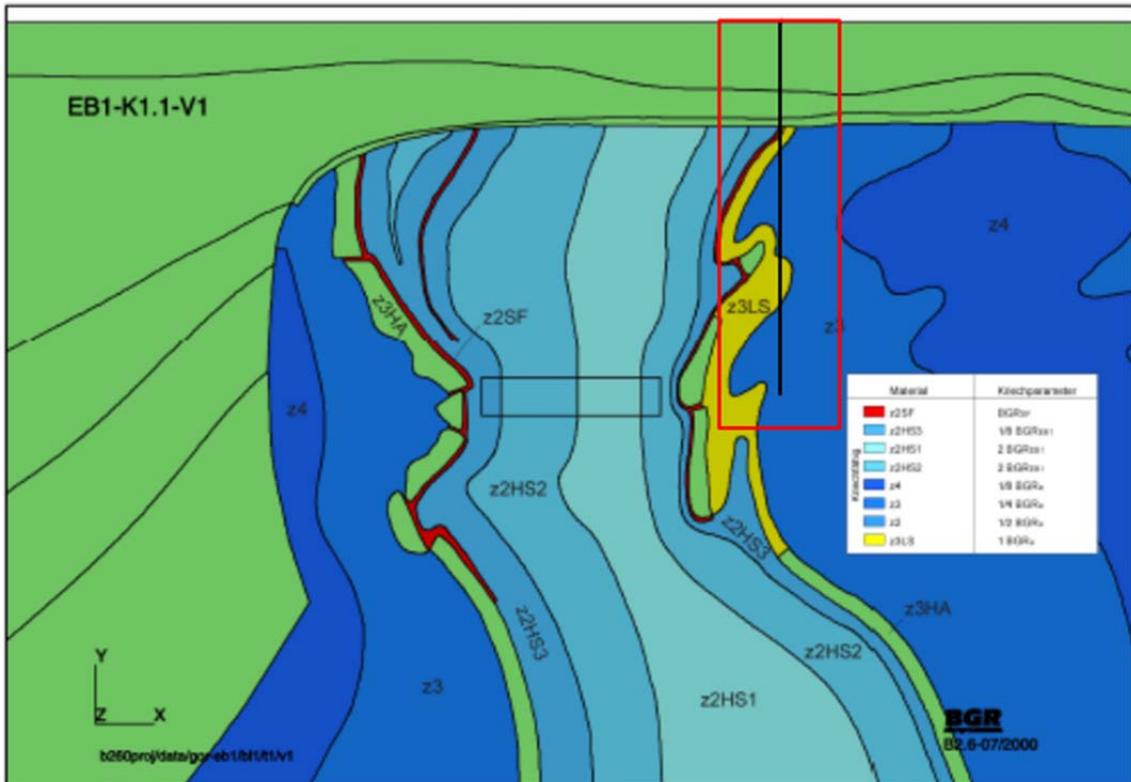
<sup>9</sup> Zur Übernahme der Randbedingungen wäre prinzipiell auch das etwas kleinräumigere Modell des IfG geeignet. Da die Berechnungsergebnisse durch die höhere Auflösung des Modells später vorlagen als die BGR-Daten, konnten diese im Rahmen des Projektes nicht berücksichtigt werden. In /KOC 12a/ sind die Berechnungsergebnisse von BGR und IfG gemeinsam dargestellt. Sie weisen eine hohe Übereinstimmung auf.

### 4.3.1 Modellgebiet

Das im Horizontalschnitt quadratische Modellgebiet umfasst den Schachtsicherheitspfeiler, der festgelegt wurde, um die thermomechanischen Auswirkungen aus dem Endlagerbergwerk auf den Schacht zu begrenzen (Abb. 4.2). Dieser Schachtsicherheitspfeiler ist kreisrund und hat einen Radius von 150 m /ENG 93/. Das Modellgebiet umfasst also eine Fläche von 300 m x 300 m. Die Angemessenheit der Wahl dieser Modellgebietsgrenzen wird durch Berechnungen zum Einfluss der Folgen des Wetterdurchschlages für den Schacht Gorleben 1 bestätigt; siehe dazu die gewählte Modellgröße in /HEU 08/. In Abb. 4.3 sind die Modellgebietsgrenzen im Basismodell für die BGR-Fernfeldmodellierung dargestellt, das auf dem geologischen Vertikalschnitt „Querschlag 1 West“ beruht.



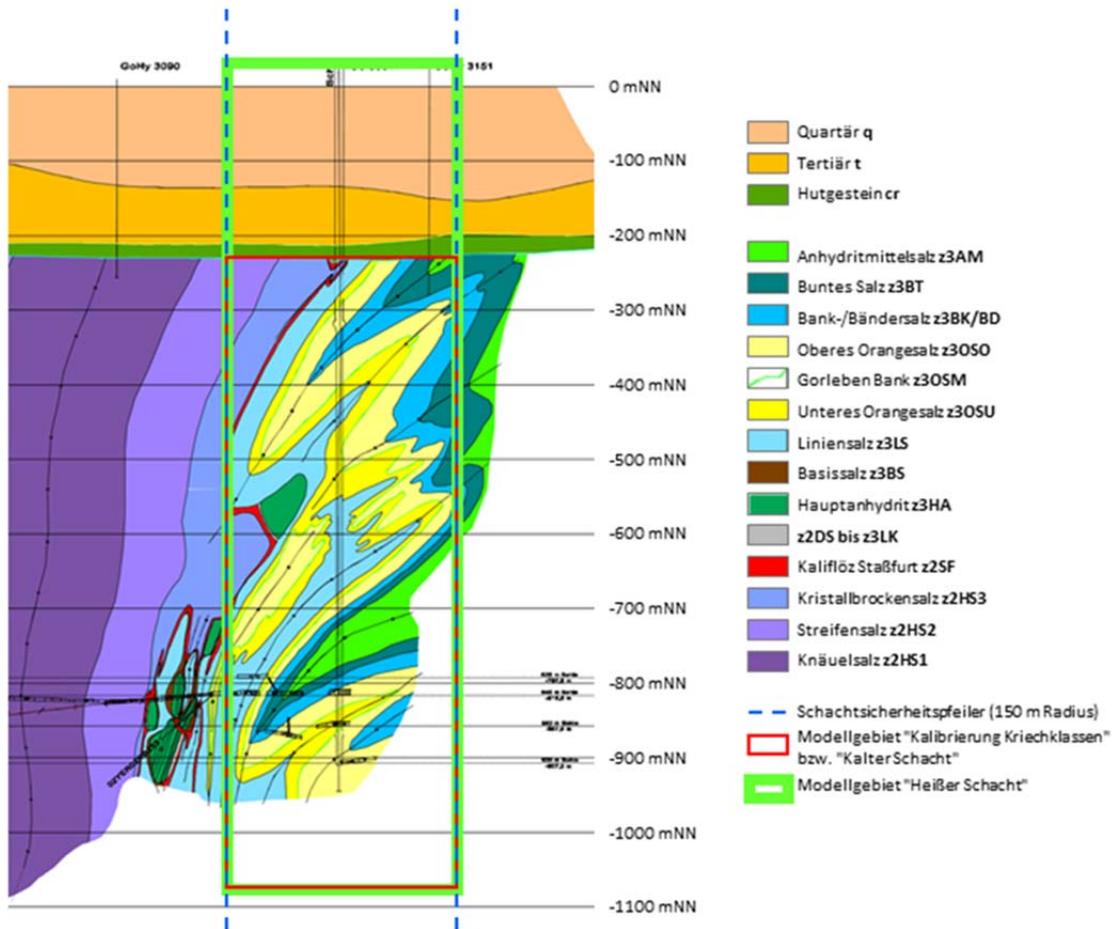
**Abb. 4.2** Endlagerspezifischer Schachtsicherheitspfeiler des Schachtes Gorleben 1 in Bezug zur Lage der Erkundungsstrecken des EB1 und horizontalen Ausdehnung des Modellgebiets



**Abb. 4.3** Basismodell für die Fernfeldmodellierung – Modellausschnitt im Nahfeld der Einlagerung (EB1-K1.1-V1)

Die rote Umrandung zeigt die Modellgebietsgrenzen für den Schachtverschluss als Ganzes, die schwarze Umrandung zeigt die angenommene wärmefreisetzende Zone des Endlagers.

In Abb. 4.4 ist das gewählte Modellgebiet in Bezug zu den stratigrafischen Einheiten der Verschlusslokalationen gegeben. Die gestrichelte blaue Linie zeigt die horizontale Ausdehnung des Modellgebiets im geologischen Vertikalschnitt „Querschlag 1 West“. In vertikaler Richtung werden zwei unterschiedliche Modellgebiete verwendet. Das rot umrandete, kleinere Modellgebiet 1 beinhaltet in vertikaler Richtung das Salinar etwa vom Salzspiegel (ca. 260 m Teufe) bis zu einer Teufe von 1.100 m (233,4 mNN – 1.073,4 mNN), das Modellgebiet hat damit eine vertikale Erstreckung von 840 m. Das grün umrandete Modellgebiet 2 beinhaltet das Salinar sowie das Deckgebirge bis zur Geländeoberkante und weist eine Teufe von 1.100 m auf.



**Abb. 4.4** Modellgebiet im geologischen Vertikalschnitt „Querschlag 1 West“ /BOR 08/

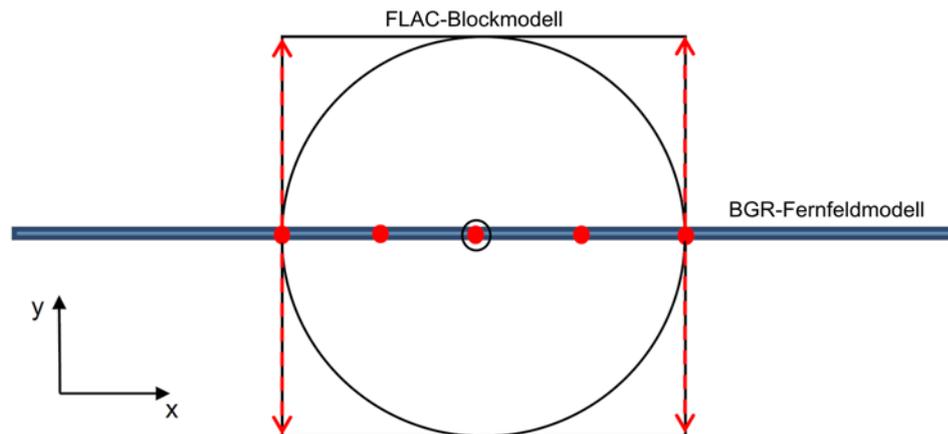
Zur Berücksichtigung der thermomechanischen Einwirkungen infolge der eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle werden die thermomechanischen Randbedingungen der BGR-Fernfeldmodellierungen übernommen /KOC 12a/. Bei dem Fernfeldmodell handelt es sich um ein 2D-Modell im ebenen Verzerrungszustand.

Zur Übernahme der Randbedingungen sowie zur Modellprüfung wurden von der BGR aus den mit dem Fernfeldmodell durchgeführten Berechnungen die zeitlich veränderlichen Spannungen, Verschiebungen und Temperaturen an fünf vertikalen Referenzlinien bereitgestellt:  $x = -150$  m,  $x = -50$  m,  $x = 0$  m (Schachtachse),  $x = 50$  m und  $x = 150$  m. In Abb. 4.5 sind die Berechnungsknoten gelb hervorgehoben, für die die Daten bereitgestellt wurden. Die vertikalen Referenzlinien wurden im Vorfeld abgestimmt, so



Modell und die adäquate Übernahme der Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar.

Für ein 3D-Blockmodell, wie in Abb. 4.6 schematisch dargestellt, können die Ergebnisse aus dem BGR-Fernfeldmodell für den entsprechenden gesamten Rand angesetzt werden, d. h. im vorliegenden Fall auf den mit roten Pfeilen markierten Modellrändern.



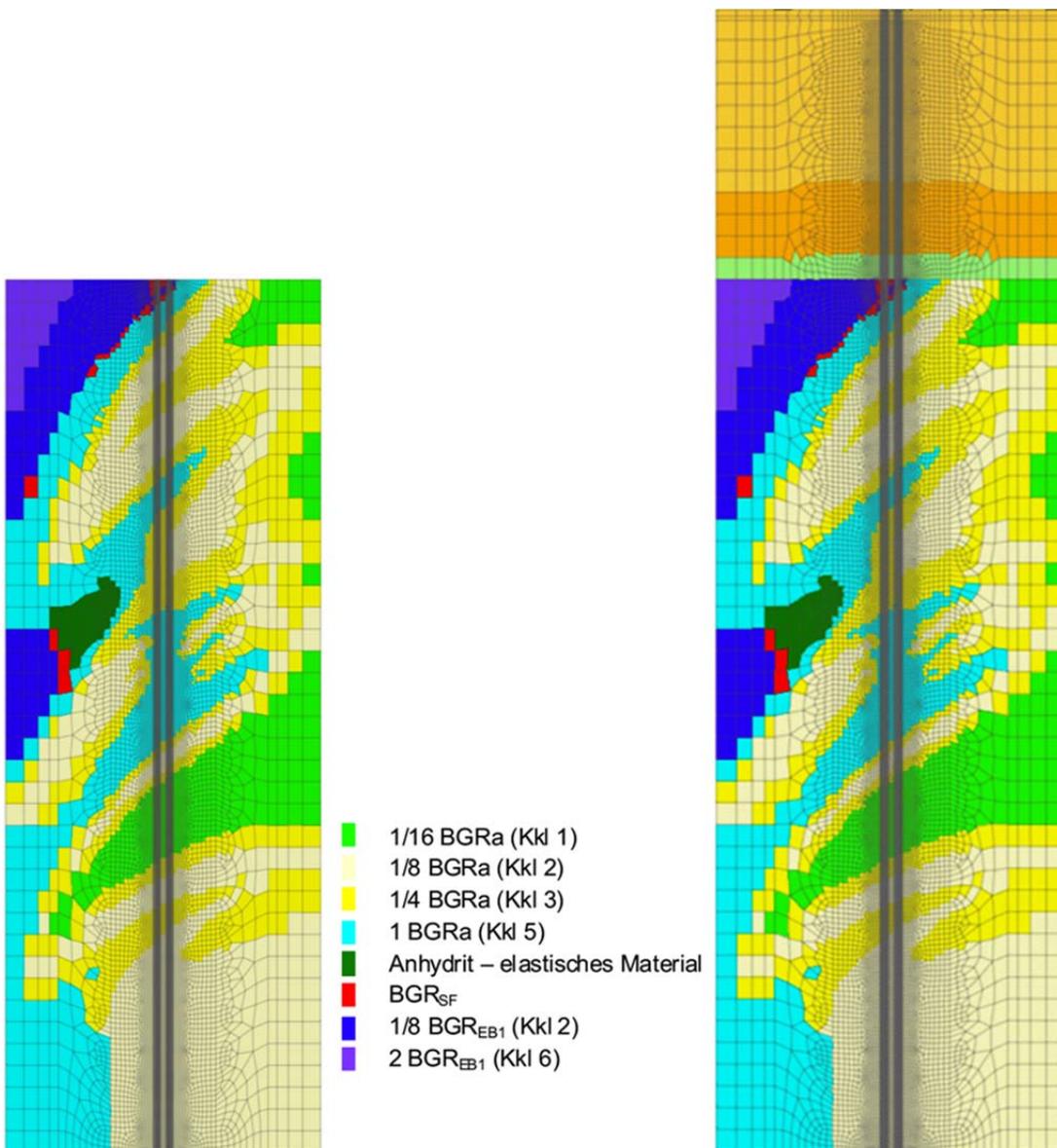
**Abb. 4.6** Draufsicht Modellgebiete (nicht maßstabsgetreu)

In Abb. 4.6 ist neben dem BGR-Fernfeldmodell und dem FLAC-Blockmodell der endlagerspezifische Schachtsicherheitspfeiler von 150 m um die Schachtachse dargestellt. Die roten Punkte markieren die Positionen, an denen Verschiebungen, Spannungen und Temperaturen aus den BGR-Fernfeldmodellierungen in unterschiedlichen Teufen zur Verfügung gestellt wurden. Die rot gestrichelten Pfeile zeigen die Verwendung der BGR-Punktinformationen am entsprechenden Rand des Blockmodells an, d. h., im Blockmodell werden die Referenzlinien zu Ebenen.

### 4.3.2 Diskretisierung

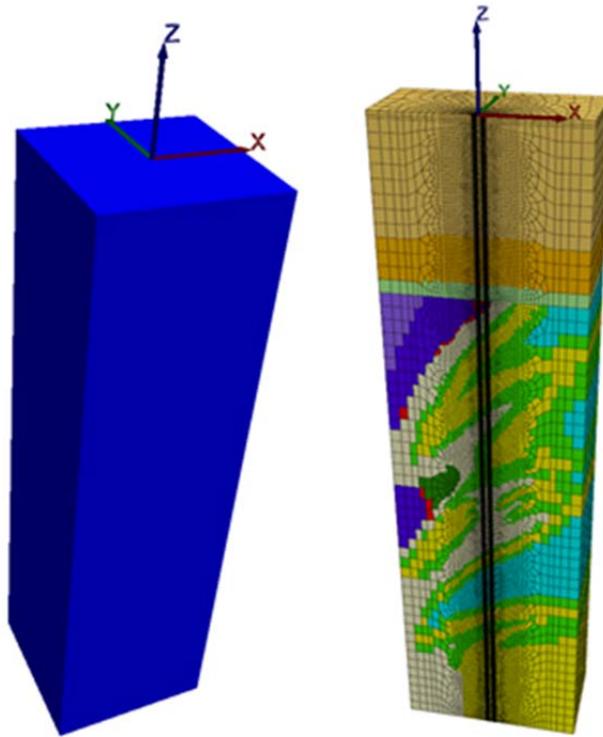
Das Blockmodell, das Modellgebiet 1 zugeordnet ist, wurde mit 716.524 Zonen diskretisiert. Die kleinste Zone beinhaltet ein Volumen von  $0,11 \text{ m}^3$ , die größte Zone  $14.378,74 \text{ m}^3$ . Das Verhältnis von Länge zu Breite ist in der Nähe zum Schachtstoß besonders groß. Dort sind die Zonen 2 m hoch und 0,1 m breit, was zu einem maximalen Länge-zu-Breite-Verhältnis von 20 führt. Die geringe Breite der Modellzonen am Schachtstoß war durch die Nachschnitttiefen von 50 cm, 60 cm und 80 cm vorgegeben, vgl. Tab. 2.1. Die vertikale Diskretisierung musste jedoch grob gehalten werden, um die Gesamtzahl der Modellzonen zu beschränken. In Abb. 4.7 und Abb. 4.8 ist die

feine Modelldiskretisierung im Schachtbereich erkennbar, die zum Modellrand hin gröber wird (bis ca. 25 m Kantenlänge).



**Abb. 4.7** Diskretisierung der Modellgebiete 1 (links) und 2 (rechts) für das Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ und Zuordnung der empfohlenen Kriechklassen gemäß Tab. 4.2

Das Blockmodell, das Modellgebiet 2 zugeordnet ist, wurde mit 929.400 Zonen diskretisiert. Für das Salinar wurde dasselbe Modellnetz wie für Modellgebiet 1 verwendet, die maximalen und minimalen Zonenabmessungen und Volumina entsprechen denen des Modellgebiets 1, vgl. ebenfalls Abb. 4.7 und Abb. 4.8.



**Abb. 4.8** Berechnungsmodell für den „Schachtverschluss als Ganzes“ im Modellgebiet 2

Links die Geometrie des Modells, rechts ein Schnitt bei  $y = 0$  m mit Darstellung des Modellnetzes und der Homogenbereiche.

Die Implementierung der geologischen Strukturen in das Blockmodell erfolgte, indem zunächst die Modellgebiete vernetzt wurden, ohne die stratigrafischen Einheiten zu berücksichtigen<sup>11</sup>. Den Zonen wurde anschließend eine stratigrafische Einheit zugewiesen, vgl. Abb. 4.1, Abb. 4.4 und Abb. 4.7. Stratigrafische Einheiten gleicher Kriechfähigkeit wurden zu Homogenbereichen zusammengefasst (Abb. 4.7), wobei die in Tab. 4.2 empfohlenen Kriechklassen als Basis dienten.

#### 4.4 Rechenfälle

Wie aus Abb. 3.4 und Anhang A hervorgeht, bilden die Ergebnisse einiger Rechenfälle die Grundlage für die Auswahl weiterführender Rechenfälle. In den weiterführenden

---

<sup>11</sup> Eine detailliertere Berücksichtigung der stratigrafischen Einheiten hätte zu einer hier nicht bearbeitbaren Modellgröße geführt.

Rechenfällen werden zunehmend komplexere Randbedingungen berücksichtigt. Die Beschreibung der Rechenfälle erfolgt daher ausgehend von den grundlegenden Rechenfällen zu den komplexeren, weiterführenden Rechenfällen.

#### **4.4.1 Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“**

Der Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“ dient dem Ziel, die Kriechklassen anhand der vorliegenden in situ Messdaten zum Konvergenzverhalten an den Erkundungshorizonten zu kalibrieren. Die in situ Messdaten sind unabhängig von den ermittelten Messdaten im Labor und werden auch zur Betriebsüberwachung des Bergwerks herangezogen. Sie unterliegen einem umfangreichen Prüfverfahren und sind regelmäßig bzw. auf Anforderung der Bergbehörde vorzulegen. Unerkannte Messfehler können ausgeschlossen werden. Durch die Kalibrierung an den in situ Messdaten werden die anhand von Laborversuchen ermittelten Bandbreiten der Kriechklassen eingegrenzt. Liegen die Multiplikationsfaktoren für die kalibrierten Kriechklassen im Rahmen der Bandbreite gemäß Tab. 4.1, können Kriechklassen (mit Auswirkungen), die oberhalb/oder unterhalb der erwarteten Bandbreite liegen, ausgeschlossen werden. D. h., die modifizierte Einwirkung einer Kriechklasse oberhalb/unterhalb der erwarteten Bandbreite, die im Rahmen einer wenig wahrscheinlichen Bemessungssituation zu betrachten wäre, braucht nicht behandelt zu werden, da sie in Realität nicht auftritt oder ohne Auswirkung ist. Die Zahl der zu betrachtenden Berechnungsvarianten kann so prinzipiell reduziert werden.

Im Rahmen des Rechenfalls „Kalibrierung Kriechklassen“ ist die Auskühlung des Schachtes durch die Wettertemperaturen zu berücksichtigen, um eine falsche Kalibrierung zu vermeiden.

Die Ergebnisse der Kalibrierungsberechnungen zum Konvergenzverhalten werden auch zur Ermittlung der Flächenkonvergenzrate genutzt, mit deren Hilfe überprüft wird, ob die Anwendung des vereinfachten Stoffmodells „effektiver Kompressionsmodul“ zulässig ist, mit dessen Hilfe das Kriechverhalten von Salzbeton und Sorelbeton vereinfacht erfasst wird. Bisher gilt die Anwendung des effektiven Kompressionsmoduls für eine volumetrische Verzerrungsrate von  $\geq 1E-10$  1/s als gesichert, bei kleineren Verzerrungsraten wird der effektive Kompressionsmodul als Approximation zwar ebenfalls angewendet, jedoch besteht noch Absicherungsbedarf.

Das für den Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“ verwendete Blockmodell umfasst Modellgebiet 1. In Tab. 4.3 ist das Blockmodell in Bezug auf das Deckgebirge, den Schachtinnenausbau sowie den geplanten Schachtverschluss vertikal eingeordnet. Die Modelloberkante liegt rund 90 m über der Oberkante des geplanten Schachtverschlusses. Der vertikale Abstand der Modellunterkante zur Unterkante des Schachtverschlusses bzw. des Schachtes beträgt rund 170 m.

**Tab. 4.3** Vertikale Einordnung des Blockmodells in Bezug auf das Deckgebirge, den Schachtinnenausbau (kursiv) sowie den geplanten Schachtverschluss (kursiv)

	Teufe	
	m u. GOK	mNN
Geländeoberkante	0	26,6
Unterkante Quartär	165,69	-139,09
Unterkante Tertiär	236,21	-209,61
Unterkante Hutgestein	259,71	-233,11
Modelloberkante	260,0	-233,4
<i>Unterkante Innenausbau</i>	<i>340,6</i>	<i>-314</i>
<i>Unterkante Innenausbaufundament</i>	<i>345,6</i>	<i>-319</i>
<i>Unterkante Stützringbereich</i>	<i>349,5</i>	<i>-322,9</i>
<i>Oberkante Schachtverschluss</i>	<i>349,5</i>	<i>-322,9</i>
<i>Unterkante Schacht = Unterkante Schachtverschluss</i>	<i>933,2</i>	<i>-906,6</i>
Modellunterkante	1.100	-1.073,4

#### **4.4.1.1 Anfangs- und Randbedingungen**

Der untere und die seitlichen Modellränder werden mit Verschiebungsrandbedingungen beaufschlagt, so dass Bewegungen in die jeweilige Normalenrichtung verhindert werden, während tangentiale Verschiebungen entlang des jeweiligen Randes möglich sind. Der obere Modellrand ist frei verschieblich.

#### **Gebirgsspannung**

Es wird von einem isotropen Primärspannungszustand ausgegangen. Auf den oberen Modellrand wird zur Erfassung der im Modell nicht abgebildeten Deckgebirgsschichten eine vertikale Spannungsrandbedingung in Höhe von 5,72 MPa aufgegeben.

#### **Temperatur**

Bei der „Kalibrierung der Kriechklassen“ ist zu beachten, dass der Schacht im Laufe seiner Standzeit auskühlt. Dieser Sachverhalt ist bei der Kalibrierung zu berücksichtigen, da andernfalls ein zu geringes Kriechvermögen kalibriert wird. Aus diesem Grunde werden an den äußeren Modellrändern konstante Temperaturrendbedingungen angesetzt, in der Schachtröhre jedoch zeitlich veränderliche Temperaturrendbedingungen berücksichtigt.

#### **Äußere Modellränder**

An den äußeren Modellrändern sind die Temperaturen entsprechend dem geothermischen Gradienten von 1,54 K/100 m angesetzt und fixiert. An der Modellunterkante wurde ein Wert von 311,5 K angesetzt. Damit wird angenommen, dass die seitlichen Modellränder und der untere Modellrand von der Auskühlung des Schachtes nicht betroffen sind, da sie weit genug entfernt liegen.

Am oberen Rand, also an der Modelloberkante, wird eine Wärmeflussdichte von 81,55 mW/m<sup>2</sup> angesetzt. Der Wert ist basierend auf dem geothermischen Gradienten dahingehend abgeschätzt, dass die Temperatur an der Modelloberkante im ungestörten Temperaturfeld konstant bleibt. Es wird also so viel Wärme abgeführt, wie bedingt durch die thermisch fixierten Modellränder ins Modell hineingeleitet wird. Durch das Ansetzen der Wärmeflussdichte bleibt die geothermisch eingetragene Wärmemenge im Berechnungsmodell konstant.

## Schachtstoß

Der freigelegte Schachtstoß wird über die gesamte Modellzeit mit einer Temperaturrandbedingung beaufschlagt, die die Schachtwettertemperatur im jahreszeitlichen Gang beschreibt. Für den Bereich unterhalb des Schachtausbaus (-314 mNN), wo das Steinsalz direkt am Schachtstoß ansteht, wurde eine teufen- und zeitabhängige Temperaturfunktion aufgestellt, die die Temperatur der Schachtwetter nachbildet. Die Temperaturfunktion wurde an die Messdaten der fünf Erkundungshorizonte /DBE 07/, /DBE 10/ angepasst. Da die gemessenen Temperaturverläufe Sprünge sowie abschnittsweise unterschiedliche Amplituden und Trends aufweisen, wurden vier zeitliche Abschnitte ausgewiesen, für die jeweils eine eigene teufen- und zeitabhängige Temperaturfunktion angepasst wurde (siehe Tab. 4.4 und Tab. 4.5). Die angepassten Temperaturfunktionen sind in Tab. 4.5 aufgelistet und in Abb. 4.9 den gemessenen Temperaturen an den Erkundungshorizonten gegenübergestellt.

**Tab. 4.4** Zeitliche Abschnitte für teufen- und zeitabhängige Temperaturfunktion

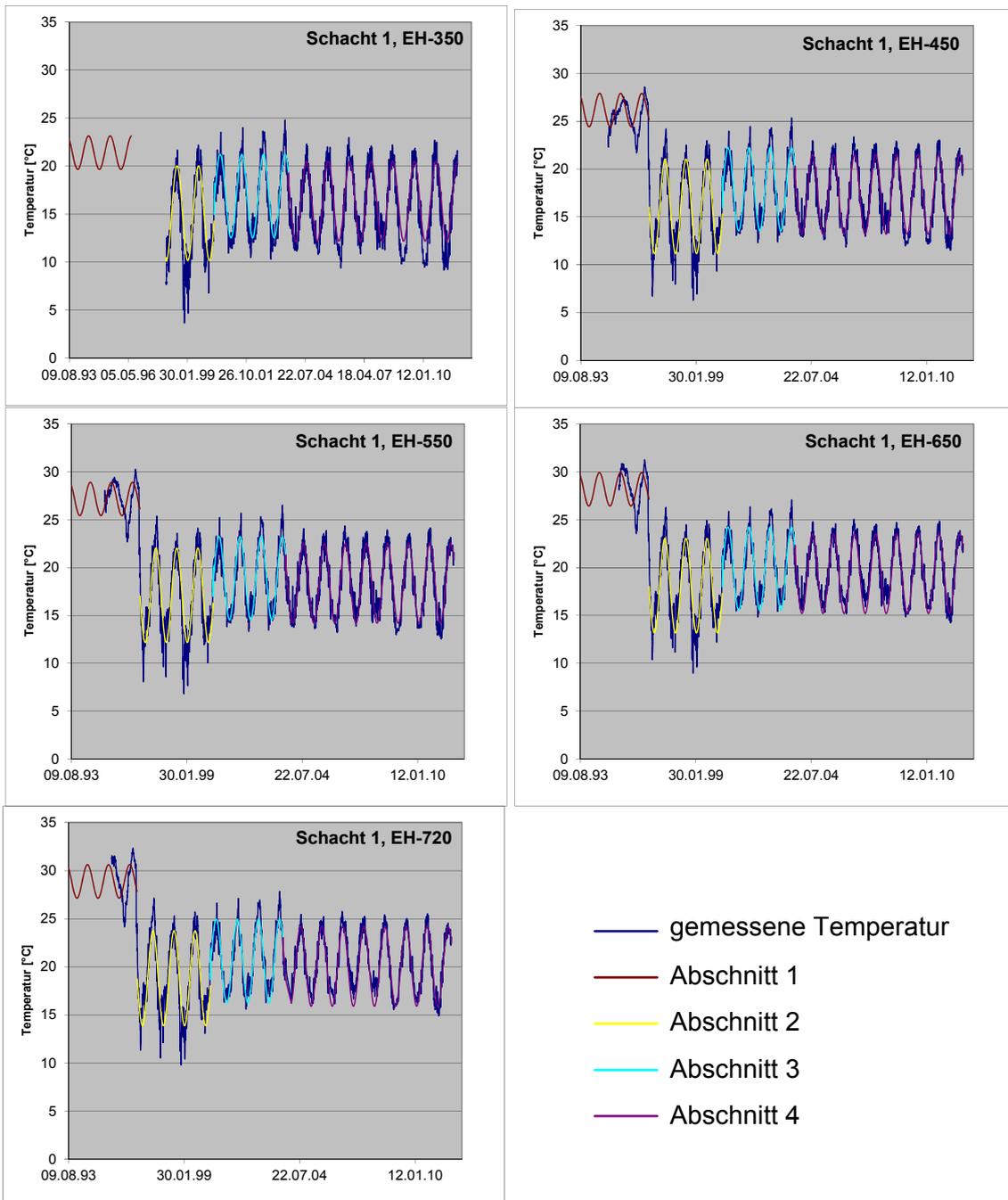
Abschnitt		Datum	Zeitpunkt [d] (Nullpunkt = Beginn Modellzeit: 9.8.1993)
1	Bis	07.11.1996	1.186
2	Von	08.11.1996	1.187
	Bis	01.05.2000	2.457
3	Von	02.05.2000	2.458
	Bis	11.10.2003	3.715
4	Ab	12.10.2003	3.716

**Tab. 4.5** Temperaturrandbedingung,  $t =$  Zeit [d] ab Beginn Modellzeit,  $h =$  Höhenlage [mNN]

Abschnitt	T [K]	C
1	$T = 1,75 \cdot \cos(0,0172 \cdot (t - 31,71)) + C + 273,15$	$C = 28,87 + (-720 + h)/100$
2	$T = 4,94 \cdot \cos(0,0172 \cdot t) + C + 273,15$	$C = 18,81 + (-720 + h)/100$
3	$T = 4,36 \cdot \cos(0,0172 \cdot (t - 25,61)) + C + 273,15$	$C = 20,59 + (-720 + h)/100$
4	$T = 4,16 \cdot \cos(0,0172 \cdot (t - 12,416)) + C + 273,15$	$C = 20,05 + (-720 + h)/100$

Bei den gemessenen Temperaturen, die der Temperaturfunktion zugrunde liegen, handelt es sich um Messwerte in einer Tiefe von 0,4 m vom Stoß, daher wird bei der Beaufschlagung der Temperatur dieser Gebirgsbereich erfasst. Bedingt durch die Dis-

kreisierung des Modellgebiets wird, ausgehend vom Schachtstoß, die Temperatur-  
randbedingung auf die ersten beiden Modellzonen aufgeben.



**Abb. 4.9** Cosinusförmige Temperaturfunktionen zur Beschreibung der Temperatur-  
randbedingung infolge der Schachtwettertemperatur

#### 4.4.1.2 Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf

Das Teufen des Schachtes wird in folgenden Schritten modelliert:

1. Herstellung eines lithostatischen Spannungszustandes (Primärspannungszustand) bei ungestörtem geothermischen Temperaturfeld
2. Instantane Auffahrung im Bereich des Schachtinnenausbaus (Sekundärspannungszustand)
3. Instantaner Einbau des Innenausbaufundaments und der Stützringe, ab hier Beaufschlagung des Schachtstoßes auf den die Asphaltfuge einwirkt, mit einer Normalspannung in Höhe des Druckes in der Asphaltfuge
4. Abschnittsweises Teufen des Schachtes, jeweils simuliert als Sequenz von instantanem Teufen und Kriechberechnung bis zum nächsten Teufenabschnitt
5. Nach Abteufen des Schachtes Fortsetzung der Kriechberechnung bis  $t_{\text{Modell}} = 18,4 \text{ a}$

Die Temperaturrandbedingung wird entsprechend ihrem Zeitverlauf nach Tab. 4.4 und Tab. 4.5 nach dem Abteufen am freigelegten Schachtstoß aufgebracht. Die im Berechnungsablauf erfassten Ereignisse sind in Tab. 4.6 detailliert aufgeführt.

**Tab. 4.6** Berechnungsablauf Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“

Datum	Modellzeit [a]	Modellzeit [d]	Ereignis
9.8.1993	0,00	0	Instantanes Abteufen bis zum Schachtfundament und Erstellung des Schachttinnenausbau
3.6.1994	0,82	298	Instantanes Abteufen bis EH-350, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
29.09.1994	1,14	416	Instantanes Abteufen bis EH-450, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
18.01.1995	1,44	527	Instantanes Abteufen bis EH-550, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
12.04.1995	1,67	611	Instantanes Abteufen bis EH-650, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
30.06.1995	1,89	690	Instantanes Abteufen bis EH-720, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
22.11.1995	2,29	835	Instantanes Abteufen bis EH-840, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
15.10.1996	3,18	1163	Wetterdurchschlag
10.11.1997	4,25	1554	Instantanes Abteufen bis Endteufe (933,2 m), Temperaturrandbedingung Schachtstoß
20.12.1999	6,36	2324	Beginn des kontinuierlichen Betriebs der Schachtwetterheizung bei Außentemperaturen $\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
01.10.2000	7,15	2610	Beginn Moratorium
01.01.2012	18,40	6719	Ende der Berechnung

#### 4.4.1.3 Berechnungsvarianten zur „Kalibrierung Kriechklassen“

Wie aus Tab. 4.2 zu entnehmen ist, ist neben der empfohlenen Kriechklasse für die meisten stratigrafischen Einheiten eine Bandbreite für die Kriechklassen ausgewiesen. Für die Kalibrierung wurde ausgehend von den empfohlenen Kriechklassen die Kriechfähigkeit variiert, indem ein zusätzlicher Multiplikationsfaktor berücksichtigt wurde. Zur Kalibrierung wurden folgende vier Variationsberechnungen durchgeführt:

- Variante 1: Referenzfall (empfohlene Kriechklassen für die jeweiligen stratigraphischen Einheiten gemäß Tab. 4.2)
- Variante 2: 0,5faches Kriechen gegenüber Referenzfall
- Variante 3: 2faches Kriechen gegenüber Referenzfall
- Variante 4: 4faches Kriechen gegenüber Referenzfall

#### **4.4.2 Rechenfälle „kalter Schacht“**

Mit den Rechenfällen „kalter Schacht“ wird analysiert, wie sich der Schachtverschluss unter isothermen Randbedingungen, d. h. ohne die thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers, verhält. Hintergrund dieser Modellierung ist, dass die Einlagerungsfelder im gewählten BGR-Fernfeldmodell (Kapitel 4.3) näher am Schacht liegen als im 3D-Modell der BGR /KOC 12a/, d. h. die thermischen Einwirkungen werden tendenziell überschätzt. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wurden vorsorglich die Rechenfälle zum „kalten Schacht“ untersucht, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers sich positiv auf die frühe Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses auswirken. Die Berücksichtigung der höheren thermomechanischen Einwirkungen bewirkt bei vergleichsweise naher Anordnung der Einlagerungsfelder einen schnellen Druckaufbau in der Auflockerungszone und der Kontaktzone im Bereich der Funktionselemente des Schachtverschlusses. Für diesen Fall ist die Berücksichtigung der thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers nicht konservativ.

Weiterhin lassen sich aus den Rechenfällen „kalter Schacht“ Erkenntnisse darüber ableiten, wie sich eine größere Entfernung der Einlagerungsfelder von den Schächten auf den Schachtverschluss auswirkt. Das ist insofern von Vorteil, da der Standort Gorleben nur im Bereich des EB1 erkundet ist und im Zuge der weiteren Erkundung der Umstand eintreten kann, dass Einlagerungsfelder mit wärmeentwickelnden Abfällen in größerer Entfernung von den Schächten angeordnet werden. Auf Basis der Rechenfälle „kalter Schacht“ lässt sich dieser Sachverhalt bewerten.

Für den „kalten Schacht“ wurden für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ zwei Rechenfälle untersucht, der Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ (lange trockener Schacht) und „kalter Schacht mit Porendruck“ (Lösungs-

druckaufbau in den Funktionselementen gemäß Vorbemessung /MÜL 12a/, /BUH 12b/).

Im Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ wird die Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses mit Hilfe einer rein mechanischen Berechnung bewertet, wobei das Porendruckfeld bei der Modellierung nicht berücksichtigt wird. Die Bewertungskriterien Dilatanzbedingung und Fluidruckkriterium für den fiktiven Porendruck werden in der Rest-ALZ ausgewertet (Kapitel 4.2). Der Rechenfall dient im Wesentlichen dazu, für die Submodelle, auf deren Grundlage die Nachweisführung erfolgt, die auslegungsbestimmenden Randbedingungen einzuschätzen und so die Zahl der zu betrachtenden Berechnungsvarianten für die Submodelle zu reduzieren. Erste orientierende Auswertungen bzgl. der Einhaltung der o. g. Kriterien werden vorgenommen, weiterhin erfolgt die Auswertung des zeitabhängigen Spannungsverlaufes an ausgewählten Stützstellen. Die Auswertungen werden in die Bewertung einbezogen sowie zu Vergleichszwecken herangezogen.

Der Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ hat insofern experimentellen Charakter, als der Einfluss eines Porendruckfeldes untersucht wird, ohne dass eine hydromechanisch gekoppelte Berechnung durchgeführt wird. Das zeitabhängige Porendruckfeld in den Komponenten des Schachtverschlusses, das mit Hilfe rein hydraulischer Berechnungen mit LOPOS /BUH 12b/, /MÜL 12a/ bestimmt wurde, wird mit Hilfe des hydromechanischen Kopplungsparameters Biot-Koeffizient als Porendruckfeld aufgebracht und sein Einfluss auf das Spannungsfeld untersucht<sup>12</sup>. Aufgrund ihres experimentellen Charakters werden die Ergebnisse ausschließlich qualitativ zur Bewertung herangezogen.

In Bezug auf das verwendete Modellgebiet 1 und die Diskretisierung ist das für die Rechenfälle „kalter Schacht“ genutzte Berechnungsmodell identisch mit dem Berechnungsmodell für den Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“. Auch die mechanischen und die thermischen Randbedingungen an den inneren und äußeren Modellrändern stimmen mit dem Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“ während der offenen Standzeit des Schachtes überein. Bei Einbau der Funktionselemente des Schachtverschlusses

---

<sup>12</sup> Die Vorgehensweise stellt eine Analogie zum Vorgehen bei thermomechanischen Analysen dar, wenn ein mit einem anderen Rechenprogramm ermitteltes zeitabhängiges Temperaturfeld aufgebracht wird und seine Auswirkungen auf das Spannungsfeld untersucht werden.

ses entfällt sukzessive die innere thermische Randbedingung der wechselnden Wittertemperatur an der Schachtkontur. Ab dem Modellzeitpunkt 111,77 Jahre wird im Vorgriff auf das Berechnungsergebnis nur noch eine rein mechanische Berechnung durchgeführt, da die Störung des initialen Temperaturfeldes infolge der Schachtauskühlung abgeklungen ist.

#### **4.4.2.1 Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“**

Für den Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ ist der Berechnungsablauf nachstehend angegeben. Zusätzlich wird die im Folgenden beschriebene Druckrandbedingung berücksichtigt.

##### **Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf**

Der Berechnungsablauf gemäß Tab. 4.5 wird um den in Tab. 2.2 angegebenen Bauablauf für das Verschlussystem ergänzt. Die Berechnung stellt somit eine Weiterführung des Rechenfalls „Kalibrierung Kriechklassen“ dar. Insgesamt sind im Berechnungsablauf die in Tab. 4.7 aufgeführten Ereignisse erfasst. Die Berechnung weist als Modellzeitpunkt auch den Beginn des Endlagerbetriebes aus, obwohl die thermomechanischen Einwirkungen in den Rechenfällen zum „kalten Schacht“ nicht berücksichtigt werden. Die Modellzeit umfasst einen Zeitraum von 10.000 Jahren, der gewählt wurde, um einen Vergleich mit den Berechnungsergebnissen zu den Rechenfällen zum „heißen Schacht“ zuzulassen.

**Tab. 4.7** Berechnungsablauf Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“

Datum	Modell-Zeit [a]	Modell-zeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
9. 8.1993	0,00	0		Instantanes Abteufen bis zum Schachtfundament und Erstellung des Schachtinnenausbaus
3. 6.1994	0,82	298		Instantanes Abteufen bis EH-350, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
29.09.1994	1,14	416		Instantanes Abteufen bis EH-450, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
18.1.1995	1,44	527		Instantanes Abteufen bis EH-550, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
12.4.1995	1,67	611		Instantanes Abteufen bis EH-650, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
0.6.1995	1,89	690		Instantanes Abteufen bis EH-720, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
22.11.1995	2,29	835		Instantanes Abteufen bis EH-840, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
15.10.1996	3,18	1.163		Wetterdurchschlag
10.11.1997	4,25	1.554		Instantanes Abteufen bis Endteufe (933,2 m), Temperaturrandbedingung Schachtstoß
20.12.1999	6,36	2.324		Beginn des kontinuierlichen Betriebs der Schachtwetterheizung bei Außentemperaturen $\leq 1^\circ\text{C}$
01.10.2000	7,15	2.610		Beginn Moratorium
1.1.2012	18,40	6.719		Berechnungsende Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“

Zeitverschiebung zum Beginn des Endlagerbetriebs – Annahme: Es herrschen stationäre Verhältnisse, der Schachtstoß wird kontinuierlich beraubt, so dass die Auflockerungszone unverändert bleibt

1.1.2035	41,40	15.120		Zeitstützstelle: Beginn des Endlagerbetriebs
<b>1.1.2055</b>	<b>61,40</b>	<b>22.425</b>	<b>0,0</b>	<b>Nullpunkt für alle Ergebnisdarstellungen Zeitstützstelle: Instantane Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle (BGR)</b>
1.1.2075	81,40	29.730	20,0	Ende Einlagerungsbetrieb, Beginn Rückbau
31.12.2076	83,40	30.461	22,0	Beginn Verfüllung Infrastrukturbereich
2.7.2078	84,90	31.008	23,5	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantane Erstellung Widerlager (Sorelbeton)
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantaner Nachschnitt für 3. Dichtelement (Sorelbeton)
25. 3.2079	85,63	31.275	24,23	Instantane Erstellung 3. Dichtelement (Sorelbeton)
23.9.2080	87,13	31.823	25,76	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basalt-/ Serpentinitschotter, techn. Bischofit)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten

**Tab. 4.7** Berechnungsablauf Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“  
(Fortsetzung)

Datum	Modell-Zeit [a]	Modell-Zeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
9.3.2081	87,58	31.990	26,19	Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
9.6.2081	87,83	32.081	26,44	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für 2. Dichtelement (Salzbeton)
8.9.2081	88,08	32.173	26,69	Instantane Erstellung 2. Dichtelement (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
8.12.2081	88,33	32.264	26,94	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)
16.12.2081	88,35	32.272	26,96	Instantane Erstellung Opferschicht (Salzbeton)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.11.2082	89,23	32.591	27,83	Instantane Erstellung „Langzeitdichtung“ (feuchter Salzgrus)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
17.10.2083	90,19	32.941	28,79	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basaltschotter)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.4.2084	90,65	33.109	29,25	Instantaner Nachschnitt für gebirgsverbundenes Widerlager (Salzbeton)
1.7.2084	90,90	33.200	29,5	Instantane Erstellung gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager (Salzbeton)
16.8.2084	91,02	33.246	29,63	Instantane Erstellung Filter (Sand/Kies/Basaltsplitt)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
30.1.2085	91,48	33.413	30,08	Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement (1. Bauabschnitt)
9.5.2085	91,75	33.512	30,35	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 1. Bauabschnitt
				Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement (2. Bauabschnitt)
16.8.2085	92,02	33.611	30,63	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 2. Bauabschnitt
1.12.2085	92,31	33.717	30,92	Instantane Erstellung Filter/Aufsättigung (Sand/Kies/Basaltsplitt)
31.12.2085	92,40	33.748	31,00	Verfüllung Schachtröhre
11.10.2166	173,17	63.250	111,77	Beginn merkbarer Versatzdruckaufbau in Langzeitdichtung (feuchter Salzgrus)
11.10.2166	173,17	63.250	111,77	Initiales Temperaturfeld wiederhergestellt, Beginn der rein mechanischen Berechnung
			10.000,00	Ende der Berechnung

### Zusätzliche innere Druckrandbedingung Salzgruskompaktion

Der aus der konvergenzinduzierten Salzgruskompaktion resultierende Versatzdruck in der Langzeitdichtung wurde in einem Submodell gesondert ermittelt (siehe Kapitel 6, Abb. 6.5 sowie die Übersicht in Abb. 3.4).

Der mit zunehmender Zeit sich aufbauende Versatzdruck wird als innere Druckrandbedingung auf den Schachtstoß sowie die Ober- und Unterkante der an das Funktions-

element „Langzeitdichtung“ angrenzenden Funktionselemente aufgegeben, wobei die Anfangsphase vernachlässigt wurde. Für die Ermittlung des Versatzdruckaufbaus wurde die „Langzeitdichtung“ vertikal in zwei Abschnitte unterteilt. Oben wurde der für den Horizont EH-550 mit einem Kriechen der Kriechklasse 5 berechnete Versatzdruck verwendet; im unteren Abschnitt wurde der für den EH-650 mit einem Kriechen der Kriechklasse 4 berechnete Versatzdruck angesetzt (vgl. dazu auch Abb. 4.10 und Abb. 4.11). Diese Kriechklassen wurden ausgewählt, weil sie an den Erkundungshorizonten EH-550 und EH-650 im Bereich des Schachtstoßes vorherrschen.

#### **4.4.2.2 Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“**

Für den Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ wird der Berechnungsablauf des Rechenfalls „kalter Schacht ohne Porendruck“ um den zeitabhängigen Aufbau der Porendrücke erweitert, die als innere Druckrandbedingung zusätzlich berücksichtigt werden.

#### **Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf**

Die Berechnung stellt eine Weiterführung des Rechenfalls „Kalibrierung Kriechklassen“ dar und ist während des Baus des Schachtverschlusses mit dem Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ identisch. Anschließend wird zusätzlich der zeitabhängige Porendruck aufgebracht. Ab diesem Zeitpunkt unterscheidet sich der Berechnungsablauf des Rechenfalls „kalter Schacht mit Porendruck“ vom Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“. Insgesamt sind im Rahmen des Berechnungsablaufs die in Tab. 4.8 aufgeführten Ereignisse erfasst. Die Berechnung weist als Modellzeitpunkt ebenfalls den Beginn des Endlagerbetriebes auf, obwohl die thermomechanischen Einwirkungen in den Rechenfällen zum „kalten Schacht“ nicht berücksichtigt werden. Die Modellzeit umfasst einen Zeitraum von 10.000 Jahren, der gewählt wurde, um einen Vergleich mit den Berechnungsergebnissen zu den Rechenfällen zum „heißen Schacht“ zuzulassen.

**Tab. 4.8** Berechnungsablauf Rechenfälle „kalter Schacht mit Porendruck“

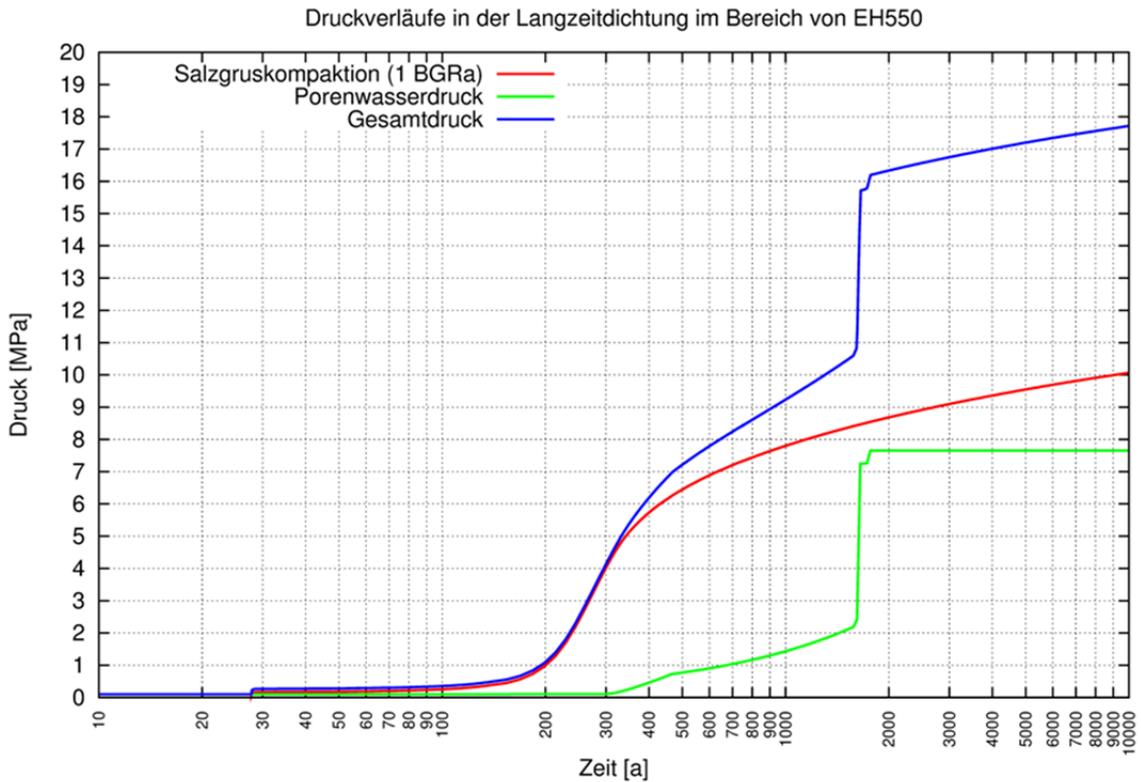
Datum	Modellzeit [a]	Modellzeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
9. 8.1993	0,00	0		Instantanes Abteufen bis zum Schachtfundament und Erstellung des Schachtinnenausbaus
3. 6.1994	0,82	298		Instantanes Abteufen bis EH-350, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
29.09.1994	1,14	416		Instantanes Abteufen bis EH-450, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
18.1.1995	1,44	527		Instantanes Abteufen bis EH-550, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
12.4.1995	1,67	611		Instantanes Abteufen bis EH-650, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
0.6.1995	1,89	690		Instantanes Abteufen bis EH-720, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
22.11.1995	2,29	835		Instantanes Abteufen bis EH-840, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
15.10.1996	3,18	1.163		Wetterdurchschlag
10.11.1997	4,25	1.554		Instantanes Abteufen bis Endteufe (933,2 m), Temperaturrandbedingung Schachtstoß
20.12.1999	6,36	2.324		Beginn des kontinuierlichen Betriebs der Schachtwetterheizung bei Außentemperaturen $\leq 1\text{ °C}$
01.10.2000	7,15	2.610		Beginn Moratorium
1.1.2012	18,40	6.719		Berechnungsende Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“
Zeitverschiebung zum Beginn des Endlagerbetriebs – Annahme: Es herrschen stationäre Verhältnisse, der Schachtstoß wird kontinuierlich beraubt, so dass die Auflockerungszone unverändert bleibt				
1.1.2035	41,40	15.120		Zeitstützstelle: Beginn des Endlagerbetriebs
<b>1.1.2055</b>	<b>61,40</b>	<b>22.425</b>	<b>0,0</b>	<b>Nullpunkt für alle Ergebnisdarstellungen Zeitstützstelle: Instantane Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle (BGR)</b>
1.1.2075	81,40	29.730	20,0	Ende Einlagerungsbetrieb, Beginn Rückbau
31.12.2076	83,4	30.461	22,0	Beginn Verfüllung Infrastrukturbereich
2.7.2078	84,9	31.008	23,5	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantane Erstellung Widerlager (Sorelbeton)
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantaner Nachschnitt für 3. Dichtelement (Sorelbeton)

**Tab. 4.8** Berechnungsablauf Rechenfälle „kalter Schacht mit Porendruck“  
(Fortsetzung)

Datum	Modellzeit [a]	Modellzeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
25. 3.2079	85,63	31.275	24,23	Instantane Erstellung 3. Dichtelement (Sorelbeton)
23.9.2080	87,13	31.823	25,76	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basalt-/ Serpentinitschotter, techn. Bischofit)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
9.3.2081	87,58	31.990	26,19	Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
9.6.2081	87,83	32.081	26,44	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für 2. Dichtelement (Salzbeton)
8.9.2081	88,08	32.173	26,69	Instantane Erstellung 2. Dichtelement (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
8.12.2081	88,33	32.264	26,94	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)
16.12.2081	88,35	32.272	26,96	Instantane Erstellung Opferschicht (Salzbeton)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.11.2082	89,23	32.591	27,83	Instantane Erstellung „Langzeitdichtung“ (feuchter Salzgrus)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
17.10.2083	90,19	32.941	28,79	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basaltschotter)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.4.2084	90,65	33.109	29,25	Instantaner Nachschnitt für gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager (Salzbeton)
1.7.2084	90,90	33.200	29,5	Instantane Erstellung gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager (Salzbeton)
16.8.2084	91,02	33.246	29,63	Instantane Erstellung Filter (Sand/Kies/Basaltsplitt)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
30.1.2085	91,48	33.413	30,08	Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement (1. Bauabschnitt)
9.5.2085	91,75	33.512	30,35	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 1. Bauabschnitt
				Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement (2. Bauabschnitt)
16.8.2085	92,02	33.611	30,63	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 2. Bauabschnitt
1.12.2085	92,31	33.717	30,92	Instantane Erstellung Filter/Aufsättigung (Sand/Kies/Basaltsplitt)
<b>31.12.2085</b>	<b>92,40</b>	<b>33.748</b>	<b>31,00</b>	Verfüllung Schachtröhre
				<b>Beginn des zeitabhängigen Lösungsdruckaufbaus</b>
11.10.2166	173,17	63.250	111,77	Beginn merkbarer Versatzdruckaufbau in Langzeitdichtung (feuchter Salzgrus)
11.10.2166	173,17	63.250	111,77	Initiales Temperaturfeld wiederhergestellt, Beginn der rein mechanischen Berechnung mit „zonenbasiertem Lösungsdruck“
			10.000,00	Ende der Berechnung

## Erweiterung der inneren Druckrandbedingung Salzgruskompaktion

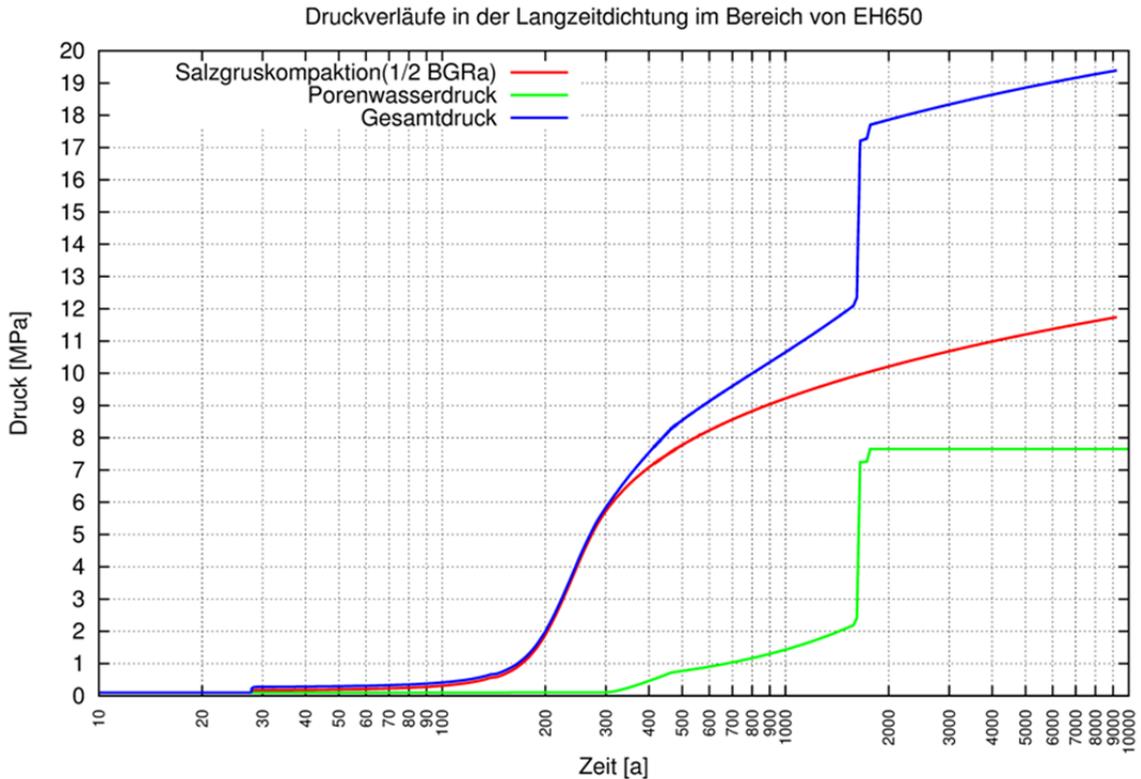
Im Bereich der Langzeitdichtung wird zu dem Versatzdruck infolge der Salzgruskompaktion noch der Porendruck gemäß /BUH 12b/ hinzuaddiert<sup>13</sup>, vgl. Abb. 4.10 und Abb. 4.11, wobei die Anfangsphase vernachlässigt wurde.



**Abb. 4.10** Druckaufbau im Bereich des EH-550

Versatzdruckaufbau gemäß Abb. 6.16 und Lösungsdruckaufbau gemäß Abb. 4.12

<sup>13</sup> Für die Langzeitdichtung wurde der Porendruckverlauf nicht ermittelt. Für die Modellierung existiert noch kein geeigneter Ansatz. Da Porenwasserüberdrücke für die Langzeitdichtung nicht von vornherein ausgeschlossen werden können, wurden Versatzdruck und Porendruck vereinfacht und sehr pauschal abdeckend addiert.



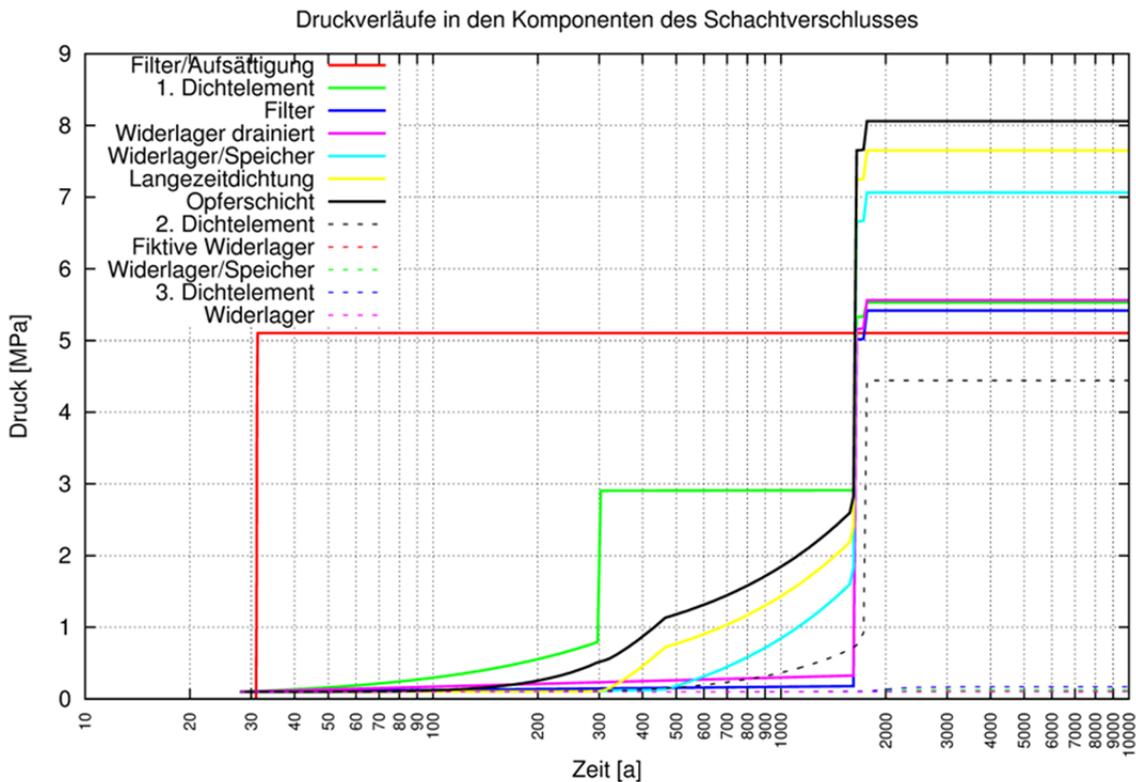
**Abb. 4.11** Druckaufbau im Bereich des EH-650

Versatzdruckaufbau gemäß Abb. 6.16 und Lösungsdruckaufbau gemäß Abb. 4.12

### Porendruck in den übrigen Funktionselementen

Der Druckaufbau in den übrigen Funktionselementen wird modelltechnisch wie folgt umgesetzt: Nach instantanem Einbau des obersten Funktionselements (Filter des Schachtverschlusses) wird mit der Aufsättigung desselben begonnen. Der Lösungsdruck in dem Filterelement wird rechnerisch innerhalb von 120 Tagen beaufschlagt (vgl. dazu Kapitel 5). So wird verhindert, dass der Lösungsdruck schlagartig ansteigt und das darunter liegende Bentonitdichtelement schädigt.

Der Beginn der Lösungsdruckbeaufschlagung des Filterelementes entspricht dem Modellzeitpunkt 31 a (Abb. 4.12 und Tab. 4.8). Abb. 4.12 zeigt die Druckverläufe in den Funktionselementen des Schachtverschlusses, wie sie in der Vorbemessung ermittelt wurden. Sie werden entsprechend ihrem Zeitverlauf beaufschlagt. Aus Abb. 4.12 geht hervor, dass an vielen Funktionselementen noch für lange Zeit kein Lösungsdruck vorhanden ist.



**Abb. 4.12** Druckverläufe in den Komponenten des Schachtverschlusses<sup>14</sup> /BUH 12b/

#### 4.4.3 Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“

Mit Hilfe des Rechenfalls „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ wird geprüft, ob die komplexen thermomechanischen Einwirkungen aus dem Endlager, die als zeitlich veränderliche Randbedingungen aufgebracht werden, für die Rechenfälle zum „heißen Schacht“ korrekt übernommen werden. Weiterhin wird geprüft, ob die thermisch induzierten Hebungen in der Schachtachse 1 m übersteigen. Ist dies der Fall, deckt der Rechenfall den FEP *Diapirismus* mit ab, da die Hebungen in kürzerer Zeit auftreten und größer sind.

Das Blockmodell für den Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ umfasst das Salinar und das Deckgebirge, das in Abb. 4.4 durch die grüne Umrandung gekennzeichnet ist, d. h., es kommt das in Kapitel 4.3 beschriebene Berech-

<sup>14</sup> Zur Modellzeit (31 a) wird mit der Beaufschlagung des Fluiddruckes an den übrigen Funktionselementen entsprechend der dargestellten Verläufe begonnen (vgl. dazu Tab. 4.8).

nungsmodell für das Modellgebiet 2 und seine Diskretisierung zur Anwendung. Die Schachtauffahrung wird nicht modelliert, da der Schacht im BGR-Fernfeldmodell ebenfalls nicht abgebildet ist.

#### **4.4.3.1 Anfangs- und Randbedingungen**

An den äußeren Rändern werden die mechanischen und thermischen Randbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell /EIC 12/ übernommen<sup>15</sup>. In dem ebenen Modell der BGR wird die zeitlich gestaffelte Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in die verschiedenen Einlagerungsfelder, die im Rückbau erfolgt und deshalb in den schachtfürnsten Einlagerungsfeldern beginnt, nicht berücksichtigt. Es wird eine instantane Einlagerung modelliert. Daher erfolgt die Einbeziehung der thermomechanischen Randbedingungen in das Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ 20 Jahre nach Betriebsbeginn, was der halben Betriebsdauer von 40 Jahren entspricht.

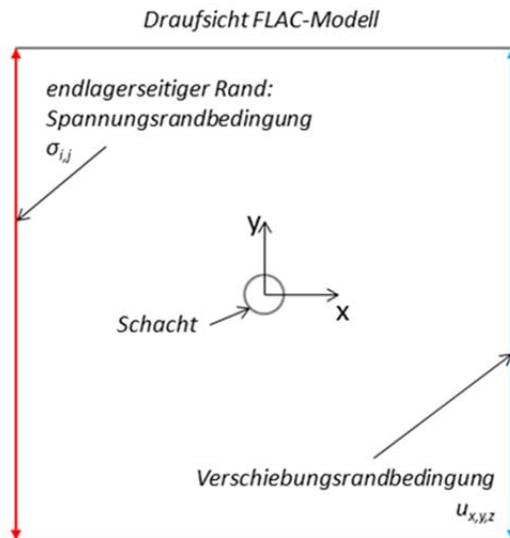
##### **Mechanische Randbedingungen**

Zum Modellzeitpunkt 20 Jahre nach Betriebsbeginn (Modellzeit = 22.425 d) startet die Beaufschlagung der mechanischen Randbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell im FLAC-Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“, vgl. Abb. 4.13.

Am linken endlagerseitigen Modellrand ( $x = -150$  m) wird der gesamte, zeitlich veränderliche Spannungstensor auf die Mittelpunkte der dem Endlager zugewandten Seiten der Zonen als Spannungsrandbedingung aufgebracht, am rechten ( $x = 150$  m) und unteren Modellrand wird der zeitlich veränderliche Verschiebungsvektor auf die Gitterpunkte aufgegeben. Aufgrund der gegenüber dem Fernfeldmodell der BGR feineren Diskretisierung des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“, werden die zeitlich veränderlichen Randbedingungen für die Mittelpunkte der Zonenflächen und für die Gitterpunkte entlang der Ränder interpoliert. Der obere Modellrand (Geländeoberkante) ist frei verschieblich. Der vordere und hintere Modellrand ( $y = -150$  m bzw.  $y = 150$  m) sind analog zum BGR-Fernfeldmodell im ebenen Verzerrungszustand in  $y$ -Richtung unverschieblich, in  $x$ - und  $z$ -Richtung frei verschieblich.

---

<sup>15</sup> Prinzipiell wäre eine Übernahme der Randbedingungen auch aus dem höher aufgelösten Modell des IfG möglich /KNA 12/. Die Ergebnisse lagen aufgrund der höheren Auflösung jedoch etwas später vor und wurden deshalb nicht genutzt.



**Abb. 4.13** Schematische Darstellung der verwendeten mechanischen Randbedingungen für die Rechenfälle zum „heißen Schacht“ am endlagernahen Modellrand und am endlagerfernen Modellrand

### Thermische Randbedingungen

Mit der Beaufschlagung der thermischen Randbedingung wird erst ca. 30 Jahre nach Beginn der Verwendung der mechanischen Randbedingungen begonnen. Zu diesem Zeitpunkt wirkt sich die Erwärmung aus dem Endlager am endlagerseitigen Modellrand aus, d. h., die Temperatur ist an einigen Punkten um 0,1 K erhöht.

Der von der BGR ermittelte Temperaturverlauf wird am endlagernahen und endlagerfernen Modellrand als Randbedingung angesetzt. Am vorderen und hinteren Modellrand wird keine Temperatur beaufschlagt, es handelt sich analog zum BGR-Fernfeldmodell um adiabatische Ränder. An der Modellunterkante und Modelloberkante ist der bereits beschriebene Wärmefluss vorgegeben, der der geothermischen Wärmeflussdichte entspricht.

Die Beaufschlagung der in den Modellrechnungen der BGR ermittelten Temperaturverläufe an den Modellrändern erfolgt bis zum Zeitpunkt von 120,75 Jahre. Zum Zeitpunkt 111,77 Jahre ist im Ergebnis des Rechenfalls „kalter Schacht“ im Schachtbereich die Störung aus der Schachtaus Kühlung abgeklungen, so dass die in den Modellrechnungen der BGR ermittelten Temperaturverläufe als repräsentativ für das ganze Modell angesetzt werden können und für alle Zonen im Modellgebiet als zonenbasierte Temperatur direkt aufgegeben werden. Die Berechnung wird zum Modellzeitpunkt

120,75 Jahre – der ersten vorliegenden BGR-Zeitstützstelle > 111,77 Jahre – von der thermomechanisch gekoppelten instationären Berechnung mit Wärmeleitung auf eine rein mechanische Berechnung mit zeitlich veränderlichem Temperaturfeld umgeschaltet, um die Rechenzeit zu verkürzen.

#### **Zeitlich veränderliches Temperaturfeld – Interpolation der BGR-Datensätze**

Um das zeitlich veränderliche Temperaturfeld auf die Zonen aufgeben zu können, war zu jedem Zeitpunkt (Zeitstützstelle) eine Interpolation der BGR Daten auf das FLAC-Modellnetz erforderlich. Diese ist nachfolgend beschrieben.

Die Temperaturreandbedingung wird zunächst an jedem Gitterpunkt des endlagernahen und endlagerfernen Randes des FLAC-Berechnungsmodells vorgegeben. Jeder Gitterpunkt bzw. Zonenmittelpunkt des FLAC-Berechnungsmodells hat eine bestimmte Höhenlage. Für diese Höhenlage wird die Temperatur aus dem BGR-Fernfeldmodell für jeden Zonenmittelpunkt interpoliert und als zeitabhängiges Temperaturfeld für die mechanische Berechnung verwendet. Die von der BGR bereitgestellten Daten sind 2D-Daten. Deshalb werden im FLAC-Berechnungsmodell in y-Achsenrichtung Temperatur, Spannung und Verschiebung nicht verändert, sondern entsprechend den Werten des 2D-Feldes vorgegeben.

Die Interpolation erfolgte für alle 102 Zeitpunkte, an denen BGR-Datensätze vorhanden waren.

#### **4.4.3.2 Berechnungsablauf**

Für den Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ sind nur wenige Ereignisse von Bedeutung. Sie sind in Tab. 4.9 angegeben.

**Tab. 4.9** Berechnungsablauf Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“

Datum	Modellzeit [a]	Modellzeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
1.1.2035	41,40	15.120		Zeitstützstelle: Beginn des Endlagerbetriebs
<b>1.1.2055</b>	<b>61,40</b>	<b>22.425</b>	<b>0,0</b>	<b>Nullpunkt für alle Ergebnisdarstellungen Zeitstützstelle: Instantane Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle (BGR)</b>
				<b>Beginn Beaufschlagung der Spannungs- und der Verschiebungsrandbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell</b>
<b>24.8.2089</b>	<b>96,04</b>	<b>35.079</b>	<b>34,64</b>	<b>Beginn Beaufschlagung der Temperaturrand- bedingung aus dem BGR-Fernfeldmodell</b>
1.10.2175	182,14	66.527	120,75	Beginn der mechanischen Berechnung mit interpoliertem Temperaturfeld
			10.000,00	Ende der Berechnung

#### 4.4.4 Rechenfälle „heißer Schacht“

Nachdem im Vorgriff auf die Ergebnisse des Rechenfalls „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ die korrekte Übernahme der Randbedingungen ohne Berücksichtigung des Schachtes untersucht wurde, enthalten die Rechenfälle zum „heißen Schacht“ nunmehr zusätzlich den Schacht.

Mit den Rechenfällen „heißer Schacht“ wird analysiert, wie sich der Schachtverschluss unter Berücksichtigung der thermomechanischen Randbedingungen, d. h. unter Berücksichtigung der thermisch induzierten Einwirkungen des Endlagers, verhält. Die Zielsetzung der Berechnungen ist identisch mit der Zielsetzung der Rechenfälle zum „kalten Schacht“.

Analog zu den Rechenfällen zum „kalten Schacht“ wurden für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ die zwei Rechenfälle „heißer Schacht ohne Porendruck“ (lange trockener Schacht) und „heißer Schacht mit Porendruck“ untersucht. Während der Schachtabteufung bis zur Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle gelten dieselben Anfangs- und Randbedingungen wie im Rechenfall „kalter Schacht“. Dann erfolgt zusätzlich ab dem Zeitpunkt 20 Jahre nach Betriebsbeginn die Beauf-

schlagung der mechanischen Randbedingungen und später der thermischen Randbedingungen, wie im Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ beschrieben.

Bis zum Zeitpunkt von ca. 120 Jahren wird eine thermomechanische Berechnung mit Erfassung der instationären Wärmeleitung durchgeführt, um den Einfluss der Schachtauskühlung zu berücksichtigen. Ab diesem Zeitpunkt wird für das gesamte FLAC-Berechnungsmodell dasselbe, zeitlich veränderliche Temperaturfeld angenommen wie im Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“.

#### 4.4.4.1 Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“

Für den Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“ wird analog zum Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ der Druckaufbau in der Langzeitdichtung berücksichtigt. Vereinfacht wird derselbe Druckverlauf gewählt wie im Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“, da das Verhalten der Langzeitdichtung ohnehin nur grob abgebildet wird und ihr Einfluss im Vorgriff auf die Ergebnisse zu den Rechenfällen „kalter Schacht“ räumlich begrenzt ist. Der Berechnungsablauf für den Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“ ist in Tab. 4.10 aufgeführt.

**Tab. 4.10** Berechnungsablauf Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“

Datum	Modell-Zeit [a]	Modell-zeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
9. 8.1993	0,00	0		Instantanes Abteufen bis zum Schachtfundament und Erstellung des Schachtinnenausbaus
3. 6.1994	0,82	298		Instantanes Abteufen bis EH-350, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
29.09.1994	1,14	416		Instantanes Abteufen bis EH-450, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
18.1.1995	1,44	527		Instantanes Abteufen bis EH-550, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
12.4.1995	1,67	611		Instantanes Abteufen bis EH-650, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
0.6.1995	1,89	690		Instantanes Abteufen bis EH-720, Temperaturrandbedingung Schachtstoß

**Tab. 4.10** Berechnungsablauf Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“  
(Fortsetzung)

Datum	Modell-Zeit [a]	Modell-zeit [d]	Zeit, Dia-gramme [a]	Ereignis
22.11.1995	2,29	835		Instantanes Abteufen bis EH-840, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
15.10.1996	3,18	1.163		Wetterdurchschlag
10.11.1997	4,25	1.554		Instantanes Abteufen bis Endteufe (933,2 m), Temperaturrandbedingung Schachtstoß
20.12.1999	6,36	2.324		Beginn des kontinuierlichen Betriebs der Schachtwetterheizung bei Außentemperaturen $\leq 1\text{ °C}$
01.10.2000	7,15	2.610		Beginn Moratorium
1.1.2012	18,40	6.719		Berechnungsende Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“

Zeitverschiebung zum Beginn des Endlagerbetriebs. Annahme: Es herrschen stationäre Verhältnisse, der Schachtstoß wird kontinuierlich beraubt, so dass die Auflockerungszone unverändert bleibt

1.1.2035	41,40	15.120		Zeitstützstelle: Beginn des Endlagerbetriebs
<b>1.1.2055</b>	<b>61,40</b>	<b>22.425</b>	<b>0,0</b>	<b>Nullpunkt für alle Ergebnisdarstellungen Zeitstützstelle: Instantane Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle (BGR)</b>
				<b>Beginn Beaufschlagung der Spannungs- und der Verschiebungsrandbedingungen aus dem BGR- Fernfeldmodell</b>
1.1.2075	81,40	29.730	20,0	Ende Einlagerungsbetrieb, Beginn Rückbau
31.12.2076	83,4	30.461	22,0	Beginn Verfüllung Infrastrukturbereich
2.7.2078	84,9	31.008	23,5	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantane Erstellung Widerlager (Sorelbeton)
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantaner Nachschnitt für 3. Dichtelement (Sorelbeton)
25. 3.2079	85,63	31.275	24,23	Instantane Erstellung 3. Dichtelement (Sorelbeton)
23.9.2080	87,13	31.823	25,76	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basalt-/Serpentinitschotter, techn. Bischofit)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
9.3.2081	87,58	31.990	26,19	Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
9.6.2081	87,83	32.081	26,44	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für 2. Dichtelement (Salzbeton)
8.9.2081	88,08	32.173	26,69	Instantane Erstellung 2. Dichtelement (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
8.12.2081	88,33	32.264	26,94	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)

**Tab. 4.10** Berechnungsablauf Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“  
(Fortsetzung)

Datum	Modell-Zeit [a]	Modell-zeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
16.12.2081	88,35	32.272	26,96	Instantane Erstellung Opferschicht (Salzbeton)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.11.2082	89,23	32.591	27,83	Instantane Erstellung „Langzeitdichtung“ (feuchter Salzgrus)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
17.10.2083	90,19	32.941	28,79	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basaltschotter)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.4.2084	90,65	33.109	29,25	Instantaner Nachschnitt für gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager (Salzbeton)
1.7.2084	90,90	33.200	29,5	Instantane Erstellung gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager (Salzbeton)
16.8.2084	91,02	33.246	29,63	Instantane Erstellung Filter (Sand/Kies/Basaltsplitt)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
30.1.2085	91,48	33.413	30,08	Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement 1. Bauabschnitt
9.5.2085	91,75	33.512	30,35	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 1. Bauabschnitt
				Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement 2. Bauabschnitt
16.8.2085	92,02	33.611	30,63	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 2. Bauabschnitt
1.12.2085	92,31	33.717	30,92	Instantane Erstellung Filter/Aufsättigung (Sand/Kies/Basaltsplitt)
31.12.2085	2,40	33.748	31,00	Verfüllung Schachtröhre
<b>24.8.2089</b>	<b>96,04</b>	<b>35.079</b>	<b>34,64</b>	<b>Beginn Beaufschlagung der Temperaturrandbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell</b>
11.10.2166	173,17	63.250	111,77	Beginn Versatzdruckaufbau in Langzeitdichtung (feuchter Salzgrus)
1.10.2175	182,14	66.527	120,75	Beginn der rein mechanischen Berechnung mit zonenbasierter Temperatur
			10.000,00	Ende der Berechnung

#### 4.4.4.2 Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“

Der Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“ berücksichtigt analog zum Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ zusätzlich den zeitabhängigen Aufbau der Porendrücke in der Langzeitdichtung gemäß Abb. 4.10 und Abb. 4.11 und in den übrigen Funktionselementen gemäß Abb. 4.12. Der Berechnungsablauf für diesen Rechenfall ist in Tab. 4.11 angegeben.

**Tab. 4.11** Berechnungsablauf Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“

Datum	Modell-Zeit [a]	Modell-zeit [d]	Zeit, Diagramme [a]	Ereignis
9.8.1993	0,00	0		Instantanes Abteufen bis zum Schachtfundament und Erstellung des Schachtinnenausbau
3.6.1994	0,82	298		Instantanes Abteufen bis EH-350, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
29.09.1994	1,14	416		Instantanes Abteufen bis EH-450, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
18.1.1995	1,44	527		Instantanes Abteufen bis EH-550, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
12.4.1995	1,67	611		Instantanes Abteufen bis EH-650, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
0.6.1995	1,89	690		Instantanes Abteufen bis EH-720, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
22.11.1995	2,29	835		Instantanes Abteufen bis EH-840, Temperaturrandbedingung Schachtstoß
15.10.1996	3,18	1.163		Wetterdurchschlag
10.11.1997	4,25	1.554		Instantanes Abteufen bis Endteufe (933,2 m), Temperaturrandbedingung Schachtstoß
20.12.1999	6,36	2.324		<i>Beginn des kontinuierlichen Betriebs der Schachtwetterheizung bei Außentemperaturen <math>\leq 1</math> °C</i>
01.10.2000	7,15	2.610		Beginn Moratorium
1.1.2012	18,40	6.719		Berechnungsende Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“
Zeitverschiebung zum Beginn des Endlagerbetriebs. – Annahme: Es herrschen stationäre Verhältnisse, der Schachtstoß wird kontinuierlich beraubt, so dass die Auflockerungszone unverändert bleibt				
1.1.2035	41,40	15.120		Zeitstützstelle: Beginn des Endlagerbetriebs
<b>1.1.2055</b>	<b>61,40</b>	<b>22.425</b>	<b>0,0</b>	<b><i>Nullpunkt für alle Ergebnisdarstellungen Zeitstützstelle: Instantane Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle (BGR)</i></b>
				<b><i>Beginn Beaufschlagung der Spannungs- und der Verschiebungsrandbedingungen aus dem BGR- Fernfeldmodell</i></b>
1.1.2075	81,40	29.730	20,0	Ende Einlagerungsbetrieb, Beginn Rückbau
31.12.2076	83,4	30.461	22,0	Beginn Verfüllung Infrastrukturbereich
2.7.2078	84,9	31.008	23,5	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantane Erstellung Widerlager (Sorelbeton)
24.12.2078	85,38	31.183	23,98	Instantaner Nachschnitt für 3. Dichtelement (Sorelbeton)

**Tab. 4.11** Berechnungsablauf Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“  
(Fortsetzung)

Datum	Modell-Zeit [a]	Modell-zeit [d]	Zeit, Dia-gramme [a]	Ereignis
25.3.2079	85,63	31.275	24,23	Instantane Erstellung 3. Dichtelement (Sorelbeton)
23.9.2080	87,13	31.823	25,76	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basalt-/Serpentinittschotter, techn. Bischoffit)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
9.3.2081	87,58	31.990	26,19	Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
9.6.2081	87,83	32.081	26,44	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für 2. Dichtelement (Salzbeton)
8.9.2081	88,08	32.173	26,69	Instantane Erstellung 2. Dichtelement (Salzbeton)
				Instantaner Nachschnitt für Widerlager (Salzbeton)
8.12.2081	88,33	32.264	26,94	Instantane Erstellung Widerlager (Salzbeton)
16.12.2081	88,35	32.272	26,96	Instantane Erstellung Opferschicht (Salzbeton)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.11.2082	89,23	32.591	27,83	Instantane Erstellung „Langzeitdichtung“ (feuchter Salzgrus)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
17.10.2083	90,19	32.941	28,79	Instantane Erstellung Widerlager/Speicher (Basaltschotter)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
1.4.2084	90,65	33.109	29,25	Instantaner Nachschnitt für gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager (Salzbeton)
1.7.2084	90,90	33.200	29,5	Instantane Erstellung gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager dräniert (Salzbeton)
16.8.2084	91,02	33.246	29,63	Instantane Erstellung Filter (Sand/Kies/Basaltsplitt)
				Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten
30.1.2085	91,48	33.413	30,08	Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement 1. Bauabschnitt
9.5.2085	91,75	33.512	30,35	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 1. Bauabschnitt
				Instantaner Nachschnitt für 1. Dichtelement 2. Bauabschnitt
16.8.2085	92,02	33.611	30,63	Instantane Erstellung 1. Dichtelement (Bentonit) 2. Bauabschnitt
1.12.2085	92,31	33.717	30,92	Instantane Erstellung Filter/Aufsättigung (Sand/Kies/Basaltsplitt)
<b>31.12.2085</b>	<b>92,40</b>	<b>33.748</b>	<b>31,00</b>	Verfüllung Schachtröhre
				<b>Beginn des zeitabhängigen Lösungsdruckaufbaus</b>
<b>24.8.2089</b>	<b>96,04</b>	<b>35.079</b>	<b>34,64</b>	<b>Beginn Beaufschlagung der Temperaturrandbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell</b>
11.10.2166	173,17	63.250	111,77	Beginn Versatzdruckaufbau in der Langzeitdichtung (feuchter Salzgrus)
1.10.2175	182,14	66.527	120,75	Initiales Temperaturfeld wiederhergestellt, Beginn der rein mechanischen Berechnung mit zonenbasiertem Fluidruck und zonenbasierter Temperatur
			10.000,00	Ende der Berechnung

#### 4.5 Stoffmodelle und Materialparameter

Für die im Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ enthaltenen Funktionselemente und die erfassten Homogenbereiche der Gesteine wurden für die mechanische, thermische, thermomechanische und hydromechanische Prozessklasse die in Tab. 4.12 angegebenen Stoffmodelle verwendet.

**Tab. 4.12** Verwendete Prozessklassen und verwendete Stoffmodelle

<b>Funktionselemente bzw. Homogenbereiche</b>	<b>Mechanisches Verhalten</b>	<b>Thermisches Verhalten</b>	<b>Thermomechanisches Verhalten</b>	<b>Hydromechanisches Verhalten</b>
Schachtausbau, Stützringe, Fundament, Spritzbeton	Elastisch	Isotrope Wärmeleitung	Thermische Expansion/Kontraktion	-
Filter, Bentonit, Schotter, Salzbeton, Sorelbeton	Elastisch	Isotrope Wärmeleitung	Thermische Expansion/Kontraktion	Effektive Spannungen nach Terzaghi, Biot
Salzgrus Langzeitdichtung	Vorgabe einer Versatzdruckentwicklung	–	Konservativ nicht erfasst	Vorgabe einer Lösungsdruckentwicklung
Salzgesteine	Elastisch – viskoplastisch (BGRa, BGR <sub>EB1</sub> , BGRsf)	Isotrope Wärmeleitung	Thermische Expansion/Kontraktion	-
Anhydrit, Deckgebirge	Elastisch	Isotrope Wärmeleitung	Thermische Expansion/Kontraktion	-

Neben der thermischen Expansion- und Kontraktion wird die Temperaturabhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit der Salzgesteine über den Arrhenius-Term in den Stoffmodellen erfasst.

Eine Erläuterung der angewandten mechanischen, thermischen und thermomechanischen Stoffmodelle findet sich in Anhang B. Die mechanischen, thermischen und thermomechanischen Materialparameter der Funktionselemente wurden gemäß Tab. 4.13 gewählt.



Analog zu der Vorgehensweise, die Temperaturverteilungen aus dem BGR-Fernfeldmodell zu übernehmen und die thermomechanischen Auswirkungen im Rahmen einer einseitigen Kopplung im Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ zu berücksichtigen, erfolgt auch die Erfassung des hydromechanischen Verhaltens. Der in /BUH 12b/ ermittelte Druckverlauf in den Funktionselementen wird dabei auf die Modellzonen der Funktionselemente in seinem zeitlichen Verlauf als Porendruck aufgegeben, vgl. auch Abb. 4.12. Die hydromechanische Kopplung erfolgt dabei nach Gl. (4.5) unter Nutzung des Konzepts der effektiven Spannungen (Terzaghi) mit dem Biot-Koeffizienten als Kopplungsparameter. Die effektiven Spannungen  $\sigma'_{ij}$  ermitteln sich zu

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha_b \cdot p \delta_{ij} \quad (4.5)$$

mit

- $\sigma_{ij}$ : Totale Spannungen (Spannungstensor)
- $\alpha_b$ : Biot-Koeffizient (Hydraulischer Wirkfaktor)
- $p$ : lokaler Porendruck
- $\delta_{ij}$ : Einheitstensor

Der Biot-Koeffizient wurde zu 1,0 gesetzt, d. h., der Porendruck wurde als voll wirksam angenommen. Der Einfluss des Porendruckes ist dadurch am deutlichsten zu erkennen. Diese Art der Berechnung ist für die Fragestellung neu, da keine Strömungsberechnung erfolgte und das Porendruckfeld durch rein hydraulische Berechnungen mit LOPOS ermittelt und übernommen wurde /BUH 12b/. Die Ergebnisse werden deshalb nur qualitativ in die Bewertung einbezogen und die quantitativen Werte zu Vergleichszwecken dargestellt.

#### **4.6 Berechnungsergebnisse zum „Schachtverschluss als Ganzes“**

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse für die Rechenfälle erfolgt in einer von der Beschreibung der Rechenfälle abweichenden Reihenfolge. Zuerst werden die Ergebnisse der Rechenfälle „Kalibrierung Kriechklassen“ und „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ dargestellt, anhand derer die Modellgültigkeit geprüft wird. Anschließend erfolgt die Darstellung der Berechnungsergebnisse zum „kalten Schacht“ und zum „heißen Schacht“.

## **4.6.1 Ergebnisse des Rechenfalls „Kalibrierung Kriechklassen“**

### **4.6.1.1 Auswertelokationen**

Die Auswertelokationen für den Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“ befinden sich in den Erkundungshorizonten. An diesen Positionen wurden die zur Kalibrierung herangezogenen Schachtkonvergenzen gemessen.

### **4.6.1.2 Ergebnisse zur Kalibrierung der Kriechklassen**

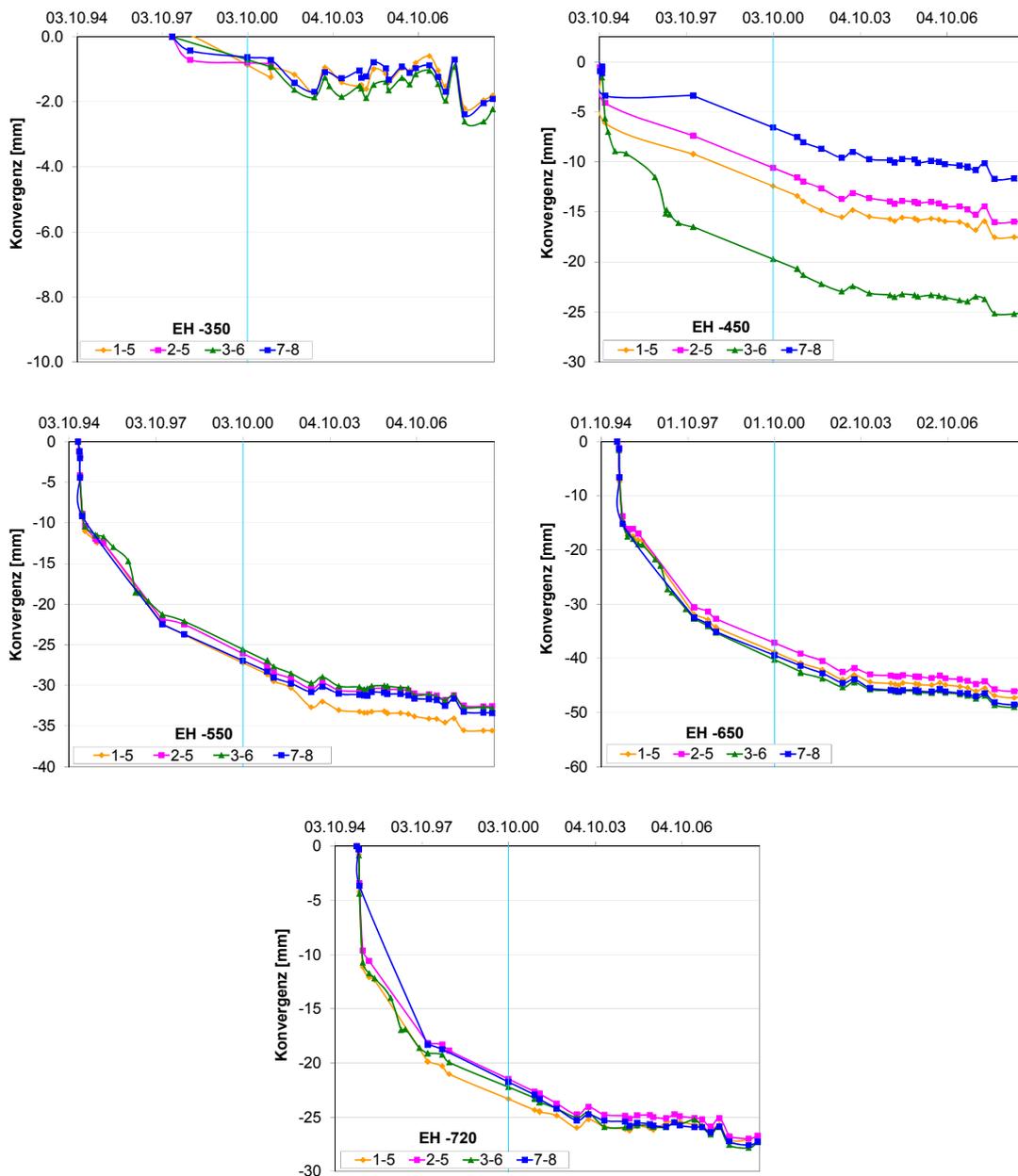
Es wird das stationäre Kriechen des Salzgebirges kalibriert, da dieser Kriechanteil für die Langzeitberechnungen relevant ist und vom verwendeten Stoffmodell numerisch abgebildet wird. In der Anfangsphase der Berechnung spielt das instationäre Kriechen eine nicht zu vernachlässigende Rolle, da folgende Ereignisse auf das Salzgebirge einwirken:

- Schachtabteufung,
- Wetterdurchschlag und die dadurch herbeigeführte Abkühlung des Schachtstoßes,
- Erwärmung des Schachtstoßes infolge der Inbetriebnahme der Schachtwetterheizung,
- Förderbetrieb aufgrund der Erkundungstätigkeit im Erkundungsbergwerk.

Am 1. Oktober 2000 begann das Moratorium im Erkundungsbergwerk. Ab diesem Zeitpunkt fanden nur noch Arbeiten zur Offenhaltung des Erkundungsbergwerks statt und deshalb auch nur noch geringer Förderbetrieb im Schacht. Zu diesem Zeitpunkt regulierte die Schachtwetterheizung bereits seit 10 Monaten die Temperaturen der Schachtwetter, so dass keine extremen Temperaturschwankungen mehr auftraten (vgl. Abb. 4.9). Es wird daher angenommen, dass die ab dem 1. Oktober 2000 gemessenen Schachtkonvergenzen das von äußeren Einwirkungen weitestgehend unbeeinflusste Verhalten des Gebirges wiedergeben.

In Abb. 4.14 sind die Zeitreihen der gemessenen Schachtkonvergenzen für die fünf Erkundungshorizonte dargestellt. An jedem Erkundungshorizont werden die Schachtkonvergenzen an vier Messstrecken gemessen /DBE 10/. Dieselben Messstrecken

werden im numerischen Modell ausgewertet. Bis zum 1. Oktober 2000 weisen die gemessenen Zeitreihen höhere Konvergenzraten auf als nach Beginn des Moratoriums (Abb. 4.14). Nach Beginn des Moratoriums pendeln sich die Konvergenzraten auf ein geringeres Niveau ein. Ab diesem Zeitpunkt wird vom stationären Kriechen des Salzgebirges ausgegangen. Er wird als Nullpunkt für die Auswertungen der Schachtkonvergenzen zur Kalibrierung der Kriechklassen gewählt (Auswertzeitpunkt 0).

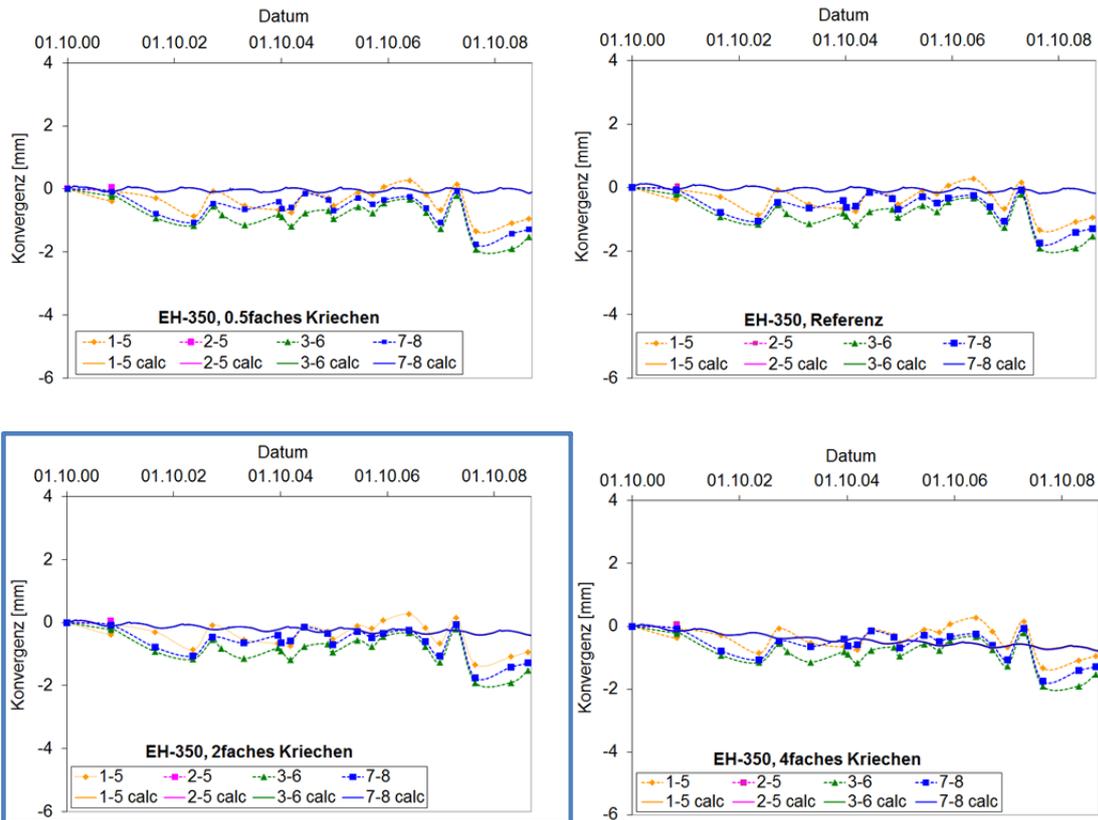


**Abb. 4.14** Gemessene Schachtkonvergenzen in den Erkundungshorizonten

Die blaue Linie markiert den Beginn des Moratoriums am 1. Oktober 2000.

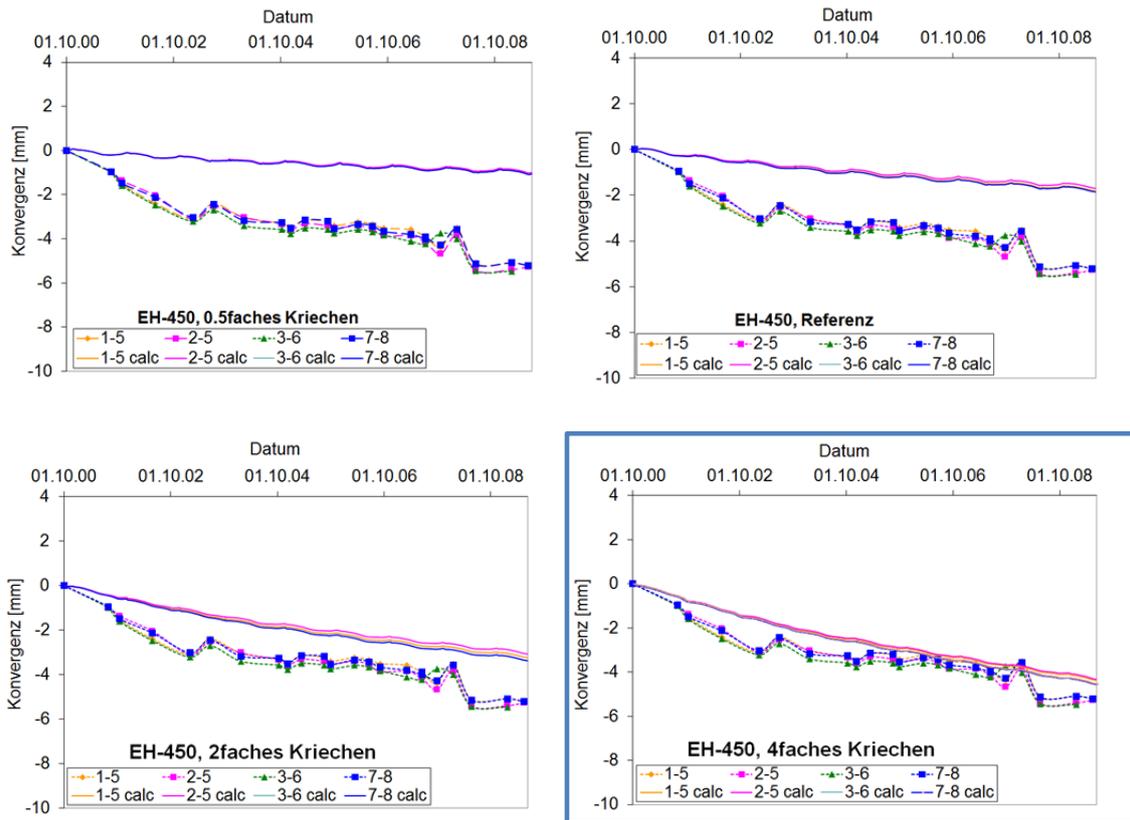
Bei der Kalibrierung der Kriechklassen wurden den stratigrafischen Einheiten bzw. Homogenbereichen im Referenzfall die empfohlenen Kriechklassen gemäß Tab. 4.2 und Abb. 4.7 zugewiesen. Zur Umsetzung der in Kapitel 4.4.1.3 beschriebenen Berechnungsvarianten wird anschließend durch die Anwendung eines zusätzlichen Multiplikationsfaktors die Kriechfähigkeit im gesamten Modellgebiet verändert, das Verhältnis der Kriechklassen zwischen den Homogenbereichen bleibt dabei bestehen.

In Abb. 4.15 bis Abb. 4.19 ist dargestellt, welcher Multiplikationsfaktor zu der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Konvergenzen in den fünf verschiedenen Erkundungshorizonten führt. Blau umrandet ist jeweils das Diagramm, das die beste Übereinstimmung zwischen den Messwerten und dem Modellierungsergebnis aufweist. Aus den Abbildungen wird für die Erkundungshorizonte EH-450, EH-550, EH-650 und EH-720 die beste Anpassung bereits visuell offensichtlich. Quantitativ beruht die Bewertung auf dem Vergleich der mit dem numerischen Modell berechneten und der gemessenen Schachtkonvergenzen. Wie in Abb. 4.15 bis Abb. 4.19 zu sehen, beruhen die gemessenen Schachtkonvergenzen auf wenigen Datenpunkten, während die berechneten Schachtkonvergenzen viele Stützstellen aufweisen. Um beide Kurven vergleichbar zu machen, wurden die gemessenen Schachtkonvergenzen durch eine lineare Funktion angepasst, die den Trend der Schachtkonvergenzen darstellt. Die lineare Funktion wurde für die zeitlichen Stützpunkte berechnet, an denen das numerische Modell die Schachtkonvergenzen ausgegeben hat. Für die Anzahl  $n$  der Zeitstützstellen wurde dann der mittlere quadratische Fehler berechnet und die Anpassung mit dem kleinsten mittleren quadratischen Fehler gewählt. Weitere Details zu den Ergebnissen des Rechenfalls „Kalibrierung Kriechklassen“ können /WOL 12b/ entnommen werden.



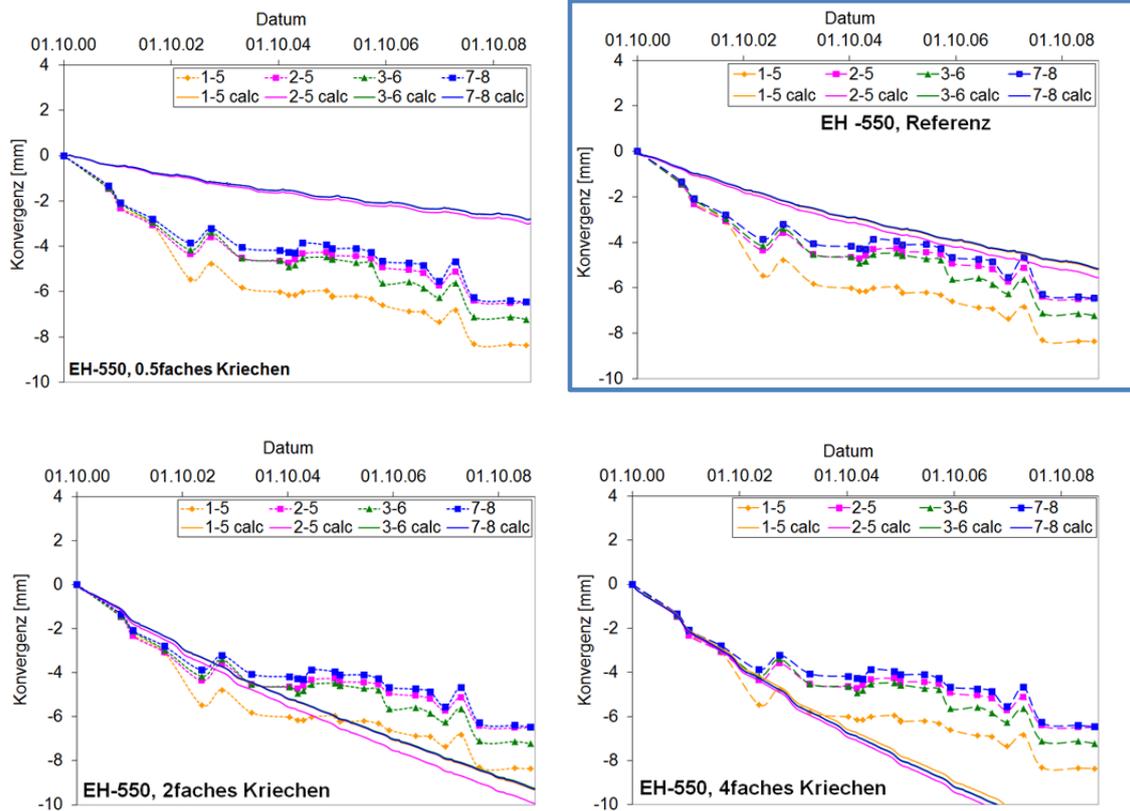
**Abb. 4.15** Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkonvergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkonvergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-350

Blau umrandet ist das Diagramm mit der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Konvergenzen (2fache Kriechfähigkeit).



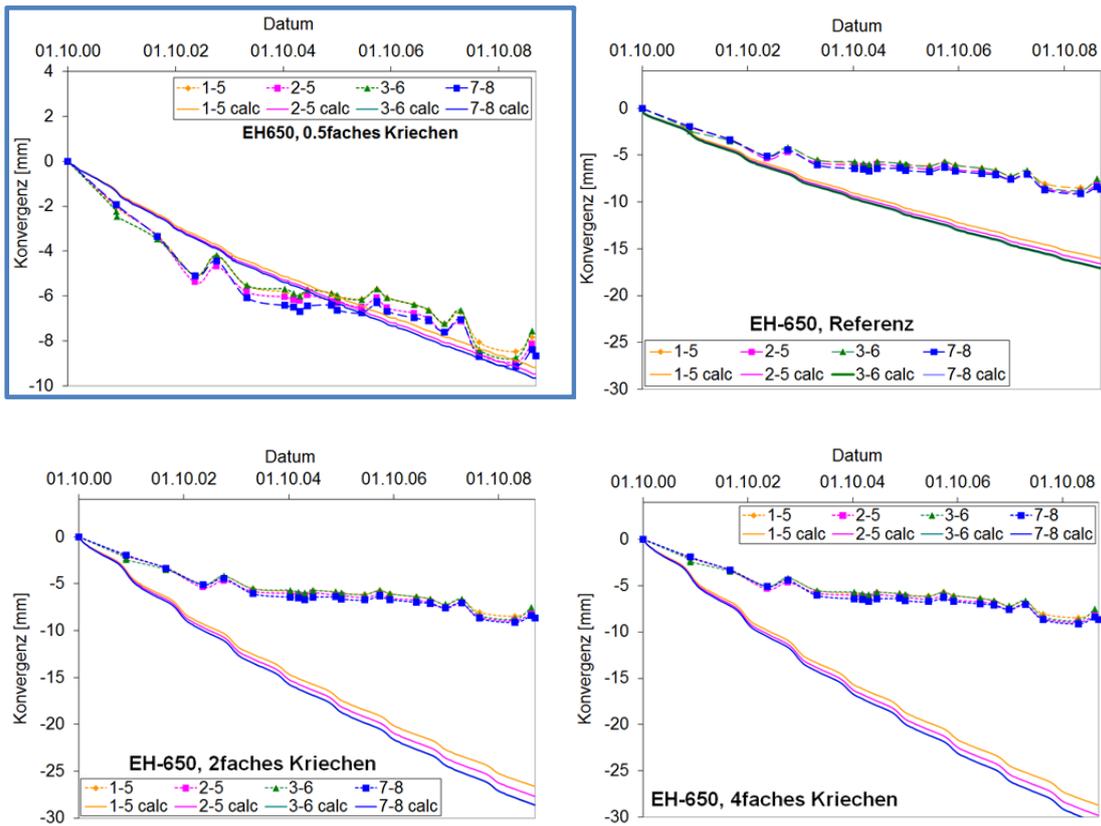
**Abb. 4.16** Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkonvergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkonvergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-450

Blau umrandet ist das Diagramm mit der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Konvergenzen (4fache Kriechfähigkeit).



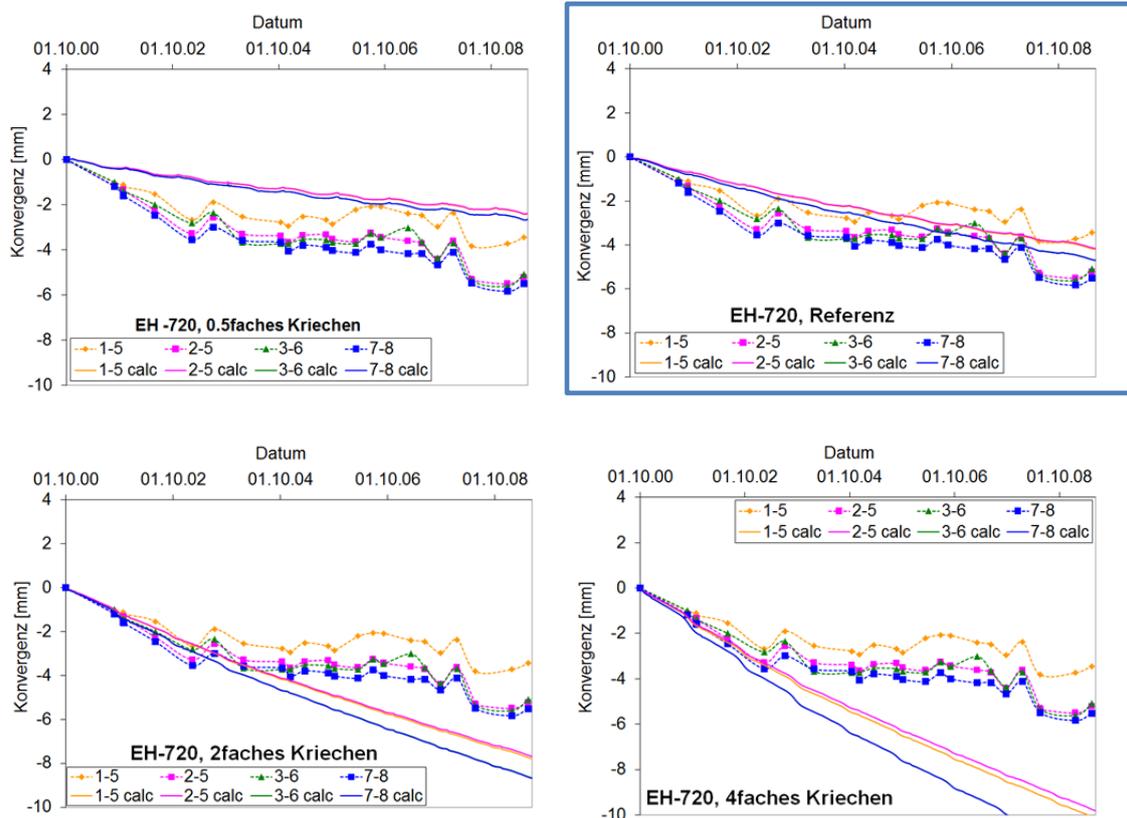
**Abb. 4.17** Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkonvergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkonvergenzen (strichpunktigte Linien) im Erkundungshorizont EH-550

Blau umrandet ist das Diagramm mit der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Konvergenzen (Referenzfall).



**Abb. 4.18** Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkonvergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkonvergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-650

Blau umrandet ist das Diagramm mit der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Konvergenzen (0,5fache Kriechfähigkeit).



**Abb. 4.19** Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkonvergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkonvergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-720

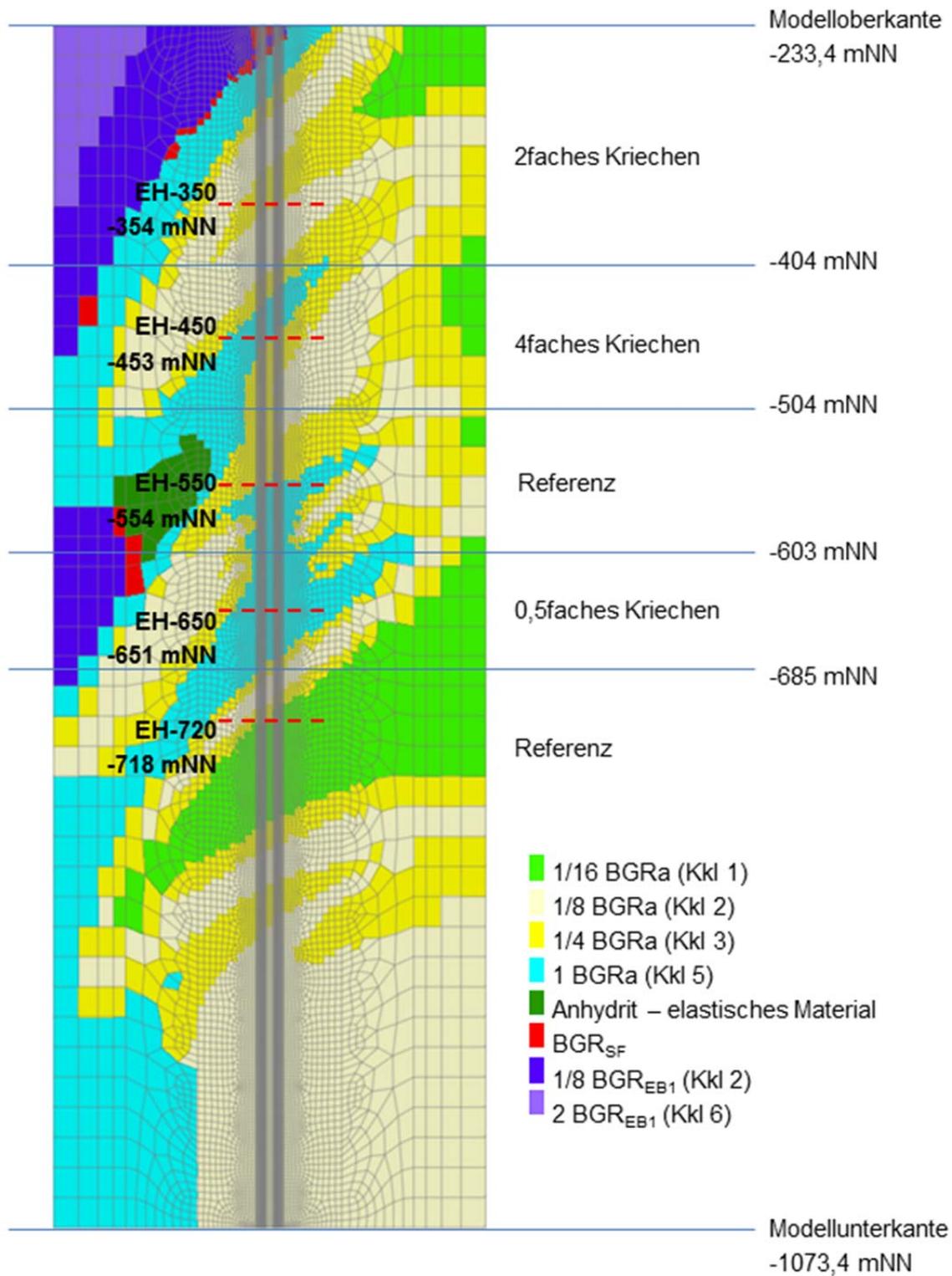
Blau umrandet ist das Diagramm mit der besten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Konvergenzen (Referenzfall).

Um dieses Ergebnis der Modellkalibrierung umzusetzen, wurde das Modellgebiet in vertikale Abschnitte unterteilt, in deren Mitte die Erkundungshorizonte liegen (Abb. 4.20). Auf diese teufenspezifischen Bereiche wird jeweils der Multiplikationsfaktor angewendet, der zur besten Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den im Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“ ermittelten Konvergenzen führte. Das Verhältnis der Kriechklassen in den Homogenbereichen entspricht dabei dem Verhältnis der empfohlenen Kriechklassen und bleibt erhalten. Die empfohlenen Kriechklassen sind in der Legende von Abb. 4.20 mit angegeben.

Die Anpassung der Kriechklassen führte – wie bereits erläutert – zu dem in Abb. 4.20 dargestellten Ergebnis. Es zeigt sich, dass mit einer Ausnahme die schachtnahen Kriechklassen alle innerhalb ihrer möglichen Bandbreite gemäß Tab. 4.2 liegen. Ausgenommen davon ist nur das Liniensalz im Bereich des Erkundungshorizontes EH-450, für das formal eine günstige Kriechklasse oberhalb der empfohlenen Bandbreite

ermittelt wird. Das Liniensalz ist an dieser Stelle jedoch in weit mächtigere Partien des oberen und unteren Orangesalzes eingefaltet (Abb. 4.1), die das Kriechverhalten im EH-450 dominieren. Für diese ist eine größere Bandbreite in Tab. 4.2 angegeben, die einen Multiplikationsfaktor 4 abdeckt. Im Ergebnis des Rechenfalls „Kalibrierung Kriechklassen“ kann deshalb festgestellt werden, dass im Schachtbereich ein die Konvergenzrate bestimmendes Auftreten von Kriechklassen oberhalb bzw. unterhalb der erwarteten Bandbreite unwahrscheinlich ist. Die modifizierte Einwirkung bzw. der weniger wahrscheinliche FEP *eine Kriechklasse oberhalb/unterhalb der erwarteten Bandbreite* braucht daher für den Schachtverschluss nicht betrachtet zu werden.

Die teufenspezifisch angepassten Kriechklassen werden für die Berechnungen zum „Schachtverschluss als Ganzes“ weiter verwendet.



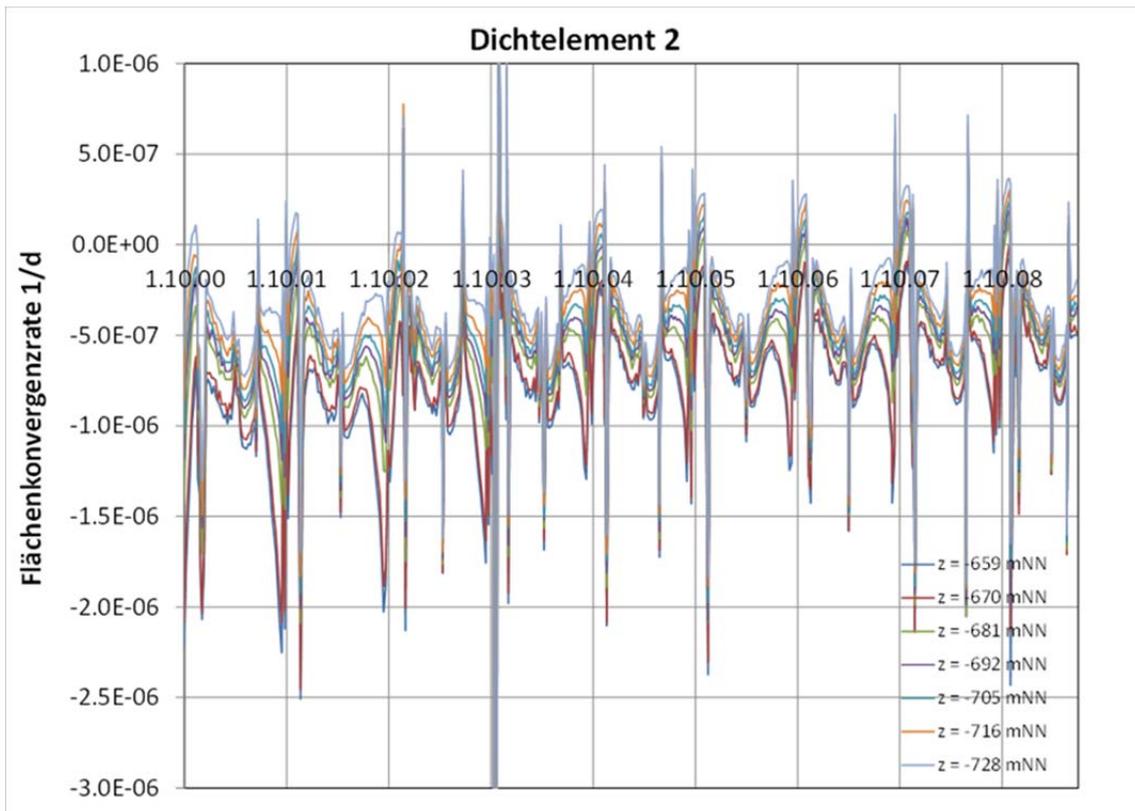
**Abb. 4.20** Ergebnis der teufenspezifisch angepassten Kriechklassen

Die Erkundungshorizonte sind rot markiert, die blauen Linien trennen die Bereiche mit unterschiedlichen Multiplikationsfaktoren. Die Kriechklassen, die den Homogenbereichen im Referenzfall (empfohlene Kriechklassen) zugewiesen wurden, sind in der Legende angegeben.

#### 4.6.1.3 Zulässigkeit der Verwendung des effektiven Kompressionsmoduls

Für die Modellierung der Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton wird der effektive Kompressionsmodul (Ersatzkompaktionsmodul) genutzt /BFS 09/, /WEI 11/, /KAM 12/. Mit ihm wird die kriechbedingt verminderte Steifigkeit der Betonbaustoffe approximiert. Die Anwendung des effektiven Kompressionsmoduls ist nach derzeitigem Wissensstand nur bei Beträgen der volumetrischen Verzerrungsraten von  $\geq 1\text{E-}10 \text{ 1/s} = 8,64\text{E-}6 \text{ 1/d}$  gesichert, da bei geringeren Raten die Extrapolation der Laborversuche nicht geklärt ist. Trotzdem wird der effektive Kompressionsmodul auch bei geringeren Verzerrungsraten verwendet, da er derzeit die beste Approximation des Kriechverhaltens darstellt.

Die Größe der volumetrischen Verzerrungsrate wird durch die Flächenkonvergenzrate approximiert. Deshalb wird geprüft, ob im Schacht eine ausreichend hohe Konvergenzrate vorhanden ist, so dass der anfänglich vorhandene Druckaufbau realistisch abgebildet wird. Abb. 4.21 zeigt die Flächenkonvergenzraten im Niveau des 2. Dichtelementes aus Salzbeton. In diesem Bereich weisen die Flächenkonvergenzraten bei gleichzeitigem Vorhandensein von Salzbeton ihre geringsten Werte auf. Da sie etwa eine Größenordnung unter der für die zulässige Extrapolation erforderlichen Konvergenzrate liegen, ist die Anwendung des effektiven Kompressionsmoduls nicht gesichert. Als beste Schätzung wird er dennoch in Ansatz gebracht.



**Abb. 4.21** Flächenkonvergenzrate im Niveau des 2. Dichtelementes

Das negative Vorzeichen kennzeichnet Flächenverkleinerung.

#### 4.6.2 Ergebnisse des Rechenfalls „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“

Zur Überprüfung der korrekten Übernahme der thermomechanischen Randbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell werden an ausgewählten Stützstellen auf den inneren vertikalen Referenzlinien (vgl. Abb. 4.5 und Abb. 4.22) die Zustandsgrößen Temperatur, Verschiebungen und Spannungen des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“ mit Modellgebiet 2 mit den Ergebnissen der Berechnungen aus der Fernfeldmodellierung der BGR /KOC 12a/ verglichen.

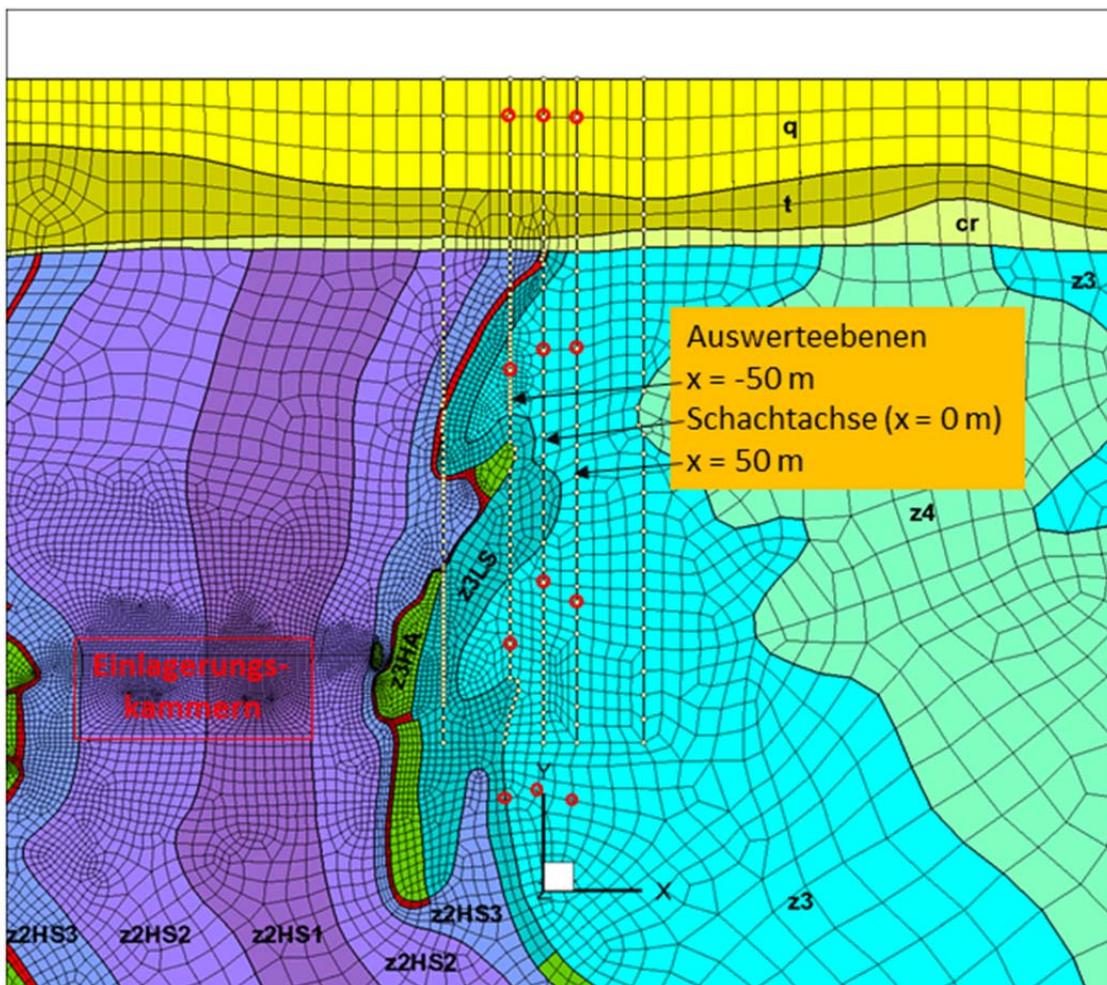
##### 4.6.2.1 Auswertelokationen

Der Abgleich der Berechnungsergebnisse erfolgt an zwölf Auswertepunkten. In Abb. 4.22 sind die vertikalen Referenzlinien sowie die Teufen, in denen die Auswertepunkte liegen, dargestellt. In Tab. 4.14 ist die Lage der Auswertepunkte gelistet. In y-

Richtung liegen alle Auswertepunkte bei  $y = 0$  m. Die Auswertelokationen wurden so gewählt, dass sie sowohl im BGR-Fernfeldmodell als auch im höher aufgelösten FLAC-Modell für den „Schacht als Ganzes“ in den gleichen stratigrafischen Einheiten liegen.

**Tab. 4.14** Auswertepunkte ( $y = 0$  m)

Vertikale Referenzlinie					
x = -50 m		Schachttachse (x = 0 m)		x = 50 m	
Punkt 1	-30 mNN	Punkt 5	-30 mNN	Punkt 9	-31 mNN
Punkt 2	-412 mNN	Punkt 6	-383 mNN	Punkt 10	-379 mNN
Punkt 3	-807 mNN	Punkt 7	-712 mNN	Punkt 11	-738 mNN
Punkt 4	-1.059 mNN	Punkt 8	-1.047 mNN	Punkt 12	-1.061 mNN



**Abb. 4.22** BGR-Fernfeldmodell mit skizziertem FLAC-Modellgebiet und Auswertelokationen

#### **4.6.2.2 Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“**

Als Ergebnis des Rechenfalls „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ sind die an den Auswertelocationen ermittelten Temperaturen (Abb. 4.23), Horizontalspannungen (Abb. 4.24), Vertikalspannungen (Abb. 4.25), Horizontalverschiebungen (Abb. 4.26) und Vertikalverschiebungen (Abb. 4.27) im Vergleich mit den Werten der BGR-Fernfeldmodellierung dargestellt.

Im Ergebnis der Auswertung (Abb. 4.23) ist festzustellen, dass die Temperaturverläufe praktisch übereinstimmen, sieht man von einer geringeren Differenz ab, die zwischen 100 und 200 Jahren auftritt. Die kleine Temperaturdifferenz von weniger als 1 K ist Resultat des Wärmeflusses über das Deckgebirge, mit dem der Einfluss des geothermischen Gradienten erfasst wird (vgl. Kapitel 4.4.1.1). Die Abweichung wird deshalb mit zunehmender Teufe geringer. Nach Beendigung der instationären Berechnung und mit Beginn der Übernahme der thermischen Feldgrößen aus dem BGR-Fernfeldmodell tritt keine Abweichung mehr auf. Die Temperaturdaten werden somit korrekt übernommen und die Interpolation der Daten vom gröberen Netz des BGR-Fernfeldmodells auf das feinere Netz des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“ erfolgt ebenfalls korrekt.

Auch in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Horizontalspannungen besteht eine gute Übereinstimmung, vgl. Abb. 4.24. Die Abweichung beträgt i. d. R. weniger als 0,5 MPa, sieht man vom Teufenniveau -1.060 mNN ab, das durch die Nähe des unteren Randes des Modellgebietes und die damit verbundene Verformungsbehinderung beeinflusst ist. Dieser Einfluss klingt bis in das Teufenniveau der Dichtelemente ab, der Rand des Modellgebietes ist also in ausreichender Entfernung zu den Dichtelementen gewählt. Eine weitere, ebenfalls noch als gering einzustufende, wenn auch etwas größere Spannungsdifferenz im Auswertepunkt bei  $x = -50$  m und im Teufenniveau von ca. -800 mNN lässt sich durch den Einfluss des Anhydrits z3HA erklären, der im Modellgebiet des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“ nicht erfasst, im BGR-Fernfeldmodell jedoch mit abgebildet wird.

Ein modifiziertes Bild ergibt sich im Fall der Vertikalspannungen. Hier sind qualitativ gleiche Verläufe zu erkennen, jedoch treten in den interessierenden Bereichen bei den Maximalwerten Abweichungen von etwa 2 MPa (bei ca. -400 mNN) bis 2,6 MPa (bei ca. -750 mNN) auf, wobei das Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“

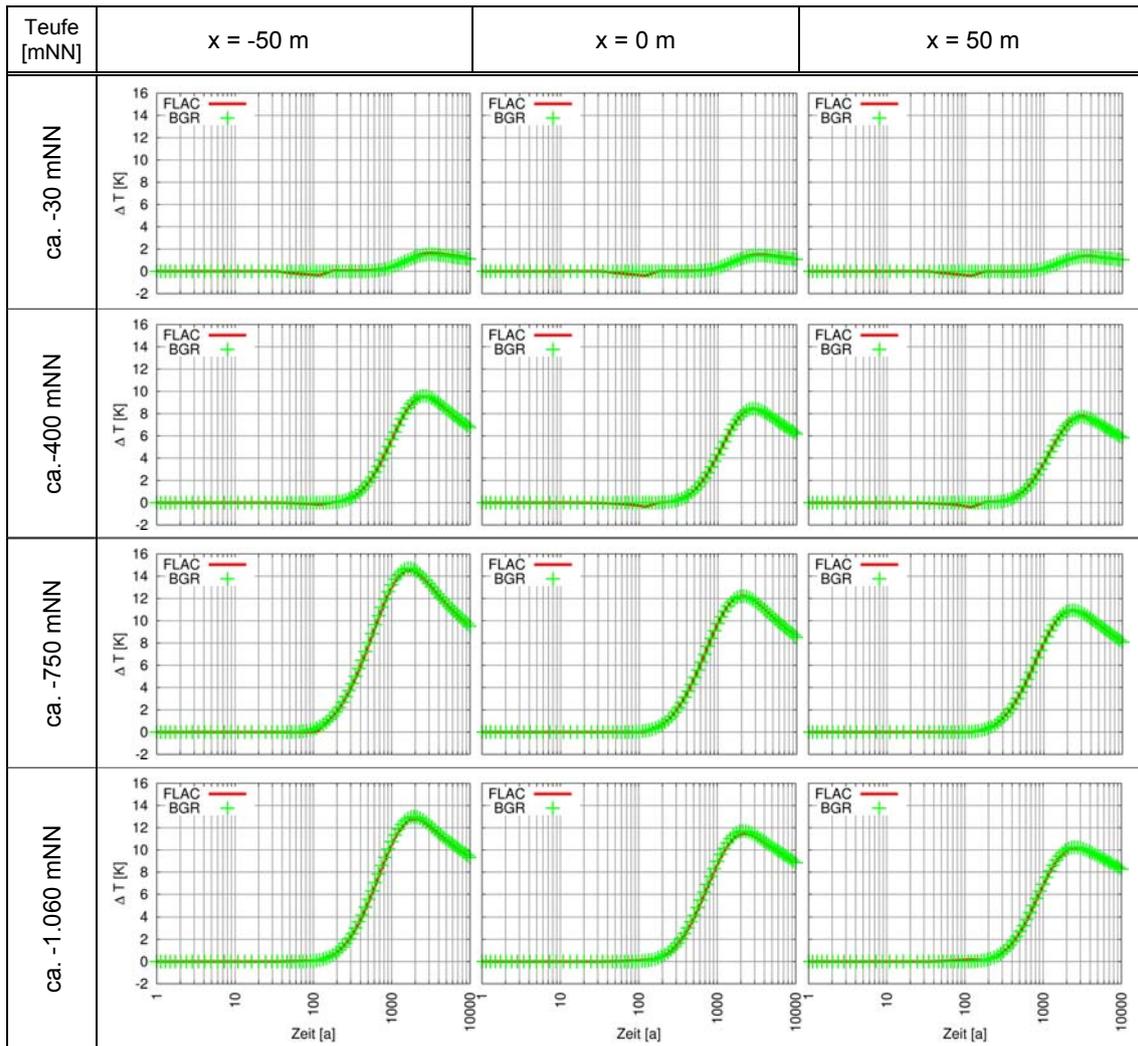
systematisch geringere Maximalwerte ausweist als das BGR-Fernfeldmodell. Auch liegen die Werte der Spannungen im Zeitverlauf fast immer unterhalb der im Fernfeldmodell ausgewiesenen Spannungen. Dieser Effekt lässt sich mit den unterschiedlichen kinematischen Ansätzen für ebenen Verzerrungszustand und für das 3D-Modell erklären sowie der feineren Vernetzung des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“. Die durch die kinematischen Randbedingungen induzierten Verformungsbehinderungen sind im Falle des 3D-Modells geringer. Deshalb können sich die Vertikalspannungen insbesondere in Richtung der als freier Rand modellierten Tagesoberfläche durch Verformungen abbauen, so dass sich tendenziell der Primärspannungszustand einstellt. Insgesamt betragen die Abweichungen im Mittel 14 % und maximal nicht mehr als 21 %, ein Wert, der für Spannungen unter den beschriebenen Modellrestriktionen ein gutes Ergebnis ist.

Dass die Abweichung in den Vertikalspannungen zu einem wesentlichen Anteil das Ergebnis der kinematischen Restriktion ist, wird aus dem Iterationsverlauf deutlich. Der Iterationsverlauf in Abb. 4.28 zeigt, dass die thermomechanischen Randbedingungen korrekt übernommen wurden, da der Beginn der Iteration jeweils nahe der Kurve des BGR-Fernfeldmodells beginnt, im Verlauf der Gleichgewichtsiteration pendeln sich die Vertikalspannungen aber in etwa auf Teufendruckniveau ein.

Die Unterschiede in den Spannungen wirken sich – wie bereits erwähnt – auf die Verschiebungen aus. Während am Anfang die Verschiebungswerte der Horizontalverschiebungen (Abb. 4.26) und Vertikalverschiebungen (Abb. 4.27) aus dem BGR-Fernfeldmodell und dem Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ praktisch übereinstimmen, werden in dem Zeitbereich, in dem die größten Abweichungen in den Vertikalspannungen ausgewiesen werden, im Gegenzug zunehmend größere Horizontal- und Vertikalverschiebungen berechnet. Die maximalen Abweichungen werden für die Vertikalverschiebungen im Deckgebirge ermittelt, sie betragen maximal 0,19 m. Im interessierenden Bereich der Schachtachse sind die Unterschiede geringer und nehmen erwartungsgemäß mit zunehmender Teufe ab.

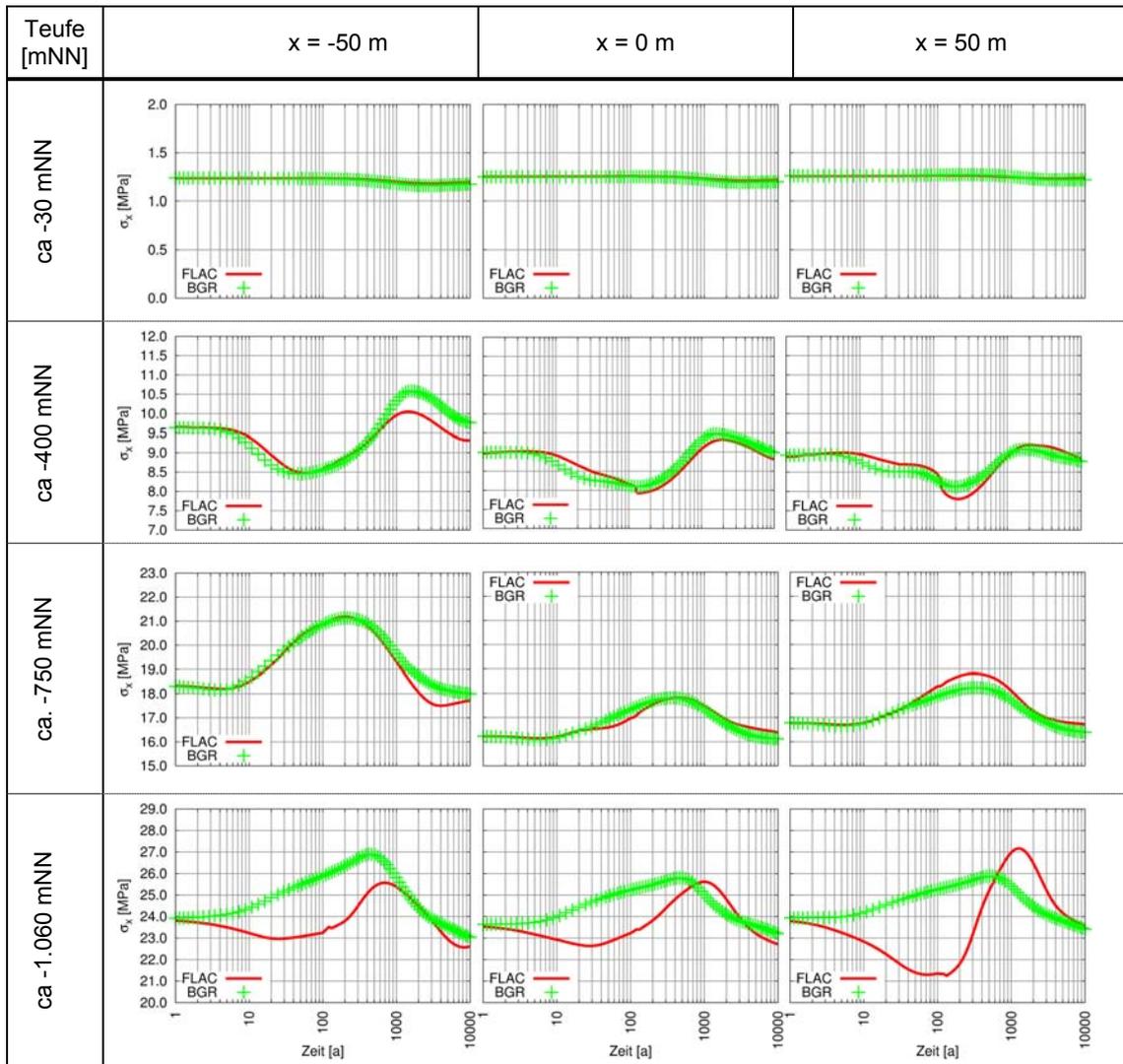
Im Ergebnis der Berechnungen zur „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ ist festzustellen, dass die Randbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell mit unerwartet geringen Abweichungen übernommen werden konnten. Damit ist sichergestellt, dass die thermisch induzierten Einwirkungen aus dem Endlager auf den Schacht bzw. Schachtverschluss durch die gewählten zeitlich veränderlichen Randbedingungen gut erfasst werden.

Als weiteres Ergebnis der Validierungsberechnungen ist festzustellen, dass der FEP *Diapirismus* durch die Berücksichtigung der thermischen Einwirkungen des Endlagers abgedeckt wird, da im Schachtbereich sowohl mit dem BGR-Fernfeldmodell als auch mit dem Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ größere Vertikalverschiebungen als 1 m erreicht werden und die Hebungen deutlich schneller ablaufen als der für den FEP *Diapirismus* angesetzte Wert, der 1 m in 50.000 Jahren beträgt.



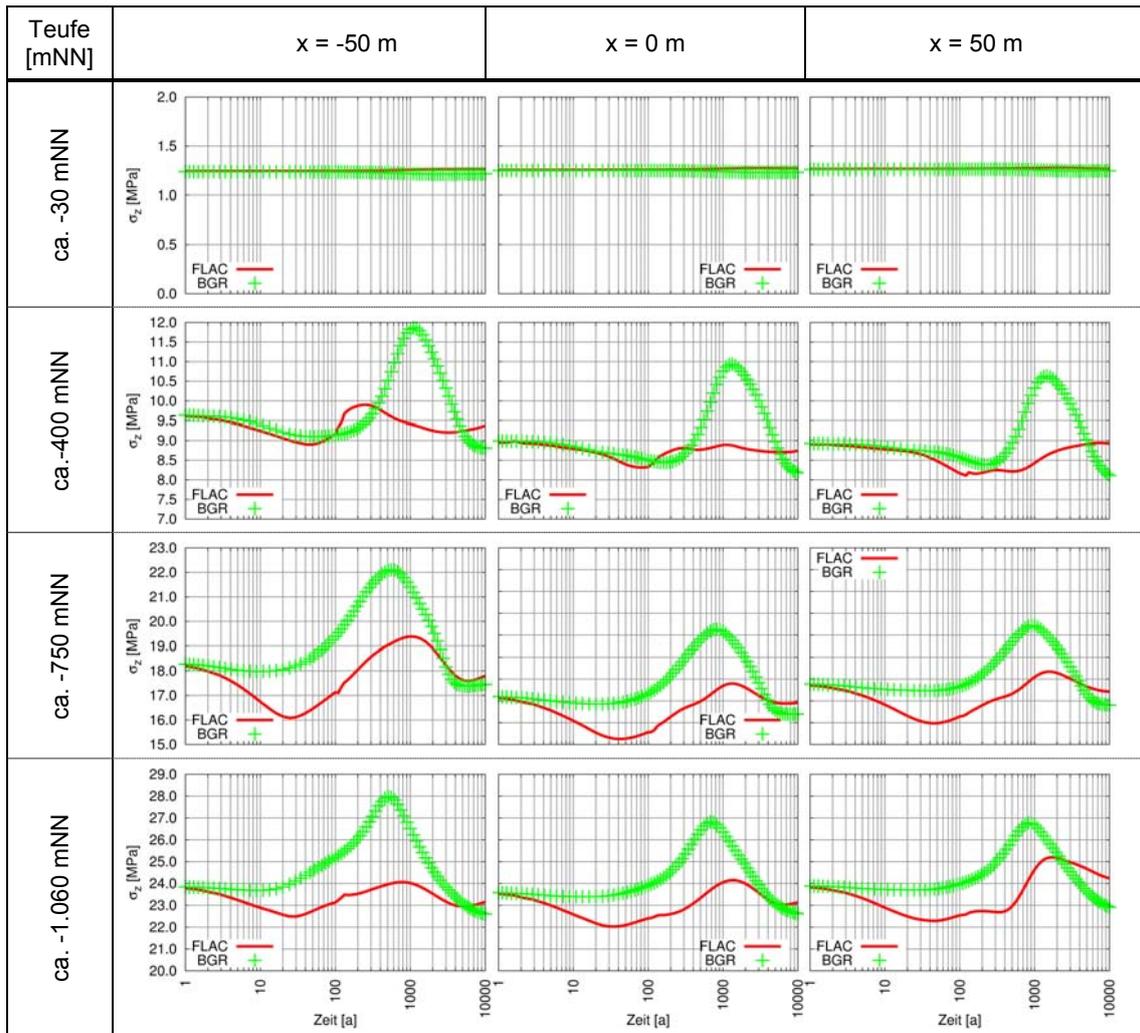
**Abb. 4.23** Temperaturerhöhung

grün: BGR-Fernfeldmodell, rot: FLAC-Berechnung Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“



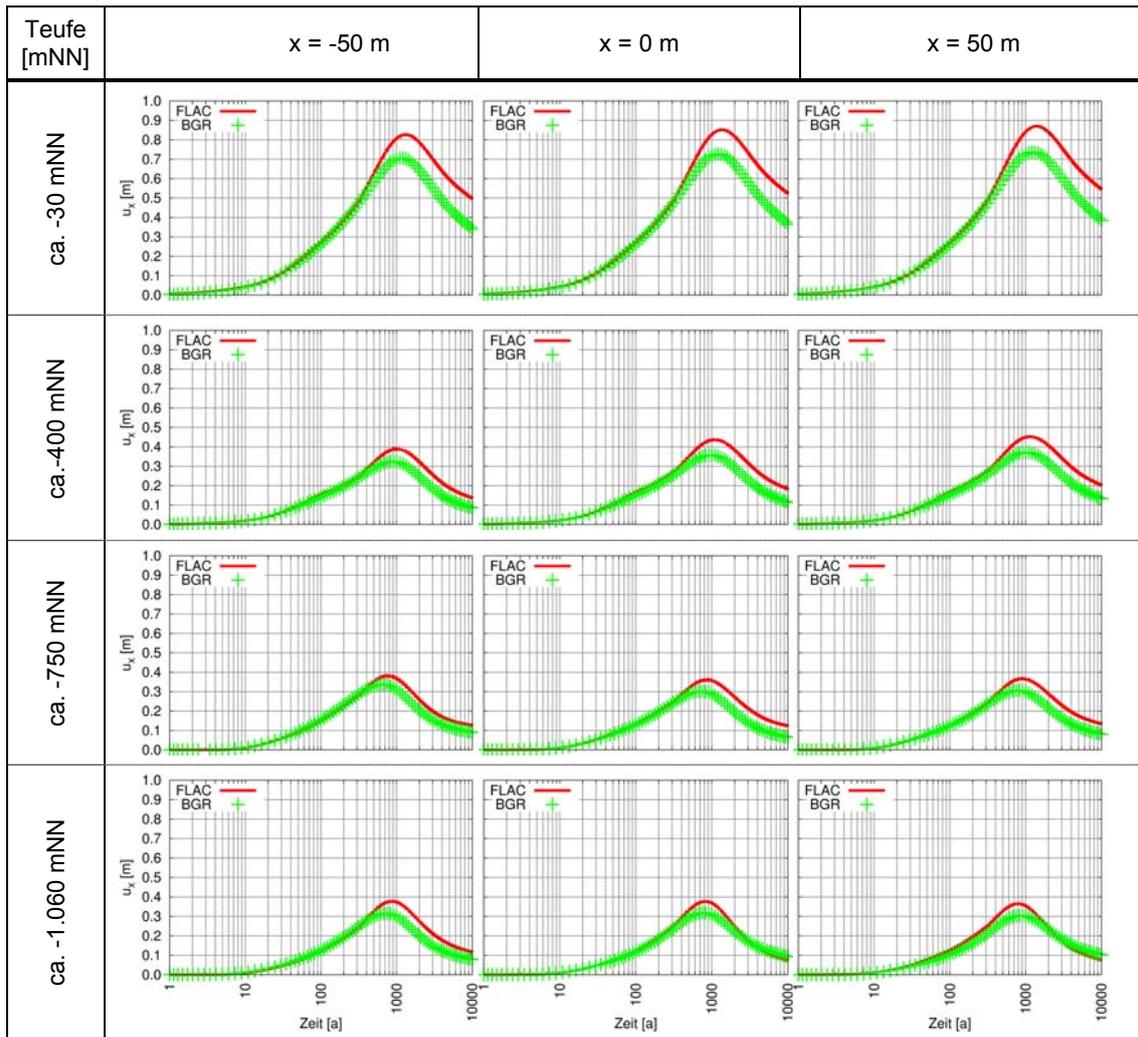
**Abb. 4.24** Horizontalspannung  $\sigma_x$

grün: BGR-Fernfeldmodell, rot: FLAC-Berechnung Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“



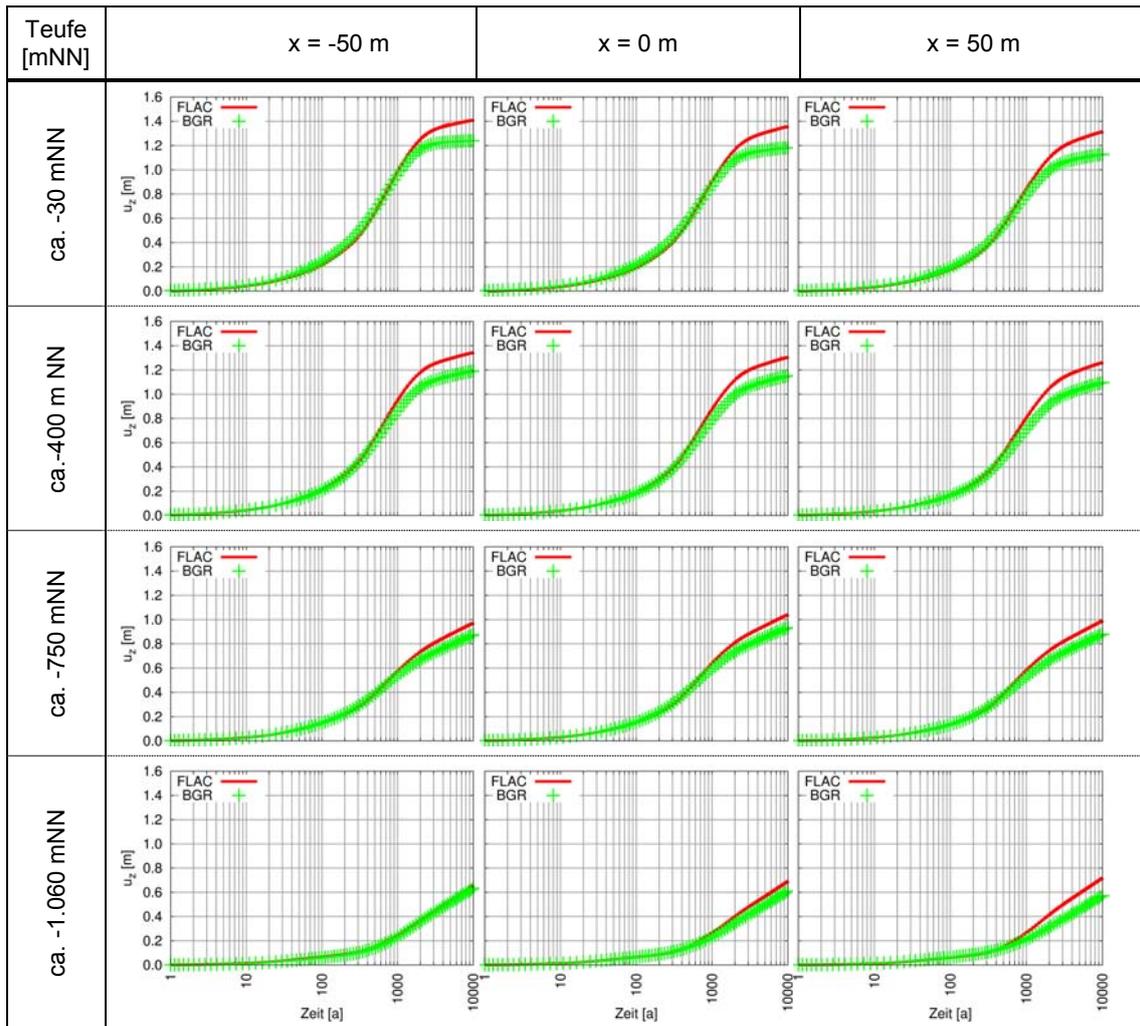
**Abb. 4.25** Vertikalspannung  $\sigma_z$

grün: BGR-Fernfeldmodell, rot: FLAC-Berechnung Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“



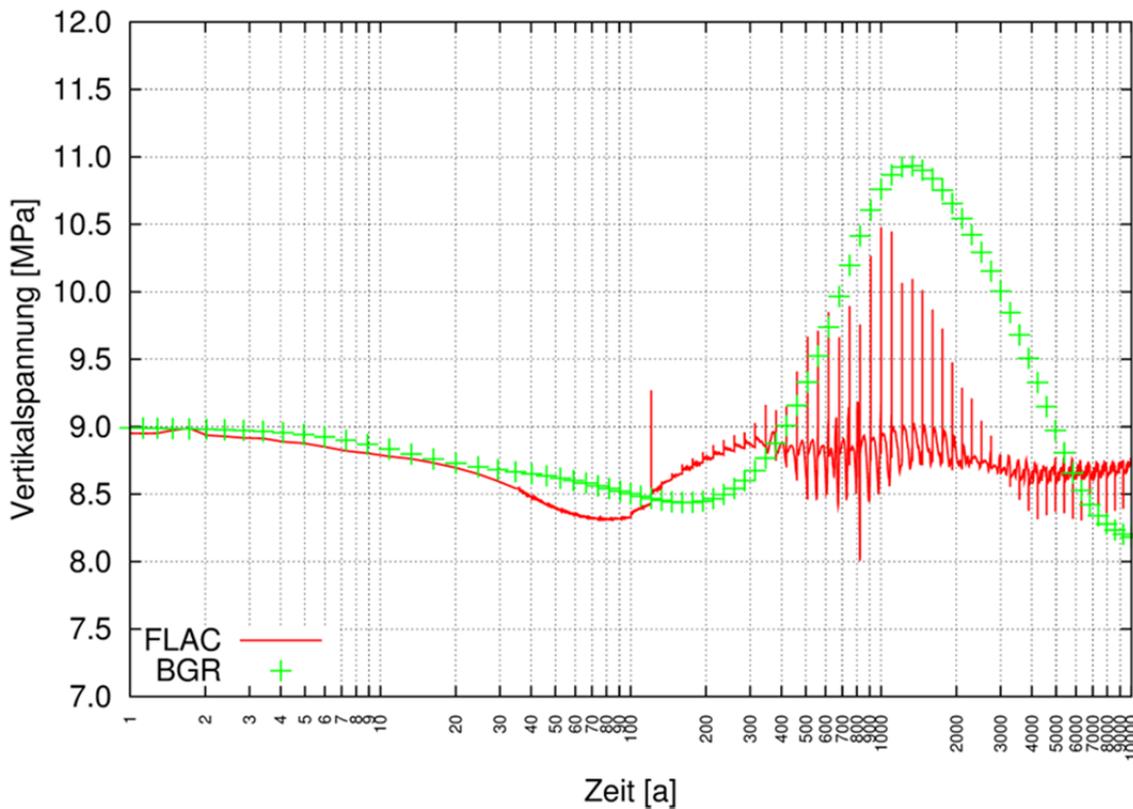
**Abb. 4.26** Horizontalverschiebung  $u_x$

grün: BGR-Fernfeldmodell, rot: FLAC-Berechnung Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“



**Abb. 4.27** Vertikalverschiebung  $u_z$

grün: BGR-Fernfeldmodell, rot: FLAC-Berechnung Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“



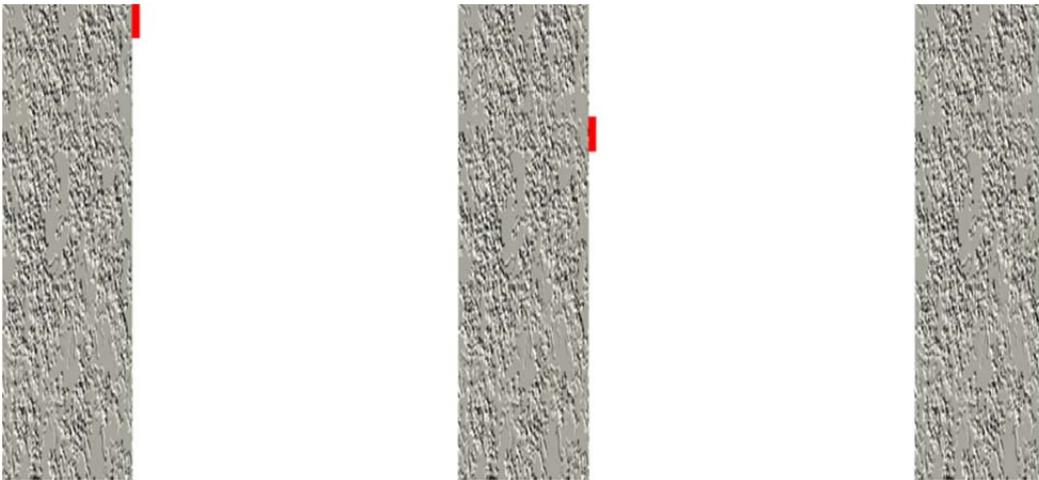
**Abb. 4.28** Zeitlicher Verlauf der Vertikalspannungen in der Schachtachse bei ca. - 400 mNN, Darstellung mit Iterationsverlauf

#### 4.6.3 Ergebnisse der Rechenfälle „kalter Schacht“

Wie einleitend beschrieben, dienen die Rechenfälle zum „Schachtverschluss als Ganzes“ der Auswahl der auslegungsbestimmenden Randbedingungen für die weiterführenden Berechnungen an den Substrukturen. Die auslegungsbestimmenden Randbedingungen werden durch den auflaufenden Gebirgsdruck und den Lösungsdruck bestimmt. Der Zeitverlauf des Lösungsdruckaufbaus und die Größe des Porendrucks wird für den Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ aus der Vorbemessung übernommen /MÜL 12a/, im Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ wird der Porendruck zu 0 gesetzt. Maßgebliche Unterschiede zu den Rechenfällen „heißer Schacht“ ergeben sich deshalb nur durch den auflaufenden Gebirgsdruck. Deshalb sind die Auswertelokationen im Kontaktbereich Dichtelement/Gebirge angeordnet.

#### 4.6.3.1 Auswertelokationen

Die Auswertelokationen befinden sich jeweils am Rand des Dichtelementes entweder innerhalb des Dichtelementes (Randzone Dichtelement) oder im Gebirge, das an das Dichtelement angrenzt (Randzone Salz). An diesen Stützstellen erfolgt die Auswertung von Zeitverläufen. Die Lage der Auswertelokationen ist qualitativ in Abb. 4.29 angegeben, die genaue Teufenlage der Auswertezonen in Tab. 4.15. Weiterhin werden Konturplots von Zustandsgrößen für das Modellgebiet zu verschiedenen Zeitpunkten ausgewertet.



**Abb. 4.29** Qualitative Lage der Auswertelokationen an den Dichtelementen

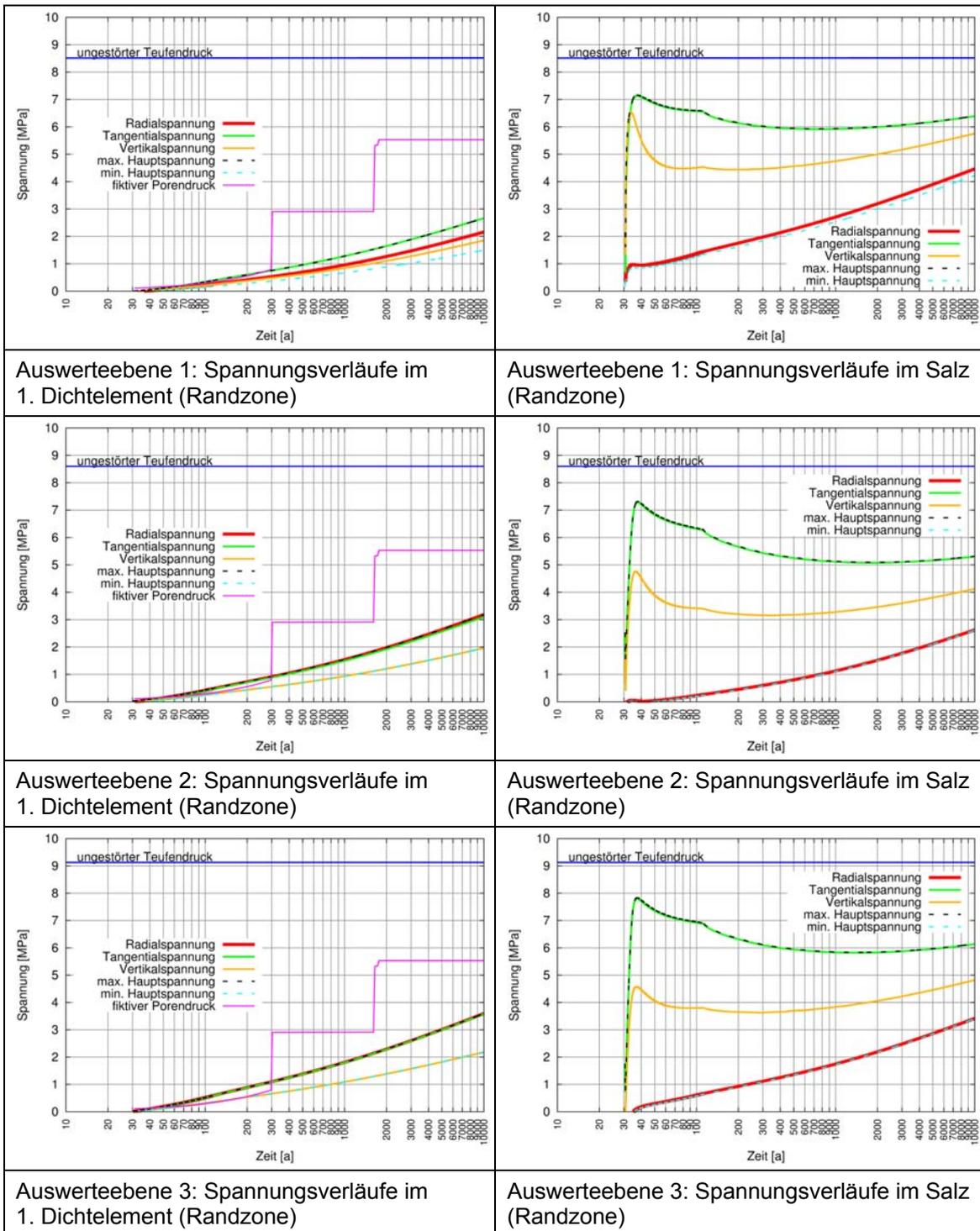
**Tab. 4.15** Positionen der Auswertelokationen mit Bezug auf das Teufenniveau und die Schachtachse

Lage des Auswertepunkts	Teufenniveau [mNN]	x-Lage [m] des Auswertepunkts Randzone Dichtelement	x-Lage [m] des Auswertepunkts Randzone Salz
1. Dichtelement, oben	-359,02	4,215	4,415
1. Dichtelement, Mitte obere Hälfte	-363,02		
1. Dichtelement, Mitte	-387,02		
2. Dichtelement, oben	-659,25	4,315	4,515
2. Dichtelement, Mitte obere Hälfte	-665,26		
2. Dichtelement, Mitte	-687,28		
3. Dichtelement, oben	-819,42	4,515	4,715
3. Dichtelement, Mitte obere Hälfte	-825,43		
3. Dichtelement, Mitte	-833,43		

#### 4.6.3.2 Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“

Als Ergebnis des Rechenfalls werden die zeitabhängigen Verläufe der Horizontalspannungen, der Tangentialspannungen und der Vertikalspannungen sowie der minimalen und der maximalen Hauptspannungen für die Dichtelemente aus Bentonit, Salzbeton und Sorelbeton an den Auswertelocationen bereitgestellt. Weiterhin wird, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung nach Gl. (4.3) orientierend für die Salzkontur ausgewertet. Auf die Auswertung des Fluiddruckkriteriums nach Gl. (4.4b) wird in diesem Rechenfall verzichtet, da kein Porendruck angesetzt wurde.

In Abb. 4.30 sind die Spannungsverläufe in korrespondierenden Zonen im Bentonitdichtelement und in der Auflockerungszone (ALZ) einander gegenübergestellt. Der ungestörte Teufendruck und der für das jeweilige Dichtelement geltende fiktive Porendruck (vgl. Abb. 4.12) sind ebenfalls angegeben. Es ist anzumerken, dass im Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ weder der detaillierte zeitliche Ablauf der Aufsättigung des Bentonitdichtelementes noch das Quellen des Bentonits berücksichtigt wird. Der Bentonit wird als elastisches Material ohne Quellvermögen nur mit seiner Stützwirkung abgebildet. Aus Abb. 4.30 wird dennoch bereits offensichtlich, dass ohne Quelldruckaufbau bei einem Lösungsdruck von 5,13 MPa das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck gemäß Gl. (4.4a) im Nachweiszeitraum immer verletzt wird. Dies dokumentiert die Notwendigkeit der Verwendung eines aktiv dichtenden Materials wie Bentonit als Baustoff für das oberste Dichtelement. So besteht die Chance, dass bei Berücksichtigung des Quellens das effektive Fluiddruckkriterium gemäß Gl. (4.4b) erfüllt wird. Dieser Sachverhalt wird auf Basis des Submodells „1. Dichtelement (Bentonit)“ vertieft untersucht, vgl. Kapitel 5. Im Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ wird deshalb auf das Bentonitdichtelement nur exemplarisch eingegangen und sein Verhalten qualitativ aufgezeigt.

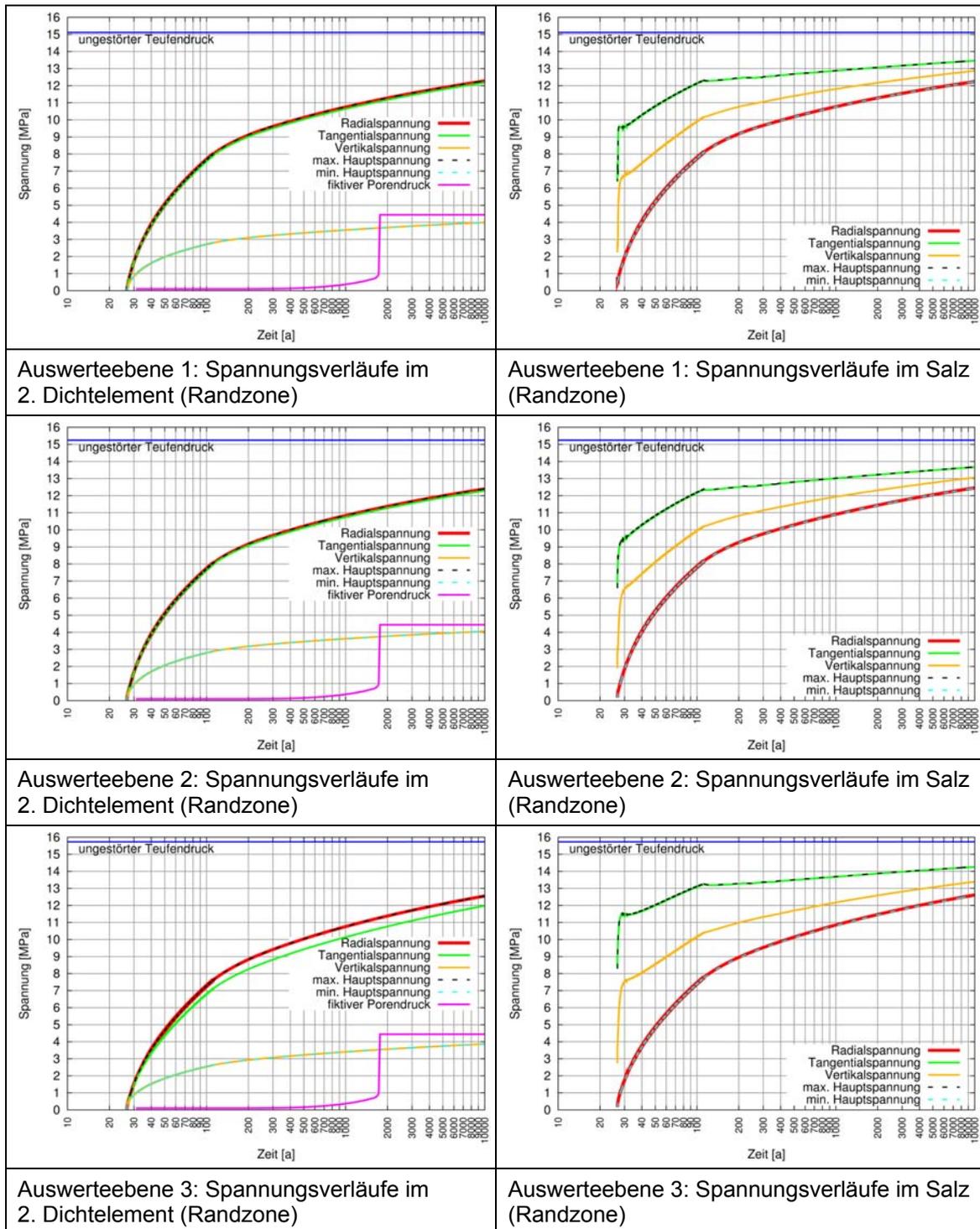


**Abb. 4.30** Rechenfall 1.2: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 1. Dichtelementes aus Bentonit

$t = 0$  a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell,  $t = 24$  a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses

Für das 2. Dichtelement aus Salzbeton zeigen die Spannungsverläufe in korrespondierenden Zonen (Abb. 4.31), dass die Radialspannung und die Tangentialspannung in-

nerhalb weniger Jahre ansteigen und das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck von der Radial- und Tangentialspannung eingehalten wird. Die Vertikalspannung zeigt ein deutlich anderes Verhalten. Während sie in der Auflockerungszone (Randzone Salz) auf hohe Werte ansteigt und das Fluiddruckkriterium eingehalten wird, steigt der Druck in der Randzone Dichtelement langsamer an und erreicht auch nach 10.000 Jahren nur ein Druckspannungsniveau von etwa 4 MPa. Nach 1.740 Jahren tritt rechnerisch ein Porendruck von 4,4 MPa auf, die Vertikalspannungskomponente im Salzbeton beträgt jedoch erst ca. 3,7 MPa, so dass im Kontaktbereich ggf. das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck verletzt wird. Bei einem langsamen Anstieg des Porendrucks werden in der Anfangsphase größere Bereiche bei geringem Druck aufgesättigt, so dass der Porendruck zunehmend als neutrale Spannung wirkt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass bei Abbau von Konservativitäten das effektive Fluiddruckkriterium eingehalten wird, vgl. dazu auch das folgende Kapitel 4.6.3.3. Ganz andere Bedingungen herrschen in der ALZ. Nach 50 Jahren wird der nach 1.740 Jahren rechnerisch wirkende Porendruck von 4,4 MPa von der Radialspannung, die mit der kleinsten Hauptspannung identisch ist, überschritten und das Fluiddruckkriterium eingehalten.

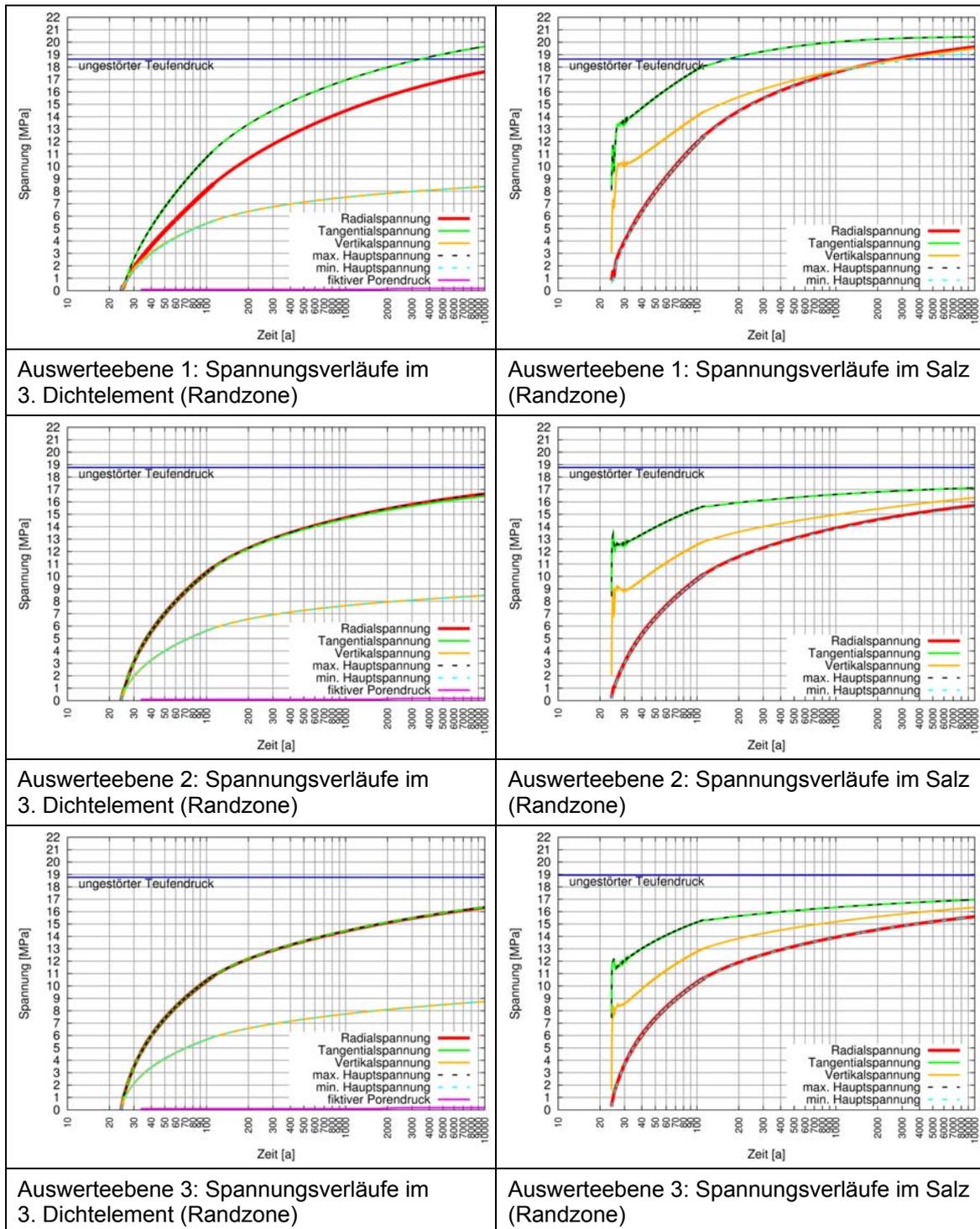


**Abb. 4.31** Rechenfall 1.2: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton

$t = 0$  a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell,  $t = 24$  a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses

In Abb. 4.32 zeigen die Spannungsverläufe in korrespondierenden Zonen für das 3. Dichtelement aus Sorelbeton, dass auch hier der Druckaufbau für die Radialspan-

nung und die Tangentialspannung schnell erfolgt, die Vertikalspannung jedoch ein Verhalten aufweist, dass dem im Bereich des 2. Dichtelementes vergleichbar ist. Wiederum steigt der Druck in der Randzone Dichtelement deutlich langsamer an und erreicht auch nach 10.000 Jahren rechnerisch nur ein Druckspannungsniveau von etwa 8 – 9 MPa. Da im Betrachtungszeitraum kein nennenswerter Porendruck ansteht, ist das Fluidruckkriterium jedoch eingehalten.



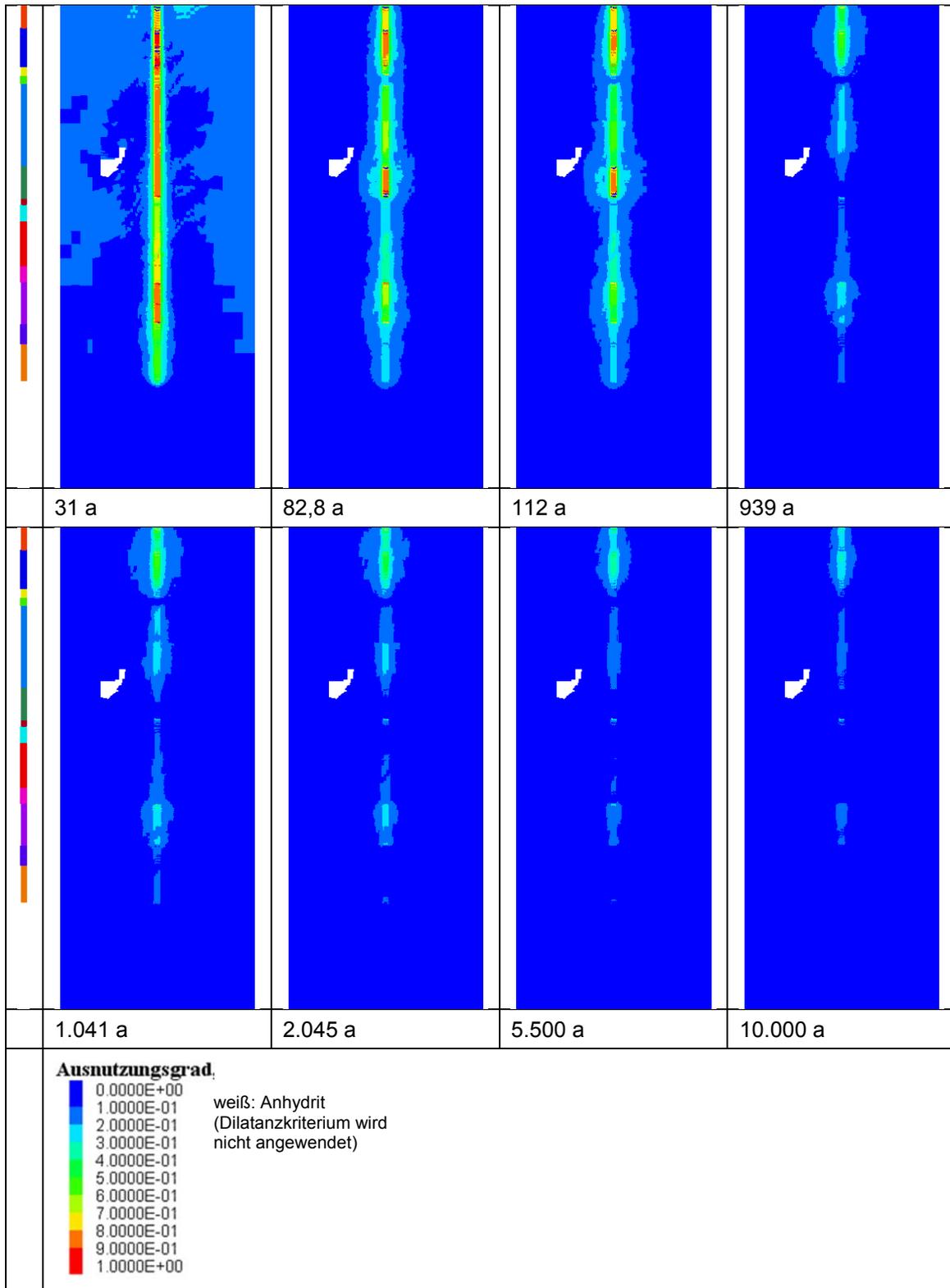
**Abb. 4.32** Rechenfall 1.2: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton

$t = 0$  a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell,  $t = 24$  a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses

Im Anschluss wird nun der Sachverhalt diskutiert, warum so geringe Vertikalspannungen ausgewiesen werden. Die Dichtelemente werden spannungsfrei eingebaut. Die

Stirnflächen der Widerlager sind unter trockenen Bedingungen nur geringem Druck ausgesetzt, da das Eigengewicht der Füllsäule über die Schachtkontur in das Salzgebirge abgetragen wird. So ist das Dichtelement in vertikaler Richtung entlastet, während der Druckaufbau im Salzgestein kriechbedingt vergleichsweise schnell wieder zunimmt. Aufgrund der Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkung ist diese Entlastung als Zwangsspannung auch für die Kontaktzone zum Salzgestein zu beachten. Dieser Effekt wird jedoch erst bei sehr hoher Auflösung (wenige cm) erfasst, da der Zwang dieser „künstlichen Schichtgrenze“ mit Materialien unterschiedlicher Steifigkeit und Kriechfähigkeit in geringer Entfernung zum Kontaktbereich bereits wieder abklingt.

Abschließend ist in Abb. 4.33 der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung für verschiedene Zeitpunkte angegeben. Die Funktionselemente des Schachtverschlusses sind in der Ansicht nicht mit dargestellt, sondern als Maßstab daneben skizziert. Für die weiß gekennzeichneten Anhydritbereiche gilt die Dilatanzbedingung nicht, für sie erfolgt keine Auswertung. Es zeigt sich, dass der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung im Salzgestein bereits kurz nach Einbau der Funktionselemente des Schachtverschlusses auf Werte kleiner 1 zurückgeht und somit keine Auflockerungen mehr stattfinden.



**Abb. 4.33** Rechenfall 1.2: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten

t = 31 a: Zeitpunkt der Fertigstellung des Schachtverschlusses im Salinar

#### 4.6.3.3 Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“

Als Ergebnis des Rechenfalls werden analog zum Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ die zeitabhängigen Verläufe der Horizontalspannungen, der Tangentialspannungen und der Vertikalspannungen, der minimalen und der maximalen Hauptspannungen sowie der Schubspannungen für die Dichtelemente aus Salzbeton und Sorelbeton an den Auswertelocationen bereitgestellt. Weiterhin werden wie in Kapitel 4.2 beschrieben der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung nach Gl. (4.3) sowie das Fluiddruckkriterium nach Gl. (4.4b) orientierend für die Salzkontur ausgewertet.

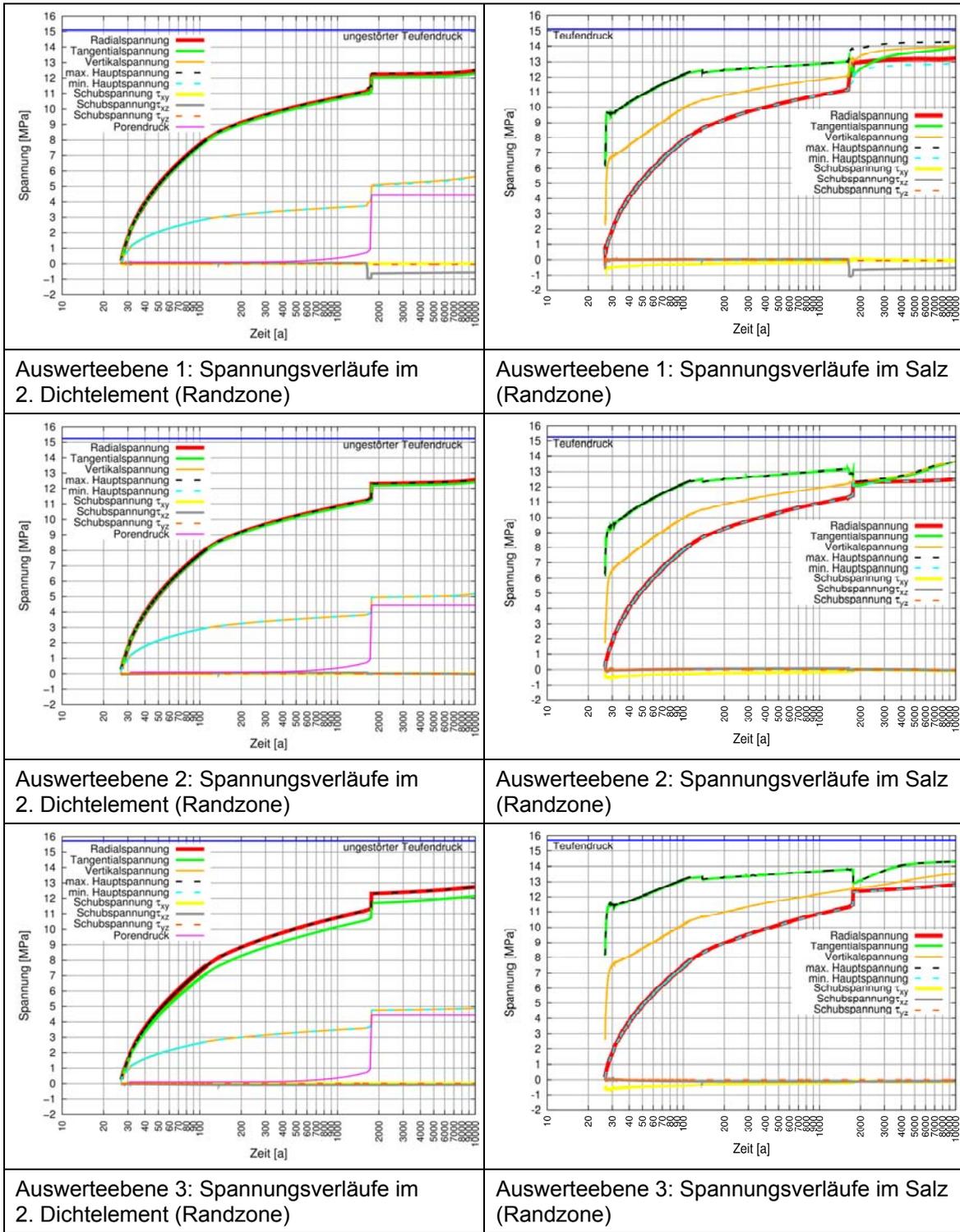
Auf die Auswertung der Spannungsverläufe im ersten Dichtelement aus Bentonit wird verzichtet, da im Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ der Quelldruck nicht erfasst wird. In Bezug auf das Dichtelement aus Bentonit wird auf die Ergebnisse zum Submodell „1. Dichtelement (Bentonit)“ in Kapitel 5 verwiesen.

In Abb. 4.34 sind die Spannungsverläufe der totalen Spannungen in korrespondierenden Zonen des 2. Dichtelements aus Salzbeton und der Auflockerungszone einander gegenübergestellt. Der ungestörte Teufendruck und der für das jeweilige Dichtelement geltende Porendruck (vgl. Abb. 4.12) sind ebenfalls angegeben, die effektiven Spannungen ergeben sich als Differenz von totalen Spannungen und Porendruck. Das Porendruckfeld wird in den Berechnungen mit berücksichtigt. Die Spannungen beinhalten also den Porendruck, erfassen jedoch nicht die lokal wirkenden Strömungskräfte, da kein Strömungsprozess modelliert wurde. Bis zum Aufbringen des Porendrucks entspricht der Spannungsaufbau dem des Rechenfalls „kalter Schacht ohne Porendruck“. Bei Aufbringen des Porendrucks wird das Niveau der totalen Spannungen in der Randzone Dichtelement angehoben, die Größe der effektiven Spannungen, die sich als Differenz zwischen Porendruck und totaler Spannung ergeben, sinkt jedoch an allen Auswertepunkten ab, da sich die auf die Feststoffmatrix wirkenden Spannungen verringern. Dennoch verbleibt auch die effektive Spannung der kleinsten Hauptspannungskomponente in der Randzone Dichtelement, die mit der Vertikalspannung identisch ist, im Druckbereich. Lediglich zum Zeitpunkt des starken Porendruckanstiegs nach 1.740 Jahren ergibt sich für die kleinste Hauptspannungskomponente eine effektive Spannung von 0. Der instantane Anstieg des Porendrucks ergibt sich modellierungsbedingt aus der hydraulischen Ankopplung der Lösungsdrucksäule /BUH 12b/. Er findet in Realität aufgrund residualer Gasphasen und der Systemkompressibilität ge-

dämpfter und zeitlich verzögert statt, so dass das Fluidruckkriterium bei realitätsnaher Modellierung eingehalten wird.

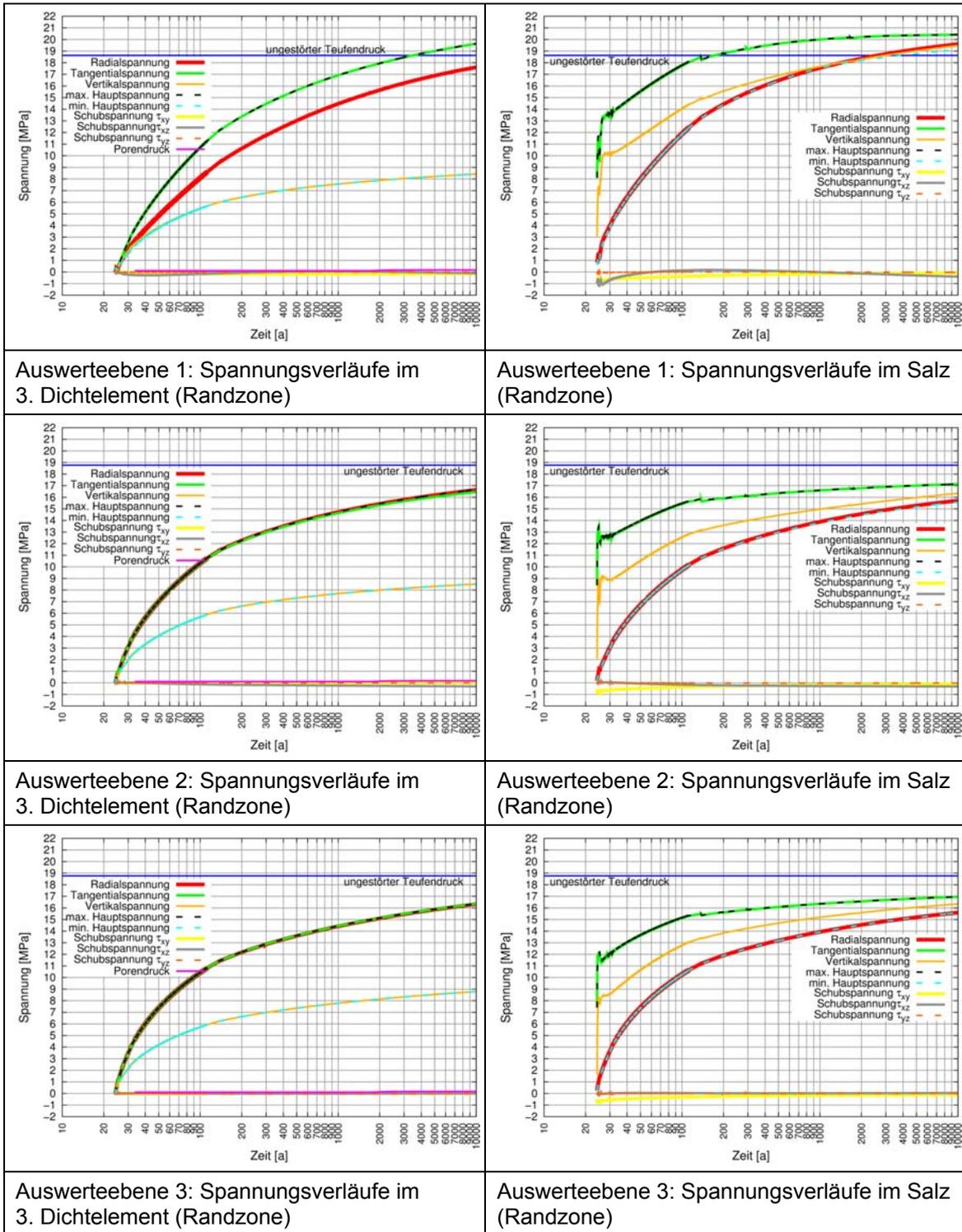
Ein anderes Verhalten ergibt sich an den korrespondierenden Auswertelokationen in den Randzonen Salz. Während das Radialspannungsniveau in den Randzonen dem Radialspannungsniveau den Randzonen Dichtelement entspricht und auch die durch den Porendruck bedingte Anhebung der totalen Spannungen vergleichbar erfolgt, sinkt die Tangentialspannung aufgrund der durch den Innendruck bedingten Entlastung zuerst ab, steigt dann aber kriechbedingt wieder an. Die Vertikalspannung erfährt im oberen Bereich des Dichtelementes (Auswerteebene 1) einen zusätzlichen Druckaufbau durch den an der Stirnfläche herrschenden Lösungsdruck, in der Mitte des Dichtelementes (Auswerteebene 2 und 3) ist dieser Einfluss jedoch nicht mehr sichtbar.

Im Bereich des 3. Dichtelementes herrscht im Betrachtungszeitraum nur ein geringer Porendruck. Der Verlauf der Spannungskomponenten ist deshalb praktisch identisch mit den Spannungsverläufen im Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“, vgl. Abb. 4.32 und Abb. 4.35. Auf eine Diskussion der Ergebnisse wird deshalb verzichtet.



**Abb. 4.34** Rechenfall 1.3: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton

$t = 0$  a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell,  $t = 24$  a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses

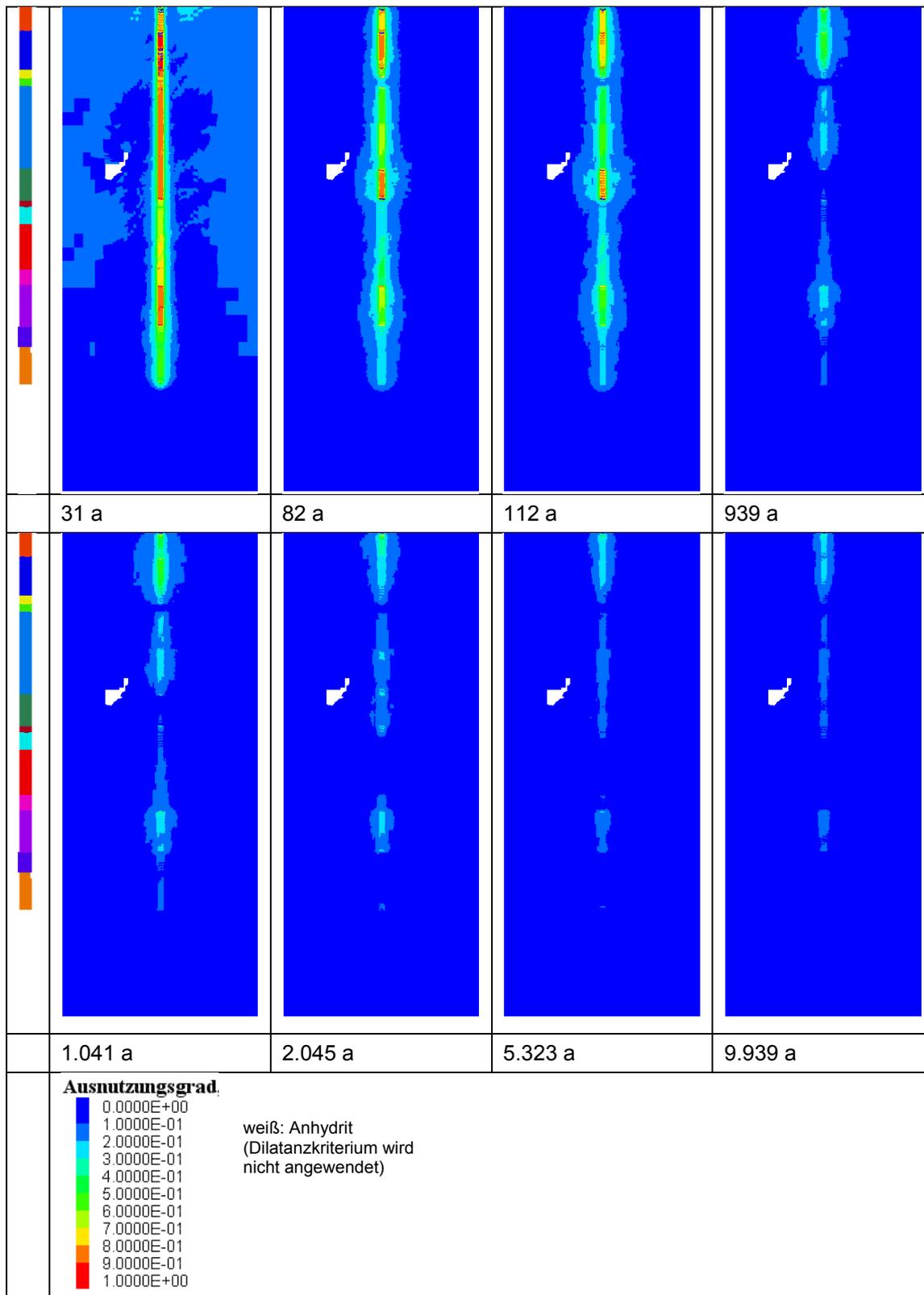


**Abb. 4.35** Rechenfall 1.3: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton

t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses

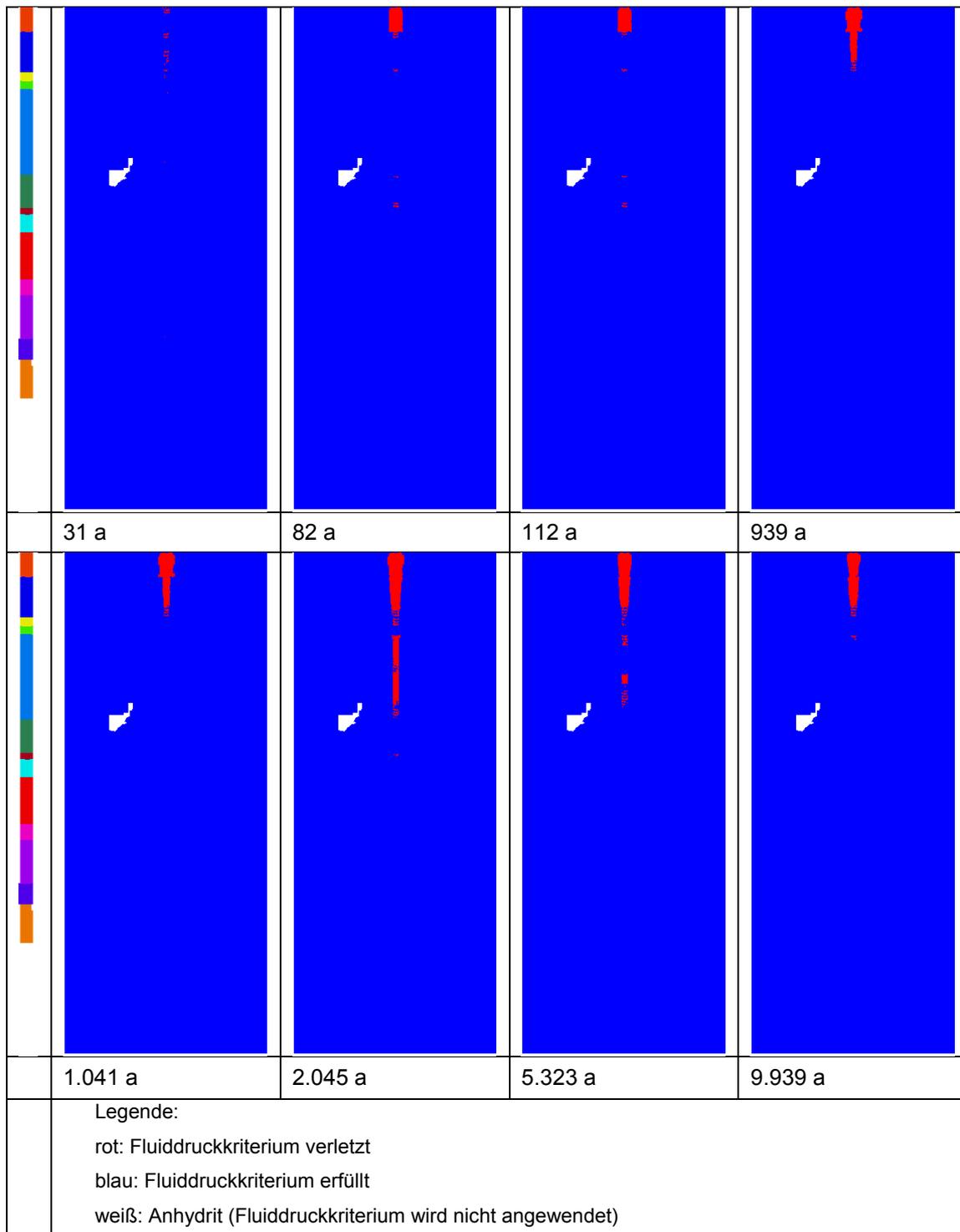
In Abb. 4.36 ist der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung für verschiedene Zeitpunkte angegeben. Die Funktionselemente des Schachtverschlusses sind analog zum Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ als Maßstab daneben skizziert, für die weiß gekennzeichneten Anhydritbereiche erfolgt keine Auswertung. Es zeigt sich, dass der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung im Salzgestein bereits kurz nach Einbau der Funktionselemente des Schachtverschlusses auf Werte kleiner 1 zurückgeht und somit keine Auflockerungen mehr stattfinden. Es treten nur geringe Unterschiede zum Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ auf, am stärksten wird der Unterschied zum Zeitpunkt 2.045 Jahre sichtbar. Dieser ist jedoch auf den Modellierungsansatz für die Langzeitdichtung zurückzuführen, in dem unterschiedliche Druckentwicklungen (Abb. 4.10 und Abb. 4.11) vorgegeben werden.

Die Auswertung des effektiven Fluiddruckkriteriums (Abb. 4.37) bestätigt erneut die Notwendigkeit, den Quelldruck des Bentonits zu berücksichtigen. Wird der Quelldruck wie im vorliegenden Rechenfall vernachlässigt, wird das effektive Fluiddruckkriterium im Bereich des 1. Dichtelementes aus Bentonit ab dem Zeitpunkt, an dem der Porendruck voll wirksam wird, nicht mehr erfüllt. Im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton ist es immer erfüllt. Im Bereich der Schottersäule ist es zuerst eingehalten, da kein Porendruck ansteht, mit Zunahme des Porendruckes ist es dann nicht mehr erfüllt, anschließend verbessert sich der Zustand durch das zunehmende Aufkriechen des Salzes und den damit verbundenen Druckaufbau und es wird wieder eingehalten. Die Verletzung des Fluiddruckkriteriums im Bereich der Schottersäule ist für die Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses ohne Belang, die Diskussion erfolgt nur zur Erläuterung der Ergebnisdarstellung in Abb. 4.37.



**Abb. 4.36** Rechenfall 1.3: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten

t = 31 a: Zeitpunkt der Fertigstellung des Schachtverschlusses im Salinar



**Abb. 4.37** Rechenfall 1.3: Ergebnisse der Anwendung des effektiven Fluiddruckkriteriums zu verschiedenen Zeitpunkten

t = 31 a: Zeitpunkt der Fertigstellung des Schachtverschlusses im Salinar

## **4.6.4 Ergebnisse der Rechenfälle „heißer Schacht“**

### **4.6.4.1 Auswertelokationen**

Die Auswertelokationen sind identisch mit den Auswertelokationen für die Berechnungsergebnisse zu den Rechenfällen zum „kalten Schacht“, vgl. Kapitel 4.6.3.1. Auch die Auswertung erfolgt analog zu den Rechenfällen zum „kalten Schacht“ anhand von Zeitverläufen und Konturplots.

Zur begleitenden Überprüfung und um weiterhin das Modellverständnis zum Einfluss des Schachtes auf das durch die thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers veränderte Spannungsfeld zu verbessern, werden für den Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“ zusätzlich die in Kapitel 4.6.2.1. beschriebenen Auswertelokationen des Rechenfalls „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ mitgeführt, wobei die Referenzlinie bei  $x = 0$  m entfällt, da diese nunmehr in der Schachtachse liegt.

### **4.6.4.2 Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“**

Als Ergebnis des Rechenfalls werden die zeitabhängigen Verläufe der Horizontalspannungen, der Tangentialspannungen und der Vertikalspannungen sowie der minimalen und der maximalen Hauptspannungen für die Dichtelemente aus Bentonit, Salzbeton und Sorelbeton an den Auswertelokationen bereitgestellt. Weiterhin wird wie in Kapitel 4.2 beschrieben der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung nach Gl. (4.3) orientierend für die Salzkontur ausgewertet. Auf die Auswertung des Fluiddruckkriteriums nach Gl. (4.4a) wird in diesem Rechenfall verzichtet, da kein Porendruck angesetzt wurde.

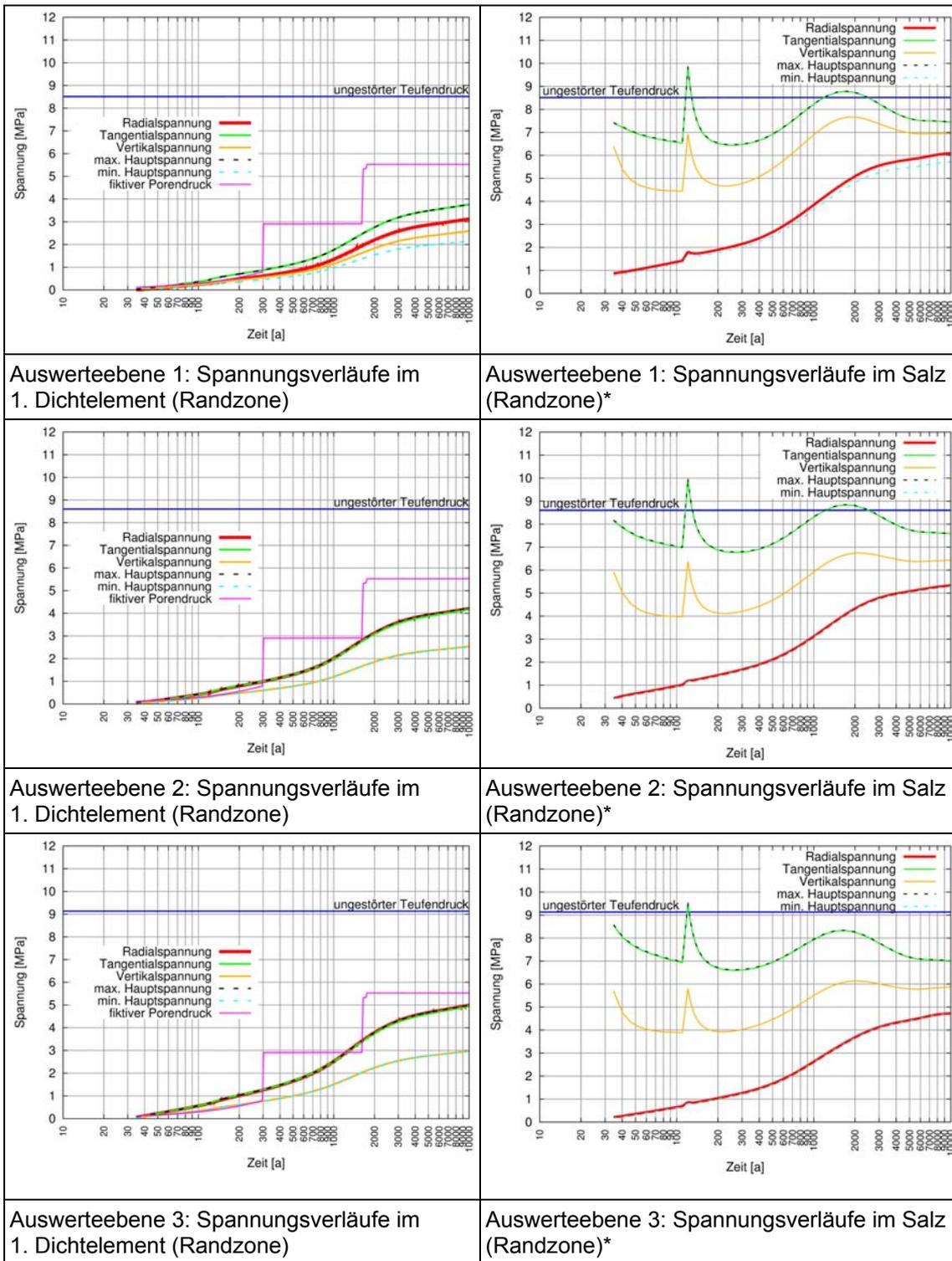
In Abb. 4.38 sind analog zum Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ die Spannungsverläufe in korrespondierenden Zonen im Bentonitdichtelement und in der ALZ einander gegenübergestellt. Weiterhin sind der ungestörte, thermomechanisch unbeeinflusste Teufendruck und der für das jeweilige Dichtelement geltende fiktive Porendruck (vgl. Abb. 4.12) ebenfalls in die Abbildungen eingetragen. Obwohl die thermomechanischen Einwirkungen infolge des Endlagers zu einem beschleunigten Druckaufbau auf das Bentonitdichtelement führen und somit zu einer tendenziell verbesserten Druckeinspannung, wird dieser Effekt erst für einen Zeitbereich von  $> 100$  Jahren merkbar. Da bereits zu frühen Zeitpunkten von einem Lösungsdruckaufbau

ausgegangen werden muss, ist offensichtlich, dass ohne Quelldruckaufbau bei einem Lösungsdruck von 5,13 MPa das Fluidruckkriterium für den fiktiven Porendruck gemäß Gl. (4.4a) verletzt wird. Dieses Ergebnis dokumentiert erneut die Notwendigkeit der Verwendung eines aktiv dichtenden Materials wie quellfähigen Betonit als Baustoff für das oberste Dichtelement, siehe dazu die weiterführenden Analysen für das Submodell „1. Dichtelement (Bentonit)“ in Kapitel 5.

Für das 2. Dichtelement aus Salzbeton zeigen die Spannungsverläufe in korrespondierenden Zonen (Abb. 4.39), dass die Radialspannungen und die Tangentialspannungen wie im Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ innerhalb weniger Jahre schnell ansteigen und das Fluidruckkriterium für den fiktiven Porendruck von der Radial- und Tangentialspannung eingehalten wird. Die Vertikalspannung zeigt erneut das bereits im Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ festgestellte, andere Verhalten. In der Randzone Dichtelement steigt die Vertikalspannung deutlich langsamer an und beträgt zum Zeitpunkt 1.740 Jahre im Salzbeton etwa 3,5 MPa. Sie steigt im weiteren Zeitverlauf bis 10.000 Jahre nicht weiter an. Die Ursache dafür liegt in der thermisch induzierten Hebung der Tagesoberfläche, die in den Dichtelementen über die Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkung zu einer Spannungsreduktion in vertikaler Richtung führt. Die Vertikalspannung liegt deshalb sogar geringfügig unter dem nach 1.740 Jahren erreichten Druckspannungsniveau von 3,7 MPa im Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“. Da bereits nach 1.740 Jahren rechnerisch ein Porendruck von 4,4 MPa auftritt, die Vertikalspannungskomponente im Salzbeton jedoch erst ca. 3,5 MPa beträgt, wird das Fluidruckkriterium für den fiktiven Porendruck im Kontaktbereich ggf. verletzt. Bei einem langsamen Porendruckaufbau in der Anfangsphase werden in Realität größere Bereiche bei geringem Druck aufgesättigt, so dass der Porendruck zunehmend als neutrale Spannung wirkt. So kann davon ausgegangen werden, dass bei Abbau von Konservativitäten das effektive Fluidruckkriterium eingehalten wird, vgl. dazu auch das folgende Kapitel 4.6.4.3. Ganz andere Bedingungen herrschen aufgrund der thermisch induzierten Spannungserhöhung in der ALZ. Bereits nach 40 Jahren wird der nach 1.740 Jahren rechnerisch wirkende Porendruck von 4,4 MPa von der Radialspannung, die mit der kleinsten Hauptspannung identisch ist, überschritten und das Fluidruckkriterium eingehalten.

In Abb. 4.40 zeigen die Spannungsverläufe in korrespondierenden Zonen für das 3. Dichtelement aus Sorelbeton erneut, dass der Druckaufbau für die Radialspannung und die Tangentialspannung unter dem zusätzlichen Einfluss des Endlagers sehr schnell erfolgt. Die Vertikalspannung im Sorelbeton zeigt das bereits bekannte andere

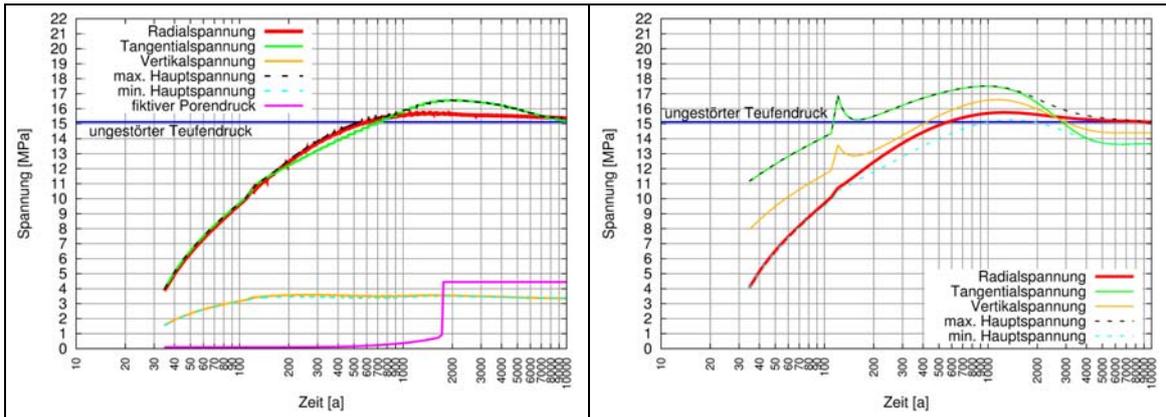
Verhalten, vgl. Kapitel 4.6.3.2 und 4.6.3.3. Wiederum steigt die Vertikalspannung in der Randzone Dichtelement langsamer an und erreicht nach einem schwach ausgeprägten Maximum nach 10.000 Jahren ein Druckspannungsniveau von etwa 8 – 9 MPa. Da im Betrachtungszeitraum kein nennenswerter Porendruck ansteht, ist das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck in der ALZ uneingeschränkt eingehalten.



\* Die Spannungsspitze in den Abbildungen rechts markiert den Übergang auf die zonenbasierte, rein mechanische Berechnung.

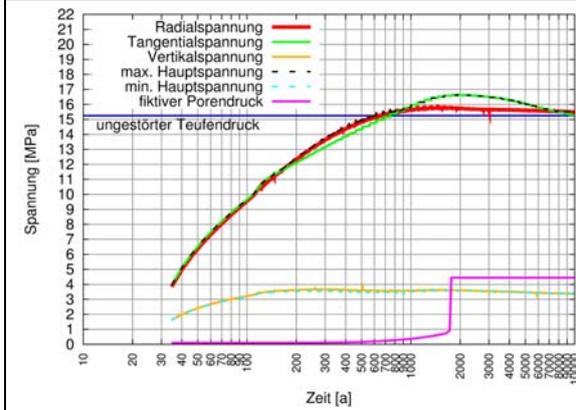
**Abb. 4.38** Rechenfall 1.5: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 1. Dichtelementes aus Bentonit

t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses

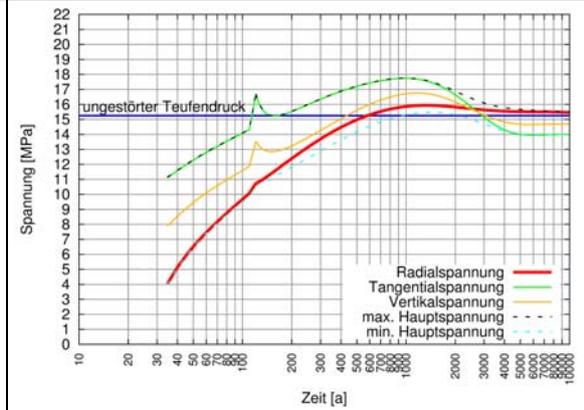


Auswerteebene 1: Spannungsverläufe im 2. Dichtelement (Randzone)

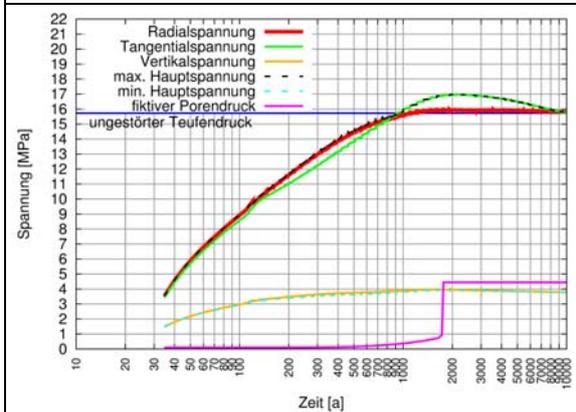
Auswerteebene 1: Spannungsverläufe im Salz (Randzone)\*



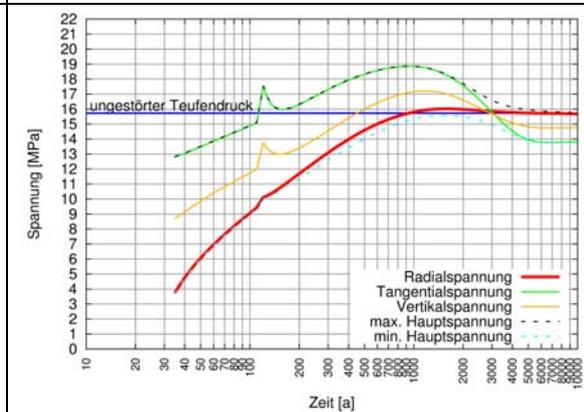
Auswerteebene 2: Spannungsverläufe im 2. Dichtelement (Randzone)



Auswerteebene 2: Spannungsverläufe im Salz (Randzone)\*



Auswerteebene 3: Spannungsverläufe im 2. Dichtelement (Randzone)

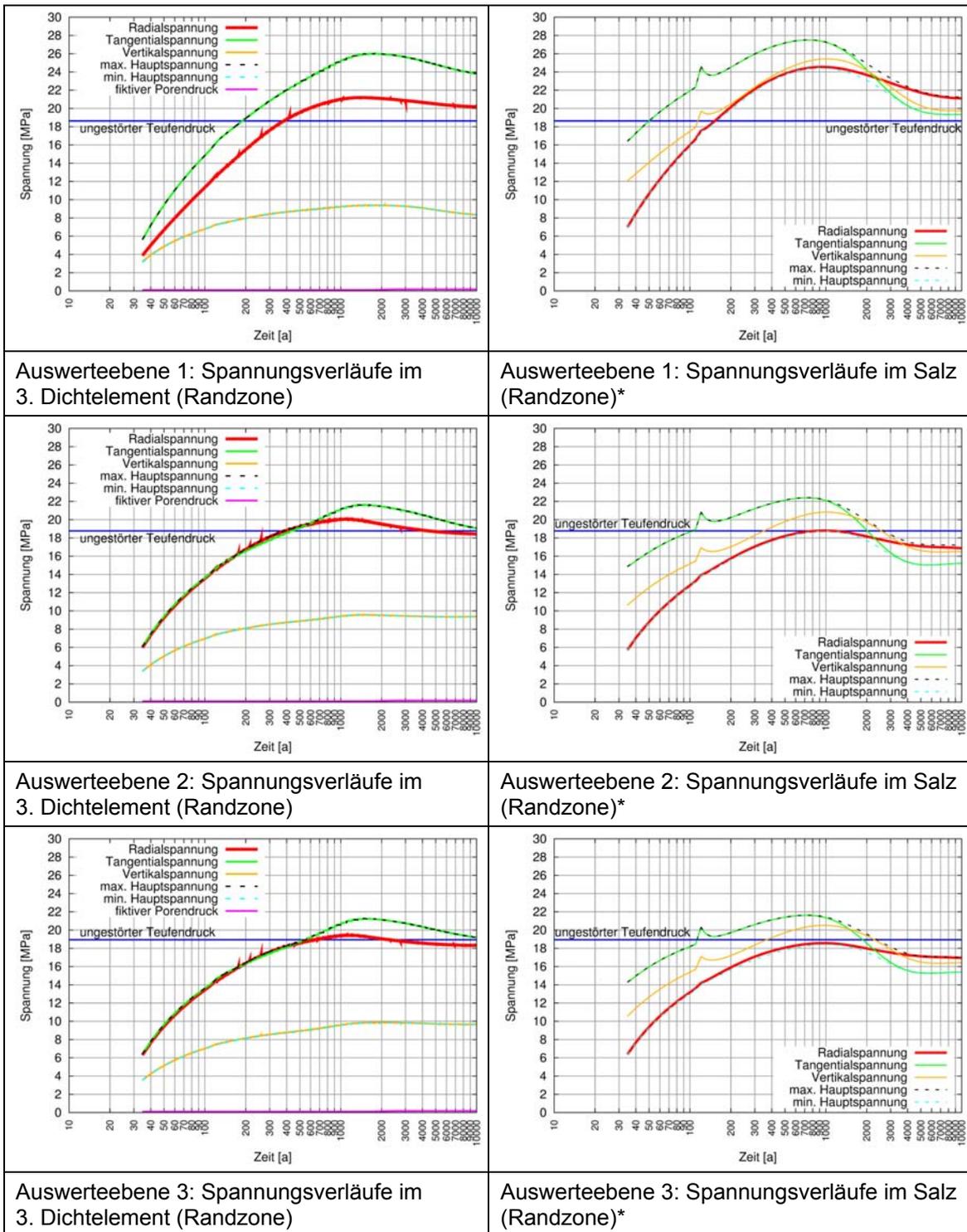


Auswerteebene 3: Spannungsverläufe im Salz (Randzone)\*

\* Die Spannungspitze in den Abbildungen rechts markiert den Übergang auf die zonenbasierte, rein mechanische Berechnung.

**Abb. 4.39** Rechenfall 1.5: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton

t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses



\* Die Spannungsspitze in den Abbildungen rechts markiert den Übergang auf die zonenbasierte, rein mechanische Berechnung.

**Abb. 4.40** Rechenfall 1.5: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton

t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses

Um das Systemverständnis zu verbessern, werden ergänzend der Zeitverlauf der Horizontalspannungen (Abb. 4.41) und der Zeitverlauf der Vertikalspannungen (Abb. 4.42) an den Auswertepunkten der Referenzlinien bei  $x = -50$  m und  $x = 50$  m dargestellt. Die Darstellungen zeigen, dass in 50 m Entfernung vom Schacht das Schachtteufen zu einem Spannungsabfall führt. Für die Horizontalspannungen stellt sich jedoch wenige Jahre nach Verfüllung des Schachtes der Spannungsverlauf des Rechenfalls „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ wieder ein, der Einfluss der ehemals offenen Schachtröhre klingt ab (siehe Abb. 4.24 und Abb. 4.41). Bei den Vertikalspannungen bleibt aufgrund der Länge der Schachtröhre und der vorhandenen Steifigkeitsunterschiede zwischen Salz und den für den Schachtverschluss verwendeten Baustoffen ein etwas stärkerer Einfluss erhalten, insgesamt ist er jedoch auch gering (siehe Abb. 4.25 und Abb. 4.42).

Aus den Darstellungen wird deutlich, warum beim Übergang auf die zonenbasierte Berechnung im Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“ rechnerisch eine so ausgeprägte Spannungsspitze entsteht. Bei Übernahme der Feldgrößen aus dem BGR-Fernfeldmodell besteht keine Kompatibilität zwischen den Randbedingungen und Feldgrößen des BGR-Fernfeldmodells, in denen der Schacht nicht berücksichtigt ist, und den Randbedingungen und Feldgrößen des FLAC-Modells, in denen der Schacht berücksichtigt ist. Mit zunehmender Zeit wird diese Inkompatibilität im numerischen Prozess geringer, und die Störung im Kurvenverlauf klingt ab.

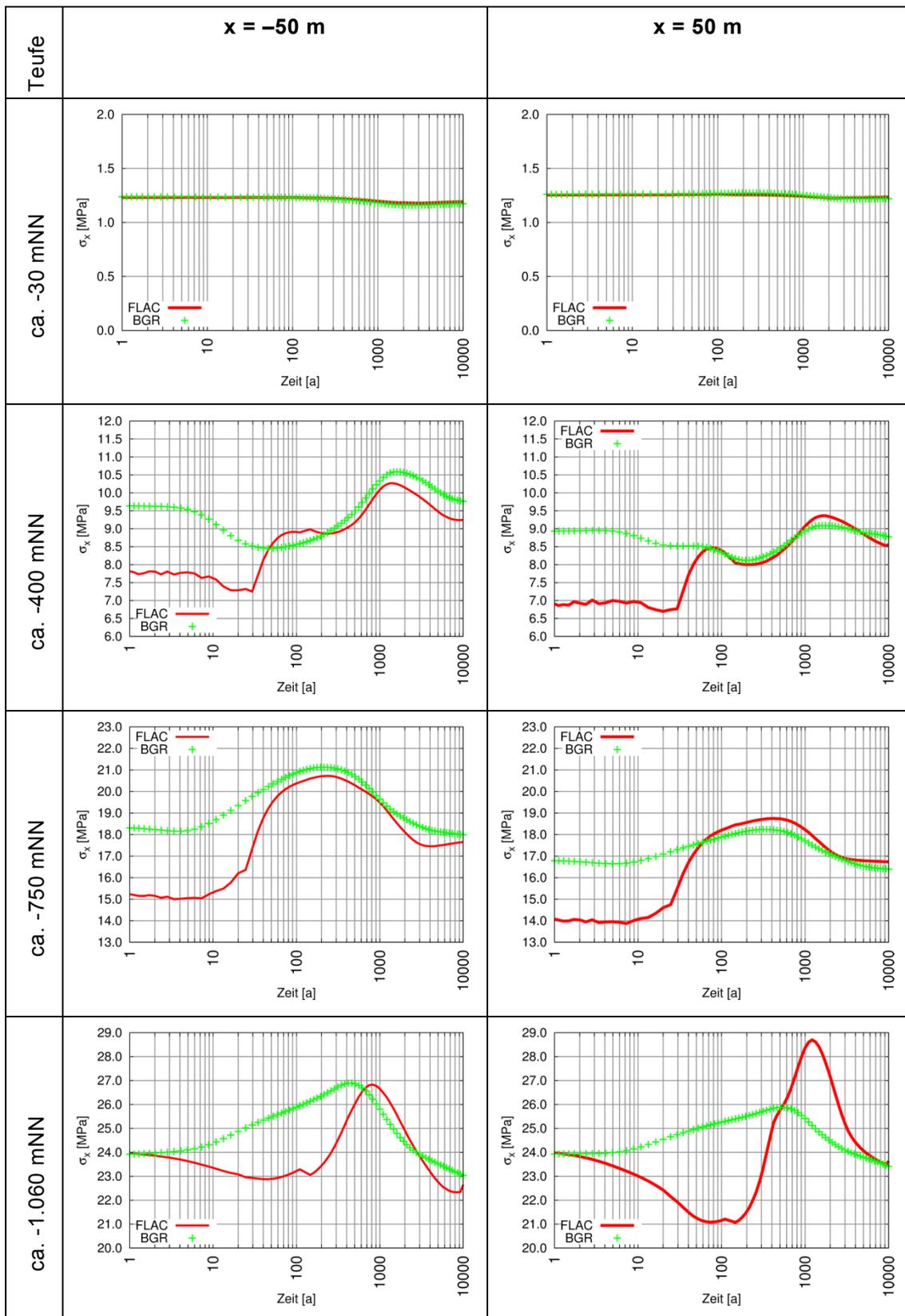


Abb. 4.41 Horizontalspannung  $\sigma_x$

grün: BGR-Fernfeldmodell, rot: FLAC-Berechnung Rechenfall 1.5

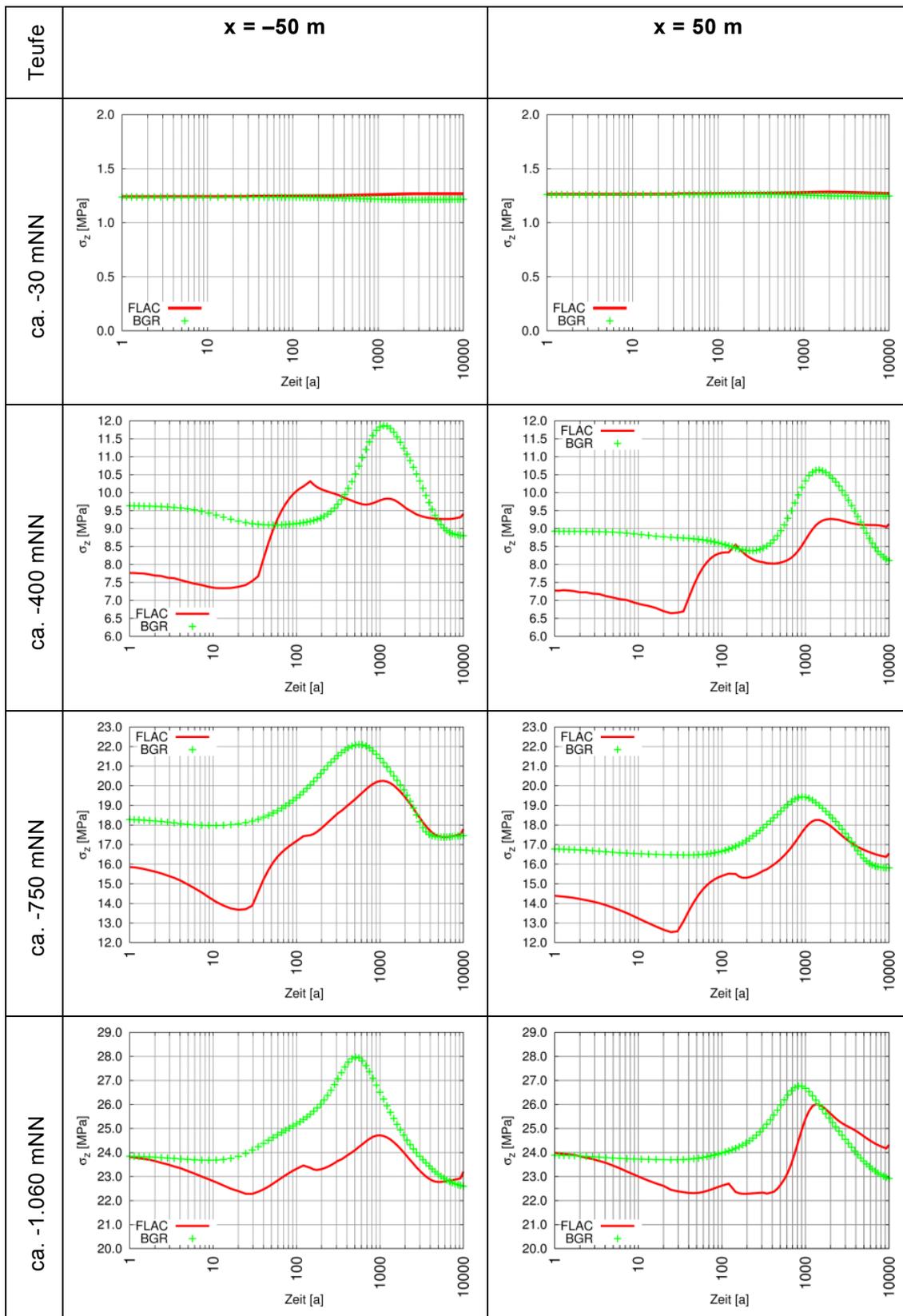
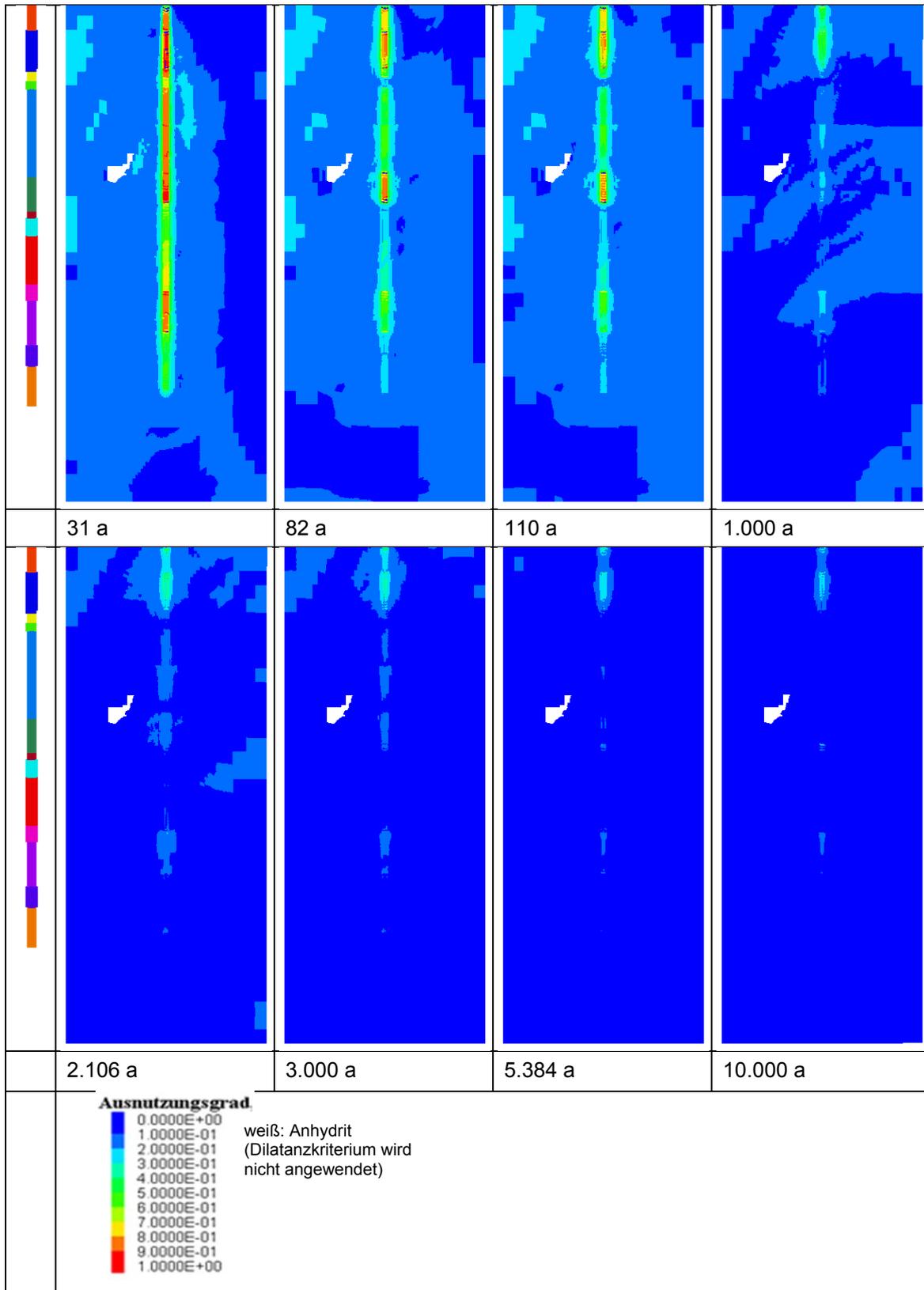


Abb. 4.42 Vertikalspannung  $\sigma_z$

grün: BGR-Fernfeldmodell, rot: FLAC-Berechnung Rechenfall 1.5

Abschließend ist in Abb. 4.43 der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung für verschiedene Zeitpunkte angegeben. Die Funktionselemente des Schachtverschlusses sind als Maßstab daneben skizziert, für die weiß gekennzeichneten Anhydritbereiche erfolgt erneut keine Auswertung. Es zeigt sich, dass der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung im Salzgestein bereits kurz nach Einbau der Funktionselemente des Schachtverschlusses auf Werte kleiner 1 zurückgeht und somit keine Auflockerungen mehr stattfinden. Der thermomechanische Einfluss des Endlagers wird jedoch in dieser Darstellung deutlich. Im Zeitraum nach Verschluss des Endlagers bis etwa 1.000 Jahre treten asymmetrisch unterschiedliche Ausnutzungsgrade der Dilatanzbedingung im Modellgebiet auf, wobei auf der dem Endlager zugewandten Seite höhere Ausnutzungsgrade vorherrschen. Zum Zeitpunkt 1.000 Jahre sind anhand des Ausnutzungsgrades der Dilatanzbedingung die Homogenbereiche erkennbar, wobei Homogenbereiche höherer Kriechfähigkeit einen geringeren Ausnutzungsgrad aufweisen. Dieses Ergebnis ist plausibel, da in Bereichen höherer Kriechfähigkeit die Spannungsdeviatoren schneller abgebaut werden.



**Abb. 4.43** Rechenfall 1.5: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten

t = 31 a: Zeitpunkt der Fertigstellung des Schachtverschlusses im Salinar

#### 4.6.4.3 Berechnungsergebnisse zum Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“

Als Ergebnis des Rechenfalls werden die zeitabhängigen Verläufe der Horizontalspannungen, der Tangentialspannungen und der Vertikalspannungen, der minimalen und der maximalen Hauptspannungen sowie der Schubspannungen für die Dichtelemente aus Salzbeton und Sorelbeton an den Auswertelocationen bereitgestellt. Weiterhin wird wie in Kapitel 4.2 beschrieben der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung nach Gl. (4.3) sowie das Fluidruckkriterium nach Gl. (4.4b) orientierend für die Salzkontur ausgewertet.

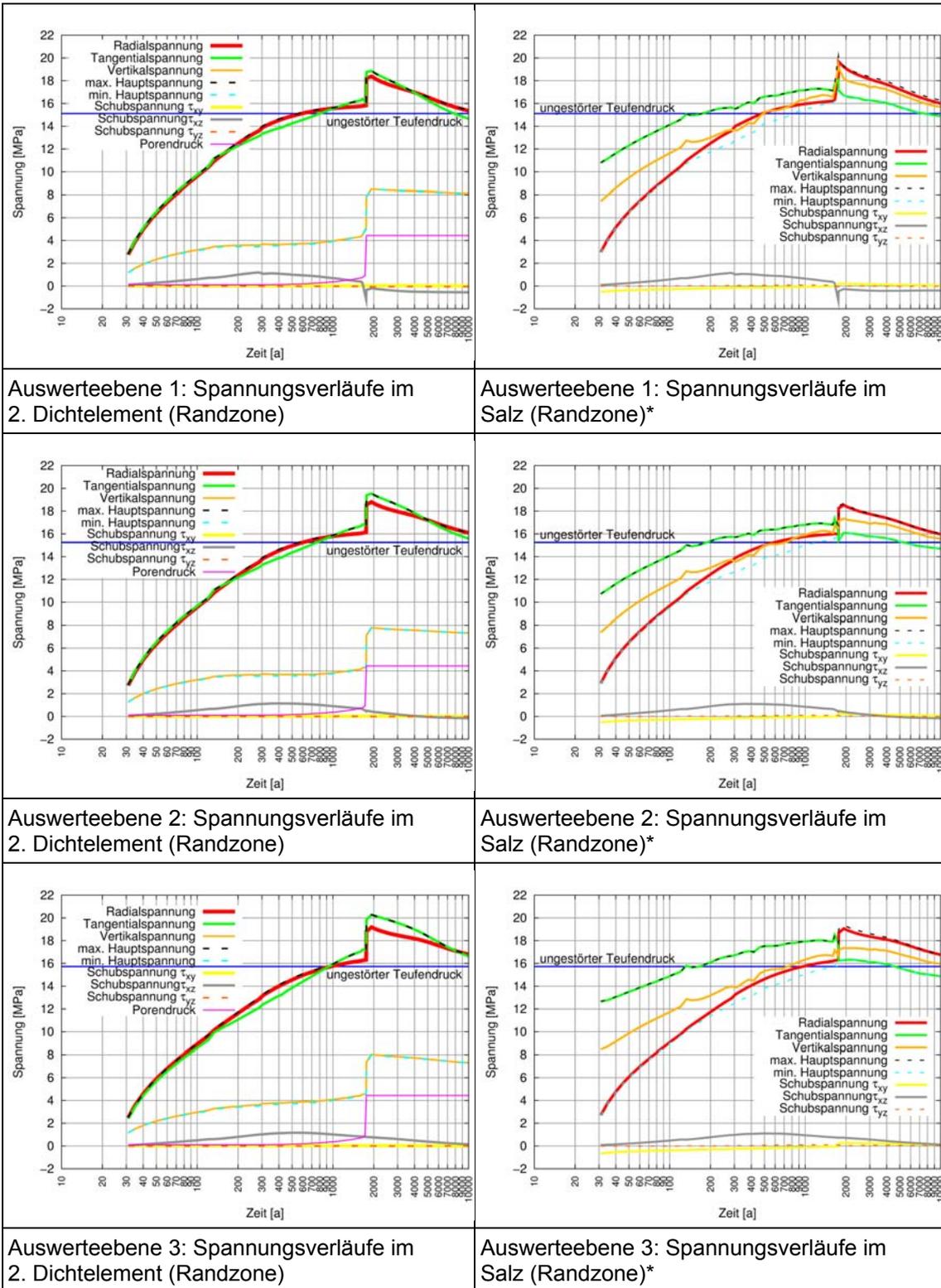
Auf die Auswertung der Spannungsverläufe im ersten Dichtelement aus Bentonit wird verzichtet, da im Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ der Quelldruck nicht erfasst wird. In Bezug auf das Dichtelement aus Bentonit wird auf die Ergebnisse zum Submodell „1. Dichtelement (Bentonit)“ in Kapitel 5 verwiesen.

In Abb. 4.44 sind die Spannungsverläufe der totalen Spannungen in korrespondierenden Zonen des 2. Dichtelements aus Salzbeton und der Auflockerungszone einander gegenübergestellt. Weiterhin sind der ungestörte, von den thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers unbeeinflusste Teufendruck und der für das jeweilige Dichtelement geltende Porendruck (vgl. Abb. 4.12) angegeben. Die effektiven Spannungen ergeben sich als Differenz von totalen Spannungen und Porendruck. Das Porendruckfeld wird in den Berechnungen mit berücksichtigt. Die totalen Spannungen beinhalten also den Porendruck, erfassen jedoch nicht die lokal wirkenden Strömungskräfte, da kein Strömungsprozess modelliert wurde. Bis zum Aufbringen des Porendruckes erfolgt der gleiche Spannungsaufbau wie im Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“. Bei Aufbringen des Porendruckes wird das Niveau der totalen Spannungen in der Randzone Dichtelement angehoben, die Größe der effektiven Spannungen, die sich als Differenz zwischen Porendruck und totaler Spannung ergeben, sinkt jedoch an allen Auswertepunkten ab, da sich die auf die Feststoffmatrix wirkenden Spannungen verringern. Dennoch verbleibt auch die effektive Spannung der kleinsten Hauptspannungskomponente, die mit der Vertikalspannung identisch ist, im Druckbereich. Lediglich zum Zeitpunkt des starken Porendruckanstiegs nach 1.740 Jahren ergibt sich für die kleinste Hauptspannungskomponente eine effektive Spannung von 0. Der instantane Anstieg des Porendruckes ergibt sich modellierungsbedingt aus der hydraulischen Ankopplung der Lösungsdrucksäule /BUH 12b/. Wie bereits in Kapitel 4.6.3.3 aufgeführt, findet er in Realität aufgrund residualer Gasphasen und der Systemkompressibilität

gedämpfter und zeitlich verzögert statt, so dass das Fluidruckkriterium bei realitätsnaher Modellierung eingehalten wird.

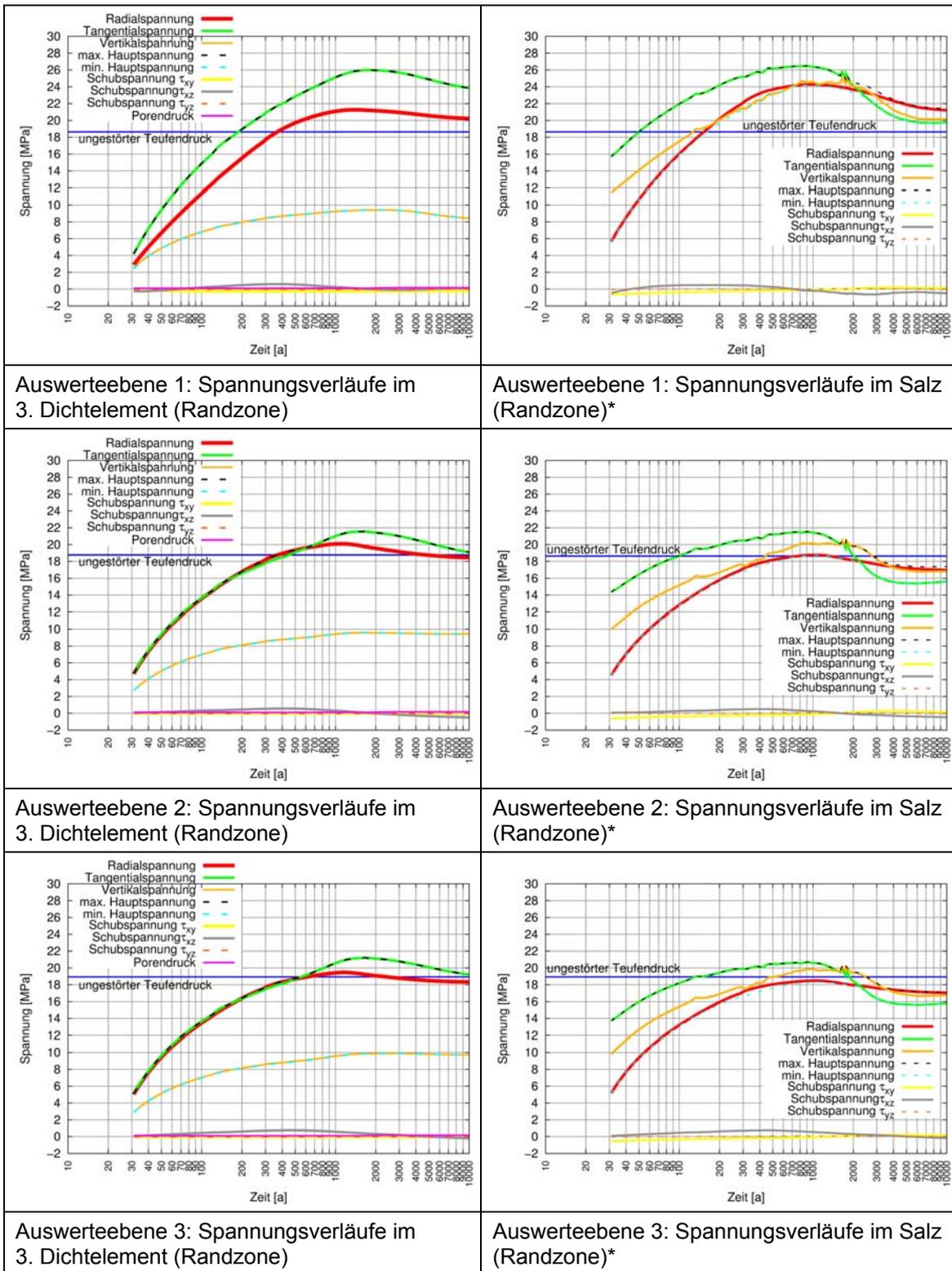
In den korrespondierenden Randzonen Salz ergibt sich das bereits in Kapitel 4.6.3.3 beschriebene andere Verhalten. Während das Radialspannungsniveau in der Randzone Salz dem Radialspannungsniveau in der Randzone Dichtelement entspricht und auch die durch den Porendruck bedingte Anhebung der totalen Spannungen vergleichbar erfolgt, ist die Tangentialspannung durch den Innendruck reduziert. Aufgrund der Überlagerung dieses Effektes mit dem Rückgang des Einflusses der durch das Endlager induzierten Druckspannungen sinkt die Tangentialspannung weiter ab und erreicht nach 10.000 Jahren in etwa das Teufendruckniveau von etwa 15 MPa. Die Vertikalspannung erfährt in der Randzone Dichtelement (Auswerteebene 1) einen zusätzlichen Druckaufbau durch den an der Stirnfläche herrschenden Lösungsdruck, der zur Mitte des Dichtelementes (Auswerteebene 2 und 3) abklingt. Insgesamt werden die Spannungsverläufe jedoch von den thermisch induzierten Spannungsanteilen so überprägt, dass der Einfluss des Porendrucks nicht mehr so eindeutig erkennbar ist wie im Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“. Festgehalten werden kann aber, dass die Spannungskomponenten in der ALZ weit über dem Porendruck liegen, so dass das Fluidruckkriterium eingehalten wird. Auch in der Randzone Dichtelement wirkt sich der frühzeitige, thermisch induzierte Druckaufbau aus, das Fluidruckkriterium wird zwar erreicht, aber eingehalten.

Im Bereich des 3. Dichtelements herrscht im Betrachtungszeitraum nur ein geringer Porendruck. Der Verlauf der Spannungskomponenten ist deshalb identisch mit den Spannungsverläufen im Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“, vgl. Abb. 4.40 und Abb. 4.45. Eine Diskussion der Berechnungsergebnisse erfolgt deshalb nicht.



\* Die Spannungsspitze zwischen 100 und 200 Jahren in den Abbildungen rechts markiert den Übergang auf die zonenbasierte, rein mechanische Berechnung.

**Abb. 4.44** Rechenfall 1.6: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton (t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses)

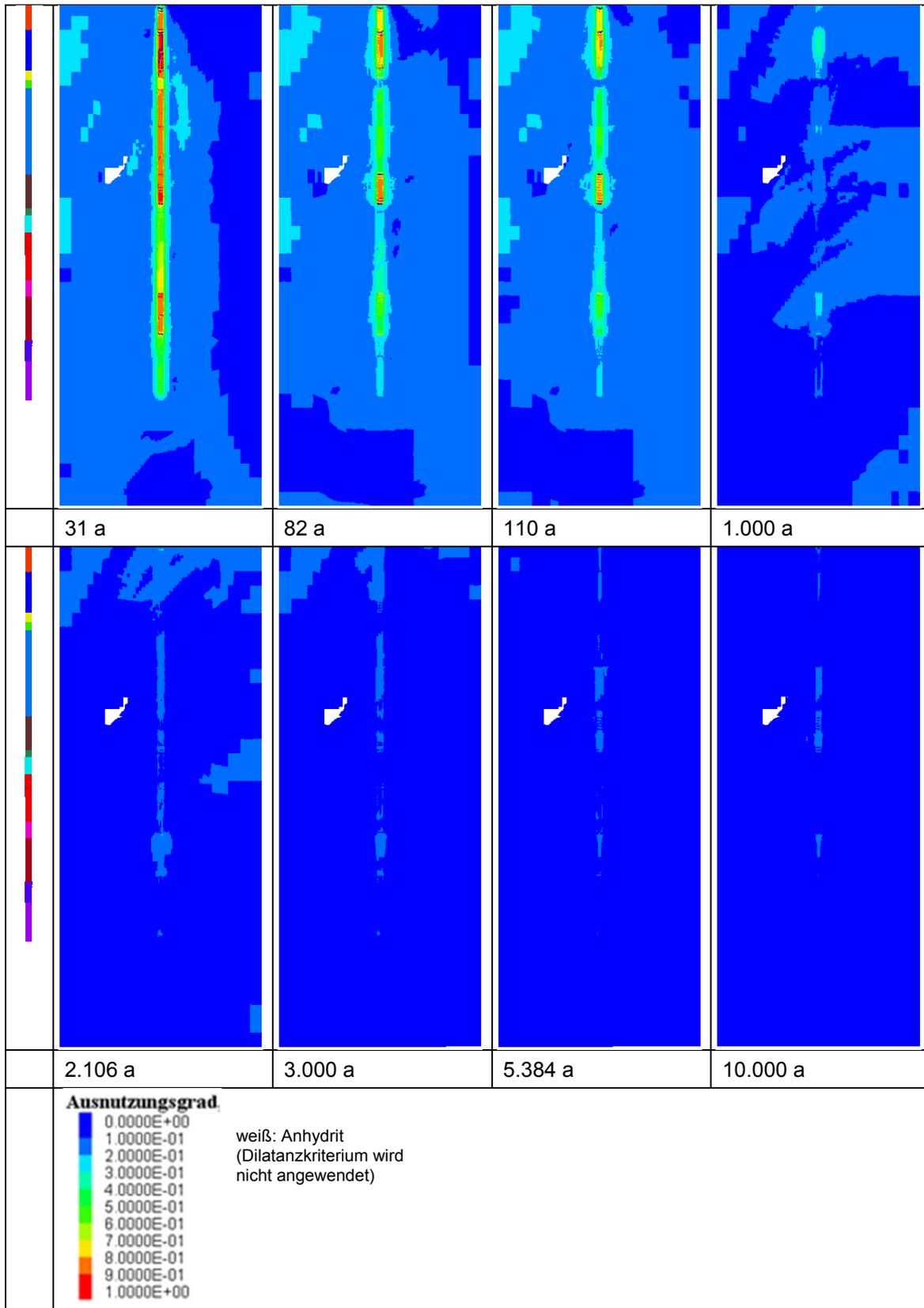


\* Die Spannungspitze im Zeitraum zwischen 100 und 200 Jahren in den Abbildungen rechts markiert den Übergang auf die zonenbasierte, mechanische Berechnung.

**Abb. 4.45** Rechenfall 1.6: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton (t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses)

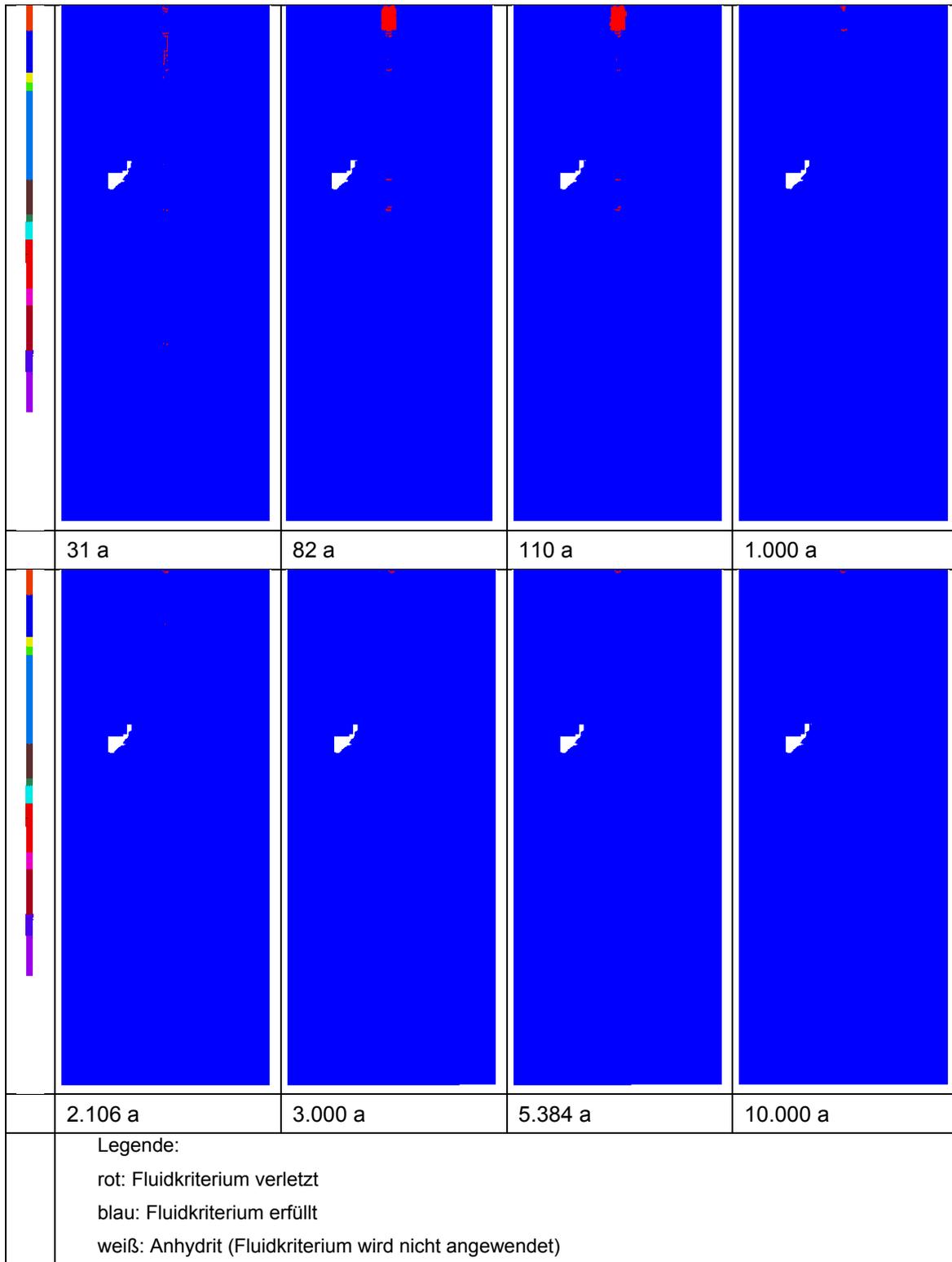
Abschließend ist in Abb. 4.46 der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung für verschiedene Zeitpunkte angegeben. Es zeigt sich, dass der Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung im Salzgestein bereits kurz nach Einbau der Funktionselemente des Schachtverschlusses auf Werte kleiner 1 zurückgeht und somit keine Auflockerungen stattfinden. Der thermomechanische Einfluss des Endlagers zeigt sich in dieser Darstellung wie in Abb. 4.43. Im Zeitraum nach Verschluss des Endlagers bis etwa 1.000 Jahre treten asymmetrisch unterschiedliche Ausnutzungsgrade der Dilatanzbedingung im Modellgebiet auf, wobei auf der dem Endlager zugewandten Seite höhere Ausnutzungsgrade vorherrschen.

Anders als im Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ zeigt sich für den „heißen Schacht“, dass das effektive Fluiddruckkriterium (Abb. 4.47) für den zeitlich veränderlichen Porendruck in der ALZ schon kurz nach Fertigstellung des Schachtverschlusses eingehalten wird, lediglich im Filterelement oberhalb des Bentonitdichtelements ist das Fluiddruckkriterium verletzt. Dieser Sachverhalt hat jedoch keine Bedeutung, da im Bereich des Filterelementes keine Anforderungen an die ALZ bestehen.



**Abb. 4.46** Rechenfall 1.6: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten

t = 31 a: Zeitpunkt der Fertigstellung des Schachtverschlusses im Salinar



**Abb. 4.47** Rechenfall 1.6: Ergebnisse der Anwendung des effektiven Fluiddruckkriteriums zu verschiedenen Zeitpunkten

t = 31 a: Zeitpunkt der Fertigstellung des Schachtverschlusses im Salinar

#### **4.6.5 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für den „Schachtverschluss als Ganzes“**

Wie einleitend ausgeführt, dienen die Berechnungen zum „Schachtverschluss als Ganzes“ überwiegend dem Ziel, die Zahl der Rechenfälle für die nachgeordneten Submodelle, die der Nachweisführung dienen, zu reduzieren bzw. die Zulässigkeit von Vereinfachungen abzusichern.

Dazu wurde im ersten Schritt eine Kalibrierung der Kriechklassen vorgenommen. Für die weiteren Berechnungen wurden nur noch die kalibrierten Kriechklassen verwendet. In Bezug auf die Nutzung des effektiven Kompressionsmoduls ergab sich, dass seine Anwendung nicht experimentell abgesichert ist. Er stellt jedoch weiterhin die beste, verfügbare Schätzung für das Kriechverhalten der Betone dar und wird deshalb verwendet.

Weiterhin wurden auf Basis des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“ die Einwirkungen infolge der wärmeentwickelnden Abfälle im Endlager berücksichtigt, indem die thermomechanischen Randbedingungen aus dem Fernfeldmodell der BGR übernommen wurden. Die Korrektheit der Übernahme wurde durch Validierungsrechnungen bestätigt.

Anschließend wurden vier Rechenfälle untersucht, und zwar die Rechenfälle „kalter Schacht ohne Porendruck“, „kalter Schacht mit Porendruck“, „heißer Schacht ohne Porendruck“ und „heißer Schacht mit Porendruck“. Im Ergebnis ließ sich feststellen, dass die thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers sich günstig auswirken, da der Gebirgsdruck auf die Dichtelemente sich früher aufbaut aber den ungestörten Teufendruck nicht wesentlich übersteigt, der langfristig ohnehin erreicht wird. Als im Sinne der Zielsetzung ungünstigster Rechenfall und damit auslegungsbestimmend im Hinblick auf die zu wählenden Randbedingungen, erwies sich der Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“. Da diese Randbedingungen mit den Randbedingungen übereinstimmten, die für die Submodelle gewählt worden waren, die bereits parallel bearbeitet wurden, als dieses Ergebnis erzielt wurde, wurden sie beibehalten. Die Richtigkeit der Wahl der Randbedingungen für die Submodelle wurde so nachträglich bestätigt.

## 5 Substruktur: 1. Dichtelement (Bentonit)

Zielstellung der hier durchgeführten Analysen ist der Nachweis der Funktionsfähigkeit des 1. Dichtelementes aus Bentonit einschließlich seiner Filterschichten und des dränierten Widerlagers für den auslegungsbestimmenden Rechenfall „Aufsättigungsprozess“. Vorab wird gemäß Tab. A.1 im Anhang A auf Grundlage vorlaufender Berechnungen, die die in Kapitel 3.4 aufgeführten Rechenfälle 2.1 – 2.3 beinhalten, überprüft, ob das gewählte Submodell zur Behandlung der Fragestellung geeignet ist. Anschließend erfolgen die Berechnungen zum Nachweis der Funktionsfähigkeit auf Basis des Rechenfalls 2.4.

### 5.1 Charakterisierung der Verschlusslokation

Das Dichtelement ist im Teufenbereich zwischen 386 m und 446 m geplant. Für die Untersuchung des Dichtelementes aus Bentonit wird das in Abb. 5.1 dargestellte Profil im Bereich der Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2 zugrunde gelegt.

Im Bereich des Bentonitdichtelements und der dazugehörigen Filterschichten und Widerlager sind einige der bereits in Kapitel 4.1 aufgeführten stratigrafischen Einheiten aufgeschlossen, siehe Tab. 5.1. Die Zuordnung der stratigrafischen Einheiten zu den Homogenbereichen nach /HEU 11/ und die in Kapitel 4.6.1.2 bestimmten Multiplikationsfaktoren finden sich ebenfalls in Tab. 5.1.

**Tab. 5.1** Im Umfeld des Dichtelementes vorhandene Homogenbereiche

Bereich	Teufe		Kriechklassen	Multiplikationsfaktor
	m u. GOK	UK in m NN		
z3OSO	380 – 400	-373,4	1/8*BGRa/ Kkl 2	2
z3OSU	400 – 425	-398,4	1/4*BGRa/ Kkl 3	4
z3LS	425 – 454	-427,4	1,0*BGRa/ Kkl 5	4
z3OSU	454 – 468	-441,4	1/4*BGRa/ Kkl 2	4

Im Bereich des ersten Dichtelementes liegt der Erkundungshorizont EH-450. Die Messergebnisse am EH-450 werden zur Überprüfung der Güte des Submodells für das erste Dichtelement aus Bentonit herangezogen.



## **5.2 Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“**

Für die ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ werden die nachfolgend dargestellten Einwirkungen, Gefährdungsbilder und zu betrachtenden Grenzzustände identifiziert. Die die Grenzzustände beschreibenden Widerstände, die identisch mit den Nachweiskriterien sind, werden im Anschluss aufgeführt.

### **Betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Eigengewicht, Gebirgsdruck, Flüssigkeitsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen, Strömungskräfte, Quellen

### **Nicht betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Massenkkräfte: Die Einwirkung Erdbeben wird im Rahmen der vertieften Nachweisierung rechnerisch nicht behandelt, siehe Vorbemessung
- Temperaturinduzierte Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge thermischer Expansion und Kontraktion: Sie werden aufgrund der Entfernung als vernachlässigbar angenommen, vgl. Kapitel 4.6.5.
- Schwinden: Ist für Bentonit sowie die angrenzenden Filtermaterialien nicht relevant

### **Betrachtete Gefährdungsbilder**

- Rissbildung/Rissöffnung in der Auflockerungszone infolge der unterschiedlich kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Flüssigkeitsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Strömungskräfte, Quellen
- Verlust des Kontaktdruckes in der Kontaktzone infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Fluiddruck, Kriechen des Salzgebirges, Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen, Strömungskräfte, Quellen
- Auflockerung des Bentonitdichtelementes infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Fluiddruck, Kriechen des Salzgebirges, Strömungskräfte, Quellen

### **Betrachtete Grenzzustände**

- Rissbildung/Rissöffnung in der Auflockerungszone

- Verlust des Kontaktdruckes in der Kontaktzone
- Auflockerung des Bentonits

## Nachweiskriterien

### Dilatanzbedingung und Mindestdruckkriterium

Vor Einbau des 1. Dichtelementes wird ausgehend von einer Verletzung der Dilatanzbedingung die Ausdehnung der Auflockerungszone unter Berücksichtigung des Kriechens des Salzgebirges erneut ermittelt und mit den Werten der Vorbemessung abgeglichen. Dazu wird die Dilatanzbedingung gemäß Kapitel 4.2, (Gl. (4.3)) ausgewertet.

Da in geringen Teufen die Dilatanzbedingung nach Erfahrungen der Bergbaupraxis zu geringe Ausdehnungen der Auflockerungszone ausweist, wird zusätzlich auch das empirisch gewonnene Mindestdruckkriterium von 1 MPa für die kleinste Hauptspannung herangezogen. Durch das Mindestdruckkriterium werden konturnahe Effekte wie Temperaturschwankungen und Änderungen der Luftfeuchtigkeit pauschal erfasst, deren Einfluss bei größerer Ausdehnung der Auflockerungszone nicht mehr relevant ist. Bereiche in denen die Dilatanzbedingung bzw. das Mindestdruckkriterium nicht erfüllt sind, werden als geschädigt angenommen. Ihre hydraulische Durchlässigkeit ist damit erhöht.

### Fluiddruckkriterium

Zur Bewertung der hydraulischen Beanspruchung wird das bereits in Kapitel 4.2 beschriebene effektive Fluiddruckkriterium gemäß Gl. (5.1) verwendet. Im Fluiddruckkriterium wird konservativ die kleinste Hauptspannung betrachtet. Die Spannungskomponente  $\sigma_3$  entspricht bei der hier verwendeten Spannungsconvention  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  der kleinsten Hauptspannung.

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - p_{fl} > 0 \quad (5.1)$$

mit

- $\sigma_3$ : kleinste Hauptspannung (totale Spannung)
- $\sigma'_3$ : kleinste Hauptspannung (effektive Spannung)
- $p_{fl}$ : lokaler Porendruck

Das Fluidruckkriterium wird abdeckend für die ALZ und die Kontaktzone angesetzt und für das Bentonitdichtelement ebenfalls zur Bewertung herangezogen. Die Erfüllung des Fluidruckkriteriums ist für den lokalen Erhalt des vorhandenen Kornverbandes im Material Bentonit hinreichend sowie zur Gewährleistung eines Kontaktes zur Salzkonzentration.

Bentonit weist ein lokal isotropes Quellvermögen auf. Ist die Quellung behindert, baut sich ein Quelldruck auf, bei unbehinderter Quellung tritt statt des Quelldrucks eine Volumenzunahme auf. Das Quellvermögen des Bentonits ist zu frühen Zeitpunkten, wenn noch kein konvergenzbedingter Gebirgsdruck wirksam ist, von entscheidender Bedeutung, da der einsetzende Quelldruck einen wesentlichen Beitrag zur effektiven, minimalen Hauptspannung  $\sigma'_3$  leistet. Hinzu kommen der Druckanteil der einwirkungsbedingten Spannungen<sup>16</sup> infolge Auflast und Eigengewicht, der sich zu frühen Zeitpunkten noch wesentlich über das Gebirge abträgt, und Strömungskräfte, die allerdings überwiegend Schubspannungen induzieren. Der Porendruck wirkt lokal als neutrale Spannung. Die Grenzzustandsfunktion  $f_{\text{Grenz}}$  entspricht der Forderung einer dauerhaft verbleibenden effektiven Druckspannung, vgl. Gl. (5.1) und Gl. (5.2).

$$f_{\text{Grenz}} = \sigma'_3 = \sigma_{3,\text{ges}} - p_{\text{fl}} > 0 \quad (5.2)$$

wobei für frühe Zeiträume gilt

$$\sigma_{3,\text{ges}} = (\sigma_{3,\text{E}} + p_{\text{q}} + p_{\text{fl}})$$

$\sigma_{3,\text{ges}}$ : kleinste totale Hauptspannung

$\sigma_{3,\text{E}}$ : kleinste Hauptspannung infolge der Einwirkungen Auflast, Eigengewicht und Strömungskräfte

$p_{\text{q}}$ : wirksamer Quelldruck

$p_{\text{fl}}$ : lokaler Porendruck

Der Quelldruckaufbau des Bentonits beginnt bereits, wenn der Bentonit noch nicht voll gesättigt ist und daher kein Porendruck wirkt.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> Diese Spannungen sind nicht isotrop, da die Querdehnzahl kleiner als 0,5 ist.

<sup>17</sup> Die Bedeutung einer langsamen Aufsättigung wird daraus deutlich, da der Quelldruck sich so früher aufbaut als der Porendruck.

Durch Berücksichtigung der Kriechvorgänge des Salinars und dem damit verbundenen Gebirgsdruckaufbau ergibt sich langfristig aufgrund der höheren effektiven Druckspannungen ein verbesserter Zustand.

Für die Kontaktzone gilt zu frühen Zeitpunkten, dass der Kontaktdruck  $\sigma_{n,ges}$ , der von dem Bentonitelement auf die Kontur wirkt, sich aus dem Flüssigkeitsdruck  $p_{fl}$ , dem wirksamen Quelldruck  $p_q$  und dem Horizontaldruckanteil, der sich infolge der Einwirkungen Auflast, Eigengewicht und Strömungskräfte ergibt, zusammensetzt.

$$\sigma_{n,ges} = \sigma_{E,h} + p_q + p_{fl} \quad (5.3)$$

mit

$\sigma_{n,ges}$ : Totaler Kontaktdruck

$p_{fl}$ : lokaler Porendruck

$p_q$ : wirksamer Quelldruck

$\sigma_{E,h}$ : Horizontaldruckanteil infolge der Einwirkungen Auflast, Eigengewicht und Strömungskräfte

Dementsprechend gilt für die Kontaktzone

$$f_{Grenz} = \sigma'_n = \sigma_{n,ges} - p_{fl} > 0 \quad (5.4)$$

Der horizontale Anteil des Quelldrucks erhöht dabei aufgrund der behinderten radialen Dehnung günstig den Kontaktdruck. Zu späteren Zeitpunkten kommt der Anteil aus dem sich kriechbedingt aufbauenden Gebirgsdruck (Radialspannung) hinzu. Durch den Ansatz der Grenzbedingung für das Fluidruckkriterium gemäß Gl. (5.2) wird die Grenzbedingung für den Kontaktdruck Gl. (5.4) mit abgedeckt.

### **Auflockerungsbeschränkung**

Im Bentonit ist während der Aufsättigung an wenig eingespannten Oberflächen, wie den Grenzflächen zu den Filterelementen, das Fluidruckkriterium rechnerisch immer verletzt. Infolge Verletzung des Fluidruckkriteriums kommt es wegen der wenig behinderten Quelldruckdehnungen zu lokalen Auflockerungen des Dichtmaterials. Praktisch bildet sich eine schlammige Masse, die prinzipiell die Eigenschaften einer Stützflüssig-

keit aufweist<sup>18</sup>. Solche lokalen Verletzungen des Fluidruckkriteriums mit der Folge lokal aufgelockerter Bereiche lassen sich während der Aufsättigung des Dichtelementes nicht vermeiden. Allerdings muss verhindert werden, dass „durchgehende“ aufgelockerte Bereiche entstehen, in denen kein ausreichend hoher Quelldruck mehr aufgebaut wird. Gemäß /WAG 05/ ist eine Auflockerung bei einer Einbautrockendichte des Bentonits von 1.750 kg/m<sup>3</sup> unkritisch, sofern 3 Volumen-% nicht überschritten werden. Untersuchungen haben ergeben /WAG 05/, dass bei Beschränkung der maximalen Auflockerung auf 3 Volumen-% sich die Parameter für den Quelldruck und die hydraulische Leitfähigkeit nicht maßgeblich ändern. Erst bei einer Auflockerung von  $\geq 3$  Volumen-% reduziert sich die Einbautrockendichte in einem Maß, das sich direkt auf den Quelldruck und die Permeabilität des Bentonits auswirkt. Die Beschränkung der Auflockerung ist somit als Kriterium zur Beschränkung der hydraulischen Leitfähigkeit und der Gewährleistung eines ausreichenden Quelldrucks zu betrachten.

Anmerkung: In /GDA 97/ wird auf das Kriterium „Beschränkung der Spreizspannungen/Spreizverformungen“ in Kontaktbereichen hingewiesen. Obwohl die in /GDA 97/ aufgeführten Beispiele nur eingeschränkt auf die vorliegende Fragestellung übertragbar sind und die empirische Erfahrung auf einen vernachlässigbaren Einfluss von Spreizverformungen hinweist, sollte dieser Sachverhalt einer Prüfung unterzogen werden<sup>19</sup>.

### **5.3 Berechnungsmodell**

Die Ergebnisse des Großversuchs Schachtverschluss Salzdetfurth zeigen, dass die Aufsättigungsphase des Bentonits, die zwangsläufig mit der Druckaufbauphase zusammenfällt, die auslegungsbestimmende Phase ist. Die Druckaufbauphase ist generell für Barrierebauwerke zu berücksichtigen. In der Aufsättigungsphase treten lokal hohe hydraulische Druckgradienten (Porendruckdifferenzen) auf und die Strömungskräfte erreichen somit lokal ebenfalls ihr Maximum. Dementsprechend sind gemäß Regelwerk (vgl. /DAF 04/) Zeitphasen des hydraulischen Druckaufbaus und – sofern

---

<sup>18</sup> Diese stabilisierende Eigenschaft wird rechnerisch nicht berücksichtigt.

<sup>19</sup> Dieser Sachverhalt wäre dem FuE-Bedarf zur Kontaktzone zuzuordnen.

vorhanden – des Druckabfalls nachzuweisen. Diese sind, obwohl es sich um sehr begrenzte Zeiträume handelt, häufig auslegungsbestimmend.

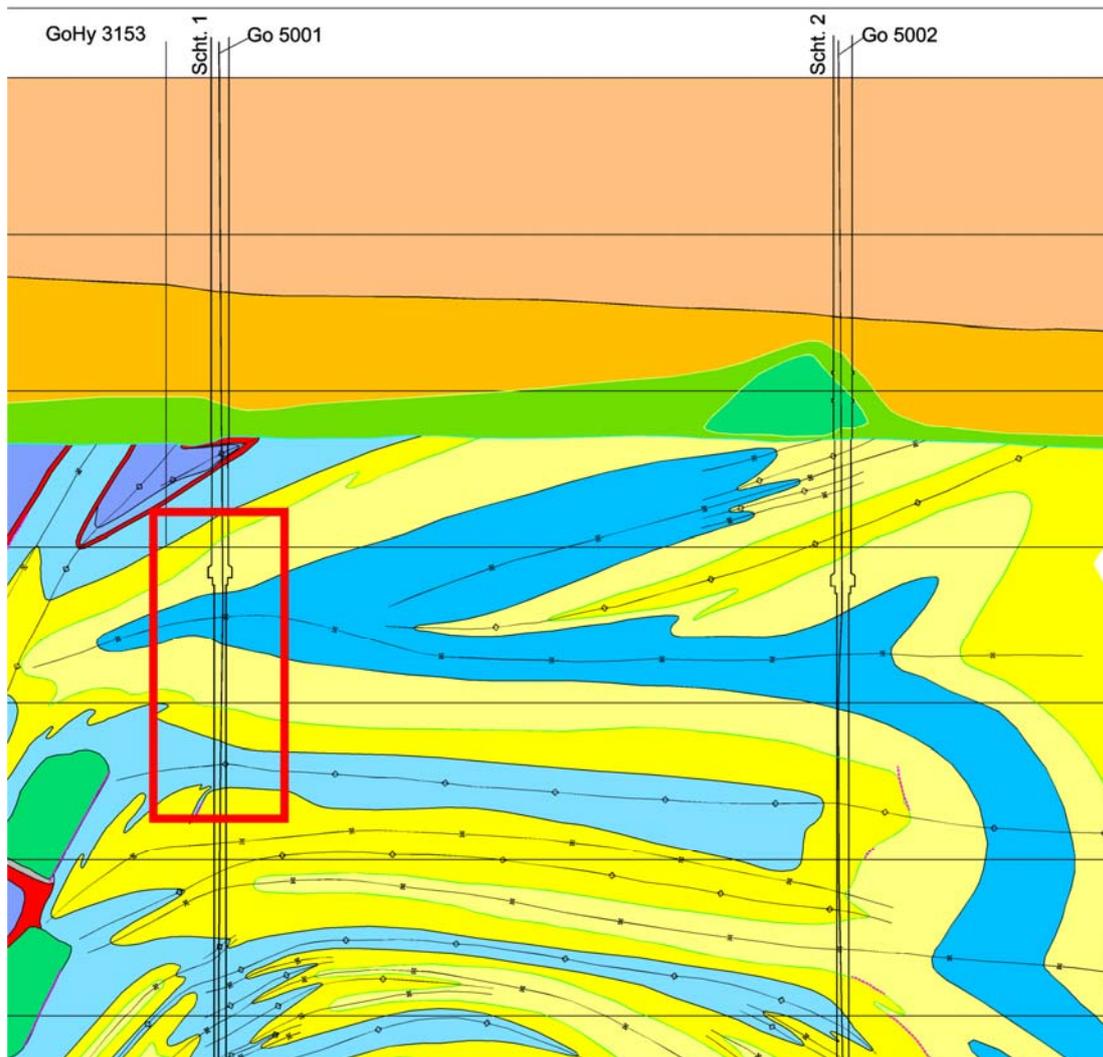
Da im Falle des Bentonitdichteelementes die hydromechanischen Beanspruchungen maßgeblich zu betrachten sind, wird ein Modell gewählt, das

- eine hydromechanisch gekoppelte Berechnung zulässt
- eine Auflösung aufweist, die es ermöglicht, steile hydraulische Gradienten abzubilden

Aufgrund der langen Rechenzeiten für solche hydromechanisch gekoppelte Berechnungen wird ein rotationssymmetrisches Modell gewählt, das sich an die geologische Situation am Schacht 1 im Profil zwischen den Schächten 1 und 2 anlehnt.

### **Modellgebiet**

Das Modellgebiet ist in Abb. 5.2 dargestellt. Durch das Modell wird der nicht ausgebaute Teil des Schachtes im „standfesten Salinar“ untersucht. Im Modell wird deshalb auf die Modellierung des Schachtausbaus und des dazugehörigen Fundamentes verzichtet, das sich in 41 m Entfernung oberhalb des Dichteelementes befindet. Das Modellgebiet umfasst in horizontaler Richtung den bergbauspezifischen Schachtsicherheitspfeiler von 50 m. In vertikaler Richtung wird der Teufenbereich von 280 m bis 468 m (-253,4 mNN bis -441,4 mNN) abgebildet, das Modell hat damit eine vertikale Erstreckung von 188 m. Abb. 5.2 zeigt das Modellgebiet als rot umrandeten Bereich im geologischen Vertikalschnitt „Schächte Gorleben 1 und 2“ /BOR 02/.



**Abb. 5.2** Geologischer Vertikalschnitt Schächte 1 und 2 /BOR 02/

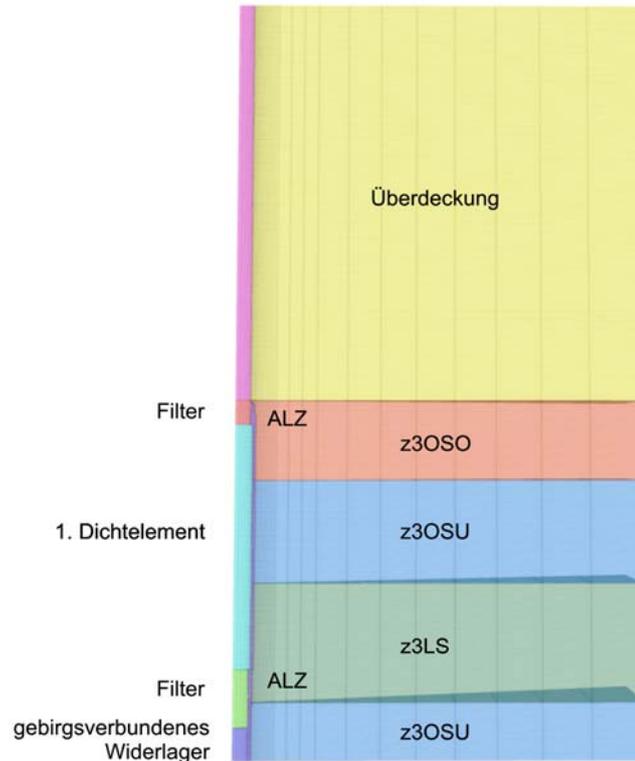
Die rote Umrandung zeigt das Modellgebiet.

Von den Funktionselementen des Schachtverschlusses sind das gebirgsverbundene dränierte Widerlager, die untere Filterschicht, das Bentonitdichtelement und die obere Filterschicht erfasst, vgl. Abb. 2.2. Die Nachschnitttiefe wird gemäß Vorbemessung mit 0,5 m im Bereich des Dichtelementes vorgesehen. Bereiche mit Widerlagern und Filtern werden nicht nachgeschnitten.

Das Modellgebiet wird allen Rechenfällen zugrunde gelegt.

### 5.3.1 Diskretisierung

Für die Berechnungen wurden zwei Netze generiert. In beiden Netzen wird die nach dem Nachschnitt verbleibende Auflockerungszone mit mindestens drei Zonen simuliert, um die hydraulischen Vorgänge mit genügend Stützstellen abbilden zu können. Im Falle von Netz I erfolgte die Diskretisierung des Modells durch 42.864 Zonen mit 86.595 Knoten. In Schachtnähe ist mit einem horizontalen Knotenabstand von 0,05 m eine feine Modelldiskretisierung gewählt worden, die mit zunehmendem Abstand gröber wird. Der Knotenabstand in vertikaler Richtung beträgt über die gesamte Modellhöhe 0,25 m. Zusätzlich wurde ein Netz II mit geringerer Zonenanzahl und größeren Knotenabständen generiert, um damit in kürzerer Zeit Variationsbetrachtungen durchführen zu können. Das Netz verfügt über 12.408 Zonen mit 25.259 Knoten mit einem horizontalen Knotenabstand von 0,2 m und einem vertikalen Knotenabstand von 0,5 m. Die Netze zeigten im Ergebnis einer Parameterüberprüfung der hydraulischen Eigenschaften keine diskretisierungsbedingten Unterschiede in den Ergebnissen (Vorgriff auf Kapitel 5.3.3). Da der die Rechenzeit dominierende Zeitschritt direkt mit dem kleinsten Knotenabstand zusammenhängt, wurde das Netz II (Abb. 5.3) aufgrund der kürzeren Rechenzeit für die weiteren Berechnungen eingesetzt.



**Abb. 5.3** Modellgeometrie (Netz II)

### 5.3.2 Anfangs- und Randbedingungen

Der untere und die seitlichen Ränder des Rechenmodells werden mit Verschiebungsrandbedingungen beaufschlagt und zwar so, dass Bewegungen in der jeweiligen Normalenrichtung verhindert werden, während Verschiebungen entlang des jeweiligen Randes möglich sind. Der obere Modellrand ist frei verschieblich.

### Spannung

Der vom Modell nicht erfasste hangende Gebirgsbereich hat eine Mächtigkeit von 280 m und beinhaltet das quartäre und tertiäre Deckgebirge, das Hutgestein und das hangende Salinar. Aus der Gesamtauflast ergibt sich für den oberen Rand eine vertikale Spannungsrandbedingung von 6,16 MPa. Aus modelltechnischen Gründen wird die Auflast des Deckgebirges simuliert, indem dem Teufenbereich zwischen 280 m und 380 m eine erhöhte 3,8fache Wichte zugewiesen wird, die die Auflast des Deckgebirges mit erfasst. Diese Überdeckung wird elastisch modelliert.

Thermisch induzierte Spannungen infolge Temperaturdehnung werden kurz nach Einbau des Bentonitdichteelementes im Vergleich zur Spannungserhöhung durch das aktiv quellende Material Bentonit als untergeordnet angesehen und daher vernachlässigt. Dieser Ansatz ist angemessen, vgl. Kapitel 4.6.4.2 und Kapitel 4.6.5.

## **Temperatur**

Es wird das ungestörte Temperaturprofil zugrunde gelegt. Die Abweichungen sind vernachlässigbar, da das Kriechen des Salzgebirges gegenüber dem Quellen des Bentonits in der frühen Aufsättigungsphase von geringer Bedeutung ist. Die Temperatur wird damit als teufenspezifisch veränderlich angenommen, zeitlich aber konstant gehalten. Die Temperatur an der Modellunterkante beträgt 28,5 °C, an der Modelloberkante 25,7 °C.

### **5.3.3 Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf**

Die Simulation beinhaltet folgende Schritte:

- Herstellung eines lithostatischen Spannungszustandes unter Berücksichtigung der Auflast und des Eigengewichtes des Gebirges (Primärspannungszustand) bei ungestörtem, geothermischem Temperaturfeld.
- Instantane Auffahrung des Schachtes (Sekundärspannungszustand), Kriechberechnung über 100 Jahre<sup>20</sup>.
- Kriechberechnung bis zum Einbau der Dichtelemente, Zuweisung von ALZ-Eigenschaften zu der errechneten Auflockerungszone.
- Nachschnitt der Auflockerungszone (Nachschnitttiefe 0,5 m im Bereich des 1. Dichtelements).
- Instantaner Einbau der Funktionselemente gemäß Ablaufplan (Tab. 2.2), zwischen den Einbauphasen jeweils Kriechberechnung.

---

<sup>20</sup> Die freie Standzeit dieses Schachtabchnittes wurde bereits in einer frühen Projektphase zu ca. 100 Jahren geschätzt. Dieser Wert liegt den hier durchgeführten Berechnungen zu Grunde. Der Einfluss der Abweichung von 8 Jahren zur tatsächlichen Auffahrungsgeschichte und zum detaillierten Bauablauf nach Tab. 2.2 und Tab. 4.7 kann vernachlässigt werden.

- Beaufschlagung der Knoten im oberen Filterelement mit Porendruck über die Zeit (Simulation des gesteuerten Lösungsdruckaufbaus), gekoppelt mit Kriechberechnung und Aufbau des Quelldrucks im Bentonit.

Der Lösungsdruckaufbau ist nachstehend im Detail beschrieben.

### **Lösungsdruck (Fluiddruck)**

Wie dem Bauablauf (Tab. 2.2) zu entnehmen, wird der Schachtverschluss kontrolliert mit Salzlösung beaufschlagt, um einen zu kurzzeitigen unkontrollierten Lösungsdruckaufbau nachweislich zu vermeiden, der aufgrund der hohen Lieferfähigkeit des Deckgebirges sonst nicht ausgeschlossen werden kann<sup>21</sup>. Aus der Teufenlage (386 m) des Dichteelementes und der konservativ pauschal angenommenen Lösungsdichte von 1.200 kg/m<sup>3</sup> (NaCl-Lösung) ergibt sich ein maximal möglicher hydrostatischer Druck von 4,54 MPa am Übergang Filter zum Dichtelement.

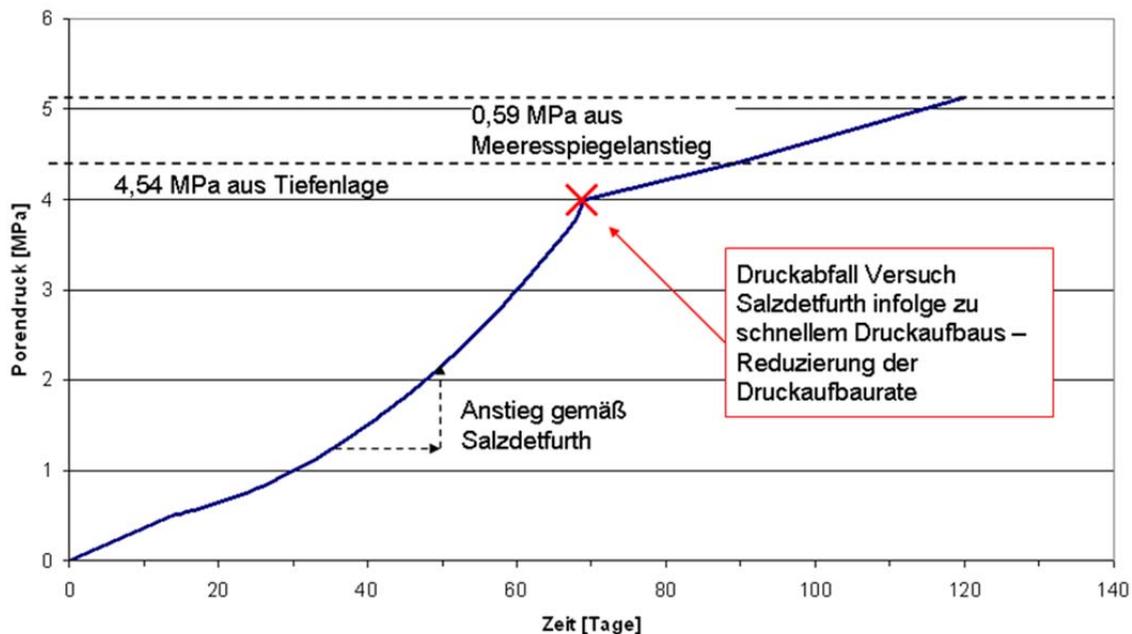
Die maximal zulässigen Druckaufbauraten wurden aus dem Forschungsprojekt „Schachtverschluss Salzdetfurth“ abgeleitet (Abb. 5.4). Bis ca. 70 Tage entspricht der Verlauf dem Druckaufbauregime des in situ-Versuchs „Schachtverschluss Salzdetfurth“. Abweichend von dem Versuch wird bei dem gewählten Druckaufbau ab 70 Tagen die Rate reduziert, da es bei dem in situ-Versuch zu einem plötzlichen Druckabfall an den Messsensoren kam /MAN 02/. Für den weiteren Druckaufbau wurde deshalb eine geringe, konstante Druckaufbaurrate gewählt, die noch unterhalb des Anstieges am Anfang der Druckbeaufschlagung liegt. Nach 90 Tagen ist der Druck von 4,54 MPa vollständig aufgebaut.

Die verbleibende Drucksteigerung infolge des säkularen Meeresspiegelanstieges von 0,59 MPa wird im Modell linear innerhalb von weiteren 30 Tagen beaufschlagt, d. h., der säkulare Meeresspiegelanstieg von 50 m erfolgt konservativ abdeckend di-

---

<sup>21</sup> Durch die kontrollierte Druckbeaufschlagung werden hydraulische Gradienten zu den stark lieferfähigen Grundwasserleitern des Deckgebirges ausgeschlossen. Der durch die Migration durch das Dichtelement eintretende Flüssigkeitsverlust wird durch die Regenspende ausgeglichen.

rekt im Anschluss an die vollständige Auffüllung des Schachtes bis GOK<sup>22</sup>. Der maximale hydrostatische Druck von 5,13 MPa an der Oberkante des Bentonitelementes herrscht dann nach 120 Tagen. Im weiteren Verlauf wird der Druck konstant gehalten. Der zeitliche Verlauf des Druckaufbaus<sup>23</sup> ist Abb. 5.4 zu entnehmen.



**Abb. 5.4** Druckbeaufschlagung Filterelement

Rechentechisch wird das Eindringen von Lösung über eine zeitabhängige Erhöhung des Porendruckes in der vollgesättigten Filterschicht simuliert, d. h., es wird eine Beaufschlagung der Knoten mit einem Porendruck gemäß Abb. 5.4 vorgenommen. Wie bereits erwähnt, befinden sich die Knoten innerhalb des ersten Filterelementes, der Porendruck ist somit innere Randbedingung.

<sup>22</sup> Die Berücksichtigung des säkularen Meeresspiegelanstiegs bereits direkt nach Lösungsdruckaufbau stellt einen additiven Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite in der auslegungsbestimmenden Aufsättigungsphase dar. Der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs braucht dann später nicht mehr betrachtet zu werden.

<sup>23</sup> Nach 1.740 Jahren kommt es rechnerisch aufgrund der Auffüllung des Speicherbereichs zur hydraulischen Ankopplung zu einer weiteren Druckerhöhung von 0,4 MPa /MÜL 12a/, /BUH 12b/. Zu diesem Zeitpunkt ist das Bentonitdichtelement voll aufgesättigt, und es hat sich nicht nur der Quelldruck, sondern auch ein Gebirgsdruck von mindestens 1 MPa aufgebaut. Es herrschen daher trotz der zusätzlichen Druckerhöhung günstigere Bedingungen als direkt nach Einbau.

## 5.4 Stoffmodelle und Materialparameter

Für die betrachteten Funktionselemente wurden für die mechanische, hydraulische und hydromechanische Prozessklasse die in Tab. 5.2 angegebenen Stoffmodelle verwendet.

**Tab. 5.2** Prozessklassen und verwendete Stoffmodelle

<b>Funktionselement</b>	<b>Mechanisches Verhalten</b>	<b>Hydraulisches Verhalten</b>	<b>Hydromechanisches Verhalten</b>
Filterschichten	Linear-elastisch (Hooke)	Isotrop (Darcy)	-
Bentonit	Linear-elastisch (Hooke)	Isotrop (Darcy)	Effektive Spannungen (Terzaghi, Biot), Quellen
Widerlager (in Abbildungen als Schotter bezeichnet)	Linear-elastisch (Hooke)	Isotrop (Darcy)	-
Salzgestein/ALZ	Elastisch-viskoplastisch (BGRa)	Isotrop (Darcy)	Effektive Spannungen (Terzaghi, Biot)
Überdeckung	Linear-elastisch (Hooke)	Isotrop (Darcy)	-

### 5.4.1 Mechanisches Verhalten

Auf eine Erläuterung der angewandten mechanischen Stoffmodelle wird hier verzichtet, siehe dazu Anhang B. Die mechanischen Parameter der Funktionselemente und der Überdeckung wurden gemäß Tab. 5.3 gewählt /RAU 03/.

**Tab. 5.3** Elastische Kennwerte für die Funktionselemente/Überdeckung

Material	Kennwerte		
	Bentonitdichtelement	E-Modul	[MPa]
Querdehnzahl		[-]	0,30
Filterschichten	E-Modul	[MPa]	150
	Querdehnzahl	[-]	0,33
Widerlager*	E-Modul	[GPa]	25
	Querdehnzahl	[-]	0,2
Überdeckung	E-Modul	[GPa]	25
	Querdehnzahl	[-]	0,27

\* Die Unterschiede zu den Kennwerten in Tab. 4.12 sind von vernachlässigbarem Einfluss auf das Berechnungsergebnis.

Bei den in Tab. 5.3 angegebenen Parametern handelt es sich z. T. um Anfangswerte. In einigen Fällen ändern sich die Parameter im Prozessverlauf. Weiterhin erfolgen im Ergebnis der weiteren Bearbeitung Parameteranpassungen und materialspezifische Kalibrierungen, die zu Veränderungen der hier aufgeführten Parameter führen. Diese Parameterveränderungen werden angegeben und bei Bedarf erläutert.

#### 5.4.2 Hydraulisches Verhalten

Die im Modell erfassten Materialbereiche werden als poröse Medien mit isotropen und homogenen hydraulischen Materialverhalten abgebildet. Im anstehenden Gebirge werden intakte und aufgelockerte Bereiche unterschieden<sup>24</sup>.

Die hydraulischen Kennwerte für die Funktionselemente wurden /MÜL 12a/ und für die Auflockerungszone im Salz und das angrenzende Salzgestein /POL 10/ entnommen, vgl. Tab. 5.4. Sind Bandbreiten angegeben, so wurde in der Regel mit mittleren Werten gearbeitet. Die benutzten Werte stehen in Klammern hinter der Bandbreite. Die Abhängigkeit der Permeabilität des Salzgesteins von der kleinsten Hauptspannung wurde

---

<sup>24</sup> Die Kennwerte wurden /POL 10/ entnommen. Sie sind quantitativ aufgrund der parallelen Bearbeitung nicht konsistent mit /CZA 12/ und Kapitel 6 und 8. Für die hier behandelte Aufsättigungsphase des Bentonitdichtelementes ist der Unterschied jedoch nicht relevant.

vernachlässigt und das konturnahe, intakte Salzgestein als hydraulisch gering durchlässig modelliert.

**Tab. 5.4** Hydraulische Kennwerte der Funktionselemente (Anfangswerte)

Material	Porosität $\Phi$ [%]	Permeabilität k [m <sup>2</sup> ]
Salz	0,1*	1E-20
ALZ Salz	1,0	1E-18
Filter	25 – 35 (30)	1E-10 – 1E-12 (1E-11)
Bentonit	27 – 34 (30)	Integral 1E-17 (bei Aufsättigung)
Schotter = dräniertes Widerlager	23 oder 38 (23)	1E-7 – 1E-9 (1E-8)

\* konservativ angenommene Untergrenze

Die Berechnungen erfolgen unter Ansatz einer dynamischen Viskosität der Salzlösung von  $\eta = 0,0015 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  und einer Dichte von  $\rho = 1.200 \text{ kg/m}^3$  (NaCl-Lösung). Es wird ein newtonsches Fließverhalten (Fließgrenze  $\tau_0 = 0$ ) angenommen. Mit Ausnahme des Bentonits werden das Gebirge und die Funktionselemente initial als trocken angenommen (Sättigung und Porendruck gleich 0). Für das 1. Dichtelement aus Bentonit wird eine Anfangssättigung von 0,45 angesetzt /ENG 11b/.

### 5.4.3 Hydromechanische Kopplung

Eine hydraulisch-mechanische Kopplung erfolgt durch das Konzept der effektiven Spannungen (Terzaghi), welches um den Biot-Ansatz erweitert wurde. Die effektiven Spannungen  $\sigma'_{ij}$  ermitteln sich zu:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha_b \cdot p \delta_{ij} \quad (5.5)$$

mit

- $\sigma_{ij}$ : totale Spannungen (Spannungstensor)
- $\alpha_b$ : Biot-Koeffizient (hydraulischer Wirkfaktor)
- p: lokaler Porendruck
- $\delta_{ij}$ : Einheitstensor

Der Biot-Koeffizient wird konservativ abdeckend zu 1,0 gesetzt.

#### 5.4.4 Quellen des Bentonits

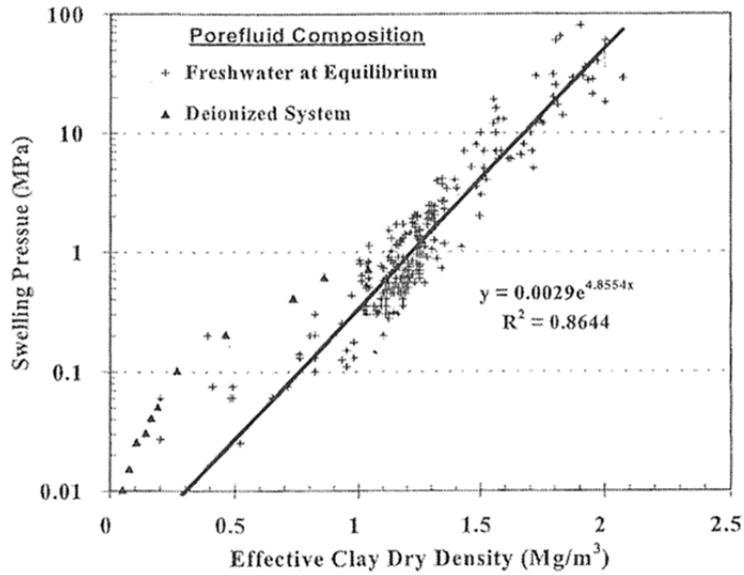
Eine prinzipiell im Stoffmodell zu berücksichtigende Nichtlinearität ergibt sich durch das von der Sättigung abhängige Quellverhalten des Bentonits und des damit verbundenen Quelldruckaufbaus.<sup>25</sup>

Unter Quellen versteht man die Volumenzunahme eines Materials. Im Falle von Bentonit erfolgt das Quellen durch Wasseraufnahme. Bentonit besteht zu großen Teilen aus Montmorillonit (63 % bis 70 %) /ENG 11a/. Durch die Einlagerung von Wasser in den Zwischenschichten des Montmorillonits weiten sich diese auf (innerkristaline Quellung). Ein weiterer Quelleffekt (osmotische Quellung) entsteht aus Konzentrationsunterschieden zwischen den in den Zwischenschichten fixierten Kationen und den Kationen der Porenlösung. Der Einfluss der osmotischen Quellung ist von der Elektrolytkonzentration und der Wertigkeit der gelösten Ionen abhängig. Dies bedeutet, dass bei einem höheren Salzgehalt der eindringenden Salzlösung der Anteil der osmotischen Quellung abnimmt. Dieser Sachverhalt war bei der Auswahl des Bentonits, der bereits im Salinar zur Anwendung kam entscheidend, da seine Parametrisierung bekannt war.

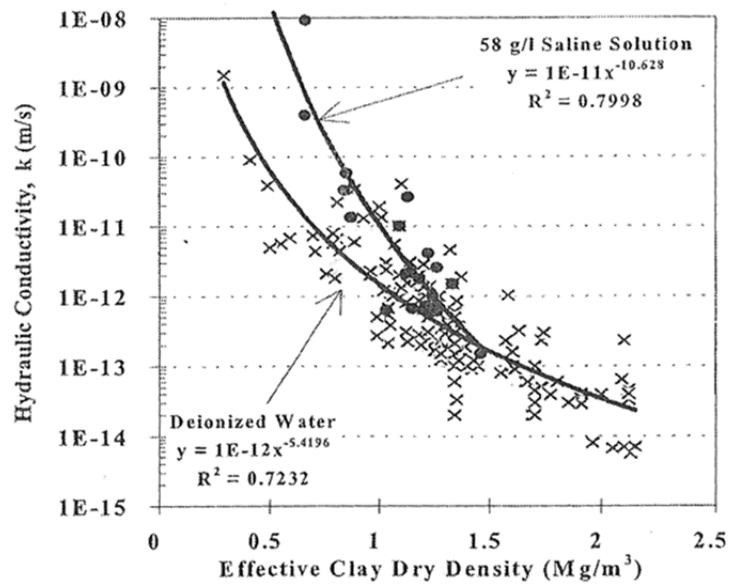
Das Quellverhalten des für das 1. Dichtelement vorgesehenen Bentonits wird auf Basis des Forschungsprojektes „Schachtverschluss Salzdetfurth“ /JOB 00/ und den Untersuchungen von /WAG 05/ beschrieben. Limitierender Faktor für den maximal möglichen Quelldruck ist die Einbautrockendichte. Eine Übersicht zur Höhe des Quelldrucks in Abhängigkeit der Bentonittrockendichte ist in /DIX 00/ gegeben (Abb. 5.5) Dort findet sich auch eine Zusammenstellung der hydraulischen Leitfähigkeiten ebenfalls in Abhängigkeit zur Einbautrockendichte (Abb. 5.6).

---

<sup>25</sup> Die Permeabilität ist abhängig vom Quelldruck und prinzipiell in ihrer Kopplung zu berücksichtigen. Diese Kopplung musste aus numerischen Gründen vernachlässigt werden. Aufgrund des hohen Speichervolumens des Bentonits während der Aufsättigung ist diese Vereinfachung vertretbar, siehe auch Kapitel 5.5.3.



**Abb. 5.5** Quelldruck in Abhängigkeit der Einbautrockendichte /DIX 00/



**Abb. 5.6** Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Einbautrockendichte /DIX 00/

Die Daten in Abb. 5.5 und Abb. 5.6 können nicht uneingeschränkt auf die hier herrschenden salinaren Bedingungen übertragen werden, sie zeigen jedoch exemplarisch,

dass der Quelldruck und die Permeabilität trotz gleicher Einbautrockendichte erheblichen Streuungen<sup>26</sup> unterliegen.

Im Rahmen der Modellierungen wurden zwei funktionale Zusammenhänge zwischen Einbautrockendichte und maximal möglichem Quelldruck, die sich auf verfügbare Daten zum Verhalten unter salinaren Bedingungen beziehen, vergleichend untersucht /BRE 12/. Im Folgenden wird jedoch nur der funktionale Zusammenhang dargestellt, der für die Modellierungen genutzt wurde.

In /WAG 05/ wird nachstehende Beziehung für die Abhängigkeit des Quelldrucks von der Einbautrockendichte vorgestellt. In der zugrunde liegenden Versuchsreihe wurde mit Calcigel-Bentonit und einer NaCl-Lösung gearbeitet. Der dimensionsbehaftete funktionale Zusammenhang zwischen Quelldruck  $p_q$  [MPa] und Einbautrockendichte ergibt sich hier zu:

$$p_q = p'_q \cdot e^{-7,68 \frac{1}{\rho_{tr}} + 11,96} \quad (5.6)$$

mit

$p'_q = 1$  MPa, Bezugsspannung

$\rho_{tr}$ : Einbautrockendichte [g/cm<sup>3</sup>]

Zusätzlich wurden Untersuchungen zur hydraulischen Leitfähigkeit durchgeführt. Der daraus ermittelte, dimensionsbehaftete funktionale Zusammenhang zwischen Einbautrockendichte [g/cm<sup>3</sup>] und Permeabilität  $k$  [m<sup>2</sup>] lautet gemäß /WAG 05/:

$$k = k'_f \cdot e^{-9,12 \cdot \rho_{tr} - 9,76} \cdot \frac{\mu_{fl}}{\rho_{fl} \cdot g} \quad (5.7)$$

mit

$k'_f = 1,0$  m/s, Bezugsleitfähigkeit

$\rho_{tr}$ : Einbautrockendichte [g/cm<sup>3</sup>]

$\mu_{fl} = 0,0015$  Pa s, dynamische Viskosität des Fluids [Pa s]

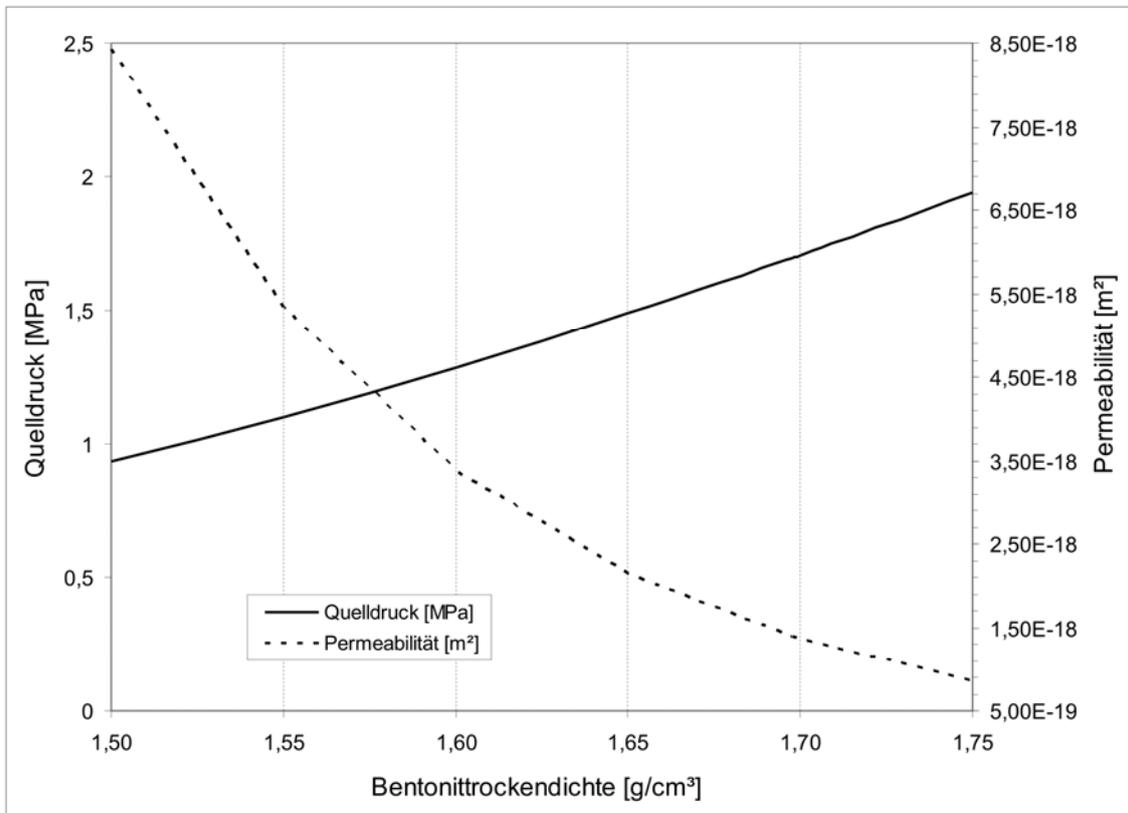
$\rho_{fl} = 1.200$  kg/m<sup>3</sup>, Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>]

$g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>, Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

---

<sup>26</sup> Die Streuungen werden u. a. mit Maßstabeffekten bei der Versuchsdurchführung begründet, da die Ergebnisse sowohl aus Labor-, Technikums- und in-situ Versuchen stammen (/DIX 00/ in /WAG 05/). Zusätzlich zu diesen Effekten ist bei der versuchstechnischen Ermittlung – insbesondere der Permeabilität – noch eine messtechnische Streuung zu unterstellen.

In Abb. 5.7 sind die beiden funktionalen Zusammenhänge gemäß Gl. (5.6) und Gl. (5.7) /WAG 05/ grafisch dargestellt.



**Abb. 5.7** Quelldruck und Permeabilität in Abhängigkeit der Einbautrockendichte des Bentonits

Für eine anzusetzende Einbautrockendichte von 1.750 kg/m³ ergibt sich der maximale Quelldruck zu 1,94 MPa bei einer Permeabilität von 8,61E-19 m² (Abb. 5.7). Auf Basis der Messergebnisse aus dem in situ Versuch „Schachtverschluss Salzdetfurth“ /MAN 02/ wird der sich maximal aufbauende Quelldruck  $p_q$  in der Nachweisführung auf 1 MPa begrenzt. Begründet wird die Reduzierung durch den Sachverhalt, dass sich ein Teil des möglichen Quelldrucks in situ durch Verformung abbaut, da sich die Randbedingungen im Labor- bzw. Technikumsversuch und in situ unterscheiden. Da im Rechenmodell ein solcher Quelldruckabbau prinzipiell mit erfasst wird, ist der Ansatz konservativ.

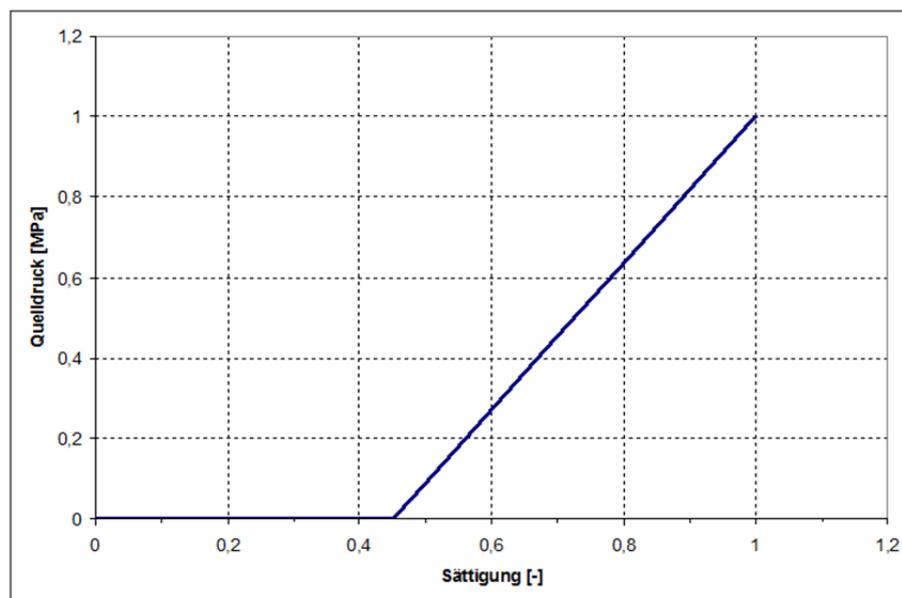
Der sich einstellende Quelldruck steht in einem linearen Verhältnis zur Sättigung /STU 84/.

$$p_q = c_0 + c_1 \cdot S \quad (5.8)$$

mit

- $p_q$ : Quelldruck [MPa]
- $c_0 / c_1$ : Proportionalitätskonstanten [-]
- $S$ : Sättigung [%]

Es wird angenommen, dass der Quelldruck  $p_q$  nach Einbau des Bentonits 0 ist. Die Einbautrockendichte beträgt  $1.750 \text{ kg/m}^3$  und der eingebaute Bentonit hat eine Anfangssättigung von  $\leq 45 \%$  /ENG 11b/. Aus dem maximalen Quelldruck von  $1,0 \text{ MPa}$  ergeben sich damit die Proportionalitätskonstanten zu  $c_0 = -0,8181$  und  $c_1 = 1,8181$ . Abb. 5.8 zeigt die Beziehung als Grafik.



**Abb. 5.8** Quelldruck in Abhängigkeit der Sättigung

In Abhängigkeit des Quelldruckes kommt es zu einer Verringerung der Permeabilität im Bentonit. Dieses Materialverhalten wurde aus rechentechnischen Gründen nicht mit im

Modell implementiert<sup>27</sup>. Die Vernachlässigung wird als vertretbar eingeschätzt, da der Aufsättigungsprozess wesentlich vom freien Porenvolumen (Speichervolumen) des Bentonits bestimmt wird<sup>28</sup>.

#### **5.4.5 Poissonzahl**

Die Poissonzahl für Bentonit wird gemäß Tab. 5.3 mit 0,3 angesetzt, solange er ungesättigt ist und noch keine plastischen Eigenschaften aufweist. Infolge der Aufsättigung und des Einsetzens des Quelldrucks erhöht sich das Verhältnis auf 0,45 bei vollständiger Sättigung, ein Wert wie er auch für plastischen Ton gilt /SIM 94/. Aus dieser Anpassung resultiert ein Verhalten, bei dem sich Spannungsänderungen, insbesondere infolge der Auflast, zunehmend richtungsunabhängig gleichmäßig über die betrachtete Zone verteilen. Begründet ist diese Anpassung mit der vollständigen Sättigung des Bentonits und des zunehmenden Einflusses der inkompressiblen Porenlösung auf das Materialverhalten.

### **5.5 Berechnungsergebnisse zum 1. Dichtelement**

Bei der Darstellung der Berechnungsergebnisse werden zuerst die Rechenfälle dargestellt, auf deren Basis die Eignung des Berechnungsmodells für den Nachweis der Funktionsfähigkeit belegt wird. Anschließend folgen die Berechnungsergebnisse zur Nachweisführung.

#### **5.5.1 Vorlaufende Berechnung zur Überprüfung der Modellgüte**

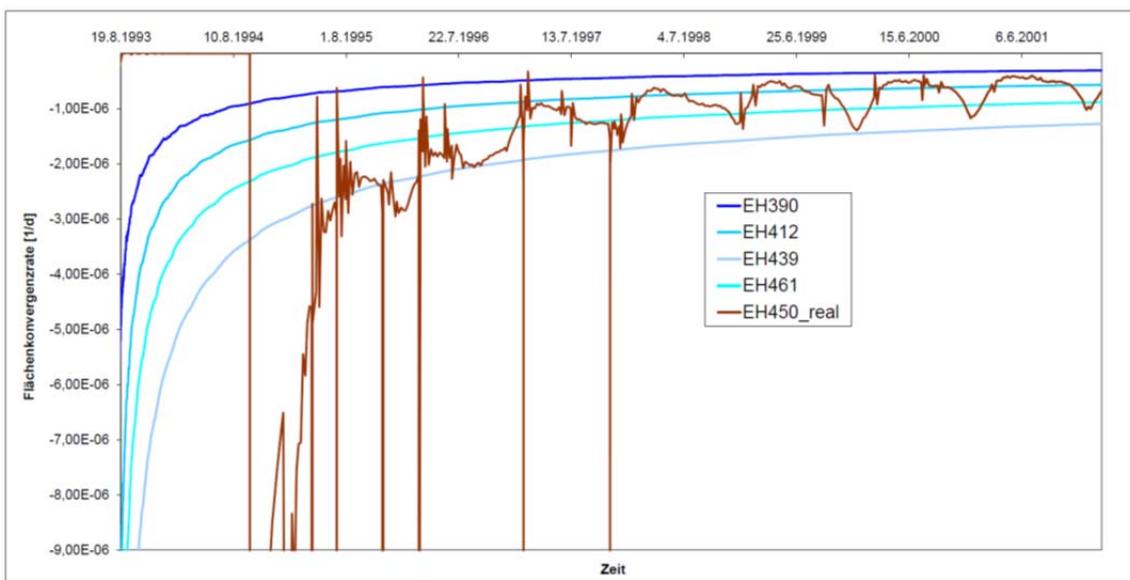
Aus Kalibrierungsberechnungen (siehe Kapitel 4.6.1.2) ergaben sich Multiplikationsfaktoren für die jeweiligen Kriechklassen, vgl. Tab. 5.1. Die kalibrierten Kriechklassen werden auch für das rotationssymmetrische Modell angesetzt. Die Güte der rotationssymmetrischen Vereinfachung wird anhand der Messdaten des Erkundungshorizontes

---

<sup>27</sup> Hohe Permeabilitätskontraste führen in der hydraulischen Berechnung zu so kleinen Zeitschritten bzw. zu so hohen Rechenzeiten, dass im Rahmen der verfügbaren Zeit keine verwertbaren Ergebnisse zu erzielen wären.

<sup>28</sup> Die Vertretbarkeit der Vernachlässigung wird in Kapitel 5.5.3 erläutert.

EH-450 überprüft. Bei dem gewählten rotationssymmetrischen Modell ist eine direkte Auswertung der Konvergenzen bzw. Konvergenzraten nicht möglich, da es keinen gegenüberliegenden Konvergenzpunkt auf der Schachtkontur gibt. Als Vergleichswert wurde die Flächenkonvergenzrate herangezogen. Die Flächenkonvergenzraten werden an vier Stützstellen in verschiedenen Teufenniveaus ausgewertet, die als imaginäre Konvergenzquerschnitte bezeichnet werden. Abb. 5.9 zeigt den Verlauf der Flächenkonvergenzrate am realen Konvergenzmessquerschnitt EH-450 sowie die Verläufe an den imaginären Querschnitten EH-390, EH-412, EH-439 und EH-461. Bei der in situ Messung am EH-450 ist der jahreszeitlich bedingte Bewitterungseinfluss deutlich zu erkennen. Die Flächenkonvergenzrate der imaginären Konvergenzquerschnitte deckt die Schwankungsbreite der in situ Messung ab, die in der Mitte der verschiedenen Homogenbereiche angeordnet wurden, um die Bandbreite zu erfassen (vgl. Abb. 5.9). Die Anwendbarkeit des rotationssymmetrischen Modells ist somit belegt.



**Abb. 5.9** Flächenkonvergenzraten

### 5.5.2 Vorlaufende Berechnung zur Überprüfung der Ergebnisse der Vorbemessung zur ALZ

In der Auflockerungszone ist die hydraulische Durchlässigkeit deutlich höher als im ungeschädigten Salinar. Für den integralen hydraulischen Widerstand des gesamten Dichtelementes kann dieser Bereich entscheidend sein. Daher ist eine möglichst realistische Bestimmung der Ausdehnung der ALZ und ihrer Permeabilität erforderlich.

Die Ausdehnung der Auflockerungszone im Modell wurde anhand der in Kapitel 5.2 beschriebenen Kriterien bestimmt. Als maßgebend erwies sich das Mindestdruckkriterium, dessen Wert hier auf 1 MPa Druck gesetzt wurde, während bei Anwendung der Dilatanzbedingung gemäß Gl. (4.3) diese Ausdehnung unterschätzt wird (vgl. Kapitel 4.2). Unter Berücksichtigung des Kriechens ergeben sich aufgelockerte Bereiche mit einer Ausdehnung von 0,60 m bis 0,90 m ab Schachtkontur<sup>29</sup>.

Der Nachschnitt wurde aus Konsistenzgründen entsprechend der Vorbemessung mit 0,5 m konstant über die Länge des Dichtelementes unabhängig von der Tiefe der rechnerisch tatsächlich ausgewiesenen ALZ angesetzt und die verbleibende ALZ bei der hydromechanischen Berechnung mit berücksichtigt.

### **5.5.3 Vorlaufende Berechnung zur Anpassung an Schachtverschluss Salzdelfurth**

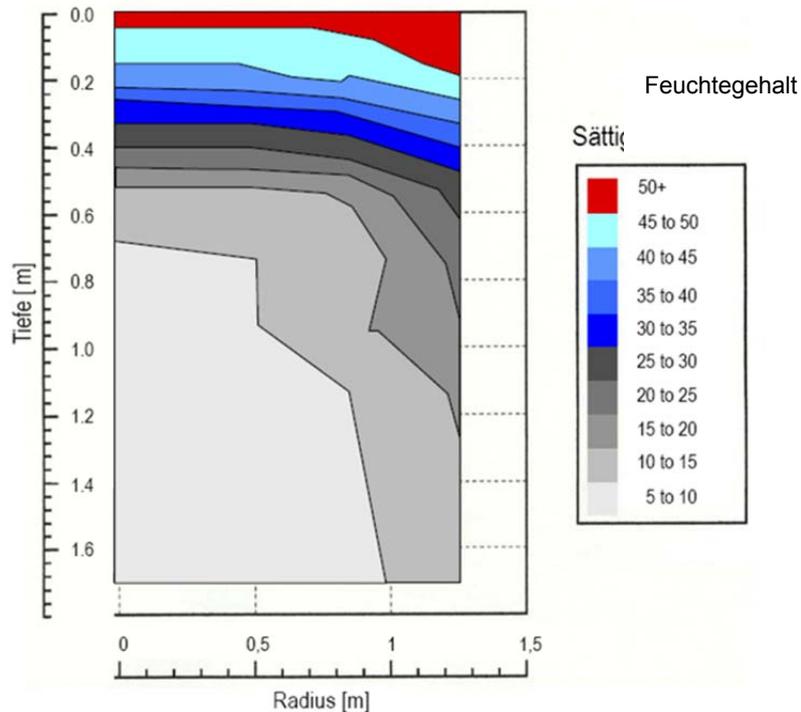
Die Anpassung des hydraulischen Verhaltens basiert auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens „Schachtverschluss Salzdelfurth“ /MAN 02/ und /EBE 09/. Eine aus den Messergebnissen abgeleitete Aussage in /MAN 02/, /EBE 09/ lautet, dass die Auflockerungszone die Systempermeabilität bestimmt. Hydromechanisch gekoppelte Modellierungen /POL 10/ von Aufsättigungsprozessen für Abdichtungselemente im Steinsalz zeigten, dass diese Aussage nur eingeschränkt zutrifft. Es zeigte sich, dass die ALZ nicht zwangsläufig durchlässiger sein muss als der Baukörper, auch wenn die Lösungsfront in der ALZ schneller voranschreitet. Das schnellere Voranschreiten der Lösungsfront in der ALZ und im Kontaktbereich ist durch das geringere Speichervolumen bedingt. Es ist dort trotz geringer Permeabilität schneller ein voll gesättigter Zustand erreicht als im Baukörper. Der Baukörper wird so auch von der ALZ aus aufgesättigt. Abb. 5.10 zeigt dazu beispielhaft den Feuchtegehalt im Dichtelement des Großversuchs Salzdelfurth bei Versuchsende (450 Tage), das verschiedenen hydraulischen Drücken an der Oberkante (Tiefe = 0 m) ausgesetzt war, wie er nach Rückbau

---

<sup>29</sup> Die Flächenvergrößerung stellt eine Abweichung von den Annahmen der Vorbemessung dar und wird deshalb nachträglich bewertet. Die Untergrenze von 0,6 m entspricht gerade dem Nachschnitt einschließlich 0,1 m im Rest-ALZ wie in /BUH 12b/, /MÜL 12a/ angenommen. Die Obergrenze von 0,9 m führt zu einer Verkürzung des Zeitraums für die Füllung des Speichervolumens zwischen dem Dichtelement aus Bentonit und dem Dichtelement aus Salzbeton von rechnerisch ca. 14 %. In Bezug auf das gesamte Verschlussystem hat dieser Sachverhalt nur geringen Einfluss und ist vernachlässigbar.

des Dichtelementes ermittelt wurde. Das Vorseilen der Sättigungsfront in der ALZ ist deutlich zu erkennen.

Diese Änderung im Systemverständnis wurde bei der Kalibrierung der hydraulischen Vorgänge berücksichtigt.



**Abb. 5.10** Feuchtegehalt Bentonit Versuch Salzdetfurth

Feuchtegehalte  $\geq 20$  % entsprechen 100 % Sättigung

In dem Forschungsvorhaben „Schachtverschluss Salzdetfurth“ wurde eine integrale Permeabilität von ca.  $1E-17$  m<sup>2</sup> für das Dichtelement bestehend aus Baukörper, Kontaktzone und ALZ ermittelt. Die integrale Permeabilität ergibt sich gemäß Gl. (5.9) aus den Flächenanteilen und den Permeabilitäten des Dichtelementes und der Auflockerungszone, wenn die Kontaktzone aufgrund ihres geringen Flächenanteils vernachlässigt wird (vgl. /EBE 09/).

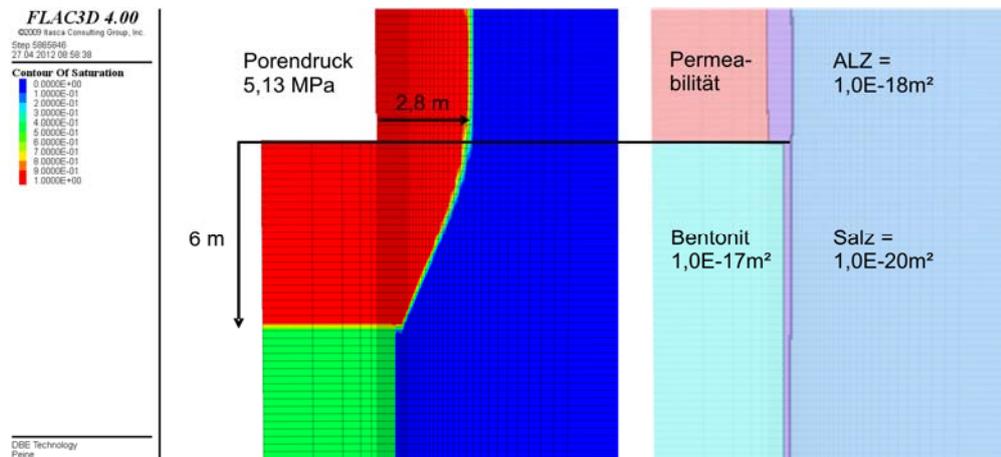
$$k_{\text{int}} = \frac{k_{\text{Bento}} \cdot A_{\text{Bento}} + k_{\text{ALZ}} \cdot A_{\text{ALZ}}}{A_{\text{Bento}}} \quad (5.9)$$

mit

- A<sub>Bento</sub>: Fläche Bentonit [m<sup>2</sup>]
- A<sub>ALZ</sub>: Fläche Auflockerungszone (ALZ) [m<sup>2</sup>]
- k<sub>Bento</sub>: Permeabilität Bentonit [m<sup>2</sup>]
- k<sub>ALZ</sub>: Permeabilität Auflockerungszone [m<sup>2</sup>]
- k<sub>int</sub>: integrale Permeabilität [m<sup>2</sup>]

Die versuchstechnisch ermittelte integrale Permeabilität und die geometrische Form der Durchfeuchtung wurden für die Kalibrierung des hydraulischen Modells herangezogen.

Abgeleitet aus der in situ integral ermittelten Permeabilität von 1E-17 m<sup>2</sup> wurde zuerst die Permeabilität der ALZ mit 1,0E-18 m<sup>2</sup> und des Bentonitelementes mit 1,0E-17 m<sup>2</sup> gewählt. Die sich daraus einstellende Sättigungsentwicklung entsprach in keinsten Weise den in situ Beobachtungen aus Salzdetfurth (siehe Abb. 5.11).

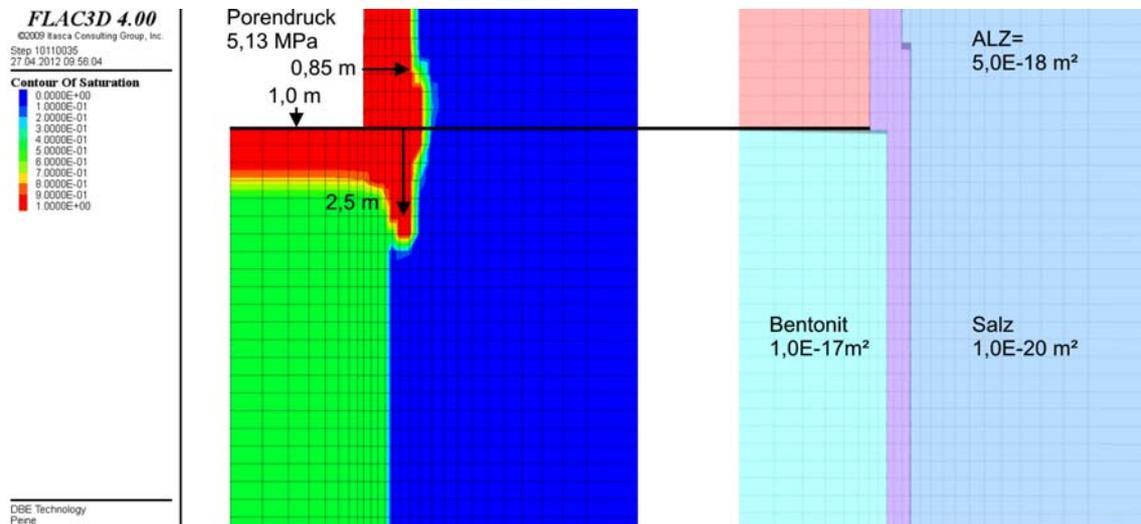


**Abb. 5.11** Sättigung nach 1.000 Tagen (Netz I, Anfangswerte des Parametersatzes)

Auf der vorhandenen Datenbasis wurden daher Anpassungsberechnungen<sup>30</sup> durchgeführt mit dem Ziel, neben der integralen Permeabilität eine qualitativ vergleichbare Abbildung des Aufsättigungsregimes mit der vorausseilenden Aufsättigung der ALZ zu er-

<sup>30</sup> Für die Anpassungsberechnungen wurden beide Netze verwendet. Die Ergebnisse für den Endparametersatz sind mit dem abschließend gewählten Netz II dargestellt.

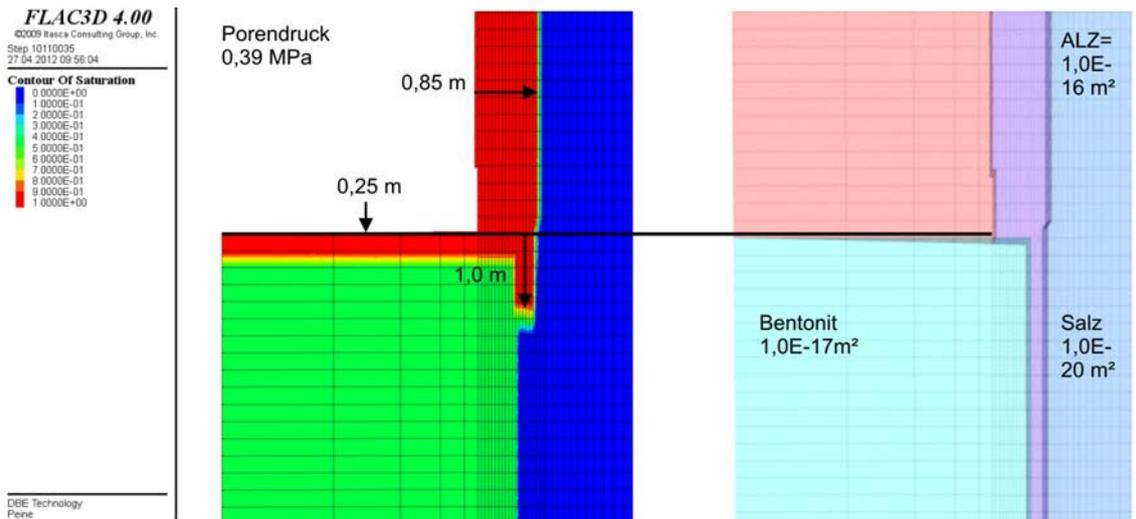
halten. Ergebnis der Anpassung ist eine Permeabilität von  $1\text{E-}17\text{ m}^2$  für den Baukörper aus Bentonit und  $5\text{E-}18\text{ m}^2$  für die ALZ. Die integrale Permeabilität beträgt  $1,07\text{E-}17\text{ m}^2$  und stimmt so mit den Ergebnissen des Versuchs „Schachtverschluss Salzdetfurth“ überein, vgl. Abb. 5.10 und Abb. 5.12.



**Abb. 5.12** Sättigung nach 120 Tagen (Endparametersatz), hydraulischer Zeitschritt  $5,3\text{E-}5$  Tage (Netz II)

Vergleichsrechnungen mit einer höheren Permeabilität der ALZ ( $1,0\text{E-}16\text{ m}^2$ ) und niedriger Permeabilität des Bentonits ( $1,0\text{E-}18\text{ m}^2$ ) lieferten wiederum qualitativ weniger passende Ergebnisse (Abb. 5.13). Daher wurde dieser Parametersatz ebenfalls verworfen.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Dieser Parametersatz sollte vorsorglich nochmals geprüft werden, wenn eine hydraulische Modellierung hoher Permeabilitätskontraste möglich ist und die sich bei Aufsättigung verändernde Permeabilität des Bentonits in die Berechnungen einbezogen werden kann.



**Abb. 5.13** Sättigung nach 10 Tagen (Kalibrierungsparametersatz), hydr. Zeitschritt  $1,1E-6$  Tage (Netz I)

Im Ergebnis der Kalibrierung der hydraulischen Vorgänge wurde der Parametersatz mit  $1E-17 \text{ m}^2$  für den Bentonit und  $5E-18 \text{ m}^2$  für die Auflockerungszone gewählt, der qualitativ auch die gleichen geometrischen Charakteristika aufweist wie die der in situ ermittelten Aufsättigung (Abb. 5.12). Da sich für diesen Parametersatz auch ein praktikabler Zeitschritt für die numerischen Berechnungen ergab, wird dieser Parametersatz für die folgenden Berechnungen verwendet. Dazu ist anzumerken, dass die Permeabilität des Bentonits konstant gehalten wurde, um den ermittelten praktikablen Zeitschritt von  $5,3E-5$  Tage zu nutzen. Diese Näherung ist vertretbar, weil in der Aufsättigungsphase das deutlich höhere Speichervolumen des Bentonits den Messbefunden entsprechend abgebildet wird und somit aufgrund seiner Dränagewirkung die Auswirkung der konstanten Permeabilität auf die Lage der Aufsättigungsfront beschränkt.

## 5.5.4 Hydromechanisch gekoppelte Berechnung des Aufsättigungsprozesses

### 5.5.4.1 Auswertelokationen

Die Ergebnisse der hydromechanischen Berechnungen werden für die maßgebenden Zustandsgrößen als Konturplots zu festen Zeitpunkten sowie Linienplots über die Zeit und Verläufe an Schnittlinien zu festen Zeitpunkten dargestellt. Der Zeitpunkt  $t = 0$  beschreibt dabei den Beginn des Lösungsdruckaufbaus unmittelbar nach Fertigstellung

des darüber angeordneten Filterelementes, vgl. Tab. 2.2. Die Lage der Auswertepunkte für die Linienplots über die Zeit ist in horizontaler Richtung in die Positionen: „Mitte Bauwerk“, „Rand Bauwerk“ und „Auflockerungszone“ gegliedert. Als „Mitte Bauwerk“ werden Zonen bezeichnet, die ca. 1,8 m von der Schachtachse entfernt liegen, als „Rand Bauwerk“ werden die äußersten Zonen des Dichtelementes bezeichnet. Die Lokation Auflockerungszone beschreibt die direkt an die äußerste Zone des Dichtelementes angrenzende Zone, die der Auflockerungszone zugewiesen wird (siehe Abb. 5.14). In vertikaler Richtung sind Auswerteebenen in verschiedenen Teufen angeordnet (siehe Tab. 5.5). Die Auswertung der Verläufe zu festen Zeitpunkten erfolgt in Schnittlinien, die durch horizontale Elementreihen definiert sind und deren Lage nur zum Teil mit den Auswerteebenen übereinstimmt (siehe Abb. 5.15). Ihre Teufenlage ist ebenfalls in Tab. 5.5 angegeben.

**Tab. 5.5** Auswerteebenen und -reihen in verschiedenen Teufen

<b>Ebenen</b>	<b>Teufe [m]</b>	<b>Reihen</b>	<b>Teufe [m]</b>
Ebene 1	387,0	Reihe 1	386,5
Ebene 2	388,0	Reihe 2	387,0
Ebene 3	390,0	Reihe 3	387,5
Ebene 4	397,0	Reihe 4	388,0
Ebene 5	440,0	Reihe 5	388,5

Anmerkungen zur Darstellung der Ergebnisse:

1. In den Abbildungen wird auf die Darstellung des Filterelementes verzichtet. Die Position des Filterelementes ist weiß. Dadurch wird eine bessere Skalierbarkeit der Spannungsplots des Bentonitelements erreicht. Zur Orientierung wurde ein Maßstab der Länge 5 m, beginnend ab Oberkante Bentonitdichtelement, eingefügt.
2. In den Konturplots (Abb. 5.28 – Abb. 5.30) erfolgt die Darstellung der Spannungsverteilungen entsprechend der Vorzeichenkonvention der technischen Mechanik: Zugspannungen positiv, Druckspannungen negativ. In den als „Minimalspannung“ bezeichneten Spannungsfeldern erfolgt die Darstellung der betragsmäßig kleinsten Hauptspannung, welche im Rahmen der
  - technischen Mechanik (Zugspannung positiv) als größte Hauptspannung  $\sigma_1$
  - Geomechanik (Zugspannungen negativ) als kleinste Hauptspannung  $\sigma_3$

bezeichnet wird. Bei der Darstellung der minimalen effektiven Hauptspannung erfolgt die Subtraktion des zonenbasierten Porendrucks von der betragsmäßig kleinsten Hauptspannung.

In den Erläuterungen zu den grafischen Darstellungen sowie den Linienplots wird die Vorzeichenkonvention der Geomechanik verwendet.

3. In den Linienplots (Abb. 5.25 – Abb. 5.27) des Fluiddruckkriteriums sind bei 0 MPa, 0,5 MPa und bei 1,0 MPa gestrichelte rote Linien eingefügt. Diese Linien dienen als Indikator für das vorhandene Zuverlässigkeitsniveau<sup>32</sup>. Bei Unterschreitung der Null-Linie ist das Fluiddruckkriterium verletzt. Bei der 1,0 MPa Linie und der 0,5 MPa Linie verbleibt die Zone im Bereich effektiver Druckspannungen und weist einen Sicherheitsabstand zur Kriteriumsverletzung aus.
4. Bei der Volumenänderung stehen positive Werte für eine Vergrößerung der Zone, negative Werte für eine Volumenreduzierung (bezogen auf das Ausgangsvolumen bei  $t = 0$ )

---

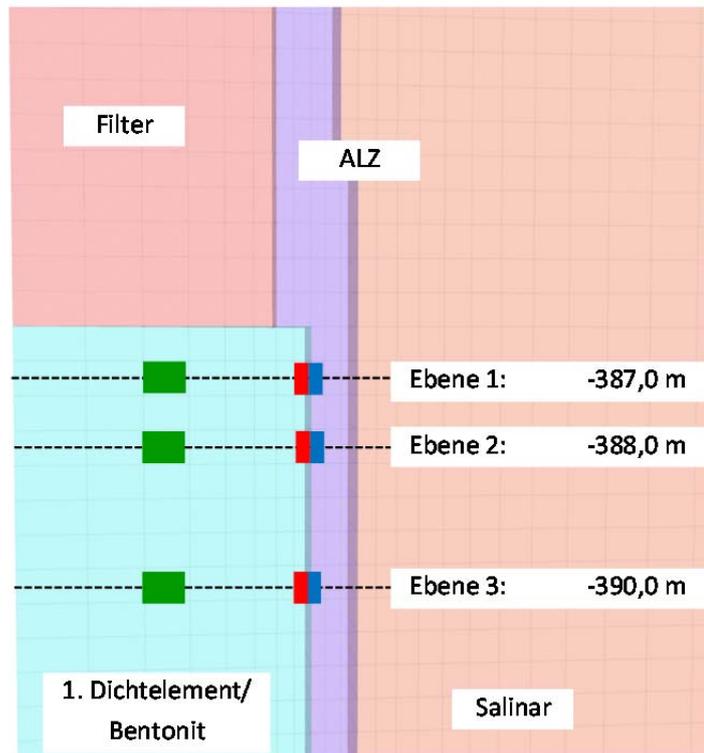
<sup>32</sup> Bei dieser bzw. einer hydraulisch gekoppelten Berechnung lässt sich die Anwendung eines Teilsicherheitsbeiwertes von 0,9 für positiv wirkende Einwirkungen nicht realisieren.

**FLAC3D 4.00**  
 ©2009 Itasca Consulting Group, Inc.  
 Step 84298  
 05.03.2013 14:35:27

**Gruppen**  
 Group Slot: 1  
 schotter  
 filter\_1  
 bentonit  
 filter\_2  
 deck\_2  
 ALZ  
 z3OSO  
 deck  
 z3OSU  
 z3LS

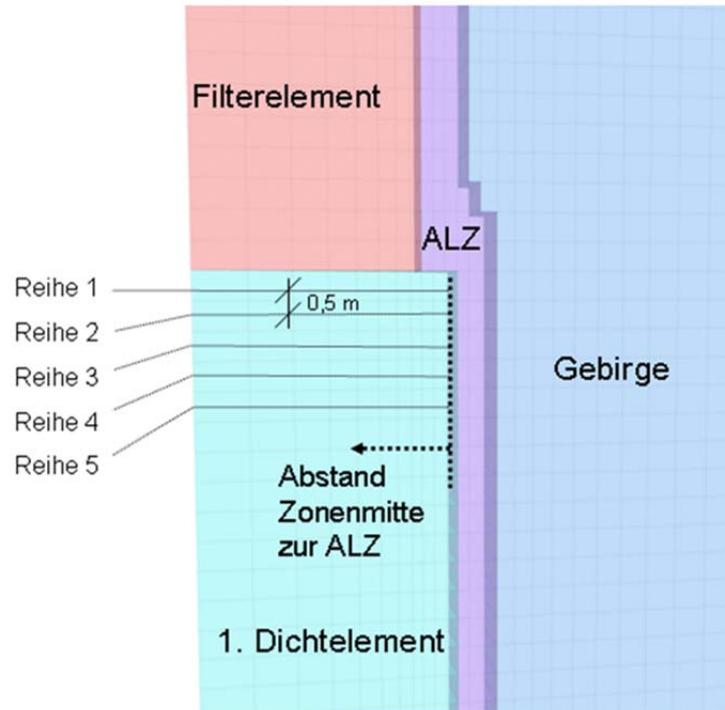
**Bauwerk Mitte**  
**Bauwerk Rand**  
**ALZ**

DBE Peine



**Abb. 5.14** Position der Auswertelokationen

Abstand von der Schachtachse 1,8 m, 4,2 m und 4,3 m



**Abb. 5.15** Betrachtete Zonenreihen Volumenkriterium

OK 1. Dichtelement bei 386 m Teufe, Reihe 1 bei 386,5 m Teufe, Reihe 5 bei 388,5 m Teufe

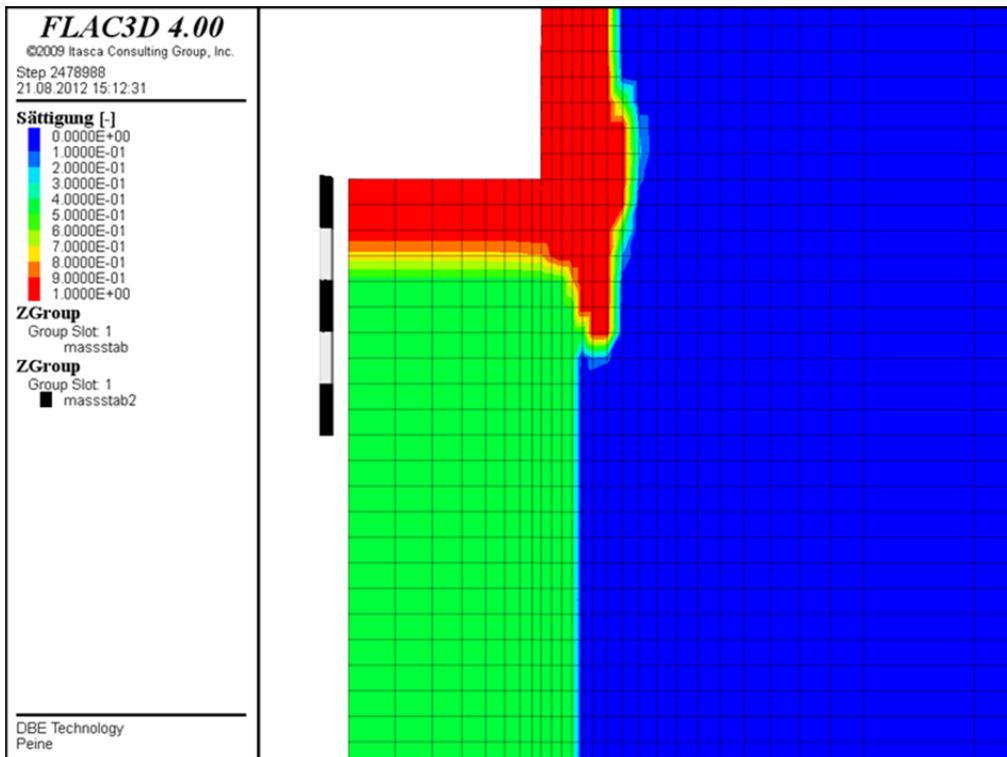
#### 5.5.4.2 Berechnungsergebnisse

In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse der hydromechanischen Berechnung erläutert, eine umfassendere Übersicht zu allen Berechnungsergebnissen ist /BRE 12/ zu entnehmen. Die Berechnungen umfassen einen Zeitraum von bis zu 2.000 Tagen, d. h., die Simulation erfolgt noch 5 Jahre über den Zeitpunkt hinaus, an dem der maximale Lösungsdruck auf das Dichtelement erreicht wird.

In Abb. 5.16 bis Abb. 5.21 sind die Sättigungszustände und die Porendrücke zu den Zeitpunkten 120 Tage (Zeitpunkt des Erreichens des Maximaldrucks), 1.000 Tage und 2.000 Tage dargestellt.

Aus den Abbildungen wird deutlich, dass sich bei zunehmender Aufsättigung die hydraulischen Gradienten abflachen, vgl. dazu die Darstellungen des Sättigungszustandes und der Porendruckverteilungen. Ein Porendruckaufbau ist bei einer vollständigen Sättigung der Modellzone möglich. Am schnellsten sättigt sich die Auflockerungszone

(ALZ) auf. Schon kleinste Mengen an Lösung führen dort aufgrund der geringen Porosität zu einer vollständigen Sättigung einer Modellzone.



**Abb. 5.16** Sättigung bei  $t = 120$  d, Ende Druckaufbau

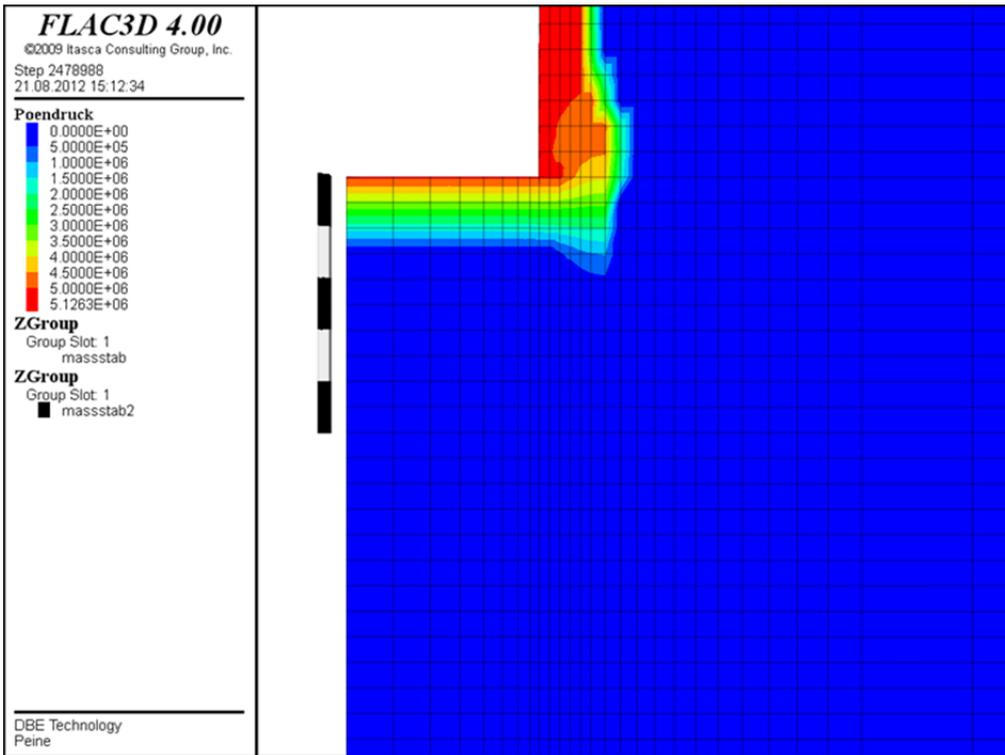


Abb. 5.17 Porendruck bei  $t = 120$  d, Ende Druckaufbau

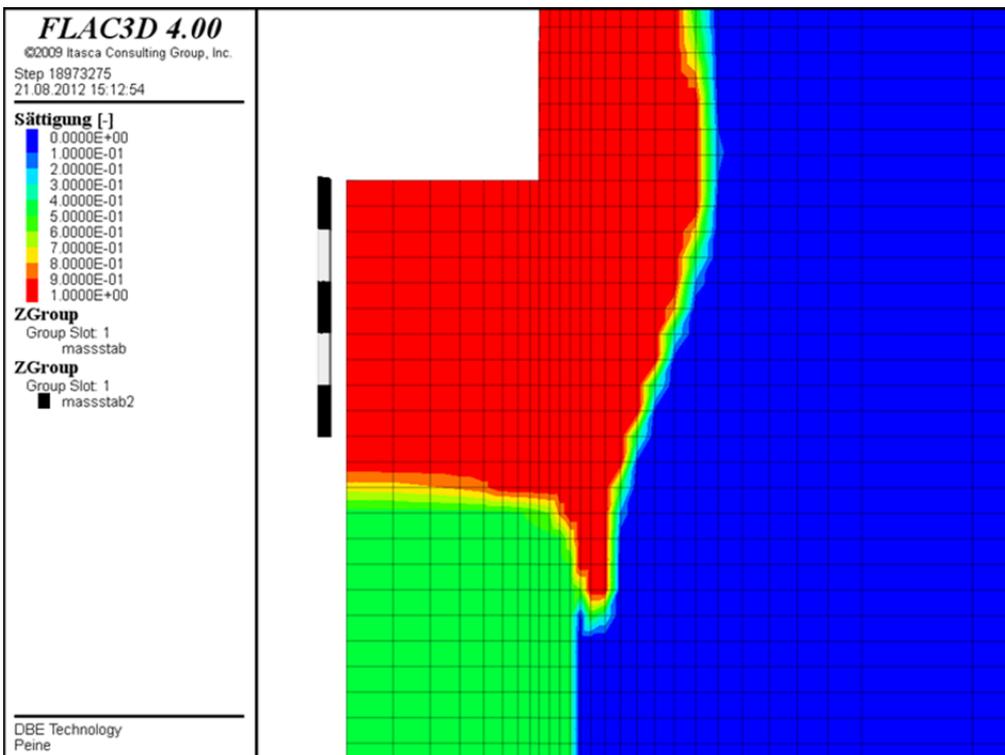


Abb. 5.18 Sättigung bei  $t = 1.000$  d

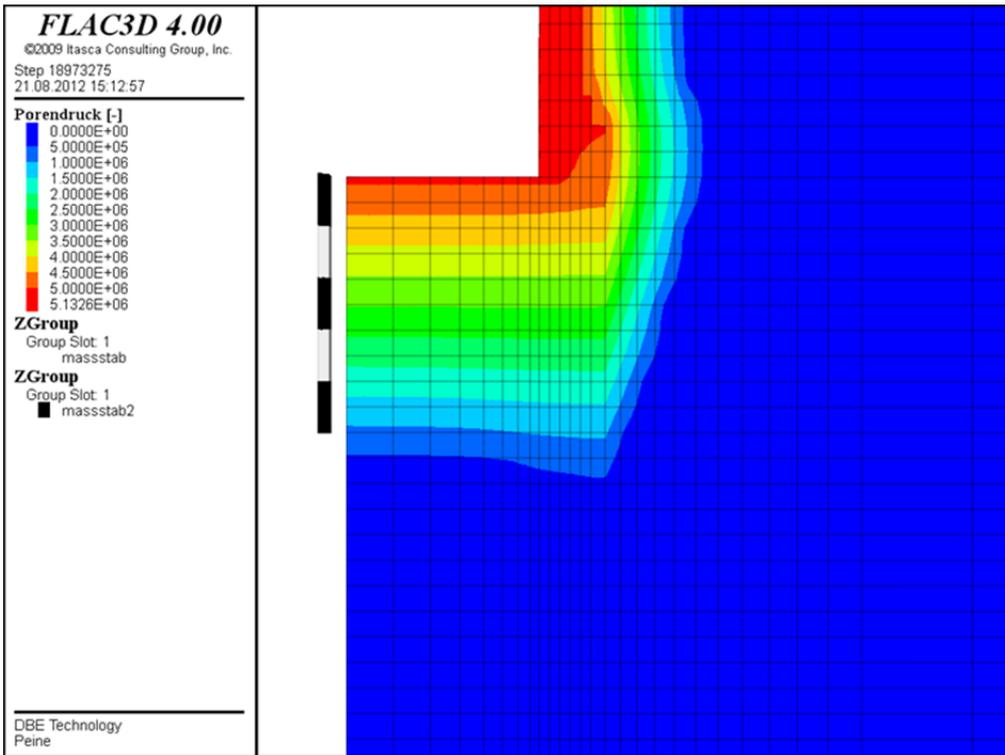


Abb. 5.19 Porendruck bei  $t = 1.000$  d

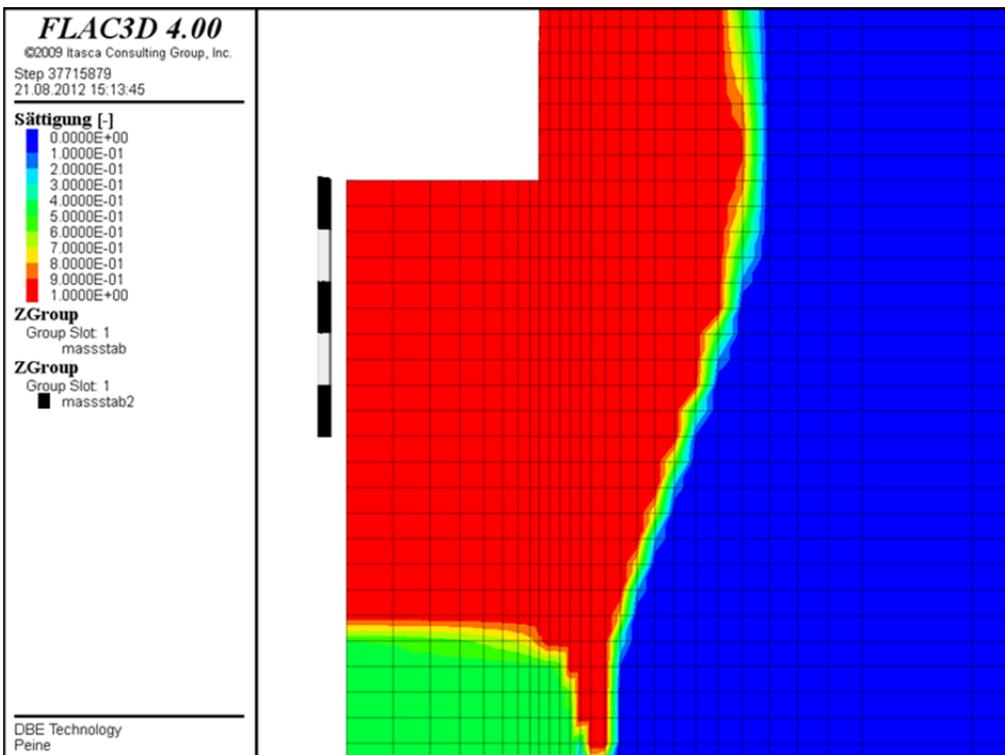
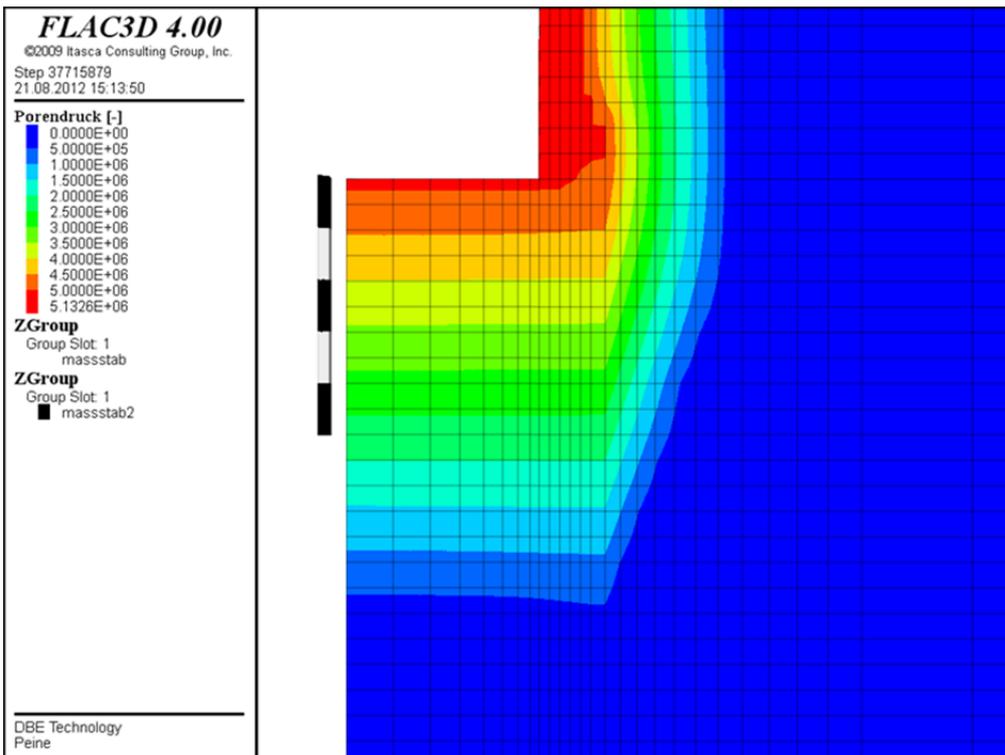


Abb. 5.20 Sättigung bei  $t = 2.000$  d

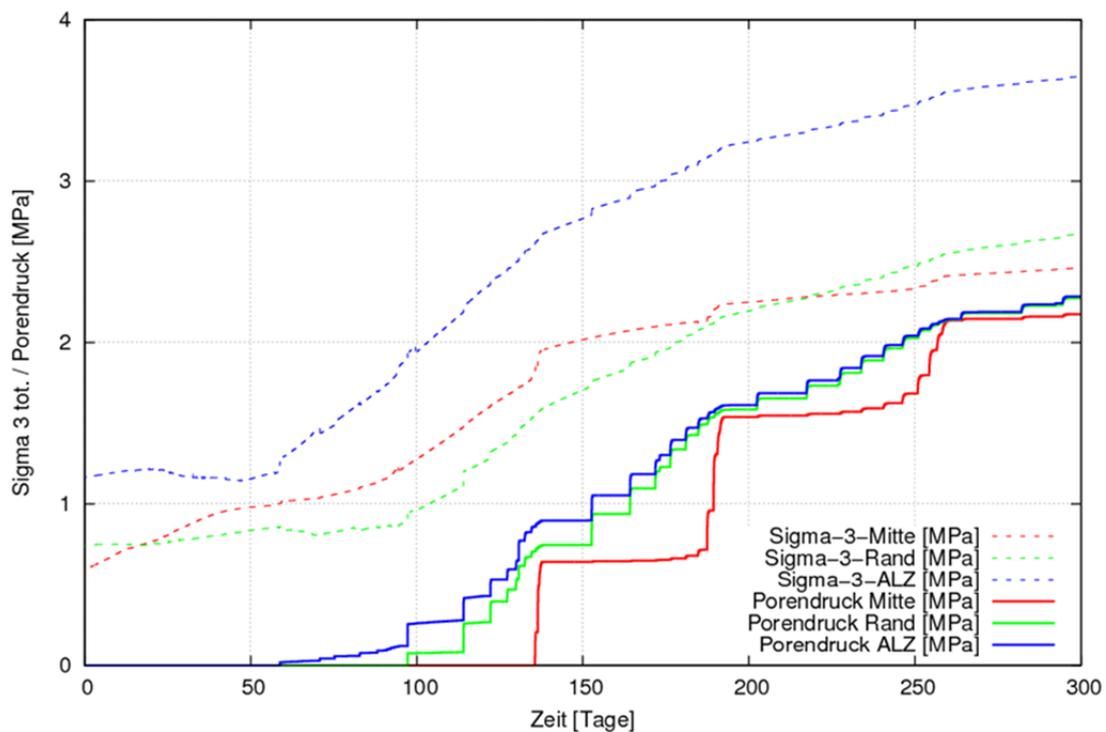


**Abb. 5.21** Porendruck bei  $t = 2.000 \text{ d}$

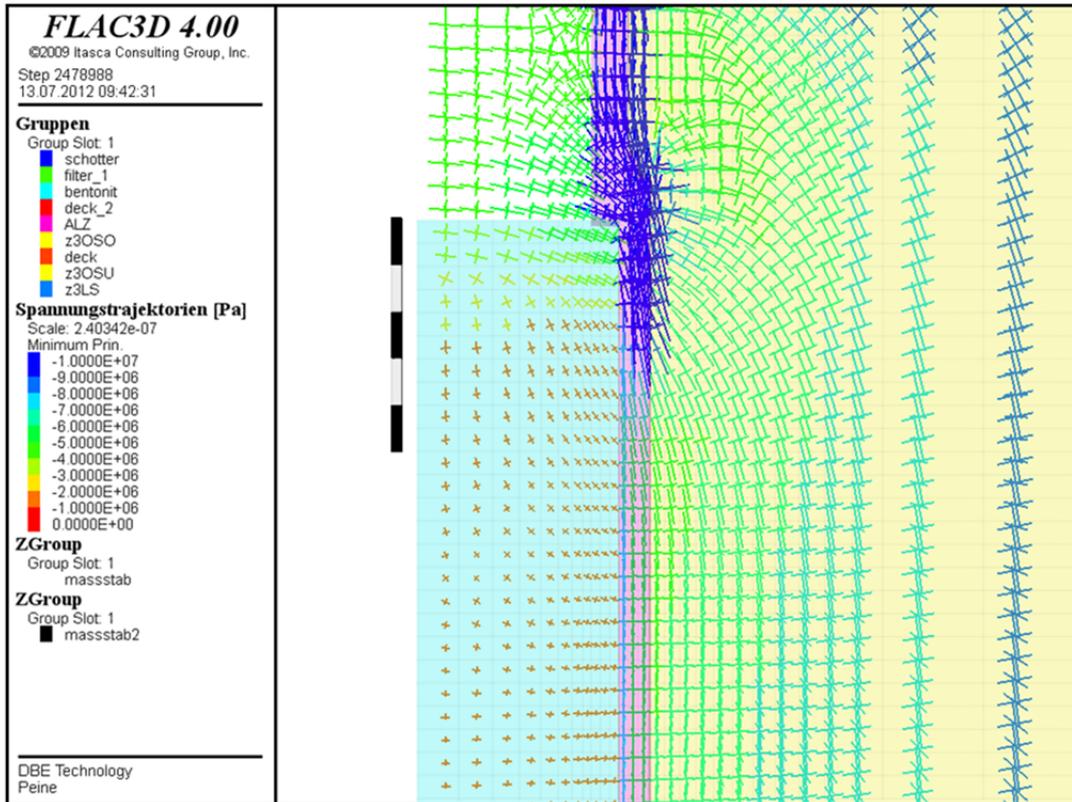
Abb. 5.22 zeigt den Verlauf der minimalen Hauptspannung  $\sigma_3$  und des Porendrucks bis 300 Tage für Ebene 2<sup>33</sup>. Die Spannungserhöhungen im Dichtelement resultieren aus dem Quelldruck und der Kompaktion infolge des aufkriechenden Gebirges. Der Quelldruckaufbau erfolgt analog zur Aufsättigung. Bereits nach 60 Tagen ist in der ALZ aufgrund ihrer geringen Porosität eine vollständige Sättigung erreicht und der Porendruckaufbau beginnt (blaue Linie). In der Randzone des Bentonit, die an die ALZ angrenzt, ist nach 95 Tagen ein Porendruckanstieg zu verzeichnen. Diese Zone sättigt sich sowohl in vertikaler Richtung als auch horizontal über die benachbarte ALZ auf. Nach 130 Tagen ist auch die mittlere Zone des Dichtelementes über den vertikalen

<sup>33</sup> Hinweis zu dem treppenartigen Anstieg des Porendrucks (insbesondere Stützstelle „Porendruck Mitte“): Der Porendruck im Filterelement wird sukzessive gemäß Auswertung „Schachtverschluss Salzdetfurth“ aufgebaut. Die Sättigung im Filterelement beträgt dazu 100 %, die Sättigung im Bentonit liegt bei anfangs 45 %. Um die numerische Stabilität der Rechnung zu erhöhen, werden Zonen mit einer Sättigung = 99,0 % automatisch innerhalb eines Rechenschrittes auf eine Sättigung von 100 % gesetzt. Somit kann sich in dieser Zone der Porendruck aufbauen. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Materials Bentonit kann es so bereits zu einem Porendruckaufbau in der oberen Zone kommen, während die tiefer liegende Zone bedingt durch eine unvollständige Sättigung noch keinen Porendruckaufbau erfährt. Erreicht die untere Zone nun die Sättigung von 99 %, wird innerhalb eines weiteren Rechenschrittes ein Porendruckaufbau zugelassen. Der Porendruck entlastet sich dann instantan in die untere Zone. Sobald die wiederum tiefere Zone voll gesättigt ist, klingt diese numerische bedingte Unregelmäßigkeit ab.

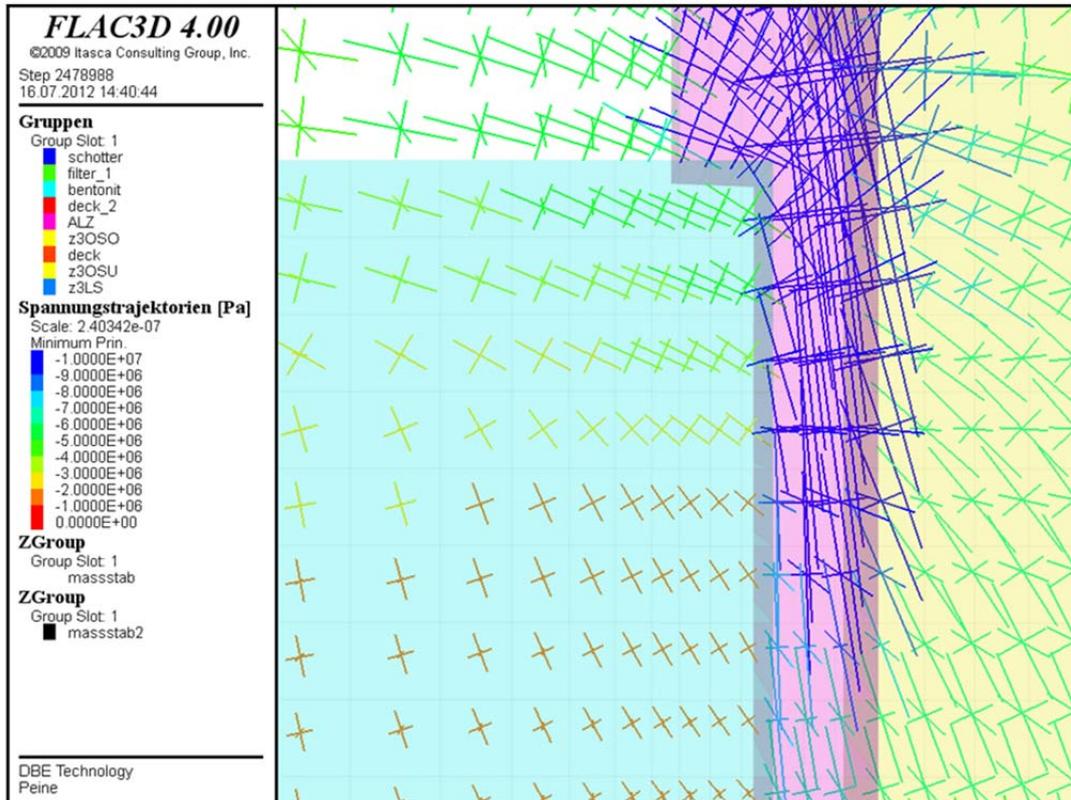
Zufluss vollständig gesättigt. Die zum Zeitpunkt  $t = 0$  bereits vorhandene kleinste Hauptspannung  $\sigma_3$  ergibt sich aus dem Überlagerungsdruck der Schachtverfüllung, der sich unter Ausbildung eines lokalen Traggewölbes in die Schachtkontur abträgt (vgl. auch Abb. 5.23 und Abb. 5.24). Abb. 5.23 und im Detail in Abb. 5.24 zeigen die Spannungstrajektorien zum Zeitpunkt, an dem der maximale hydrostatische Drucks von 5,13 MPa gerade erreicht wird. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass in den Übergangsbereichen Filter/Dichtelement und insbesondere Dichtelement/ALZ die Richtung der kleinsten Hauptspannung nicht mehr normal zur Kontur orientiert ist.



**Abb. 5.22** Detail: Minimalspannungs- und Porendruckentwicklung in Ebene 2



**Abb. 5.23** Spannungstrajektorien nach 120 d, Ende Druckaufbau



**Abb. 5.24** Spannungstrajektorien nach 120 d (Detailansicht)

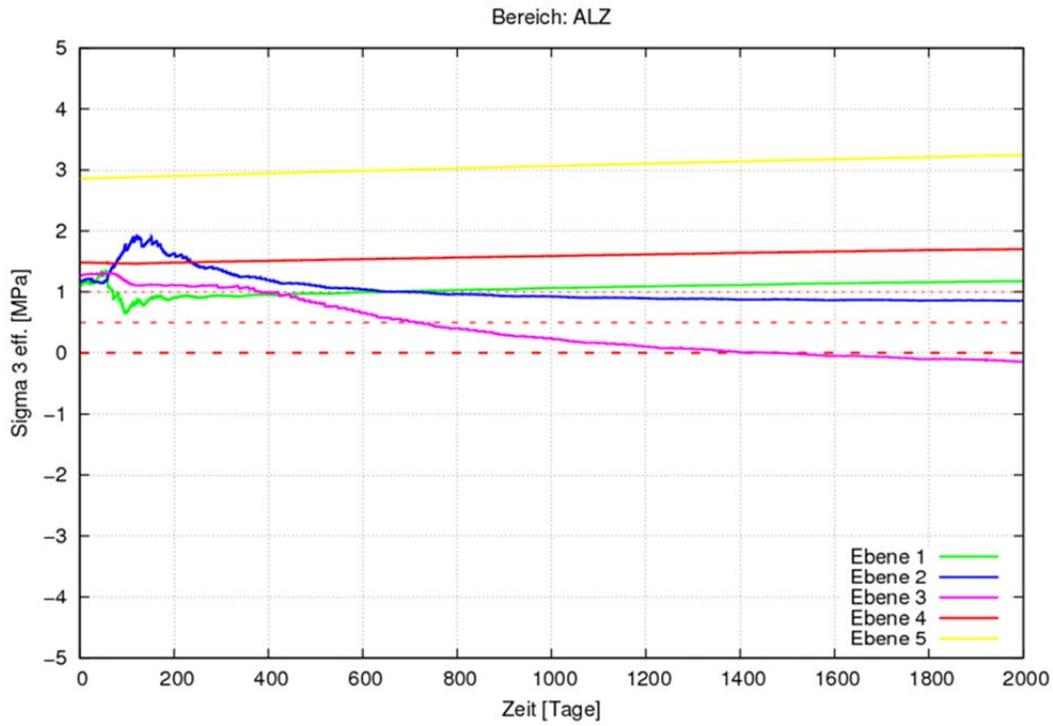
### Bewertung der Berechnungsergebnisse – Fluiddruckkriterium

Für die Bewertung der Berechnungsergebnisse in Bezug auf das effektive Fluiddruckkriterium werden die zeitlichen Verläufe (Linienplots) gemäß Abb. 5.25 bis Abb. 5.27 herangezogen. Die Darstellung der Verläufe beginnt mit dem Eindringen der ersten Lösung ( $t = 0$ ) und endet bei 2.000 Tagen. Bei Werten  $< 0$  ist das Fluiddruckkriterium nicht erfüllt, d. h., eine lokale Auflockerung infolge der herrschenden Porendrücke kann nicht ausgeschlossen werden. Abb. 5.25 zeigt den zeitlichen Verlauf der kleinsten effektiven Spannungskomponente für die Auswertepunkte ALZ für die Ebenen 1 bis 5. Innerhalb des betrachteten Zeitraums kommt es zu einer lokalen Verletzung des Fluiddruckkriteriums in Ebene 3 der Auflockerungszone. Ebene 4 und Ebene 5 zeigen bedingt durch die Gebirgskonvergenz eine Zunahme der kleinsten effektiven Spannung, sind aber noch nicht aufgesättigt.

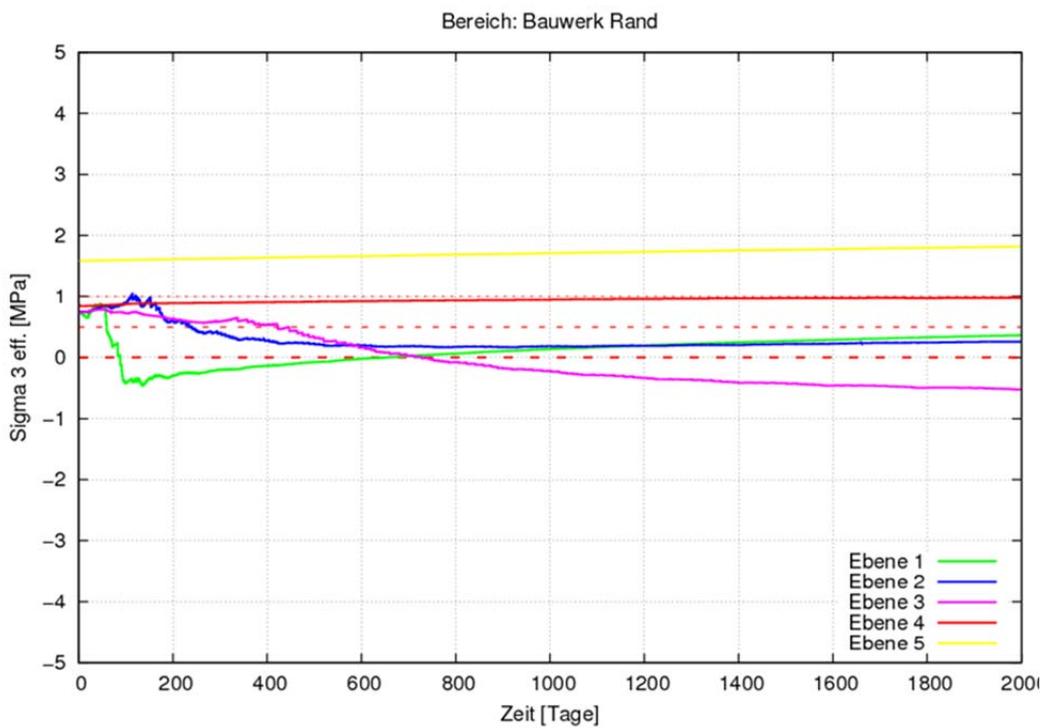
Die Kontaktzone (Rand Dichtelement) zeigt im betrachteten Zeitraum zwei lokale Kriteriumsverletzungen, Abb. 5.26. In Ebene 1 wird eine Kriteriumsverletzung bei ca. 120 Tagen (maximaler hydrostatischer Druck) erkennbar, aber der Zustand verbessert sich,

und nach 600 Tagen ist die Zone bereits wieder im Druckbereich, obwohl in Ebene 1 der hydrostatische Druck weiterhin mit 5,13 MPa voll ansteht. Die Verbesserung des Zustandes ist mit dem Einsetzen der Quellvorgänge in den tieferliegenden Ebenen zu begründen, was sich auch positiv auf die Einspannung von Ebene 1 auswirkt. Die Ebene 2 verschlechtert ihren Zustand bis etwa 600 Tage, danach nimmt die effektive Spannung wieder zu, das Fluidruckkriterium wird jedoch während des betrachteten Zeitraums von 2.000 Tagen immer eingehalten. Die zweite lokale Verletzung tritt in Ebene 3 auf. Für die Ebenen 4 und 5 ist eine Verbesserung des unaufgesättigten Zustands infolge der ansteigenden effektiven kleinsten Spannungskomponente zu beobachten.

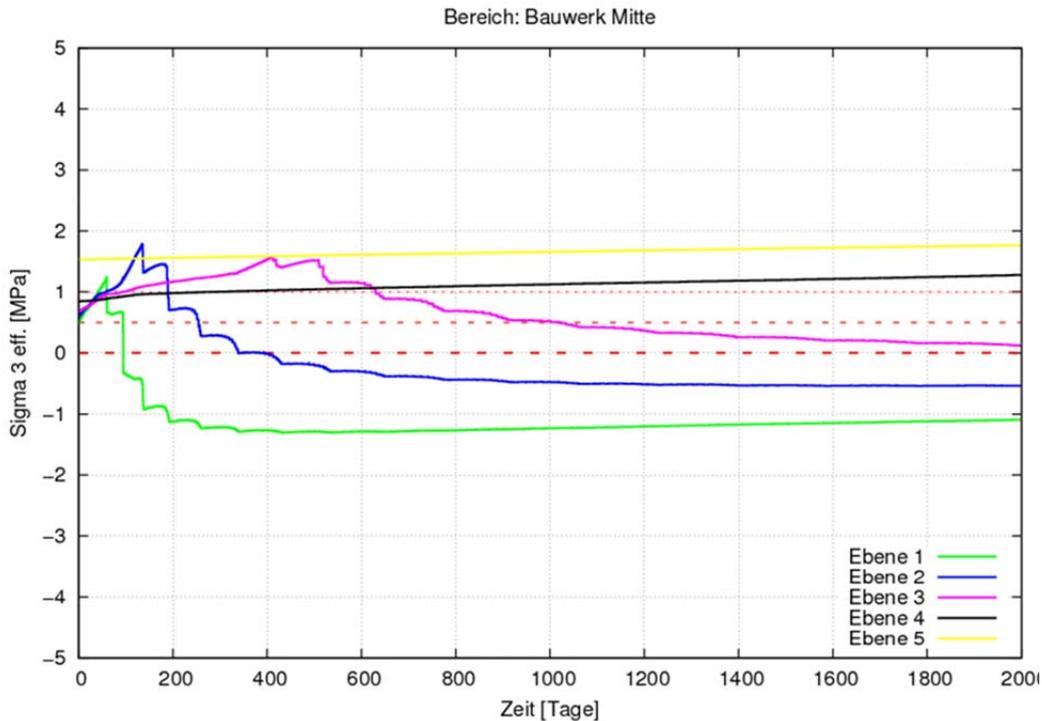
In der Mitte des Bauwerks (Dichtelementes) kommt es zu einer Verletzung des Fluidruckkriteriums in Ebene 1 kurz vor Erreichen des maximalen hydrostatischen Drucks an der Oberkante des Dichtelements (Abb. 5.27). Infolge der Aufsättigung und des damit verbundenen Porendruckanstiegs kommt es auch nach 400 Tagen in Ebene 2 zu einer Verletzung des Kriteriums. In Ebene 3 ist infolge der beginnenden Quellvorgänge zuerst eine Verbesserung des Zustandes erkennbar, der sich allerdings bei 400 Tagen bedingt durch den Porendruckaufbau bei vollständiger Sättigung der Zone wieder verschlechtert. In den Ebenen 4 und 5 lässt sich eine positiv wirkende Erhöhung der Druckspannung erkennen. Auch die Verletzung des Fluidruckkriteriums in den Ebenen 1 und 2 nimmt mit der Zeit wieder ab.



**Abb. 5.25** Zeitliche Entwicklung der kleinsten effektiven Spannungskomponente, Bereich: ALZ



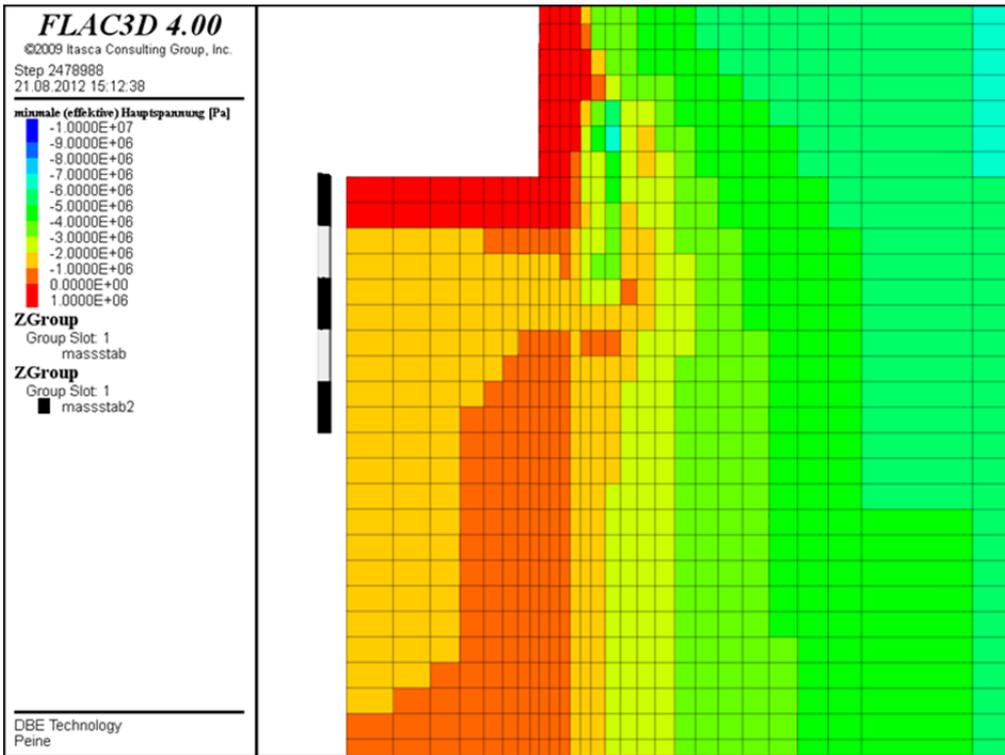
**Abb. 5.26** Zeitliche Entwicklung der kleinsten effektiven Spannungskomponente, Bereich: Bauwerk Rand



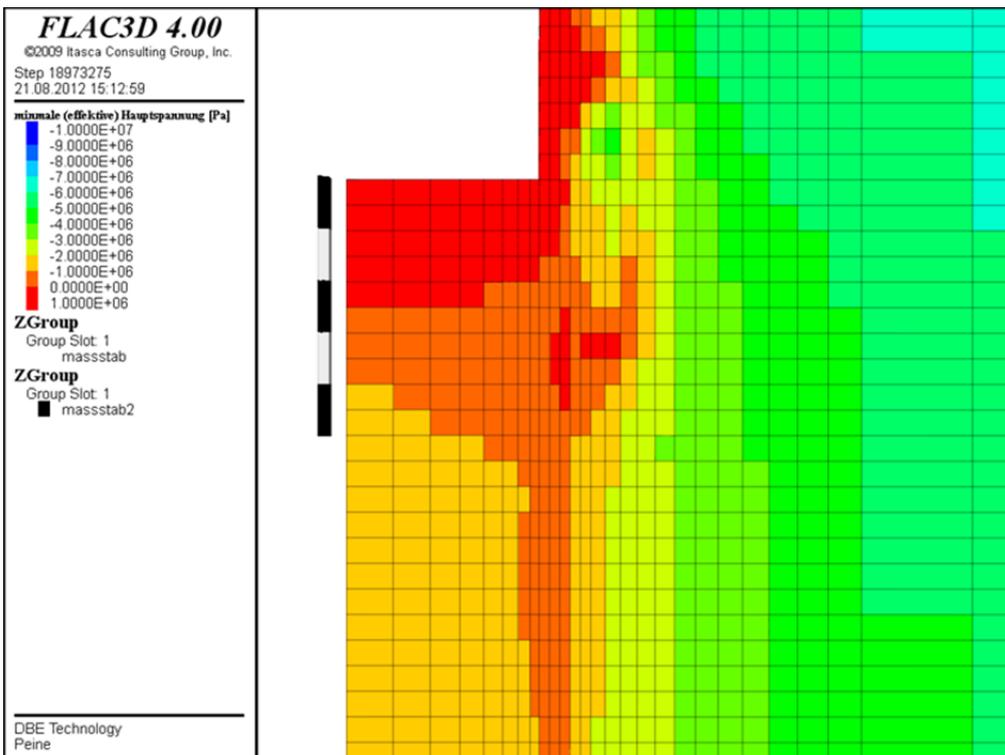
**Abb. 5.27** Zeitliche Entwicklung der kleinsten effektiven Spannungskomponente, Bereich: Bauwerk Mitte

Abb. 5.28 bis Abb. 5.30 stellen die minimalen effektiven Spannungen zu den Zeitpunkten 120 Tage, 1.000 Tage und 2.000 Tage nach Beginn Druckbeaufschlagung dar. Es zeigt sich, dass es bei Sättigung und Aufbau des Porendrucks jeweils zu lokalen Verletzungen des effektiven Fluiddruckkriteriums kommt, wobei die Zonen der Verletzung jedoch nicht durchgehend miteinander verbunden sind. So zeigt sich, dass die Bereiche, in denen das Kriterium verletzt wird, deutlich langsamer wachsen als die aufgesättigten Bereiche. Weiterhin wird deutlich, dass sich mit zunehmender Zeit Bereiche durch die zunehmende Einspannung wieder verbessern. Somit wird offensichtlich, dass das zweite Kriterium, die Auflockerungsbeschränkung, sinnvoll ist, da bei lokal beschränkter Auflockerung die „Selbststabilisierung“ bzw. „Selbstheilung“ des Systems erfolgt. Dieses Kriterium wird im Folgenden überprüft<sup>34</sup>.

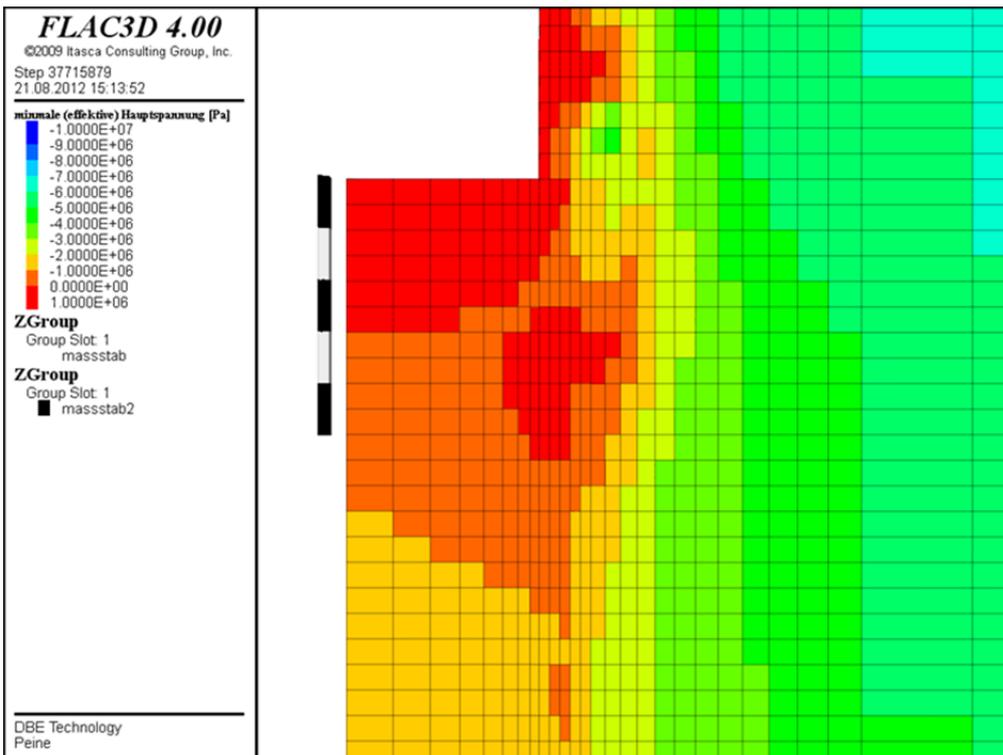
<sup>34</sup> Es ist bekannt, dass im Ton auch Porenwasserüberdrücke existieren können, d. h. das Fluiddruckkriterium ist verletzt. Überdrücke bauen sich bei niedriger Permeabilität und Diffusivitäten auf /BFS 02/.



**Abb. 5.28** Minimale effektive Hauptspannung ( $\sigma'_3$ ) bei  $t = 120$  d



**Abb. 5.29** Minimale effektive Hauptspannung ( $\sigma'_3$ ) bei  $t = 1.000$  d

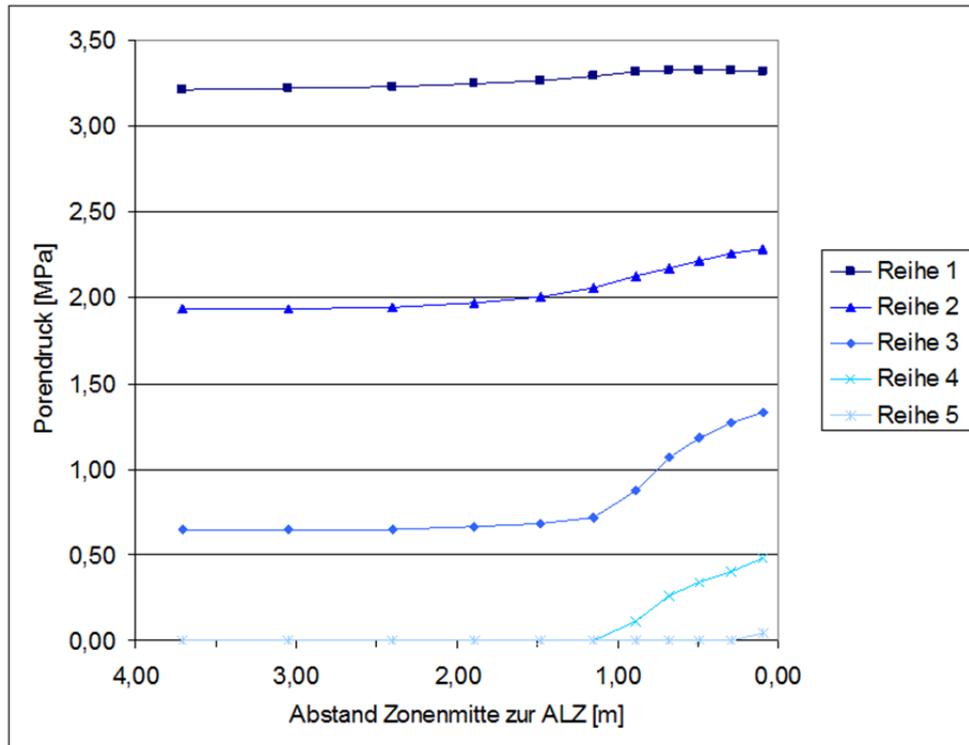


**Abb. 5.30** Minimale effektive Hauptspannung ( $\sigma'_3$ ) bei  $t = 2.000$  d

### Bewertung der Berechnungsergebnisse – Auflockerung des Bentonits

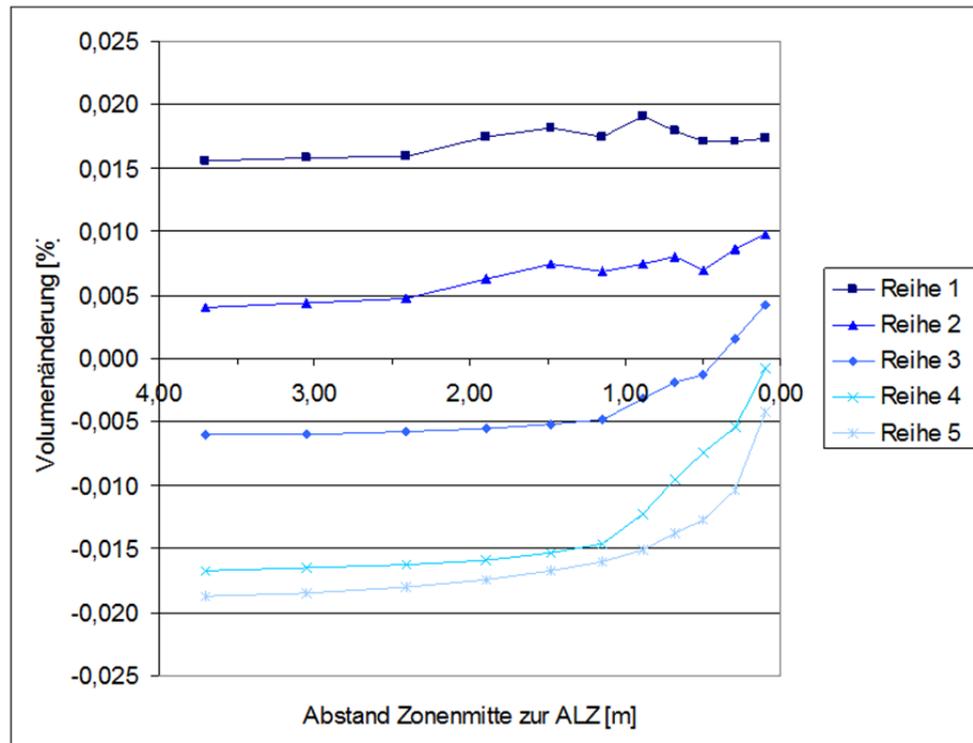
Gemäß /WAG 05/ ist eine Auflockerung des Bentonits unerheblich, sofern sie auf Werte unter 3 Volumen-% (siehe Kapitel 5.2) beschränkt ist. Auf Basis dieser Aussage wurden die Zonen des Bentonits hinsichtlich der Erfüllung dieses Auflockerungskriteriums untersucht. Dabei zeigen vollgesättigte Modellzonen infolge des Porendruckaufbaus eine Volumenvergrößerung. Die Volumenvergrößerung liegt stets unterhalb der Grenze von 3 Volumen-%. Dies gilt auch für die Kontaktzonen zum Filterelement (oberste Zonenreihe Bentonit). Diese Modellzonen sind im Hinblick auf Auflockerung bzw. Volumenvergrößerung als besonders kritisch zu bewerten, da dort am schnellsten der maximale Porendruck ansteht und zusätzlich ein großer Expansionsraum in Form des weniger steifen Filterelementes vorhanden ist. Ungesättigte Modellzonen kompaktieren infolge der zunehmenden Übertragung der Auflast, der Kriechvorgänge im Salinar und des Quelldruckaufbaus in den benachbarten Zonen. Exemplarisch ist in

Abb. 5.31 und Abb. 5.32 das Verhalten 56 Tage<sup>35</sup> (= 176 Tage bei Bezug auf t = 0) nach Erreichen des maximalen hydraulischen Drucks an der Oberkante des 1. Dichtelements dargestellt. Die Darstellung des Porendrucks und der Volumenänderung erfolgt jeweils getrennt für die Reihen 1 bis 5 und in Abhängigkeit des horizontalen Abstands von der ALZ.



**Abb. 5.31** Porendruckverlauf [MPa] in radialer Richtung für die Auswerteebenen gemäß Abb. 5.15 (176 Tage)

<sup>35</sup> Der Zeitpunkt 176 Tage wurde im Projektverlauf für die Auswertung gewählt, weil er einerseits deutlich hinter dem Zeitpunkt des Erreichens des Maximaldrucks liegt, andererseits rechenzeitbedingt als erster repräsentativer Speicherstand ausgewertet werden konnte.



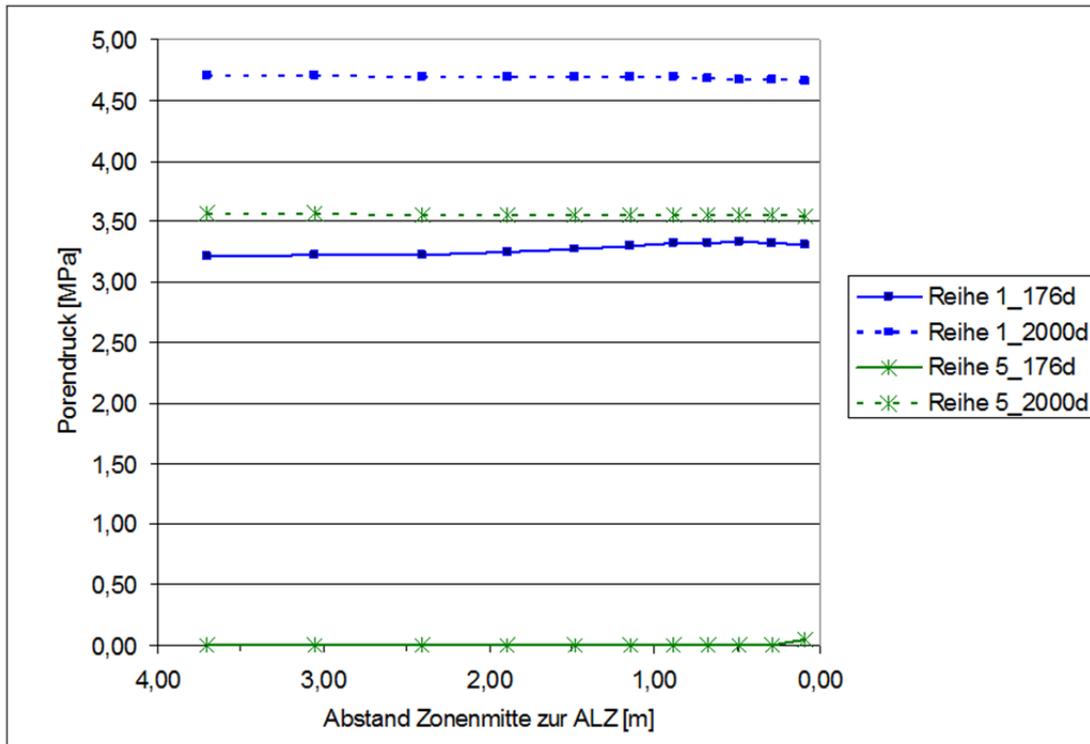
**Abb. 5.32** Volumenänderung [%] in radialer Richtung für die Auswerteebenen gemäß Abb. 5.15 (176 Tage)

Wie aus den Konturplots (Abb. 5.17, Abb. 5.19, Abb. 5.21) ersichtlich, baut sich ein Porendruck in vollgesättigten Zonen am stärksten in den Randzonen zur ALZ auf, da es hier zu einer vorausseilenden Aufsättigung kommt. Zum betrachteten Zeitpunkt 176 Tage liegt der Porendruck in den Reihen 1 bis 3 zwischen 0,65 MPa und 3,3 MPa mit einem Anstieg in Richtung der ALZ. Entsprechend dem Porendruckaufbau verhält sich auch das Volumen der Zonen. Zonen ohne Porendruckaufbau kompaktieren infolge des zunehmenden Druckaufbaus (Reihe 4 und 5). Zonen mit Porendruckaufbau vergrößern ihr Volumen infolge Quelldruck und Porendruck (Reihe 1, 2 und 3). Die Vergrößerung übersteigt nicht die Auflockerungsgrenze von 3 Volumen-%<sup>36</sup>.

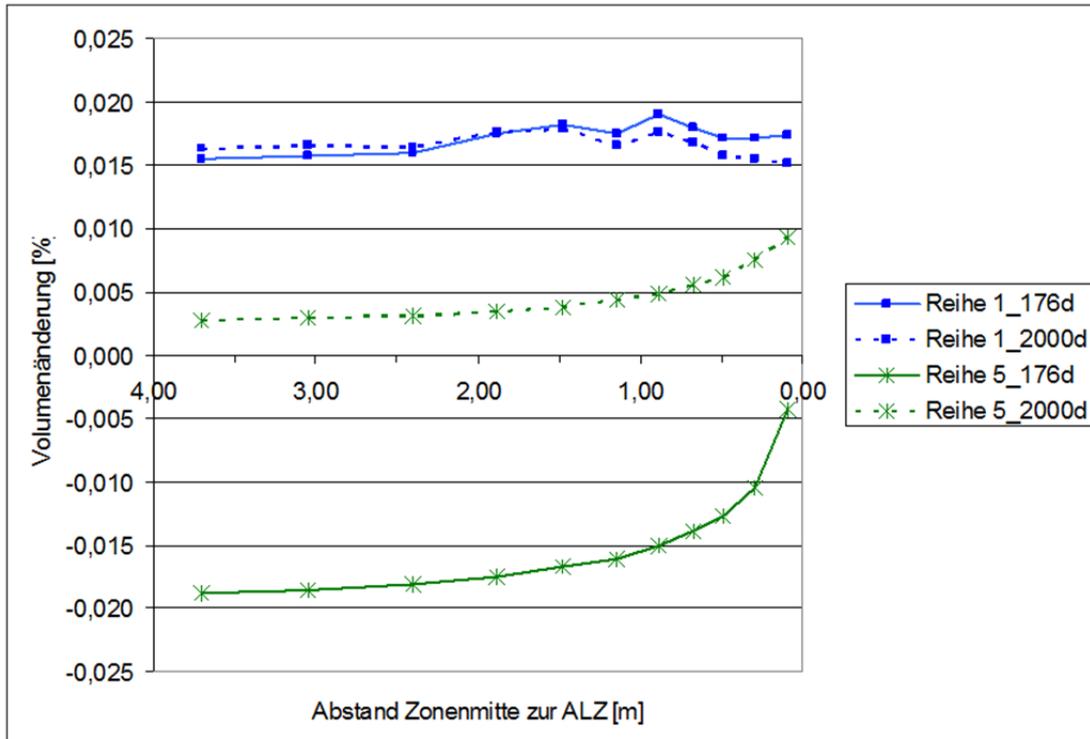
Um die Auflockerung auch nach einem längeren Zeitraum zu untersuchen, wurde die Berechnung bis zu einem Modellzeitpunkt von 2.000 Tagen fortgeführt. Um die Übersicht zu wahren, sind in den nächsten Abbildungen nur die Reihe 1 (höchster hydraulische

<sup>36</sup> Im Rahmen von weitergehender Modellierung mit realitätsnäherem Stoffmodell für Bentonit sollte auch eine Variation des Elastizitätsmoduls des Bentonits in die Betrachtungen einbezogen werden.

scher Druck) und die Reihe 5 (weitere Entwicklung) abgebildet, vgl. Abb. 5.33 und Abb. 5.34.



**Abb. 5.33** Porendruck [MPa] Reihe 1 und 5 bei  $t = 176$  d und  $t = 2.000$  d



**Abb. 5.34** Volumenänderung [%] Reihe 1 und 5 bei  $t = 176$  d und  $t = 2.000$  d

In der Reihe 1 ist der Porendruck auf etwa 4,65 MPa angestiegen. Das Volumen hat sich nicht mehr wesentlich geändert. In Reihe 5 ist der Porendruck von Null auf über 3,5 MPa angestiegen. Entsprechend vergrößert sich auch das Zonenvolumen, da dieser Bereich näher an der Sättigungsfront mit noch kompaktierbarem luftgefülltem binärem Gemisch liegt und damit geringer eingespannt ist. Es ist festzuhalten, dass trotz einer erheblichen Porendrucksteigerung in Reihe 1 keine maßgebliche Auflockerung mehr stattgefunden hat. Ein identisches Verhalten kann auch für die weiteren Reihen angenommen werden, da die oberste Reihe zum Filterelement hinsichtlich der lokalen Auflockerung die ungünstigste Reihe darstellt. Der Nachweis der Beschränkung der Auflockerung ist damit erbracht.

### 5.5.5 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für das 1. Dichtelement (Bentonit)

Wie einleitend aufgeführt, wurde im ersten Schritt geprüft, ob das vereinfachte rotationssymmetrische Berechnungsmodell die lokationsspezifischen Randbedingungen für die Fragestellung angemessen abbildet. Dies trifft zu. Im zweiten Schritt wurde festgestellt, dass die Schätzung der Ausdehnung der Auflockerungszone, die der Vorbemes-

sung zugrunde liegt ausreichend genau war. Auch können die Versuchsergebnisse des Großversuchs Schachtverschluss Salzdetfurth mit Hilfe des gewählten Berechnungsmodells, insbesondere des Stoffmodells für Bentonit, das vor dem Hintergrund einer noch handhabbaren Rechenzeit konservativ vereinfacht werden musste, akzeptabel abgebildet werden.

Anschließend wurde der Nachweis der Funktionsfähigkeit für das 1. Dichtelement aus Bentonit für die Aufsättigungsphase geführt, in der gleichzeitig der Lösungsdruck aufgebaut wird, was gezielt erfolgt. Da in der Aufsättigungsphase lokal die größten hydraulischen Gradienten und damit Strömungskräfte auftreten, ist sie auslegungsbestimmend.

Zur Bewertung der Funktionsfähigkeit werden das effektive Fluiddruckkriterium und zusätzlich für den Baukörper aus Bentonit das Auflockerungskriterium genutzt. Für die ALZ ist das effektive Fluiddruckkriterium mit Ausnahme eines räumlich begrenzten Übergangsbereiches von 1 m – 2 m eingehalten. Im Bereich des Bentonits ist seine Einhaltung nicht zwingend, jedoch ergibt seine Auswertung Auskunft darüber, in welchen Bereichen Porenwasserüberdrücke nicht ausgeschlossen sind, die in der Aufsättigungsphase unvermeidbar sind. Für Bereiche, in denen Porenwasserüberdrücke auftreten können, wird geprüft, ob sie hinreichend in Bereiche eingespannt sind, die nicht durch Porenwasserüberdrücke gefährdet sind. Weiterhin wird das empirische Auflockerungskriterium für den Baukörper aus Bentonit überprüft. Es ist eingehalten. In Verbindung mit den Ergebnissen des Großversuchs Schachtverschluss Salzdetfurth ist für das 1. Dichtelement aus Bentonit der ingenieurtechnische Nachweis der Funktionsfähigkeit nach derzeitigem Wissensstand geführt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Nachweis der Rissbeschränkung für die Auflockerungszone und der Nachweis Verformungsbeschränkung – hier der Auflockerungsbeschränkung – für das 1. Dichtelement aus Bentonit geführt wurde, vgl. Abb. 3.1.

Der Nachweis der Funktionsfähigkeit der Widerlager wurde bereits im Rahmen der Vorbemessung geführt. Auf den Nachweis der Filterstabilität wurde verzichtet, da er einerseits einer Planung im Tiefgang einer Ausführungsplanung bedarf, es andererseits klar ist, dass er geführt werden kann (siehe dazu Anhang E). Es ist ausreichend Platz vorhanden, um die Körnungen der Filterschichten fein abzustimmen.

Die Dauerhaftigkeit des Bentonits wird auf Grundlage von natürlichen Analoga als gegeben eingeschätzt.

Die Integrität des 1. Dichtelements aus Bentonit ist somit gegeben, so dass es seinen planmäßigen hydraulischen Widerstand aufweist.



## 6 Substruktur: 2. und 3. Dichtelement und Langzeitdichtung

Dieses Kapitel behandelt das 2. und 3. Dichtelement aus Salz- bzw. Sorelbeton einschließlich ihrer Widerlager sowie die Langzeitdichtung aus verdichtetem Salzgrus. Zielstellung der hier durchgeführten Analysen ist der Nachweis der Funktionsfähigkeit des 2. Dichtelementes aus Salzbeton und des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton (Rechenfall 3.1 gemäß Kapitel 3.4). Die Langzeitdichtung wird gesondert in den Rechenfällen 4.1, 4.2 und 4.3 (Kapitel 3.4) behandelt. Die für die Langzeitdichtung erzielten Ergebnisse dienen als Eingangsdaten für die Berechnungen zum Schachtverschluss als Ganzes.

Die numerischen Simulationen für die aufgeführten Rechenfälle werden mit dem Finite-Element-Programm CODE\_BRIGHT durchgeführt. Dieses ermöglicht für Steinsalz neben der Berücksichtigung von elastischem und Kriechverhalten die Modellierung von Dilatanz und Rekompaktion. Die Ansätze wurden im Rahmen des THERESA-Projekts entwickelt und kalibriert /WIE 10/, können aber noch nicht als Stand von W&T angesehen werden. Ebenso ist der Ansatz für Salzgrus, der Elastizität, Kriechen und Kriechkompaktion, Kornbruch und -verschiebung sowie, bei Anwesenheit von Lösung, Drucklösungseffekte berücksichtigt, noch Gegenstand aktueller Forschung.

### 6.1 Charakterisierung der Verschlusslokation

Die Dichtelemente und die Langzeitdichtung liegen im Teufenbereich zwischen 600 m und 933 m. In dem Bereich sind die bereits in Kapitel 4.1 aufgeführten stratigrafischen Einheiten aufgeschlossen.

Die Zuordnung von Kriechklassen erfolgt auf der Grundlage von retrospektiven Analysen bereits existierender Konvergenzmessungen im Vergleich mit Ergebnissen der numerischen Simulation, vgl. Kapitel 4.6.1.2. Das Kriechverhalten des Steinsalzes im Umfeld des Schachtes wird integral mit Kriechklasse 2<sup>37</sup> beschrieben.

---

<sup>37</sup> Die durch die parallele Bearbeitung verursachte Inkonsistenz zu Kapitel 4.6.1.2 ist für die Nachweisführung vernachlässigbar. Auf sie wird in der Ergebnisbewertung eingegangen.

Im Umfeld des 2. Dichteletes und der Langzeitdichtung befinden sich die Erkundungshorizonte EH-550, EH-650 und EH-720. Kalibrierungsergebnisse an den Erkundungshorizonten EH-550 und EH-650 werden für Variantenbetrachtungen der Langzeitdichtung herangezogen.

Für den Primärspannungszustand und die ungestörte Gebirgstemperatur gelten die in Kapitel 4.1 bereits aufgeführten Ansätze.

## **6.2 Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“**

Für die ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ werden die nachfolgend dargestellten Einwirkungen, Gefährdungsbilder und zu betrachtenden Grenzzustände identifiziert. Die den jeweiligen Grenzzustand beschreibenden Widerstände, die durch die Nachweiskriterien beschrieben werden, sind im Anschluss aufgeführt.

### **Betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen, Kriechen des Salzbetons und des Sorelbetons

### **Nicht betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Fluiddruck: Der Fluiddruck wird nicht direkt als Einwirkung behandelt, sondern wird im Rahmen der Bewertung als fiktiver Porendruck berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2).
- Strömungskräfte: Für das 2. und 3. Dichteletes erfolgt keine hydromechanisch gekoppelte Betrachtung; Strömungskräfte werden deshalb nicht erfasst.
- Massenkräfte: Die Einwirkung Erdbeben wird im Rahmen der vertieften Nachweissführung rechnerisch nicht behandelt, sondern wurde in der Vorbemessung diskutiert.
- Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge thermischer Expansion/Kontraktion: Die Berücksichtigung erfolgt im Rahmen der Betrachtung des Schachtverschlusses als Ganzes; eine weitere Detaillierung erfolgt nicht.

- Quellen und Schwinden: Autogenes Quellen und Schwinden der Betone sind den Bauzuständen zuzurechnen und werden deshalb nicht betrachtet. Lösungsinduziertes Quellen wird konservativ vernachlässigt.

### **Betrachtete Gefährdungsbilder**

Für die Substruktur werden die Gefährdungsbilder

- Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Kriechen des Salzbetons und des Sorelbetons, Lösungsdruck (indirekt),
- Rissbildung in der Kontaktzone infolge Festigkeitsüberschreitung infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Kriechen des Salzbetons und des Sorelbetons, Lösungsdruck (indirekt),
- Rissbildung im Baukörper infolge Festigkeitsüberschreitung infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Kriechen des Salzbetons und des Sorelbetons, Lösungsdruck (indirekt)

betrachtet. Der Einfluss von Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen wird durch die Modellbildung mit erfasst.

Für die Langzeitdichtung wird kein Gefährdungsbild abgeleitet. Die Langzeitdichtung wurde vorsorglich vorgesehen für den Fall, dass es zu einer Auspressung  $MgCl_2$ -reicher Salzlösungen und damit zu einer Korrosion des Salzbetondichtelementes kommen würde. Dieser Fall kommt im Referenzszenarium nicht vor /BUH 12b/.

### **Betrachtete Grenzzustände**

Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone, Kontaktzone und/oder im Baukörper

### **Nachweiskriterien**

Als ein Nachweiskriterium wird die Dilatanzbedingung herangezogen. Abweichend von der in Kapitel 4.2 beschriebenen Dilatanzbedingung (Gl. (4.3)) wird die Dilatanzgrenze nach Olivella genutzt. Das Auflockerungsverhalten von festem Steinsalz bei Spannungszuständen oberhalb der Dilatanzgrenze wird dabei mit Hilfe einer Fließfunktion

und Fließregel beschrieben, die im Rahmen des Projekts THERESA /WIE 09/, /WIE 10/ von Olivella entwickelt und kalibriert wurde. Es handelt sich um eine nicht-assozierte Form, d. h., Spannungsfunktion  $F$  und Fließregel  $G$  für intaktes Steinsalz sind unterschiedlich. Sie lauten

$$F = a_1 \cdot q - b \cdot p \quad \text{und} \quad G = a_1 \cdot q - \alpha \cdot b \cdot p \quad (6.1)$$

mit den Invarianten

$$p = \frac{1}{3} \cdot I_1 = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (6.2)$$

$$q = I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (6.3)$$

Die Parameter  $a_1$  und  $W_{d0}$  sind konstant,  $\alpha$  und  $b$  berechnen sich aus der deviatorischen Arbeit  $W_d$ .

$$b = a_3 + a_2 \cdot W_d^{0.25} - a_4 \langle W_d - W_{d0} \rangle^{0.25} \quad (6.4)$$

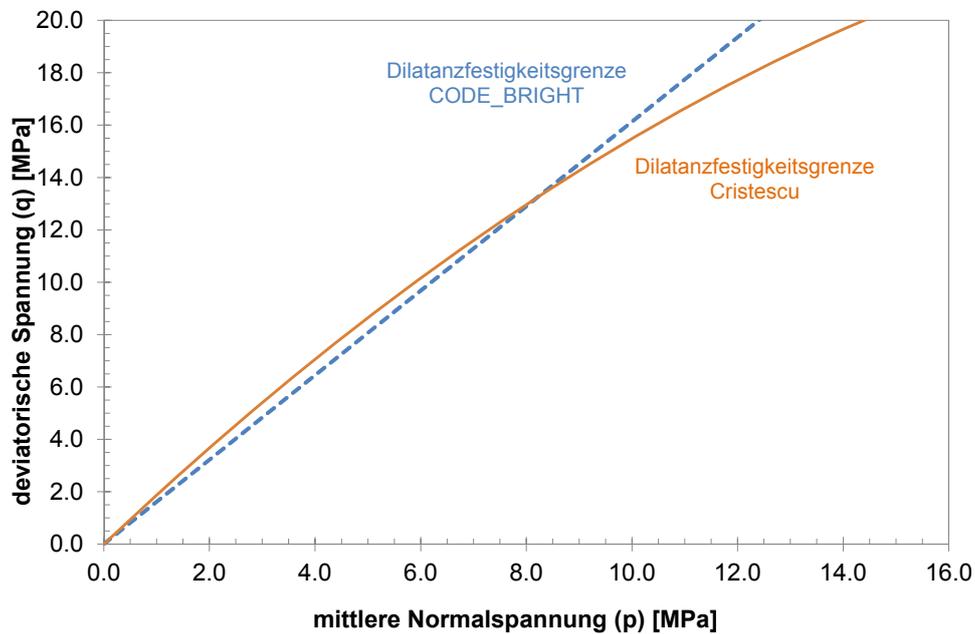
$$\alpha = a_5 + a_7 \cdot W_d + a_6 \cdot \langle W_d - W_{d0} \rangle^2 \quad (6.5)$$

$$dW_d = q \cdot d\varepsilon_d \quad (6.6)$$

Die spitzen Klammern bedeuten, dass der Klammerausdruck im Fall eines negativen Arguments auf null gesetzt wird.

Die Modellparameter für die Dilatanzgrenze wurden im Rahmen des THERESA-Projekts /WIE 09/, /WIE 10/ anhand von Laborversuchen kalibriert. Im Bereich von mittleren Normalspannungen zwischen 0 und ca. 10 MPa liegt sie sehr nahe bei der in Kapitel 4, Gl. (4.3), verwendeten Dilatanzbedingung von Cristescu (siehe Abb. 6.1). Allerdings wurde bereits im THERESA-Projekt festgestellt, dass bei der Modellierung einer In-situ-Konfiguration mit einer Strecke im Steinsalz die im Stoffmodell vorhandene Dehnungsverfestigung so stark eingeht, dass nahezu keine Dilatanz stattfinden

kann. Aus diesem Grund wurde der Verfestigungsterm hier (wie in der THERESA-Streckenmodellierung) deaktiviert.



**Abb. 6.1** Dilatanzbedingungen im Diagramm q (deviatorische Spannung) in Abhängigkeit von p (mittlere Normalspannung)

Weiterhin wird das Fluidruckkriterium analog zu Kapitel 4.2 für die Bewertung der Auflockerungszone herangezogen und dem fiktiven Porendruck gegenübergestellt.

$$\sigma_3 > p_{fl} \tag{6.7}$$

mit

- $\sigma_3$ : kleinste Hauptspannung
- $p_{fl}$ : Fluiddruck (fiktiver Porendruck)

Die Scherfestigkeit  $f_s$  der Kontaktzone zwischen dem Salzbeton und der Steinsalzkon- tur wird als Funktion der Normalspannung  $\sigma_n$  gegeben:

$$f_s = \tan \varphi \cdot \sigma_n + c \tag{6.8}$$

mit

- $\varphi$ : Winkel der inneren Reibung
- $\sigma_n$ : Normalspannung in der Kontaktfuge
- c: Kohäsion

Für die Scherfestigkeiten werden die Bemessungswerte angesetzt, die für den Fall Rissbeschränkung gelten. Für die Beschreibung des Festigkeitsverhaltens der Baukörper der Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton wird ein Ansatz nach Drucker-Prager gewählt /MÜL 12c/. Die Bruchhüllkurve wird durch die Fließbedingung wie folgt beschrieben:

$$f = \sqrt{I_2} + q_\varphi \cdot \frac{1}{3} I_1 - k_\varphi \quad (6.9)$$

mit

$$q_\varphi = \frac{\sqrt{3} \cdot (f_c - f_{ct})}{f_c + f_{ct}} \quad (6.10)$$

$$k_\varphi = \frac{2 \cdot f_c \cdot f_{ct}}{\sqrt{3} \cdot (f_c + f_{ct})} \quad (6.11)$$

Die Materialparameter  $q_\varphi$  und  $k_\varphi$  werden mit Hilfe der einaxialen Druckfestigkeit  $f_c$  und Zugfestigkeit  $f_{ct}$  ermittelt. Die Festigkeiten beruhen auf den Bemessungswerten für Rissbeschränkung.

### 6.3 Berechnungsmodelle

Für die in Kapitel 3.4 aufgelisteten Rechenfälle ist eine möglichst geringe Anzahl von Berechnungsmodellen zu nutzen. Da jedoch das 2. und 3. Dichtelement auf Grundlage einfacher Stoffmodelle – Kriechen des Salzgebirges und linear-elastisches Verhalten der Baukörper – abgebildet werden können, dies für die Langzeitdichtung aus verdichtetem Salzgrus aber nicht möglich ist, werden für die Berechnungen zwei unterschiedliche Berechnungsmodelle zugrunde gelegt, und zwar

1. ein rotationssymmetrisches Rechenmodell zur Modellierung der Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton,
2. ein Rechenmodell im ebenen Verzerrungszustand zur Modellierung der Langzeitdichtung.

Das rotationssymmetrische Modell muss in der Lage sein, das Aufkriechen des Salzgebirges auf die Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton in einer adäquaten Auflösung abdeckend abzubilden, so dass eine Bewertung der Transporteigenschaften der Auflo-

ckerungszone möglich ist. Mit Hilfe des Modells im ebenen Verzerrungszustand wurde der zeitliche Aufbau des Drucks auf die Schachtkontur infolge der zunehmenden Kompaktion der Langzeitdichtung bestimmt, der als Eingangsgröße für die Modellierung des „Schachtverschlusses als Ganzes“ dient, da die Langzeitdichtung in dem Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ in Bezug auf ihr Materialverhalten nicht aufgelöst wird.

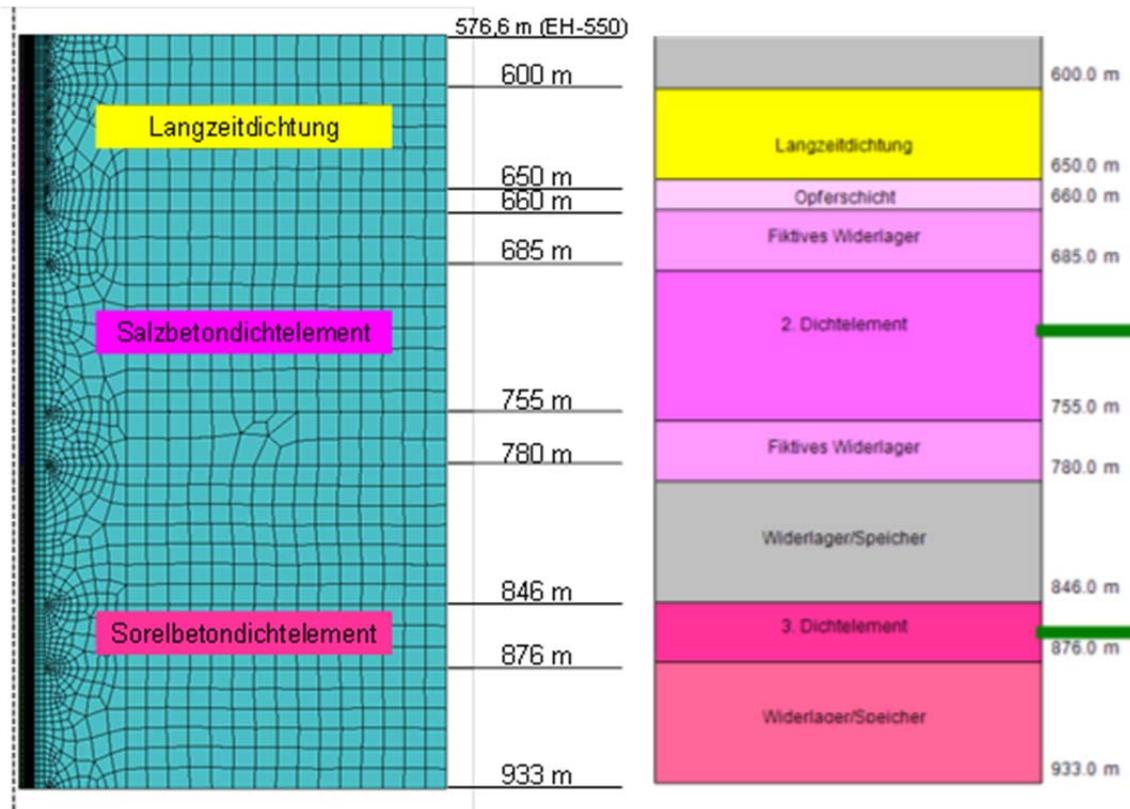
### 6.3.1 Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell

#### 6.3.1.1 Modellgebiet

Das Modellgebiet des rotationssymmetrischen Rechenmodells besitzt eine Gesamtlänge von 356 m und eine radiale Ausdehnung von 200 m, Abb. 6.2. Die Teufenlagen der im rotationssymmetrischen Modell erfassten Funktionselemente sind neben weiteren geometrischen Daten in Tab. 6.1 aufgeführt (s. a. Kapitel 2.2.1).

**Tab. 6.1** Funktionselemente des Schachtverschlusses im Modell

Funktionselement	Material	Radius/Nachschnitt	Teufe OK
Widerlager/Speicher	Basaltschotter	3,815 m / -	576,6 m (EH-550)
Langzeitdichtung	Salzgrus (feucht)	3,815 m / -	600 m
Opferschicht	Salzbeton	3,815 m / -	650 m
Fiktives Widerlager	Salzbeton	3,815 m / 4,415 m	660 m
2. Dichtelement	Salzbeton	3,815 m / 4,415 m	685 m
Fiktives Widerlager	Salzbeton	3,815 m / 4,415 m	755 m
Widerlager/Speicher	Basaltschotter	3,815 m / -	780 m
3. Dichtelement	Sorelbeton	3,815 m / 4,415 m	846 m
Widerlager	Sorelbeton	3,815 m / -	876 m



**Abb. 6.2** Berechnungsmodell mit Funktionselementen des Schachtverschlusses

### 6.3.1.2 Diskretisierung

Die Diskretisierung des rotationssymmetrischen Modells erfolgt durch 9.362 Elemente mit 9.483 Knoten. Im Bereich der Schachtkontur ist eine sehr feine Modelldiskretisierung mit Knotenabständen von  $d_r = 0,1$  m und  $d_z = 0,5$  m vorgenommen worden, die mit zunehmenden Abstand zur Schachtachse zunimmt (Knotenabstände am Modellrand  $d_r = d_z = 10$  m). Der Nachschnitt der Schachtkontur wird im Modell im Bereich der Beton-Baustoffe einheitlich mit  $\Delta r = 0,6$  m berücksichtigt. Unterschiedliche Nachschnitttiefen der Salz- und Sorelbetondichtung werden nicht erfasst.

### 6.3.1.3 Anfangs- und Randbedingungen

Das Modell ist an den seitlichen Rändern in Normalenrichtung unverschieblich gelagert, in tangentialer Richtung frei verschieblich. Der obere Rand ist als freier Rand modelliert. Der untere Rand ist in vertikaler Richtung unverschieblich.

## Gebirgsspannung

Der primäre Spannungszustand wird an der oberen Modellgrenze, dem Erkundungshorizont EH-550 (Teufenlage bei 576,6 m), analog dem lithostatischen Druck mit  $\sigma_{\text{iso}} \approx 12,7 \text{ MPa}$  angesetzt. Am unteren Modellrand in einer Teufe von 933 m wird der Primärspannungszustand entsprechend der Auflast mit  $\sigma_{\text{iso}} \approx 20,5 \text{ MPa}$  angenommen.

## Temperatur

Von dem Erkundungshorizont EH-550 wird mit zunehmender Teufe ein Temperaturgradient von 1,5385 K/100 m angesetzt. Damit ergibt sich ein im Modell ein Temperaturbereich von  $T_{\text{OK(EH550)}} = 303,4 \text{ K}$  bis  $T_{\text{UK(933m)}} = 308,9 \text{ K}$ .

### 6.3.1.4 Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf

Im rotationssymmetrischen Modell wird mit dem Beginn des Einlagerungsbetriebs am 01.01.2035 der Schachtausbruch instantan durch sukzessive Reduzierung der Radialspannung an der Kontur auf Atmosphärendruckniveau simuliert. Zwar existieren die Schächte tatsächlich schon, allerdings laufen die wesentlichen Spannungsumlagerungen und Schädigungsprozesse innerhalb kurzer Zeit nach dem Schachtausbruch ab. Danach herrschen im Schacht stationäre Verhältnisse und der Schachtstoß wird kontinuierlich beraubt, so dass die Auflockerungszone praktisch unverändert bleibt. Deshalb wird die gegenüber der Realität verkürzte Standzeit als nicht relevant für die weitere Modellierung angesehen. Entsprechend der vorgegebenen zeitlichen Rahmenbedingungen für den Einlagerungsbetrieb in Tab. 2.2 variiert die Standzeit der offenen Schachtkontur teufenbezogen (Fertigstellung 3. Dichtelement aus Sorelbeton am 25.03.2079, Fertigstellung 2. Dichtelement aus Salzbeton am 08.09.2081). Drei Monate vor Einbringung der jeweiligen Verschlusselemente wird im Modell der Nachschnitt der Schachtkontur im Bereich der Beton-Baustoffe simuliert.

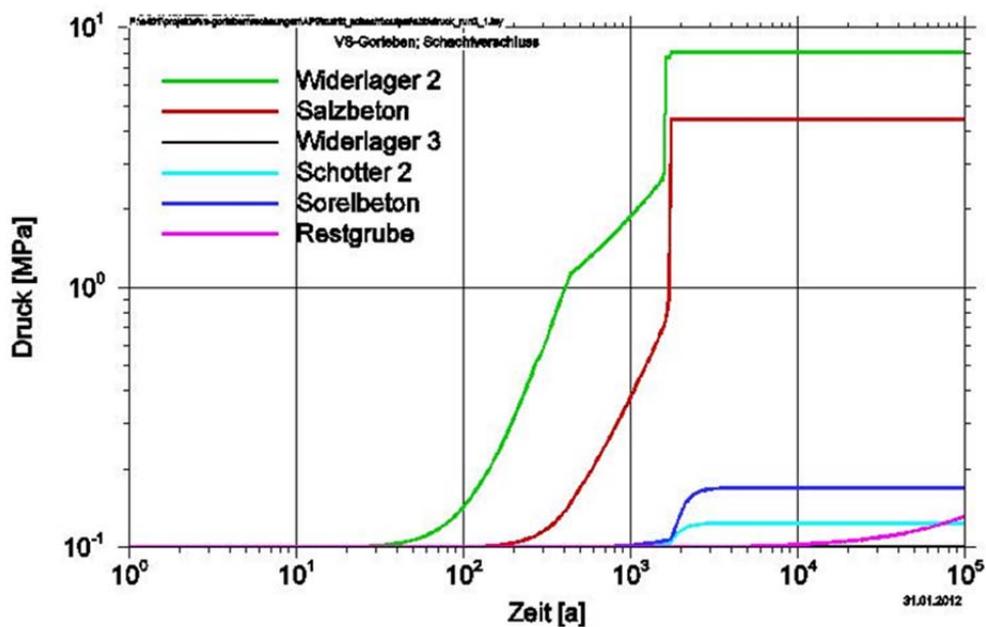
Für das 2. und 3. Dichtelement aus Salz- und Sorelbeton wird entsprechend der Vorbemessung /MÜL 12a/ nachstehend aufgeführter Zeitverlauf des Lösungsdruckaufbaus angenommen. Er wird im Berechnungsablauf nicht abgebildet, aber bei Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt, indem ein zeitlicher Bezug zu den berechneten Spannungen hergestellt wird, denen der Lösungsdruck in seiner jeweiligen Größe gegenübergestellt wird (siehe Kapitel 6.5).

## Lösungsdruck (Fluiddruck)

Von der GRS sind Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS hinsichtlich der Durchströmung des Schachtverschlusses durchgeführt worden /BUH 12b/. Dabei wurden die folgenden Maximaldrücke im Bereich der Funktionselemente erhalten:

- Langzeitdichtung: 7,25 (7,65) MPa nach 1.600 (1.740) Jahren
- Salzbetondichtung: 4,40 MPa nach 1.740 Jahren
- Sorelbetondichtung: 0,17 MPa nach > 4.000 Jahren

Abb. 6.3 zeigt als Ergebnis der numerischen Simulation die Lösungsdruckentwicklung an den Funktionselementen im Bereich der Dichtelemente.



**Abb. 6.3** Lösungsdruckentwicklung an den Funktionselementen

Berechnungsergebnisse der GRS hinsichtlich der Durchströmung des Schachtverschlusses /BUH 12b/.

## 6.3.2 Berechnungsmodell im ebenen Verzerrungszustand (Langzeitdichtung)

### 6.3.2.1 Modellgebiet und Diskretisierung

Das Berechnungsmodell im ebenem Verzerrungszustand (Ausschnitt siehe Abb. 6.15) stellt einen Radialschnitt durch das Schachtverschlussystem dar und wird unter Ausnutzung vorhandener Symmetrieeigenschaften durch ein Viertelkreismodell abgebildet. Der Langzeitdichtung wird dabei ein Radius von  $r_0 = 3,815$  m zugewiesen.

Die Diskretisierung des Modells erfolgt durch 3.440 Elemente mit 2.669 Knoten. Im Bereich der Langzeitdichtung und der Auflockerungszone wurde eine sehr feine Modelldiskretisierung mit Knotenabständen von  $d_r = 0,10$  m und  $d_\phi = 0,15$  m vorgenommen.

### 6.3.2.2 Anfangs- und Randbedingungen

Das Modell ist an den seitlichen Rändern in Normalenrichtung unverschieblich gelagert, in tangentialer Richtung frei verschieblich. Eine Verschiebung der Hohlraumkontur in Normalenrichtung (Konvergenz) ist möglich. Der äußere Rand ist als freier Rand modelliert. Es wird eine Spannungsrandbedingung angesetzt, die den jeweiligen Überlagerungsdrücken der Erkundungshorizonte EH-550 (Teufenlage bei 576,6 m) bzw. EH-650 (Teufenlage bei 676,6 m) entspricht.

### Gebirgsspannung

Es wird ein isotroper Primärspannungszustand angesetzt. Es wurden hierzu Zahlenwerte ausgewählt, die den Erkundungshorizonten EH-550 (Teufenlage bei 576,6 m mit  $\sigma_{\text{iso}} \approx 12,7$  MPa) bzw. EH-650 (Teufenlage bei 676,6 m mit  $\sigma_{\text{iso}} \approx 14,9$  MPa) zugewiesen werden können.

### Temperatur

Auf dem Niveau der Erkundungshorizonte EH-550 bzw. EH-650 wird im Modell eine konstante Gebirgstemperatur von  $T_{\text{EH550}} = 303,4$  K bzw.  $T_{\text{EH650}} = 305,0$  K angenommen.

### 6.3.2.3 Belastungsgeschichte/ Berechnungsablauf

Im ebenen Modell erfolgt der zeitliche Ablauf der Modellierung analog zur Simulation des Schachtausbruchs durch sukzessive Reduzierung der Radialspannung an der Kontur auf Atmosphärendruckniveau. Im Anschluss wird die Standzeit der offenen Schachtkontur entsprechend den vorgegebenen zeitlichen Rahmenbedingungen für den Einlagerungsbetrieb in Tab. 2.2 simuliert, bevor der Einbau der Langzeitdichtung instantan am 01.11.2082 erfolgt. Im Bereich der Langzeitdichtung aus angefeuchtetem Salzgrus findet kein Konturnachschnitt statt.

## 6.4 Stoffgesetze und Materialparameter

Die verwendeten Stoffmodellansätze und Materialparameter für Steinsalz und Salzgrus werden im Rahmen der Arbeiten zur Salzgruspezifikation /WIE 12/ im Anhang „Physikalische Modellierung von Salzgrus im PLC CODE\_BRIGTH“ ausführlich beschrieben; auf eine explizite Darstellung der verwendeten physikalischen Zusammenhänge wird an dieser Stelle verzichtet. Die verwendeten Ansätze zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Steinsalz und der Salzgruskompaktion werden lediglich kurz erläutert. Sie integrieren verschiedene Teile, die durch vier additive Terme beschrieben werden:

- (1) Elastischer Ansatz (Salzgrus mit porositätsabhängiger Materialsteifigkeit),
- (2) Visko-plastischer Ansatz, bei Salzgrus zur Beschreibung der Kornverschiebung und der Kornzertrümmerung, bei Steinsalz zur Beschreibung der Auflockerung/Rekompaktion (transiente Deformationsprozesse),
- (3) Viskoser Ansatz zur Beschreibung stationärer Deformationsprozesse (Dislokationskriechen),
- (4) Ansatz zur Berücksichtigung von Drucklösungs-/Ausfällungsprozessen bei Feuchtigkeitszugabe (sogenanntes „Feuchtekriechen“).

Das Stoffmodell für Steinsalz enthält die Terme (1) – (3), die Salzgruskompaktion wird durch alle vier Terme beschrieben, wobei alle Terme porositätsabhängig formuliert sind. Die im Rahmen der modelltheoretischen Untersuchungen verwendeten Materialparameter für Steinsalz und Salzgrus sind in Tab. 6.2 angegeben.

Für die physikalische Modellierung der weiteren Verschlussmaterialien wird vereinfacht ein elastischer Stoffmodellansatz nach *HOOKE* angewendet. Das Kriechverhalten des Salzbetons und des Sorelbetons ist dabei durch die Anwendung des effektiven Kom-

pressionsmoduls  $K_e$  erfasst. Als Eingabeparameter werden die ermittelten Bemessungswerte nach /MÜL 12c/ angesetzt und bei den Nachweisen zur Rissbeschränkung im Baukörper und in der Kontaktzone verwendet, siehe Tab. 6.3.

**Tab. 6.2** CODE\_BRIGTH-Parameter für Steinsalz und Salzgrus nach /WIE 12/

Elastizität		Formel <sup>38</sup>	Steinsalz	Salzgrus
E	[MPa]	-	10 000	
E <sub>0</sub>	[MPa]	(2)		1,0
dE/dη	[MPa]	(2)		-4 500
η <sub>0</sub>	[-]	(2)		0,35
ν	[-]	-	0,18	0,27
<b>Versetzungskriechen</b>				
n	[-]	(3, 5, 9, 10)	5,0	5,0
A <sub>A</sub>	[s <sup>-1</sup> MPa <sup>-n</sup> ]	(8)	2,08E-6 <sup>39</sup>	2,08E-06
Q <sub>A</sub>	[J mol <sup>-1</sup> ]	(8)	54 000	54 000
<b>Viskoplastizität</b>				
δ	[-]	(13)		10,0
p <sub>0</sub>	[MPa]	(13)		0,1
Γ <sub>0</sub>	[s <sup>-1</sup> ]	(14)	5,00E-09	7,00E-04
Q	[J mol <sup>-1</sup> ]	(14)	54 000	54 000
D	[MPa]	(15)		1,00E+05
l	[-]	(15)		4,0
m	[-]	(12, 16)	8,0	3,0
a <sub>1</sub>	[-]	(16)	2,5	
a <sub>2</sub>	[-]	(17)	1,8	
a <sub>3</sub>	[-]	(17)	2,5	
a <sub>4</sub>	[-]	(17)	0,7	
a <sub>5</sub>	[-]	(18)	0,04	
a <sub>6</sub>	[-]	(18)	0,02	
a <sub>7</sub>	[-]	(18)	0,02	
W <sub>d0</sub>	[-]	(17, 18)	3,5	
<b>FADT</b>				
d <sub>0</sub>	[m]	(21, 22)		1,50E-04
A <sub>B</sub>	[s <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> m <sup>3</sup> ]	(23)		1,00E-14
Q <sub>B</sub>	[J mol <sup>-1</sup> ]	(23)		24 530
<b>Permeabilität</b>				
k <sub>0</sub>	[m <sup>2</sup> ]	(28)		1,00E-11
η <sub>0</sub>	[-]	(28)		0,3
k <sub>matrix</sub>	[m <sup>2</sup> ]	(29)	5,00E-20	
b <sub>0</sub>	[m]	(29)	1,00E-08	
s	[m]	(29)	2,00E-04	

<sup>38</sup> Die angegebene Nummerierung beziehen sich auf die Formelbeschreibung in /WIE 12/.

<sup>39</sup> Wert für Kriechklasse 5. Es wurden Berechnungen mit anderen Kriechklassen durchgeführt, bei denen A<sub>A</sub> entsprechend modifiziert wurde.

**Tab. 6.3** CODE-BRIGHT Parameter für Salz- und Sorelbeton nach /MÜL 12c/

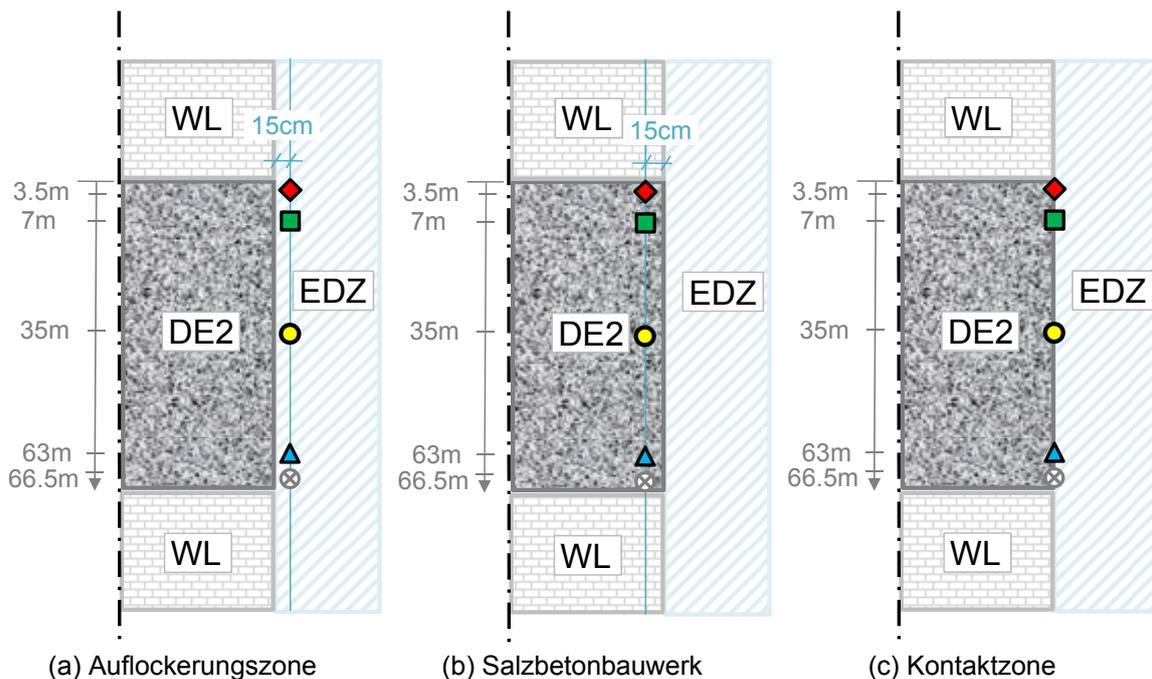
Elastizität		Formel	Salzbeton	Sorelbeton
$K_e$	[MPa]	-	900	1 100
$\nu$	[-]	-	0,13	0,24
Festigkeitsverhalten				
$f_c$	[MPa]	(6.9), (6.10), (6.11)	25,0*	34,5
$f_{ct}$	[MPa]	(6.9), (6.10), (6.11)	0,97*	2,83
Kontaktfestigkeiten				
$c$	[MPa]	(5.11)	1,3	1,7
$\tan \varphi$	[-]	(6.8)	0,642	0,485

\* Der Teilsicherheitsbeiwert von 1,25 (Betontragverhalten) /DAF 04/ für Rissbeschränkung für den Baukörper aus Salzbeton ist in den Zahlenwerten noch nicht erfasst. Er wird nachträglich berücksichtigt.

## 6.5 Berechnungsergebnisse für das 2. und 3. Dichtelement

### 6.5.1 Auswertelokationen

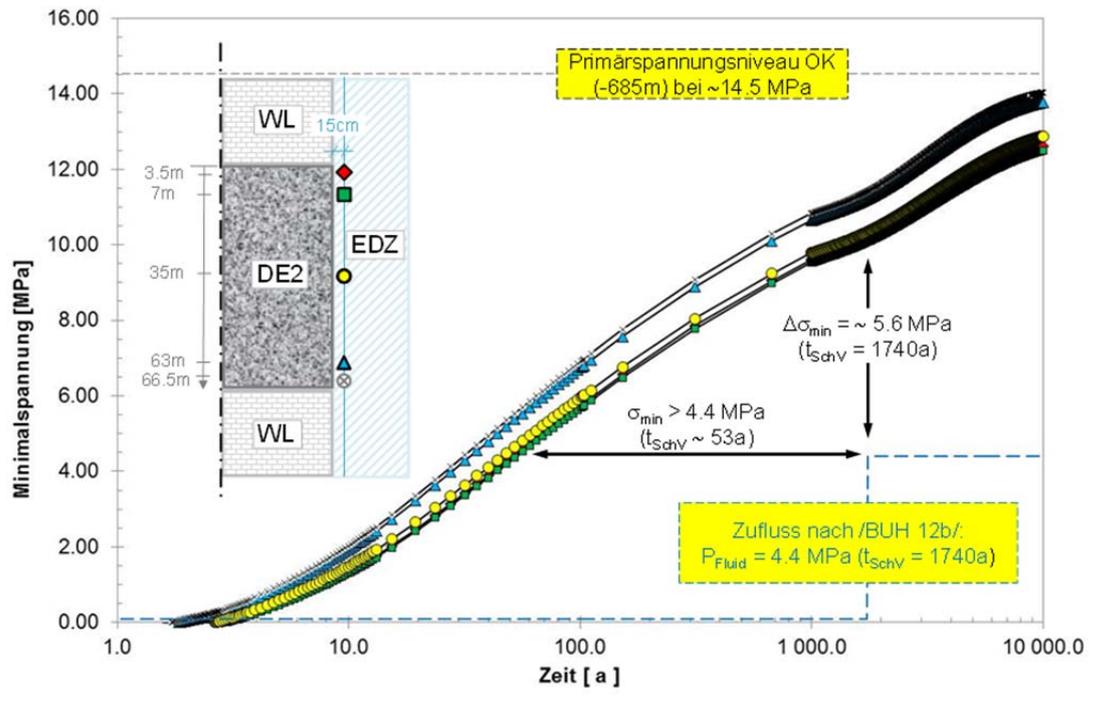
Die gewählten Auswertelokationen für die berechneten Zustandsgrößen liegen entlang des Dichtelementes entweder innerhalb der Auflockerungszone oder innerhalb des Baukörpers jeweils mit einem Abstand zur Kontur von ca. 0,15 m. Für die Nachweisführung der Rissbeschränkung in der Kontaktzone werden die Auswertepunkte in die Kontaktbereich zwischen Baukörper und Gebirgskontur gelegt. Die Positionen der Auswertepunkte sind in Abb. 6.4 exemplarisch am Beispiel des 2. Dichtelements skizziert und farblich unterschiedlich markiert. Die Farbkennzeichnung der Auswertepunkte wird für die Darstellungen der Zustandsgrößen an den Auswertepunkten beibehalten.



**Abb. 6.4** Positionen der Auswertepunkte am Beispiel des 2. Dichtelements (a) für die ALZ, (b) im Bauwerk und (c) in der Kontaktzone

### 6.5.2 Berechnungsergebnisse zum 2. Dichtelement (Salzbeton)

Die Berechnungen mit Ansatz einer Kriechfähigkeit des Salinargebirges mit Kriechklasse 2 zeigen für die gewählten Auswertepunkte entlang des 2. Dichtelements bei 688,5 m, 692 m, 721 m, 748 m und 751,5 m Teufe in Abb. 6.5 die berechnete zeitliche Entwicklung der Minimalspannung ( $\sigma_3$  gemäß Gl. (6.7)) in der Auflockerungszone (ALZ) mit einem Abstand zur Kontur von ca. 0,15 m. Zusätzlich wird der von /BUH 12b/ berechnete Fluiddruck mit dargestellt, vgl. Kapitel 6.3.1.4. In der Berechnung aus /BUH 12b/ wurde der Druckaufbau unter Annahme einer konstanten (Anfangs-) Porosität und Permeabilität der über dem zweiten Dichtelement eingebauten Komponenten, insbesondere der Langzeitdichtung, ermittelt. Tatsächlich wird sich auf Grund der Schachtkonvergenz die Porosität und Permeabilität der Langzeitdichtung mit der Zeit verringern, so dass der Druckaufbau am zweiten Dichtelement eher verzögert wird.



**Abb. 6.5** Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im Bereich des 2. Dichtelements aus Salzbeton

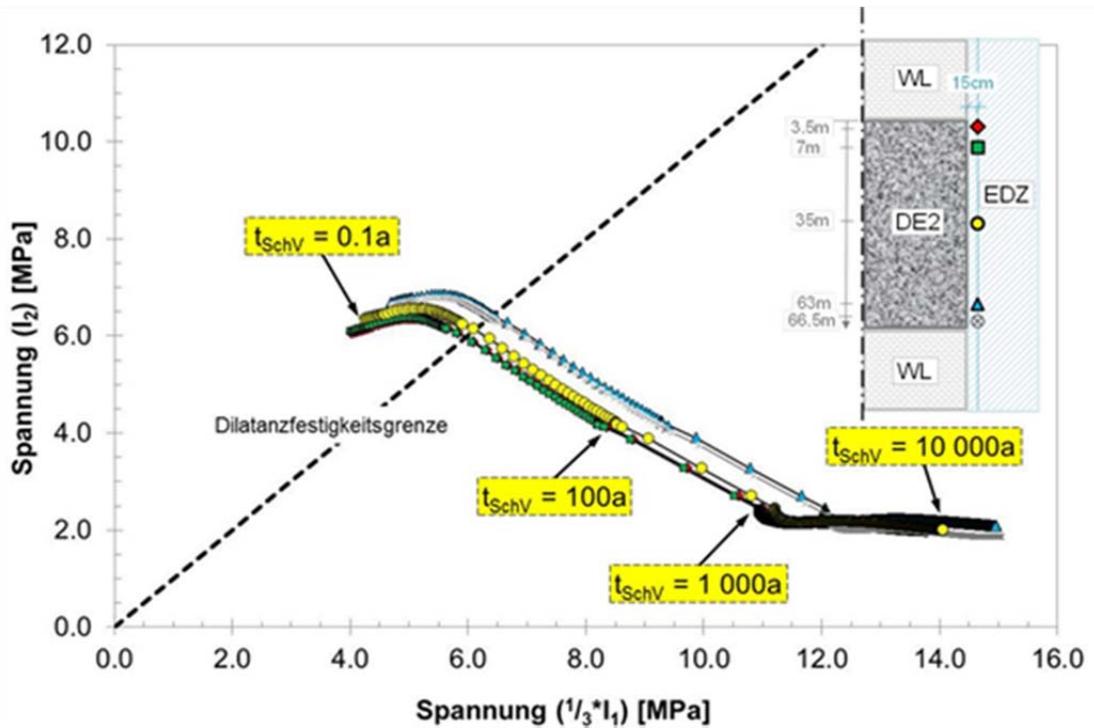
Die Ergebnisse der numerischen Simulation zeigen für die zeitliche Entwicklung der Minimalspannung im Bereich der Auflockerungszone zum Zeitpunkt des errechneten Lösungsdruckanstiegs auf  $P_{\text{Fluid}} = 4,4 \text{ MPa}$  Werte im Bereich von  $\sigma_{\text{min}} = 10 \text{ MPa}$ . Ein dem Lösungsdruck entsprechender Wert von  $\sigma_{\text{min}} = 4.4 \text{ MPa}$  wird bereits 53 Jahre nach Fertigstellung des Schachtverschlusssystems erreicht. Dieses Ergebnis wird für den ingenieurtechnischen Nachweis herangezogen. Das Fluidruckkriterium ist erfüllt, da der fiktive Porendruck die kleinste Hauptspannung unterschreitet und stark aufgelockerte Bereiche durch Konturschnitt entfernt wurden.

Der Anstieg der Minimalspannung und der damit verbundene Rückgang der deviatorischen Beanspruchung (Unterschreitung der Dilatanzgrenze) führen zu einer Rekompaktion der Auflockerungszone, die sich infolge des berechneten sekundären Spannungszustandes gebildet hatte. Abb. 6.6 zeigt hierzu die zuerst ansteigende Gebirgsbeanspruchung und später die mit der Zeit wieder einsetzende Reduzierung der Gebirgsbeanspruchung im Vergleich mit der verwendeten Dilatanzgrenze des Gesteins. Für die Darstellung werden die Invarianten

$$p = \frac{1}{3} \cdot I_1 = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (6.12)$$

$$q = I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (6.13)$$

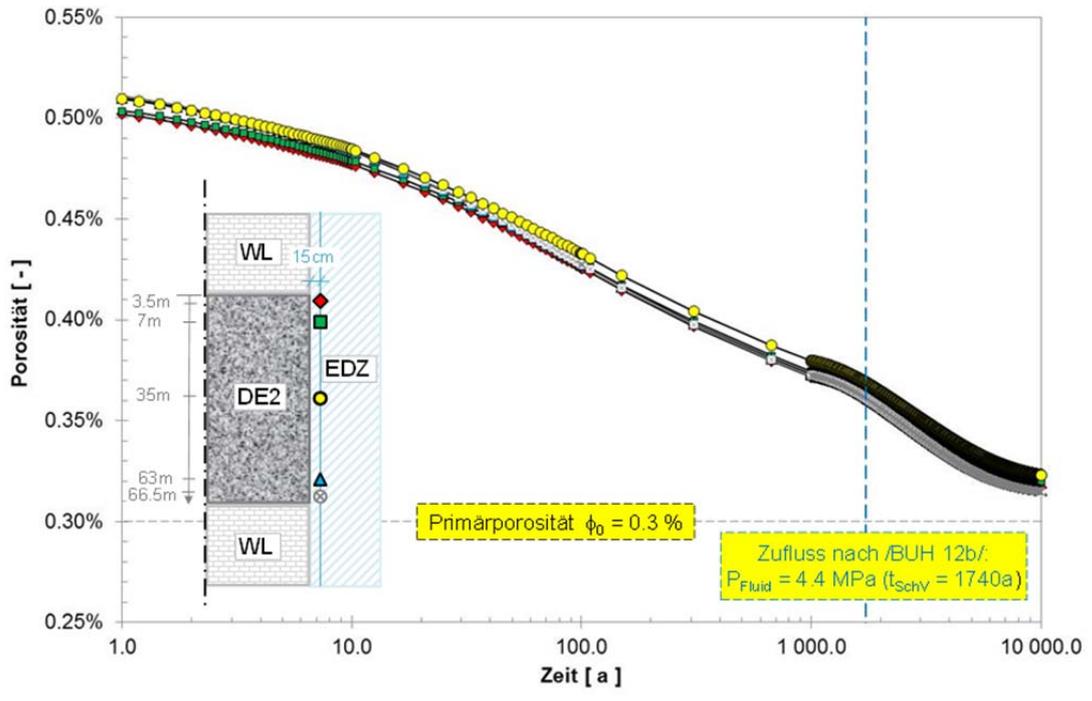
verwendet.



**Abb. 6.6** Rückgang der deviatorischen Beanspruchung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 2. Dichtelements mit Darstellung der Dilatanzgrenze in der Invariantendarstellung

In Abb. 6.6 werden erwartungsgemäß anfänglich in der Kontur Spannungsbereiche ausgewiesen, in denen die Dilatanzbedingung verletzt ist. Trotz des erfolgten Konturschnitts sind somit noch Gebirgsbereiche vorhanden, die gegenüber der primären Gesteinsporosität erhöhte Werte aufweisen bzw. woraus noch eine weitergehende Schädigung (Ausweitung der ALZ) resultieren könnte. Der verwendete Stoffmodellansatz beschreibt die Ausbildung einer Auflockerungszone an der Schachtkontur mittels Erhöhung der Porosität. Abb. 6.7 zeigt hierzu die zeitliche Entwicklung der Porosität in der Auflockerungszone im Bereich des 2. Dichtelements. Aus der Darstellung wird deutlich, dass zum Zeitpunkt des berechneten Fluidruckaufbaus 1.740 Jahren nach Fertigstellung des Schachtverschlusssystems die angesetzte primäre Gesteinsporosität von  $\phi_0 = 0,3\%$ , die aus den THERESA-Experimenten /WIE 10/ übernommen wurde, zwar rechnerisch noch nicht wieder erreicht wurde, in dem Bereich der gewählten Auswerte-

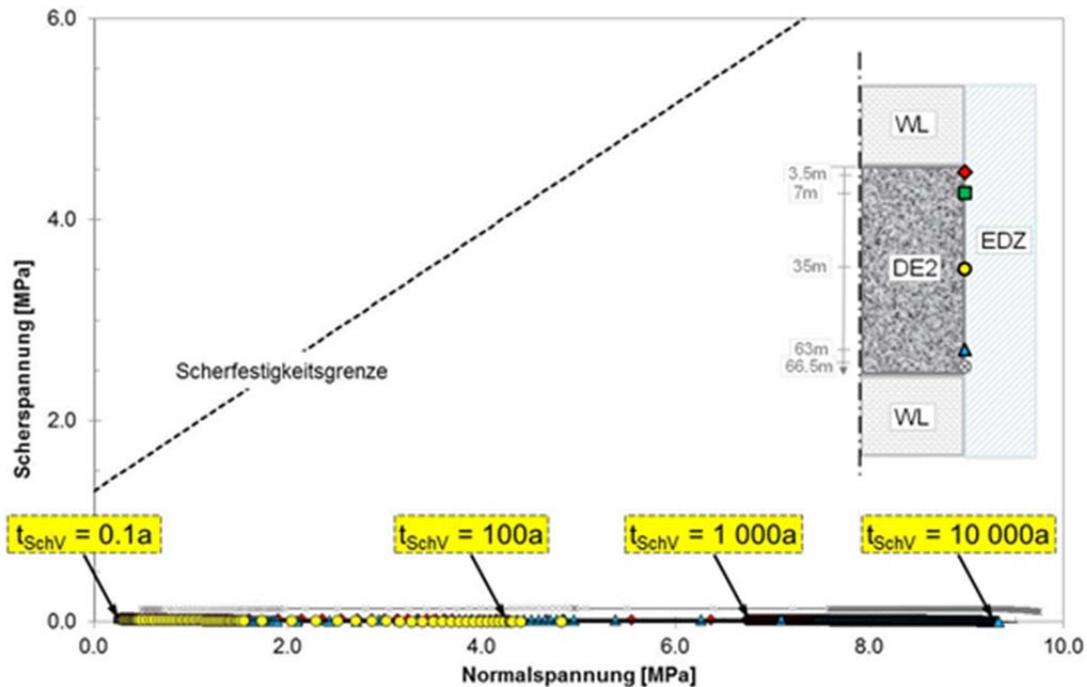
punkte an der Kontur mit einem maximalen Wert von  $\Delta\phi \approx 0,07\%$  die Auflockerungszone jedoch schon weitgehend rückgebildet wurde.



**Abb. 6.7** Berechnete Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 2. Dichtelements

Die Permeabilität  $k$  wird in CODE\_BRIGTH porositätsabhängig angegeben. Die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung von geschädigtem Steinsalz ist noch Stand der Forschung, siehe Anhang C. Deshalb wurde auf eine Bewertung des hydraulischen Widerstandes der ALZ auf dieser Basis verzichtet und nur das Fludruckkriterium zur Bewertung herangezogen, vgl. Abb. 6.5.

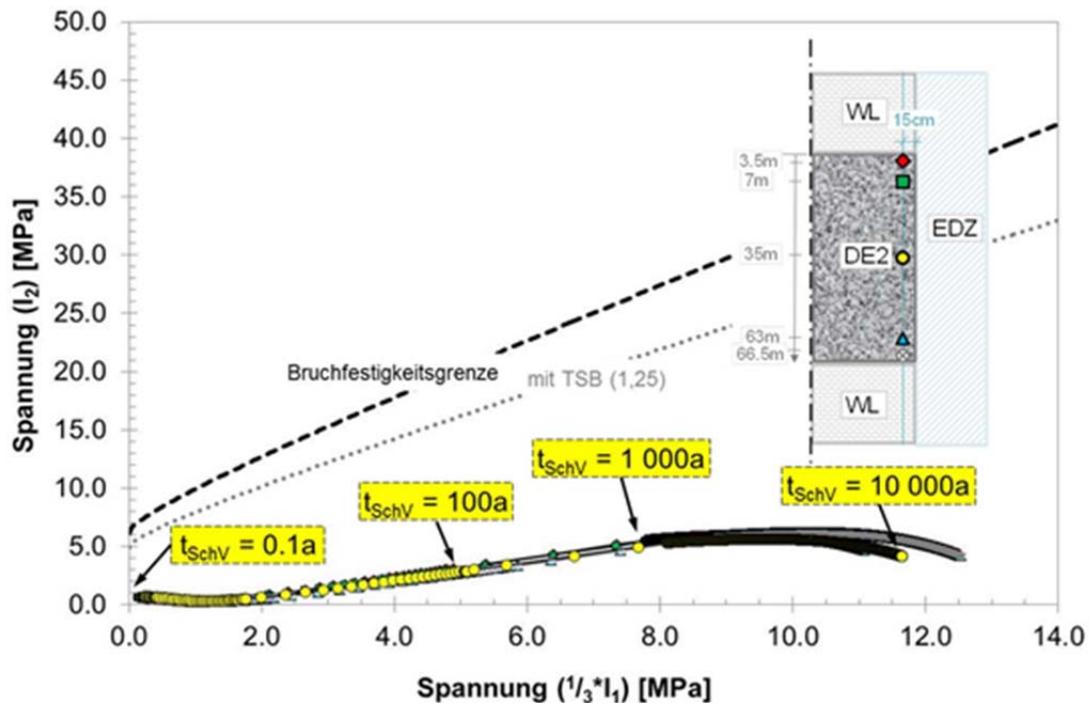
In Abb. 6.8 wird als Ergebnis der numerischen Simulation die Scherbeanspruchung in der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge gezeigt.



**Abb. 6.8** Zulässige Schubspannung in der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen

Im Modell werden nur marginale Schubspannungen in vernachlässigbarer Größenordnung ausgewiesen (Abb. 6.8). Sie liegen unterhalb des Wertes für die Kohäsion, eine durch den Porendruck bedingte Reduktion der Normalspannung auf ihren effektiven Wert ist deshalb nicht von Bedeutung. Die Nachweise der Rissbeschränkung werden damit erfüllt. Durch den strukturellen Aufbau des Schachtverschlussbauwerkes mit den beidseitig angebrachten Widerlagern werden Schubspannungen in der Kontaktzone zwischen Bauwerkskörper und Konturzone planerisch minimiert.

Abb. 6.9 zeigt abschließend die für den Salzbetonbaukörper ausgewiesene Beanspruchung in den gewählten Auswertepunkten innerhalb des 2. Dichtelementes mit einem Abstand zur Kontur von ca. 0,15 m im Vergleich mit den zugewiesenen Bemessungswerten der Bruchfestigkeit in der Invariantendarstellung.



**Abb. 6.9** Festigkeitsverhalten Salzbeton (Bemessungswerte bzw. mit Berücksichtigung eines zusätzlichen TSB von 1,25 für die Rissbeschränkung) im Vergleich mit Rechenergebnissen

Die numerischen Untersuchungen haben ergeben, dass die für das Salzbetonbauwerk ausgewiesene Beanspruchung weit unterhalb der Bemessungswerte der Bruchfestigkeit (zusätzlicher Teilsicherheitsbeiwert von 1,25 für Rissbeschränkung) liegt. Die Nachweise der Rissbeschränkung werden damit auch hier erfüllt.

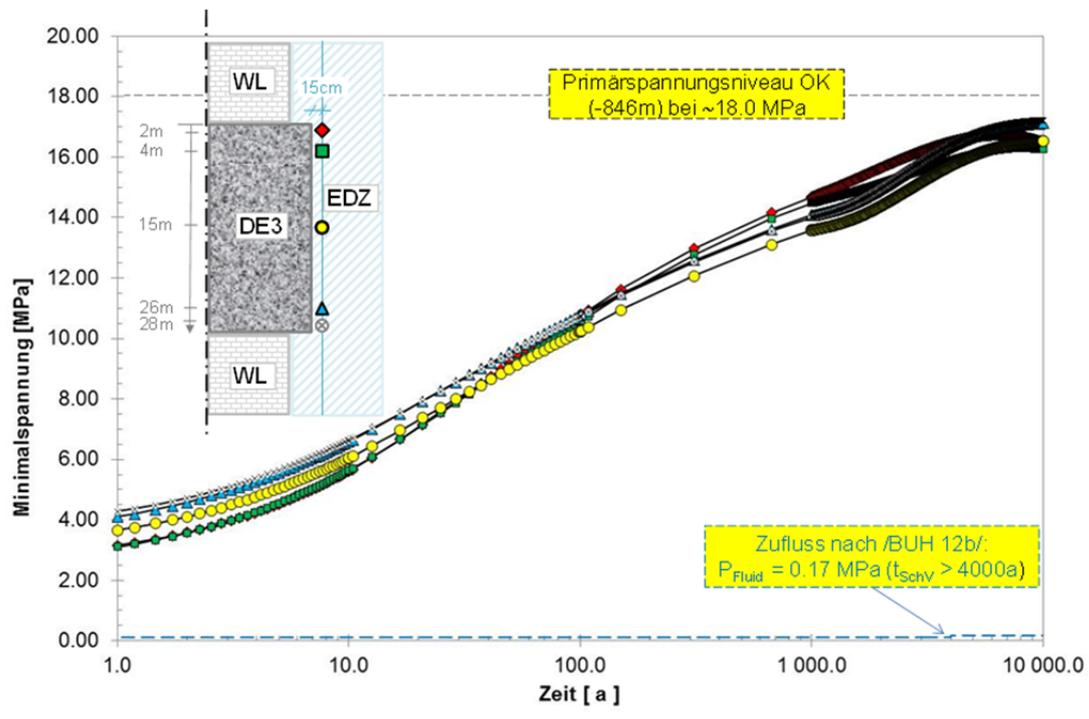
### 6.5.3 Berechnungsergebnisse zum 3. Dichtelement (Sorelbeton)

Die Vorgehensweise erfolgt analog zum 2. Dichtelement.

Die Berechnungen mit Ansatz einer Kriechfähigkeit des Salinargebirges mit Kriechklasse 2 zeigen in Abb. 6.10 für die gewählten Auswertepunkte entlang des 3. Dichtelements bei 848 m, 850 m, 861 m, 872 m und 874 m Teufe die berechnete zeitliche Entwicklung der Minimalspannung in der Auflockerungszone mit einem Abstand zur Kontur von ca. 0,15 m. Zusätzlich wird auf den von /BUH 12b/ berechneten Lösungszufluss nach ca. 4.000 Jahren hingewiesen, der wegen der bereits genannten vereinfachten Bedingungen dieser Rechnung den frühesten Zeitpunkt für den Fluidruckaufbau darstellt (vgl. Abb. 6.3). Der zu diesem Zeitpunkt anstehende Lösungsdruck von

$P_{\text{Fluid}} = 0,17 \text{ MPa}$  kann aufgrund seiner geringen Größe bei der weiteren Simulation vernachlässigt werden.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation zeigen im Bereich des 3. Dichtelements zum Zeitpunkt des errechneten Fluidruckanstiegs im 2. Dichtelement nach 1740 Jahren bereits Werte von  $\sigma_{\text{min}} = 14 \text{ MPa}$ , vgl. Abb. 6.10.

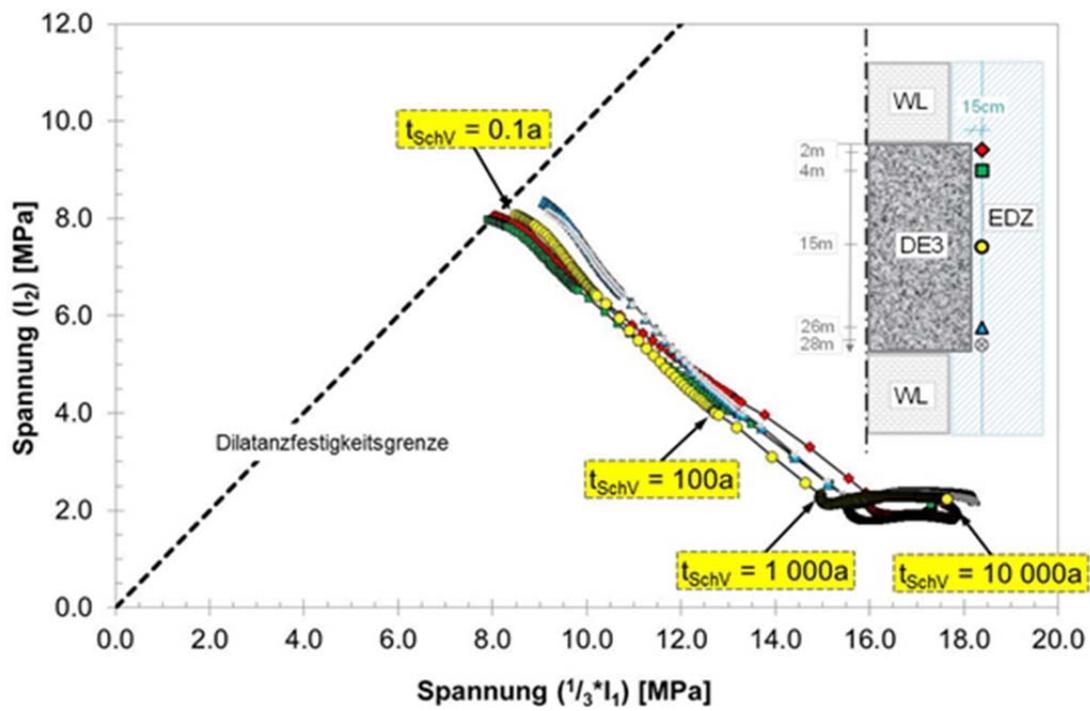


**Abb. 6.10** Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im Bereich des 3. Dichtelements aus Sorelbeton

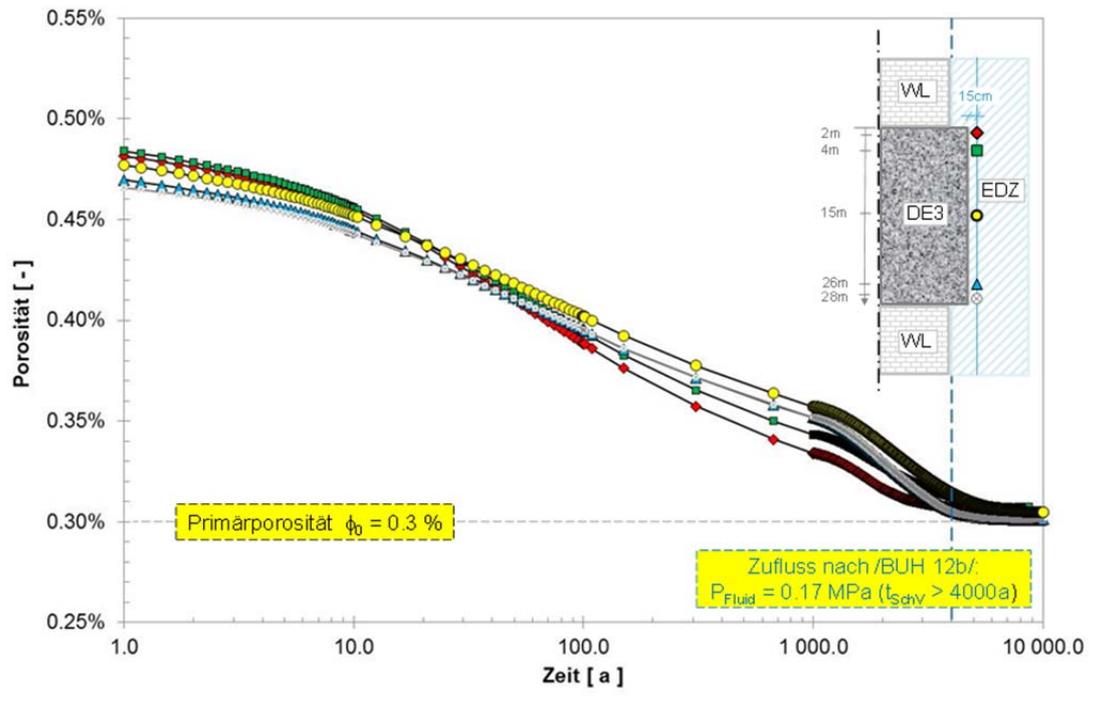
Der mit dem sukzessiven Einbau des Schachtverschlusssystems vergleichsweise frühzeitig stattfindende Anstieg der Minimalspannung im Bereich des 3. Dichtelementes und der damit verbundene Rückgang der deviatorischen Beanspruchung führt bereits bei Fertigstellung des Schachtverschlusssystems zu einer Unterschreitung der Dilatanzgrenze. Abb. 6.11 zeigt hierzu die zeitliche Entwicklung der Gebirgsbeanspruchung im Vergleich mit der verwendeten Dilatanzgrenze des Gesteins in der Invariantendarstellung.

Abb. 6.12 zeigt ergänzend die zeitliche Entwicklung der Porosität in der Auflockerungszone im Bereich des 3. Dichtelements. Aus der Darstellung wird deutlich, dass zum Zeitpunkt des Fluidruckaufbaus 4.000 Jahren nach Fertigstellung des Schachtver-

schlussystems die angesetzte primäre Gesteinsporosität von  $\phi_0 = 0,3 \%$  rechnerisch nahezu wieder erreicht ist.



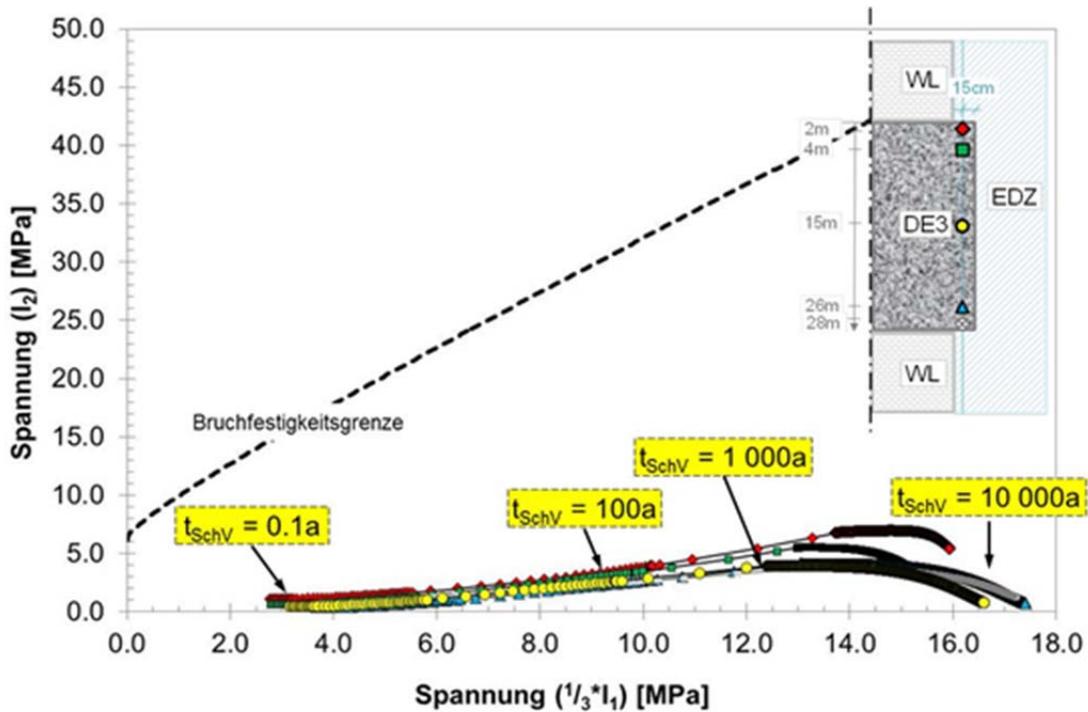
**Abb. 6.11** Rückgang der deviatorischen Beanspruchung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 3. Dichtelements mit Darstellung der Dilatanzgrenze in der Invariantendarstellung



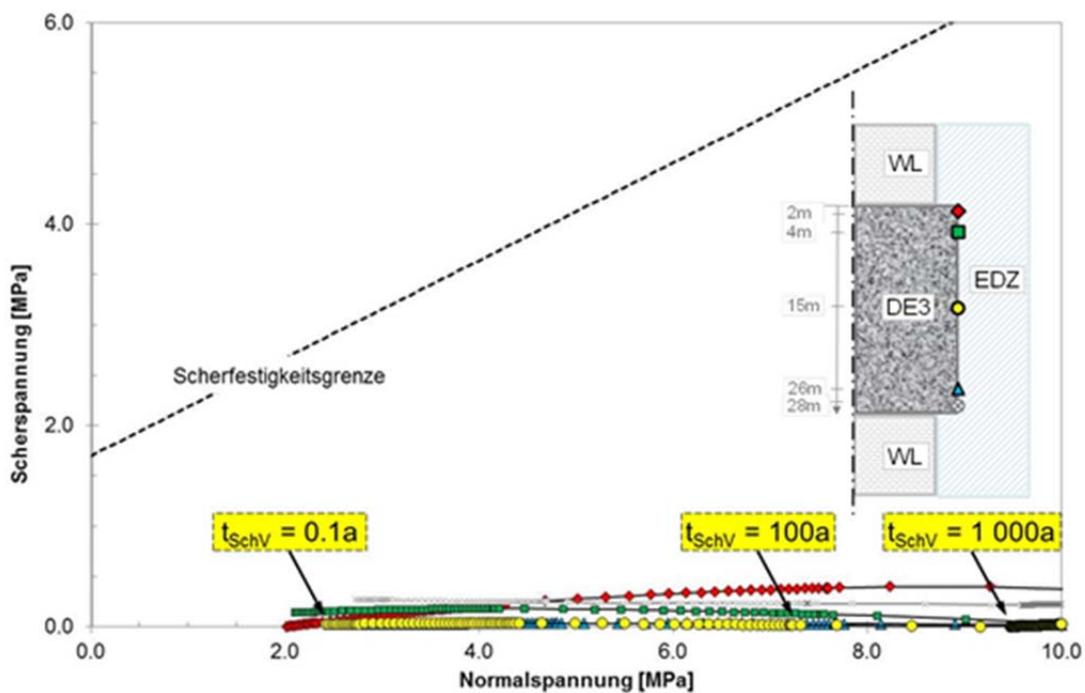
**Abb. 6.12** Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 3. Dichtelements

Auch für das 3. Dichtelement haben weitere Untersuchungen ergeben, dass die für das Sorelbetonbauwerk ausgewiesene Beanspruchung weit unterhalb der angesetzten Bemessungswerte der Bruchfestigkeit (Rissbeschränkung) liegt. Daher werden im Modell erwartungsgemäß auch nur marginale Schubspannungen in vernachlässigbarer Größenordnung berechnet. Die Nachweise der Rissbeschränkung werden damit erfüllt.

Abb. 6.13 zeigt hierzu die für den Sorelbetonbaukörper ausgewiesene Beanspruchung im Vergleich mit den angesetzten Bemessungswerten der Bruchfestigkeit in der Invariantendarstellung und Abb. 6.14 die Schubbeanspruchung in der Kontaktzone zwischen Baukörper und Gebirge. Der Einfluss des Porendruckes auf die Normalspannung kann aufgrund seines geringen Wertes vernachlässigt werden.



**Abb. 6.13** Festigkeitsverhalten Sorelbeton (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen

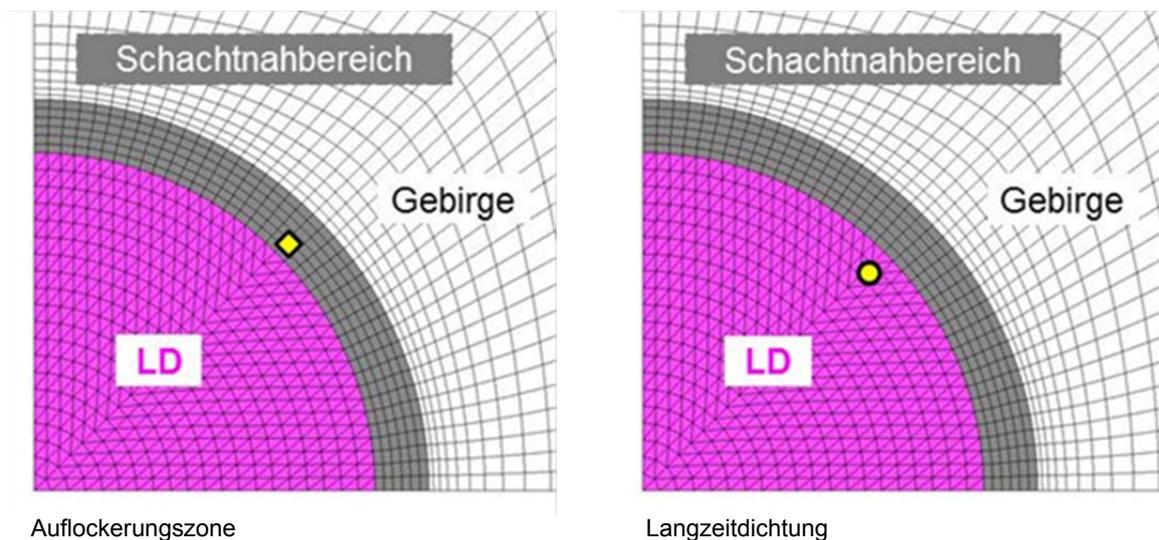


**Abb. 6.14** Zulässige Schubspannung in der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen

## 6.6 Berechnungsergebnisse zum Langzeitdichtelement

### 6.6.1 Auswertelokationen

Die Berechnungsergebnisse zur Langzeitdichtung dienen für das Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“, in dem die Langzeitdichtung nicht explizit betrachtet wird, zur Modellierung des zeitlichen Druckaufbaus auf die Schachtkontur. Aus diesem Grund sind zwei Auswertelokationen vorhanden. Der Spannungszustand wird direkt an der Schachtkontur ausgewertet (Abb. 6.15 links), die zeitliche Abnahme der Porosität nahe der Schachtkontur im Salzgrus innerhalb der Langzeitdichtung (Abb. 6.15 rechts). Die Ergebnisse an diesen Lokationen dienen dem Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ als Eingabe.



**Abb. 6.15** Position der Auswertepunkte im Bereich des Langzeitdichtelements (a) für die ALZ und (b) im Bauwerk

### 6.6.2 Rechenfälle Kriechklasse 2, 4 und 5

Die zeitliche Entwicklung der Porosität des Salzgruses im Modell hängt im Grundsatz von der Konvergenzbewegung der ehemaligen Schachtkontur ab, die wiederum auf das viskose Materialverhalten des Gebirges und damit auf die verwendete Kriechklasse zurückgeführt werden kann.

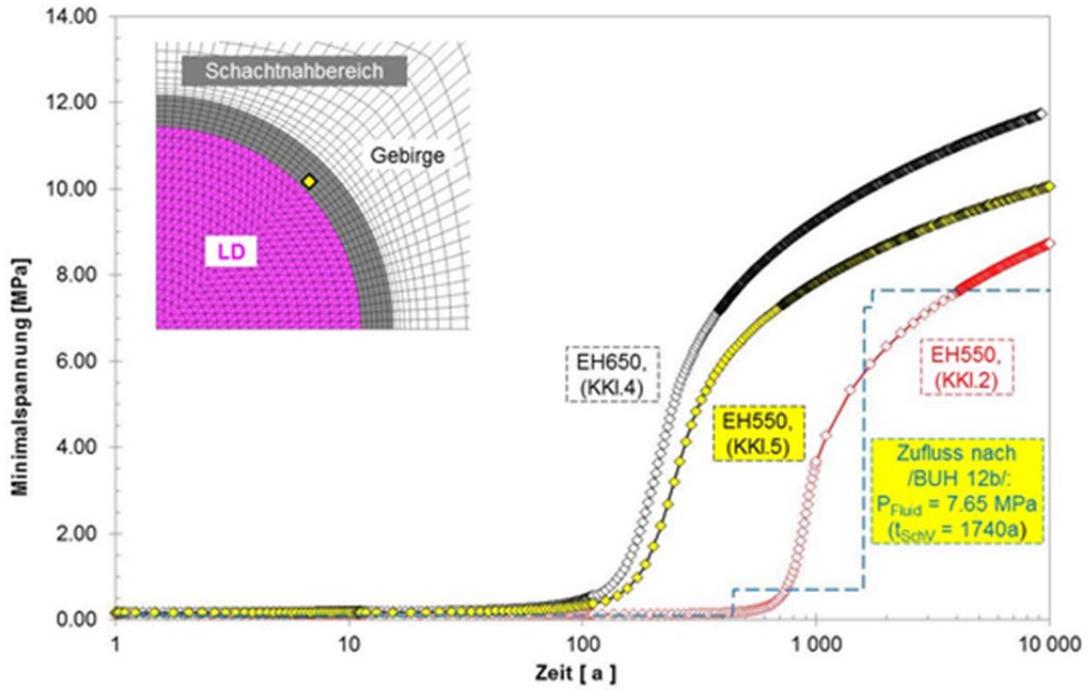
In Abb. 6.16 wird als Ergebnis der numerischen Simulation die zeitliche Entwicklung der Minimalspannung bei Variation der Kriechklassen Kkl. 2 (rot) und Kkl. 5 (gelb) für das Niveau des Erkundungshorizontes EH-550 und Kkl. 4 (schwarz) für das Niveau des Erkundungshorizontes EH-650 farblich markiert dargestellt. In Abb. 6.17 ist die zugehörige Porositätsentwicklung dargestellt. Der Ansatz einer geringeren Kriechfähigkeit des Salinargebirges mit Kriechklasse 2 im 2D-Modell führt zu einem zeitlich versetzten Aufbau des Versatzwiderstandes und der damit verbundenen Minimalspannung in der Auflockerungszone.

Im Vergleich mit dem von /BUH 12b/ berechneten Fluidruckaufbau (unter Annahme des Einbauzustandes) an der Oberkante des Langzeitdichteelementes (Teufenlage bei 600 m) wird bei Ansatz einer geringeren Kriechklasse 2 deutlich, dass der Fluiddruck die Minimalspannung in der Auflockerungszone bereits nach 440 Jahren übersteigt (Abb. 6.16) und somit das Langzeitdichteelement noch nicht seine vollständige Stützwirkung<sup>40</sup> erreicht hat.

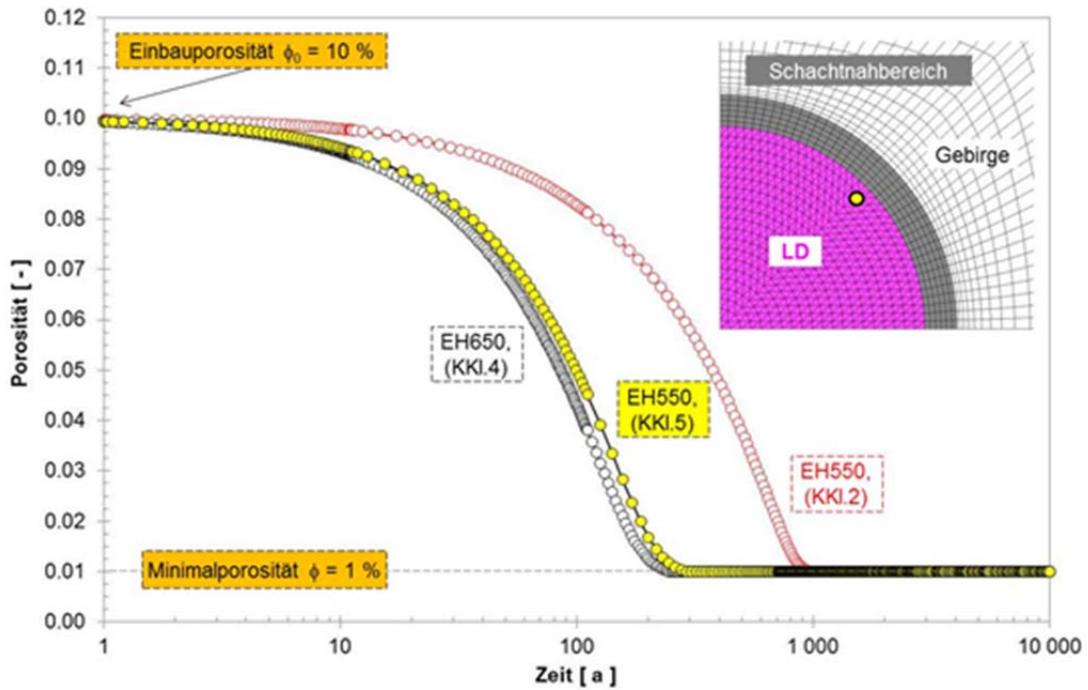
Die in /BUH 12b/ berechnete zeitliche Entwicklung des Fluidruckaufbaus beinhaltet einige Vereinfachungen: So wird keine konvergenzbedingte Kompaktion des Salzgruses berücksichtigt, und das oberhalb liegende erste Dichteelement aus Bentonit wird als poröses Medium konstanter Permeabilität modelliert. Insofern ergibt sich eine idealisierte Druckaufbaukurve, die sich in der Realität eher zu größeren Zeiten verschieben wird. Die Höhe des Fluiddrucks wird dadurch allerdings nicht beeinflusst, sie ergibt sich aus der Höhe der Lösungssäule und wird irgendwann erreicht werden.

---

<sup>40</sup> Sie ist zu diesem Zeitpunkt allerdings auch noch nicht erwartet und auch nicht erforderlich.



**Abb. 6.16** Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im 2D-Modell mit ebenem Verzerrungszustand



**Abb. 6.17** Entwicklung der Porosität in der Langzeitdichtung über die Zeit im 2D-Modell mit ebenem Verzerrungszustand

Wird im Modell eine detaillierte teufenspezifische Zuordnung von Kriechklassen im schachtnahen Bereich angenommen, vgl. Kapitel 4.6.1.2, dann wird die vorgegebene Minimalporosität von  $\phi = 1\%$  in der Langzeitdichtung unter der Voraussetzung, dass die in der Langzeitdichtung zu Verdichtungszwecken initial eingebrachte Lösungsmenge keinen Porendruck aufbaut, sondern in die angrenzenden Speichervolumina gepresst wird, für EH-550 mit Kkl. 5 nach 216 Jahren (EH-650 mit Kkl. 4 nach 186 Jahren) noch deutlich vor dem von /BUH 12b/ berechneten Lösungsdruckaufbau nach 440 Jahren erreicht. Die korrespondierende Minimalspannungsentwicklung führt nach 440 Jahren zu Werten von  $\sigma_{\min} \approx 5,9$  MPa (7,6 MPa).

Die Ergebnisse der numerischen Simulation für EH-550 (EH-650) zeigen für die weitere zeitliche Entwicklung der Minimalspannung im Bereich der Auflockerungszonen dauerhaft Werte oberhalb des errechneten Lösungsdruckes. Zum Zeitpunkt des errechneten Lösungsdruckanstiegs auf  $P_{\text{Fluid}} = 7,65$  MPa nach 1.740 Jahren liegen die Werte der Minimalspannung im Bereich von  $\sigma_{\min} \approx 8,5$  MPa (10 MPa).

## **6.7 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Wie einleitend aufgeführt, wurden für das 2. und 3. Dichtelement aus Salz- bzw. Sorel-beton einschließlich ihrer Widerlager die ingenieurtechnischen Nachweise der Funktionsfähigkeit geführt. Den Nachweisen wurden als Nachweiskriterien die Dilatanzbedingung und das Fluidruckkriterium für den fiktiven Porendruck für die Auflockerungszone im Salz zugrunde gelegt sowie die Festigkeitskriterien für Rissbeschränkung für die Kontaktzonen und die Baukörper aus Salz- und Sorel-beton. Die Nachweiskriterien wurden eingehalten. Die ingenieurtechnischen Nachweise der Rissbeschränkung decken für das Dichtelement aus Salz- und Sorel-beton die Nachweise der Tragfähigkeit und der Verformungsbeschränkung ab. Die Inkonsistenz der kalibrierten und verwendeten Kriechklassen ist für den Nachweis der Funktionsfähigkeit ohne Auswirkung, da auch eine geringere Kriechfähigkeit – wie sie in Kapitel 4.6.1.2 im Bereich des 2. Dichtelements aus Salz-beton kalibriert wurde – zwar zu einer zeitlichen Verzögerung um etwa den Faktor 2, aber immer noch zu einem hinreichend schnellen Druckaufbau in der ALZ führen würde.

Der Nachweis der Dauerhaftigkeit für das 2. und 3. Dichtelement aus Salz und Sorel-beton wurde bereits im Rahmen der Vorbemessung geführt. Der Nachweis der Filter-

Stabilität braucht für das 2. Dichtelement aus Salzbeton und das 3. Dichtelement aus Sorelbeton nicht geführt werden, da es sich nicht um körnige Erdstoffe handelt.

Im Ergebnis der Einzelnachweise sind die Integrität des 2. und 3. Dichtelements aus Salz- und Sorelbeton gegeben, so dass sie ihren planmäßigen hydraulischen Widerstand aufweisen.

Für die Langzeitdichtung wurden im Ergebnis der Analysen die zeitlichen Verläufe des Versatzdruckaufbaus als Eingangsdaten für die Berechnungen zum „Schachtverschluss als Ganzes“ bereitgestellt.

Es ist anzumerken, dass für die numerischen Simulationen für das Salzgebirge und die Langzeitdichtung mechanische Stoffmodelle eingesetzt wurden, die in der Lage sind, ihr Verhalten nicht nur im Rahmen des ingenieurtechnischen Nachweises abdeckend, sondern realistisch zu modellieren. Einschränkend muss bemerkt werden, dass die Bildung und Rekompaktion der Auflockerungszone und das Kompaktionsverhalten von Salzgrus Forschungs- und Entwicklungsthemen sind und die verwendeten Ansätze – wie alle zurzeit verfügbaren Modelle – noch nicht hinreichend validiert sind. Diese Einschränkungen beziehen sich jedoch nicht auf den ingenieurtechnischen Nachweis und die für ihn angewandten Kriterien.



## 7 Zusammenfassende Bewertung für den Schachtverschluss

Die Schachtverschlüsse sind Bestandteil des Verschlussystems, das dazu dient, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den endgelagerten, radioaktiven Abfällen möglichst zu verhindern bzw. die Freisetzung von Radionuklidinventaren auf allenfalls geringfügige Mengen zu begrenzen. In /MÜL 12a/ wurden auf Basis der Szenarienentwicklung für das Verschlussystem fünf Bemessungssituationen identifiziert und zwar „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, „Referenzszenarium mit Erdbeben“, „Versagen des Schachtverschlusses“, „Versagen des Streckenverschlusses“ sowie die modifizierte Einwirkung „schnelleres/langsameres Kriechen infolge einer Kriechklasse unter-/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“, die im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation zu behandeln ist, vgl. Kapitel 3.2. In Bezug auf die Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses sind nur die Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ und „Referenzszenarium mit Erdbeben“ sowie die modifizierte Einwirkung „schnelleres/langsameres Kriechen infolge einer Kriechklasse unter-/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“ zu betrachten. Im Szenarium „Versagen des Schachtverschlusses“ ist der Verlust der planmäßigen Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses unterstellt. Die Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses braucht deshalb nicht mehr betrachtet zu werden. Streckenverschlüsse sind zu den Schachtverschlüssen redundante Verschlüsse. Ihr Ausfall ist für die Funktionsfähigkeit der Schachtverschlüsse ohne Bedeutung.

Insgesamt sind zwei Schachtverschlüsse zu betrachten, die sich durch ihre lokationspezifischen Randbedingungen unterscheiden. Die lokationsspezifischen Unterschiede sind jedoch nicht groß, so dass die exemplarische Untersuchung eines Schachtverschlusses<sup>41</sup> als ausreichend angesehen wird, um eine Aussage zur Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Verschlussystems abzuleiten.

Zur Bearbeitung der Fragestellung wurde die Submodelltechnik eingesetzt, d. h., verschiedene Modelle für unterschiedliche Skalen verwendet, wobei die Anfangs- und Randbedingungen der den Substrukturen zugeordneten Submodelle prinzipiell auf Er-

---

<sup>41</sup> Die Untersuchung beider Schachtverschlüsse war auch praktisch im Rahmen der VSG aufgrund des damit verbundenen Aufwands nicht möglich.

gebnissen anderer, i. d. R. übergeordneter Modelle basieren. Folgende Substrukturen und zugeordnete Submodelle wurden betrachtet:

- Schachtverschluss als Ganzes
- Dichtelement aus Bentonit
- 2. und 3. Dichtelement aus Salz- und Sorelbeton
- Langzeitdichtung aus verdichtetem Salzgrus

Da der Schacht bereits abgeteuft ist und Konvergenzmessdaten an den Erkundungshorizonten vorhanden sind, wurde für den „Schacht als Ganzes“ eine Kalibrierung der Kriechklassen vorgenommen. In die Kalibrierung einbezogen wurde die als wahrscheinlich angesehene Bandbreite der Kriechklassen. Sie wurde auf Basis der aus der Vergangenheit vorhandenen Konvergenzmessdaten präzisiert. Im Ergebnis der Kalibrierung ergaben sich Kriechklassen im Rahmen der erwarteten Bandbreiten. Damit wurden die empfohlenen Kriechklassen und ihre Bandbreiten anhand der in situ Messungen praktisch bestätigt. Auf die Betrachtung des weniger wahrscheinlichen Szenariums bzw. der modifizierten Einwirkung schnelleres/langsameres Kriechen infolge einer Kriechklasse oberhalb/unterhalb der erwarteten Bandbreite kann konsequenterweise auf Basis der Kalibrierungsergebnisse verzichtet werden, da Kriechklassen oberhalb/unterhalb der erwarteten Bandbreite, die maßgebliche Auswirkungen auf das Konvergenzverhalten haben, anhand der Kalibrierungsergebnisse als unwahrscheinlich einzustufen sind und daher nicht untersucht werden müssen. Die kalibrierten Kriechklassen wurden den weiteren prognostischen Berechnungen zugrunde gelegt bzw. im Rahmen von Variationsberechnungen berücksichtigt.

Bei den Kalibrierungsberechnungen wurden die Flächenkonvergenzraten in den Erkundungshorizonten ermittelt. Die Flächenkonvergenzrate im Erkundungshorizont EH-450 wurde herangezogen, um zu zeigen, dass das rotationssymmetrische Modell, das für die Substruktur 1. Dichtelement (Bentonit) genutzt wird, die realen Bedingungen ausreichend genau abbildet. Weiterhin ist die Auswertung der (Flächen-) Konvergenzraten von Bedeutung, weil Funktionselemente aus Salz- und Sorelbeton Bestandteil des Schachtverschlusses sind. Bekanntlich nimmt bei Betonbaustoffen, zu denen Salz- und Sorelbeton zählen, die Steifigkeit mit abnehmender Belastungsgeschwindigkeit bzw. Verzerrungsgeschwindigkeit ab, so dass sich der konvergenzbedingte Druckaufbau in der Auflockerungszone und der Kontaktzone verlangsamt. Dieser Sachverhalt ist in Bezug auf die Bewertung der hydraulischen Eigenschaften der

Auflockerungszone und der Kontaktzone nicht konservativ, da die Druckspannung in den für die Bewertung herangezogenen Kriterien

- Dilatanzbedingung,
- Fluiddruckkriterium

eine wesentliche Rolle spielt. Deshalb wird der effektive Kompressionsmodul (Ersatzkompaktionsmodul) verwendet, der die Verringerung der Steifigkeit in Abhängigkeit der Verzerrungsgeschwindigkeit näherungsweise erfasst. Die Flächenkonvergenzrate wird als Approximation für die Verzerrungsrate genutzt. Die Flächenkonvergenzrate (Verzerrungsrate) im Schacht Gorleben 1 in allen Erkundungshorizonten liegt unter einem Wert von  $1E-10$  1/s. Die Nutzung des effektiven Kompressionsmoduls in der maßgeblichen, frühen Phase des Druckaufbaus ist damit zwar nicht experimentell abgesichert, aber derzeit die beste Approximation, die im Rahmen von Langzeitbetrachtungen auch in numerischen Berechnungen umsetzbar ist.

Die thermomechanischen Randbedingungen für den „Schachtverschluss als Ganzes“ wurden aus dem Fernfeldmodell der BGR übernommen. Dafür musste eine Interpolation der Randbedingungen vom gröberen Netz des Fernfeldmodells auf das feinere Netz des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“ vorgenommen werden und weiterhin diese Randbedingungen in Ost-West-Richtung übertragen werden, da das BGR-Fernfeldmodell den kinematischen Bedingungen eines ebenen Verzerrungszustands entspricht, für den Schachtverschluss aber ein 3D-Modell erforderlich wurde und deshalb ein Blockmodell mit extrudierter Geologie des Schnittes Querschlag 1 West gewählt wurde. Vor Durchführung der Berechnungen unter Berücksichtigung der thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers wurde ein Rechenfall zur Validierung genutzt, um die adäquate Erfassung der thermomechanischen Randbedingungen zu überprüfen bzw. um Abweichungen bewerten zu können. Bei der Validierung wurde das bereits erwähnte Blockmodell genutzt, bei dem im Berechnungsablauf auf die Erstellung des Schachtes verzichtet wurde. Die zeitabhängigen, interpolierten Randbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell wurden an den äußeren Modellrändern aufgegeben und an Kontrollpunkten des markscheiderischen Sicherheitspfeilers und der Schachtachse ausgewertet und mit den von BGR ermittelten zeitlichen Verläufen der Temperaturen, der Verschiebungen und der Spannungen verglichen. Der Vergleich ergab eine sehr gute Übereinstimmung der Temperaturen sowie eine gute Übereinstimmung der Verschiebungen und Spannungen im Schachtbereich. Davon ausgenommen ist die Vertikalspannung im oberen Bereich des 1. Dichtelementes. Dort baut

sich – wie der Verlauf der Gleichgewichtsiteration zeigt – die erhöhte thermomechanisch induzierte Spannung des BGR-Fernfeldmodells ab und geht immer wieder in Richtung Teufendruckniveau zurück, d. h., der thermomechanische Einfluss wird nur gedämpft abbildet. Aus dem Iterationsverlauf lässt sich ableiten, dass die Randbedingungen korrekt übernommen wurden und die beschriebenen Abweichungen auf die notwendigerweise vorgenommenen modellbedingten Veränderungen in den Randbedingungen der feineren Auflösung der geologischen Verhältnisse und insbesondere auf die geringeren kinematischen Restriktionen des 3D-Blockmodells gegenüber dem BGR-Fernfeldmodell im ebenen Verzerrungszustand zurückzuführen sind.

Das Ergebnis der Validierungsberechnung ist trotz der lokal vorhandenen (erklärbaren) Abweichungen aufgrund der insgesamt hohen Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse als gut zu bewerten.

Als zusätzliches Ergebnis zeigen die Berechnungen des Validierungsmodells, dass durch die Berücksichtigung der thermomechanischen Einwirkungen der FEP *Diapirismus* abgedeckt ist. Infolge der thermomechanischen Einwirkungen wird in der Schachtachse bereits nach 2.000 Jahren ein Absolutbetrag der Hebung von mehr als 1 m errechnet. Sowohl im Hinblick auf den Absolutbetrag der Hebung als auch auf die 25fach schnellere Hebungsrate werden im Validierungsmodell „heißer Schacht“ die Werte der für den FEP *Diapirismus* abgeleiteten Hebungen und Hebungsraten überschritten.

Im Ergebnis der o. a. Analysen sind für den Schachtverschluss die zwei verbleibenden Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ und „Referenzszenarium mit Erdbeben“ zu untersuchen.

### **Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“**

Im Anschluss an die Kalibrierung erfolgten weiterführende Berechnungen zum „Schachtverschluss als Ganzes“ sowie an weiteren Submodellen, die die Substrukturen abbilden. Letztere waren notwendig, da der „Schachtverschluss als Ganzes“ das Verhalten einzelner Funktionselemente für eine ingenieurtechnische Nachweisführung nicht hinreichend genau auflöst. Die mit Hilfe des Submodells „Langzeitdichtung“ erzielten Versatzdruckverläufe dienten als Eingangsdaten für das Berechnungsmodell zum „Schachtverschluss als Ganzes“. Für den „Schachtverschluss als Ganzes“ wurden vier Rechenfälle vergleichend betrachtet, im Wesentlichen mit dem Ziel, die ausle-

gungsbestimmenden Anfangs- und Randbedingungen für die nachgeordneten Submodelle einzugrenzen und so die Zahl der Rechenfälle für die Submodelle zu begrenzen. Für diesen Zweck wurden die Rechenfälle

- „kalter Schacht ohne Porendruck“,
- „kalter Schacht mit Porendruck“,
- „heißer Schacht ohne Porendruck“,
- „heißer Schacht mit Porendruck“

gewählt. Die Rechenfälle stellen eine Fortführung der Kalibrierungsberechnungen dar und bilden die Herstellung des Schachtverschlusses im Berechnungsablauf mit ab. Danach wird die Berechnung unterschiedlich fortgesetzt, im ersten Fall wird kein Aufbau von Porendruck angesetzt (lange trockener Schacht), im zweiten Fall wird der Porendruck gemäß Vorbemessung /MÜL 12a/, /BUH 12b/ als innere Randbedingung berücksichtigt. Die aus dem Lösungsdruckaufbau resultierenden Spannungsänderungen werden so erfasst, der Strömungsprozess selbst wird jedoch nicht modelliert. Die Rechenzeiten bleiben damit beherrschbar. Im dritten Rechenfall wird der erste Rechenfall zusätzlich mit den thermomechanischen Randbedingungen beaufschlagt, im vierten Rechenfall erfolgt dies für den zweiten Rechenfall.

Als wesentliches Berechnungsergebnis ist festzuhalten, dass der Gebirgsdruckaufbau auf den Schachtverschluss und die Dichtelemente für den „heißen Schacht“ schneller erfolgt als im Falle des „kalten Schachtes“. Im Zeitbereich von 1.000 bis 2.000 Jahren wird ein Maximum (Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“) erreicht, das im Bereich des 2. und 3. Dichtelementes den Teufendruck temporär um ca. 1 – 3 MPa übersteigt und anschließend wieder Richtung Teufendruckniveau abfällt. Im Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“ ist das grundsätzliche Verhalten gleich, die zeitliche Lage der Druckmaxima variiert jedoch bedingt durch den lokalen Einfluss des Porendrucks. Im Ergebnis der Berechnungen zum „heißen Schacht“ lässt sich feststellen, dass die thermomechanischen Einwirkungen nicht grundsätzlich zu anderen auslegungsbestimmenden Spannungszuständen führen, sie treten lediglich zu einem früheren Zeitpunkt auf. D. h., der thermomechanische Einfluss aus dem Endlager bewirkt einen Zeitraffereffekt, der sich in Bezug auf den Gebirgsdruckaufbau in der Auflockerungszone und der Kontaktzone günstig auswirkt.

Im Ergebnis des Vergleichs wurde festgestellt, dass die Randbedingungen für den „kalten Schacht ohne Porendruck“ die ungünstigsten Randbedingungen für die Nachweisführungen an den Submodellen darstellten. Dieses Ergebnis deckte sich mit der Voranschätzung für die auslegungsbestimmenden Anfangs- und Randbedingungen für die Submodelle, mit deren Bearbeitung bereits vor Übergabe der Berechnungsergebnisse zum Fernfeldmodell begonnen worden war. Aufgrund des Ineinandergreifens der Berechnungen und der Notwendigkeit für die einzelnen Substrukturen adäquate Berechnungsmodelle mit hohen Rechenzeiten zuzuwählen, war – wegen der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Zeit – eine gleichzeitige Bearbeitung der verschiedenen Submodellebenen erforderlich.

Abschließend wurde im Rahmen der orientierenden Auswertungen für den „Schachtverschluss als Ganzes“ auf Basis der Dilatanzbedingung und des Fluiddruckkriteriums sowie der Spannungskomponenten an ausgewählten Stützstellen das Ergebnis der Vorbemessung bestätigt, dass für das Schachtverschlusskonzept die Nachweisführung voraussichtlich gelingt.

So wurden die Berechnungen an den für die Nachweisführung gewählten Submodellen „1. Dichtelement aus Bentonit“ und „2. und 3. Dichtelement aus Salz- und Sorelbeton“ fortgesetzt.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse am Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ und „1. Dichtelement aus Bentonit“ bestätigt die Richtigkeit der Wahl des aktiv quellenden Baustoffs Bentonit. In den Berechnungen zum „Schachtverschluss als Ganzes“ wird das aktive Quellen des Bentonits nicht erfasst, sondern nur seine Stützwirkung. Daher errechnet sich in diesem Fall nur ein sehr langsamer Druckaufbau im Kontaktbereich, so dass das konservative Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck im gesamten Berechnungszeitraum von 10.000 Jahren nicht erfüllt ist. Die Reduzierung der Konservativität erfolgte deshalb mittels der hydromechanisch gekoppelten Berechnung an dem Submodell „1. Dichtelement aus Bentonit“. Für das Dichtelement aus Bentonit wurde der besonders sensible Aufsättigungsprozess im oberen Bereich des Bentonitdichtelementes über einen Zeitraum von 2.000 Tagen modelliert, der Druckaufbau bis zum maximalen Lösungsdruck wurde dabei konservativ abdeckend innerhalb von 120 Tagen umgesetzt.

Im Ergebnis der Berechnungen zeigt sich, dass es in der Auflockerungszone und in der Kontaktzone lokal zur Verletzung des effektiven Fluiddruckkriteriums kommt. Aufgrund

des zunehmenden Quelldrucks stabilisieren sich diese Bereiche aber wieder und das effektive Fluiddruckkriterium wird später trotz des herrschenden Porendrucks wieder erfüllt. Im mittleren Bereich des Bauwerks wird das effektive Fluiddruckkriterium im Berechnungszeitraum von 2.000 Tagen verletzt, allerdings setzt auch dort aufgrund der zunehmenden Einspannung wieder eine Zustandsverbesserung ein. Da die Auflockerung des Bentonits während des Aufsättigungsprozesses unterhalb des Grenzwertes von 3 Volumen-% verbleibt, ist gewährleistet, dass sich der Bentonit des 1. Dichtelementes bei einer Einbautrockendichte von  $1.750 \text{ kg/m}^3$  mit zunehmender Aufsättigung bei gleichzeitig abflachenden hydraulischen Gradienten infolge seiner quelldruckbedingten Einspannung selbst stabilisiert.

In Bezug auf die Auflockerungszone gilt, dass das effektive Fluiddruckkriterium dort zeitweise ebenfalls lokal verletzt ist, später aber wieder erfüllt wird und sich somit ein hydromechanisch stabiler Zustand ohne Permeabilitätszunahme der Auflockerungszone einstellt. Das durch die vorliegenden Berechnungsergebnisse ausgewiesene Systemverhalten wird durch den Großversuch Schachtverschluss Salzdefurth bestätigt, der weiterhin zeigt, dass ein zu schnelles Aufsättigen zu einer Schädigung des Bentonitdichtelementes führen kann, die durch Druckverlust gekennzeichnet ist. Nach erfolgter Druckentlastung verheilte der geschädigte Bereich wieder /MAN 02/.

Im Ergebnis lässt sich zum „1. Dichtelement aus Bentonit“ feststellen, dass die geführten Nachweise der Tragfähigkeit und der Verformungsbeschränkung die Integrität zeigen und somit von dem planmäßigen hydraulischen Widerstand des 1. Dichtelementes aus Bentonit ausgegangen werden kann.

Für das „2. und 3. Dichtelement aus Salz- und Sorelbeton“ weisen die Radialspannungen des Berechnungsmodells „Schachtverschluss als Ganzes“ und des Submodells „2. und 3. Dichtelement aus Salz- und Sorelbeton“ unter Berücksichtigung der modellbedingten Unterschiede eine gute Übereinstimmung aus.

Die Berechnungen am Submodell zeigen für das „2. Dichtelement aus Salzbeton“ und das „3. Dichtelement aus Sorelbeton“, dass das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck in der Auflockerungszone eingehalten wird. In den Kontaktbereichen sind in Normalenrichtung Druckspannungen vorhanden, und die Schubspannungen liegen weit unterhalb der Bemessungsgrenze. Die Festigkeitskriterien im jeweiligen Baukörper sind ebenfalls eingehalten. Die Nachweise der Rissbeschränkung für die Kontaktzonen und die Baukörper sind damit geführt.

Im Ergebnis lässt sich für das „2. Dichtelement aus Salzbeton“ und das „3. Dichtelement aus Sorelbeton“ feststellen, dass die Nachweise der Rissbeschränkung geführt sind und somit ihre Integrität gezeigt ist. Der planmäßige hydraulische Widerstand des 2. und 3. Dichtelementes ist damit gewährleistet.

Zusammenfassend zeigen die ausgewerteten Berechnungsergebnisse, dass der Schachtverschluss seine Funktion unter den abdeckenden isothermen Bedingungen für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ erfüllt. Ungewissheiten sind dadurch gegeben, dass in den Rechenmodellen die Kontaktzone nicht adäquat abgebildet wird. Allerdings liegen zur Untersuchung der Kontaktzone Messergebnisse vor, die am Asse-Vordamm gewonnen wurden /BFS 10/. Die Ergebnisse zeigen, dass bei ordnungsgemäßer Bauausführung sowohl bei geringen als auch bei hohen Minimalspannungen anforderungsgerecht niedrige Permeabilitätswerte im Kontaktbereich vorhanden sind. Ein belastbarer Modellierungsansatz für Kontaktzonen, der einen ausreichend hohen Detaillierungsgrad aufweist, ist allerdings noch nicht vorhanden.

#### **Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“**

Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“ wurden im Rahmen der vertieften Nachweisführung keine Berechnungen durchgeführt<sup>42</sup>.

In Bezug auf die Setzung der Schottersäule bleibt der konservativ abdeckende Status der Vorbemessung bestehen.

Im Allgemeinen gilt, dass die Bemessungssituation Erdbeben bei geringen zusätzlichen Beschleunigungen, wie sie im Falle des Sicherheitserdbebens anzusetzen sind, die Auslegung nicht bestimmt, da die dynamischen Materialfestigkeiten (Widerstände) i. d. R. stärker anwachsen als die Beanspruchungen. Eine Ausnahme ist gegeben, wenn der Versagensmodus dem Schubversagen zuzuordnen ist und er weiterhin geo-

---

<sup>42</sup> Die Bemessungssituation „Erdbeben“ wird im technischen Regelwerk z. B. /CEN 10/ gesondert behandelt. Ein Grund dafür ist, dass ein auslegungsbestimmendes Erdbeben nur sehr selten und kurzzeitig auftritt und deshalb die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens mit den ungünstigsten Werten anderer, veränderlicher Einwirkungen unwahrscheinlich ist. Diese Begründung trifft für die im vorliegenden Fall nicht zu, da im Endlager die Prozesse langsam verlaufen und sich damit die Zustände des Endlagersystems im Vergleich zur Eintrittswahrscheinlichkeit des Erdbebens, dessen Bezugszeitraum 1 Jahr ist, nur langsam ändern. Die Einwirkung Erdbeben wäre also prinzipiell nicht nur für die ständigen Bemessungssituationen zu berücksichtigen, sondern auch für die außergewöhnlichen.

metrisch nicht blockiert ist. Scherfestigkeiten können aufgrund der durch Erdbeben bedingten Normalspannungsreduktion sogar absinken. Dieser Fall betrifft ggf. die Kontaktzone, da Schubversagen in der Kontaktzone ein möglicher Versagensmodus ist. Da die Scherfestigkeit aber nur in geringem Umfang ausgenutzt wird, wird ein potenzielles Versagen der Kontaktzone als ausgeschlossen eingeschätzt. Dieser Sachverhalt ist allerdings noch zu belegen. Bei Notwendigkeit ist es möglich, den Funktionsentwurf des Schachtverschlusses so zu verändern, dass der Fall konstruktiv beherrscht wird, siehe dazu Kapitel 10 und Kapitel 12.

Im Ergebnis der vertieften Nachweisführung und der Vorbemessung lässt sich feststellen, dass die durchgeführten Untersuchungen ausreichen, die Funktionsfähigkeit der Schachtverschlüsse in Bezug auf die Zielstellung zu bewerten. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass die Schachtverschlüsse ihre Funktion, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den endgelagerten Abfällen zu unterbinden, mit Bezug auf die mechanischen, hydraulischen, chemischen und thermischen Einwirkungen erfüllen. Diese Aussage bezieht sich auf die Schachtverschlüsse als Bestandteil des Verschlussystems und ihr Zusammenwirken mit den Streckenverschlüssen.



## **8 Exemplarische Nachweisführung für den Streckenverschluss**

Zielstellung der hier durchgeführten Analysen ist der Nachweis der Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse einschließlich ihrer Widerlager für die Bemessungssituation „Schachtverschlussversagen“, da in diesem Fall die Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost ihre Funktion erfüllen müssen. Der Streckenverschluss Nord ist auch im Falle eines Schachtverschlussversagens keinem maßgeblichen Lösungsdruck ausgesetzt /BUH 12a/, sofern die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost gegeben ist (siehe auch Abb. 2.1).

Die Nachweisführung erfolgt auf Grundlage der in Kapitel 3.4 aufgeführten Rechenfälle 5.1 und 5.2. Die Ergebnisse der Rechenfälle werden so kombiniert, dass auslegungsbestimmende Systemzustände für die Bemessungssituation „Schachtverschlussversagen“ abgedeckt werden. Bestandteil der Nachweisführung ist dabei auch, mit Hilfe des Rechenfalls „Gasdruck“ zu zeigen, dass die Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost nicht vor, während oder nach Aufbau des Lösungsdruckes durch den zusätzlichen Gasdruck in ihrer Funktionsfähigkeit irreversibel beeinträchtigt werden. Der Rechenfall „Gasdruck“ ohne Lösungsdruck ist dem Referenzszenarium zuzuordnen. Deshalb wird für die Streckenverschlüsse auch das Referenzszenarium betrachtet. Zugrunde gelegt wird hier die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“. Der Streckenverschluss Nord stellt eine Besonderheit dar. Für ihn ist zweiseitiger Gasdruck zu betrachten, nicht jedoch ein Lösungsdruckaufbau.

### **8.1 Charakterisierung der Verschlusslokation**

Alle Streckenverschlüsse (Abb. 2.1) sind auf der Einlagerungssohle in 870 m Teufe im älteren Hauptsalz z2HS der Staßfurtfolge geplant. Die Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost befinden sich im Wesentlichen im z2HS1 (Knäuelsalz) und z2HS2 (Streifensalz) während der Streckenverschluss Nord im z2HS3 (Kristallbrockensalz) angeordnet ist. Den Lokationen der Streckenverschlüsse sind mit Bezug auf das Stoffmodell BGRa die in Tab. 8.1 angegebenen Kriechklassen und Streubereiche zugeordnet /BGR 11/. Die Kriechklassen unterscheiden sich von den Angaben in Tab. 4.2. Die in Tab. 8.1 aufgeführten Kriechklassen wurden auf Grundlage von Laboruntersuchungen festgelegt, die an Bohrkernen der Erkundungssohle vorgenommen wurden, die den geplanten Lokationen der Streckenverschlüsse (siehe Abb. 2.1) entstammen. Eine Ausnahme

bildet der Streckenverschluss Ost. Hier wurden mangels Daten die Kriechklassen geschätzt. Es kommt das Stoffmodell BGRa zur Anwendung, da die Temperaturerhöhung an den Lokationen der Streckenverschlüsse so begrenzt ist /BOL 12/, /MÜL 12a/, dass BGRa angesetzt wird.

Das Kriechverhalten des Salzes wird mit Kriechklasse 3 abdeckend erfasst. Die niedrigste Kriechrate ergibt sich am Streckenverschluss Nord mit Kriechklasse 5 und Faktor  $\frac{1}{4}$ , was Kriechklasse 3 entspricht (vgl. dazu Kapitel 4.1). Alle anderen in Tab. 8.1 angegebenen Kombinationen aus Kriechklasse und Multiplikationsfaktor führen zu höheren Kriechraten.

**Tab. 8.1** Kriechklassen für BGRa an den Lokationen der Streckenverschlüsse /BGR 11/

Lokation		Kriechklassen	Bandbreite der Kriechklassen - Multiplikationsfaktoren	
			Schnelles Kriechen	Langsames Kriechen
West		2,0*BGRa/Kkl. 6	k. A.	k. A.
Mitte	nördlich	1,0*BGRa/Kkl. 5	2 (= Kkl. 6)	$\frac{1}{2}$ (= Kkl. 4)
	südlich	2,0*BGRa/Kkl. 6	8 (= Kkl. 8)	1 (= Kkl. 5)
Ost	nördlich	1,0*BGRa/Kkl. 5*	k. A.	k. A.
	südlich	2,0*BGRa/Kkl. 6*	k. A.	k. A.
Nord		1,0*BGRa/Kkl. 5	4 (= Kkl. 7)	$\frac{1}{4}$ (= Kkl. 3)

\* Schätzwerte, da nicht erkundeter Bereich (EB3)

Es wird ein isotroper Primärspannungszustand angesetzt, wobei integral eine Dichte<sup>43</sup> der überlagernden Schichten von  $2.163 \text{ kg/m}^3$  angenommen wurde. Damit ergibt sich im Niveau der Einlagerungssohle ein berechneter Teufendruck von ca. 18,5 MPa. Für die ungestörte Gebirgstemperatur wird das in /BOL 12/ angesetzte Temperaturprofil für den Einlagerungsbereich, das aus Messdaten abgeleitet wurde, zugrunde gelegt. Daraus ergibt sich im Teufenniveau der Einlagerungssohle eine Temperatur von 38,67 °C.

---

<sup>43</sup> Der Unterschied zu den Angaben in Kapitel 4.1 resultiert aus der parallelen Bearbeitung verschiedener Modellberechnungen; er ist in Bezug auf das Ergebnis vernachlässigbar.

## 8.2 Auswahl des abdeckenden fiktiven Streckenverschlusses

Im Rahmen der vertieften Nachweisführung wird nur ein Streckenverschluss behandelt. Ihm werden im Sinne einer abdeckenden Herangehensweise Einwirkungskombinationen zugeordnet und daraus Rechenfälle abgeleitet, die eine Bewertung aller vier Streckenverschlüsse zulassen. Es handelt sich dabei um einen fiktiven Streckenverschluss. Seine Auswahl wird in Tab. 8.2 verdeutlicht, in der die Unterschiede zwischen den Streckenverschlüssen aufgeführt sind, die die Auslegung maßgeblich bestimmen. Sachverhalte, die für alle Streckenverschlüsse gleich sind, sind nicht angegeben. Bei der Identifikation des fiktiven Streckenverschlusses wurden im Sinne der Zielsetzung, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen möglichst frühzeitig zu unterbinden, Sachverhalte, die den Gebirgsdruckaufbau beschleunigen, als günstig gewertet, Sachverhalte, die einen Gebirgsdruckaufbau verzögern, als ungünstig. Die maßgebenden Auswahlkriterien sind in Tab. 8.2 unterstrichen. Zu Tab. 8.2 ist anzumerken, dass für die Streckenverschlüsse der weniger wahrscheinliche FEP eine Kriechklasse unterhalb der erwarteten Bandbreite mit berücksichtigt wurde, da keine Kalibrierung der Laborversuche anhand von in situ-Messdaten möglich war, da die Zugangstrecken noch nicht aufgeföhren sind.

**Tab. 8.2** Auswahl des fiktiven Streckenverschlusses (maßgebende Auswahlkriterien sind unterstrichen)

Auswahlkriterium	Streckenverschluss			
	Ost	Mitte	West	Nord
Geometrie	= West	= <u>Nord</u>	= Ost	= <u>Mitte</u>
Empfohlene Kkl.	<u>5</u> - 6	<u>5</u> - 6	6	<u>5</u>
Bandbreite Kkl.	-	<u>4</u> - 8	-	<u>3</u> - 7
Untere Bandbreite Kkl. -1	4	<u>3</u>	5	<u>2</u>
Temperaturverlauf*	Ca. 55 °C, Maximum < 1.000 a	Ca. 45 °C, Maximum ≈1.000 – 2.000 a	<u>Ca. 40 °C,</u> <u>Maximum</u> <u>&gt; 2.000 a ≈</u> <u>isotherm</u> <u>38,67° C</u>	Ca. 43 °C, Maximum ≈1.000 – 2.000 a
Gasdruckentwicklung*	<u>maximal</u>	geringer	geringer	<u>maximal</u>
Lösungsdruckentwicklung	<u>ja</u>	<u>ja</u>	<u>ja</u>	nein

\* vgl. Anhang D

Aus Tab. 8.2 ergibt sich eine eindeutige Auswahl. Ein fiktiver Streckenverschluss mit der Geometrie des Streckenverschlusses Nord, dem auch die lokationsspezifischen

Randbedingungen des Streckenverschlusses Nord und ein für den Streckenverschluss West geltender Temperaturverlauf bzw. isotherme Bedingungen zugeordnet werden sowie die Gasdruckentwicklung am Streckenverschluss Nord und eine Lösungsdruckentwicklung entsprechend den Streckenverschlüssen Ost, Mitte, West, ist abdeckend für alle Streckenverschlüsse.

Damit ist für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ der fiktive Streckenverschluss Nord mit Kriechklasse 3 unter isothermen Bedingungen und maximaler Gasdruckentwicklung der zu behandelnde, abdeckende Rechenfall.

Für die Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ ist der fiktive Streckenverschluss Nord mit Kriechklasse 4 unter isothermen Bedingungen und Lösungsdruck ein erster zu betrachtender, prinzipiell abdeckender Rechenfall. Er wird durch die ungünstigere Kriechklasse 3 unter isothermen Bedingungen, die für den fiktiven Streckenverschluss für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ gewählt wurde, mit abgedeckt. Der durch das Versagen des Schachtverschlusses induzierte Lösungsdruck wird dabei zusätzlich berücksichtigt.

Die modifizierte Einwirkung „schnelleres bzw. langsames Kriechen infolge einer Kriechklasse unter-/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“ wird im Sinne der Zielsetzung, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den endgelagerten radioaktiven Abfällen zu verhindern, für die Streckenverschlüsse Ost, Mitte und West mit Kriechklassen  $\geq 4$  durch die Kriechklasse 3 des fiktiven Streckenverschlusses abgedeckt. Nur an diesen Streckenverschlüssen steht Lösungsdruck infolge von Schachtverschlussversagen an /BUH 12a/.

### **8.3 Ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“**

Für die ständige Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ werden für den fiktiven Streckenverschluss die nachfolgend dargestellten Einwirkungen, Gefährdungsbilder und zu betrachtenden Grenzzustände identifiziert. Die den jeweiligen Grenzzustand beschreibenden Widerstände, die durch die Nachweiskriterien beschrieben werden, sind im Anschluss aufgeführt.

### **Betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Eigengewicht, Gebirgsdruck, Gasdruck, Strömungskräfte, Kriechen des Salzgebirges, Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen, Kriechen des Sorelbetons

### **Nicht betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Lösungsdruck: Im Rahmen der ständigen Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ erfüllt der Schachtverschluss seine Funktion. Daher ist der Lösungsdruck auf den Streckenverschluss im Nachweiszeitraum vernachlässigbar.
- Massenkräfte: Die Einwirkung Erdbeben wird im Rahmen der vertieften Nachweisführung rechnerisch nicht behandelt, siehe Vorbemessung.
- Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge thermischer Expansion/Kontraktion: Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge Temperaturerhöhung werden im Rahmen der vertieften Nachweisführung nicht behandelt. Eine Plausibilitätsbetrachtung erfolgte im Rahmen der Vorbemessung.
- Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge Diapirismus werden vernachlässigt, es erfolgt eine Einschätzung zur Beherrschung von Auswirkungen des Diapirismus.
- Quellen und Schwinden: Autogenes Quellen des Sorelbetons ist den Bauzuständen zuzurechnen und wird deshalb nicht betrachtet. Lösungsinduziertes Quellen tritt nicht auf, da nur in vernachlässigbarem Umfang Lösung ansteht.

### **Betrachtete Gefährdungsbilder**

Für den Streckenverschluss wird im Rahmen der Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ nur das Gefährdungsbild

- Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Gasdruck, Strömungskräfte, Kriechen des Salzgebirges, Kriechen des Sorelbetons

betrachtet. Der Einfluss von Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen wird durch die Modellbildung mit erfasst.

## Betrachtete Grenzzustände

Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone

Für die Bemessungssituation erfolgt zusätzlich eine Betrachtung der Grenzzustände

- Rissbildung in der Kontaktzone,
- Rissbildung im Baukörper,

obwohl für sie an dieser Stelle keine Gefährdungsbild abgeleitet wurde.

## Nachweiskriterien

Als ein Nachweiskriterium wird die Dilatanzbedingung herangezogen. Analog zum 2. und 3. Dichtelement des Schachtverschlusses wird die Dilatanzgrenze nach Olivella genutzt, vgl. Kapitel 6.2. Das Auflockerungsverhalten von intaktem Steinsalz bei Spannungszuständen oberhalb der Dilatanzgrenze wird dabei mit Hilfe einer Fließfunktion und Fließregel beschrieben, die im Rahmen des Projekts THERESA /WIE 09/, /WIE 10/ von Olivella entwickelt und kalibriert wurde. Wie in Kapitel 6 muss auch hier bemerkt werden, dass Bildung und insbesondere Rekompaktion der Auflockerungszone noch Forschungsgegenstand sind.

Weiterhin wird das Fluiddruckkriterium analog zu Kapitel 4.3 für die Bewertung der Auflockerungszone genutzt. Im Fluiddruckkriterium wird konservativ die kleinste Hauptspannung betrachtet. Da eine fluidmechanisch gekoppelte Berechnung durchgeführt wird, sind die kleinste totale und die kleinste effektive Hauptspannung aufgrund des vorhandenen Porendruckes nicht identisch. Es gilt

$$\sigma_3 > p_{fl} \text{ bzw. } \sigma'_3 = \sigma_3 - p_{fl} > 0 \quad (8.1)$$

mit

- $\sigma_3$ : kleinste Hauptspannung (totale Spannung)
- $\sigma'_3$ : kleinste Hauptspannung (effektive Spannung)
- $p_{fl}$ : lokaler Porendruck

Das Fluiddruckkriterium wird abdeckend für die ALZ angesetzt.

Da die Nachschnitttiefe für den fiktiven Streckenverschluss nicht im Rahmen der Vorbemessung ermittelt wurde, ist ein zusätzliches Kriterium für die Ermittlung der Nach-

schnitttiefe erforderlich. Für die Ermittlung der Nachschnitttiefe wird hier die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung nach Olivella genutzt, obwohl sie noch Stand der Forschung ist, vgl. Anhang C. Sie stellt jedoch aus konservativer Sicht die Obergrenze dar. Unabhängig davon ist die Quantifizierung einer realistischen Permeabilitäts-Beziehung zur Beschreibung der Ausbildung der ALZ (und insbesondere für den umgekehrten Fall der Rückbildung der ALZ) noch Gegenstand von FuE. Als Grenzbedingung zur Ermittlung der Nachschnitttiefe wird die Permeabilität von  $5E-17 \text{ m}^2$  gewählt, da sie für die integrale Permeabilität des Streckenverschlusses angesetzt wurde /MÜL 12a/. Bereiche höherer Permeabilität werden durch Nachschnitt entfernt.

#### **8.4 Bemessungssituation „Schachtverschlussversagen“**

Für die Streckenverschlüsse stellt das für das Verschlussystem weniger wahrscheinliche Szenarium „Schachtverschlussversagen“ die ständige Bemessungssituation dar, da die Streckenverschlüsse als redundante Verschlüsse zu den Schachtverschlüssen konzipiert sind. Die Streckenverschlüsse übernehmen gerade im Fall Schachtverschlussversagen die Verschlussfunktion und sind deshalb für diesen Fall auszulegen. Für die Bemessungssituation „Schachtverschlussversagen“ werden die nachfolgend dargestellten Einwirkungen, Gefährdungsbilder und zu betrachtenden Grenzzustände identifiziert. Die den jeweiligen Grenzzustand beschreibenden Widerstände, die durch die Nachweiskriterien beschrieben werden, sind im Anschluss aufgeführt.

##### **Betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen, Kriechen des Sorelbetons

##### **Nicht betrachtete mechanische Einwirkungen**

- Fluiddruck: Der Fluiddruck wird nicht direkt als Einwirkung behandelt, sondern wird im Rahmen der Bewertung als fiktiver Porendruck berücksichtigt.
- Strömungskräfte: Für diesen Fall erfolgt keine hydromechanisch gekoppelte Betrachtung; Strömungskräfte werden deshalb nicht erfasst.
- Massenkkräfte: Die Einwirkung Erdbeben wird im Rahmen der vertieften Nachweisführung rechnerisch nicht behandelt.

- Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge thermischer Expansion/Kontraktion: Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge Temperaturerhöhung werden im Rahmen der vertieften Nachweisführung nicht behandelt. Eine Plausibilitätsbetrachtung erfolgte im Rahmen der Vorbemessung.
- Zwangsspannungen/Zwangsverformungen infolge Diapirismus werden vernachlässigt, es erfolgt eine Einschätzung zur Beherrschung von Auswirkungen des Diapirismus.
- Quellen und Schwinden: Autogenes Quellen des Sorelbetons ist den Bauzuständen zuzurechnen und wird deshalb nicht betrachtet. Lösungsinduziertes Quellen wird konservativ vernachlässigt.

### **Betrachtete Gefährdungsbilder**

Für den Streckenverschluss werden die Gefährdungsbilder

- Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Kriechen des Sorelbetons, Lösungsdruck (indirekt), Gasdruck (indirekt),
- Rissbildung in der Kontaktzone durch Festigkeitsüberschreitung infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Kriechen des Sorelbetons,
- Rissbildung im Baukörper durch Festigkeitsüberschreitung infolge der kombinierten Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck, Kriechen des Salzgebirges, Kriechen des Sorelbetons

betrachtet. Der Einfluss von Zwangsspannungen/Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrund-Wechselwirkungen wird durch die Modellbildung mit erfasst.

### **Betrachtete Grenzzustände**

Rissbildung/Rissöffnung in der Salzkontur bzw. Auflockerungszone, Kontaktzone und/oder im Baukörper

## **Nachweiskriterien**

Es werden die gleichen Nachweiskriterien wie für das 3. Dichtelement (Sorelbeton) des Schachtverschlusses herangezogen, vgl. Kapitel 6.2.

### **8.5 Berechnungsmodelle für den Streckenverschluss**

Für die in Kapitel 3.4 aufgelisteten Rechenfälle sind wiederum möglichst wenige Rechenmodelle zu nutzen. Für die Rechenfälle mit Gasdruck wird ein rotationssymmetrisches Rechenmodell verwendet, um den Aufwand für die fluidmechanisch gekoppelten Berechnung in Grenzen zu halten. Da ein „volumentreues bzw. flächentreues“ rotationssymmetrisches Modell verwendet wird, ist die erforderliche Nachschnitttiefe an einem Modell zu ermitteln, das die geometrischen Verhältnisse des Streckenquerschnitts genauer erfasst, um den erforderlichen Nachschnitt „volumentreu bzw. flächentreu“ abbilden zu können. Aus diesem Grunde werden für die Berechnungen zwei unterschiedliche Rechenmodelle benötigt. Folgende Rechenmodelle werden gewählt:

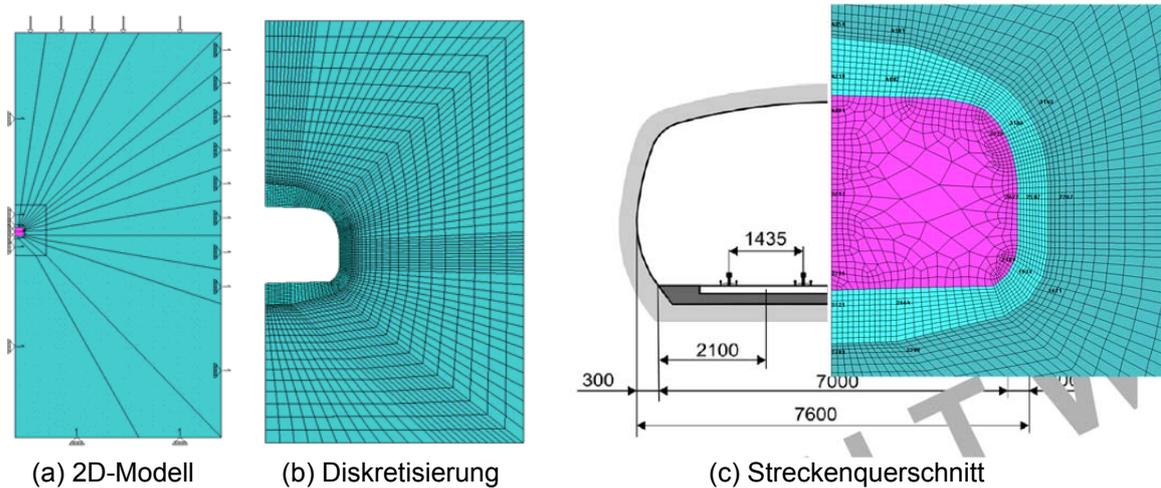
1. ein Rechenmodell im ebenen Verzerrungszustand zur Bestimmung der Nachschnitttiefe
2. ein rotationssymmetrisches Rechenmodell zur Modellierung eines Dichtelementes des Streckenverschlusses und seiner Widerlager aus Sorelbeton

Für die Modellierung des Streckenverschlusses werden die bereits in Kapitel 6.4 erläuterten Stoffmodelle verwendet. Für die Ermittlung der Nachschnitttiefe wird – wie bereits erwähnt – zusätzlich die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung nach Olivella verwendet, vgl. Anhang C.

#### **8.5.1 Berechnungsmodell im ebenen Verzerrungszustand**

Grundlage des Berechnungsmodells zur Bestimmung der erforderlichen Nachschnitttiefe für den fiktiven Streckenverschluss ist der Streckenquerschnitt der Richtstrecke Nord /BOL 11/. Das Berechnungsmodell mit ebenem Verzerrungszustand stellt einen Vertikalschnitt durch die Richtstrecke dar mit einer Bezugsteufenlage der Streckensohle von 870 m. Unter Ausnutzung vorhandener Symmetrieeigenschaften wird nur der halbe Streckenquerschnitt abgebildet. Das Gebirge wird im Modell mit einer horizontalen und vertikalen Ausdehnung von jeweils 100 m abgebildet. Abb. 8.1 zeigt hierzu das

verwendete Modell im Vergleich mit dem vorgegebenen Streckenquerschnitt. Die Diskretisierung des Modells erfolgt durch 4.949 Elemente mit 5.062 Knoten. Im Bereich der Auflockerungszone ist eine sehr feine Modelldiskretisierung mit Knotenabständen von  $d_x = d_z = 0,13$  m vorgenommen worden.



**Abb. 8.1** Streckenquerschnitt im ebenen Verzerrungszustand (2D)

### 8.5.1.1 Anfangs- und Randbedingungen

Wie aus Abb. 8.1 erkennbar sind die unteren und seitlichen Ränder in Normalenrichtung unverschieblich gelagert. Der obere Rand ist als freier Rand modelliert. Es wird eine Spannungsrandbedingung angesetzt, die dem Überlagerungsdruck von 15,88 MPa in einer Teufe von 770 m entspricht. Am unteren Modellrand in einer Teufe von 970 m wird der Primärspannungszustand mit  $\sigma_{iso} \approx 20,12$  MPa angenommen.

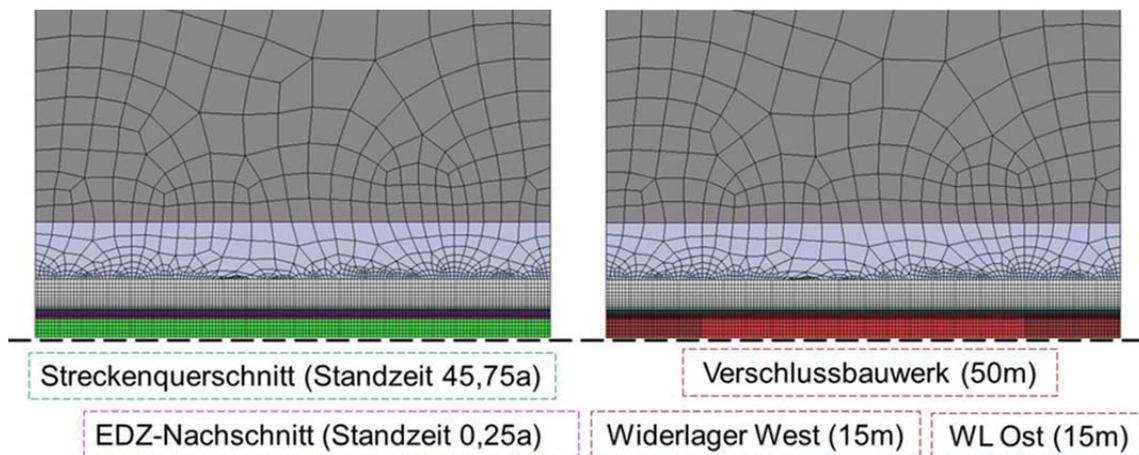
Die primäre Gebirgstemperatur im Modellgebiet wird konstant zu 38,67 °C angesetzt.

### 8.5.1.2 Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf

Im Modell wird die Streckenauffahrung durch Reduzierung der Radialspannung an der Kontur auf Atmosphärendruckniveau simuliert. Entsprechend der vorgegebenen zeitlichen Rahmenbedingungen für den Einlagerungsbetrieb ergibt sich eine Standzeit der offenen Strecke von ca. 46 Jahren, vgl. Tab. 2.2.

## 8.5.2 Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell

Das Modellgebiet des rotationssymmetrischen Rechenmodells des fiktiven Streckenschlusses besitzt eine Gesamtlänge von 80 m und eine radiale Ausdehnung von 100 m. Analog zum Modell mit ebenem Verzerrungszustand wird der Streckensohle eine Bezugsstufe von 870 m zugewiesen.



**Abb. 8.2** Berechnungsmodell (rotationssymmetrisch)

Für die weiterführende Berechnung mit einem rotationssymmetrischen Rechenmodell muss der aufgefahrene Streckenquerschnitt von ca.  $A_0 = 26,60 \text{ m}^2$  ersatzweise durch einen kreisförmigen Querschnitt mit einem Streckenradius von  $r_0 = 2,90 \text{ m}$  berücksichtigt werden. Für den nachgeschnittenen Streckenquerschnitt ergibt sich im Vorgriff auf die Berechnungsergebnisse zur Nachschnitttiefe (Kapitel 8.6.2) eine Fläche von ca.  $A \approx 44 \text{ m}^2$  ( $\Rightarrow r = 3,75 \text{ m}$ ). Die Diskretisierung des Modells erfolgt durch 6.098 Elemente mit 6.058 Knoten. Im Bereich der Streckenkontur ist eine sehr feine Modelldiskretisierung mit Knotenabständen von  $d_y = 0,5 \text{ m}$  und  $d_z = 0,1 \text{ m}$  vorgenommen worden, die mit größerem Abstand zur Streckenachse zunimmt (Knotenabstände am Modellrand  $d_x = d_z = 6 \text{ m}$ ).

### 8.5.2.1 Anfangs- und Randbedingungen

Das Modell ist an den seitlichen Rändern in Normalenrichtung unverschieblich gelagert, in tangentialer Richtung frei verschieblich. Die Mantelfläche des axialsymmetrischen Modells ist als freier Rand modelliert. Es wird ein isotroper Primärspannungszustand angesetzt, wobei integral eine Dichte der überlagernden Schichten von

2.163 kg/m<sup>3</sup> angenommen wurde. Damit ergibt sich im Niveau der Einlagerungssohle ein lithostatischer Teufendruck von ca. 18,5 MPa.

Die ungestörte Gebirgstemperatur ist konstant mit  $T = 38,67 \text{ °C}$  angesetzt.

#### **8.5.2.2 Belastungsgeschichte/Berechnungsablauf**

Zunächst wird der Streckenausbruch durch Reduzierung der Radialspannung an der Kontur auf Atmosphärendruckniveau simuliert. Entsprechend der vorgegebenen zeitlichen Rahmenbedingungen für den Einlagerungsbetrieb wird eine maximale Standzeit der offenen Strecke vor Nachschnitt von 45,75 Jahren im Modell angesetzt.

Drei Monate vor instantaner Einbringung des Verschlussbauwerkes wird die Streckenkontur auf einer Länge von 50 m um  $\Delta r = 0,85 \text{ m}$  nachgeschnitten. Im Bereich der beiden Widerlager auf einer Länge von je 15 m wird im Modell kein Konturnachschnitt simuliert, vgl. Abb. 2.3.

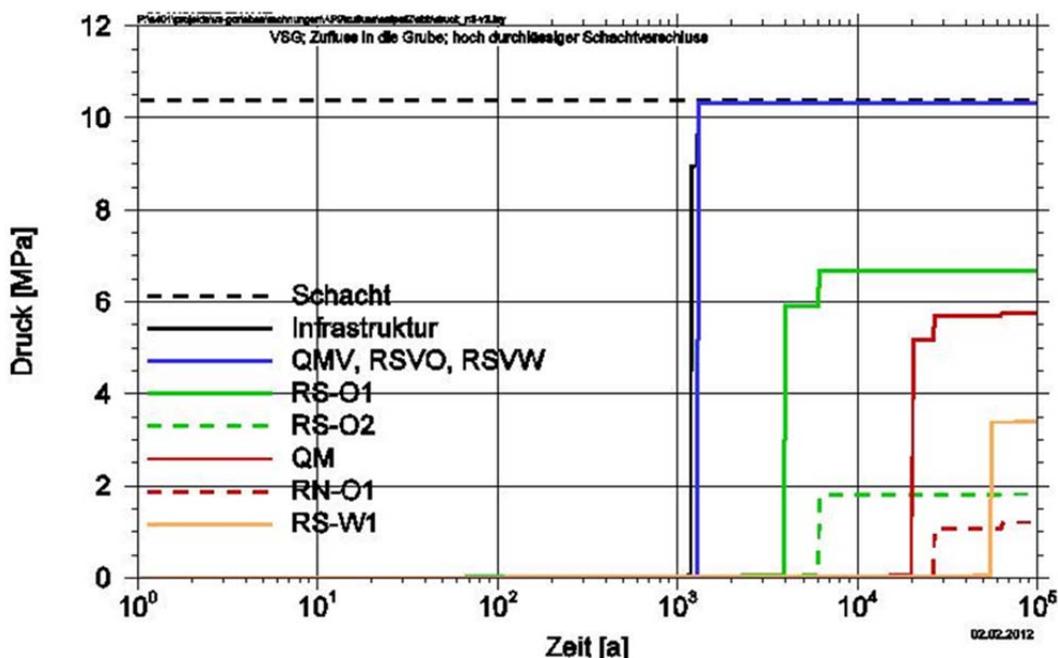
Für den Streckenverschluss werden zwei Rechenfälle untersucht, die zu unterschiedlichen Berechnungsabläufen führen, und zwar der Rechenfall „Gebirgsdruck“ und der Rechenfall „beidseitiger Gasdruck“. Die beiden Rechenfälle werden sowohl im Rahmen der Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ als auch „Schachtverschlussversagen“ ausgewertet. Im Rechenfall Gebirgsdruck werden die durch das Aufkriechen des Salzgebirges hervorgerufenen Beanspruchungszustände des Streckenverschlusses ermittelt. Dieser Rechenfall wird zur Bewertung der Beanspruchung durch einseitigen Lösungsdruck herangezogen. Im Rechenfall Gasdruck wird die Beanspruchung des Streckenverschlusses durch beidseitigen Gasdruck bestimmt, der aus der Korrosionsgasbildung der endgelagerten, radioaktiven Abfällen resultiert und der den maximalen Belastungsfall durch Gasdruck darstellt. Beide Rechenfälle dienen abschließend der Bewertung der Einwirkungskombination einseitiger Lösungs- und Gasdruck.

Der zeitliche Verlauf des Lösungsdrucks und des Gasdrucks sind nachstehend beschrieben.

## Lösungsdruck

Für den fiktiven Streckenverschluss aus Sorelbeton wird entsprechend der Vorbemessung /MÜL 12a/, /BUH 12a/ der in Abb. 8.3 dargestellte Zeitverlauf des Lösungsdruckaufbaus angenommen. Er wird im Berechnungsablauf nicht abgebildet, aber bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Er basiert auf Modellrechnungen, die von der GRS mit dem Computercode LOPOS zur Ermittlung des Zuflusses in das Grubengebäude bei Schachtverschlussversagen durchgeführt wurden /MÜL 12a/, /BUH 12a/. Unter der sehr konservativen Annahme, dass sämtliche Schachtverschlusselemente nach Fertigstellung instantan mit Lösung gefüllt sind und oberhalb des Schachtverschlusses ein hydrostatischer Lösungsdruck ansteht, wird nach ca. 1.300 Jahren im Bereich der Streckenverschlüsse ein maximaler Lösungsdruck von 10,3 MPa ausgewiesen.



**Abb. 8.3** Lösungsdruckentwicklung am fiktiven Streckenverschluss Nord

Berechnungsergebnisse der GRS hinsichtlich des Zuflusses in das Grubengebäude bei Schachtverschlussversagen /BUH 12a/

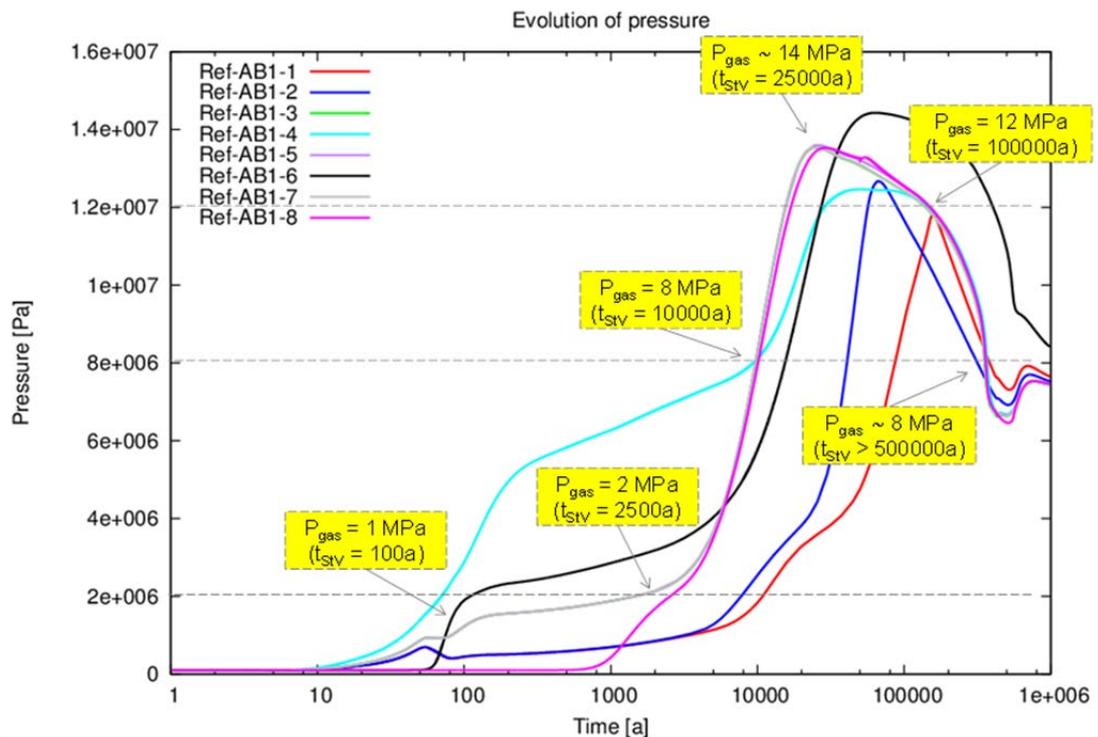
## Beidseitige Belastung mit Gasdruck

Von der GRS sind im Rahmen von numerischen Untersuchungen /KOC 12a/ Variationsrechnungen zur Gasdruckentwicklung im Gesamtsystem durchgeführt worden. Da-

bei wurden im Bezugszeitraum von 50.000 Jahren die höchsten Gasdrücke an einem Streckenverschluss im Rechenfall Ref-AB1-3 und Ref-AB1-7 errechnet. Die höchsten Belastungen durch Gasdruck ergeben sich dabei am nördlichen Streckenverschluss, wo der Gasdruck an beiden Stirnflächen am Verschluss anliegt. Die Druckverläufe am nördlichen Streckenverschluss sind in Abb. 8.4 (Abb. 9.94 in /KOC 12a/) dargestellt. Am nördlichen Streckenverschluss werden hier zu einem Zeitpunkt ca. 25.000 Jahre nach Verschluss etwa 14 MPa berechnet.

Der vorliegende Rechenfall mit Ansatz von Porengasdrücken berücksichtigt die am nördlichen Streckenverschluss auftretenden Gasdrücke für den fiktiven Streckenverschluss. Dazu ist der Gasdruck in seiner zeitlichen Entwicklung als Druckwert auf die jeweiligen Stirnflächen der Widerlager aufgegeben worden. Der in axialer Richtung wirkende und zeitlich variierende Gasdruck wird somit als Randbedingung auf das Modell vorgegeben. Das zur Verfügung stehende Porenvolumen wird hierzu im Ausgangszustand als unter Atmosphärendruck stehend angenommen.

Die Porengasdrücke werden nur mit einer einseitigen Kopplung berücksichtigt. Ein advektiver Strömungsprozess wird simuliert, ohne 2-Phasen-Fluss-Effekte zu berücksichtigen, wie sie bei Nutzung des Process-Level-Codes CODE\_BRIGHT bei einer hydro-mechanisch gekoppelten Simulation Anwendung finden /MIE 10/. Der aufgebrachte Porendruck verringert die effektive Gebirgsbeanspruchung und verlangsamt damit die Konvergenzbewegung und in der Folge auch das Rekompaktionsverhalten der ALZ.



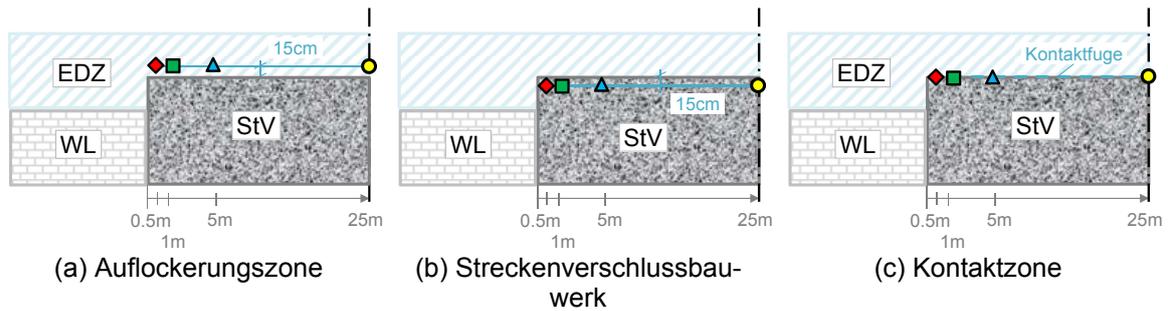
**Abb. 8.4** Gasdruckentwicklung am Streckenverschluss NORD (Ref-AB1-7)

Berechnungsergebnisse der GRS /KOC 12a/

## 8.6 Berechnungsergebnisse für den Streckenverschluss

### 8.6.1 Auswertelokationen

Die Auswertelokationen für die berechneten Zustandsgrößen im rotationssymmetrischen Rechenmodell sind vergleichbar mit denen der Dichtelemente im Schacht, vgl. Kapitel 6.5.1. Sie liegen entlang des Streckenverschlusselementes entweder innerhalb der Auflockerungszone oder innerhalb des Baukörpers jeweils mit einem Abstand zur Kontur von ca. 0,15 m. Für die Nachweisführung der Rissbeschränkung in der Kontaktzone werden die Auswertepunkte in die Kontaktbereich zwischen Baukörper und Gebirgskontur gelegt. Die Position der Auswertepunkte ist in Abb. 8.5 unter Ausnutzung vorhandener Symmetrierandbedingungen am halben Streckenverschlusselement skizziert und farblich unterschiedlich markiert. Die Farbkennzeichnung der Auswertepunkte wird für die Darstellungen der Zustandsgrößen an den Auswertepunkten beibehalten.



**Abb. 8.5** Position der Auswertepunkte am Streckenverschlusselement (a) für die ALZ, (b) im Bauwerk und (c) in der Kontaktzone

### 8.6.2 Vorlaufende Berechnung zur Ermittlung der Nachschnitttiefe

Während der freien Standzeit der Strecke führt der mit dem verwendeten Stoffmodellansatz berechnete sekundäre Spannungszustand zur Erhöhung der Porosität an der Streckenkontur und somit zur Ausbildung einer Auflockerungszone im Gebirge mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit. Die primäre Gesteinsporosität für das intakte Salzgestein wird hierbei entsprechend /WIE 10/ mit  $\phi_0 = 0,3 \%$  angenommen.

Im Modell werden für den umgebenden Gebirgsbereich der offenen Strecke erwartungsgemäß konturnah Bereiche mit einer höheren Permeabilität  $k_{\text{Fluid}} > 5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  ausgewiesen (Ansatz Olivella, vgl. Anhang C). Diese Grenze ergibt sich als Anforderung aus der integralen Permeabilität.

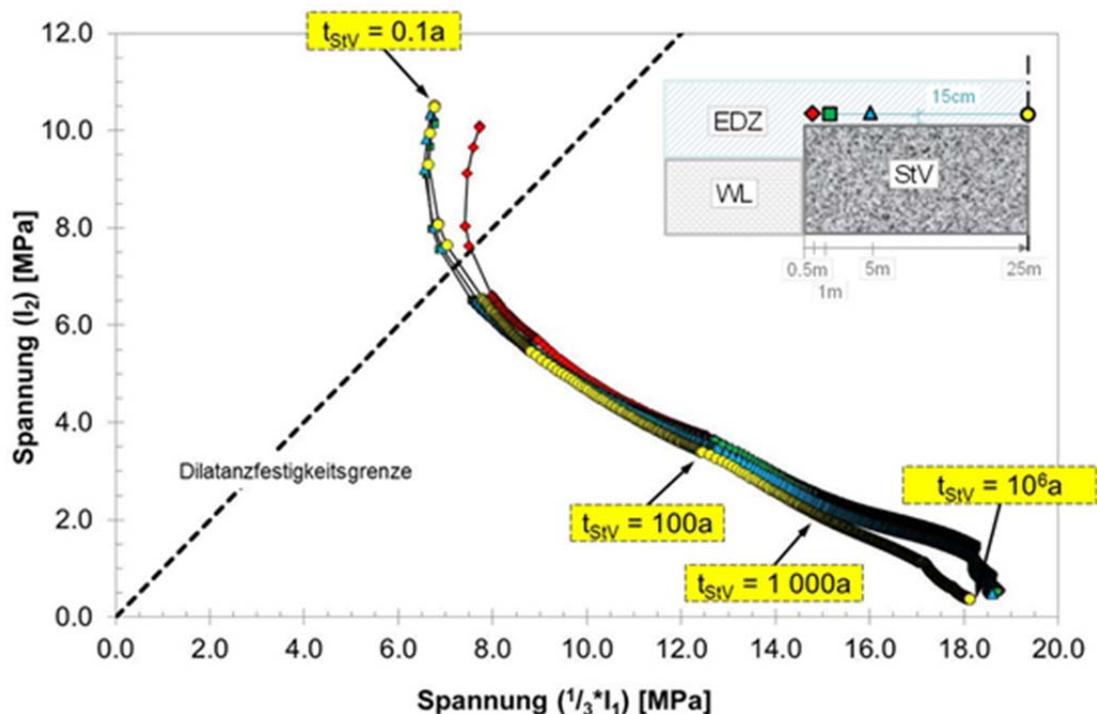
Als Ergebnis dieser Berechnung wird in der weiterführenden Berechnung mit einem rotationssymmetrischen Rechenmodell der aufgefahrene Streckenquerschnitt von ca.  $A_0 = 26,60 \text{ m}^2$  auf eine Fläche von ca.  $A \approx 44 \text{ m}^2$  vergrößert, um den Nachschnitt „volumentreu bzw. flächentreu“ zu berücksichtigen. Dieser Wert entspricht einer Nachschnitttiefe von 0,85 m im rotationssymmetrischen Berechnungsmodell und weist damit einen Wert auf, der für die Teufenlage üblich ist /WOL 12a/. Auf eine Ergebnisdarstellung wird an dieser Stelle verzichtet.

### 8.6.3 Rechenfall Gebirgsdruck (Bewertung einseitiger Lösungsdruck)

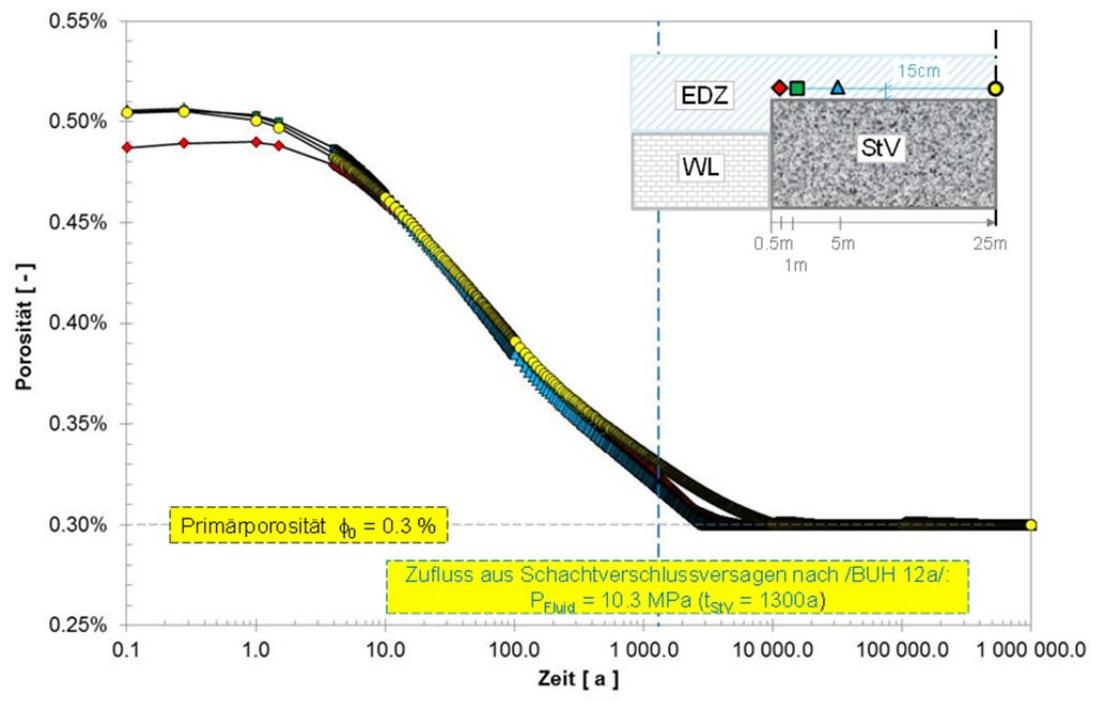
Die Berechnungen mit Ansatz einer Kriechfähigkeit des Salinargebirges mit Kriechklasse 5 und langsamem Kriechen (Faktor  $\frac{1}{4}$ , vgl. Tab. 8.1), die für die Rückbildung der Auflockerungszone den ungünstigsten Fall darstellen, zeigen für die gewählten

Auswertepunkte des rotationssymmetrischen Modells, dass ein tendenzieller Rückbildungsprozess der konturnahen ALZ bereits nach wenigen Jahren einsetzt (Abb. 8.6). Es werden keine Zugspannungen ausgewiesen.

Nach 100 Jahren ist die aus der anfänglichen Gebirgsentfestigung resultierende Porositätszunahme in den gewählten Auswertepunkten bereits auf Werte  $\Delta\phi < 0,1\%$  zurückgeführt, nach maximal 10.000 Jahren wird dann in allen gewählten Auswertepunkten die primäre Gesteinsporosität mit  $\phi_0 = 0,3\%$  wieder erreicht (Abb. 8.7).

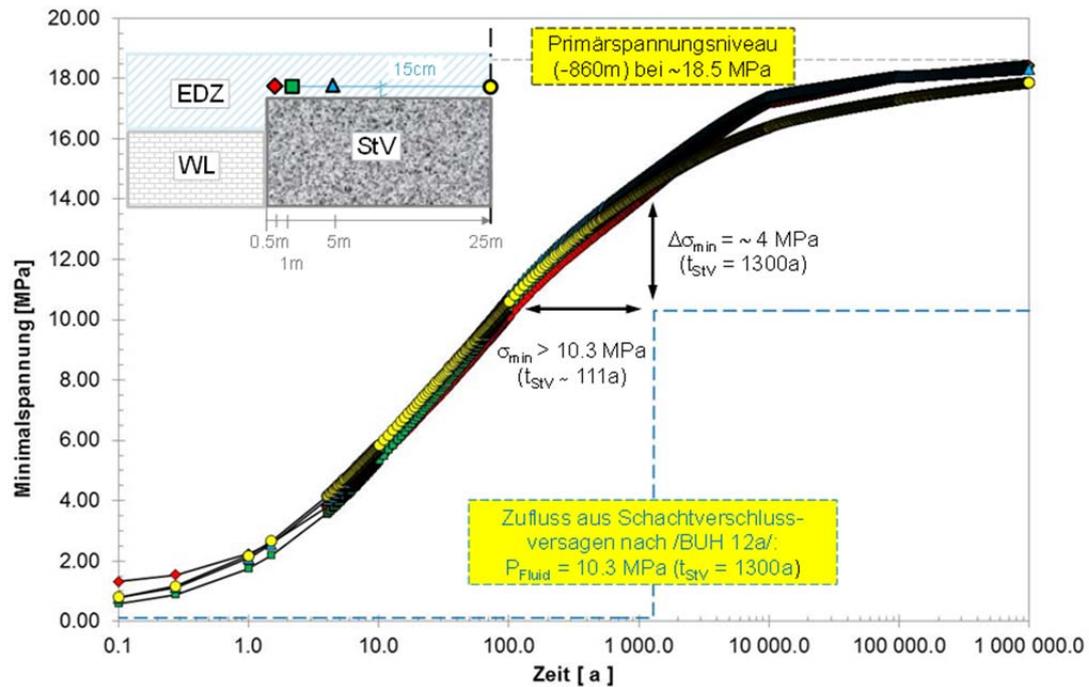


**Abb. 8.6** Rückgang der deviatorischen Beanspruchung in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses mit Darstellung der Dilatanzfestigkeitsgrenze in der Invariantendarstellung



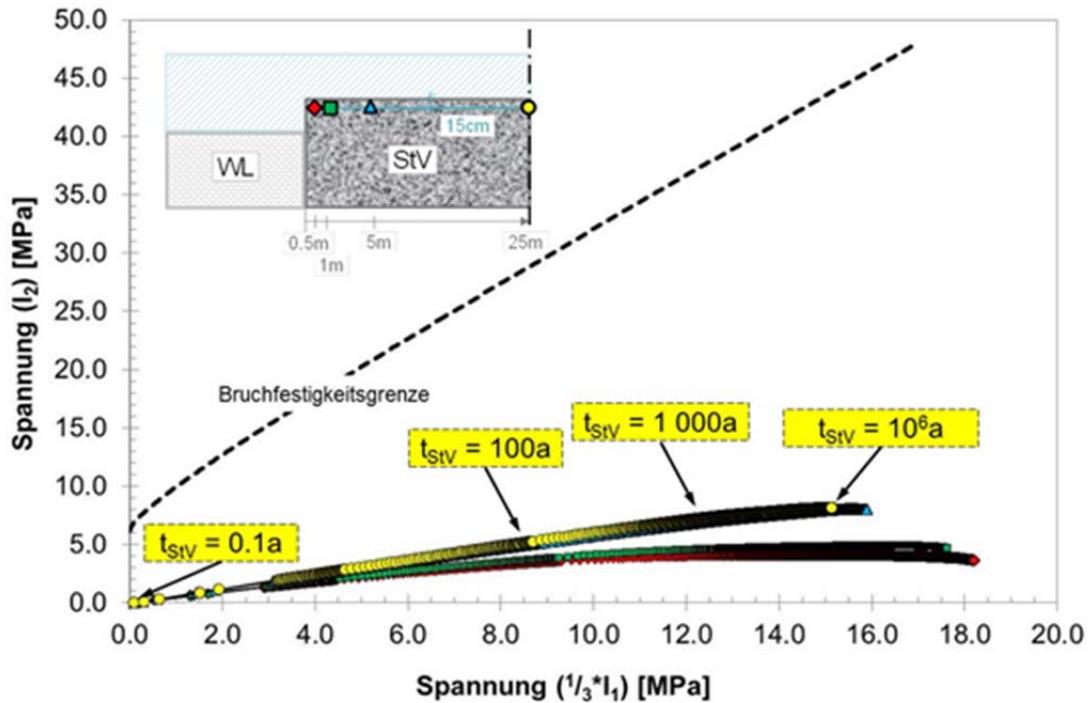
**Abb. 8.7** Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses

Die berechnete Minimalspannung im Bereich der Auflockerungszone ist in Abb. 8.8 dargestellt. Sie wird für den ingenieurtechnischen Nachweis herangezogen. Den berechneten Zeitverlauf der Minimalspannungen wird der Lösungsdruckaufbau gemäß Abb. 8.3 gegenübergestellt, der als fiktiver Porendruck interpretiert wird. Zum Zeitpunkt des errechneten Lösungsdruckanstiegs auf  $P_{\text{Fluid}} = 10,3 \text{ MPa}$  nach 1.300 Jahren haben die Minimalspannungen bereits Werte im Bereich von  $\sigma_{\text{min}} = 15 \text{ MPa}$  angenommen, ein dem Lösungsdruck entsprechender Wert von  $\sigma_{\text{min}} = 10,3 \text{ MPa}$  wird nach 111 Jahren überschritten (Abb. 8.8). Damit ist in der ALZ das Fluidruckkriterium für den fiktiven Porendruck für den Lösungsdruck bei Schachtverschlussversagen eingehalten.

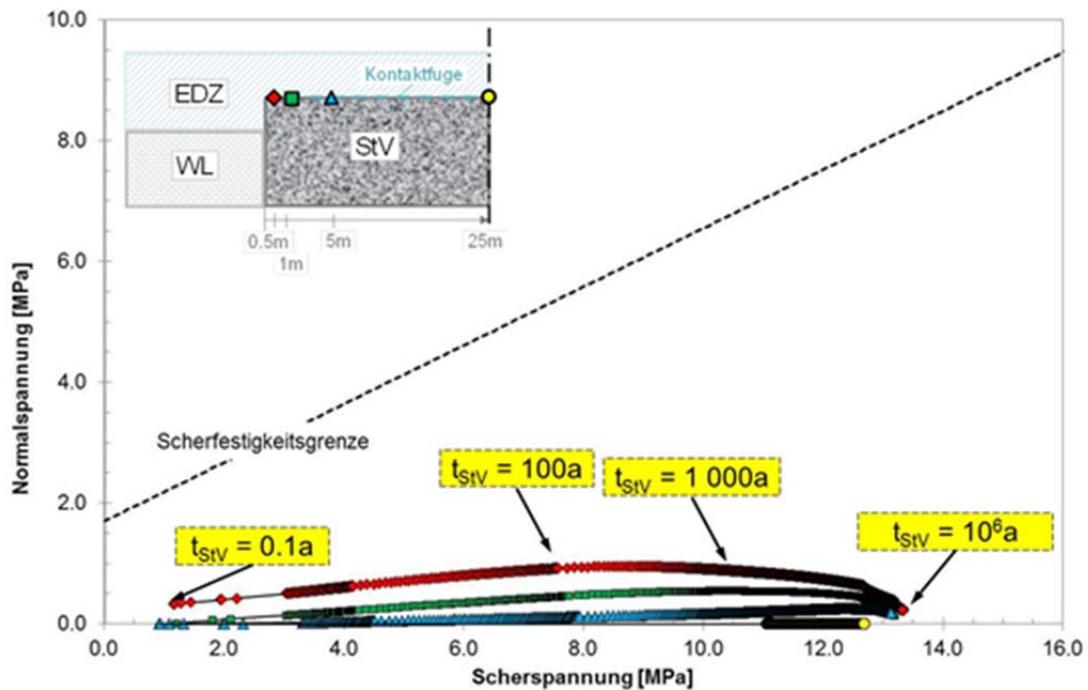


**Abb. 8.8** Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses

Die für den fiktiven Streckenverschluss ausgewiesenen Beanspruchungen in der Kontaktzone und im Baukörper liegen weit unterhalb der Bemessungswerte der Bruchfestigkeit (Rissbeschränkung) (Abb. 8.9). Durch den strukturellen Aufbau des Verschlussbauwerkes mit den beidseitig angebrachten Widerlagern werden Schubspannungen in der Kontaktzone zwischen Baukörper und Konturzone planerisch minimiert. Im Berechnungsmodell werden daher erwartungsgemäß auch nur marginale Schubspannungen in vernachlässigbarer Größenordnung ausgewiesenen (Abb. 8.10). Die Nachweise der Rissbeschränkung für den fiktiven Streckenverschluss werden damit erfüllt.



**Abb. 8.9** Festigkeitsverhalten Sorelbeton (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen



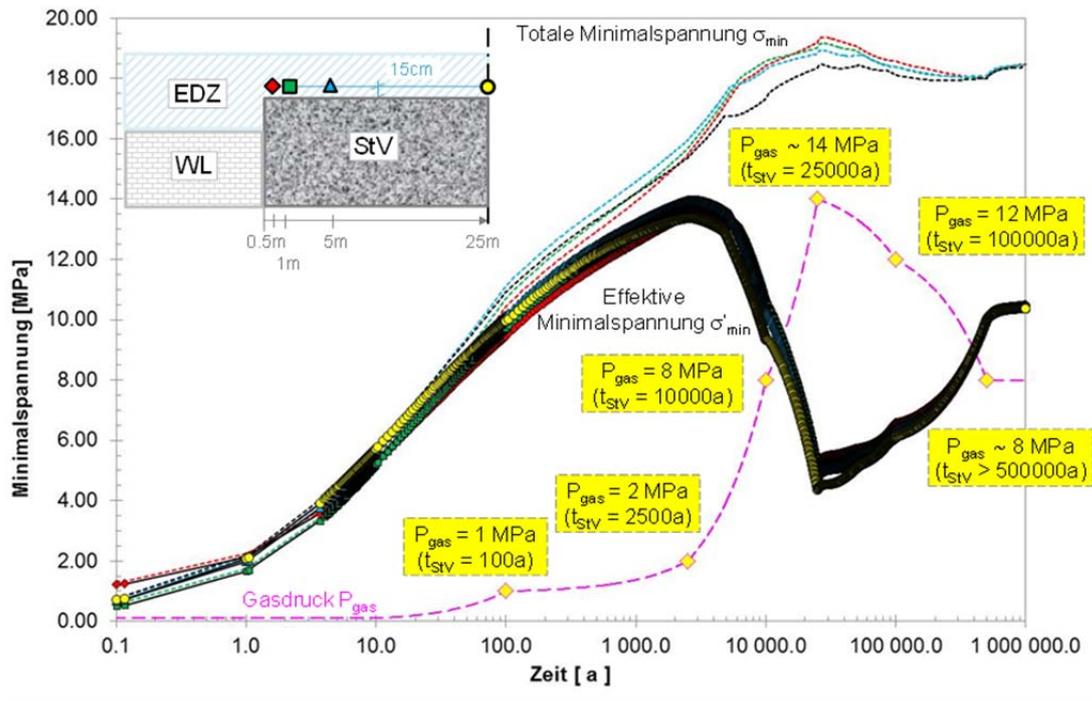
**Abb. 8.10** Zulässige Schubbeanspruchung in der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen

Im Fall eines Schachtverschlussversagens wäre ein einseitiger Lösungsdruck an den Streckenverschlüssen West, Mitte und Ost anzusetzen. Aufgrund der höheren Kriechfähigkeit des dort anstehenden Salzgesteins (Minimum Kriechklasse 4), die den Minimalspannungsanstieg und den damit einhergehenden Prozess der Rekompaktion der Auflockerungszone begünstigt, sind die Berechnungsergebnisse am fiktiven Streckenverschluss (Kriechklasse 5 mit Faktor  $\frac{1}{4}$  entspricht Kriechklasse 3) für diesen Fall abdeckend. Eine gesonderte Berechnung mit Berücksichtigung der Kriechklasse 4 findet daher nicht statt. Der Zeitpunkt 1.300 Jahre für den Lösungsdruckanstieg ist nur an den Streckenverschlüssen West, Mitte und Ost anzusetzen. Der Streckenverschluss Nord wird gemäß /BUH 12a/ von Tages-, Deckgebirgs-, und Formationslösungen nicht erreicht.

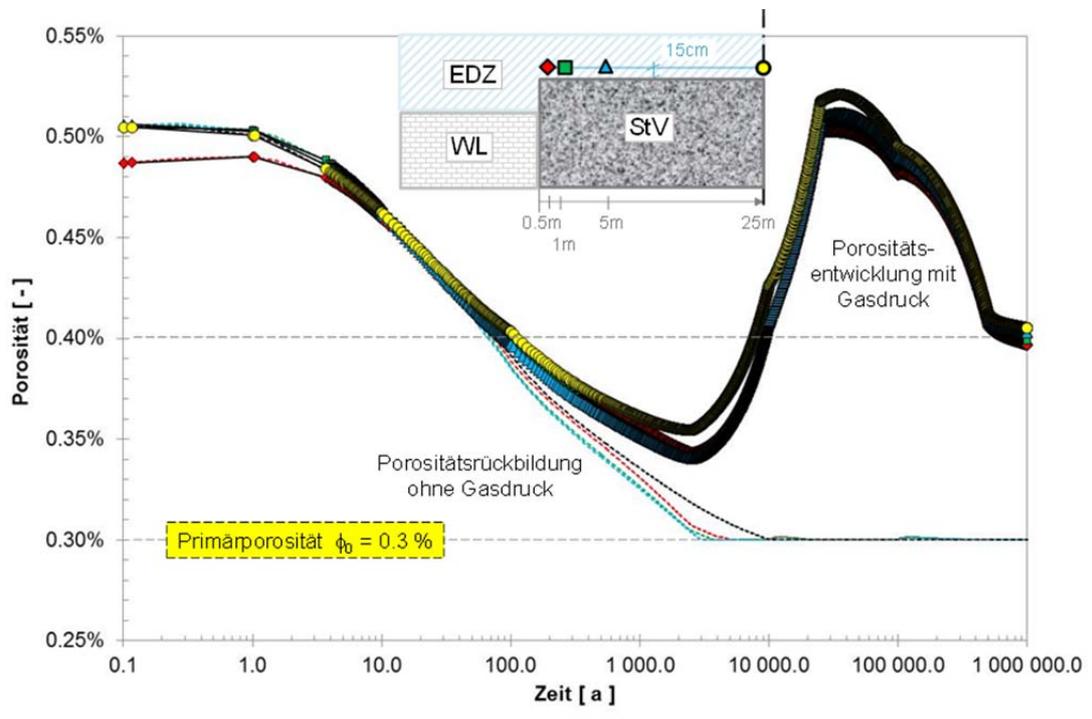
#### **8.6.4 Rechenfall Gasdruck**

Der vorliegende Rechenfall mit Ansatz von Porengasdrücken gemäß Abb. 8.4 berücksichtigt die am nördlichen Streckenverschluss auftretenden Gasdrücke für den fiktiven Streckenverschluss. Die Gasdrücke an den Streckenverschlüssen West, Mitte und Ost sind dadurch abdeckt.

Abb. 8.11 zeigt die zeitliche Entwicklung der effektiven Minimalspannung mit  $\sigma'_{\min} = \sigma_{\min} - P_{\text{gas}}$  in der ALZ im Bereich des Streckenverschluss Nord, Abb. 8.12 die Entwicklung der Porosität.



**Abb. 8.11** Minimalspannungsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses bei Vorgabe eines Gasdruckes



**Abb. 8.12** Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses bei Vorgabe eines Gasdruckes

Die Ergebnisse der numerischen Simulation für die gewählten Auswertepunkte zeigen für den Zeitraum bis 2.500 Jahren im Vergleich zu den Ergebnissen des Rechenfalls „Gebirgsdruck“ einen verzögerten Anstieg der Minimalspannung (Abb. 8.11) und damit einhergehend auch einen verzögerten Rückbildungsprozess der ALZ (Abb. 8.12).

Die nachfolgende Druckerhöhung von  $P_{\text{gas}} = 2 \text{ MPa}$  auf Werte bis maximal  $P_{\text{gas}} = 14 \text{ MPa}$  führt dann im Modell zu einer vollständigen Stagnation des Rückbildungsprozesses bis hin zur Wiederentstehung der bei Bauwerkseinbau vorhandenen Porosität auf Werte bis zu  $\phi \approx 0,55 \%$ . Dieser Prozess wird durch die Reduzierung der vom aufgebrauchten Gasdruck abhängigen effektiven Beanspruchung des Gebirges begünstigt. Eine mit der Porositätszunahme verbundene Gasdruckreduzierung wird durch den Ansatz der Randbedingungen im Berechnungsmodell nicht abgebildet. Die Annahme im Berechnungsmodell, dass der Gasdruck in seiner vollen Höhe der totalen Gebirgsbeanspruchung entgegen wirkt, führt in den gewählten Auswertepunkten zu dilatanten Deformationszuständen. Wird der Gasdruck dann auf den final anstehenden Wert von  $8 \text{ MPa}$  abgesenkt, bleibt in der Folge im Berechnungsmodell eine gegenüber dem Ausgangszustand erhöhte Porosität mit Werten um  $\Delta\phi \approx 0,1 \%$  zurück.

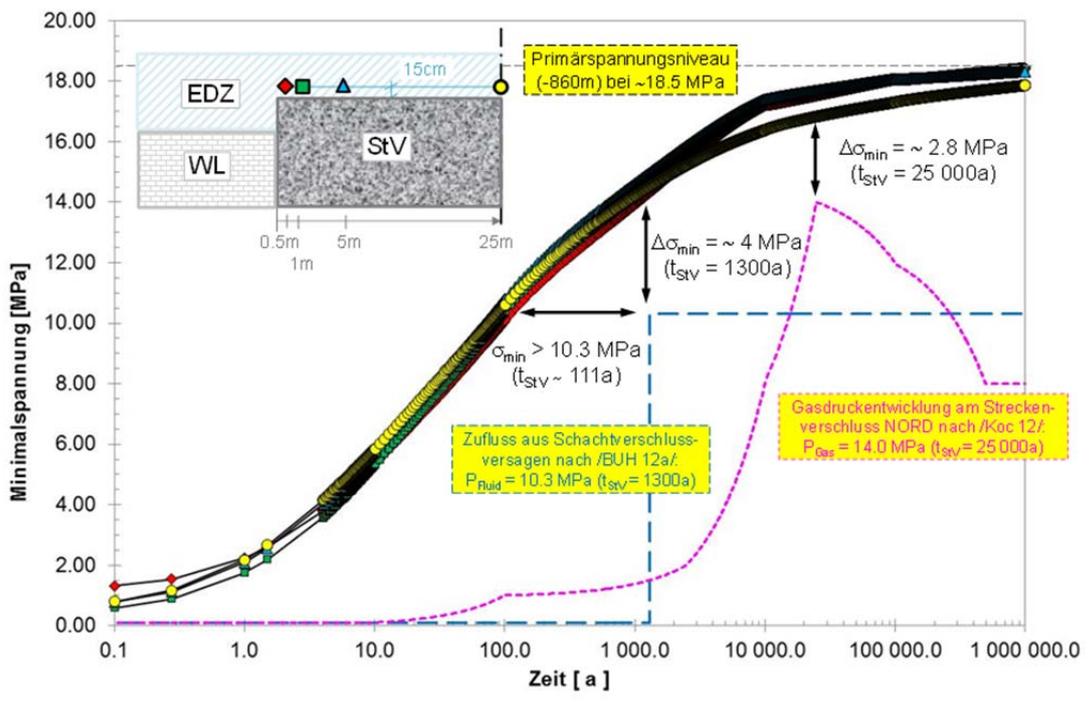
An dieser Stelle ist abermals zu bemerken, dass erstens die einseitige Kopplung mit dem Gasdruck die tatsächlichen Verhältnisse nur ungenau abbildet und dass zweitens die Rückbildung der Auflockerungszone noch Forschungsthema ist.

Das für den ingenieurtechnischen Nachweis herangezogene Fluiddruckkriterium für den effektiven Porendruck weist dauerhaft effektive Spannungen im Druckbereich aus, es ist also erfüllt. Eine Zunahme der Permeabilität über den Anfangswert in der nachgeschnittenen ALZ hinaus kann also ausgeschlossen werden.

#### **8.6.5 Plausibilitätsbetrachtung zur Einwirkungskombination einseitiger Lösungs- und Gasdruck**

Maßgeblicher Lösungsdruck an den Streckenverschlüssen Ost, Mitte und West tritt ausschließlich im Fall eines frühzeitigen Schachtverschlussversagens und dann frühestens nach 1.300 Jahren auf. Er steigt bis auf  $10,3 \text{ MPa}$  an und verbleibt auf diesem Niveau. Er wird für den fiktiven Streckenverschluss angesetzt. Der Gasdruck für den fiktiven Streckenverschluss ist zu diesem Zeitpunkt geringer und beginnt erst nach etwa 10.000 Jahren den Lösungsdruck zu übersteigen, verbleibt aber jeweils unter

halb der kleinsten Hauptspannung, vgl. Abb. 8.8 und Abb. 8.13. Daraus lässt sich ableiten, dass sich die Rekompaktion der ALZ verringert, das Ausgangsniveau von  $k = 5E-17 \text{ m}^2$ , das weiterführenden Berechnungen zugrunde gelegt wird, aber nicht überschritten wird. Damit ist auch für die Einwirkungskombination einseitiger Lösungs- und Gasdruck der Nachweis der Rissbeschränkung in der ALZ für den fiktiven Streckenverschluss geführt. Er ist abdeckend für die Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost.



**Abb. 8.13** Vergleichende Darstellung des Spannungszustandes in der ALZ und des einseitigen Lösungs- und Gasdruckes

## **9 Zusammenfassende Bewertung für den Streckenverschluss**

Die Streckenverschlüsse sind Bestandteil des Verschlussystems, das dazu dient, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den endgelagerten, radioaktiven Abfällen möglichst zu verhindern bzw. die Freisetzung von Radionuklidinventaren auf allenfalls geringfügige Mengen zu begrenzen. In /MÜL 12a/ wurden auf Basis der Szenarienentwicklung fünf Bemessungssituationen identifiziert und zwar die Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, „Referenzszenarium mit Erdbeben“, „Versagen des Schachtverschlusses“, „Versagen des Streckenverschlusses“ sowie die modifizierte Einwirkung „eine Kriechklasse unter-/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“, die im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation zu behandeln ist, vgl. Kapitel 3.2.

In Bezug auf die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse sind, mit Ausnahme der Bemessungssituation „Versagen des Streckenverschlusses“, die für die Streckenverschlüsse selbst nicht relevant ist, die verbleibenden Bemessungssituationen zu betrachten. Da insgesamt vier Streckenverschlüsse konzipiert sind, die sich durch ihre geometrischen und lokationsspezifischen Randbedingungen sowie durch die zeitlich veränderlichen Einwirkungen, denen sie in ihrer planmäßigen Funktionsdauer ausgesetzt sind, unterscheiden, war die individuelle Behandlung aller Streckenverschlüsse aus Zeitgründen nicht möglich. Weiterhin war der Schwierigkeit zu begegnen, dass für die Streckenverschlüsse auslegungsbestimmende, zeitliche veränderliche Einwirkungen – insbesondere die aus der Gasbildung der Abfälle resultierenden Zeitverläufe der Gasdrücke – erst zu einem späten Zeitpunkt des Projektverlaufs identifiziert und quantifiziert werden konnten. Aus diesem Grund wurde für die vertiefte Nachweisführung eine dem Projektverlauf schrittweise angepasste Vorgehensweise gewählt. Es wurden dem jeweiligen Kenntnisstand angepasste Rechenfälle gewählt, die sich im Zeitverlauf des Projektes als auslegungsrelevant darstellten. Im Rahmen der zusammenfassenden Bewertung wird nunmehr geprüft, ob diese „historisch“ gewachsenen Rechenfälle geeignet sind, eine Aussage bezüglich der Funktionsfähigkeit des Verschlussystems abzuleiten.

Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“ wurden im Rahmen der vertieften Nachweisführung keine Berechnungen durchgeführt<sup>44</sup>. Im Allgemeinen gilt, dass die Bemessungssituation Erdbeben bei geringen zusätzlichen Beschleunigungen, wie sie im Falle des Sicherheitserdbebens anzusetzen sind, die Auslegung nicht bestimmt, da die dynamischen Materialfestigkeiten (Widerstände) i. d. R. stärker anwachsen als die Beanspruchungen. Eine Ausnahme ist gegeben, wenn der Versagensmodus dem Schubversagen zuzuordnen ist und er weiterhin geometrisch nicht blockiert ist. Scherfestigkeiten können aufgrund der durch Erdbeben bedingten Normalspannungsreduktion sogar absinken. Dieser Fall betrifft ggf. die Kontaktzone, da Schubversagen in der Kontaktzone ein möglicher Versagensmodus ist. Da die Scherfestigkeit aber nur in geringem Umfang ausgenutzt wird, wird ein potenzielles Versagen der Kontaktzone als ausgeschlossen eingeschätzt. Dieser Sachverhalt ist allerdings noch zu belegen. Sollte sich wider Erwarten ergeben, dass Schubversagen maßgebend ist, kann dieser Fall konstruktiv beherrscht werden, vgl. Kapitel 11.

Nachfolgend werden die Berechnungsergebnisse für den fiktiven Streckenverschluss, der die ungünstigen Bedingungen des Streckenverschlusses Nord abdeckt (vgl. Tab. 8.2), zusammengefasst und auf die Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost übertragen.

Im Rechenfall „beidseitiger Gasdruck, der der Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ zugeordnet wird, kommt es für den fiktiven Streckenverschluss bei Ansatz von Kriechklasse 3 zu einer vollständigen Stagnation des Rekompaktionsprozesses der ALZ und sogar zu einer erneuten Porositätszunahme der ALZ, die allerdings nicht zu einer Überschreitung der Anfangspermeabilität führt. Ein anforderungsgerechter hydraulischer Widerstand ist also immer vorhanden. Im Rechenfall „einseitiger Lösungsdruck“, der der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ zugeordnet wird, hat sich zum Zeitpunkt des Lösungsdruckanstiegs nach 1.300 Jahren in der ALZ bereits ein so hoher Druck aufgebaut, dass das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck eingehalten ist. Diese Aussage kann auf den Fall der Einwirkungskombination einseitiger Lösungs- und einseitiger Gasdruck, der ebenfalls der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ zuzuordnen ist, über-

---

<sup>44</sup> Siehe Anmerkungen zur Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“ in Kapitel 7. Sie gelten auch für die Streckenverschlüsse.

tragen werden. Zum Zeitpunkt des Lösungsdruckaufbaus nach 1.300 Jahren ist die Auflockerungszone so eingespannt, dass das Fluidruckkriterium für den fiktiven Porendruck eingehalten wird. Der Gasdruck ist zu diesem Zeitpunkt noch gering und beginnt erst nach etwa 10.000 Jahren, den Lösungsdruck zu überschreiten. Da der Lösungsdruck nicht weiter ansteigt, sind für die Ausführungen zum Rechenfall beidseitiger Gasdruck für den fiktiven Streckenverschluss auch für den Fall einseitiger Lösungsdruck und einseitiger Gasdruck abdeckend, ein anforderungsgerechter hydraulischer Widerstand immer vorhanden. Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass für eine adäquate numerische Berechnung – hydromechanisch gekoppelter 2-Phasenfluss – weder die verfügbaren Modellierungswerkzeuge geeignet noch Parameter vorhanden waren. Auch die experimentelle Datengrundlage bedarf noch der Absicherung.

Für den fiktiven Streckenverschluss, an dem gemäß Tab. 8.2 die modifizierte Einwirkung Kriechklasse 2 zu betrachten wäre, kommt es schon bei Ansatz von Kriechklasse 3 zu einer vollständigen Stagnation des Rekompaktionsprozesses und einer erneuten Porositätszunahme der ALZ. Dieser Effekt verstärkt sich bei Ansatz von Kriechklasse 2, so dass ohne weitere Berechnung nicht ausgeschlossen werden kann, dass es zu einer Erhöhung der Permeabilität in der Auflockerungszone kommt, die den Anfangswert (Anforderung) übersteigt.

Dieser Fall wurde nicht untersucht, da er für den Streckenverschluss Nord gilt, der vor dem Hintergrund der Zielstellung, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den endgelagerten Abfällen zu unterbinden, nicht relevant ist. Für die Vermeidung eines Zutritts von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den Abfällen sind nur die Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost maßgeblich. Gemäß Tab. 8.2 ist für diese drei Streckenverschlüsse im ungünstigsten Fall als modifizierte Einwirkung Kriechklasse 3 anzusetzen. Dieser Fall wird durch die durchgeführten Berechnungen zum fiktiven Streckenverschluss abgedeckt.

Weiterhin ist anzumerken, dass eine Kombination von Lösungsdruck, der aus dem weniger wahrscheinlichen Szenarium „Versagen des Schachtverschlusses“ resultiert, und das weniger wahrscheinliche Szenarium der modifizierten Einwirkung „eine Kriechklasse unterhalb der wahrscheinlichen Bandbreite“ gemäß Szenarientwicklung im Sinne der Methodik prinzipiell nicht betrachtet werden muss. Trotzdem ist dieser Fall durch die Kriechklasse 3 an den Streckenverschlüssen West, Mitte und Ost abgedeckt, an denen die Lösung im Falle Schachtverschlussversagen ansteht.

Im Ergebnis der Übertragung der Berechnungsergebnisse am fiktiven Streckenverschluss auf die individuellen Streckenverschlüsse für die aufgeführten Bemessungssituationen lässt sich feststellen, dass die in Kapitel 8 vorhandenen Rechenfälle und Plausibilitätsbetrachtungen ausreichen, die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse in ihrer Anordnung gemäß Abb. 2.1 in Bezug auf die Zielstellung zu bewerten. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden kann, dass die Streckenverschlüsse in der geplanten Anordnung gemäß Abb. 2.1 ihre Funktion, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu Abfällen zu unterbinden, mit Bezug auf die thermischen, mechanischen, hydraulischen und chemischen Einwirkungen erfüllen. Diese Aussage bezieht sich auf die Streckenverschlüsse als Bestandteil des Verschlussystems und ihrem Zusammenwirken mit den Schachtverschlüssen.

Bei der Bewertung dieses Ergebnisses müssen zusätzlich folgende Punkte berücksichtigt werden.

- Bei den Berechnungen der GRS, die als Datenlieferant Datengrundlage für die Gasdruckentwicklung fungierten, wurde die Gasproduktion abhängig vom Ausgangswassergehalt der eingelagerten Abfälle berechnet und ist somit mengenmäßig begrenzt. Der Gasfluss fand bei diesen Berechnungen nur über die Verschlüsse selbst und nicht über die ALZ statt. Ein zusätzlicher Abfluss über die ALZ, der zwangsläufig zu einer Druckreduktion führen würde, wurde nicht berücksichtigt. Im vorliegenden Rechenfall wird dieser Gasdruck als Randbedingung aufgegeben, was einem unbegrenzten Gasvorrat entspricht.
- Einwirkungen aus Porengasdrücken werden nur mit einer einseitigen Kopplung berücksichtigt. Ein advektiver Strömungsprozess dem aufgebracht Druckgradienten folgend wird mangels entsprechender Materialdaten simuliert, ohne 2-Phasen-Fluss Effekte zu berücksichtigen.
- Die Nachweise der Rissbeschränkung werden ohne den stabilisierenden Einfluss des Lösungsdrucks auf die Stirnfläche der Streckenverschlüsse bzw. des entlastenden Porendruckes geführt. Sie sind somit abdeckend.

Aus diesen Gründen sowie aufgrund des Standes von Forschung und Entwicklung der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung kann den Berechnungen mit Gasdruck nur ein orientierender Charakter zugewiesen werden. Es ist anzunehmen, dass der Gasdruckeinfluss (bzw. der Gasdruck selbst) überschätzt wird, für eine detaillierte Betrachtung sind

jedoch gekoppelte Berechnungen erforderlich, die das „Gasreservoir“ und ein realistisches hydraulisches Verhalten einbeziehen.

Abschließend ist festzuhalten, dass mit Bezug auf die ingenieurtechnische Nachweissführung die Aussagen zur Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse in ihrer geplanten Anordnung Bestand haben, obwohl die Berechnungen mit Gasdruck nur einen orientierenden Charakter aufweisen.

Der Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes wurde geführt, da die zugrunde gelegten Kriterien für den Nachweis der Rissbeschränkung eingehalten sind. Der Nachweis der Rissbeschränkung deckt für die Streckenverschlüsse aus Sorelbeton A1, die kohäsiv mit der Streckenkontur verbunden sind, den Nachweis der Tragfähigkeit und den Nachweis der Verformungsbeschränkung ab. Der Nachweis der Filterstabilität braucht nicht geführt zu werden, da Sorelbeton A1 kein körniger Erdstoff ist, vgl. Anhang E.

Der Nachweis der Dauerhaftigkeit wurde bereits im Rahmen der Vorbemessung geführt.



## 10 Bewertung des Gesamtsystems

An dieser Stelle erfolgt für das konzipierte Verschlussystem abschließend die Zusammenfassung der Ergebnisse zur vertieften Nachweisführung unter Einbeziehung von Ergebnissen der Vorbemessung vor dem Hintergrund der Zielsetzung, den Nachweis zu führen, dass ein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den endgelagerten, radioaktiven Abfällen wenigstens für die wahrscheinlichen Entwicklungen nicht zu besorgen ist.

Vorauslaufend ist festzuhalten, dass für die Konzipierung des Verschlussystems am Standort Gorleben bereits ein hoher lokationsspezifischer Kenntnisstand vorliegt, da die Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2 bereits geteuft sind und drei der vier Streckenverschlüsse direkt unterhalb des EB1 angeordnet sind. Zum EB1 liegen Erkundungsergebnisse vor. Für das Verschlussystem bestehend aus Schacht- und Streckenverschlüssen sind deshalb nur noch die für den vierten Streckenverschluss Ost maßgeblichen Daten ungewiss, da sie dem EB3 zugeordnet werden.

Das konzipierte Verschlussystem ist nicht in jeder Hinsicht optimiert, da z. B. ausschließlich Materialien gewählt wurden, die großtechnisch erprobt sind und aus denen vergleichbare Komponenten bereits praktisch gebaut wurden, so dass die Herstellbarkeit gesichert ist. Den Komponenten lassen sich nachstehende Funktionen zuordnen:

- Abdichten (Dichtelemente)
- Stabilisieren (Widerlager)
- Verzögern und Druckreduzieren (Speicher)
- Abreichern (Opferschicht)
- Aufsättigen (Bischoffitdepot)

Da von bereits errichteten Komponenten an anderen Standorten wesentliche, für den Nachweis der Funktionsfähigkeit maßgebliche, technische Daten vorlagen /ENG 11a/, /LIN 12/, /MÜL 12b/ konnte beim Entwurf des Verschlussystems auf diese Daten zurückgegriffen werden. Sie wurden weiterhin den Projektpartnern zu einem frühen Zeitpunkt im Vorhabensverlauf mitgeteilt, so dass nicht nur die Endlagerplanung, sondern auch die Sicherheitsanalysen zur geologischen Barriere /KOC 12a/ und zur Langzeitsicherheit /LAR 13/ auf dieser realistischen Datenbasis durchgeführt werden konnten.

Somit liegt den Planungen und Sicherheitsanalysen bezüglich der geotechnischen Barrieren eine gut abgesicherte Datenbasis zugrunde.

Auf Basis des zunächst vorbemessenen Verschlussystems erfolgten die Prozessanalysen in /KOC 12a/ und /LAR 13/. Die Vorbemessung führte nur zu geringfügigen Modifikationen des Verschlussystems. Im Wesentlichen sind zu nennen die Komponenten Opferschicht und Bischofitdepot, die im Verlauf der geochemischen Vorbemessung /XIE 12/ in das Verschlussystem integriert wurden, sowie ein dräniertes Widerlager, das nachträglich eingeführt wurde, da im Rahmen der zeitlich parallel verlaufenden Szenarienentwicklung festgestellt wurde, dass für das Verschlussystem das Sicherheitserdbeben auch zu einem frühen Zeitpunkt anzusetzen ist /BEU 12/, /WOL 12a/. Zu diesem frühen Zeitpunkt ist die Schottersäule des Schachtverschlusses noch nicht durch Gebirgskonvergenz eingespannt.

Für das aus der Vorbemessung resultierende Verschlussystem erfolgte eine vertiefte Nachweisführung, die Gegenstand dieses Berichtes ist.

Für das Verschlussystem wurden fünf Bemessungssituationen identifiziert /MÜL 12a/ und zwar die Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, „Referenzszenarium mit Erdbeben“, „Versagen des Schachtverschlusses“, „Versagen des Streckenverschlusses“ sowie die modifizierte Einwirkung „schnelleres/langsames Kriechen infolge einer Kriechklasse unter-/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“, die im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation zu behandeln ist.

### **Schachtverschluss**

Auf Basis vorlaufender Betrachtungen und Kalibrierungsberechnungen zu den Kriechklassen anhand von vorhandenen in situ Messergebnissen konnten für den Schachtverschluss drei der fünf Bemessungssituationen als nicht relevant ausgeschlossen werden, so dass für den Schachtverschluss nur die Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, und „Referenzszenarium mit Erdbeben“ zu behandeln waren. Weiterhin konnte auf Grundlage der Berechnungsergebnisse zur Validierung der thermomechanischen Randbedingungen aus dem BGR-Fernfeldmodell, das den Einlagerungsbereich umfasst, für den Schachtverschluss gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der thermomechanischen Randbedingungen den FEP *Diapirismus* mit abdeckt.

Im Rahmen der vertieften Nachweisführung wurde das Schachtverschlussystem sowohl unter Berücksichtigung der thermomechanischen Einwirkungen des Endlagers (Berechnungsmodell „heißer Schacht“) als auch unter den Bedingungen der Gebirgstemperatur ohne Einwirkungen des Endlagers (Berechnungsmodell „kalter Schacht“) behandelt. Diese beiden Modelle decken eine große Bandbreite möglicher Anordnungen von Einlagerungsfeldern ab, da das Berechnungsmodell „heißer Schacht“ die Anordnung von Einlagerungsfeldern unterhalb des EB1 umfasst, also in größtmöglicher Nähe des Schachtes Gorleben 1. Das Berechnungsmodell „kalter Schacht“ entspricht der Anordnung von Einlagerungsfeldern in so großer Entfernung vom Schacht, dass die thermomechanischen Einwirkungen vernachlässigt werden können.

Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ wurden für den Schachtverschluss Berechnungsergebnisse erzielt, die in Verbindung mit der Vorbemessung sowie ergänzend auf Grundlage von Versuchsdaten folgende Aussagen zulassen.

Bei ordnungsgemäßer Bauausführung und hinreichend langsamem Lösungsdruckaufbau wird das 1. Dichtelement aus Bentonit in Verbindung mit den ihm zugeordneten Funktionselementen Filter und Widerlager seine Funktion bezüglich der mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen anforderungsgerecht erfüllen, da das Fluiddruckkriterium nur temporär und lokal verletzt ist, das Auflockerungskriterium aber eingehalten wird. Obwohl aus den Berechnungsergebnissen aufgrund der langen Rechenzeiten für die notwendigen hydromechanisch gekoppelten Berechnungen nur eine Trendaussage abgeleitet werden kann, wird diese Trendaussage durch die Versuchsergebnisse des Großversuchs „Schachtverschluss Salzdörfurth“ zusätzlich gestützt. Für die betrachteten Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen kann eine positive Eignungsprognose in Bezug auf die Funktionsfähigkeit des Dichtelementes aus Bentonit abgegeben werden, Einzelaspekte sind allerdings noch abzusichern, vgl. Kapitel 12.

Die chemischen Einwirkungen auf das 1. Dichtelement aus Bentonit resultieren aus den möglichen Zusammensetzungen der Deckgebirgsässer unter Berücksichtigung zusätzlicher Zementphasen, die aus dem deckgebirgsseitigen Schachtausbau resultieren. Hierzu erfolgten keine rechnerischen Analysen, der Effekt wird von Experten als vernachlässigbar gering eingestuft. Die Einschätzung ist zu belegen, siehe Kapitel 12.

Bei ordnungsgemäßer Bauausführung und Lösungsdruckbeaufschlagung gemäß Vorbemessung wird das 2. Dichtelement aus Salzbeton in Verbindung mit den ihm zugeordneten Widerlagern seine Funktion bezüglich der mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen anforderungsgerecht erfüllen. Für die Berechnungsergebnisse zum „heißen Schacht“ gilt die Aussage uneingeschränkt, für die Berechnungsergebnisse zum „kalten Schacht“ ist nur eine Trendaussage möglich, da belastbare Ergebnisse aus hydromechanisch gekoppelten Berechnungen nicht erzielt wurden. Die Verletzung des Fluiddruckkriteriums für den fiktiven Porendruck im Falle der Berechnungen zum kalten Schacht ist jedoch so gering, dass eingeschätzt werden kann, dass bei Ansatz des effektiven Fluiddruckkriteriums im Rahmen hydromechanisch gekoppelter Berechnungen das effektive Fluiddruckkriterium eingehalten wird. Diese Trendaussage wird durch den Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ untermauert, der die positive Wirkung des Lösungsdrucks „von oben“ tendenziell belegt. Bei Bewertung der Berechnungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass noch Ungewissheiten bezüglich der Spannungsauswertung bei Annäherung an die möglicherweise Zwangsspannungen unterworfenen Kontaktzone bestehen. Trotz dieser Ungewissheit, die in Bezug auf die Kontaktzone hinsichtlich der Berechnungsergebnisse herrscht, belegen orientierende Versuchsergebnisse am Asse-Vordamm /BFS 10/, dass die Zwangsspannungen im Kontaktbereich nicht zu Permeabilitätswerten führen, die die Erfüllung der Funktionsanforderungen in Frage stellen. Für die genannten Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen kann eine positive Eignungsprognose in Bezug auf die Funktionsfähigkeit des Dichtelementes aus Salzbeton abgegeben werden, Einzelaspekte sind allerdings noch abzusichern, vgl. Kapitel 12.

Die chemischen Einwirkungen auf das 2. Dichtelement aus Salzbeton resultieren aus den durch das Bentonitdichtelement durchgetretenen und dadurch veränderten Deckgebirgswässern sowie schachtinternen Lösungen. Hierzu wurden geochemische Berechnungen durchgeführt, die zeigten, dass die vorgesehene Opferschicht prinzipiell ausreicht, das Korrosionspotenzial der zutretenden Salzlösungen abzubauen. Eine Ungewissheit besteht bezüglich lokalisierter Korrosion in der Kontaktzone. Der Einfluss lokalisierter Korrosion wird aufgrund der Bodensatzbildung der korrodierten Zementphasen als gering eingestuft. Die Einstufung ist durch vertiefte Untersuchungen der Kontaktzone zu belegen, siehe Kapitel 12.

Für das 3. Dichtelement aus Sorelbeton gelten bezüglich der mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen die gleichen Aussagen wie für das 2. Dichtelement aus Salzbeton. Bezüglich der chemischen Einwirkungen, bei denen es sich um

die durch das Salzbetondichtelement durchtretenden Lösungen handelt, die bis zur Sorelbetonstabilität mit Bischofit an  $MgCl_2$  aufgesättigt werden, besitzen kein Korrosionspotential gegenüber dem 3. Dichtelement aus Sorelbeton. Die geochemische Langzeitstabilität ist somit gewährleistet. Weiterer Untersuchungsbedarf wird nicht abgeleitet.

Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“ wurden für den Schachtverschluss in der vertieften Nachweisführung keine Untersuchungen durchgeführt, die über den Stand der Vorbemessung hinausgehen.

Im Rahmen der Vorbemessung wurden die erdbebeninduzierten Setzungen der Schotter säule konservativ abdeckend auf analytischer Basis abgeschätzt. Sie erwiesen sich im Vergleich mit ausschließlich durch Auflast bedingten Setzungen als auslegungsbestimmend. Bedingt durch die Einführung des dränierten Widerlagers blieb die Auflockerung des Dichtelementes aus Bentonit innerhalb tolerierbarer Grenzen von 3 Volumen-%. Bezüglich des 2. und 3. Dichtelementes aus Salz- und Sorelbeton kam folgende Plausibilitätsbetrachtung zur Anwendung: Im Allgemeinen gilt, dass die Bemessungssituation Erdbeben bei geringen zusätzlichen Beschleunigungen, wie sie im Falle des Sicherheitserdbebens anzusetzen sind, die Auslegung nicht bestimmt, da die dynamischen Materialfestigkeiten und Steifigkeiten (Widerstände) i. d. R. stärker anwachsen als die Beanspruchungen. Eine Ausnahme ist gegeben, wenn ein Versagensmodus auftritt, der dem Scherversagen zuzuordnen ist, und er weiterhin geometrisch nicht blockiert ist. Scherfestigkeiten können aufgrund der durch Erdbeben bedingten Normalspannungsreduktion absinken. Dieser Fall betrifft ggf. die Kontaktzone, da Schubversagen in der Kontaktzone ein potenzieller Versagensmodus ist. Da die Scherfestigkeit nur in geringen Maß ausgenutzt wird, wird Versagen in der Kontaktzone infolge Erdbeben als ausgeschlossen eingeschätzt. Dieser Sachverhalt ist jedoch vertieft zu untersuchen, da er im Rahmen der VSG aufgrund seines Aufwandes nicht behandelt werden konnte, siehe Kapitel 12. In diesem Zusammenhang kann auch die Frage erdbebeninduzierter, möglicherweise zu berücksichtigender erhöhter Poren(wasser) drücke behandelt werden.

Im Ergebnis der Vorbemessung und der vertieften Nachweisführung für den Schachtverschluss Gorleben 1 lässt sich feststellen, dass für diesen eine positive Prognose bezüglich seiner Funktionsfähigkeit gegeben werden kann, obwohl nicht alle Nachweise detailliert geführt wurden. Besonders hervorzuheben ist, dass der Schachtverschluss im Ergebnis der Vorbemessung drei unabhängige, voneinander entkoppelte

Dichtelemente mit jeweils eigenen Widerlagern aufweist, so dass es unwahrscheinlich ist, dass der Schachtverschluss als Ganzes seine Funktionsfähigkeit verliert. Das weniger wahrscheinliche Szenarium „Versagen des Schachtverschlusses“, das für die Streckenverschlüsse betrachtet wird, ist damit sehr konservativ.

### **Streckenverschlüsse**

Anders als im Falle des Schachtverschlusses konnten von den fünf Bemessungssituationen nur die Bemessungssituation „Versagen des Streckenverschlusses“ von der Betrachtung ausgeschlossen werden, da ein Versagen der Streckenverschlüsse bei planmäßiger Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses von untergeordneter Bedeutung ist, da der Zutritt von Tages- und Deckgebirgslösungen solange verzögert wird, dass die Funktion der Streckenverschlüsse von kompaktierten Salzgrus übernommen wird. Die geringe Menge von Formationslösungen können von Grubenbauen des Infrastrukturbereichs, die unterhalb der Einlagerungssohle liegen, z. B. den Schachtsümpfen, aufgenommen werden. Da weiterhin vier Streckenverschlüsse zu untersuchen waren, wurde – um in der verfügbaren Zeit ein belastbares Ergebnis zu erzielen – ein fiktiver Streckenverschluss untersucht, bei dem die für die vier Streckenverschlüsse geltenden Randbedingungen und Einwirkungen so ungünstig kombiniert wurden, dass in Hinblick auf die Zielstellung der fiktive Streckenverschluss alle vier Streckenverschlüsse abdeckt. Der fiktive Streckenverschluss besitzt die Geometrie und die lokationsspezifischen Randbedingungen des Streckenverschlusses Nord. Ihm wird ein für den Streckenverschluss West geltender Temperaturverlauf bzw. isotherme Bedingungen zugeordnet sowie die Gasdruckentwicklung am Streckenverschluss Nord und eine Lösungsdruckentwicklung gemäß den Streckenverschlüssen Ost, Mitte und West.

Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ ist der fiktive Streckenverschluss mit Kriechklasse 3 unter isothermen Bedingungen und maximaler Gasdruckentwicklung zu behandeln.

Für die Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ ist der fiktive Streckenverschluss mit Kriechklasse 4 unter isothermen Bedingungen und Lösungsdruck zu betrachten. Er ist bei Wahl der ungünstigeren Kriechklasse 3 unter isothermen Bedingungen mit abgedeckt. Für die Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ ist weiterhin die kombinierte Einwirkung Lösungs- und Gasdruck zu behandeln.

Die modifizierte Einwirkung „schnelleres/langsameres Kriechen infolge einer Kriechklasse unter-/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“ wird im Sinne der Zielsetzung, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen zu den endgelagerten radioaktiven Abfällen zu verhindern, für die Streckenverschlüsse Ost, Mitte und West mit Kriechklassen  $\geq 4$  durch die Kriechklasse 3 des fiktiven Streckenverschlusses abgedeckt.

Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“ wurden im Rahmen der vertieften Nachweisführung keine Berechnungen durchgeführt. Die Ausführungen zum Schachtverschluss gelten auch für den Streckenverschluss.

Die Berechnungsergebnisse für den fiktiven Streckenverschluss, der den Streckenverschluss Nord abdeckt, werden nachstehend zusammengefasst und auf die für den Lösungspfad maßgeblichen Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost übertragen.

Im Fall beidseitigen Gasdrucks, der der Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ zugeordnet wird, kommt es für den fiktiven Streckenverschluss bei Ansatz von Kriechklasse 3 zu einer vollständigen Stagnation des Rekompaktionsprozesses der ALZ und sogar zu einer erneuten Porositätszunahme der ALZ, die allerdings nicht zu einer Überschreitung der Anfangspermeabilität führt. Ein anforderungsgerechter hydraulischer Widerstand ist also immer vorhanden. Im Rechenfall einseitiger Lösungsdruck, der der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ zugeordnet wird, hat sich zum Zeitpunkt des Lösungsdruckanstiegs nach 1.300 Jahren in der ALZ bereits ein so hoher Druck aufgebaut, dass das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck erfüllt ist. Diese Aussage kann auf den Fall der Einwirkungskombination einseitiger Lösungs- und einseitiger Gasdruck, der ebenfalls der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ zuzuordnen ist, übertragen werden. Die Ausführungen zum Rechenfall beidseitiger Gasdruck sind dafür abdeckend, ein anforderungsgerechter hydraulischer Widerstand ist immer vorhanden.

Die modifizierte Einwirkung Kriechklasse 2, die für den fiktiven Streckenverschluss zu betrachten wäre, ist für die für den Lösungspfad maßgeblichen geplanten Streckenverschlüsse nicht relevant und braucht deshalb nicht betrachtet zu werden.

Im Ergebnis der Berechnungen zum fiktiven Streckenverschluss und der Übertragung der Berechnungsergebnisse auf die geplanten Streckenverschlüsse für die aufgeführten Bemessungssituationen lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse ausreichen, um

die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse in ihrer Anordnung gemäß Abb. 2.1 in Bezug auf die Zielstellung zu bewerten.

Aus den Ergebnissen kann eine positive Prognose in Bezug auf die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse in ihrer geplanten Anordnung gegeben werden. Für die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse sind insbesondere die verzögernden und druckreduzierenden Funktionselemente des Verschlussystems – insbesondere die Infrastrukturbereiche – von Bedeutung, die auch bei Versagen des Schachtverschlusses einen schnellen konvergenzbedingten Druckaufbau in der Auflockerungs- und Kontaktzone, der durch einen poredruckbedingten Gegendruck nicht verlangsamt wird, ermöglichen. In Bezug auf die geochemische Langzeitstabilität der Streckenverschlüsse ist die Aufsättigung mit  $MgCl_2$  durch das vorlaufend angeordnete Bischofitdepot von entscheidender Bedeutung. Deshalb bezieht sich die positive Prognose auf die Streckenverschlüsse als Bestandteil des konzipierten Verschlussystems und im Zusammenwirken mit den übrigen Funktionselementen.

### **Verschlussystem**

Für das geplante Verschlussystem bestehend aus Schacht- und Streckenverschlüssen sowie weiteren Funktionselementen wurden im Rahmen der Vorbemessung und der vertieften Nachweisführung für die behandelten mechanischen, thermischen, hydraulischen und chemischen Einwirkungen folgende in Abb. 3.1 aufgeführten, ingenieurtechnischen Einzelnachweise zur Integrität des Verschlussystems geführt bzw. betrachtet:

- Tragfähigkeit
- Rissbeschränkung
- Verformungsbeschränkung
- Dauerhaftigkeit (Langzeitstabilität)

Der Nachweis der Filterstabilität wurde nur beschrieben; er bedarf einer vertieften Planung auf dem Niveau einer Ausführungsplanung im Vorfeld. Es bestehen jedoch keine Zweifel, dass er geführt werden kann, da es sich einerseits um einen Nachweis nach dem Stand der Technik handelt und andererseits für die Filter noch hinreichende Planungsfreiheit besteht. Im Ergebnis der ingenieurtechnischen Einzelnachweise kann

zusammenfassend festgestellt werden, dass das Verschlussystem seinen plangemäß angesetzten hydraulischen Widerstand erreicht.

Die Einzelnachweise wurden mit unterschiedlichem Tiefgang behandelt. Es wurden Berechnungen und Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt sowie Trendaussagen abgeleitet, zu deren Absicherung auf Versuchsergebnisse verwiesen wurde. Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“ wurde auf empirische Erfahrungen zurückgegriffen.

Da die Einzelnachweise zur Bauwerksintegrität in ihrem jeweiligen Tiefgang erfolgreich geführt werden konnten, kann für das geplante Verschlussystem auch eine positive Prognose bezüglich seiner hydraulischen Funktionsfähigkeit gegeben werden, d. h., der eingangs spezifizierte hydraulische Widerstand wird erreicht.

Da für die Nachweisführungen – mit Ausnahme des Streckenverschlusses Ost – auf in situ Daten (Erkundungsdaten) zu den Abdichtlokalationen zurückgegriffen werden konnte und die verwendete technische Datenbasis zu den Komponenten weitestgehend gesichert ist, besitzen die geführten Einzelnachweise eine hohe Prognosezuverlässigkeit. Dabei ist hervorzuheben, dass durch die Nachweisführungen eine sehr große Bandbreite der Anordnung möglicher Einlagerungsfelder (Streckenlagerung) für wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle abgedeckt wird, so dass praktisch unabhängig von späteren Erkundungsergebnissen und der damit verbundenen tatsächlichen Anordnung der Einlagerungsfelder, die positive Prognose bezüglich der Funktionsfähigkeit des Verschlussystems bestehen bleibt.

Abschließend wird vorsorglich überprüft, ob alle in Kapitel 3.1 aufgeführten Einwirkungen in den Einzelnachweisen der Vorbemessung oder der vertieften Nachweisführung berücksichtigt wurden.

Es ist festzustellen, dass die durch Temperaturänderungen ausgelösten chemischen Einwirkungen nicht explizit angesprochen wurden. Dies betrifft sowohl die Barrierenbaustoffe als auch die zutretende Salzlösung, insbesondere wenn sie, wie im Fall der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“, in größerer Menge erwärmte Bereiche erreicht. Während der Baustoff Sorelbeton schon in seiner Erhärtungsphase Temperaturen ausgesetzt ist, die über den ermittelten Temperaturen an den Lokationen der Streckenverschlüsse infolge der Wärmeproduktion der eingelagerten Abfälle liegen, ist dieser Fall für die Baustoffe abgedeckt. Das erhöhte Lösungs-

tential erwärmter Salzlösungen bedarf jedoch zusätzlicher Betrachtungen (FEP *Auflösung und Ausfällung*). In Bezug auf die  $MgCl_2$ - Aufsättigung wurde diesem Sachverhalt empirisch Rechnung getragen, indem das Bischofitdepot im Infrastrukturbereich mit Überschuss geplant wurde /XIE 12/, /ENG 12/. Das erhöhte Lösungspotential an NaCl wurde nicht quantifiziert; die Bearbeitung ist dem FuE-Bedarf zuzuordnen, vgl. Kapitel 12. Dabei sind auch konstruktive Alternativen, z. B. die Anordnung eines zusätzlichen Streckenverschlusses im schachtnahen Bereich, der die Menge an Salzlösung in den erwärmten Bereichen und damit das Lösungspotential zusätzlich beschränkt, denkbar. Dazu ist jedoch anzumerken, dass nach derzeitigem Erkundungsstand im Bereich des Schachtes Gorleben 1 ein solcher Streckenverschluss nur sinnvoll angeordnet werden kann, wenn der Anschluss der Einlagerungssohle an den Schacht im Teufenniveau von etwa 880 m im Süden durch das Anhydritmittelsalz erfolgt. Dies sollte bei der Weitererkundung berücksichtigt werden, damit dieser Bereich nicht durch bergbauliche Auffahrungen wie Nischen und Bohrorte (Bohrungen) für Abdichtungszwecke unbrauchbar wird.

Die Einwirkung Zwangsverformung (FEP *Diapirismus*) wurde für die Streckenverschlüsse nicht betrachtet. Die Streckenverschlüsse liegen im gleichen Teufenniveau und eine gleichmäßige Hebung sowie eine beschränkte Neigung sind für sie unschädlich. Größere Neigungen können konstruktiv durch Segmentierung beherrscht werden. Deshalb beschränkt sich ihre Gefährdung auf Bereiche, wo gegenläufige Verformungen möglich sind, z. B. im Bereich von Sattelachsen oder Schichtgrenzen mit ausgeprägt unterschiedlichem Verformungsverhalten, das zu stark lokalisierter Verformung führen kann. In diesen Bereichen ist die Anordnung von Abdichtkörpern zu vermeiden. Ist das nicht möglich oder wie am Beispiel der Gorlebenbank nicht gewollt, sollte das langfristige Verhalten dieser Bereiche möglicherweise lokalisierter Verformungen vertieft betrachtet werden. Da Schichtgrenzen nichts anderes darstellen als natürliche Kontaktzonen, gelten für sie die Ausführungen zu Kontaktzonen in Kapitel 12.

## 11 Optimierung

Voraussetzung für eine Optimierung des Verschlussystems ist eine vollständige Liste der übergeordneten Funktionsanforderungen. Weiterhin ist eine Beschreibung der Funktionsweise erforderlich. Daraus leiten sich Funktionsanforderungen an die einzelnen Funktionselemente ab, die zusammenzustellen und für die die technischen Einzelnachweise zu führen sind. Diese Nachweisführung muss i. d. R. vollständig vorliegen, d. h., es sind exemplarisch alle Einzelnachweise vorhanden. Damit ist mit den übergeordneten Funktionsanforderungen die Zielfunktion der Optimierung gegeben, der vorliegende Funktionsentwurf und die vorliegende Nachweisführung einschließlich der Einzelnachweise bilden den Startvektor. Sind weitere Nebenbedingungen, z. B. Kosten, zu berücksichtigen, sind diese ebenfalls zu listen.

Bezüglich des vorliegenden Funktionsentwurfs für das Verschlussystem ist anzumerken, dass es im Vergleich zu anderen Verschlussystemen (z. B. Schachtverschlüsse Asse und Morsleben) eine (von mehreren) mögliche technische Lösung darstellt, die nach heutigem Kenntnisstand die Funktionsanforderungen erfüllt. Weiterhin bestehen grundsätzlich nachstehende Optimierungsmöglichkeiten:

- Geometrische Optimierung des bestehenden Verschlussystems bezüglich der Abfolge und Größe von Dichtelementen und Speicherelementen, um eine möglichst lange Verzögerung des Salzlösungszutritts in den Infrastrukturbereich zu erzielen. Ggf. ist auch eine geometrische Optimierung der einzelnen Funktionselemente bezüglich ihrer Form möglich oder notwendig, z. B. die Verwendung konischer oder verzahnter Geometrien sowie im Bereich des Bentonitdichtelementes ein allmählicher Übergang zwischen nachgeschnittener und nicht nachgeschnittener Schachtkontur. Der Nachweis der Herstellbarkeit bzw. die fehlerarme Herstellung ist dabei allerdings gezielt zu überprüfen, da komplexere Geometrien schwieriger herzustellen sind und damit die Wahrscheinlichkeit von Herstellungsfehlern steigt.
- Materialoptimierung der einzelnen Funktionselemente unter Nutzung vergleichbarer oder ähnlicher Materialien. Als Beispiel hierfür könnte z. B. der Austausch des gewählten Bentonits Calcigel gegen einen MX80 dienen, der weniger austauschbares Magnesium enthält. Auch die Wahl des Salzbetons TYP Asse für das dränierte Widerlager ist nicht zwingend. Alternativen könnten Solebeton oder mit Salzelementsuspension verfestigter Schotter bilden. Auch können ggf. die vorgeschlagene

nen Salz- und Sorelbetonrezepturen mit Bezug auf den Anwendungszweck optimiert werden.

Weiterhin ist als Optimierungsmaßnahme prinzipiell ein Ersatz oder ein teilweiser Ersatz des verdichteten Salzgruses durch geschnittene Salzformsteine denkbar, um eine niedrigere Anfangsporosität der Langzeitdichtung zu erreichen und den Druckaufbau und damit die Dichtwirkung zu beschleunigen. Erste orientierende Voruntersuchungen zu dieser Optimierungsmaßnahme wurden im Rahmen der VSG am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durchgeführt.

Den bisher beispielhaft aufgeführten Optimierungsmöglichkeiten ist gemeinsam, dass die für den vorliegenden Funktionsentwurf vorhandenen Einzelnachweise zwar angepasst werden müssen, d. h., sie sind neu zu führen und ein ausreichendes Zuverlässigkeitsniveau ist zu gewährleisten. Die Grundstruktur der Nachweisführung und die zu führenden Einzelnachweise bleiben jedoch erhalten. Ausgenommen davon ist der Nachweis der Herstellbarkeit, der im Einzelfall neu zu führen ist.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten bestehen ggf. durch Einführung weiterer Funktionselemente, z. B:

- Diversitäre Dichtelementen aus Asphalt/Bitumen (Kurzzeitdichtung)
- Äquipotenzialsegmenten zur Vergleichmäßigung der Aufsättigung des Bentonits
- Aufbringen einer Bentonitsuspension als thixotrope Stützflüssigkeit auf das obere Dichtelement, um die schwierige Anfangsphase bei der gezielten Aufbringung des Lösungsdrucks einfacher zu gestalten

Dabei ist jedoch festzuhalten, dass der vorhandene Entwurf nach heutigem Kenntnisstand die Funktionsanforderungen erfüllt. Bei Modifikationen zum Zweck der Optimierung ist zu gewährleisten, dass

(1) die Herstellbarkeit weiterhin gesichert ist und

(2) der Funktionsnachweis für das Verschlussystem bzw. die erforderlichen Einzelnachweise für die zusätzlichen Funktionselemente mit adäquater Zuverlässigkeit geführt werden können.

Sind (1) und (2) nicht gegeben, zieht eine vermeintliche Optimierung offene Fragen nach sich und es besteht die Gefahr, dass eine „gefühlte“ Verbesserung durch eine Verringerung des Zuverlässigkeitsniveaus erkaufte wird und somit kontraproduktiv ist.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass bei Einführung neuer Materialien und Funktionselemente sich nicht nur die Nachweisführung ändert, sondern auch neue FEPs bzw. Einwirkungen zu berücksichtigen sind, z. B. biologische Einwirkungen /GDA 97/ bei der Verwendung organischer Materialien.

Eine konkrete Verbesserung für das entworfene Verschlussystem drängt sich im Ergebnis der vertieften Nachweisführung jedoch auf. Durch den Anschluss des Schachtes an den bestehenden Infrastrukturbereich der Erkundungssohle wird ein dreiteiliges 3. Dichtelement aus Sorelbeton erforderlich, vgl. Anhang 4 in /MÜL 12a/. Dieses könnte durch einen schachtnahen infrastrukturseitigen Streckenverschluss aus Sorelbeton ersetzt oder besser ergänzt werden. Dieser dürfte sich insbesondere im weniger wahrscheinlichen Szenarium „Schachtverschlussversagen“ positiv auswirken. Weiterhin liegt er bezogen auf den Einlagerungsbereich hinter dem großen Gasspeichervolumen des Infrastrukturbereichs der Einlagerungssohle, so dass die möglicherweise hohen Gasdrücke zu frühen Zeiten, die aus der Gasbildung resultieren und die die derzeit geplanten Streckenverschlüsse belasten (Kapitel 8.6), über den Infrastrukturbereich Einlagerungssohle abgebaut werden. Damit werden die Gasdrücke, die derzeit noch mit hoher Prognoseunsicherheit behaftet sind, durch diese konstruktive Maßnahme von vornherein beherrscht und die Prognoseunsicherheit bezüglich des Gasdruckaufbaus beeinflusst die Aussagen zur Funktionsfähigkeit des Verschlussystems nur noch in vernachlässigbarem Umfang.

Weiterhin wird der Einfluss von temperaturinduzierten Änderungen des Lösungspotenzials im weniger wahrscheinlichen Szenarium „Schachtverschlussversagen“ minimiert, da dieser zusätzliche Streckenverschluss nur geringen Temperaturerhöhungen ausgesetzt ist. Analog zur Betrachtung der Gasdrücke wird damit die Prognoseunsicherheit verringert.



## 12 Zusammenstellung identifizierter notwendiger FuE-Arbeiten

Im vorliegenden Bericht und im Bericht „Teil 1 Vorbemessung“ /MÜL 12a/ wurde ein Verschlusssystem für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und optional auch für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung entworfen und seine konzeptuelle Auslegung vorgenommen, d. h., es wurde der Nachweis seiner anforderungsgerechten Funktionsfähigkeit geführt. In Abhängigkeit von

- dem Kenntnisstand bezüglich der zu berücksichtigenden Prozesse,
- der verfügbaren Datenlage,
- der Notwendigkeit einer vertieften Nachweisführung<sup>45</sup> und
- der Möglichkeiten, die die verwendeten Rechenprogramme bieten,

liegen der Nachweisführung Einzelnachweise zugrunde, die in unterschiedlichem Tiefgang geführt wurden. In Zusammenhang mit der Nachweisführung wurden Fragestellungen identifiziert, für die weitergehenden Untersuchungen, die über den Zeit und Kostenrahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse GORleben hinausgehen, als notwendig angesehen werden. Im Folgenden werden diese Fragestellungen zusammenfassend beschrieben.

Vorauslaufend ist jedoch anzumerken, dass nicht nur FuE-Bedarf identifiziert wurde, sondern auch Fragestellungen, die nicht berücksichtigt werden konnten, weil entweder Kennwerte nicht verfügbar waren, obwohl ihre Bestimmung Stand der Technik ist oder der Zeit- und Kostenrahmen der VSG nicht ausreichte, um Fragestellungen – in der Regel Einzelnachweise – vertieft zu behandeln. Sie wurden deshalb nur im Tiefgang der Vorbemessung, auf Basis von Plausibilitätsbetrachtungen oder empirischen Erfahrungen bearbeitet. Dies betrifft insbesondere die Bemessungssituation „Referenzszenarium mit Erdbeben“. Dementsprechend ist empfehlenswert, die vorliegende Nachweisführung für diese Fragestellungen zu vervollständigen bzw. zu vertiefen, um fehlende Kenntnisse von tatsächlichem FuE-Bedarf zu separieren und auszuschließen,

---

<sup>45</sup> Wenn Einzelnachweise bereits im Rahmen der Vorbemessung vollständig und abdeckend geführt werden können, ist eine vertiefte Nachweisführung nicht notwendig.

dass daraus derzeit unerkannter FuE-Bedarf resultiert. Im Ergebnis dieser Vorgehensweise werden fehlende Kenntnisse schnell identifiziert und das Defizit kann mit vergleichsweise geringem Aufwand, z. B. auf Basis exemplarischer Werte, beseitigt werden.

Fragestellungen, die bereits früher als FuE-Bedarf und im Vorfeld /THO 13/ mitgeteilt wurden, sind nachstehend zusammenfassend dargestellt. Für eine ausführliche Darstellung und die Kategorisierung des FuE-Bedarfs wird auf /THO 13/ verwiesen.

### **Salzgrusversatz**

Salzgrusversatz wird in großem Umfang als Versatzmaterial zur Verfüllung der Einlagerungsstecken, Querschläge und Richtstrecken auf der Einlagerungssohle sowie der Erkundungsstrecken auf der Erkundungssohle eingesetzt. Er kompaktiert mit der Zeit und nimmt aus heutiger Sicht langfristig die Eigenschaften von Steinsalz an. Sein Verhalten wird neben dem Spannungszustand und der Belastungsgeschwindigkeit wesentlich von seinem Feuchtegehalt und der Temperatur beeinflusst. Das betrifft sowohl sein Kompaktionsverhalten als auch seine Durchlässigkeitseigenschaften. Es liegen nur wenige Informationen und Versuche vor, die bezüglich dieser voneinander abhängigen Eigenschaften eine Quantifizierung zulassen. So ist der Kenntnisstand zum Versatzverhalten bei geringer zusätzlich vorhandener Feuchte (z. B. im Versatz vorhandene Wetterfeuchte oder infolge kleiner zutretender Lösungsmengen) gering. Weiterhin ist nicht systematisch untersucht, ob geringe Feuchtmengen mobil sind und somit zu einer potenziellen Radionuklidfreisetzung beitragen können, oder ob bzw. unter welchen Bedingungen sie immobil sind, z. B. eingeschlossen bzw. an Korngrenzen gebunden. Diese Information ist vor dem Hintergrund des Konzeptes „Vollständiger Einschluss“ bzw. „Sicherer Einschluss“ von zentraler Bedeutung.

Der generell vorhandene Kenntnisstand zum Salzgrus ist prinzipiell weit fortgeschritten und wird im Rahmen der VSG in einer eigenständigen Unterlage, der Salzgruspezifikation, zusammengefasst. Jedoch ist aufgrund des Wechsels des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes von der „Begrenzung der Freisetzung“ zum „Vollständigen/Sicheren Einschluss“ gerade der nunmehr für die Nachweisführung relevante Bereich des Salzgrusverhaltens im Bereich kleiner Porositäten und Permeabilitäten sowie bei geringen Feuchtemengen nicht ausreichend quantifiziert. Auch zum Auspressverhalten existieren diesbezüglich keine belastbaren Informationen. Dazu ist anzumerken, dass

einige dieser Fragestellungen im Rahmen des FuE-Projektes Repoperm II derzeit bereits bearbeitet werden.

Weiterhin gilt, dass auch in den Fällen, in denen bereits Versuche vorliegen, für wichtige Fragestellungen die Versuchsumfänge nur klein sind und deshalb für eine Zuverlässigkeitsaussage nicht ausreichen. Die Versuchszahl ist daher sukzessive zu erhöhen, da eine Zuverlässigkeitsaussage für den Nachweis des langfristig „sicheren Ein-schlusses“ von radioaktiven Abfällen an Standorten im Salinar von zentraler Bedeutung ist.

### **Wetterfeuchte**

Bei bestimmten Wetterlagen kommt es zur Kondensation von Luftfeuchte im Bergwerk. Dies ist an z. B. an Pfützen auf der Sohle erkennbar, ein Sachverhalt, der im Rahmen des FEP *Lösungen im Grubenbau*<sup>46</sup> erfasst ist. Die Lufttemperaturen im Bergwerk (Trocken- und Feuchttemperatur) werden regelmäßig im Rahmen von Wettermessungen erfasst.

Um im Kontext der Fragestellung den Einfluss vorhandener Feuchtemengen auf

- das Verhalten von Salzgrusversatz,
- die Korrosion von Endlagerbehältern bzw.
- als potenzielles Transportmedium für Radionuklide

zu bewerten, fließt die eingetragene Wetterfeuchte in die Bewertung der Langzeitsicherheit mit ein. Eine Bilanzierung und damit Quantifizierung der Menge der Wetterfeuchte ist bisher nicht vorhanden. Diese Lücke ist zu schließen.

Alternativ können Konzepte zur Vermeidung von Wetterlösungen im Grubenbau untersucht werden.

---

<sup>46</sup> Der Salzgrusversatz wird nicht den geotechnischen Barrieren zugeordnet, deshalb ist der FEP *Lösungen im Grubenbau* in /MÜL 12a/ nicht behandelt. Da der Salzgrusversatz aber die Auslegung der geotechnischen Barrieren mitbestimmt, wird der FEP hier mit aufgeführt.

## **Kontaktzonen von Dicht- und Widerlagerelementen**

Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Baustoffen weisen i. d. R. in Bezug auf ihre mechanischen, hydraulischen und chemischen Eigenschaften andere Eigenschaften auf als die Baustoffe selbst. Deshalb ist es gemäß technischem Regelwerk unzulässig, die Eigenschaften der Baustoffe für Kontaktzonen anzusetzen. Während die Ermittlung der für die Nachweisführung maßgeblichen mechanischen Eigenschaften (Haftzug- und Scherfestigkeit) von Kontaktzonen bereits in einigen Fällen erfolgte /MÜL 12b/, liegen für die hydraulischen Eigenschaften nur sehr wenige Werte vor, die in der Regel auf in situ Messungen basieren. In einem Fall wurden auch Kernproben, die aus der Kontaktzone eines in situ Bauwerks /BFS 10/ gewonnen wurden, untersucht. Das geochemische Verhalten von Kontaktzonen, auf denen aufgrund der langen Nachweiszeiträume geochemische Einwirkungen von Bedeutung sein können, weil sie zu lokalisierten Veränderungen führen können, ist versuchstechnisch nicht untersucht. Auch ein systematisches, im Labor realisierbares Versuchskonzept zur reproduzierbaren Ermittlung solcher Eigenschaften existiert nicht, wobei letzteres auch für die hydraulischen Eigenschaften gilt. Bezüglich eines möglicherweise lokalisierten Korrosionsfortschrittes auf Kontaktzonen existieren keine experimentellen Ergebnisse, es wird auf Expertenschätzungen bzw. Modellierungsergebnisse zurückgegriffen. Der Einfluss der Korrosion für das Verschlusssystem wird, wie im Bericht erläutert, zwar als gering eingeschätzt, diese Einschätzung ist aber noch zu belegen. Aufgrund des Mangels an Versuchsergebnissen sind auch die genutzten Modellierungskonzepte wenig belegt.

Für die experimentelle Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Kontaktzonen wurde – wie bereits erwähnt – ein Versuchskonzept einschließlich Probekörperpräparation entwickelt. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass bezüglich der mechanischen Eigenschaften durch das Versuchskonzept repräsentative Werte erhalten werden. Das Versuchskonzept ist von seinem Aufbau her prinzipiell auch zur Prüfung hydraulischer Eigenschaften geeignet. Ob damit repräsentative Werte erzielt werden, ist offen. Werden die hydraulischen Eigenschaften ausreichend gut abgebildet, könnten auf dieser Grundlage auch geochemische Analysen vorgenommen werden.

Geeignete Modellierungswerkzeuge und Modellierungsstrategien zur Behandlung von Kontaktzonen unter dem Aspekt ausgewählter mechanischer Einwirkungen (Zwangsspannungen, Zwangsverformungen) sowie hydraulischer, thermischer und chemischer Einwirkungen sind derzeit nicht verfügbar.

## **Bentonit**

Der wasserdichte Ausbau im lösungsführenden Deckgebirge verbleibt im Schacht. Er besteht aus Normalbeton. Zementphasen beeinflussen das Verhalten von Bentonit, insbesondere das Quellverhalten. Der Verlust der Quellfähigkeit beeinflusst ggf. die Permeabilitätseigenschaften des Bentonits. Der Sachverhalt ist aus vielen Endlagerprojekten bekannt, aber in Bezug auf die Schächte Gorleben nicht systematisch aufgearbeitet. Der Einfluss wird als gering eingeschätzt, diese Einschätzung ist aber zu belegen.

Für die Nachweisführung der Dichtelemente sind für den Funktionsnachweis die Strömungskräfte in Bezug auf die hydromechanische Widerstandsfähigkeit zu bewerten. Diese nehmen bei steilen hydraulischen Gradienten ihre Maximalwerte an, welche i. d. R. in der Aufsättigungsphase auftreten. Zu diesem Zeitpunkt geht der Bentonit aufgrund seiner zunehmenden Aufsättigung von einem zwar verdichteten, aber kompressiblen, nahezu kohäsionslosen Erdstoff vergleichsweise hoher Steifigkeit in einen nahezu inkompressiblen, kohäsiven Erdstoff geringer Steifigkeit über. Der Übergang beeinflusst die hydromechanische Beanspruchung erheblich, kann aber auf Basis des vorhandenen Kenntnistanandes nicht abgebildet werden. Diese Lücke bezüglich der rechnerischen Nachweisführung bzw. der Parametrisierung des Bentonits ist zu schließen. Jedoch ist anzumerken, dass aufgrund der Messdaten am Großversuch „Schachtverschluss Salzdetfurth“, keine Zweifel an der Eignung des Bentonits und an der Herstellbarkeit funktionsfähiger Dichtelemente aus Bentonit bestehen. Die zusätzlichen Untersuchungen sind für den Nachweis der Sicherheitsfunktion von Dichtelementen aus Bentonit bedeutsam.

## **Modellierungswerkzeuge**

Bei der Durchführung der hydromechanisch gekoppelten Berechnungen wurde festgestellt, dass die Berechnungsdurchführung nur auf Basis von Vereinfachungen möglich war, obwohl die notwendigen Parametrisierungen vorlagen (z. B. Nutzung der Permeabilitäts-Sättigungsbeziehung von Bentonit), weil die Zeitdiskretisierung im Rechenprozess zu zu kleinen Zeitschritten und damit nicht mehr beherrschbaren Rechenzeiten führte. Dieser Sachverhalt ist unter dem Aspekt der langen endlagerrelevanten Nachweiszeiträume von besonderer Bedeutung. Modellierungsstrategien bzw. Modellierungswerkzeuge sind bezüglich dieses Aspektes zu verbessern.

Im Fall der fluidmechanisch gekoppelten Berechnung zum Gasdruck konnte nur eine einseitige Kopplung realisiert werden und so die anzunehmenden, endlagerspezifischen Randbedingungen nicht adäquat abgebildet werden. Auch hier sind die Modellierungswerkzeuge an die Erfordernisse der Nachweisführung anzupassen.

Weiterhin besteht bezüglich der fluidmechanisch gekoppelten Berechnungen noch FuE-Bedarf in Bezug auf die Stoffmodellbeschreibungen, insbesondere für die Dichtelemente aus Sorelbeton, die zeitlich veränderlichem und deutlich erhöhtem Gas- und Lösungsdruck ausgesetzt sind, d. h., bei denen 2-Phasenflusseffekte nicht vernachlässigt werden können. Die Parameter und Kennwerte für die Stoffmodelle sind ebenfalls zu ermitteln.

### **THMC-Prozesse**

Die Bewertung von THMC-Prozessen erfolgte im Rahmen der Nachweisführung auf Basis von Einschätzungen, vgl. /XIE 12/. Die Fragestellung der THMC-Prozesse betrifft im Wesentlichen das weniger wahrscheinliche Szenarium „Schachtverschlussversagen“. Es besteht grundsätzlicher Klärungsbedarf, wie diese THMC-Prozesse (z. B. das FEP *Auflösung und Ausfällung*) behandelt werden sollen. Dabei sind zwei unterschiedliche Zielrichtungen denkbar. Eine Zielrichtung ist das Verschlussystem so zu optimieren bzw. entkoppeln, dass nur TMC oder nur HMC Prozesse zu behandeln sind und die jeweils 4. Kopplungsstufe vernachlässigt werden kann. Die alternative Zielrichtung, die THMC-Prozesse gekoppelt zu behandeln, wird derzeit nicht als erfolgshöflich eingeschätzt.

### **Effektiver Kompressionsmodul**

Für Verzerrungsraten  $< 1E-10$  1/s liegen derzeit keine abgesicherten Werte für den effektiven Kompressionsmodul vor. Die Absicherung ist vorzunehmen. Vor dem Hintergrund möglicherweise sehr langer Versuchsdauern ist eine experimentelle Ermittlung ggf. eingeschränkt, so dass als erster Schritt mögliche Vorgehensweisen zu analysieren sind.

Die vorliegende Zusammenstellung des FuE-Bedarfs erhebt nicht den Anspruch, vollständig zu sein, umfasst aber unter dem Aspekt des Nachweises der anforderungsgerechten Funktionsfähigkeit geotechnischer Barrieren im Kontext des Sicherheitskonzeptes „vollständiger bzw. sicher Einschluss“ alle wichtigen Aspekte.

## Glossar

Submodell	Rechenmodell für die Substruktur.
Submodelltechnik	Reduktionsmethode bei der Simulation mit Diskretisierungsverfahren (z. B. FEM), bei der zunächst mit einer groben Diskretisierung das gesamte Modell und anschließend mit einer feineren Diskretisierung Teilbereiche untersucht werden, wobei Randbedingungen sowie ggf. Anfangsbedingungen und/oder Feldgrößen aus dem gröberen Modell übernommen werden.
Substruktur	Struktur, die Teil einer größeren Struktur ist.
Spreizspannungen	Spezialbegriff aus der Deponietechnik. Spreizspannungen entstehen infolge unterschiedlicher Verformungseigenschaften des Abdichtungskörpers und des Untergrundes und bezeichnen die daraus resultierenden Schubspannungen.
Spreizverformungen	Spezialbegriff aus der Deponietechnik. Spreizverformungen entstehen infolge unterschiedlicher Verformungseigenschaften des Abdichtungskörpers und des Untergrundes und der daraus resultierenden Schubspannungen.
Zwangsspannungen	Unter mechanischer Belastung oder infolge von Temperaturänderung will sich ein Bauteil verformen. Sind die Verformungen aufgrund innerer oder äußerer Randbedingungen behindert, wird die dadurch verursachte Spannung als Zwangsspannung bezeichnet.
Zwangsverformungen	Durch äußere oder innere Randbedingungen wird einem Bauteil eine Verformung aufgegeben, z. B. durch Bewegungen des Baugrundes. Diese Verformungen werden als Zwangsverformungen bezeichnet.



## Literaturverzeichnis

- /BEC 99/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghorecychi, M., Heusermann, S., Gens, A., Olivella, S.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-Project). Final Report, EUR 19124 EN, European Commission, 1999.
- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). EUR 20621 EN, European Commission, Nuclear Science and Technology: Luxembourg, 2004.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübél, A., Wolf, J.: Szenarientwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BFS 02/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Colenco, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten. Schlussbericht, PSP-Nr. WS0008, BFS-Bestellnr. 8391-0, Bundesamt für Strahlenschutz (BFS): Wettingen, 15. Mai 2002.
- /BFS 09/ Asse-GmbH, DBE TECHNOLOGY GmbH: Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten und Resthohlräume in der Südflanke der Schachanlage Asse ausgewählten Baustoffe Sorelbeton A1 und A1-560. BfS-KZL 9A/44215100/GHR/TV/0001/00, Bundesamt für Strahlenschutz (BFS), Stand 03.03.2009.

- /BFS 10/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm – Zusammenfassung und Interpretation der Messergebnisse. BFS-KZL 9M/22310131/GH/RB/0130/00, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Stand 03.05.2010.
- /BGR 03/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Hannover, 2003.
- /BGR 11/ Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR): Kriechkennwerte für geplante Streckenverschlüsse in Gorleben auf der 870-m-Sohle. Schreiben, B3.4/B50120-04/2010-0001/009, 14.10.2011.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BOR 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 02/ Bornemann, O., Behlau, J., Mingerzahn, G.: Projekt Gorleben, Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie) 2. Geologische Fachbericht (Geologische Schnitte zur untertägigen Erkundung). 9G4121100000, 11813/02, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 25. Juni 2002.

- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BRE 12/ Breustedt, M.: Vertiefte Nachweisführung: 1. Dichtelement Schachtverschluss Gorleben 1. Memo im Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH, Stand August 2012.
- /BUH 12a/ Buhmann, D.: Zufluss in das Grubengebäude bei Schachtversagen, Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, grs-notiz 808800-05, Version 04, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 23.04.2012.
- /BUH 12b/ Buhmann, D.: Durchströmung von Schachtverschlüssen, Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS, Veränderte Aufteilung des Schachts. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, grs-notiz 808800-04, Version 04, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 23.04.2012.
- /CEN 10/ CEN – Europäisches Komitee für Normung: Eurocode, Grundlagen der Tragwerksplanung. DIN EN 1990, Deutsche Fassung EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC: Brüssel, Stand Dezember 2010.
- /COD 02/ CODE-BRIGHT: A 3-D program for thermo-hydro-mechanical analysis in geological media. User's Guide, Universidad Politècnica de Catalunya (UPC), 2002.
- /CRI 98/ Cristescu, N.D., Hunsche, U.: Time Effects in Rock Mechanics. ISBN 0471955175, Wiley & Sons, 1998.

- /CZA 12/ Czaikowski, O., Wieczorek, K.: Salzgruskompaktion – Kalibrierung der in CODE\_BRIGHT verwendeten physikalischen Modellansätze zur numerischen Simulation. internes Memo im Arbeitspaket 9.2 des Vorhabens "Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben", Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 15.06.2012 (Rev. 30.08.2012).
- /DAF 04/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“. Oktober 2004.
- /DBE 96/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): FEM-Berechnungen der Belastungen und Verschiebungen des Innenausbaufundamentes und der Stützringe des Schachtes Gorleben 1. KZL: 9G/00YES01/GC/LD/0046/00, in Freigabe: Peine, Stand 21.03.1996.
- /DBE 07/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Schacht 1, Innenausbaufundament und Stützringe, Übersicht geotechnische Messstellen. KZL: 9G/00YES01/GC/RX/0039/03, Stand 26.02.2007.
- /DBE 09/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Bergwerk zur Erkundung des Salzstockes Gorleben, Schachtbild Schacht 1, Blätter 1 bis 10, Betriebszustand 28.02.2009 (Blatt 1-4 und 9), Betriebszustand 31.08.2009 (Blatt 5 – 8 und 10). 2009.
- /DBE 10/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Geotechnische Erkundungsergebnisse Schacht 1 bis 30.04.2010. KZL: 9G/00YES01/GC/BZ/0061/00, in Freigabe, Stand 28.06.2010.
- /DIX 00/ Dixon, D.A.: Porewater salinity and the development of swelling pressure in bentonit-based buffer and backfill materials. Posiva Report, Atomic Energy of Canada Limited: Helsinki, 2000.

- /EBE 09/ Eberth, S., Müller-Hoeppe, N.: Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salinar auf andere Wirtsgesteine. Übersicht, FuE-Vorhaben (FKZ 032 E 9521), DBE TECHNOLOGY GmbH, Dezember 2009.
- /EIC 12/ Eickemeier, R.: SLB1-2D. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, E-Mail vom 11.01.2012.
- /ENG 93/ Engelmann, H.-J.: Grubengebäudeplanungen und Temperaturfeldberechnungen für das Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstocks Gorleben. DEAB (02 E 8201), T56, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Peine, 1993.
- /ENG 11a/ Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N.: Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 24.08.2011.
- /ENG 11b/ Engelhardt, H.J., Müller-Hoeppe, N.: Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth. Memo im Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, Oktober 2011.
- /ENG 12/ Engelhardt, H.J., Stradinger, A., v. Borstel, L.E.: Bestimmung der Oberflächenfeuchte von Steinsalzgrus aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben. Memo im Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, Stand Januar 2012.
- /GDA 97/ Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT): GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten. 3. Edition, Verlag Ernst & Sohn, 1997.

- /HAM 12/ Hampel, A.H., Salzer, K., Günther, R.-M., Minkley, W., Pudewills, A., Leuger, B., Zapf, D., Staudtmeister, K., Rokahr, R., Herchen, K., Wolters, R., Lux, K.-H.: Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt II. Overview of the models and results of 3- D benchmark calculations. S. 231-240, The Mechanical Behavior of Salt VII: Paris, 2012.
- /HEE 04/ Heemann, U., Heusermann, S.: Theoretical and Experimental Investigation on Stresses and Permeability in the BAMBUS Project. DisTec 2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal: Berlin, 26.-28. April 2004.
- /HER 12/ Herold, P., Müller-Hoeppe, N.: Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse – Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und Variante A). Memo im Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, August 2012.
- /HEU 08/ Heusermann, S., Eickemeier, R.: Einfluss der Bewetterungstemperatur auf das mechanische Verhalten des Schachtes 1 im Erkundungsbergwerk Gorleben. Messen in der Geotechnik 2008, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 87, 2008.
- /HEU 11/ Heusermann, S., Eickemeier, R.: Festlegung von Materialparametern für thermomechanische Modellberechnungen. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Arbeitspaket 9, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /ITA 09/ ITASCA: FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. 4. Edition, Version 4.0, ITASCA Consulting Group Inc.: Minneapolis, Minnesota, USA, 2009.
- /JOB 00/ Jobmann, M.: Hydraulische Modellierungen, Modellgrundlagen und Prognose. Forschungsprojekt Schachtverschluß Salzdetfurth, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2000.

- /KAM 12/ Kamlot, P., Weise, D., Gärtner, G., Teichmann, L.: Drift sealing elements in the Asse II mine as a component of the emergency concept – assessment of the hydro-mechanical functionality, Taylor & Francis, London, The Mechanical Behavior of Salt: 7th Conference (SaltMech7): Paris, France, 2012.
- /KNA 12/ Knauth, M.: VSG-Randbedingungen aus Thermomechanik auf den Schacht. Institut für Gebirgsmechanik (IFG), E-Mail vom 17.01.2012.
- /KOC 12a/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN: 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /KOC 12b/ Kock, I.: Druckverlauf. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, E-Mail vom 10.02.2012.
- /KOC 12c/ Kock, I.: Datenübermittlung und Ergebnisse zum Druck am nördlichen Damm. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, E-Mail vom 07.05.2012.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /LIN 12/ Linkamp, M., Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J.: Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer. Arbeitspaket AP 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Rev 02, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2012.

- /MAN 02/ Manthee, F., Teichmann, L., Fischle, W., Heda, M., Bollingerfehr, W.: Untersuchungen im Bohrschacht, Auswertung und Interpretation der Messergebnisse. Forschungsprojekt Schachtverschluß Salzdetfurth, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2002.
- /MIE 10/ Miehe, R., Czaikowski, O., Wiczorek, K.: Barrier Integrity of the Isolating Rock Zone in Clay Formations. Final Report, GRS-261, ISBN: 3939355364, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2010.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, ISBN: 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MÜL 12b/ Müller-Hoeppe, N.: Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 26.01.2012.
- /MÜL 12c/ Müller-Hoeppe, N.: Ergänzung Materialkennwerte. DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, Email vom 13.01.2012.
- /POL 10/ Polster, M.: Ergänzende mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungen zur Nachweisführung für Abdichtbauwerke im Steinsalz. KZL: 9M/22310171/ECC/GH/LD/0007/01, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Bundesamt für Strahlenschutz (BFS), Stand 23.07.2010.

- /POP 02/ Popp, T.: Transporteigenschaften von Steinsalz - Modellierung der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung. Meyniana, Vol. 54, S. 113-129, 2002.
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, H., Minkley, W., Manthei, G.: Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Abschlussbericht der Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 2007.
- /POP 12/ Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D.: Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Leipzig, 30.05.2012.
- /RAU 03/ Rauche, H., Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K., Teichert, T.: Nachweisführung zur Langzeitsicherheit, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, P 177, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 2003.
- /SCH 94/ Schneider, K.-J.: Bautabellen für Ingenieure mit europäischen und nationalen Vorschriften. 11. Edition, ISBN 3804134467, Werner Verlag, 1994.
- /SIM 94/ Simmer, K.: Grundbau; Teil 1: Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. 19. Edition, ISBN 3-519-45231-6, B. G. Teubner Stuttgart: Stuttgart, 1994.
- /STU 84/ Studer, L., Amman, W., Meier, P., Müller, C., Glauser, E.: Verfüllen und Versiegeln von Stollen, Schächten und Bohrlöchern, Band 1 und 2: Anhänge. Technischer Bericht 84-33, Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle (NAGRA): Baden, Schweiz, 1984.
- /THO 13/ Thomauske, B., Charlier, F.: Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen. Bericht zum Arbeitspaket 14, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-304, ISBN 978-3-939355-83-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.

- /WAG 05/ Wagner, K.: Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge. Dissertation, TU-Bergakademie Freiberg: Freiberg, 2005.
- /WEI 11/ Weise, D., Brückner, D.: Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzbeton M2. 58 Seiten, Auftrag Nr. B IFG 51 / 2009, in Freigabe, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 17.5.2011.
- /WIE 09/ Wieczorek, K., Rothfuchs, T., Förster, B., Heemann, U., Olivella, S., Lerch, C., Pudewills, A., Kamlot, P., Grupa, J., Herchen, K.: THERESA Deliverable D9, Coupled Processes in Salt Host-Rock Repositories - Final Report of Work Package 3. Coordinated by Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 30. November 2009.
- /WIE 10/ Wieczorek, K., Förster, B., Rothfuchs, T., Zhang, C., Olivella, S., Kamlot, P., Günther, R.-M., Lerch, C.: THERESA subproject MOLDAU – Coupled thermal-hydrological-mechanical-chemical processes for application in repository safety assessment. GRS-262, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2010.
- /WIE 12/ Wieczorek, K., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Czaikowski, O., Navarro, M.: Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus. Technischer Bericht, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, August 2012.
- /WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J., Müller-Hoeppe, N.: Vertiefte Nachweisführung des Schachtverschlusses Gorleben 1. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, Oktober 2012.

/XIE 12/ Xie, M., Herbert, H.-J.: Geochemical analysis of the sealing system. Bericht zum Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, Februar 2012.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Position der Schächte und der vier Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord auf der Einlagerungssohle /BOL 11/ .....	3
Abb. 2.2	Funktionsentwurf Schachtverschluss Gorleben 1 (nach Vorbemessung) /MÜL 12a/ .....	7
Abb. 2.3	Konstruktive Gestaltung der Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord /HER 12/ .....	10
Abb. 2.4	Streckenquerschnitt (Mindestprofile) Richtstrecke Nord (Streckenverschluss Nord und Mitte) /BOL 11/ .....	11
Abb. 3.1	Struktur des technischen Funktionsnachweises für die Dichtelemente und Widerlager des Verschlussystems .....	16
Abb. 3.2	Ausschnitt des Submodells „Schacht als Ganzes“ (unten) im Fernfeldmodell (oben) und Darstellung der gegenüber dem Fernfeldmodell erhöhten Auflösung von Detailstrukturen im Submodell... 24	
Abb. 3.3	Dichtelemente und Widerlager im Schacht und beispielhaft Submodell Bentonitdichtelement mit Widerlager sowie Auflösung des Submodells Bentonitdichtelement in Baukörper, Kontaktzone und Auflockerungszone.....	25
Abb. 3.4	Verknüpfung der Randbedingungen und Submodelle zum Gesamtnachweis am Beispiel des Schachtverschlusses.....	28
Abb. 4.1	Schacht Gorleben 1 .....	33
Abb. 4.2	Endlagerspezifischer Schachtsicherheitspfeiler des Schachtes Gorleben 1 in Bezug zur Lage der Erkundungsstrecken des EB1 und horizontalen Ausdehnung des Modellgebiets .....	40
Abb. 4.3	Basismodell für die Fernfeldmodellierung – Modellausschnitt im Nahfeld der Einlagerung (EB1-K1.1-V1) .....	41
Abb. 4.4	Modellgebiet im geologischen Vertikalschnitt „Querschlag 1 West“ /BOR 08/ .....	42
Abb. 4.5	Ausschnitt aus dem BGR-Fernfeldmodell .....	43

Abb. 4.6	Draufsicht Modellgebiete (nicht maßstabsgetreu).....	44
Abb. 4.7	Diskretisierung der Modellgebiete 1 (links) und 2 (rechts) für das Berechnungsmodell „Schachtverschluss als Ganzes“ und Zuordnung der empfohlenen Kriechklassen gemäß Tab. 4.2.....	45
Abb. 4.8	Berechnungsmodell für den „Schachtverschluss als Ganzes“ im Modellgebiet 2.....	46
Abb. 4.9	Cosinusförmige Temperaturfunktionen zur Beschreibung der Temperaturrandbedingung infolge der Schachtwettertemperatur.....	51
Abb. 4.10	Druckaufbau im Bereich des EH-550.....	62
Abb. 4.11	Druckaufbau im Bereich des EH-650.....	63
Abb. 4.12	Druckverläufe in den Komponenten des Schachtverschlusses /BUH 12b/.....	64
Abb. 4.13	Schematische Darstellung der verwendeten mechanischen Rand- bedingungen für die Rechenfälle zum „heißen Schacht“ am endlager nahen Modellrand und am endlagerfernen Modellrand.....	66
Abb. 4.14	Gemessene Schachtkonvergenzen in den Erkundungshorizonten.....	78
Abb. 4.15	Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkon- vergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkon- vergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-350 .....	80
Abb. 4.16	Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkon- vergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkon- vergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-450 .....	81
Abb. 4.17	Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkon- vergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkon- vergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-550 .....	82
Abb. 4.18	Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkon- vergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkon- vergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-650 .....	83

Abb. 4.19	Mit verschiedenen Multiplikationsfaktoren berechnete Schachtkonvergenzen (durchgezogene Linien) und gemessene Schachtkonvergenzen (strichpunktierte Linien) im Erkundungshorizont EH-720 .....	84
Abb. 4.20	Ergebnis der teufenspezifisch angepassten Kriechklassen .....	86
Abb. 4.21	Flächenkonvergenzrate im Niveau des 2. Dichtelementes .....	88
Abb. 4.22	BGR-Fernfeldmodell mit skizzierten FLAC-Modellgebiet und Auswertelokationen .....	89
Abb. 4.23	Temperaturerhöhung .....	92
Abb. 4.24	Horizontalspannung $\sigma_x$ .....	93
Abb. 4.25	Vertikalspannung $\sigma_z$ .....	94
Abb. 4.26	Horizontalverschiebung $u_x$ .....	95
Abb. 4.27	Vertikalverschiebung $u_z$ .....	96
Abb. 4.28	Zeitlicher Verlauf der Vertikalspannungen in der Schachtachse bei ca. - 400 mNN, Darstellung mit Iterationsverlauf .....	97
Abb. 4.29	Qualitative Lage der Auswertelokationen an den Dichtelementen .....	98
Abb. 4.30	Rechenfall 1.2: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 1. Dichtelementes aus Bentonit .....	100
Abb. 4.31	Rechenfall 1.2: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton .....	102
Abb. 4.32	Rechenfall 1.2: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton .....	104
Abb. 4.33	Rechenfall 1.2: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten .....	106
Abb. 4.34	Rechenfall 1.3: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton .....	109
Abb. 4.35	Rechenfall 1.3: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton .....	110

Abb. 4.36	Rechenfall 1.3: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten .....	112
Abb. 4.37	Rechenfall 1.3: Ergebnisse der Anwendung des effektiven Fluiddruckkriteriums zu verschiedenen Zeitpunkten .....	113
Abb. 4.38	Rechenfall 1.5: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 1. Dichtelementes aus Bentonit .....	117
Abb. 4.39	Rechenfall 1.5: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton.....	118
Abb. 4.40	Rechenfall 1.5: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton .....	119
Abb. 4.41	Horizontalspannung $\sigma_x$ .....	121
Abb. 4.42	Vertikalspannung $\sigma_z$ .....	122
Abb. 4.43	Rechenfall 1.5: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten .....	124
Abb. 4.44	Rechenfall 1.6: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 2. Dichtelementes aus Salzbeton (t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses) .....	127
Abb. 4.45	Rechenfall 1.6: Spannungs-Zeitverläufe im Bereich des 3. Dichtelementes aus Sorelbeton (t = 0 a: Einlagerungszeitpunkt im BGR-Fernfeldmodell, t = 24 a: Beginn der Erstellung des Schachtverschlusses) .....	128
Abb. 4.46	Rechenfall 1.6: Ausnutzungsgrad der Dilatanzbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten .....	130
Abb. 4.47	Rechenfall 1.6: Ergebnisse der Anwendung des effektiven Fluiddruckkriteriums zu verschiedenen Zeitpunkten .....	131
Abb. 5.1	Geologischer Vertikalschnitt Schächte Gorleben 1 und 2 /BOR 02/ .....	134
Abb. 5.2	Geologischer Vertikalschnitt Schächte 1 und 2 /BOR 02/ .....	141
Abb. 5.3	Modellgeometrie (Netz II).....	143

Abb. 5.4	Druckbeaufschlagung Filterelement.....	146
Abb. 5.5	Quelldruck in Abhängigkeit der Einbautrockendichte /DIX 00/.....	151
Abb. 5.6	Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Einbautrockendichte /DIX 00/ .....	151
Abb. 5.7	Quelldruck und Permeabilität in Abhängigkeit der Einbautrockendichte des Bentonits .....	153
Abb. 5.8	Quelldruck in Abhängigkeit der Sättigung .....	154
Abb. 5.9	Flächenkonvergenzraten.....	156
Abb. 5.10	Feuchtegehalt Bentonit Versuch Salzdetfurth .....	158
Abb. 5.11	Sättigung nach 1.000 Tagen (Netz I, Anfangswerte des Parametersatzes).....	159
Abb. 5.12	Sättigung nach 120 Tagen (Endparametersatz), hydraulischer Zeitschritt 5,3E-5 Tage (Netz II) .....	160
Abb. 5.13	Sättigung nach 10 Tagen (Kalibrierungsparametersatz), hydr. Zeitschritt 1,1E-6 Tage (Netz I) .....	161
Abb. 5.14	Position der Auswertelokationen .....	164
Abb. 5.15	Betrachtete Zonenreihen Volumenkriterium.....	165
Abb. 5.16	Sättigung bei t = 120 d, Ende Druckaufbau .....	166
Abb. 5.17	Porendruck bei t = 120 d, Ende Druckaufbau .....	167
Abb. 5.18	Sättigung bei t = 1.000 d .....	167
Abb. 5.19	Porendruck bei t = 1.000 d .....	168
Abb. 5.20	Sättigung bei t = 2.000 d .....	168
Abb. 5.21	Porendruck bei t = 2.000 d .....	169
Abb. 5.22	Detail: Minimalspannungs- und Porendruckentwicklung in Ebene 2.....	170

Abb. 5.23	Spannungstrajektorien nach 120 d, Ende Druckaufbau.....	171
Abb. 5.24	Spannungstrajektorien nach 120 d (Detailansicht) .....	172
Abb. 5.25	Zeitliche Entwicklung der kleinsten effektiven Spannungskomponente, Bereich: ALZ .....	174
Abb. 5.26	Zeitliche Entwicklung der kleinsten effektiven Spannungskomponente, Bereich: Bauwerk Rand .....	174
Abb. 5.27	Zeitliche Entwicklung der kleinsten effektiven Spannungskomponente, Bereich: Bauwerk Mitte .....	175
Abb. 5.28	Minimale effektive Hauptspannung ( $\sigma'_3$ ) bei $t = 120$ d.....	176
Abb. 5.29	Minimale effektive Hauptspannung ( $\sigma'_3$ ) bei $t = 1.000$ d.....	176
Abb. 5.30	Minimale effektive Hauptspannung ( $\sigma'_3$ ) bei $t = 2.000$ d.....	177
Abb. 5.31	Porendruckverlauf [MPa] in radialer Richtung für die Auswerteebenen gemäß Abb. 5.15 (176 Tage).....	178
Abb. 5.32	Volumenänderung [%] in radialer Richtung für die Auswerteebenen gemäß Abb. 5.15 (176 Tage).....	179
Abb. 5.33	Porendruck [MPa] Reihe 1 und 5 bei $t = 176$ d und $t = 2.000$ d .....	180
Abb. 5.34	Volumenänderung [%] Reihe 1 und 5 bei $t = 176$ d und $t = 2.000$ d .....	181
Abb. 6.1	Dilatanzbedingungen im Diagramm $q$ (deviatorische Spannung) in Abhängigkeit von $p$ (mittlere Normalspannung).....	189
Abb. 6.2	Berechnungsmodell mit Funktionselementen des Schachtverschlusses	192
Abb. 6.3	Lösungsdruckentwicklung an den Funktionselementen.....	194
Abb. 6.4	Positionen der Auswertepunkte am Beispiel des 2. Dichtelements (a) für die ALZ, (b) im Bauwerk und (c) in der Kontaktzone .....	199
Abb. 6.5	Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im Bereich des 2. Dichtelements aus Salzbeton.....	200

Abb. 6.6	Rückgang der deviatorischen Beanspruchung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 2. Dichtelements mit Darstellung der Dilatanzgrenze in der Invariantendarstellung.....	201
Abb. 6.7	Berechnete Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 2. Dichtelements.....	202
Abb. 6.8	Zulässige Schubspannung in der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen .....	203
Abb. 6.9	Festigkeitsverhalten Salzbeton (Bemessungswerte bzw. mit Berücksichtigung eines zusätzlichen TSB von 1,25 für die Rissbeschränkung) im Vergleich mit Rechenergebnissen .....	204
Abb. 6.10	Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im Bereich des 3. Dichtelements aus Sorelbeton .....	205
Abb. 6.11	Rückgang der deviatorischen Beanspruchung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 3. Dichtelements mit Darstellung der Dilatanzgrenze in der Invariantendarstellung.....	206
Abb. 6.12	Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des 3. Dichtelements .....	207
Abb. 6.13	Festigkeitsverhalten Sorelbeton (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen .....	208
Abb. 6.14	Zulässige Schubspannung in der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen .....	208
Abb. 6.15	Position der Auswertepunkte im Bereich des Langzeitdichtelements (a) für die ALZ und (b) im Bauwerk .....	209
Abb. 6.16	Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im 2D-Modell mit ebenem Verzerrungszustand .....	211
Abb. 6.17	Entwicklung der Porosität in der Langzeitdichtung über die Zeit im 2D-Modell mit ebenem Verzerrungszustand.....	211
Abb. 8.1	Streckenquerschnitt im ebenen Verzerrungszustand (2D).....	234
Abb. 8.2	Berechnungsmodell (rotationssymmetrisch) .....	235

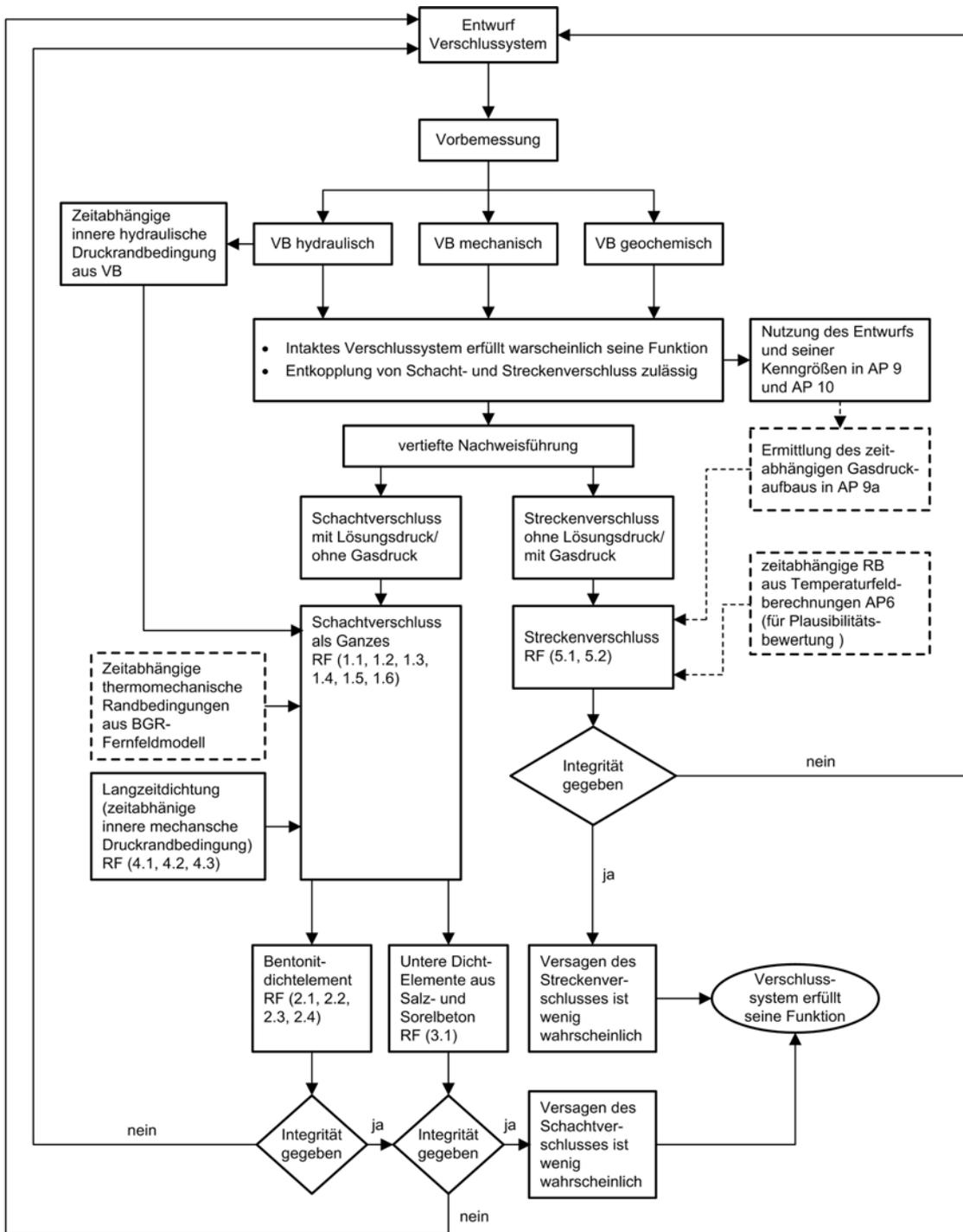
Abb. 8.3	Lösungsdruckentwicklung am fiktiven Streckenverschluss Nord .....	237
Abb. 8.4	Gasdruckentwicklung am Streckenverschluss NORD (Ref-AB1-7) .....	239
Abb. 8.5	Position der Auswertepunkte am Streckenverschlusselement (a) für die ALZ, (b) im Bauwerk und (c) in der Kontaktzone.....	240
Abb. 8.6	Rückgang der deviatorischen Beanspruchung in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses mit Darstellung der Dilatanzfestigkeitsgrenze in der Invariantendarstellung .....	241
Abb. 8.7	Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses .....	242
Abb. 8.8	Spannungszustand in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses .....	243
Abb. 8.9	Festigkeitsverhalten Sorelbeton (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen .....	244
Abb. 8.10	Zulässige Schubbeanspruchung in der Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge (Bemessungswerte) im Vergleich mit Rechenergebnissen .....	244
Abb. 8.11	Minimalspannungsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des fiktiven Streckenverschlusses bei Vorgabe eines Gasdruckes .....	246
Abb. 8.12	Porositätsentwicklung in der ALZ über die Zeit im Bereich des Streckenverschlusses bei Vorgabe eines Gasdruckes .....	246
Abb. 8.13	Vergleichende Darstellung des Spannungszustandes in der ALZ und des einseitigen Lösungs- und Gasdruckes .....	248

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Materialien, geometrische und wirksame Größen des Funktionsentwurfes nach Vorbemessung /MÜL 12a/.....	8
Tab. 2.2	Erstellung Verschlussystem – Bauablauf .....	12
Tab. 4.1	Relation zwischen Vorfaktoren und Kriechklassen .....	34
Tab. 4.2	Bandbreite der Kriechfähigkeit der stratigrafischen Einheiten und empfohlenes Stoffmodell /HEU 11/. Die Stoffmodelle sind im Anhang in Tab. B.2, Tab. B.3 und Tab. B.4 ausführlich dargestellt.....	35
Tab. 4.3	Vertikale Einordnung des Blockmodells in Bezug auf das Deckgebirge, den Schachtinnenausbau (kursiv) sowie den geplanten Schachtverschluss (kursiv) .....	48
Tab. 4.4	Zeitliche Abschnitte für teufen- und zeitabhängige Temperaturfunktion ...	50
Tab. 4.5	Temperaturrandbedingung, t = Zeit [d] ab Beginn Modellzeit, h = Höhenlage [mNN].....	50
Tab. 4.6	Berechnungsablauf Rechenfall „Kalibrierung Kriechklassen“ .....	53
Tab. 4.7	Berechnungsablauf Rechenfall „kalter Schacht ohne Porendruck“ .....	57
Tab. 4.8	Berechnungsablauf Rechenfälle „kalter Schacht mit Porendruck“.....	60
Tab. 4.9	Berechnungsablauf Rechenfall „Validierung thermomechanischer Randbedingungen“ .....	68
Tab. 4.10	Berechnungsablauf Rechenfall „heißer Schacht ohne Porendruck“ .....	69
Tab. 4.11	Berechnungsablauf Rechenfall „heißer Schacht mit Porendruck“.....	72
Tab. 4.12	Verwendete Prozessklassen und verwendete Stoffmodelle .....	74
Tab. 4.13	Materialparameter Verschlussbauwerk /MÜL 12c/.....	75
Tab. 4.14	Auswertepunkte (y = 0 m) .....	89

Tab. 4.15	Positionen der Auswertelokationen mit Bezug auf das Teufenniveau und die Schachtachse.....	98
Tab. 5.1	Im Umfeld des Dichtelementes vorhandene Homogenbereiche .....	133
Tab. 5.2	Prozessklassen und verwendete Stoffmodelle.....	147
Tab. 5.3	Elastische Kennwerte für die Funktionselemente/Überdeckung .....	148
Tab. 5.4	Hydraulische Kennwerte der Funktionselemente (Anfangswerte) .....	149
Tab. 5.5	Auswerteebenen und -reihen in verschiedenen Teufen.....	162
Tab. 6.1	Funktionselemente des Schachtverschlusses im Modell .....	191
Tab. 6.2	CODE_BRIGHT-Parameter für Steinsalz und Salzgrus nach /WIE 12/ ..	197
Tab. 6.3	CODE-BRIGHT Parameter für Salz- und Sorelbeton nach /MÜL 12c/ ...	198
Tab. 8.1	Kriechklassen für BGRa an den Lokationen der Streckenverschlüsse /BGR 11/ .....	226
Tab. 8.2	Auswahl des fiktiven Streckenverschlusses (maßgebende Auswahlkriterien sind unterstrichen) .....	227

**A Anhang A: Verknüpfung der Einzelnachweise zum Gesamtnachweis**



**Abb. A.1** Flowchart des Gesamtnachweises

**Tab. A.1** Erläuterung der Rechenfälle

RF	Inhalt	Zielsetzung
<b>Schachtverschluss als Ganzes</b>		
1.1	Kalibrierung der Kriechklassen anhand von in situ Messungen und Ermittlung der Flächenkonvergenzrate	Reduktion der Zahl der Rechenfälle zur Variation der Kriechklasse
		Zulässigkeit vereinfachtes Stoffmodell effektiver Kompressionsmodul
1.2	Modell kalter Schacht, lange trockener Fall (ohne Porendruck)	Reduktion der Zahl der Rechenfälle für nachfolgende Submodelle
		Vergleich der Ergebnisse FLAC3D und CODE_BRIGHT
		Orientierende Auswertungen
1.3	Modell kalter Schacht, Porendruckaufbau aus VB als innere Randbedingung	Reduktion der Zahl der Rechenfälle für nachfolgende Submodelle, experimentelle Berechnung
		Orientierende Auswertungen
1.4	Validierung thermomechanischer Randbedingungen	Korrekte Übernahme von zeitabhängigen Anfangs- und Randbedingungen zugeordneter Modelle
		Bewertung, ob abdeckend für FEP <i>Diapirismus</i>
1.5	Modell heißer Schacht, lange trockener Fall (ohne Porendruck)	Reduktion der Zahl der Rechenfälle für nachfolgende Submodelle und Bereitstellung der Randbedingungen für die Submodelle (sofern erforderlich)
		Orientierende Auswertungen
1.6	Modell heißer Schacht, Porendruckaufbau aus VB als innere Randbedingung	Reduktion der Zahl der Rechenfälle für nachfolgende Submodelle, experimentelle Berechnung
		Orientierende Auswertungen

**Tab. A.1** Erläuterung der Rechenfälle (Fortsetzung)

RF	Inhalt	Zielsetzung
<b>Bentonitdichtelement mit Widerlager und Filterschichten</b>		
2.1	Überprüfung der Flächenkonvergenzrate	Zulässigkeit des vereinfachten radial-symmetrischen Modells
2.2	Ermittlung der Tiefe der Auflockerungszone	Absicherung von Annahmen aus der VB und damit der Gültigkeit der inneren hydraulischen Druckrandbedingung für tieferliegende Dichtelemente
2.3	Modellprüfung anhand der Ergebnisse des in situ Versuchs „Schachtverschluss Salzdetfurth“	Korrekte Wahl von Modellparametern für Stoffmodell
2.4	Funktionsfähigkeit des Bentonitdichtelements	Einzelnachweise für Bentonitdichtelement
<b>Untere Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton</b>		
3.1	Funktionsfähigkeit untere Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton	Einzelnachweise für untere Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton
<b>Langzeitdichtung</b>		
4.1	Druckaufbau auf Schachtkontur und Permeabilitätsentwicklung der Langzeitdichtung	Orientierende Berechnungen zur Feststellung der Wirksamkeit der Langzeitdichtung
4.2	Druckaufbau auf Schachtkontur, Kriechklasse 4	Ermittlung innere mechanische Druckrandbedingung
4.3	Druckaufbau auf Schachtkontur, Kriechklasse 5	Ermittlung innere mechanische Druckrandbedingung
<b>Fiktiver Streckenverschluss</b>		
5.1	Modell kalte Strecke nur Gebirgsdruck, Kriechklasse 3	Einzelnachweise für Streckenverschluss
		Einzelnachweis Streckenverschluss mit einseitigem Lösungsdruck (fiktiver Porendruck) im Fall Schachtverschlussversagen
		Plausibilitätsbetrachtung Lösungs- und Gasdruck
5.2	Modell kalte Strecke nur Gasdruck, Kriechklasse 3	Nachweisführung Streckenverschluss einseitiger Gasdruck
		Plausibilitätsbetrachtung Lösungs- und Gasdruck



## B Anhang B: Verwendete Stoffmodelle

Für das Steinsalz wird ein isotropes thermo-elasto-viskoplastisches Materialverhalten angenommen, für die Funktionselemente – sofern nicht anders beschrieben – thermoelastisches Verhalten. Die Berechnung erfolgt geometrisch linear, so dass von einer additiven Zerlegung des Verzerrungstensors und des Tensors der Verzerrungsgeschwindigkeiten  $\dot{\varepsilon}$  in einen elastischen, einen thermischen und einen viskoplastischen Anteil ausgegangen werden kann:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_{th} + \dot{\varepsilon}_v \quad (B.1)$$

### B.1 Thermoelastizität

Der elastische und der thermische Anteil genügen dem verallgemeinerten Hookeschen Gesetz, d. h., es gilt:

$$\varepsilon_e = \sigma \cdot \underline{\underline{E}}^{-1} \quad (B.2)$$

mit

- $\varepsilon_e$ : Verzerrungstensor (elastischer Anteil)
- $\sigma$ : Spannungstensor
- $\underline{\underline{E}}$ : Elastizitätstensor

und

$$\varepsilon_{th} = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (B.3)$$

mit

- $\varepsilon_{th}$ : Verzerrungstensor (thermischer Anteil)
- $\alpha_T$ : Thermischer Expansionskoeffizient
- $\Delta T$ : Temperaturerhöhung

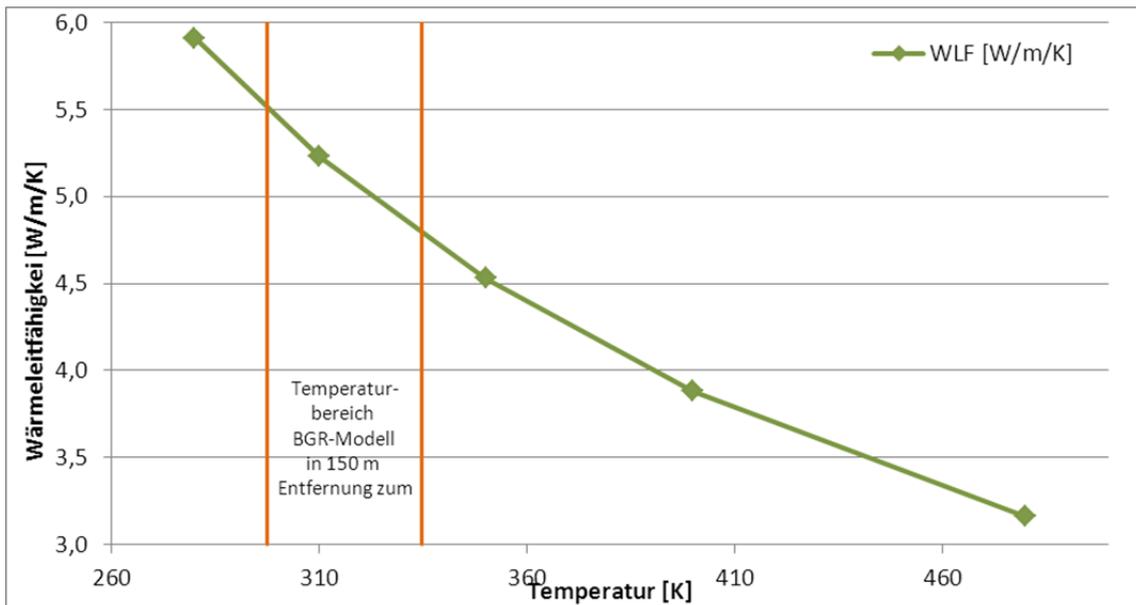
Die elastischen, thermischen und thermoelastischen Parameter für das Salzgestein und den vorhandenen Schachtausbau sind in Tab. B.1 angegeben.

**Tab. B.1** Parameter für das elastische und das thermische Verhalten nach /HEU 11/, /DBE 96/

	Dichte	E-Modul	Quer- kon- trakti- onszahl	Wärme- leitfä- higkeit	Wärmekapazität	Ex- pan- sions- koeffi- zient
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	$\nu$ [-]	$\lambda$ [W/m/K]	$c_p$ [J/kg/K]	$\alpha$ [1/K]
Zech- stein3 (z3) /Steinsalz	$\gamma = 0,022 \text{ MN/m}^3$ $\rho = 0,022 \cdot 1E6 /$ $9,81 \text{ m/s} =$ $2242,61 \text{ kg/m}^3$	25.000	0,27	5,23 <sup>47</sup>	$c \cdot \rho = 22,0$ $\text{W} \cdot \text{d/m}^3/\text{K}$ $c_p = 22,0 \cdot 60 \cdot 60$ $\cdot 24 / (0,022 \cdot 1E6$ $/ 9,81) = 848$ $\text{J/kg/K}$	$4,0 \cdot$ $10^{-5}$
Kaliflöz Staßfurt (z2SF)/ Carnallit	$\gamma = 0,022 \text{ MN/m}^3$ $\rho = 0,022 \cdot 1E6 /$ $9,81 \text{ m/s} =$ $2242,61 \text{ kg/m}^3$	16.000	0,27	1,5 <sup>48</sup>	$c \cdot \rho = 23,0$ $\text{W} \cdot \text{d/m}^3/\text{K}$ $c_p = 23,0 \cdot 60 \cdot 60$ $\cdot 24 / (0,022 \cdot 1E6$ $/ 9,81) = 886$ $\text{J/kg/K}$	$2,5 \cdot$ $10^{-5}$
Haupt- anhydrit (z3HA)/ Anhydrit/	$\gamma = 0,022 \text{ MN/m}^3$ $\rho = 0,022 \cdot 1E6 /$ $9,81 \text{ m/s} =$ $2242,61 \text{ kg/m}^3$	30.000	0,23	5,12	$c \cdot \rho = 22,0$ $\text{W} \cdot \text{d/m}^3/\text{K}$ $c_p = 22,0 \cdot 60 \cdot 60$ $\cdot 24 / (0,022 \cdot 1E6$ $/ 9,81) = 848$ $\text{J/kg/K}$	$1,6 \cdot$ $10^{-5}$
<b>Schachtausbau</b>						
Stützring/ Stahlprofile und Ver- gussmörtel	2980	49.000	0,15	2,1	1.000	$1,0 \cdot$ $10^{-5}$
Funda- ment/ Stahlbeton	2280	37.000	0,16	2,1	1.000	$1,0 \cdot$ $10^{-5}$
Spritzbeton	2340	38.000	0,2	2,1	1.000	$1,0 \cdot$ $10^{-5}$

<sup>47</sup> Siehe nachfolgender Absatz und Abb. B.1

<sup>48</sup> In /HEU 11/ sind für das Kaliflöz Staßfurt zwei Werte angegeben von 2,14 W/m/K und 1,5 W/m/K. Die Wahl ist für die vorliegende Fragestellung ohne Bedeutung, da Kaliflöz Staßfurt im Rechenmodell nur in vernachlässigbarem Umfang vorkommt.



**Abb. B.1** Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit /HEU 11/

Abb. B.1 zeigt die in /HEU 11/ angegebene Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und die minimalen und maximalen Temperaturen, die sich nach BGR-Berechnungen in 150 m Entfernung vom Schacht (auf der endlagerzugewandten Seite) ergeben. Die erwarteten Temperaturen im Salinar liegen zwischen 297 K und 337 K. Der Einfachheit halber wird für die Steinsalz-Formationen eine temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit von 5,23 W/m/K verwendet.

## B.2 Stationäres Kriechen BGR $\alpha$

Das zeitabhängige Deformationsverhalten wird durch den viskoplastischen Anteil  $\dot{\epsilon}_v$  des Stoffmodells, der als stationäres Kriechen modelliert wird, erfasst. Wie in /HEU 11/ vorgegeben, wird das stationäre Kriechen der Leine-Folge (z3) mit dem Stoffmodell BGR $\alpha$ , d. h.

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{eff}^{cr} \tag{B.4}$$

beschrieben, für die Staßfurt-Folge (z2) wird das Stoffmodell BGR<sub>EB1</sub> und für den Carnallit das Stoffmodell BGR<sub>SF</sub> angesetzt. Die nachfolgende Beschreibung der Stoffmodelle entstammt /BGR 03/:

**Tab. B.2** Stoffmodell für das stationäre Kriechen der Leine-Folge (z3)

$BGRa = \dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = V \cdot A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*}\right)^n$		
$V = \frac{2^K}{32}$		Vorfaktor K: Kriechklasse des Homogenbereichs
A	0,18 d <sup>-1</sup>	Strukturfaktor
Q	54 kJ/mol	Aktivierungsenergie
R	8,314 * 10 <sup>-3</sup> kJ/(mol * K)	Allgemeine Gaskonstante
$\sigma_{eff} = \sqrt{3I_2^D}$		$I_2^D = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$ : zweite Invariante des Spannungsdeviators, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ : Hauptspannungen
$\sigma^*$	1 MPa	Normierungsspannung
n	5	Spannungsexponent

**Tab. B.3** Stoffmodell für das stationäre Kriechen der Staßfurt-Folge (z2)

$BGR_{EB1} = \dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = 5,872 \cdot V \cdot \left[ A_1 \cdot e^{-\frac{Q_1}{RT}} + A_2 \cdot e^{-\frac{Q_2}{RT}} \right] \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*}\right)^n$		
$V = \frac{2^K}{32}$		Vorfaktor K: Kriechklasse des Homogenbereichs
A <sub>1</sub>	2,3 · 10 <sup>-4</sup> d <sup>-1</sup>	Strukturfaktor 1
A <sub>2</sub>	2,1 · 10 <sup>6</sup> d <sup>-1</sup>	Strukturfaktor 2
Q <sub>1</sub>	42 kJ/mol	Aktivierungsenergie 1
Q <sub>2</sub>	113,4 kJ/mol	Aktivierungsenergie 2
R	8,314 * 10 <sup>-3</sup> kJ/(mol * K)	Allgemeine Gaskonstante
$\sigma_{eff} = \sqrt{3I_2^D}$		$I_2^D = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$ : zweite Invariante des Spannungsdeviators, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ : Hauptspannungen
$\sigma^*$	1 MPa	Normierungsspannung
n	5	Spannungsexponent

**Tab. B.4** Stoffmodell für das stationäre Kriechen des Trümmercarnallitits

$BGR_{SF} = \dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*}\right)^n + C \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*}\right)$		
$A$	0,18 d-1	Strukturfaktor
$Q$	54 kJ/mol	Aktivierungsenergie
$R$	$8,314 \cdot 10^{-3}$ kJ/(mol * K)	Allgemeine Gaskonstante
$\sigma_{eff} = \sqrt{3I_2^D}$		$I_2^D = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$ : zweite Invariante des Spannungsdeviators, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ : Hauptspannungen
	1 MPa	Normierungsspannung
$n$	5	Spannungsexponent
$C = A \cdot (C^* - 1) \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*}\right)^{n-2}$		Struktur bzw. Vorfaktor $C^* = 5$ für Trümmercarnallitit $T = 22 \text{ °C} = 295 \text{ K}$ $\sigma^* = 10 \text{ MPa}$

Um die unterschiedliche Kriechfähigkeit der verschiedenen stratigrafischen Einheiten zu berücksichtigen, werden Kriechklassen verwendet, vgl. dazu Kapitel 4.1.



## C Anhang C: Erläuterungen zu Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen

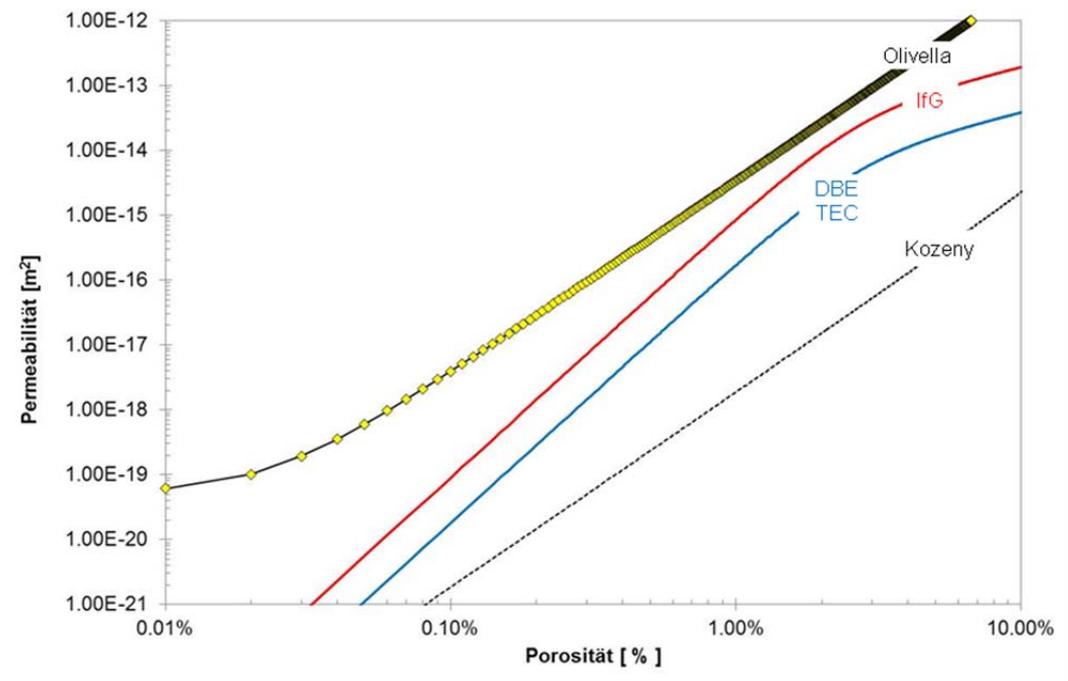
Die Permeabilität  $k$  wird in CODE\_BRIGTH porositätsabhängig angegeben. Die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung von geschädigtem Steinsalz ist noch Stand der Forschung. Zunächst wurde eine kubische Beziehung nach Kozeny verwendet:

$$k = k_0 \frac{\eta^3}{(1-\eta)^2} \frac{(1-\eta_0)^2}{\eta_0^3} \quad (\text{C.1})$$

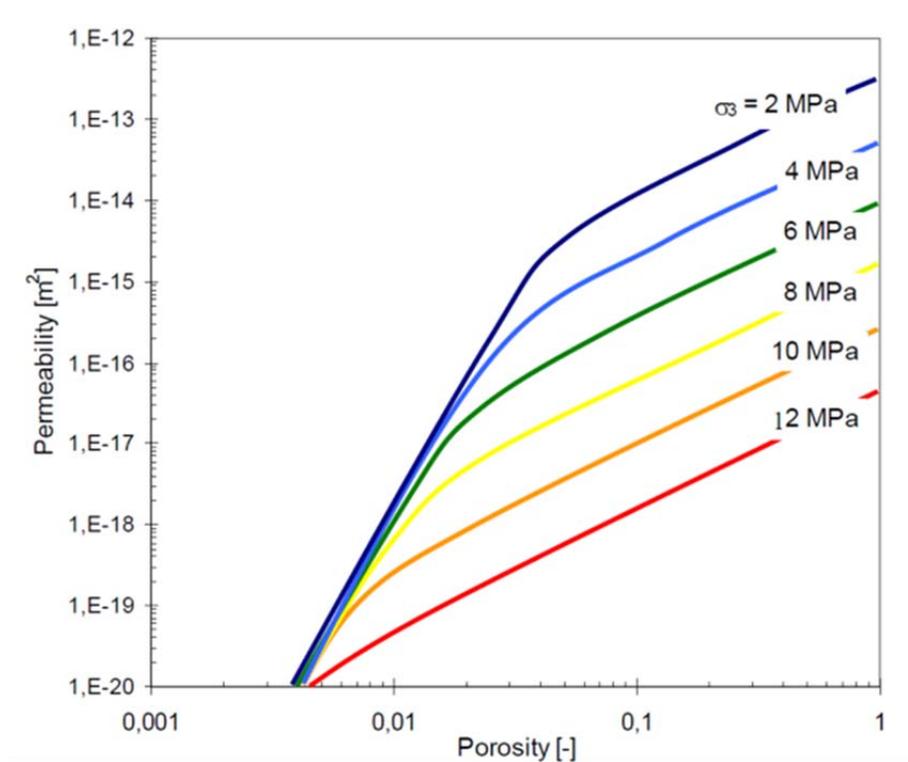
Für aufgelockertes Steinsalz stellte sich im Rahmen des THERESA-Projektes heraus, dass die Kozeny-Beziehung die Permeabilitäts-Porositäts-Relation nicht optimal erfasst. Stattdessen wurde von Olivella eine Mikroriss-Beziehung vorgeschlagen und implementiert /WIE 09/, /WIE 10/. Bei dieser wird von einem Mikrorissnetzwerk mit konstantem Rissabstand ausgegangen, wobei die Rissöffnungsweite durch die Volumendeformation berechnet wird.

Von den Projektpartnern IfG und DBE TECHNOLOGY GmbH wurde eine weitere Beziehung verwendet /HEE 04/, die die Minimalspannungsabhängigkeit auf der Basis von laborativen Untersuchungen nach /POP 02/ integriert. In Abb. C.1 sind die verwendeten Beziehungen in einem Diagramm Permeabilität in Abhängigkeit der Porositätszunahme  $\Delta\phi = \phi - \phi_0$  gegenübergestellt, wobei in dieser Abbildung die Minimalspannung der von IfG bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH verwendeten Beziehungen auf 0,1 MPa gesetzt wurde. Die Abhängigkeit der IfG-Beziehung von der Minimalspannung ist in Abb. C.2 gezeigt.

Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen für aufgelockertes Steinsalz sind zurzeit noch Gegenstand der Forschung; dies gilt im Übrigen auch für die Bildung und insbesondere die Rekompaktion der Auflockerungszone selbst.



**Abb. C.1** Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen für aufgelockertes Steinsalz

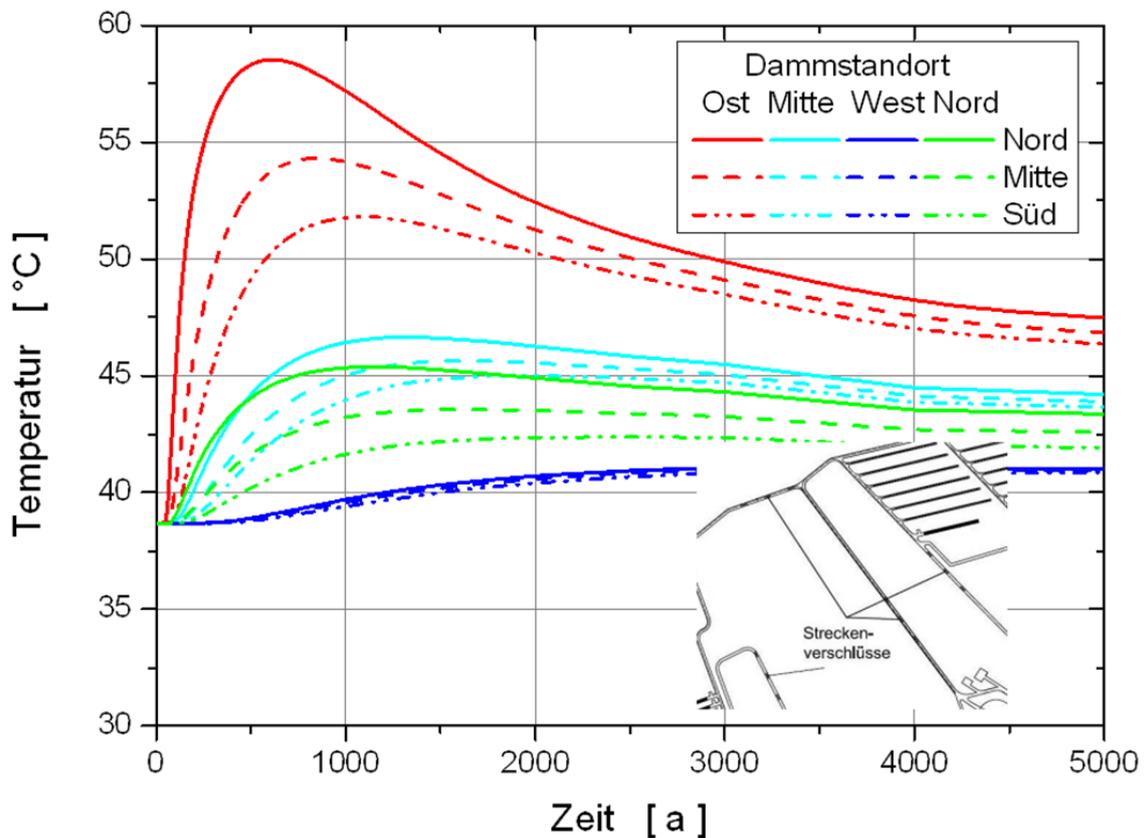


**Abb. C.2** Porositäts-Permeabilitätsbeziehung nach IfG mit Minimalspannungsabhängigkeit /POP 07/

## D Anhang D: Temperatur- und Gasdruckentwicklungen zur Auswahl des fiktiven Streckenverschlusses

### D.1 Temperaturentwicklung

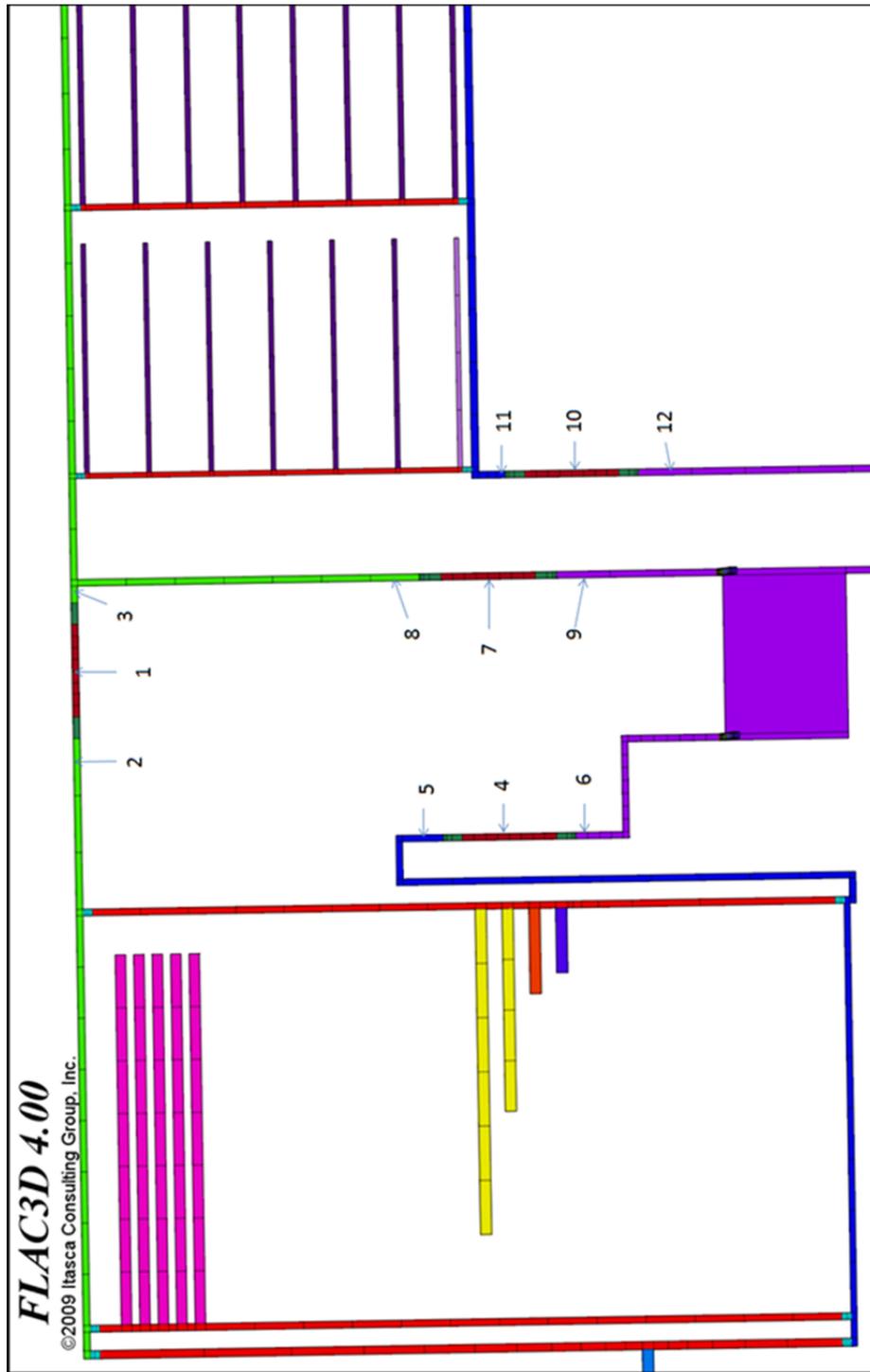
In Abb. D.1 sind die zeitlichen Verläufe der Temperaturentwicklung, die der Auswahl des fiktiven Streckenverschlusses zugrunde liegen, dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass der Streckenverschluss West innerhalb der ersten 1.000 Jahre keine maßgebliche Temperaturerhöhung erfährt und danach auch nur einen Wert von ca. 41 °C erreicht. Die Nutzung isothermer Randbedingungen für den fiktiven Streckenverschluss ist damit angemessen (vgl. Kapitel 8 und 9).



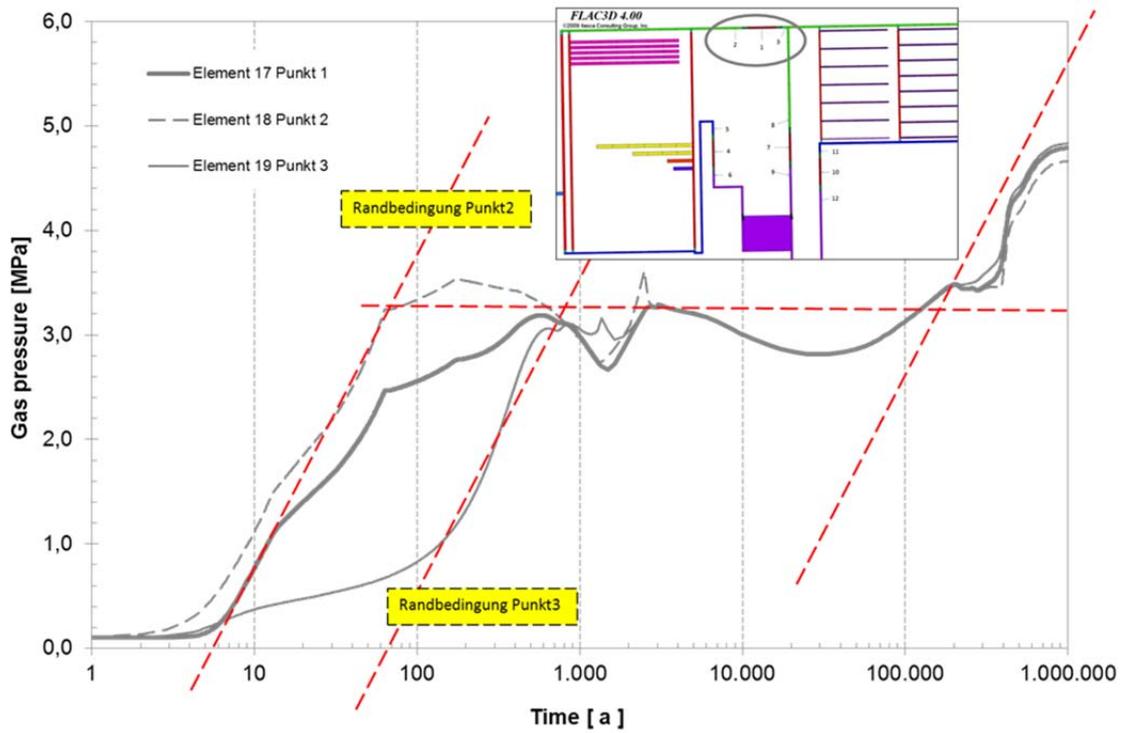
**Abb. D.1** Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung an den Lokationen der Streckenverschlüsse

## D.2 Gasdruckentwicklung

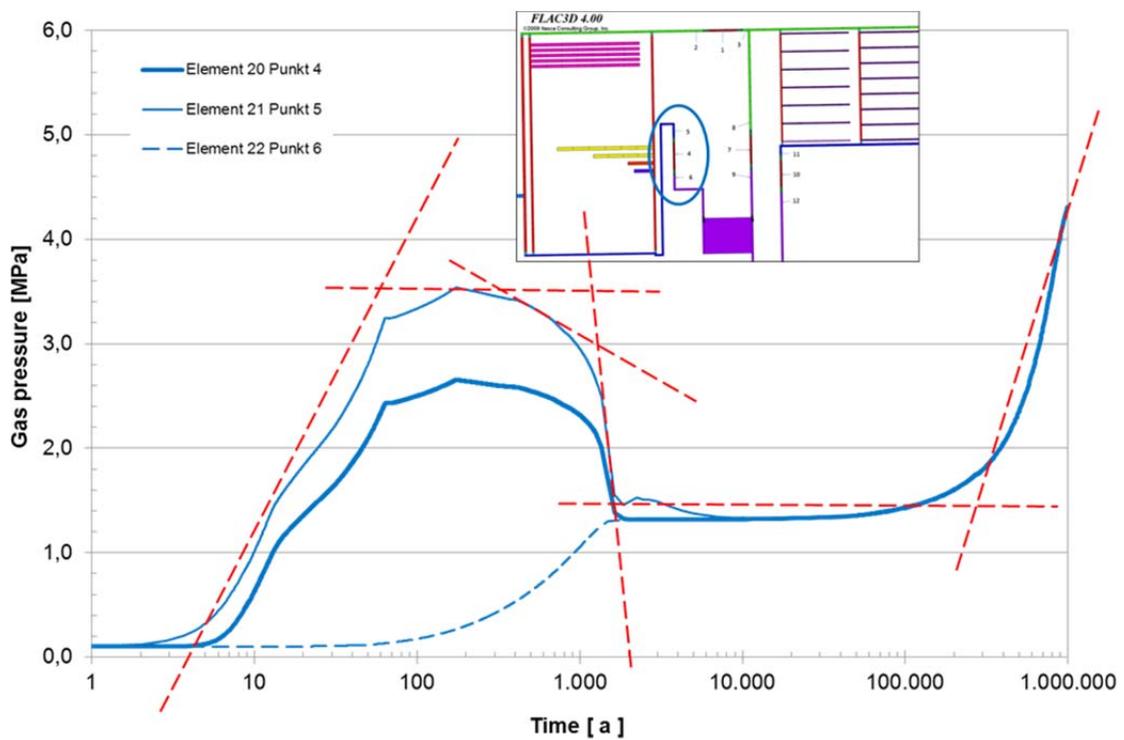
In Abb. D.2 sind die Positionen der Streckenverschlüsse und die gewählten Stützstellen dargestellt, an denen im Rechenmodell die Gasdruckverläufe ausgewertet wurden. Die Gasdruckverläufe selbst, die der Auswahl des fiktiven Streckenverschlusses zugrunde lagen /KOC 12b/, sind in den folgenden Abbildungen Abb. D.3 bis Abb. D.5 angegeben. Anhand Abb. D.5 wird deutlich, dass die Gasdruckentwicklungen an den Streckenverschlüssen Ost und Mitte nicht maßgebend sind, während die Druckanstiegsrate am Streckenverschluss Nord und West zu frühen Zeiten und bezüglich des Maximalwertes von ca. 3,5 MPa nahezu gleich sind. Am Streckenverschluss Nord bleibt das Gasdruckniveau jedoch nahezu erhalten und steigt noch auf etwas höhere Werte an. Am Streckenverschluss West fällt es jedoch wieder ab und bleibt bis zum Ende des für den Streckenverschluss angesetzten Funktionszeitraums von 50.000 Jahren auf einem niedrigen Niveau. Aus diesem Grunde wurde für den fiktiven Streckenverschluss der Gasdruckverlauf des Streckenverschlusses Nord zugrunde gelegt. Auch in weiteren Rechenfällen mit erhöhtem Druckaufbau an den Streckenverschlüssen /KOC 12c/ blieben diese Bedingungen für den Streckenverschluss Nord am ungünstigsten, wobei die ungünstigsten Bedingungen nunmehr auch auf den Streckenverschluss West zutrafen (vgl. Abb. D.6 bis Abb. D.9). Die dem Streckenverschluss Nord letztlich zugrunde gelegte Gasdruckentwicklung ist in Abb. 8.4 in Kapitel 8.5 angegeben.



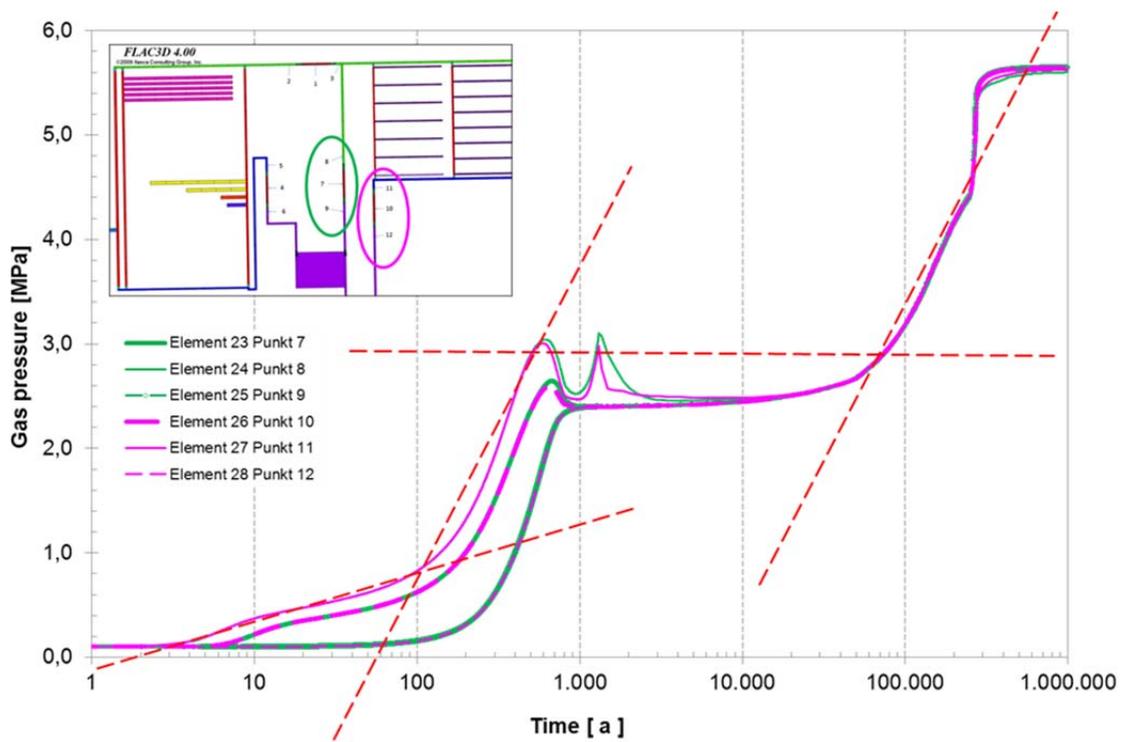
**Abb. D.2** Position der Streckenverschlüsse im Rechenmodell und Stützstellen zur Auswertung der Gasdruckverläufe



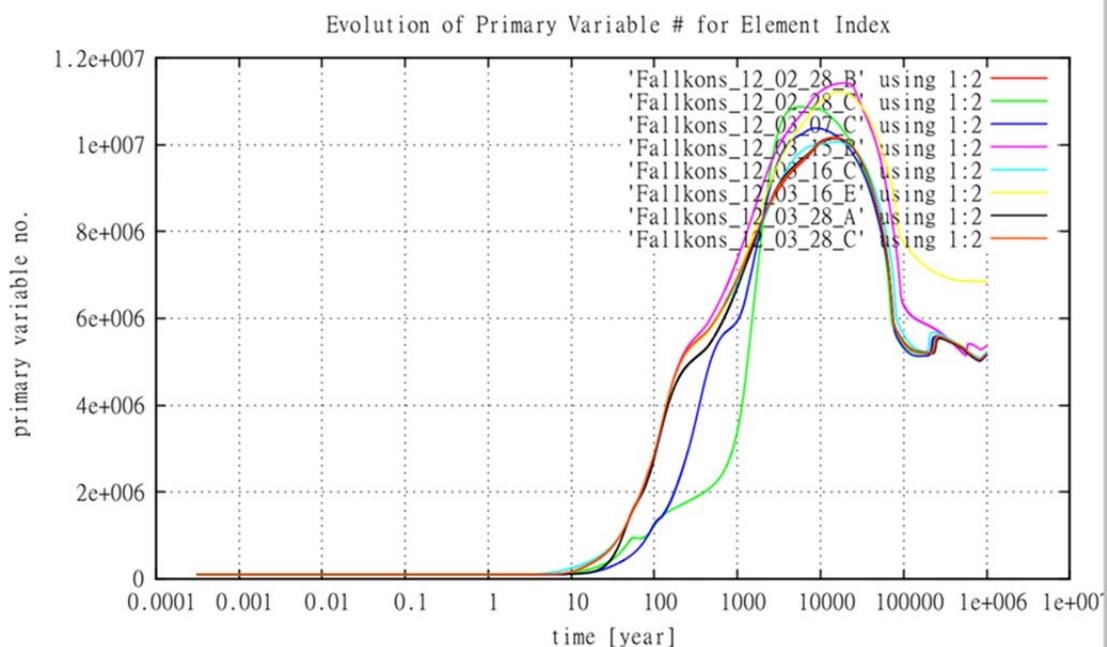
**Abb. D.3** Zeitliche Entwicklung der Gasdrücke am Streckenverschluss Nord (Stützstellen 1, 2, 3) /KOC 12b/



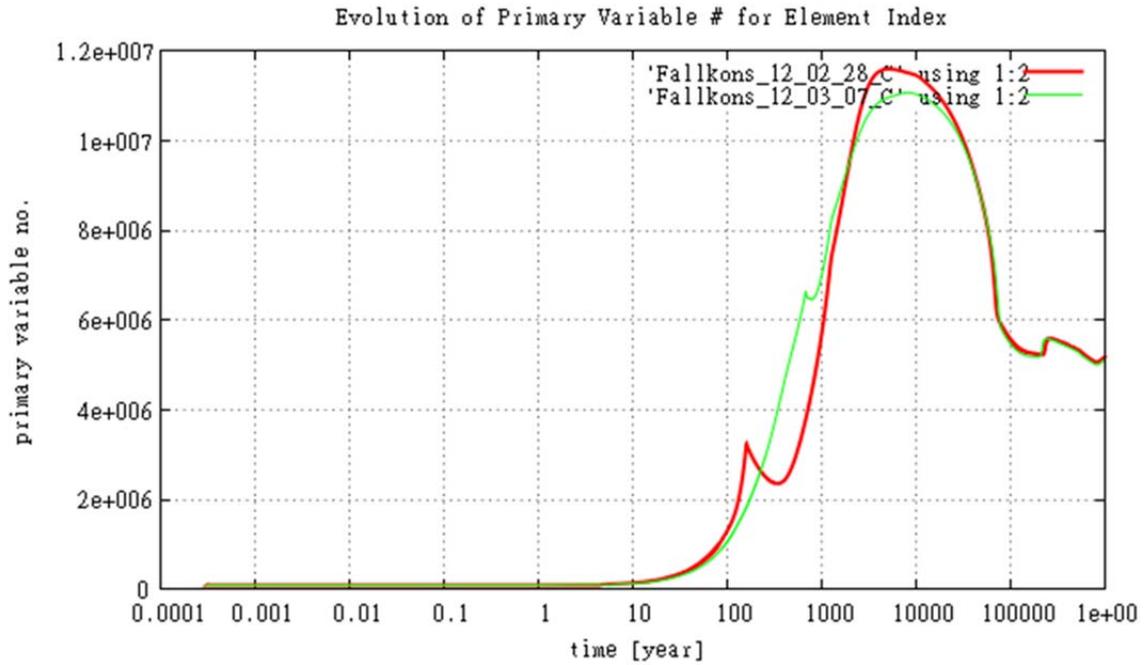
**Abb. D.4** Zeitliche Entwicklung der Gasdrücke am Streckenverschluss West (Stützstellen 4, 5, 6) /KOC 12b/



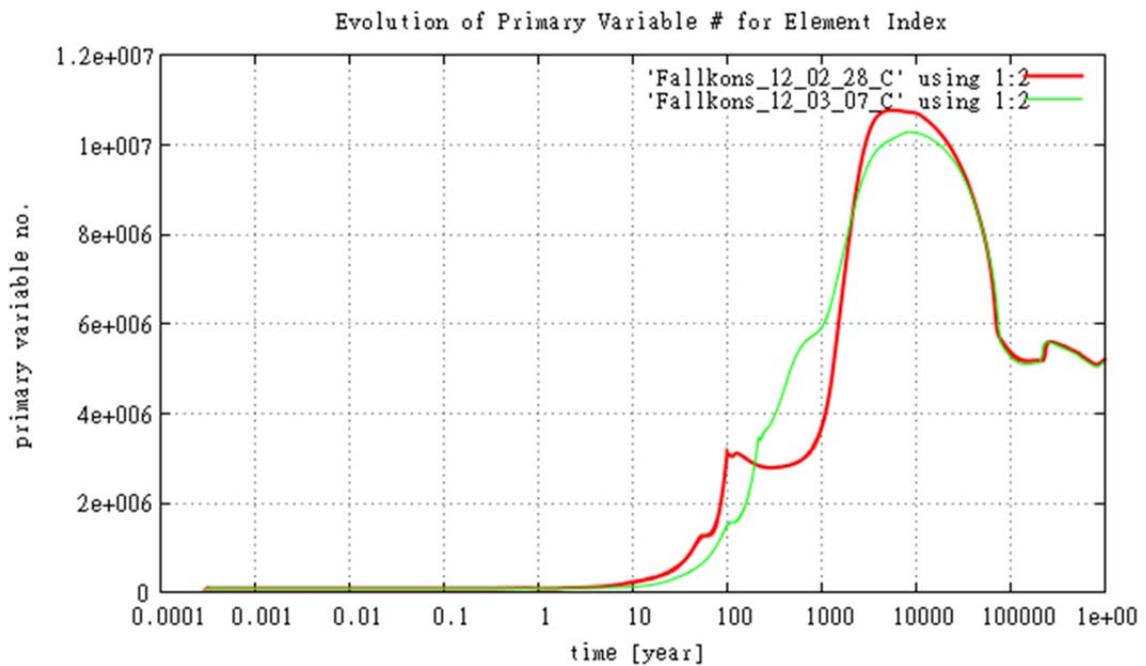
**Abb. D.5** Zeitliche Entwicklung der Gasdrücke an den Streckenverschlüssen Mitte (Stützstellen 7, 8, 9) und Ost Stützstellen (Stützstellen 10, 11, 12) /KOC 12b/



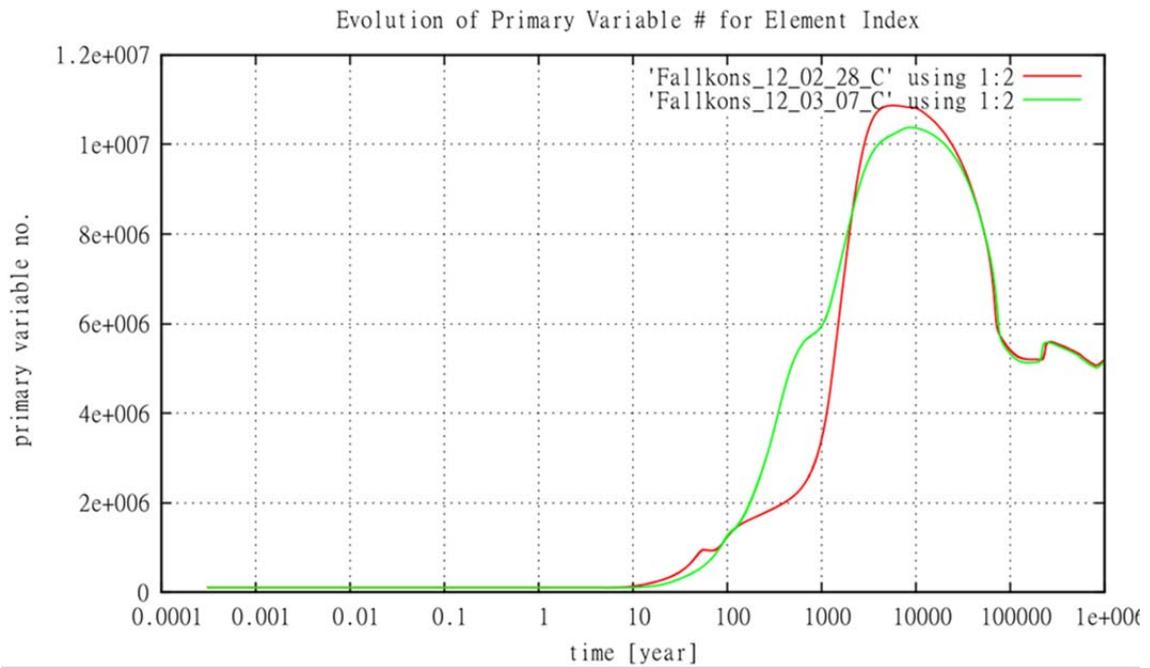
**Abb. D.6** Gesamtdarstellung der Rechenfälle mit erhöhtem Druckaufbau am Streckenverschluss Nord /KOC 12c/



**Abb. D.7** Rechenfälle, zugehörig zum Referenzszenarium mit erhöhtem Druckaufbau am Streckenverschluss West /KOC 12c/



**Abb. D.8** Rechenfälle, zugehörig zum Referenzszenarium mit erhöhtem Druckaufbau Streckenverschluss Ost /KOC 12c/



**Abb. D.9** Rechenfälle, zugehörig zum Referenzszenarium mit erhöhtem Druckaufbau Streckenverschluss Mitte /KOC 12c/



## **E            Anhang E: Beschreibung des Nachweises der Filterstabilität**

Der Nachweis der Filterstabilität ist für Böden (bzw. Erdstoffe/Lockergesteine) zu führen. Er ist also ausschließlich für das 1. Dichtelement aus Bentonit und die zugehörigen Filterschichten aus Sand, Kies und ggf. Splitt maßgeblich. Zum Nachweis der Filterstabilität werden Filterregeln angewendet. Filterregeln geben an, welche Kornverteilungen aneinander grenzende Erdstoffe haben dürfen, ohne dass feine Bestandteile des Bodens geringerer Durchlässigkeit ausgespült werden, wenn Wasser durch den Erdstoff sickert oder strömt.

Die Kornverteilungen von Böden werden bestimmt, indem die Böden mit verschiedenen großen genormten Sieben gesiebt werden. Der durchlässigere Boden mit den größeren Körnern (das Filtermaterial) darf im eingebauten Zustand nicht so große Porenkanäle haben, dass die feinen Körner des hydraulisch geringer durchlässigen Erdstoffes hindurch transportiert werden können. Das Verhältnis der Korngröße des Filtermaterials zu der des abzufilternden Bodens darf folgende Bedingungen nicht verletzen /SCH 94/.

$$d_{15,f}/d_{85,b} < 4 < d_{15,f}/d_{15,b} \quad (E.1)$$

mit

$d_{15,f}$ : Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang des Filtermaterials

$d_{85,b}$ : Durchmesser bei 85 % Siebdurchgang des abzufilternden Bodens

Andere Siebdurchgänge werden sinngemäß durch Modifikation der Indizes gekennzeichnet.

Beide Regeln sind nur gültig, wenn für die Ungleichförmigkeitszahlen  $U = d_{60}/d_{10}$  des Filtermaterials  $U_f$  als auch des abzufilternden Bodens  $U_b$  gilt

$$U_f < 2 \wedge U_b < 2 \quad (E.2)$$

Der Nachweis der Filterstabilität wird hier nur beschrieben, auf die detaillierte Ermittlung der Sieblinien für abgestuften Filtermaterialien wird hier aus Zeitgründen verzichtet.

Da die Mindestdicke  $d_{\min}$  eines Kornfilters

$$d_{\min} = 25 * d_{50,f} \quad (E.3)$$

beträgt, ist offensichtlich, dass bei einer Mächtigkeit des kleineren, unteren Filters von 14 m (Abb. 2.2) ausreichend Platz für fein abgestufte Filterschichten vorhanden ist. Es kann also ohne weitere Detaillierung des Nachweises festgestellt werden, dass der Nachweis der Filterstabilität gelingt.

## Abbildungsverzeichnis der Anhänge

Abb. A.1	Flowchart des Gesamtnachweises .....	299
Abb. B.1	Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit /HEU 11/ .....	305
Abb. C.1	Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen für aufgelockertes Steinsalz.....	310
Abb. C.2	Porositäts-Permeabilitätsbeziehung nach IfG mit Minimalspannungsabhängigkeit /POP 07/ .....	310
Abb. D.1	Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung an den Lokationen der Streckenverschlüsse .....	311
Abb. D.2	Position der Streckenverschlüsse im Rechenmodell und Stützstellen zur Auswertung der Gasdruckverläufe .....	313
Abb. D.3	Zeitliche Entwicklung der Gasdrücke am Streckenverschluss Nord (Stützstellen 1, 2, 3) /KOC 12b/ .....	314
Abb. D.4	Zeitliche Entwicklung der Gasdrücke am Streckenverschluss West (Stützstellen 4, 5, 6) /KOC 12b/ .....	314
Abb. D.5	Zeitliche Entwicklung der Gasdrücke an den Streckenverschlüssen Mitte (Stützstellen 7, 8, 9) und Ost Stützstellen (Stützstellen 10, 11, 12) /KOC 12b/ .....	315
Abb. D.6	Gesamtdarstellung der Rechenfälle mit erhöhtem Druckaufbau am Streckenverschluss Nord /KOC 12c/.....	315
Abb. D.7	Rechenfälle, zugehörig zum Referenzszenarium mit erhöhtem Druckaufbau am Streckenverschluss West /KOC 12c/ .....	316
Abb. D.8	Rechenfälle, zugehörig zum Referenzszenarium mit erhöhtem Druckaufbau Streckenverschluss Ost /KOC 12c/.....	316
Abb. D.9	Rechenfälle, zugehörig zum Referenzszenarium mit erhöhtem Druckaufbau Streckenverschluss Mitte /KOC 12c/ .....	317



## Tabellenverzeichnis der Anhänge

Tab. A.1	Erläuterung der Rechenfälle .....	300
Tab. B.1	Parameter für das elastische und das thermische Verhalten nach /HEU 11/, /DBE 96/ .....	304
Tab. B.2	Stoffmodell für das stationäre Kriechen der Leine-Folge (z3) .....	306
Tab. B.3	Stoffmodell für das stationäre Kriechen der Staßfurt-Folge (z2) .....	306
Tab. B.4	Stoffmodell für das stationäre Kriechen des Trümmercarnallitits .....	307

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**DBE TECHNOLOGY GmbH**

Eschenstraße 55

31224 Peine

**ISBN 978-3-939355-64-9**