



**Stilllegung ERAM /
Verfüllen und Verschließen
von Strecken**

**Anforderungen an die
Streckenverschlüsse
aus Salzbeton
- Phase 1 -**

BS-Projekt-Nr. 0108-03/13

erstellt im Auftrag der

IHU Geologie und Analytik GmbH
Dr.-Kurt-Schumacher-Str. 23
39576 Stendal

durch die

Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

Aachen, 15.04.2010

Anmerkung:

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers (BS) wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.



AUTOREN

Dieser Bericht wurde erstellt von folgenden Bearbeitern der Brenk Systemplanung GmbH:

- Dipl.-Phys. S. Kistingner
- Dipl.-Phys. G. Hoppe
- Dipl.-Geol. R. H. Stollenwerk
- Dr. S. Wörlen

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

PRÜFUNG UND FREIGABE

geprüft	freigegeben
Unterschrift Projektleiter	Unterschrift Geschäftsleitung

ZUSAMMENFASSUNG

Die Herstellung von Streckenverschlüssen ist ein wesentlicher Bestandteil des Stilllegungskonzepts. Es wird damit die Zielstellung verfolgt, die Einlagerungsbereiche (ELB) hydraulisch von der Restgrube abzukoppeln, d. h. den Zutritt von Flutungswässern aus der Restgrube in die ELB sowie den Austritt kontaminierter Lösungen aus den ELB in die Restgrube einzuschränken. Zum Nachweis der ausreichenden Funktionsfähigkeit der Abdichtungen hat das BfS verschiedene Unterlagen vorgelegt. Gegenstand dieses Gutachtens ist die Vollständigkeitsprüfung der in diesen Unterlagen dargestellten Nachweisführung hinsichtlich hydraulischer und chemischer Aspekte.

Die Nachweisführung des BfS besteht zu wesentlichen Teilen aus Modellrechnungen. Da bei Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager sehr lange Zeiträume zu berücksichtigen sind, für die keine praktischen Erfahrungen mit den Baustoffen und technischen Bauwerken bestehen, ist sicherzustellen, dass bei den theoretischen Analysen und Modellierungen auch alle relevanten Einflussfaktoren bedacht und ausreichend berücksichtigt werden. Um hierbei eine möglichst hohe Vollständigkeit zu erzielen und nachzuweisen, wird international empfohlen, zunächst alle Einflussfaktoren systematisch zusammenzustellen und dann auf dieser Basis die System- und Konsequenzenanalyse durchzuführen.

Bei der Prüfung der Antragsunterlagen des BfS stellten wir fest, dass solche systematischen Zusammenstellungen der möglichen Einflussgrößen nicht enthalten sind. Weiterhin wird vom BfS die von ihm verwendete Nachweismethodik nur unvollständig dargestellt, so dass es auf dieser Basis nicht möglich ist, die Vollständigkeit der Nachweisführung zu erkennen. Schwerpunkt dieses Gutachtens ist deshalb eine Zusammenstellung der Einflussfaktoren und die Analyse der Nachweismethodik des BfS.

Die Zusammenstellung der Einflussfaktoren, in der internationalen Fachöffentlichkeit FEP genannt, erfolgt in Kapitel 2 bzw. Anhang A. Wir gehen davon aus, dass die dort aufgeführten Einflussfaktoren für die Phase des Abbindens des Salzbetons vollständig sind. Die Zusammenstellung der FEP ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch nicht abschließend ausgearbeitet. Es fehlen hierzu noch

- die systematische Ableitung der (in diesem Gutachten zusammengestellten) makroskopischen Zustandsgrößen aus der mikroskopischen Betrachtungsweise,
- die systematische Ableitung der wechselseitigen Beeinflussungen der (in diesem Gutachten zusammengestellten) Zustandsgrößen,
- die präzisierte Darstellung der Prozesse als mathematische Formeln,
- die systematische Ableitung der (in diesem Gutachten zusammengestellten) Materialparameter und
- eine dem Anhang A entsprechende Zusammenstellung der FEP für die Nachbetriebsphase.

Weiterhin halten wir es für zweckmäßig, die Übersichtlichkeit der Darstellung, z. B. durch die Erstellung von Abhängigkeitsmatrizen, zu erhöhen.

Die vollständigen Aufstellungen sollten dann die Basis für die Vollständigkeitsprüfung der (noch vorzulegenden, s. u.) Nachweise bilden.

In Kapitel 3 analysieren wir zunächst die Nachweismethodik des BfS. Das BfS stellt in den Unterlagen Teilnachweise dar, ohne dass ausreichend klar erläutert wird, weshalb genau diese Teilnachweise zu erbringen sind und weshalb sie für die gesamte Nachweisführung ausreichen. Unsere Analyse, die in der Erstellung von zwei Nachweisbäumen mündet, basiert deshalb notwendigerweise auf Interpretationen zur Vorgehensweise des BfS. Wir können die von uns unterstellten Vorgehensweise des BfS nicht immer belegen und Fehlinterpretationen nicht ausschließen. Eine wesentliche potentielle Schwachstelle bei der Nachweismethodik des BfS ist die unzureichend begründete Entkopplung der chemischen und mechanischen Einflussfaktoren. Bei der anschließenden Analyse der Nachweisführung kommen wir zu dem Ergebnis, dass die vorliegenden Unterlagen keine Nachweise darstellen, sondern dass in ihnen lediglich die Methodik der noch vorzulegenden Nachweise (nach obiger Einschätzung unzureichend) dargestellt wird. Abschließend formulieren wir Prüffragen, nach denen die noch vorzulegenden Nachweise geprüft werden sollten.

In Kapitel 4 und 5 ermitteln wir näherungsweise die in der Nachbetriebsphase auf die Abdichtungen lastenden möglichen Fluiddrücke durch Flutungswässer (Kapitel 4) und Gase aus der Zersetzung von Metallen und Organika in den Einlagerungsbereichen (Kapitel 5). Wegen der großen Unsicherheiten wesentlicher Prozessabläufe (vgl. [BS 09]) ergeben sich hierbei große Bandbreiten. Bei den durchgeführten Modelrechnungen zum potentiellen Laugendruck wurde – vertragsgemäß – die Konvergenz noch nicht berücksichtigt. Sofern in einer späteren zweiten Prüfungsphase detailliertere Abschätzungen erforderlich sind, sollte das verwendete Modell diesbezüglich ergänzt werden.

In Kapitel 6 analysieren wir die Bedeutung einer inhomogenen Durchströmung der Abdichtungen. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass eine inhomogene Durchströmung zu einer schnelleren Korrosion der Abdichtungen führen kann und dass dieser Aspekt vom BfS bislang nicht ausreichend betrachtet wird. In einer zweiten Prüfungsphase sollten hierzu numerische Berechnungen mit dem Ziel einer Quantifizierung dieses Effekts durchgeführt werden. Da das Konzept des BfS in den Abdichtungen Querrisse zulässt, analysieren wir in Kapitel 6 auch deren Einfluss auf die effektive Permeabilität der Abdichtungen. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass Querrisse nur dann unschädlich sind, wenn es in den Abdichtungen keine Vorzugsfließwege in Längsrichtung gibt, die durch die Querrisse miteinander verbunden werden könnten.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

ZUSAMMENFASSUNG

1. EINLEITUNG	1
2. EINFLUSSFAKTOREN FÜR DIE STRECKENVERSCHLÜSSE	3
2.1. Zusammenstellung der relevanten iFEP.....	4
2.2. Angaben zu iFEP-Ebene 0	6
2.3. Angaben zu iFEP-Klasse 1.1.04	8
2.4. Angaben zu iFEP-Klassen 2.1 und 2.2	9
2.4.1. Herstellungsphase.....	10
2.4.1.1. Phase der Standortauswahl.....	10
2.4.1.2. Phase der Standortvorbereitung.....	10
2.4.1.3. Phase des Materialeintrags	11
2.4.1.4. Phase des Abbindens.....	12
2.4.1.4.1. Interne FEP	13
2.4.1.4.2. Koppelnde Prozesse	18
2.4.1.4.3. Externe FEP	19
2.4.1.5. Phase der Nachbehandlung.....	19
2.4.2. Bestehensphase	20
2.4.2.1. Zeitliche Unterteilung	20
2.4.2.2. Gliederung der FEP	21
3. ANFORDERUNGEN UND NACHWEISFÜHRUNG	22
3.1. Anforderungen an die Abdichtungen aus der LSA	22
3.2. Nachweiserfordernisse des BfS.....	23
3.2.1. Angaben in [P 195]	23
3.2.2. Angaben in [P 255]	26
3.2.3. Angaben in [I 366]	26
3.2.4. Bewertung	27
3.2.4.1. Grundsätzliche Beschränkungen bei der Nachweisführung	27
3.2.4.2. Analyse der Vorgehensweise des BfS	28
3.2.4.2.1. Analyse des Vorgehens in [P 195] und [P 255]	30
3.2.4.2.2. Analyse des Vorgehens in [I 366]	39
3.2.4.3. Bewertung der Vorgehensweise des BfS	45
3.3. Vorliegende Nachweise.....	47



3.4. Prüffragen.....	48
3.5. Sonstige Bewertungen.....	51
4. LAUGENDRUCK AUF DIE ABDICHTUNGEN.....	52
4.1. Abschätzung des Laugendrucks in der Restgrube	52
4.1.1. Hohlraumbilanz.....	52
4.1.2. Flutungsverlauf.....	56
4.2. Vergleich mit den Angaben in den Planunterlagen.....	62
5. GASDRUCK AUF DIE ABDICHTUNGEN	65
5.1. Abschätzung des Gasdrucks in den ELB.....	65
5.2. Vergleich mit den Angaben in den Planunterlagen.....	75
6. ZUR BEDEUTUNG VON INHOMOGENITÄTEN	77
6.1. Bedeutung der Auflockerungs- und der Kontaktzone	77
6.1.1. Bewertung der Angaben des BfS.....	77
6.1.1.1. Angaben in [A 281Q]	77
6.1.1.2. Angaben in [G 296].....	78
6.1.1.3. Angaben in [P 192].....	79
6.1.1.4. Angaben in [P 195].....	80
6.1.1.5. Angaben in [P 255].....	83
6.1.1.6. Angaben in [P 298].....	84
6.1.1.7. Angaben in [P 266].....	89
6.1.1.8. Angaben in [P 278].....	91
6.1.1.9. Angaben in [P 277].....	92
6.1.2. Bewertung der Konsistenz der Unterlagen	95
6.1.3. Abschätzung der Relevanz der Inhomogenität einer Durchströmung.....	97
6.2. Bedeutung von Querrissen.....	98
7. GLOSSAR	100
8. LITERATUR.....	101

Anhang A: FEP-Liste für eine Abdichtung aus Salzbeton in die Phase des Abbindens – Entwurf

1. EINLEITUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat beim zuständigen Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens nach § 9 b Atomgesetz (AtG) zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) beantragt.

Zum Themenkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ legte das BfS hierzu u. a. die Unterlagen [P 192], [P 195], [P 255], [P 256], [P 262], [P 263], [P 264] und [I 343] vor.

Diese Unterlagen sowie weitere¹ sind lt. Aufgabenstellung des MLU an die Gesellschaft für Ingenieur – Hydro – und Umweltgeologie mbH (IHU) vom 11.04.2008 hinsichtlich der folgenden Fragestellungen zu prüfen:

1. Sind die zum Bau der Streckenabdichtungen vorgesehenen konstruktiven Maßnahmen realisierbar?
2. Ist zu erwarten, dass die so konstruierten Streckenabdichtungen die Anforderungen aus den vom BfS vorgelegten Langzeitsicherheitsanalysen erfüllen werden?
3. Ist die Nachweisführung zur Dichtwirkung der Streckenabdichtungen vollständig und kann sie inhaltlich akzeptiert werden (z. B. hinsichtlich der verwendeten Nachweiskriterien, der berücksichtigten Berechnungs- bzw. Lastfälle und dem Beleg der Materialeigenschaften)?

Die Frage der chemischen Beständigkeit ist bei der Prüfung auszuklammern, da diese dem Prüfkomples „Langzeitsicherheit“ zugeordnet ist. Die Unterlagenprüfung soll in zwei Arbeitsschritten erfolgen, nämlich einer Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung in einer Phase 1 und einer Prüfung und Bewertung der vorgelegten Nachweisführung in einer Phase 2.

Zur Berücksichtigung der sich aus der LSA ergebenden Anforderungen an die Streckenverschlüsse wurde von der IHU die Brenk Systemplanung GmbH (BS) eingebunden. Die Aufgaben von BS umfassen:

Identifizierung impliziter Annahmen und Anforderungen an die Streckenverschlüsse

- Systematische Aufstellung der Faktoren, die die Wirksamkeit der Abdichtungen beeinflussen (in Form von zu benennenden und zu beschreibenden FEP).
- Identifizierung aller impliziten Annahmen und Anforderungen an die Streckenverschlüsse, die sich aus ihrer abstrahierten Beschreibung in der LSA ergeben.
- Identifizierung sich hieraus ergebender Prüffragen. Festlegung der (im weiteren zu behandelnden) Fragen hydraulischer und chemischer Natur.
- Prüfung, in wieweit diese Fragen hydraulischer und chemischer Natur in den Prüfunterlagen beantwortet werden (i. S. einer Vollständigkeitsprüfung).

Die Ergebnisse der Arbeiten zum ersten Punkt enthält Kapitel 2 dieses Gutachtens.

¹ vgl. Schreiben des MLU vom 22.07.2008

Im Verlauf der Prüfungen stellte sich heraus, dass die Aufgabenstellung des zweiten Punkts unzweckmäßig formuliert ist. Die idealisierten Abdichtungen in der LSA weisen z. T. Eigenschaften auf, die von den realen Abdichtungen nicht exakt erfüllt werden können und auch nicht erfüllt werden müssen. Die Anforderung an die Abdichtungen besteht also nicht darin, dass sie konkrete Eigenschaften (z. B. die der idealisierten Abdichtungen) aufweisen sollen, sondern darin, dass sie sich unter dem Einfluss aller relevanten (in Kapitel 2 zusammengestellten) Einflussfaktoren nicht ungünstiger verhalten als die idealisierten Abdichtungen in der LSA. Die Aufgabenstellung sollte deshalb lauten:

- „Prüfung der Nachweisführung, dass sich die realen Abdichtungen unter dem Einfluss aller relevanten Einflussfaktoren nicht ungünstiger verhalten als die idealisierten Abdichtungen in der LSA.“

In Kapitel 3 erfolgt eine Analyse der vorliegenden Nachweise hinsichtlich dieser Aufgabenstellung und es werden Prüffragen zusammengestellt. Da wir zu dem Ergebnis kommen, dass die o. g. Unterlagen keine Nachweise darstellen, sondern dass in ihnen lediglich die Methodik der noch vorzulegenden Nachweise geschildert wird, wird der vierte Punkt der Aufgabenstellung auf die zweite Prüfungsphase verschoben.

Abschätzung des Fluiddrucks an den Streckenverschlüssen

- Plausibilitätsprüfung der diesbezüglichen Abschätzungen in [P 195] und [P 255].
- Erstellung einer detaillierten teufenabhängigen Hohlräumbilanz (unter Berücksichtigung der vorgesehenen Verfüllungen).
- Abschätzung des Fluiddrucks auf der Basis der detaillierten Hohlräumbilanzierung (keine Berücksichtigung von Konvergenz und Umlösungsprozessen).

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in Kapitel 4 enthalten.

Abschätzung des Gasdrucks an den Streckenverschlüssen

- Berechnung der zeitlichen Entwicklung des Gasdrucks in den Einlagerungsbereichen (West-Süd-Feld und Ostfeld) für den Referenzfall und für ausgewählte konservative Parametersätze. Die Berechnungen werden mit dem bei BS vorhandenen Programm zur LSA durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in Kapitel 5 enthalten.

Hydraulische und chemische Inhomogenitäten in den Streckenverschlüssen

- Qualitative Betrachtungen und analytische Abschätzungen zur Bedeutung der Kontaktfuge.
- Qualitative Betrachtungen zur Bedeutung von Querrissen in Verbindung mit der (ggf. inhomogenen) Kontaktfuge.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in Kapitel 6 enthalten.

2. EINFLUSSFAKTOREN FÜR DIE STRECKENVERSCHLÜSSE

Die Herstellung von Streckenverschlüssen ist ein wesentlicher Bestandteil des Stilllegungskonzepts. Es wird damit die Zielstellung verfolgt, die Einlagerungsbereiche (ELB) hydraulisch von der Restgrube abzukoppeln, d. h. den Zutritt von Flutungswässern aus der Restgrube in die ELB sowie den Austritt kontaminierter Lösungen aus den ELB in die Restgrube einzuschränken². Die Wirksamkeit der Streckenverschlüsse wird durch Faktoren (sog. FEP = Systemeigenschaften (engl. „features“), Effekte und Prozesse) beeinflusst, welche bei der Planung und Ausführung sowie bei der Abschätzung der Wirksamkeit der Verschlüsse zu berücksichtigen sind.

Um bei der Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Stoffe bzgl. der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren einen möglichst hohen Grad an Vollständigkeit zu erzielen, wurde von der OECD/NEA die sogenannte Internationale FEP-Liste („iFEP-Liste“) [NEA 00] erstellt, die als Ausgangsbasis für eine standortspezifische Identifizierung, Charakterisierung und Analyse der Einflussfaktoren dienen soll. Die iFEP-Liste weist nur Klassen von FEP aus, die standortspezifisch auszugestalten sind und für die zu spezifizieren ist, welche konkreten Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind.

Bei der Bewertung des für das ERAM vorgesehene Systems aus Abdichtungen ist deshalb zu prüfen, welche konkreten Einflussfaktoren sich auf die Abdichtungen auswirken können bzw. welche Faktoren die beabsichtigten Eigenschaften der Abdichtungen beeinflussen können. Voraussetzung für eine solche Prüfung ist, dass eine vollständige – auf die Abdichtungen bezogene – FEP-Liste vorliegt, anhand derer die erforderlichen Nachweise identifiziert und die Führung aller erforderlichen Nachweise kontrolliert werden können.

Mit den Antragsunterlagen wurde keine entsprechende FEP-Liste vorgelegt. Die vom Antragsteller geführten Nachweise bzw. das von ihm verwendete Nachweischema sind nicht ohne weiteres in das Schema der iFEP-Liste einzupassen. Eine Prüfung zur Vollständigkeit der Nachweisführung ist auf der Basis der vorliegenden Angaben und Unterlagen nicht möglich.

Für die Prüfung der zu den Abdichtungen vorgelegten Nachweise ist es daher erforderlich, zunächst eine vollständige FEP-Liste auszustellen. Die zu beachtenden Eigenschaften, Zustände, Prozesse, Effekte, Kopplungen und Wechselwirkungen unter Berücksichtigung aller möglicherweise relevanten physikochemischen Zusammenhänge sind sehr komplex. Im Rahmen des vorliegenden Berichts wurde dazu – ausgehend von der iFEP-Liste – eine erste FEP-Liste zu den Streckenabdichtungen des ERAM erarbeitet, die zwar bereits ausführlich ist, jedoch noch keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erhebt bzw. erheben kann.

Im Rahmen der weiteren Arbeiten zu diesem Prüfkomplex sollte die Zielstellung verfolgt werden, diese erste FEP-Liste mittels Aufstellung einer Abhängigkeitsmatrix weiter zu entwickeln. Dabei

² Ein Nebeneffekt dieser Maßnahmen ist das Erzielen einer mechanischen Stützwirkung für die verfüllten Streckenabschnitte. Er ist jedoch von untergeordneter Bedeutung. Da die Funktionsfähigkeit der Abdichtungen deren Stand-sicherheit voraussetzt, ergeben sich aus der Forderung nach Stützwirkung zudem keine zusätzlichen Anforderungen an die Abdichtungen.

sind die Zusammenhänge und Wechselwirkungen der verschiedenen Faktoren zu berücksichtigen. Erst im Zuge dieser Arbeiten wird es möglich sein, die Vollständigkeit der FEP-Liste darzulegen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die für die Abdichtungen relevanten FEP der iFEP-Liste identifiziert (Abschnitt 2.1) und die hier relevanten Einflussfaktoren nach den Ebenen 0, 1 und 2 der iFEP-Liste zusammengestellt (Abschnitte 2.2 bis 2.4). Die dieser Zusammenstellung zugrunde gelegten Annahmen, Überlegungen, Voraussetzungen etc. werden dabei erläutert. Ergebnis der Zusammenstellung ist die in Anhang A beigefügte FEP-Liste für die Phase des Abbindens, die in dieser ersten Fassung in textlicher Form erfolgte und zusätzliche Informationen enthält. Zwecks besserer Lesbarkeit dieses Anhangs sind die textlichen Erläuterungen aus Abschnitt 2.4.1.4 dort ebenfalls weitgehend enthalten.

2.1. Zusammenstellung der relevanten iFEP

Der Begriff „FEP“ wird in [NEA 00] in einer verallgemeinerten Form verwendet und es werden vier Ebenen von „FEP“ (Ebenen 0, 1, 2, und 3) betrachtet.

In der Ebene 0 werden der Bewertungsrahmen aufgespannt und die Anforderungen an die LSA beschrieben (bspw. Zielgrößen der Bewertung, Betrachtungszeitraum, rechtliche Grundlagen, ...). Hierbei handelt es sich somit um keine Beschreibung des (physikalischen) Endlagersystems, sondern um eine Darlegung des (von der Gesellschaft vorgegebenen) Bewertungsrahmens.

In den Ebenen 1 bis 3 werden „physikalische“ Einflussfaktoren des Endlagersystems beschrieben. Die Ebene 1 enthält zum einen die „äußeren“ Einflussfaktoren, die auf das Endlagersystem wirken. Hierbei wird zwischen geologischen (FEP-Klasse 1.2), klimatischen (FEP-Klasse 1.3) und durch künftiges menschliches Handeln verursachten (FEP-Klasse 1.4) Einflussfaktoren unterschieden. Weiterhin werden (als FEP-Klasse 1.1) der bestehende und der für die Zukunft unterstellte Anlagenzustand sowie die vorgesehenen Verwahrungsarbeiten (inkl. Untersuchungen) dargestellt, da diese für die LSA ebenfalls „von außen“ vorgegebene Einflussfaktoren sind.

Die Ebene 2 beschreibt die „inneren“ Einflussfaktoren, die im Endlager und seiner Umgebung gegenwärtig oder/und künftig wirken, ausgehend von dem in der Ebene 1 beschriebenen Endlagerzustand und der zeitlichen Entwicklung der "äußeren Einflussfaktoren".

Es wird differenziert zwischen

- Abfälle und technische Maßnahmen im Endlager,
- geologische Umgebung,
- Verhältnisse an der Erdoberfläche und
- menschliches Verhalten (an der Erdoberfläche, ohne Einwirkung auf das Endlager).

Die Ebene 3 beschreibt die FEP, die die Ausbreitung der Kontaminanten aus dem Endlager betreffen, ausgehend von den in der Ebene 2 beschriebenen Abläufen im Endlager und der Umgebung. Die FEP dieser Ebene werden gegliedert nach

- Charakterisierung/Eigenschaften der Kontaminanten,
- Freisetzung und Ausbreitung sowie
- die Exposition beeinflussende Faktoren.

Für die Ableitung von Anforderungen an die Streckenabdichtungen sind die folgenden iFEP-Ebenen bzw. Klassen von Bedeutung:

- iFEP-Ebene 0 (Allgemeines)
- iFEP-Klasse 1.1.04 (Schließen und Abdichten des Endlagers)
- iFEP-Klasse 2.1.05, 2.1.07 bis 13 und 2.2.01 (s. Tabelle 2-1)

Tabelle 2-1: Im Zusammenhang mit Streckenabdichtungen zu berücksichtigende FEP der Ebene 2

iFEP-Nr.	Titel	Beschreibung
2.1	Abfälle und technische Systeme	
2.1.05	Abdichtungen	FEPs im Zusammenhang mit der Planung, physikalischen, chemischen, hydraulischen etc. Eigenschaften von Abdichtungen zum Zeitpunkt der Abdichtung und daran anschließend, einschließlich FEPs die insbesondere als Degradationsprozesse für Abdichtungen von Bedeutung sind
2.1.07	Mechanische Prozesse und Bedingungen	FEPs im Zusammenhang mit mechanischen Prozessen, die Abfälle, Behälter, Abdichtungen und andere technische Einrichtungen beeinflussen sowie die allgemeine mechanische Entwicklung im zeitlichen Nahbereich. Dies schließt die Auswirkungen hydraulischer und mechanischer Lasten auf Abfälle, Behälter und Endlagereinrichtungen durch das umgebende Gestein ein.
2.1.08	Hydraulische / hydro-geologische Prozesse und Bedingungen	FEPs im Zusammenhang mit hydraulischen / hydrogeologischen Prozessen, die Abfälle, Behälter, Abdichtungen und andere technische Einrichtungen beeinflussen sowie die allgemeine hydraulische / hydrogeologische Entwicklung im zeitlichen Nahbereich. Dies schließt die Auswirkungen hydraulischer / hydrogeologischer Einwirkungen auf Abfälle, Behälter und Endlagereinrichtungen durch das umgebende Gestein ein.
2.1.09	Chemische / geochemische Prozesse und Bedingungen	FEPs im Zusammenhang mit chemischen/geochemischen Prozessen, die Abfälle, Behälter, Abdichtungen und andere technische Einrichtungen beeinflussen sowie die allgemeine chemische/geochemische Entwicklung im Nahbereich. Dies schließt die Auswirkungen chemischer/geochemischer Einwirkungen auf Abfälle, Behälter und Endlagereinrichtungen durch das umgebende Gestein ein.

Tabelle 2-1: Im Zusammenhang mit Streckenabdichtungen zu berücksichtigende FEP (*Fortsetzung*)

iFEP-Nr.	Titel	Beschreibung
2.1.10	Biologische / biochemische Prozesse und Bedingungen	FEPs im Zusammenhang mit biologischen / biochemischen Prozessen, die Abfälle, Behälter, Abdichtungen und andere technische Einrichtungen beeinflussen sowie die allgemeine biologische / biochemische Entwicklung im Nahbereich. Dies schließt die Auswirkungen biologischer / biochemischer Einwirkungen auf Abfälle, Behälter und Endlagereinrichtungen durch das umgebende Gestein ein.
2.1.11	Thermische Prozesse und Bedingungen	FEPs im Zusammenhang mit dem thermischen Prozess, die Abfälle, Behälter, Abdichtungen und andere technische Einrichtungen beeinflussen sowie die allgemeine thermische Entwicklung im Nahbereich. Dies schließt die Auswirkungen thermischer Einwirkungen auf Abfälle, Behälter und Endlagereinrichtungen durch das umgebende Gestein ein.
2.1.12	Gasbildner und Auswirkungen	FEPs innerhalb und in der Umgebung von Abfällen, Behältern und technischen Einrichtungen, die zu einer Gasproduktion führen, und ihre Folgeauswirkungen auf das Endlagersystem.
2.1.13	Strahlungs- wirkungen	FEPs im Zusammenhang mit Auswirkungen der Strahlungseinwirkungen der Abfälle auf Abfälle, Behälter, Abdichtungen und andere technische Einrichtungen sowie die allgemeine radiogenetische Entwicklung im zeitlichen Nahbereich.
2.2	Geologische Umgebung	
2.2.01	Störungzone im Wirtsgestein um Auf- fahrungen	FEPs im Zusammenhang mit dem Gebirgsbereich im Umfeld von Hohlräumen, Stollen, Schächten oder anderen Grubenhohlräumen, der infolge der Auffahrung mechanisch gestört sein könnte, sowie die Eigenschaften und Bedingungen, die sich vor und nach der Stilllegung des Endlagers einstellen könnten.

Im folgenden stellen wir die hier relevanten Einflussfaktoren geordnet nach den Ebenen 0, 1 und 2 zusammen.

2.2. Angaben zu iFEP-Ebene 0

Aus dem in der Ebene 0 ausgestalteten Bewertungsrahmen ergibt sich u. a. die Forderung, dass die LSA den Nachweis der Einhaltung gewisser Schutzziele erbringen muss und um welche Schutzziele es sich hierbei handelt. Hieraus werden im Rahmen der LSA Anforderungen an die Abdichtungen abgeleitet. Ebene 0 ist gegenwärtig nicht abschließend bearbeitet und die Frage der einzuhaltenden Schutzziele ist nicht abschließend geklärt.

In [BS 09] haben wir in Abhängigkeit vom einzuhaltenden radiologischen Schutzziel Anforderungen an die Abdichtungen abgeleitet:

- Für den Fall, dass mit den Stilllegungsmaßnahmen lediglich die Abmilderung der Auswirkungen gefordert wird und man als erforderliches Maß lediglich die Begrenzung der effektiven Dosis Erwachsene auf 300 $\mu\text{Sv/a}$ verwendet, dann sind Abdichtungen mit den beantragten

Eigenschaften ausreichend. Diese beantragten Eigenschaften bzw. die diesen zugrunde liegenden Annahmen werden in Abschnitt 3.1 identifiziert.

- Wird dagegen
 - ein weitestgehender Ausgleich der Schwäche der geologischen Barriere oder
 - die Begrenzung der effektiven Dosis der kritischen Altersgruppe oder deren kritische Organodosis als erforderliches Maß für eine Abmilderung

gefordert, dann müssten zumindest die Abdichtungen zum Südfeld günstigere Eigenschaften als beantragt aufweisen. Hierzu müssten die Streckenverschlüsse entweder korrosionsbeständig sein oder eine anfängliche (System-)Permeabilität von etwa 10^{-19} m² aufweisen, so dass ihre Korrosion kinetisch gehemmt wird.

Da die Nachweisführung für eine anfängliche (System-)Permeabilität von etwa 10^{-19} m² sehr anspruchsvoll ist, empfehlen wir in [BS 09], eine größtmögliche Korrosionsbeständigkeit der Abdichtungen anzustreben. Hierzu ist es erforderlich,

- die sich in der Grube bei bzw. nach einer Flutung einstellenden chemischen Verhältnisse so genau zu verstehen, dass die chemischen Eigenschaften der die Abdichtungen dann angreifenden Laugen gut prognostizierbar sind,
- bei Bedarf Maßnahmen zu konzipieren und zu planen, die das gewünschte chemische Milieu unterstützen (wie z. B. die Einlagerung von Mg-Speichern in den Auffahrungen vor Abdichtungen aus MgO-Beton),
- die Korrosionsbeständigkeit des für die Abdichtungen vorgesehenen Betons im Hinblick auf die prognostizierte Laugenqualität durch Auswahl geeigneter Ausgangsmaterialien und Rezepturen zu optimieren,
- geeignete Kenngrößen für die Charakterisierung des einzusetzenden Materials festzulegen und
- ein Programm aufzustellen, das die Eignung des eingesetzten Ausgangsmaterials und die planmäßige Herstellung des Betons gewährleistet.

Zumindest bei den kurzen Abdichtungen zum Südfeld sollte nur gut definiertes und charakterisiertes Ausgangsmaterial zum Einsatz kommen. Dies schließt den Einsatz von Salzbeton nicht aus. Es müssen jedoch Parameter und Messmethoden festgelegt werden, die die chemischen Eigenschaften des Salzbetons bzw. der Ausgangsstoffe sicher charakterisieren bzw. ermitteln.

Sofern die an den Abdichtungen anstehende Laugenzusammensetzung nicht sicher prognostizierbar ist, sollten der Nutzen und die Möglichkeit einer Errichtung von „Mischdämmen“ (z. B. aus Salzbeton- und MgO-Betonsegmenten) geprüft werden.

In [BS 09] empfehlen wir, für die weiteren Prüfungen zunächst die zugrunde zu legenden Bewertungskriterien zu ermitteln und festzulegen (Thema 1). Da dies noch aussteht, gehen wir in diesem Statusbericht von dem vom BfS verwendeten radiologischen Bewertungskriterium aus. Als

radiologisches Bewertungskriterium wird vom BfS lediglich die Begrenzung der effektiven Dosis Erwachsene auf 300 $\mu\text{Sv/a}$ gefordert. Sofern künftig ein restriktiveres Bewertungskriterium zugrunde zu legen ist (z. B. die Begrenzung der effektiven Dosis auch von Kindern auf 300 $\mu\text{Sv/a}$), ändern sich zwar die einzuhaltenden Material- bzw. Systemparameterwerte. Die Methode der Nachweisführung wird hierdurch aber nicht beeinflusst.

Die Anforderungen an die Material- bzw. Systemparameterwerte stehen weiterhin unter dem Vorbehalt, dass die künftigen inhaltlichen Prüfungen die Modellannahmen aus [P 277] und [P 278] sowie aus den diesen zugrunde liegenden Unterlagen bestätigen bzw. dass künftige Änderungen und Verfeinerungen bei der LSA-Modellierung nicht zu einer Reduzierung der Anforderungen führen.

2.3. Angaben zu iFEP-Klasse 1.1.04³

Im ERAM sollen in ausgewählten Streckenabschnitten 20 Abdichtungen (19 aus Salzbeton, 1 aus Magnesiabeton) errichtet werden. Die gegenwärtig geplanten Lokalitäten sind in [P 195] (Anlagen 3 bis 12) dargestellt. Die Rezepturen für den vorgesehenen Salzbeton und den Magnesiabeton sind in [G 296] und [P 266] angegeben. Zunächst soll an den Standorten der Abdichtungen die Auflockerungszone beraubt werden. Dann werden die Schalungen errichtet und der Beton für die Abdichtungen „frisch in frisch“ eingebracht. In die Abdichtungen aus Salzbeton sollen Trennbleche eingebaut werden, an denen - sofern erforderlich - kontrolliert Querrisse ausgelöst werden sollen, um eine unkontrollierte Rissbildung im Baukörper zu vermeiden. Bei den Abdichtungen aus Salzbeton wird erwartet, dass zwischen Salzbeton und Gebirge beim Abbinden des Salzbetons ein offener Spalt entsteht. Dieser soll mittels Injektionsmittel verschlossen werden. Hierzu werden vor dem Einbringen des Salzbetons Injektionsleitungen ringförmig am Stoß der Abdichtungsstandorte verlegt. Die Anschlussleitungen der Injektionsleitungen liegen im Inneren des späteren Salzbetonkörpers. Sie werden nach Einbringen und Abbinden des Salzbetons überbohrt und die Überbohrung wird mit Salzbeton verpresst. Bzgl. einer detaillierteren Darstellung verweisen wir auf die Konzeptplanungen [P 266], [P 298] und [I 366]. Die Planungen sind zumindest für die Abdichtungen aus Salzbeton noch nicht endgültig, da hierzu die Errichtung eines Versuchsbauwerks vorgesehen ist. Im Ergebnis dieses Versuchs können sich konstruktive Veränderungen ergeben.

Hieraus leiten wir ab:

- Bei der Ermittlung der auf die Abdichtung wirkenden Einflussfaktoren ist als Abdichtung bzw. Abdichtungsbauwerk nicht nur das in einen Streckenabschnitt eingebrachte Abdichtungssegment inklusive aller Einbauten (Abdichtungskörper) zu berücksichtigen. Die hydraulische Wirksamkeit der Abdichtungen hängt maßgeblich auch von den Eigenschaften der Kontaktzone zum umgebenden Gestein sowie der konturnahen dilatanten Auflockerungszone dieses umgebenden Gesteins ab, so dass auch für diese Bereiche Anforderungen und Nachweiserfordernisse bestehen. Insgesamt sind somit bei allen Betrachtungen zur Wirksamkeit bzw. Versagensmöglichkeit der Abdichtungen folgende als ‚Konstruktionselemente‘ bezeichneten Bereiche zu berücksichtigen:

³ „Schließen und Abdichten des Endlagers“

- Abdichtungskörper aus Salzbeton einschließlich Einbauten (SB),
- Kontaktfuge (KF) und
- Auflockerungszone (AZ).
- Bei der Zusammenstellung der Einflussfaktoren für diese Konstruktionselemente gehen wir chronologisch vor. Wir analysieren verschiedene Phasen bei der Errichtung bzw. dem Bestehen eines Abdichtungsbauwerks, die von der Auswahl des Abdichtungsstandorts bis zur Langzeitphase nach Errichtung der Abdichtung reichen:
 - Herstellungsphase, bestehend aus
 - Phase der Standortauswahl,
 - Phase der Standortvorbereitung,
 - Phase des Materialeintrags („frisch in frisch“, bis zur Verfestigung der letzten Charge),
 - Phase des Abbindens (bis zur Injektion bzw. bis zur weitgehenden Temperaturkonstanz),
 - Phase eventueller Nachbehandlung (Injektion, Beseitigung des Hüllrohrs) und
 - Bestehensphase (nach Errichtung der Abdichtung).

Die Bestehensphase wird zweckmäßigerweise in verschiedene Phasen unterteilt, die sich nach der Wirkdauer bestehender Einflussfaktoren (bspw. Phase bis zum vollständigen Abschluss des Hydratationsprozesses) oder dem Einsetzen neuer Einflussfaktoren (z. B. dem Angriff durch Lauge) richten. Im Folgenden haben wir diese Differenzierung noch nicht vorgenommen, da hierzu eine vertiefte Analyse der verschiedenen (von den beantragten Materialien abhängigen) Prozesse erforderlich ist.

2.4. Angaben zu iFEP-Klassen 2.1 und 2.2

Im folgenden stellen wir die auf die Abdichtungen wirkenden Einflussfaktoren geordnet nach den o. g. Phasen zusammen, wobei hierbei eine Mehrfachnennung (bei Einflussfaktoren, die in verschiedenen Phasen wirken) möglich ist.

Die in der Herstellungsphase wirkenden Einflussfaktoren stellen keine auf die (fertigen) Abdichtungen wirkenden Einflussfaktoren dar, da diese ja noch gar nicht existieren. Sie haben aber Einfluss auf den Zustand und damit die Wirksamkeit der späteren Abdichtungen. Die von der OECD/NEA empfohlene Methodik der FEP-Listen bezieht sich auf die Einflussfaktoren in der Bestehensphase. Im folgenden erweitern wir diese Methodik auf die Herstellungsphase, da die hier wirkenden Einflussfaktoren die Übertragbarkeit der an dem In-situ-Bauwerk gewonnenen Ergebnisse auf die Abdichtungen beeinflussen. Bei der Nachweisführung⁴ sind sie deshalb zu beachten. Für die Langzeitsicherheitsanalyse sind dagegen nur die Einflussfaktoren in der Bestehensphase unmittelbar zu beachten. Die Einflussfaktoren der Herstellungsphase werden implizit über den angenommenen Zustand der Abdichtungen nach ihrer Herstellung berücksichtigt.

⁴ D. h. bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises.

2.4.1. Herstellungsphase

2.4.1.1. Phase der Standortauswahl

Bei der Standortauswahl sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Das Vorhandensein und/oder das spätere Entstehen von großräumigen Umläufigkeiten der Abdichtungen (über Bohrungen, Strecken, Gesenke oder geschädigtes Gebirge) in Gebirgsbereichen außerhalb der Abdichtung kann zu einer Beeinträchtigung der mit der Abdichtung angestrebten hydraulischen Abkopplung der ELB von der Restgrube führen.
- Die Wirtsgesteinsausbildung im Nahbereich der Abdichtung beeinflusst bei einer Lagerstättenflutung das geochemische Milieu im Nahfeld der Abdichtungen und die damit verbundenen chemischen Einwirkungen auf die Abdichtung.
- Die lokalen geometrischen und hydraulischen Verhältnisse beeinflussen bei einer Lagerstättenflutung die Strömungsverhältnisse im Nahfeld der Abdichtungen. Aufgrund des damit verbundenen An- und Abtransports von Stoffen hat dies wiederum Einfluss auf die chemische Einwirkung auf die Abdichtung.

Die hierbei zu berücksichtigenden Einflussfaktoren sind

- die nach Durchführung der Verwahrungsarbeiten bestehenden bergmännischen Verhältnisse (Lage von Grubenbauen, differenziert nach Einlagerungsbereichen (ELB) und Restgrube, und von Bohrlöchern im Gebirgskörper),
- bestehende Wasserwegsamkeiten (Klüfte) im die ELB und die Restgrube trennenden Gebirgskörper,
- die Konvergenz und mögliche Auflockerung des die ELB und die Restgrube trennenden Gebirgskörpers,
- (Um-)Löseprozesse in dem die ELB und die Restgrube trennenden Gebirgskörper,
- chemische Reaktionen (Löseprozesse im Salz und Reaktionen mit Salzbeton aus der Hohlräumverfüllung) im Nahfeld der Abdichtungen,
- konvektive Flüsse im Nahfeld der Abdichtungen unter Berücksichtigung von Dichteschichtung bzw. dichtegetriebene Zirkulationen.

Im folgenden gehen wir auf diese Einflussfaktoren nicht weiter ein, da die Standortauswahl der Abdichtungen hier nicht Prüfgegenstand ist.

2.4.1.2. Phase der Standortvorbereitung

Durch die Standortvorbereitung soll die spätere Anbindung der Abdichtung an das umgebende Gestein gewährleistet werden, um

- die Standsicherheit/Lagesicherheit der Abdichtung zu gewährleisten und
- eine spätere Umströmung/Umläufigkeit der Abdichtung in ihrem Nahbereich zu verhindern.

Hierzu sind an den Standorten der Abdichtungen verschiedene Vorbereitungsarbeiten vorgesehen:

- Verfüllung von Bohrungen im Bereich der Abdichtung,
- Vorerkundung der Streckenkontur hinsichtlich der erforderlichen Nachrisstiefe,
- Nachreißen der Streckenkontur einschließlich der Sohle,
- Konturgestaltung der Strecke (ansteigende Firste, Ausrundungen),
- Vorbehandlung von Streckenabschnitten, die anlösungsgefährdet sind (gemäß [I 366] ist z. B. ein Anstrich von Kalibändern vorgesehen),
- Vorbehandlung von Anhydritabschnitten,
- Vorlaufende technische Maßnahmen für die Herstellung der Abdichtungen (Einbau der Verfüll- und Injektionsleitungen sowie der Trennbleche u. a.),
- Aufstellen einer ausreichend bemessenen Schalung und Abdichtung der Randbereiche gegen Baustoffaustritte und
- Säuberung der Strecke (staubfrei) vor dem Beginn der Betonierarbeiten.

Diese Maßnahmen stellen keine auf die Abdichtungen wirkenden Einflussfaktoren dar, sie haben aber Einfluss auf den Zustand und damit die Qualität der späteren Abdichtungen. Der Nachweis der Wirksamkeit der Abdichtungen setzt voraus, dass die Maßnahmen fehlerfrei durchgeführt werden. Mögliche Fehlerquellen sind somit potentielle Einflussfaktoren auf den Zustand der Abdichtungen, so dass wir sie im weiteren Sinne den Einflussfaktoren zuordnen. Bei der Langzeitsicherheitsanalyse schließen wir die potentiellen Herstellungsfehler aus der Betrachtung aus, so dass sie nicht als FEP erscheinen. Bei der Festlegung des Qualitätssicherungsplans sind sie jedoch zu beachten. Eine vollständige und detaillierte Aufstellung möglicher Fehlerquellen ist erst nach einer detaillierten Festlegung der Herstellungsmaßnahmen möglich.

2.4.1.3. Phase des Materialeintrags

Während der Phase des Materialeintrags sind i. W. solche Einflussfaktoren relevant, die in Zusammenhang mit der Herstellung, dem Transport und dem Einbringen des Abdichtungsmaterials (Salzbeton) stehen:

- Fließverhalten des Salzbetons (in den Transportleitungen und im Verfüllkörper)

Durch Verzögerungen/Unterbrechungen beim Transport aufgrund ungeeigneten Fließverhaltens kann es zur Erhöhung der Viskosität des Materials und dadurch zum unvollständigen Anschluss des eingebrachten Salzbetons an die Firste kommen. Bei längeren Unterbrechungen kann das Abbinden des schon eingebrachten Salzbetons den geplanten Einbau „frisch in frisch“ verhindern, was Inhomogenitäten im Verfüllkörper zur Folge haben kann.

- Entmischung
 - beim Transport (in den Transportleitungen)
 - beim Einfüllvorgang (im Verfüllkörper)

Dies kann zu Inhomogenitäten im Verfüllkörper führen, die eine inhomogene Durchströmung bzw. inhomogene Korrosion der Abdichtungen zur Folge haben können. Hierdurch kann sich die Standzeit der Abdichtung verringern (vgl. Kapitel 6).

- Bildung und ggf. Abfluss von Überstandswasser
Die Bildung von Überstandswasser kann zum unvollständigen Kontakt von Betonkörper und Gebirge führen.
- Chemische Reaktionen innerhalb des Füllstoffs, verbunden mit Wärmefreisetzung
Schon während des Einbaus beginnen die Abbindereaktionen, verbunden mit Wärmefreisetzung. Diesen Prozess ordnen wir jedoch der folgenden Phase des Abbindens zu.
- Chemische Reaktionen mit den Gesteinen am Streckenstoß
Sofern die Stöße aus NaCl bestehen, sind Reaktionen mit dem Salzbeton nicht zu erwarten. In anderen Fällen hängen mögliche Reaktionen vom Salztyp und der Art der Vorbehandlung ab. Beides ist gegenwärtig nicht spezifiziert. Auch diesen Prozess ordnen wir der folgenden Phase des Abbindens zu.
- Verdrängen/Entweichen der Luft aus dem zu verfüllenden Bereich
Ein unvollständiges Verdrängen der Luft aus dem Verfüllraum kann zum unvollständigen Anschluss des Salzbetons an das Gebirge führen.
- Einfluss der Einbauten auf die Verfüllung
Bei fehlerfreiem Einbau erwarten wir keine Beeinflussung des Materialeintrags bzw. des eingebrachten Verfüllmaterials durch die Einbauten.

Diese Faktoren können die Qualität der Abdichtungen beeinflussen. Bei der Langzeitsicherheitsanalyse schließen wir potentielle Fehler im Herstellungsprozess aus der Betrachtung aus, so dass sie dort nicht als FEP erscheinen. Bei der Nachweisführung⁵ und der Festlegung des Qualitätssicherungsplans sind sie jedoch zu beachten. Eine vollständige und detaillierte Aufstellung möglicher Fehlerquellen ist erst nach einer detaillierten Festlegung der Herstellungsmaßnahmen möglich.

2.4.1.4. Phase des Abbindens

Für die Phase des Abbindens sind keine Maßnahmen vorgesehen, so dass sich in dieser Phase keine maßnahmenbedingten Fehlerquellen ergeben können. Da die Phase des Abbindens nicht Teil der Bestehensphase ist, wird sie in der LSA nicht behandelt, so dass bzgl. der LSA eine Zusammenstellung der FEP für diesen Zeitraum nicht erforderlich ist. Vom BfS ist jedoch vorgesehen, bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises den Nachweis der Gebrauchsfähigkeit der Abdichtungen schon für den Zeitpunkt unmittelbar nach ihrer Errichtung zu führen und hierzu (auch) rechnerische Elemente zu verwenden (s. Kapitel 3). Konkret soll (rechnerisch) gezeigt werden, dass der Salzbetonkörper während der Phase des Abbindens rissfrei bleibt. Um für diesen Teil der Nachweisführung trotz der hohen Komplexität einen möglichst hohen Grad an Vollständigkeit zu gewährleisten, ist die Erstellung einer FEP-Liste für die Phase des Abbindens zweckmäßig.

Die FEP-Liste umfasst

⁵ D. h. bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises.

- die Systemzustände und Systemeigenschaften („features“),
- die das System beeinflussenden Ereignisse („events“), d. h. Abläufe, die ihre Ursache außerhalb des Systems haben, und
- die innerhalb des Systems ablaufenden Prozesse („processes“), d. h. Abläufe, die ihre Ursache innerhalb des Systems haben.

Die Benennung eines FEP bedeutet nicht, dass dieser z. B. bei einer Modellierung explizit erfasst werden muss. Bei der Nachweisführung bzw. deren Prüfung hat man sich jedoch zu vergegenwärtigen, dass alle aufgeführten FEP entweder berücksichtigt wurden oder vernachlässigbar sind.

Um die Analyse so weit wie möglich zu vereinfachen, ist es zweckmäßig, zwischen der jeweiligen Abdichtung und ihrer Umgebung zu unterscheiden. Bei der Charakterisierung der Umgebung werden dann nur die FEP berücksichtigt, die einen Einfluss auf die Abdichtung haben können. Diese bezeichnen wir als „externe“ FEP. Die Eigenschaften der Abdichtungen und die in dieser ablaufenden Prozesse bezeichnen wir als „interne FEP“. Weiterhin ist es erforderlich, die koppelnden Prozesse zu identifizieren, die die wechselseitige Beeinflussung von Abdichtung und Umgebung beschreiben.

Das BFS rechnet die Auflockerungszone der Abdichtung zu. Definiert man die Auflockerungszone als den tatsächlich aufgelockerten Bereich, dann ist die Geometrie der Abdichtung und des Gebirges i. A. zeitabhängig, da sich bislang kompakte Gebirgsbereiche in der Umgebung der Abdichtung künftig auflockern können. Dies ist für die weitere Analyse unzweckmäßig. Anstelle des tatsächlich aufgelockerten Gebirgsbereichs betrachten wir statt dessen eine „abdichtungsnahe (Gebirgs-)Zone“ (AZ), die eine von der Zeit unabhängige räumliche Erstreckung aufweist. Sie ist definiert als der die Abdichtung umgebende Gebirgsbereich, der im Laufe der Zeit auflockern kann.

2.4.1.4.1. Interne FEP

Merkmale (Zustände und Eigenschaften)

Die für die LSA zentrale Eigenschaft einer Abdichtung ist ihre Permeabilität gegenüber Lösungen. Weitere, weniger relevante Eigenschaften sind der Gaseindringdruck und die Gaspermeabilität der Abdichtung, für die sich aus den durchgeführten LSA keine Anforderungen ergeben.

Alle übrigen Eigenschaften einer Abdichtung sind nur insofern von Bedeutung, wie sie die Permeabilitäten und den Gaseindringdruck direkt oder indirekt beeinflussen. Ebenso sind die Einwirkungen auf eine Abdichtung für die LSA nur insofern von Bedeutung, als sie zu Veränderungen dieser stofftransportbezogenen Eigenschaften der Abdichtung führen.

Die Abdichtung (als System aus SB, KF und AZ) besteht aus miteinander verbundenen festen Phasen, zwischen denen sich Hohlräume befinden. Der Lösungsfluss und der Gasfluss durch die Abdichtung können nur über diese Hohlräume erfolgen. Lösungsfluss ist an lösungs(teil)gefüllte Hohlräume gebunden, Gasfluss an gas(teil)gefüllte Hohlräume. Die Höhe des Fluidflusses hängt von der räumlichen Gestalt und Anordnung der Hohlräume und von den physikalisch/chemischen Eigenschaften der Hohlraumwandungen ab, da letztere mit den Molekülen der Fluide wechselwirken können.

Neben den hydraulischen Eigenschaften werden auch die mechanischen und chemischen Eigenschaften der Abdichtung durch diese mikroskopische Anordnung von Bindungen und Hohlräumen bestimmt.

Die Anordnungen der Moleküle der Festphase können durch chemische und mechanische Prozesse bzw. Einwirkungen verändert werden. Die chemischen Prozesse der Festphase laufen fast immer unter Einbeziehung der Flüssig- und der Gasphase ab⁶. Eine vollständige chemische Charakterisierung des Abdichtungsmaterials umfasst deshalb auch die chemische Charakterisierung der Flüssig- und der Gasphase. Die Menge der Flüssigphase beeinflusst nicht nur die chemischen Eigenschaften und Prozesse in der Abdichtung, sondern auch die thermischen, mechanischen und stofftransportbezogenen Eigenschaften.

Zur näherungsweise Erfassung dieser im Detail unfassbaren komplexen Zusammenhänge wird das Festkörpersystem durch seine wesentlichen makroskopischen **stofflich/chemischen, thermischen, mechanischen** und **stofftransportbezogenen Materialkenngrößen** beschrieben. Die Beschreibung des Festkörpersystems umfasst neben diesen Materialkenngrößen auch makroskopische Größen zur Beschreibung des **stofflich/chemischen Zustands** (Volumen, räumliche Anordnung und chemisch/mineralogische Zusammensetzung), des **thermischen Zustands**, des (mechanischen) **Spannungszustands** und des **stofftransportbezogenen Zustands** (hydraulische Potentiale)⁷.

Diese vereinfachte Charakterisierung des Systems durch makroskopische Zustands- und Materialkenngrößen kommt aber bei der Prognose des künftigen Systemverhaltens an Grenzen, wie folgende Beispiele zeigen:

- Bei der hier gewählten makroskopischen Beschreibung sind die chemischen Zusammensetzungen der Flüssigphase und der Gasphase Mittelungen über makroskopische Raumbereiche. Tatsächlich kann die Zusammensetzung dieser Phasen auf mikroskopischer Basis stark mit dem Ort variieren. Hierdurch können sich Komplikationen bei der Prognose von Art und Umfang chemischer Reaktionen ergeben. Bei Prognosen werden deshalb häufig „effektive“ Reaktionsraten gewählt, die von der räumlich gemittelten Zusammensetzung der Fluide abhängen.
- Die bei der makroskopischen Beschreibung verwendeten Festphasen sind häufig idealisierte, reine Phasen. Tatsächlich weisen die Festphasen häufig Unregelmäßigkeiten auf, die zu einem von den reinen Festphasen abweichenden chemischen Verhalten führen. Bei Prognosen werden deshalb häufig „effektive“ Festphasen mit „effektiven“ Materialkenngrößen gewählt, die eine Gruppe von tatsächlich vorkommenden Festphasen repräsentieren sollen.
- Die Kenntnis der makroskopischen Materialkenngrößen *Porosität* und *Porengrößenverteilung* erlaubt keine Aussage zur räumlichen Verbindung der Poren untereinander. Dies hat zur Konsequenz, dass innerhalb von massiven Stoffen kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen diesen Größen und den Permeabilitäten besteht. Prognosen zur Permeabilität aufgrund von Änderungen in der Porosität können nur anhand eines „effektiven“ Zusammenhangs erfolgen, der auf der Basis stoffspezifischer Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen

⁶ Lediglich manche Umkristallisationsprozesse metastabiler Phasen können ohne Anwesenheit einer Flüssig- oder Gasphase stattfinden.

⁷ Die Zustandsgrößen sind zum Teil nicht unabhängig voneinander.

beiden Größen erstellt wurde. Finden Stoffumwandlungen in größerem Umfang statt, kann die für den Ausgangsstoff ermittelte Porosität-Permeabilität-Beziehung ihre Gültigkeit verlieren.

Solche Beschränkungen sind bei der Analyse der möglichen Prozesse und bei der Nachweisführung zu berücksichtigen. Hierbei ist es wichtig, den Gültigkeitsbereich der verwendeten „effektiven“ Beschreibungsweisen zu kennen und einzuhalten.

Prozesse

Die stofftransportbezogenen Eigenschaften der Abdichtungen werden primär durch die räumliche Anordnung des Hohlraumsystems bestimmt. Darüber hinaus werden die Permeabilitäten und Diffusionskonstanten auch durch den chemisch/mineralogischen Zustand der Hohlraumwandungen, die Porensättigung und die chemischen (und damit auch die stofftransportbezogenen) Eigenschaften des Fluids bestimmt⁸.

Die chemischen, thermischen und mechanischen Einwirkungen auf die Abdichtungen und die chemischen, thermischen und mechanischen Prozesse in den Abdichtungen sind für die LSA nur insofern von Bedeutung, als sie zu Veränderungen im Hohlraumsystem der Abdichtung, in der chemisch/mineralogischen Beschaffenheit der Hohlraumwandungen, in der Porensättigung oder/und der chemischen Fluideigenschaften führen können.

Änderungen im Hohlraumsystem können durch chemische Prozesse (Lösen, Ausfällen/Auskristallisieren, Stoffumwandlung) oder durch mechanische Bewegungen erfolgen. Die möglichen Bewegungen sind Verformungen und (makroskopisches) Reißen. Verformungen können elastisch (d. h. reversibel) oder plastisch (d. h. irreversibel) sein.

Beide Verformungsarten haben einen sofort auftretenden Anteil („Anfangsverformung“) und einen erst zeitlich verzögert auftretenden Anteil („Kriechen“), so dass grundsätzlich zwischen

- der elastischen Anfangsverformung,
- der plastischen Anfangsverformung,
- dem elastischen Kriechen und
- dem plastischen Kriechen („Fließen“)

zu unterscheiden ist. Alle Verformungsarten können zur Veränderung der makroskopischen Hohlräume führen. Die plastischen Verformungen sind mit Änderungen der inneren Verbindungen in den Festphasen verbunden, so dass sie auch mit einer Änderung des mikroskopischen Hohlraumsystems einhergehen können. Es kann unterschieden werden zwischen dilatanten (d. h. mit einer Volumenzunahme verbundenen), volumenneutralen und kontraktanten (d. h. mit einer Volumenabnahme verbundenen) plastischen Verformungen.

⁸ Häufig wird die Permeabilität als eine von den Fluideigenschaften unabhängige Materialeigenschaft dargestellt. Dies gilt jedoch nur für idealisierte, nicht mit den Festphasen wechselwirkende Fluide. Die chemischen Reaktionen mit den Festphasen der Abdichtung können die chemische Zusammensetzung und Viskosität der sie durchströmenden Lösungen und Gase verändern. Weiterhin können Sorptions- und Oberflächenspannungseffekte die Durchströmung beeinflussen. Daher ist eine entkoppelte Darstellung von Material- und Fluideigenschaften hier nicht geeignet.

Es ist zweckmäßig, beim Hohlraumsystem nach Poren, (offenen) Rissen und Fugen zu unterscheiden. Bei den (offenen) Rissen differenzieren wir zwischen Mikrorissen und Makrorissen. Als Fugen bezeichnen wir makroskopische Hohlräume zwischen zwei aneinander angrenzenden Materialien.

Mögliche chemische und mechanische Beeinflussungen des Hohlraumsystems können somit sein

- die Ausbildung neuer Makrorisse und Fugen
 - mechanisch durch spannungsbedingtes Reißen und
 - chemisch durch Zerstören von Bindungen, das eine mechanische Reaktion nach sich zieht,
- das Aufweiten vorhandener Makrorisse und Fugen
 - mechanisch durch spannungsbedingte (volumenneutrale oder dilatante) Verformung und
 - chemisch durch Auflösung oder durch Zerstören von Bindungen, das eine solche mechanische Reaktion nach sich zieht,
- das Verengen (und Schließen⁹) vorhandener Makrorisse und Fugen
 - mechanisch durch spannungsbedingte (volumenneutrale oder kontraktante) Verformung und
 - chemisch durch Ausfällung/Auskristallisation oder volumenvergrößernde Stoffumwandlung,
- die Ausbildung neuer (geöffneter) Mikrorisse¹⁰
 - mechanisch durch spannungsbedingte (dilatante) Verformung und
 - chemisch durch Zerstören von Bindungen, das eine solche Reaktion nach sich zieht,
- das Aufweiten vorhandener Mikrorisse
 - mechanisch durch spannungsbedingte (dilatante) Verformung und
 - chemisch durch Auflösung, volumenverkleinernde Stoffumwandlung oder durch Zerstören von Bindungen, das eine dilatante Verformung nach sich zieht,
- das Verengen (und Schließen) vorhandener Mikrorisse
 - mechanisch durch spannungsbedingte (kontraktante) Verformung und
 - chemisch durch Ausfällung/Auskristallisation oder volumenvergrößernde Stoffumwandlung,

⁹ Unter Schließen verstehen wir lediglich das Beseitigen des Rissvolumens. Ein Verheilen der Risse durch den Aufbau von Verbindungen zwischen den Festphasen an den Rissoberflächen berücksichtigen wir hier nicht.

¹⁰ Die Ausbildung neuer geschlossener Mikrorisse stellt keine Veränderung des Hohlraumsystems dar und wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Wenn sich (zunächst) geschlossene Mikrorisse bilden, erfolgt dies durch volumenneutrales Kriechen. Da hierbei Festkörperbindungen zerstört werden, können sich die mechanischen Materialkennwerte ändern.

- das Aufweiten vorhandener Poren
 - chemisch durch Auflösung oder volumenverkleinernde Stoffumwandlung,
- das Verengen (und Schließen) vorhandener Poren
 - chemisch durch Ausfällung/Auskristallisation oder volumenvergrößernde Stoffumwandlung,
- das volumenbeständige Umstrukturieren vorhandener Poren
 - chemisch durch Auflösung, Ausfällung/Auskristallisation und Stoffumwandlung,
- das räumliche und chemische Verändern der Poren-, Riss- und Fugenoberflächen
 - chemisch durch Auflösung, Ausfällung/Auskristallisation und Stoffumwandlung,
- das Verändern der transportbezogenen Fluideigenschaften
 - chemisch durch Reaktion mit den Festphasen.

Hierbei gehen wir von folgenden Annahmen bzw. Vereinfachungen aus:

(A1) Unter den hier möglichen mechanischen Verhältnissen können mechanische Verformungen nicht zu einer signifikanten Zu- oder Abnahme des Porenvolumens führen.

(A2) Volumenbeständiges Kriechen des Salzbetons führt nicht zu einer für den Stofftransport relevanten Umstrukturierung von Poren im Bindemittel.

Diese Annahmen sollten von der TUC überprüft werden.

Wir kommen deshalb zu folgenden Ergebnissen:

- Das Hohlräumssystem (sowohl Poren- als auch Riss- und Fugenhohlraum) und damit die stofftransportbezogenen Eigenschaften können sich durch **chemische Prozesse** verändern.
- Der Riss- und Fugenhohlraum und damit die stofftransportbezogenen Eigenschaften können sich durch die **mechanischen Prozesse** „Reißen“ und dilatante, volumenbeständige oder kontraktante „Verformung“ verändern.

Neben der direkten Beeinflussung des Hohlräumzustands und damit der stofftransportbezogenen Eigenschaften können die chemischen und mechanischen Einwirkungen und Abläufe auch indirekt wirken. Indem sie die Festkörperstruktur in der Abdichtung verändern, verändern sie auch deren chemische und mechanische Materialkenngrößen. Hierdurch ändert sich der Umfang, mit dem die stofftransportbezogenen Eigenschaften der Abdichtung auf die chemischen und mechanischen Einwirkungen reagieren.

Die chemischen Prozesse sind von der Temperatur und dem chemischen Milieu in der Flüssig- und Gasphase abhängig. Dadurch sind sie abhängig von **thermischen Prozessen** und den **stofftransportbezogenen Prozessen** (Diffusion, Konvektion, Sorption/Fällung/Bindung während des Transports) in der Flüssigkeits- und der Gasphase.

Die mechanischen Prozesse sind über die chemische Beeinflussung der mechanischen Materialeigenschaften von den chemischen Prozessen abhängig. Sie sind auch (explizit) von der Temperatur und der Porensättigung abhängig. Dadurch sind sie sowohl explizit als auch (über die chemischen Prozesse) implizit von thermischen und feuchtigkeitsbezogenen Prozessen (den chemischen

Prozessen mit Einfluss auf die Porensättigung und dem Flüssigkeitstransport) abhängig. Letzterer ist Teil der stofftransportbezogenen Prozesse.

Zu den stofftransportbezogenen Prozessen rechnen wir auch die Erosion und die Ablagerung von Schwebstoffen. Diese können die stofftransportbezogenen Materialkenngrößen verändern.

Im Detail läuft innerhalb der Abdichtungen während der Abbindephase eine Vielzahl von Prozessen ab, die wir in Anhang A als FEP-Liste entsprechend der geschilderten Gliederung zu Gruppen zusammengefasst haben. Wir gehen davon aus, dass einige dieser Reaktionen bzw. Gruppen vernachlässigt werden können. Dies ist jedoch bei der Nachweisführung explizit anzugeben bzw. zu zeigen (z. B. mittels einer rechnerischen Abschätzung der jeweiligen Größenordnung der Prozesse).

Hinsichtlich der internen chemischen Prozesse gehen wir in Anhang A von den folgenden Annahmen aus:

(A3) Der Einfluss der Gasphase auf die chemischen Reaktionen in der Abdichtung wird aufgrund des vergleichsweise geringen Zeitraums und der vergleichsweise geringen Gasdruckdifferenzen in der Phase des Abbindens vernachlässigt.

(A4) Wir gehen davon aus, dass chemische Reaktionen der Einbauten in der Abbindephase vernachlässigt werden können.

Die Annahme A4 ist zu prüfen, wenn die Art der vorgesehenen Einbauten und ihre Materialien vom BfS spezifiziert sind.

2.4.1.4.2. Koppelnde Prozesse

Die Umgebung der Abdichtungen besteht aus dem (mantelseitig) anstehenden Salzgestein und den (stirnseitig) angrenzenden Grubenbauen¹¹. Diese können entweder offen sein oder sie können Abschaltungen oder Verfüllmaterial (aus vorherigen Verfüllmaßnahmen) enthalten.

Die Einwirkungen der Umgebung auf die Abdichtungen können als

- Stoffeintrag (Wasser, Wasserinhaltsstoffe, Gase),
- Energieeintrag (Wärmeenergie oder Strahlungsenergie) und
- (mechanischer) Krafteintrag

erfolgen.

Der mechanische Krafteintrag kann in einen „reaktiven“ und einen „aktiven“ Teil aufgespaltet werden. Die reaktiven Kräfte umfassen die Gegenkräfte der Umgebung. Sie treten an den Grenzen der Abdichtungen auf und sind eine Reaktion auf Kräfte, die ihren Ursprung in den Abdichtungen haben. Diese Gegenkräfte bewirken eine Verformungsbehinderung. Die aktiven Kräfte haben ihren Ursprung außerhalb der Abdichtungen (z. B. Gravitation und Konvergenz).

¹¹ Formal gehört die gesamte Erde zu der zu berücksichtigenden Umgebung, da sie über die Gravitationskraft auf die Abdichtung einwirkt. Es reicht hier jedoch aus, die auf die Abdichtung und die Umgebung wirkende Schwerkraft zu berücksichtigen. Die übrigen FEP der Erde können dann vernachlässigt werden.

Da neben den Einträgen in gleicher Weise auch Austräge zu erfassen sind, sollte bzgl. der Einwirkungen besser von Stoff- und Energieaustausch sowie Kraftkopplung gesprochen werden. Die Austausche bzw. Kopplungen von Umgebung und Abdichtung in der Phase des Abbindens werden in Anhang A weiter differenziert.

Störfallereignisse (und damit die stoßartigen Kräfte) werden von der Analyse ausgeschlossen.

2.4.1.4.3. Externe FEP

Hinsichtlich der externen FEP gelten die bereits im Zusammenhang mit den internen FEP dargestellten Randbedingungen und Annahmen (vgl. Abschnitt 2.4.1.4.1).

Um die Einwirkungen der Umgebung auf die Abdichtungen erfassen zu können, muss die Umgebung durch Zustände und Eigenschaften beschrieben werden. Zudem sind Ereignisse und Prozesse zu berücksichtigen, welche die Kopplungen und Austausche beeinflussen können.

2.4.1.5. Phase der Nachbehandlung

Während der Phase der Nachbehandlung ist eine Beeinflussung der Wirksamkeit der Abdichtung bei folgenden Geschehnissen im Rahmen der Injektionsmaßnahmen wie auch beim Überbohren und Verpressen des Hüllrohrs möglich:

- Versagen des Injektionswiderlagers (Austritt von Injektionsmaterial insbesondere in Richtung der vom Einfüllpunkt abgewandten und nicht mehr zugänglichen Stirnseite der Abdichtung),
- Versagen und/oder Verstopfen von Injektionsleitungen (kann zu stellen- bzw. flächenweise unvollständiger Injizierung führen),
- ungeeignete Verpressraten und/oder -drücke (kann zu unvollständiger Injizierung oder Cracken des angrenzenden Gebirges führen),
- unzureichende Druckhaltephase (kann zu nicht ausreichender Vorspannung führen),
- fehlerhaftes Überbohren des Hüllrohrs für die Injektions- und Entlüftungsleitungen (kann zum Verbleib eines Teils des Hüllrohrs oder – im Fall eines Nachbohrens – zu einer außerplanmäßigen Kontur der Bohrung führen),
- unzureichende Abdichtung der Bohrung nach dem Überbohren des Hüllrohrs und nicht ausreichende Vorspannung in diesem Abdichtmaterial (kann zu lokalen Wasserwegsamkeiten im Inneren der Abdichtung führen).

Analog zu Abschnitt 2.4.1.2 schließen wir bei der Langzeitsicherheitsanalyse die potentiellen Herstellungsfehler aus der Betrachtung aus, so dass sie nicht als FEP erscheinen. Bei der Festlegung des Qualitätssicherungsplans sind sie jedoch zu beachten. Eine vollständige und detaillierte Aufstellung möglicher Fehlerquellen ist erst nach einer detaillierten Festlegung der Herstellungsmaßnahmen im Rahmen der Ausführungsplanung möglich.

Bei der Planung der Nachbehandlungsphase sind folgende mögliche Prozesse zu berücksichtigen, da sie ebenfalls zu Mängeln des Bauwerks führen können:

- Bildung von Überschusswasser

Bei der Bildung von Überschusswasser aus dem Injektionsmittel kann es zu Auf- und Umlöseprozessen von Salz in der Kontaktfuge kommen, insbesondere, da dieses Überschusswasser gegenüber NaCl nicht gesättigt ist. Die mit Überschusswasser gefüllten und ggf. durch Löseprozesse erweiterten Bereiche stellen potentielle Wasserwege dar.

- Abhängigkeit der Injizierbarkeit von Rissen von der Rissweite und der effektiven Korngröße des Injektionsmittels
- Veränderung der effektiven Korngröße des Injektionsmittels infolge des hydrationsbedingten Anwachsens einzelner Partikel unmittelbar nach dem Anmischen
Je größer die effektive Korngröße ist, desto größer wird die vom Injektionsmittel nicht mehr verfüllte Rissweite.
- Chemische Reaktionen zwischen Injektionsmittel und den benachbarten Materialien
Hierzu gehört das Nachlösen von Salzen, da das Injektionsmittel mit teilgesättigter Lösung hergestellt wird.

2.4.2. Bestehensphase

2.4.2.1. Zeitliche Unterteilung

Die Bestehensphase beginnt nach dem Aushärten des Injektionsmittels. Wir gehen davon aus, dass zu diesem Zeitpunkt die Abbindeprozesse im Salzbeton und ggf. auch im Bindemittel noch nicht vollständig abgeklungen sind, so dass sie auch in dieser Phase zu berücksichtigen sind.

Zu einem späteren Zeitpunkt werden die Abbindeprozesse soweit zurückgegangen sein und die Folgen des Abbindens (in Form von Wärmeeintrag in das Gebirge) soweit abgeklungen sein, dass die thermischen FEP nicht mehr berücksichtigt werden brauchen. Diesen Zeitpunkt bezeichnen wir mit t_E ¹². Wir unterstellen, dass es erst zu einem späteren Zeitpunkt t_F zu einem Anstau eindringender Grubenwässer vor den Abdichtungen kommen kann. Damit kann die Bestehensphase in drei Abschnitte unterteilt werden, für die unterschiedliche FEP-Listen zu beachten sind¹³:

- Für $t \leq t_E$ sind thermische Effekte und Prozesse sowie mit dem Abbinden verbundene chemische und mechanische Prozesse (wie autogenes Schwinden) zu beachten, Effekte und Prozesse aufgrund eines Grubenwasseranstaus treten dagegen nicht auf.
- Für $t_E < t \leq t_F$ können thermische Effekte und Prozesse, mit dem Abbinden verbundene chemische und mechanische Prozesse sowie Prozesse aufgrund eines Grubenwasseranstaus unberücksichtigt bleiben.

¹² Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen dem Zeitpunkt t_{E1} , an dem die Abbindeprozesse und deren Temperatureinflüsse in der Abdichtung (weitestgehend) abgeschlossen sind und dem Zeitpunkt t_{E2} , an dem die Abbindeprozesse und deren Temperatureinflüsse in der übrigen Grube (weitestgehend) abgeschlossen sind. Im Folgenden differenzieren wir nicht zwischen beiden Zeitpunkten. Wir definieren t_E als den Zeitpunkt, an dem die Abbindeprozesse in Abdichtung und Grube soweit abgeklungen sind, dass ihre Temperatureinflüsse im Bereich der Abdichtung vernachlässigbar sind.

¹³ Für Szenarien ohne einen Lösungszutritt entfällt der dritte Abschnitt. Allerdings ist für diese Szenarien auch kein Nachweis zur Wirksamkeit der Abdichtungen erforderlich.

- Für $t_F < t$ können thermische und mit dem Abbinden verbundene Effekte und Prozesse unberücksichtigt bleiben, Effekte und Prozesse aufgrund eines Grubenwasseranstaus sind dagegen zu berücksichtigen.

Diese Aufspaltung kann die Nachweisführung erheblich vereinfachen.

Die FEP-Liste für den Zeitraum $t \leq t_E$ entspricht i. W. der Liste für die Phase des Abbindens in Anhang A. Zusätzlich muss nun jedoch das Injektionsmittel berücksichtigt werden. Im Zeitraum $t_E < t \leq t_F$ entfallen die thermischen FEP. Im Zeitraum $t_F < t$ kommen die FEP aufgrund des Grubenwasseranstaus hinzu.

2.4.2.2. Gliederung der FEP

Analog zu Abschnitt 2.4.1.4 unterscheiden wir auch hier zwischen internen FEP, externen FEP und Kopplungsprozessen.

Interne FEP

Die Abdichtungen werden in der Bestehensphase durch die gleichen Zustände und Eigenschaften wie in der Abbindephase charakterisiert. Hinzu kommen noch die Zustände und Eigenschaften des Injektionsmaterials.

Koppelnde Prozesse

In der Bestehensphase sind die möglichen Kopplungen bzw. Austausche von Umgebung und Abdichtung umfangreicher als in der Phase des Abbindens. Neben den schon in Abschnitt 2.4.1.4.2 aufgeführten Prozessen sind nun die Folgen der Gasentwicklung in den Abfällen und die Folgen eines möglichen Laugenzutritts zu berücksichtigen. Diese führen zu einem Kräfteintrag (als Flächenkraft oder/und als Volumenkraft) und zu einem Stoffeintrag in die Abdichtungen.

Externe FEP

Um die Einwirkungen der Umgebung auf die Abdichtungen erfassen zu können, muss die Umgebung durch Zustände und Eigenschaften beschrieben werden. Zudem sind in der Phase des Abbindens Ereignisse und Prozesse zu berücksichtigen, welche die in Abschnitt 2.4.2.2.2 aufgeführten Kopplungen und Austausche beeinflussen können.

3. ANFORDERUNGEN UND NACHWEISFÜHRUNG

3.1. Anforderungen an die Abdichtungen aus der LSA

In [BS 09] führten wir einen ersten Iterationsschritt zur Langzeitsicherheitsanalyse für das ERAM durch. Vorbehaltlich der in diesem Iterationsschritt bestehenden Unsicherheiten und Prüfungsvorbehalte kamen wir zu dem Ergebnis, dass die geologische Barriere – sofern sie die vom BfS erwarteten Eigenschaften aufweist – einen ausreichenden Schutz vor künftigen erhöhten Strahlenexpositionen darstellt. In diesem Fall haben die Abdichtungen keine Funktion und es bestehen an sie keine Anforderungen.

Der Zweck der Abdichtungen besteht u. E. darin, eine (nicht erwartete, aber zum gegenwärtigen Zeitpunkt auch nicht ausschließbare) Schwäche der geologischen Barriere möglichst auszugleichen, zumindest aber deren Auswirkungen abzumildern. Zu diesem Zweck müssen die Abdichtungen unter der zu erwartenden bzw. nicht ausschließbaren chemischen und mechanischen Beeinflussungen ausreichend lange eine ausreichend niedrige Wasserwegsamkeit aufweisen.

Die Quantifizierung der Begriffe „ausreichend lange“ und „ausreichend niedrig“ hängt von dem zugrunde liegenden Bewertungskriterium ab. Fordert man lediglich die Abmilderung der Auswirkungen und verwendet man als erforderliches Maß – entsprechend der Vorgehensweise des BfS im Plan [A 281Q] und den LSA [P 277] und [P 278] – lediglich die Begrenzung der effektiven Dosis Erwachsene auf 300 $\mu\text{Sv/a}$, dann können die Anforderungen an die Abdichtungen wie folgt quantifiziert werden:

(A1) Zu dem Zeitpunkt t_F , an dem erstmalig Lauge an einer Abdichtung ansteht, muss deren hydraulischer Widerstand so groß sein, dass folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\text{Fluss} \leq A_{\text{LSA}} \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\eta_{\text{Fluid}} \cdot \Delta p/l \quad \text{bzw.}$$

$$Q_{iP} \leq 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot A_{\text{LSA}}$$

mit

Fluss = durch die Abdichtung fließende Laugenmenge pro Zeiteinheit

Q_{iP} = querschnittsintegrierte Permeabilität der Abdichtung

$$= \text{Fluss} \cdot \eta_{\text{Fluid}} \cdot l / \Delta p$$

A_{LSA} = in der LSA angesetzter Querschnitt der Abdichtung

l = in der LSA angesetzte Länge der Abdichtung

η_{Fluid} = dynamische Viskosität der in der LSA angesetzten Lösung

Δp = an der Abdichtung anliegende Druckdifferenz

- (A2) Für alle späteren Zeitpunkte, d. h. für $t > t_F$, darf der Fluss bzw. die querschnittsintegrierte Permeabilität Q_iP der Abdichtung nicht schneller ansteigen als bei der in den LSA angesetzten idealisierten Abdichtung
- ohne autogene chemische Reaktionen,
 - ohne Auflockerungszone und Kontaktfuge,
 - mit homogenen Materialeigenschaften und gleichmäßiger Durchströmung,
 - mit einer (homogenen) Permeabilität von 10^{-18} m^2 ,
 - mit einer (homogenen) Umlösekapazität von
 - $3,6 \text{ m}^3_{\text{Salzbeton}}/\text{m}^3_{\text{IP21}}$ für Abdichtungen aus Salzbeton bzw.
 - $0,48 \text{ m}^3_{\text{Magnesiabeton}}/\text{m}^3_{\text{NaCl}}$ für Abdichtungen aus Magnesiabeton,
 - mit einer scharfen Reaktionsfront,
 - mit einer Permeabilitätssteigerung im korrodierten Bereich um 10^4 .

Die LSA enthält die implizite Annahme, dass sich die realen Abdichtungen unter dem Einfluss aller in Kapitel 2.4.2 aufgeführten FEP nicht ungünstiger verhalten als diese idealisierte Abdichtung.

Fordert man dagegen einen weitestgehenden Ausgleich der Schwäche der geologischen Barriere oder verwendet man als erforderliches Maß für eine Abmilderung die Begrenzung der effektiven Dosis der kritischen Altergruppe oder deren kritische Organdosis, dann müssten zumindest die Abdichtungen zum Südfeld günstigere Eigenschaften als in [A 281Q] beantragt aufweisen. Entweder müssten sie korrosionsbeständig sein oder sie müssten eine anfängliche (System-) Permeabilität von etwa 10^{-19} m^2 aufweisen, so dass ihre Korrosion kinetisch gehemmt wird.

Die Nachweismethodik und die Art der zu erbringenden Nachweise sind von dem zugrunde liegenden Bewertungskriterium unabhängig. Lediglich die nachzuweisenden Parameterwerte unterscheiden sich in beiden Fällen. In der folgenden Bewertung unterstellen wir Bewertungskriterien aus dem Plan [A 281Q] und damit die Anforderungen (A1) und (A2) an die Abdichtungen.

3.2. Nachweiserfordernisse des BfS

3.2.1. Angaben in [P 195]

Um die Anforderungen (A1) und (A2) einzuhalten bzw. die Einhaltung dieser Anforderungen nachzuweisen, sind nach [P 195] die folgenden Nachweise zu erbringen¹⁴:

¹⁴ Die Gliederung und Nummerierung erfolgt hier durch uns zur Erhöhung der Übersichtlichkeit.

- (1) Nachweis (NW) einer ausreichend geringen hydraulischen Anfangspermeabilität¹⁵ der Teilelemente
 - (1a) Salzbetonkörper (SB),
 - (1b) Kontaktzone bzw. Kontaktfuge (KF) und
 - (1c) Auflockerungszone (AZ).

NW (1a) besteht aus den (Teil-)Nachweisen

(1-1a) der ausreichend geringen (anfänglichen) hydraulischen Werkstoffpermeabilität des Salzbetons und

(1-2a) der (anfänglichen) Rissbeschränkung des SB.

NW (1b) wird in [P 195] auch als NW „gering permeable Fugen“ bezeichnet. Er besteht aus den (Teil-)Nachweisen

(1-1b) der ausreichend geringen (anfänglichen) hydraulischen Werkstoffpermeabilität des Injektionsmittels (sofern verwendet) auch

(1-2b) der ausreichenden (anfänglichen) Rissbeschränkung in der KF.

Da ungestörtes Salz praktisch impermeabel ist, wird NW (1c) durch den Nachweis

(1-2c) der ausreichenden (anfänglichen) Rissbeschränkung in der AZ

geführt.

Der Nachweis einer ausreichend geringen künftigen hydraulischen Permeabilität kann nach [P 195] ersetzt werden durch die Nachweise

- (2) „(thermo)mechanischer NW“, bestehend aus
 - (2-1) dem NW der Standsicherheit, seinerseits bestehend aus
 - (2-1-1) dem NW der (künftigen) Lagesicherheit und
 - (2-1-2) dem NW der (künftigen) Festigkeit,
 - (2-2) dem NW der (künftigen) Rissbeschränkung und
- (3) der Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit gegenüber chemischen Angriffen unter Beachtung der Bandbreite des geochemischen Milieus,

wobei auch hier die Teilelemente SB, KF und AZ zu beachten sind.

In [P 195] (S. 62) wird angegeben, dass die NW (2-1-1) und (2-1-2) (und damit der NW (2-1)) durch den NW (2-2) abgedeckt werden, soweit dieser die äußeren (thermo)mechanischen Einwirkungen berücksichtigt und „mit Hilfe geeigneter Diskretisierungsverfahren“ erbracht wird.

¹⁵ In [P 195] wird nicht angegeben, ob hier der Wortteil „Anfangs-“ einen Zeitpunkt kurz nach der Errichtung der Abdichtung oder den Zeitpunkt, an dem die Abdichtung erstmalig von Lauge durchströmt wird, bezeichnet. Aus dem Zusammenhang wird u. E. jedoch deutlich, dass hiermit ein Zeitpunkt kurz nach der Errichtung der Abdichtung bezeichnet wird.

Die (Teil-)Nachweise (1-2a), (1-2b), (1-2c) und (2-2) werden in [P 195] zusammenfassend als „NW der Rissbeschränkung“ bezeichnet.

Bei der Nachweisführung wird in [P 195] zwischen „Bauzuständen“ und der Nachbetriebsphase unterschieden. Bei der Nachweisführung zur Rissbeschränkung für die „Bauzustände“ (NW (1-2a), (1-2b) und (1-2c)) werden die thermischen Effekte und das Schwinden während des Abbindeprozesses berücksichtigt, bei der Nachweisführung für die Nachbetriebsphase (NW (2-2)) werden diese vernachlässigt. Bei der Nachbetriebsphase wird in [P 195] zwischen den Fällen „lange trockenes Endlager“ und „zugelaufenes Endlager“ unterschieden. Damit ergeben sich nach [P 195] die in Tabelle 3.2-1 angegebenen Nachweiserfordernisse.

Tabelle 3.2-1: Nachweiserfordernisse nach [P 195] Tabelle 5.1-1 (von uns angepasst und ergänzt).

Nachweiserfordernis	Bauzustände	Nachbetriebsphase	
		trockenes Endlager	zugelaufenes Endlager
NW der geringen (anfänglichen) Werkstoffpermeabilität			x ¹⁾ (1-1a), (1-1b)
(thermomechanischer) NW der Rissbeschränkung ²⁾	x (1-2a), (1-2b), (1-2c)	x (2-2)	x (2-2)
NW der chemischen Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit			x (3)

¹⁾ In [P 195] Tabelle 5.1-1 wird der NW der geringen Werkstoffpermeabilität der Spalte „zugelaufenes Endlager“ zugeordnet. Diese Darstellung ist mit der textlichen Darstellung auf S. 19 [P 195] inkonsistent. Dort wird nur eine ausreichend geringe Anfangspermeabilität gefordert, was dort als „zum Zeitpunkt der Bauzustände“ zu verstehen ist. U. E. richtig ist jedoch – so wie in [P 195] Tabelle 5.1-1 angegeben – der Nachweis für die Nachbetriebsphase. Danach ist „anfänglich“ zu verstehen als „(unmittelbar) vor Beginn der Laugendurchströmung“.

²⁾ Das in [P 195] Tabelle 5.1-1 aufgeführte Nachweisziel „gering permeable Fugen“ haben wir nicht aufgeführt, da es weder auf S. 62 des Kapitels 5 noch bei den erforderlichen Nachweisen (Abschnitt 5.3) oder dem exemplarischen Nachweis in Kapitel 6 aufgeführt wird. Nach unserem Verständnis wird in [P 195] der Zustand „gering permeabler Fugen“ mit dem Zustand „Rissbeschränkung in der KF“ gleichgesetzt.

In den Kapiteln 5.3 und 6 von [P 195] wird die Nachweisführung zur Rissbeschränkung erläutert. Es wird zwischen den Abdichtungselementen SB, KF und AZ sowie zwischen der Phase der Bauzustände und der Nachbetriebsphase unterschieden; die Angaben zur Nachweisführung für die Bauzustände wurde jedoch mittlerweile durch [P 255] ersetzt. Für die Nachbetriebsphase werden in [P 195] verschiedene Szenarien berücksichtigt, für die jeweils eine Nachweisführung erforderlich ist.

Bzgl. der Nachweise zur geringen Werkstoffpermeabilität wird auf S. 46 angegeben, dass hierzu noch genauere Auswertungen erfolgen müssen. Es wird auf [P 192] und Untersuchungen am Asse-Vordamm verwiesen.

Bzgl. des Nachweises der chemischen Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit wird auf die Unterlagen [P 146], [IBMB 01] und [IBMB 03] verwiesen ([P 195] S. 62). Es wird angegeben, dass die

Nachweise zur Rissbeschränkung und zur chemischen Langzeitstabilität entkoppelt werden können, da nach [IBMB 01] und [IBMB 03] die Abdichtungen im Nachweiszeitraum¹⁶ nur bis zu einer Tiefe von 30 bis 60 cm geschädigt werden. Diese Schicht wird als Opferschicht behandelt und in der Nachweisführung zur Rissbeschränkung von der hydraulisch wirksamen Länge abgezogen ([P 195] S. 75). Um die chemische Korrosion von den hydraulisch-mechanischen Nachweisen entkoppeln zu können, wird in [P 195] zusätzlich gefordert (S. 38): „Für den Salzbetonkörper und die Kontaktzone gilt die Anforderung $K \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ bezogen auf jede Stelle des Querschnitts, da eine lokal erhöhte Korrosion ausgeschlossen werden muss. Im Langzeitsicherheitsnachweis wird von einem gleichmäßigen Fortschreiten der Korrosion ausgegangen. ... Als Nebenbedingung ist zu beachten, dass für Abdichtungskörper und Kontaktzone der Grenzwert an jeder Stelle des Querschnitts eingehalten werden muss, um lokal erhöhte Korrosion auszuschließen.“

3.2.2. Angaben in [P 255]

In [P 255] werden die Kriterien und das methodische Vorgehen bei der Nachweisführung zur Rissbeschränkung für die Bauzustände aktualisiert. Für den Salzbetonkörper (SB) ist der Nachweis der Rissfreiheit entlang der Achse der Abdichtung zu erbringen. Risse in Querrichtung sind zugelassen. Für die Kontaktfuge (KF) ist der Nachweis zu erbringen, dass sie – ggf. nach geeigneter Injektion – ausreichend gering permeabel ist. Dies entspricht dem in Tabelle 5.1-1 in [P 195] aufgeführten Nachweisziel „gering permeabler Fugen“.

3.2.3. Angaben in [I 366]

In der Unterlage [I 366] werden auf S. 27 unter Verweis auf [P 195] die in Tabelle 3.2-2 wiedergegebenen Nachweiserfordernisse aufgeführt (Nummerierung durch uns).

Tabelle 3.2-2: Nachweiserfordernisse nach [I 366] Tabelle 2

Nachweiserfordernis	Bauzustände	Nachbetriebsphase	
		trockenes Endlager	zugelaufenes Endlager
(1) NW der ausreichend geringen integralen Permeabilität			x
(2) NW der Rissbeschränkung	x	x	x
(3) NW der Lagesicherheit			x
(4) NW der hinreichenden Festigkeit	x	x	x
(5) NW der Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit			x

(1) wird als grundlegende Anforderung bezeichnet, die die Anforderungen (2), (3) und (4) beinhaltet.

¹⁶ Nach [P 195] S. 78 beträgt der Nachweiszeitraum 30.000 Jahre.

Im Rahmen des in [I 366] geschilderten In-situ-Versuchs sollen die Nachweise (1), (2) und (4) für die Bauzustände gegenständlich erbracht werden. Für die Nachbetriebsphase sollen diese Nachweise mittels Prognoseberechnungen und baubegleitender Materialprüfungen erbracht werden¹⁷.

Auf S. 10 wird in [I 366] angegeben, dass durch den In-situ-Versuch darüber hinaus auch

- die Anbindung des Betonkörpers an das Salzgestein und
- die Injizierbarkeit der Kontaktzone (falls erforderlich)

nachgewiesen werden soll. Diese Nachweise sehen wir als Teil des Nachweisziels „gering permeable Fugen“ und damit von (2) an. Weiterhin sollen durch den In-situ-Versuch die bautechnische Herstellbarkeit eines Abdichtsegments und die Einhaltung der bautechnischen Anforderungen¹⁸ dargelegt werden.

Bzgl. des Nachweises zur chemischen Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit (5) wird auf S. 28 angegeben, dass dieser mit [P 299] für den Salzbeton M2 vorliegt. Für das vorgesehene Injektionsmittel Ultrafin 12 „*wird er an anderer Stelle geführt*“. Diese Stelle wird jedoch nicht benannt.

3.2.4. Bewertung

3.2.4.1. Grundsätzliche Beschränkungen bei der Nachweisführung

Die Erfüllung der Anforderungen (A1) und (A2) an die Abdichtungen kann nicht durch direkte Messung nachgewiesen werden,

- da nach gegenwärtigem Stand von Wissenschaft und Technik keine Methoden zur Verfügung stehen, die einen zerstörungsfreien messtechnischen Permeabilitätsnachweis an den Abdichtungen erlauben und
- da der Nachweiszeitraum zu (A2) um mehrere Größenordnungen über dem für die Nachweisführung zur Verfügung stehenden Zeitraum liegt.

Weiterhin müssen die Nachweise für die Wirksamkeit der Abdichtungen vor der Planfeststellung vorliegen, also zu einem Zeitpunkt, an dem die Abdichtungen noch nicht bestehen.

Es ist deshalb erforderlich, den Nachweis i. W. auf theoretischer Basis (d. h. mittels theoretischer Überlegungen und hierauf basierender Modellrechnungen) zu führen, wobei einzelne Aspekte durch Messungen abgesichert werden können. Hierunter fallen die messtechnische Ermittlung von Materialparametern und die messtechnische Erfassung der Eigenschaften einzelner Systemkomponenten zu bestimmten Zeitpunkten. Diese Messungen können jedoch nicht an den Abdichtungen bzw. den in den Abdichtungen eingebauten Materialchargen direkt, sondern nur an entsprechenden Ver-

¹⁷ Die Formulierung zu (2) und (4) lautet in [I 366]: „Für die Bemessungssituation „Trockenes Endlager“ und „Zugelaufenes Endlager“ werden die Nachweisziele „hinreichende Festigkeit“ und „Rissbeschränkung“ über die baubegleitenden Materialprüfungen in Verbindung mit den theoretischen Betrachtungen nach [P 195] und den Prognoserechnungen nach Kapitel 9 bestätigt.“ Wir gehen davon aus, dass diese Bestätigung noch nicht vorliegt, sondern erst erbracht werden soll.

¹⁸ Die bautechnischen Anforderungen werden in [I 366] auf S. 28 f. konkretisiert.

gleichsobjekten durchgeführt werden. An die theoretische Nachweisführung ergeben sich deshalb verschiedene Anforderungen:

- Es besteht die Möglichkeit, dass langfristig wirkende Prozesse und deren Auswirkungen nicht erkannt werden und bei den theoretischen Überlegungen und damit bei der Nachweisführung unberücksichtigt bleiben. Durch eine systematische Vorgehensweise bei der Zusammenstellung der zu berücksichtigenden Prozesse und Einflussfaktoren ist diese Gefahr zu minimieren.¹⁹
- Die theoretischen Überlegungen und die hierauf basierenden Modelle sind stets mit vereinfachenden Annahmen verbunden. Deren Gültigkeit ist sicherzustellen. Dies kann u. a. durch Messungen an Vergleichsobjekten (ähnliche Materialchargen, Labor- bzw. Technikumsproben, In-situ-Bauwerk) erfolgen.
- Die verfügbaren numerischen Modelle zur Prognose des Stoff- und Systemverhaltens können gegenwärtig nicht alle wirkenden Prozesse gleichzeitig abbilden, so dass nur das Führen von Teilnachweisen möglich ist. Durch eine systematische Vorgehensweise ist sicherzustellen, dass diese Teilnachweise zu einem vollständigen Nachweis führen.
- Aufgrund von Schwankungen in den Ausgangsmaterialien und im Herstellungsprozess sowie Unterschiede in den Randbedingungen (räumlich, zeitlich, durch die Messtechnik bedingt u. a.) unterscheiden sich die o. g. Vergleichsobjekte von den späteren Abdichtungen bzw. ihren Elementen. Bei der Durchführung von Messungen an Vergleichsobjekten ist die Übertragbarkeit auf die Abdichtungen sicherzustellen und nachzuweisen.

3.2.4.2. Analyse der Vorgehensweise des BfS

Das BfS stützt die Nachweisführung primär auf Modellrechnungen, deren Parameter aus Messungen an Vergleichsobjekten gewonnen werden sollen. Zur Absicherung der Modelle sind ebenfalls Messungen an Vergleichsobjekten vorgesehen, deren Ergebnisse mit Modellprognosen zum Systemverhalten verglichen werden sollen. Die Nachweisführung wird in das Führen von Teilnachweisen aufgespalten. Die Teilnachweise berücksichtigen jeweils nur einen Teil der wirkenden FEP bzw. einen Teil des Betrachtungszeitraums und tragen den Begrenzungen der verwendeten Modelle Rechnung.

Die Überlegungen und die impliziten Annahmen, die mit der Aufspaltung der Nachweisführung in die Teilnachweise verbunden sind, werden in den Unterlagen [P 195], [P 255] und [I 366] nicht erläutert. Zudem werden verschiedene Teilnachweise zwar benannt, aber nicht definiert. Dadurch bleibt unklar, welche genauen Aussagen bzw. Annahmen durch sie nachgewiesen werden sollen. Für eine Vollständigkeits- und Plausibilitätsprüfung der Nachweisführung sind diese Informationen jedoch erforderlich. Im Folgenden analysieren wir deshalb zunächst, welche Überlegungen und Annahmen zu der Aufspaltung der Nachweisführung des BfS führen und welchen genauen Gegenstand die Teilnachweise haben müssen.

Zunächst schließen wir aus den Angaben in [P 195], [P 255] und [I 366], dass das BfS an die Stelle von (A1) und (A2) zwei Ersatzanforderungen (A1*) und (A2*) setzt:

¹⁹ Zu diesem Zweck haben wir in Kapitel 2 FEP-Listen zusammengestellt.

(A1*) Zu dem Zeitpunkt t_E , an dem die Herstellung einer Abdichtung abgeschlossen ist, muss deren hydraulischer Widerstand so groß sein, dass folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\text{Fluss} \leq A_{\text{LSA}} \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\eta_{\text{Fluid}} \cdot \Delta p/l \quad \text{bzw.}$$
$$Q_{\text{iP}} \leq 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot A_{\text{LSA}}$$

(A2*) Für alle späteren Zeitpunkte innerhalb des Betrachtungszeitraums von 30.000 Jahren, d. h. für $t_E < t \leq 30.000 \text{ a}$, darf der Fluss bzw. die querschnittsintegrierte Permeabilität Q_{iP} der Abdichtung nicht schneller ansteigen als bei der in den LSA angesetzten idealisierten Abdichtung.

Nach Abschnitt 3.1 ist der Nachweis der ausreichend geringen Permeabilität unter Berücksichtigung der mechanischen und chemischen Einwirkungen ab dem Zeitpunkt zu erbringen, an dem erstmalig Lauge an einer Abdichtung ansteht. Das BfS erweitert in [P 195] diesen Nachweiszeitraum, indem es seinen Beginn auf einen Zeitpunkt während oder kurz nach Errichtung der Abdichtungen vorzieht („Bauzustände“). Dies ist aus den folgenden Gründen sinnvoll bzw. sogar unvermeidbar²⁰:

- Die Nachweisführung für den späteren Zeitraum setzt i. d. R. voraus, dass die jeweiligen Anforderungen schon zu einem früheren Zeitpunkt erfüllt sind. Spätere Heilungseffekte können i. d. R. nicht nachgewiesen werden. Würden die Werkstoffe nach der Errichtung der Abdichtung nicht die gewünschten Permeabilitäten aufweisen, könnte nicht nachgewiesen werden, dass sich die Werkstoffeigenschaften künftig in dem gewünschten Umfang verbessern. Würden die Abdichtungen nach ihrer Errichtung hydraulisch wirksame Risse aufweisen, könnte vermutlich nicht nachgewiesen werden, dass diese künftig rechtzeitig verheilen oder zumindest ihre hydraulische Wirksamkeit verlieren. Das BfS führt deshalb die Nachweise derart, dass die Abdichtungen schon frühzeitig die gewünschten Eigenschaften aufweisen und dass sich diese Eigenschaften künftig nicht (signifikant) verschlechtern.
- Die Nachweisführung für einem frühen Zeitpunkt kann gegenständlich erfolgen. Der gegenständliche Nachweis hat gegenüber dem rechnerischen Nachweis den Vorteil, dass er keine oder zumindest weniger Annahmen voraussetzt und damit i. A. mit einer höheren Aussagesicherheit verbunden ist. Sofern er jedoch – wie im Fall des ERAM – nicht an dem eigentlichen Objekt durchgeführt werden kann, sondern nur an einem ähnlichen Versuchsobjekt, ist zusätzlich seine Übertragbarkeit nachzuweisen.

Die Ersatzforderung (A1*) ist umfassender als die ursprüngliche Forderung (A1) und schließt diese mit ein. Gleiches gilt für (A2*) für den Zeitraum zwischen t_E und t_F . Auf der anderen Seite entfällt die Anforderung (A2) ersatzlos für den Zeitraum $t > 30.000$ Jahren, ohne dass dies begründet wird.

⇒ **Es fehlt der Nachweis zur Erfüllung der Anforderung (A2) für den Zeitraum $t > 30.000$ Jahren.**

Der Nachweis zur Erfüllung der Anforderungen (A1*) und (A2*) muss unter Berücksichtigung aller in Abschnitt 2.4.2 für die Bestehensphase identifizierten FEP geführt werden. Wir bezeichnen ihn

²⁰ Bei der Interpretation der Ergebnisse im Rahmen der Nachweisführung ist jedoch stets zu berücksichtigen, dass die Nachweise erst ab dem Zeitpunkt erforderlich sind, an dem erstmalig Lauge an einer Abdichtung ansteht.

im folgenden als „chemisch-thermisch-mechanisch-hydraulischer Nachweis“. Die Bezeichnung „chemisch“ drückt aus, dass die chemischen FEP

- stofflich/chemische Charakterisierung des Verfüllstoffs (Salzbeton)
- stofflich/chemische Charakterisierung des Injektionsmittels
- stofflich/chemische Charakterisierung der Einbauten
- interne chemische Prozesse
- Stoffaustausch
- stofflich/chemische Charakterisierung des umgebenden Gebirges (ohne AZ)
- stofflich/chemische Charakterisierung der Verfüllung in den angrenzenden Grubenbauen
- stofflich/chemische Charakterisierung der Flüssigphase in den angrenzenden Grubenbauen
- stofflich/chemische Charakterisierung der Gasphase in den angrenzenden Grubenbauen
- externe stofflich/chemische Ereignisse und Prozesse

berücksichtigt werden. Analog beziehen sich die übrigen drei Bezeichnungen auf die thermischen, mechanischen und stofftransportbezogenen FEP²¹.

Wie schon erwähnt, spaltet das BfS die Nachweisführung in das Führen von Teilnachweisen auf²². Dabei unterscheiden sich die Vorgehensweisen in [P 195] (mit [P 255]) und [I 366], die im folgenden getrennt analysiert werden.

3.2.4.2.1. Analyse des Vorgehens in [P 195] und [P 255]

Nach unserem Verständnis der Angaben in [P 195] und [P 255] besteht die Aufspaltung der Nachweisführung aus den folgenden Schritten:

- (1) Aufspaltung des chemisch-thermisch-mechanisch-hydraulischen Nachweises in
 - einen thermisch-mechanisch-hydraulischen Teilnachweis (TNW)²³ und
 - einen TNW der „hinreichenden Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit gegenüber chemischen Angriffen“.

²¹ Diese Darstellung ist etwas vereinfacht. Die Diffusion und Advektion der Wasserinhaltsstoffe, die wir in Kapitel 2 den stofftransportbezogenen FEP zugeordnet haben, fallen bei der hier beschriebenen Nachweismethodik des BfS unter die chemischen FEP.

²² Auch jede Vereinfachung oder Näherung bei der Nachweisführung kann als eine Aufspaltung in Teilnachweise aufgefasst werden, nämlich in den Teilnachweis, dass das vereinfacht beschriebene (Modell)System den jeweiligen Anforderungen genügt und den Teilnachweis, dass sich das vereinfacht beschriebene (Modell)System nicht günstiger verhält als das reale System.

²³ Der thermisch-mechanisch-hydraulische TNW schließt die thermischen, mechanischen und hydraulischen Effekte des Abbindens ein, s. u..

- (2) Aufspaltung des thermisch-mechanisch-hydraulischen TNW in
 - Teilnachweise zur Begrenzung der porenbedingten Anteile der Wasserwegsamkeit und
 - Teilnachweise zur Begrenzung der rissbedingten Anteile der Wasserwegsamkeit.
- (3) Aufspaltung der thermisch-mechanisch-hydraulischen TNW zur Begrenzung der rissbedingten Anteile der Wasserwegsamkeit in
 - die Phase der Bauzustände und
 - die Nachbetriebsphase.
- (4) Reduzierung der thermisch-mechanisch-hydraulischen TNW zur Begrenzung der Wasserwegsamkeit von Rissen auf thermisch-mechanische TNW zur Rissbeschränkung

Im Folgenden werden diese Schritte erläutert und es werden die mit diesen verbundenen impliziten Annahmen identifiziert.

zu (1) Aufspaltung des chemisch-thermisch-mechanisch-hydraulischen Nachweises

Der chemisch-thermisch-mechanisch-hydraulische Nachweis kann in die folgenden Teilnachweise aufgespalten werden:

TNW 1: Nachweis, dass die Abdichtungen die Anforderungen (A1*) und (A2*) an die QiP erfüllen unter der Voraussetzung, dass Alterungs- und Korrosionsprozesse²⁴ sowie alle chemischen äußeren Einwirkungen vernachlässigt werden können.

TNW 2: Nachweis, dass die Alterungs- und Korrosionsprozesse sowie alle chemischen äußeren Einwirkungen nicht zu einem schnelleren Anstieg der QiP bei den realen Abdichtungen führen als bei den in den LSA angesetzten idealisierten Abdichtungen.

Die thermischen, hydraulischen und mechanischen Folgen des Abbindens und des Eindringens von Wasser in den Beton bzw. das IM müssen in TNW 1 berücksichtigt werden. Grundsätzlich kann dies durch eine explizite Berücksichtigung der chemischen Prozesse oder durch eine empirische Beschreibung des thermischen, hydraulischen und mechanischen Materialverhaltens erfolgen. Das BfS wählt letztere Beschreibung.

Wir bezeichnen TNW 1 als thermisch-mechanisch-hydraulischen Nachweis, auch wenn er einige chemische Prozesse berücksichtigt.

Der in [P 195] eingeführte (aber nicht näher definierte) Nachweis einer hinreichenden Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit bzw. einer ausreichenden Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit gegen chemischen Angriff (im Folgenden als TNW L/D abgekürzt) entspricht grundsätzlich diesem TNW 2, weicht aber im Detail von diesem ab:

²⁴ Unter Alterungsprozesse fassen wir alle chemischen Prozesse zusammen, die ohne Stoffeinträge von außen (autogen) in den Abdichtungen (bestehend aus SB, KF und AZ) ablaufen, mit Ausnahme der Abbindeprozesse im Rahmen der Betonherstellung und der Aushärtung des Bindemittels. Unter Korrosionsprozesse fassen wir alle chemischen Prozesse zusammen, die in Folge von Stoffeinträgen von außen in den Abdichtungen ablaufen. Damit fallen auch Ausfällungen aus eindringenden übersättigten Lösungen unter die Korrosionsprozesse.

- Der TNW L/D soll den Nachweis erbringen, dass die Alterungs- und Korrosionsprozesse sowie alle chemischen äußeren Einwirkungen vernachlässigt werden können.

Gegenüber dem TNW 2 ist dies eine erweiterte Forderung. Ziel dieser Erweiterung durch das BfS ist nach unserem Verständnis, die Methodik der Nachweisführung bzw. die zur Nachweisführung verwendeten Modelle vereinfachen zu können. Wir können aus den Unterlagen des BfS allerdings nicht ableiten, welchen Maßstab bzw. welches Kriterium das BfS für die Vernachlässigbarkeit der Alterungs- und Korrosionsprozesse anlegt. In [P 195] wird angegeben, dass entsprechend der Untersuchungen zu TNW 2 die Mächtigkeit des durch die Korrosion beeinträchtigten Bereichs der Abdichtungen unter 0,6 m liegt, was als vernachlässigbar angesehen wird. Ob auch größere Eindringtiefen toleriert würden, bleibt unklar.

- Der TNW L/D ist nicht Gegenstand der Unterlagen [P 195], [P 255] und [I 366]. Durch den Verweis auf die Unterlage [P 146] wird aber deutlich, dass bei der Nachweisführung nur Korrosionsprozesse im SB in Folge einer (homogenen) Laugendurchströmung berücksichtigt werden. Nicht berücksichtigt werden

- (autogene) Alterungsprozesse innerhalb des Salzbetons und des Bindemittels,
(Autogene Prozesse in der trockenen AZ können ausgeschlossen werden, da diese nur Salzgestein enthält.)
- diffusiver Stofftransport zwischen SB, KF und AZ bzw. durch diesen ausgelöste (autogene) Alterungsprozesse,
- Stoffeintrag durch die Gasphase bzw. durch diesen ausgelöste Korrosionsprozesse,
- Korrosionsprozesse im Bindemittel und
- mechanische Prozesse und (äußere) Einwirkungen einschließlich der durch sie hervorgerufenen hydraulischen Folgen.

(Sofern mechanische Prozesse und Einwirkungen lokal zur Rissbildung führen, ändert dies lokal die effektive Permeabilität und die Diffusionskonstante in SB, KF und AZ. Dies verändert die Stoffflüsse und damit ggf. den Korrosionsprozess.)

Die Korrosion führt nach [P 180] bis zur vollständigen Entfestigung des Salzbetons. Hierdurch ergeben sich Änderungen im Spannungszustand der Abdichtung, die die mechanischen Prozesse und den Ort möglicher Rissbildungen beeinflussen.

Chemische Reaktionen, die mit Volumenänderungen verbunden sind, können auch direkt durch Druck beeinflusst werden. Dieser Einfluss dürfte aber vernachlässigbar sein.)

- Weiterhin wird in [P 146] und in der Nachfolgeunterlage [P 180] von einer homogenen Durchströmung der Abdichtung ausgegangen. Der Nachweis, dass diese Näherung zulässig ist, ist im Rahmen des TNW 2 ebenfalls noch zu führen (s. Kapitel 6).

Die vorliegenden LSA weisen aus, dass die Tiefe der chemischen Einwirkungen auch innerhalb eines reduzierten Betrachtungszeitraums von 30.000 Jahren deutlich über 0,6 m liegen kann. Weiterhin wiesen wir auf verschiedene Lücken hin, die der TNW D/L gegenüber dem eigentlich zu erbringenden TNW 2 aufweist. Wir kommen deshalb zu dem Ergebnis:

⇒ **Ein belastbarer und umfassender TNW 2, der die Möglichkeit der Entkopplung der Alterungs- und Korrosionsprozesse vom thermisch-mechanisch-hydraulischen TNW 1 nachweist, liegt nicht vor.**

zu (2) Aufspaltung des thermisch-mechanisch-hydraulischen TNW in poren- und rissbedingte Anteile

Der Laugenfluss durch die Abdichtung kann über Poren in der Salzbetonmatrix, Poren in der Bindemittelmatrix, Risse im SB, Fugen und Risse in der KF und Risse in der AZ erfolgen. Die Vorstellung, dass sich der Laugenfluss als Summe über 5 Teilströme zusammensetzt, die – jeweils von einander getrennt – über diese 5 Elemente fließen, ist jedoch stark idealisiert. Die verschiedenen Stromfäden können auch über mehrere dieser 5 Elemente fließen, immer dem Weg des geringsten hydraulischen Widerstands folgend.

Unabhängig hiervon kann man die QiP jedoch als eine Funktion auffassen, die von den 5 Größen

- hydraulische Wirksamkeit der porösen Salzbetonmatrix,
- hydraulische Wirksamkeit der porösen Bindemittelmatrix,
- hydraulische Wirksamkeit der Risse im SB,
- hydraulische Wirksamkeit der Risse in der KF und
- hydraulische Wirksamkeit der Risse in der AZ

abhängt. Die beiden ersten Größen werden durch die Permeabilität des (rissfreien) Salzbetons bzw. des Bindemittels beschrieben. Wie die drei letzten Größen im Detail definiert sind und wie der Zusammenhang zwischen diesen Größen und der QiP ist, kann zunächst offen bleiben.

Der TNW 1 (Nachweis, dass die Abdichtungen die Anforderungen (A1*) und (A2*) an die QiP erfüllen unter Vernachlässigung der chemischen Prozesse und Einwirkungen mit Ausnahme des Abbindens) kann in die folgenden Teilnachweise aufgespalten werden:

TNW 1.1: Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit des SB

TNW 1.2: Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit der KF

TNW 1.3: Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit der AZ

TNW 1.4: Nachweis der Erfüllung von TNW 1 unter der Voraussetzung, dass die TNW 1.1 bis 1.3 erfüllt sind.

Die TNW 1.1 und 1.2 können weiter aufgespalten werden in

TNW 1.1.1: Nachweis der Begrenzung der Permeabilität des (rissfreien) Salzbetons

TNW 1.1.2: Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit von Rissen im SB

TNW 1.1.3: Nachweis der Erfüllung von TNW 1.1 unter der Voraussetzung, dass die TNW 1.1.1 und 1.1.2 erfüllt sind.

und

TNW 1.2.1: Nachweis der Begrenzung der Permeabilität des (rissfreien) Bindemittels

TNW 1.2.2: Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit von Rissen²⁵ in der KF

TNW 1.2.3: Nachweis der Erfüllung von TNW 1.2 unter der Voraussetzung, dass die TNW 1.2.1 und 1.2.2 erfüllt sind.

Der TNW 1.3 kann auf einen Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit von Rissen in der AZ (TNW 1.3.2) beschränkt werden, da das rissfreie Salzgestein praktisch impermeabel ist.

Alle TNW sind zunächst als thermisch-mechanisch-hydraulische Nachweise zu führen, d. h. unter Berücksichtigung aller thermischen, mechanischen und hydraulischen FEP einschließlich der thermischen, mechanischen und hydraulischen Folgen des Abbindens sowie aller mechanischen Eigenschafts- und Zustandsänderungen aufgrund des Eindringens von Wasser (wie Änderung des Kriechverhaltens und Quellen).

TNW 1.1.1 und TNW 1.2.1 werden in [P 195] als „Nachweis der geringen Werkstoffpermeabilität“ zusammengefasst, wobei dieser Nachweis in [P 195] nicht geführt wird.

zu (3) Aufspaltung der thermisch-mechanisch-hydraulischen TNW in die Phase der Bauzustände und die Nachbetriebsphase

Grundsätzlich können alle TNW in die Phase der Bauzustände und in die Nachbetriebsphase aufgespalten werden. Diese Aufspaltung ist mit keinen Annahmen verbunden. Wir kennzeichnen im folgenden die TNW für die Bauzustände mit (a) und die für die Nachbetriebsphase mit (b).

In [P 195] erfolgt die Aufspaltung der Nachweisführung in die Phase der Bauzustände und in die Nachbetriebsphase nur für die Nachweise der Begrenzung der Wasserwegsamkeit von Rissen, d. h. für die TNW 1.1.2, 1.2.2 und 1.3.2. In [P 195] endet die Phase der Bauzustände mit dem Zeitpunkt, an dem die Abbindeprozesse im Salzbeton abgeschlossen und ihre thermischen und mechanischen Auswirkungen abgeklungen sind. Die thermisch-mechanischen Prozesse reduzieren sich damit in der Nachbetriebsphase definitionsgemäß auf die mechanischen Prozesse.

zu (4) Reduzierung der thermisch-mechanisch-hydraulischen TNW zur Begrenzung der Wasserwegsamkeit von Rissen auf thermisch-mechanische TNW zur Rissbeschränkung

Zur Führung der **TNW 1.1.2** und **TNW 1.2.2** sieht [P 195] vor, die Rissfreiheit²⁶ des SB und der KF nachzuweisen. Hieraus würde unmittelbar folgen, dass eine Wasserwegsamkeit von Rissen im SB und in der KF ausgeschlossen ist. Dadurch könnten auch die TNW 1.1.3 und 1.2.3 entfallen bzw. wären trivial.

Zunächst soll (mittels thermomechanischer Modellierung) die Rissfreiheit für die Phase der Bauzustände nachgewiesen werden (TNW 1.1.2.1 (a) bzw. TNW 1.2.2.1 (a)). Hierauf aufbauend soll (mittels mechanischer²⁷ Modellierung) gezeigt werden, dass die Rissfreiheit dann auch in der Nachbetriebsphase erhalten bleibt (TNW 1.1.2.1 (b) bzw. TNW 1.2.2.1 (b)). Die hydraulischen

²⁵ Zur sprachlichen Vereinfachung fassen wir Risse und offene Fugen unter dem Begriff Risse zusammen.

²⁶ In [P 195] wird der Begriff Rissbeschränkung verwendet, da in [P 195] die Rissfreiheit nur auf 80 % der Länge des Abdichtungsbauwerks gefordert wird.

²⁷ Bei der thermomechanischen Modellierung werden die thermischen und mechanischen Auswirkungen des Abbindeprozesses berücksichtigt, bei der mechanischen Modellierung nicht.

TNW 1.1.2.2 (a) und TNW 1.1.2.2 (b) bzw. TNW 1.2.2.2 (a) und TNW 1.2.2.2 (b) bestehen dann aus der einfachen Feststellung, dass bei Abwesenheit von Rissen kein Laugenfluss durch Risse erfolgen kann. Die Nachweisführung zu TNW 1.1.2 und 1.2.2 soll so auf einen rein (thermisch) mechanischen Nachweis zur Rissfreiheit reduziert werden.

In [P 255] wird zu TNW 1.2.2 ausgeführt, dass der Nachweis der Rissfreiheit für die KF während der Bauzustände nicht geführt werden kann und die KF deshalb injiziert werden soll. Die nun für die Bauzustände vorgesehene Nachweisführung wird nicht weiter erläutert. Aufgrund der Angaben in [I 366] gehen wir davon aus, dass die Rissfreiheit der KF nach Injektion durch In-situ-Messungen erfolgen soll. Diese Nachweisführung ist aus unserer Sicht eine chemisch-thermisch-mechanisch-hydraulische, da bei den In-situ-Messungen die Konsequenzen alle wirkenden Prozesse erfasst werden (sollten).

Zur Führung des **TNW 1.3.2** soll für die AZ nach [P 195] der Nachweis erbracht werden, dass die Wasserwegsamkeit über Risse begrenzt ist. Dieser Nachweis soll für die Phase der Bauzustände aus In-situ-Messungen der (effektiven) Permeabilität abgeleitet werden²⁸ (TNW 1.3.2 (a)). Diese Nachweisführung ist aus unserer Sicht eine chemisch-thermisch-mechanisch-hydraulische.

Für die Nachbetriebsphase soll (mittels mechanischer Modellierung) gezeigt werden, dass sich die Risse nicht aufweiten (TNW 1.3.2.1 (b)), so dass ihre Wasserwegsamkeit nicht zunehmen kann. Dadurch kann TNW 1.3.2.2 (b) entfallen bzw. wäre trivial. Für die Nachbetriebsphase wird der TNW 1.3.2 auf einen rein mechanischen Nachweis (der „Rissbegrenzung“) reduziert.

Die Aufspaltung der TNW in einen thermisch-mechanischen und einen hydraulischen Anteil impliziert, dass hydraulische Einwirkungen auf die mechanischen Abläufe (mit Ausnahme des hydrostatischen Drucks) nicht berücksichtigt werden. Konkret bedeutet dies:

- Änderungen im Kriechverhalten der AZ aufgrund von Wassereintrag werden vernachlässigt.
- Der Aufbau von zusätzlichen inneren Spannungen aufgrund von Quellen (Salzbeton, Injektionsmittel) bei Wassereintrag (in der Nachbetriebsphase relevant) wird vernachlässigt.

Nach unserer Einschätzung sind beide Ansätze konservativ, d. h. sie führen ggf. zu einer Überschätzung der QiP, nicht aber zu ihrer Unterschätzung:

- Aufgrund eines verstärkten Kriechens in der AZ verringert sich die Wasserwegsamkeit der AZ und der KF.
- Ein Quellen des SB oder/und des Injektionsmittels kann zu einer Verringerung von offenen Rissen bzw. Fugen führen. Mechanismen, die zu einer Erhöhung der Wasserwegsamkeit in SB, KF oder AZ führen, sehen wir dagegen nicht.

Die Aufspaltung der Nachweisführung entsprechend [P 195] und [P 255] in den Schritten (1) bis (4) ist in Abbildung 3.2-1 dargestellt.

²⁸ Die Fragen nach Ort, Zeitpunkt und Repräsentativität der Messungen wird hier zunächst ausgeklammert.

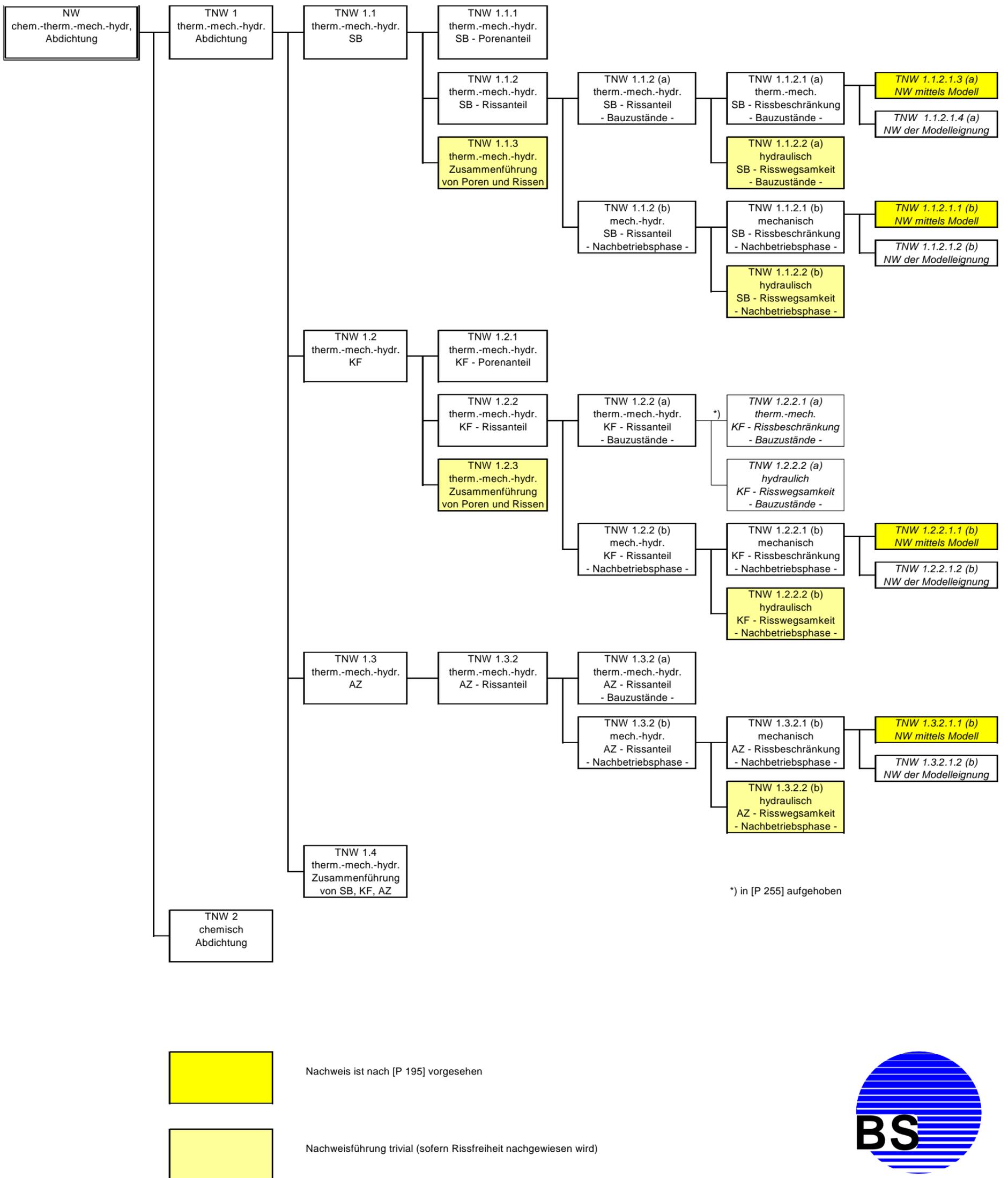


Abbildung 3-1: Aufspaltung der Nachweisführung in [P 195] und [P 255]

Die Zuordnung der in Abbildung 3.2-1 aufgeführten TNW zu den Nachweiserfordernissen nach [P 195] Tabelle 5.1-1 ist dabei wie folgt:

- Der „Nachweis der Rissbeschränkung“ umfasst die vier (thermisch-)mechanischen TNW 1.1.2.1 (a), 1.1.2.1 (b), 1.2.2.1 (b) und 1.3.2.1 (b) ([P 195], [P 255])²⁹. Diese müssen jeweils aus einem rechnerischen Nachweis sowie dem Nachweis der Modelleignung bestehen (in Abbildung 3.2-1 kursiv gedruckt). Die in [P 195] zusätzlich aufgeführten Nachweise der Standsicherheit bzw. der Lagesicherheit und der Festigkeit werden durch diese (thermisch-)mechanischen TNW zur Rissbeschränkung abgedeckt und brauchen hier nicht weiter berücksichtigt zu werden: Ein Mangel an Standsicherheit oder Festigkeit wirkt sich auf die Wasserwegsamkeit der Abdichtung nur in Form zusätzlicher bzw. sich erweiternder Risse aus.
- Der „Nachweis der geringfügigen (anfänglichen) Werkstoffpermeabilität“ ist das Gegenstück zu den TNW 1.1.1 und 1.2.1.
- Der „Nachweis der chemischen Langzeitbeständigkeit/Dauerhaftigkeit“ ist das Gegenstück zu TNW 2.

In [P 195] werden für den „Nachweis der Rissbeschränkung“ die Nachweiskriterien (dort Abschnitt 5.3) und der exemplarische Nachweis (dort Kapitel 6) angegeben. Diese TNW werden als rechnerische Nachweise geführt. Die in [P 195] verwendeten Nachweismethoden und Nachweiskriterien sind in Tabelle 3.2-3 zusammengestellt. Bei der Nachweisführung für die Nachbetriebsphase wird dabei zwischen einer Frühphase (bis 100 Jahre) und einer Spätphase differenziert.

Die Teilnachweise

- zur geringen Werkstoffpermeabilität (TNW 1.1.1) und (TNW 1.2.1),
- zur Begrenzung der hydraulischen Wirksamkeit der Risse in der KF und der AZ in der Phase der Bauszustände (TNW 1.2.2 (a) und TNW 1.3.2 (a)),
- zur Begrenzung der QiP der Abdichtung mittels Zusammenführung der TNW für SB, KF und AZ (TNW 1.4) sowie
- zur chemischen Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit (TNW 2)

werden in den Kapiteln 5.3 und 6 in [P 195] nicht weiter konkretisiert.

Aus [I 366] kann entnommen werden, dass die TNW 1.2.2 (a) und TNW 1.3.2 (a) mittels In-situ-Messungen an einer Versuchsabdichtung erbracht werden sollen. Dies setzt die Repräsentativität der Versuchsabdichtung voraus (s. u.).

Aus Kapitel 4 in [P 195] kann entnommen werden, dass TNW 1.4 dadurch erbracht werden soll, dass die Anforderungen (A1*) und (A2*) von jedem der drei Teilelemente SB, KF und AZ separat erfüllt werden. Aufgrund der Angaben in [P 298] und [I 366] gehen wir jedoch davon aus, dass diese Vorgehensweise vom BfS nicht mehr vorgesehen ist.

²⁹ In [P 195] umfasst der Nachweis der Rissbeschränkung zusätzlich den TNW 1.2.2.2 (a). Dieser Teil der Nachweisführung wird aber in [P 255] aufgehoben.



Tabelle 3.2-3: Vom BfS nach [P 195] und [P 255] vorgesehene Nachweismethoden und Nachweiskriterien.

Nachweiserfordernis	Zeitraum der Nachweisführung	berücksichtigte FEP	Nachweismethoden und Nachweiskriterien	Quelle
NW der Rissbeschränkung im SB				
TNW 1.1.2.1.3 (a)	Bauzustände (vom Einbringen des Salzbetons bis zum vollständiges Abbinden)	im SB: <ul style="list-style-type: none"> • therm. Materialkennwerte • Alterstransformation • Hydratationswärme • mech. Kurzzeiteigenschaften • viskoelastisches Verhalten • autogenes Schwinden äußere Einwirkung: <ul style="list-style-type: none"> • Verformungsbehinderung 	<u>Methode:</u> Numerisches 2D-Modell zur Ermittlung der zeitabh. Spannungen und Festigkeiten <u>Kriterium:</u> (Zug)Festigkeit/Spannung > 2	[P 255]
TNW 1.1.2.1.1 (b)	Nachbetriebsphase (vom vollständigen Abbinden bis zum Ende des Betrachtungszeitraums)	in Abdichtung: <ul style="list-style-type: none"> • Eigengewicht • Kriechen • ggf. Vorspannung aus Injektion äußere Einwirkung: <ul style="list-style-type: none"> • Gebirgsdruck • Fluiddruck • Verformungsbehinderung • chemischer Angriff 	<u>Methode:</u> Numerisches 3D-Modell zur Ermittlung der zeitabh. Spannungen <u>Kriterium:</u> ¹⁾ <ul style="list-style-type: none"> • bis 100 a: Vergleich mit Druck- und Zugfestigkeitswerten für Salzbeton, die in [P 195] in Anlehnung an Drucker-Prager abgeleitet werden („Festigkeitskriterium“). • nach 100 a: Dilatanzkriterium (mit Parametern für Salzbeton) 	[P 195]
NW der Rissbeschränkung in der KF				
TNW 1.2.2.1.1 (b)	Nachbetriebsphase	siehe TNW 1.1.2.1.1 (b)	<u>Methode:</u> wie TNW 1.1.2.1.1 (b) <u>Kriterium:</u> <ul style="list-style-type: none"> • bis 100 a: Vergleich mit Druck- und Zugfestigkeitswerten für Salz, die in [P 195] in Anlehnung an Drucker-Prager abgeleitet werden. • nach 100 a: Dilatanzkriterium (mit Parametern für Salz) Das jeweilige Kriterium muss auf mind. 80% der Abdichtungslänge erfüllt sein.	[P 195]
NW der Rissbeschränkung in der AZ				
TNW 1.3.2.1.1 (b)	Nachbetriebsphase	siehe TNW 1.1.2.1.1 (b)	<u>Methode:</u> wie TNW 1.1.2.1.1 (b) <u>Kriterium:</u> ²⁾ <ul style="list-style-type: none"> • $t_E...t_G$: Dilatanzkriterium (mit Parametern für Salz) • $t_F...t_G$: Fluidkriterium; ersatzweise kann auch eine „effektive Dilatanzbedingung“ zur Anwendung kommen. Das jeweilige Kriterium muss auf mind. 80% der Abdichtungslänge erfüllt sein.	[P 195]
NW der Beschränkung der hydraulischen Wirksamkeit von KF und AZ				
TNW 1.2.0.1 (b) TNW 1.3.0.1 (b)	Teil der Nachbetriebsphase (solange trocken)	- gegenständig -	Verweis auf Asse-Vordamm	[P 255]
TNW 1.2.0.2 (b) TNW 1.3.0.2 (b)	Teil der Nachbetriebsphase (solange trocken)	im Gebirge <ul style="list-style-type: none"> • Kriechklasse • Temperatur 	Transformation der Zeit wg. unterschiedlicher Kriechraten	[P 255]

¹⁾ Die Angaben entsprechen denen von Abschnitt 5.3. In der „exemplarischen Nachweisführung“ in Kapitel 6 wird hiervon abweichend angegeben, dass auch in der frühen Phase (d. h. bis 100 a) das Dilatanzkriterium zum Nachweis der Rissbeschränkung zur Anwendung kommt (zusätzlich zum Festigkeitskriterium nach Drucker-Prager; s. S. 96 in [P 195]).

²⁾ Die Angaben entsprechen denen von Abschnitt 5.3. In der „exemplarischen Nachweisführung“ in Kapitel 6 wird hiervon abweichend für das Szenario „trockene Grube“ auch für den Zeitraum $t_E...t_F$ die „effektive Dilatanzbedingung“ unter Ansatz eines fiktiven Porendrucks von 6 MPa angewendet.

Bzgl. des Nachweises der geringen Werkstoffpermeabilität wird in [P 195] auf S. 46 auf „genauere Auswertungen“ verwiesen, die noch erforderlich seien.

Bzgl. des Nachweises der chemischen Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit wird auf [P 146] verwiesen, was wir bereits oben kommentierten.

3.2.4.2.2. Analyse des Vorgehens in [I 366]

Im Rahmen des in [I 366] geschilderten In-situ-Versuchs sollen die Nachweise

- der ausreichend geringen integralen Permeabilität,
- der Rissbeständigkeit und
- der hinreichenden Festigkeit

für die Bauzustände gegenständlich erbracht werden. Für die Nachbetriebsphase sollen diese Nachweise mittels Prognoseberechnungen und baubegleitende Materialprüfungen erbracht werden³⁰.

Dies bedeutet eine Aufspaltung in Teilnachweise, die von der Struktur, die wir oben aus [P 195] abgeleitet haben, teilweise abweicht. Die im folgenden erläuterten Aufspaltungen sind in Abbildung 3.2-2 graphisch dargestellt. Die nach [I 366] vorgesehenen Untersuchungen (als [U nn] gekennzeichnet) haben wir nach unserem Verständnis einzelnen Teilnachweisen zugeordnet. Die Untersuchungen [U nn] werden in den Tabellen 3.2-4 und 3.2-5 erläutert.

- (1) Zunächst erfolgt eine Aufspaltung des Nachweises in die Phase der Bauzustände (TNW 1+2 (a)) und die Nachbetriebsphase (TNW 1+2 (b)).

Die Bezeichnung TNW 1+2 bringt zum Ausdruck, dass der jeweilige TNW neben den (thermo)mechanisch-hydraulischen Prozessen auch die chemischen (Alterungs- und Korrosions-) Prozesse berücksichtigt.

Die in [I 366] beschriebenen Untersuchungen am In-situ-Bauwerk betreffen ausschließlich die Phase der Bauzustände.

- (2) Das Führen des TNW 1+2 (a) für die Bauphase soll nun offensichtlich zweigleisig erfolgen, nämlich durch
 - eine „summarische“ Nachweisführung durch eine direkte Messung der QiP des Abdichtungssystems mittels einer Druckkammer (TNW 1+2.0 (a))
 - und
 - eine „elementweise“ Nachweisführung der Begrenzung der Wasserwegsamkeit der einzelnen Abdichtungselemente SB, KF und AZ.

³⁰ Die Formulierung in [I 366] lautet: „Für die Bemessungssituation „Trockenes Endlager“ und „Zugelaufenes Endlager“ werden die Nachweisziele „hinreichende Festigkeit“ und „Rissbeschränkung“ über die baubegleitenden Materialprüfungen in Verbindung mit den theoretischen Betrachtungen nach [P 195] und den Prognoserechnungen nach Kapitel 9 bestätigt.“ Wir gehen davon aus, dass diese Bestätigung noch nicht vorliegt, sondern erst erbracht werden soll.

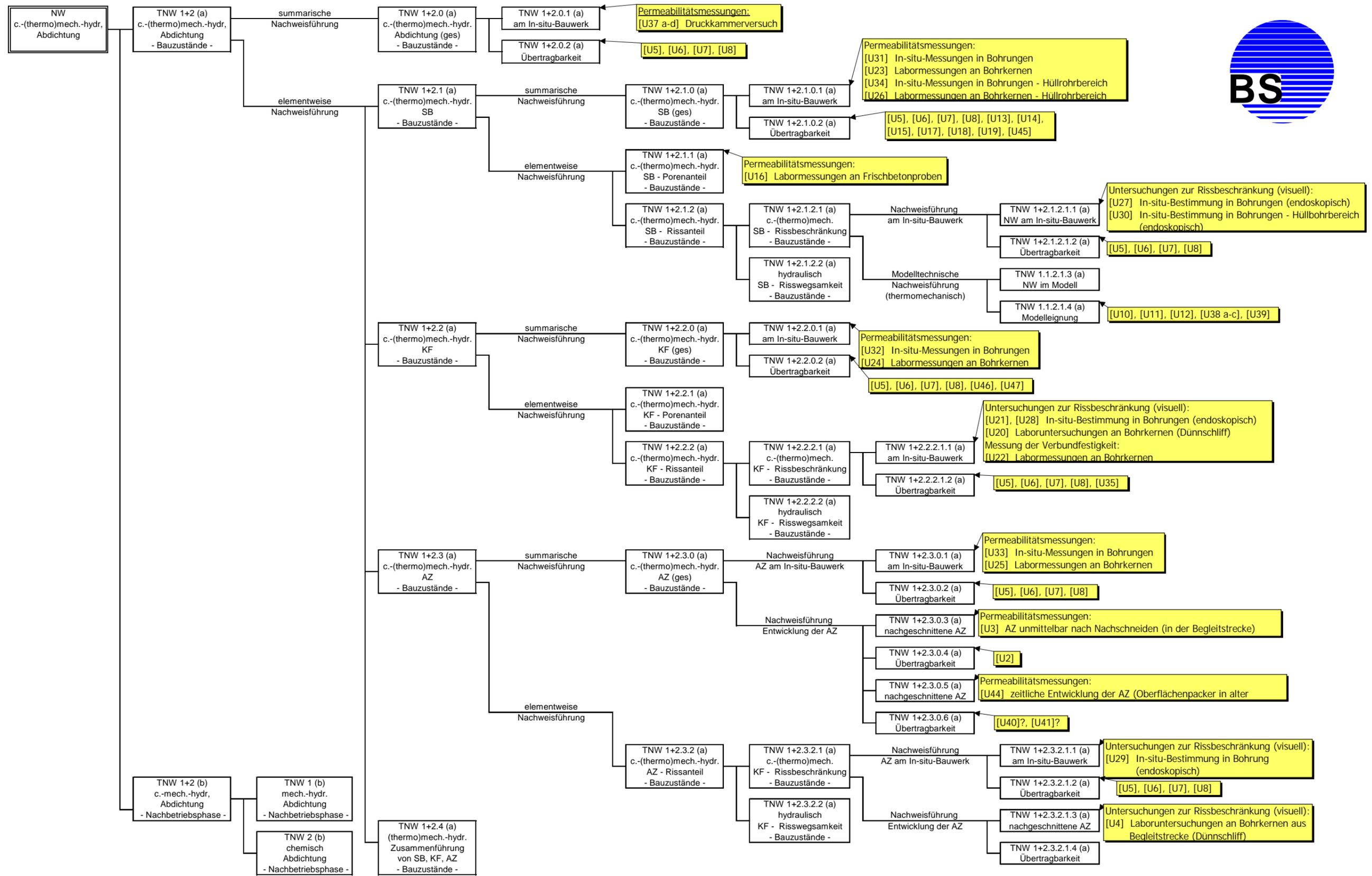


Abbildung 3.2-2: Aufspaltung der Nachweisführung zur Einordnung der in [P 195], [P 255] und [I 366] vorgesehenen Untersuchungen (Phase der Bauzustände)

- (3) Der TNW durch direkte Messung besteht aus zwei Teilen, nämlich
 - dem Nachweis der Einhaltung der QiP am In-situ-Bauwerk (TNW 1+2.0.1 (a)) und
 - dem Nachweis der Übertragbarkeit der Messergebnisse vom In-situ-Bauwerk auf die Abdichtungen (TNW 1+2.0.2 (a)).
- (4) Der „elementweise“ TNW muss wie im vorigen Abschnitt 3.2.4.2.1 aus 4 TNW bestehen, nämlich
 - dem Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit des SB (TNW 1+2.1 (a)),
 - dem Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit der KF (TNW 1+2.2 (a)),
 - dem Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit der AZ (TNW 1+2.3 (a)) und
 - dem Nachweis der Erfüllung von TNW 1.2 (a) unter der Voraussetzung, dass diese drei TNW erfüllt sind (TNW 1+2.4 (a)).
- (5) Offensichtlich sollen auch TNW 1+2.1 (a) (für den SB), TNW 1+2.2 (a) (für die KF) und TNW 1+2.3 (a) (für die AZ) zweigleisig geführt werden, nämlich einmal durch direkte Messung der jeweiligen Wasserwegsamkeit am In-situ-Bauwerk („summarische Nachweisführung“) und einmal über die getrennte Berücksichtigung von Poren und Rissen zur jeweiligen Wasserwegsamkeit („elementweise Nachweisführung“).
- (6) Die summarischen TNW (TNW 1+2.1.0 (a), TNW 1+2.2.0 und TNW 1+2.3.0 (a)) bestehen analog zu (3) jeweils aus dem Nachweis der Begrenzung der Wasserwegsamkeit (des SB, der KF bzw. der AZ) am In-situ-Bauwerk und dem Nachweis der Übertragbarkeit auf die Abdichtungen (TNW 1+2.x.0.1 und TNW 1+2.x.0.2).
- (7) Der TNW 1+2.3.0 (a) soll wiederum zusätzlich (im Sinne von zweigleisig) auch durch Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der AZ (In-situ-Messungen der Permeabilität) geführt werden. Neben den Permeabilitätsnachweisen sind auch hier wieder die Nachweise der Übertragbarkeit zu erbringen (TNW 1+2.3.0.3 bis TNW 1+2.3.0.6).
- (8) Bei den elementweisen Nachweisführungen wird bei SB und KF jeweils zwischen der Begrenzung der porengedunden Wasserwegsamkeit (TNW 1+2.1.1 (a) bzw. TNW 1+2.2.1 (a)) und der Begrenzung der rissgedunden Wasserwegsamkeit (TNW 1+2.1.2 (a) bzw. TNW 1+2.2.2 (a)) unterschieden.
- (9) Die Nachweisführungen zur Begrenzung der rissgedunden Wasserwegsamkeit (TNW 1+2.1.2 (a) für den SB, TNW 1+2.2.2 (a) für die KF und TNW 1+2.3.2 (a) für die AZ) werden jeweils aufgespalten in eine Nachweisführung der Rissbegrenzung (TNW 1+2.x.2.1 (a)) und der Begrenzung der hydraulischen Wirksamkeit der festgestellten Risse (TNW 1+2.x.2.2 (a)).

Für den SB ist beabsichtigt, die Rissfreiheit festzustellen, so dass sich TNW 1+2.1.2.2 (a) auf die triviale Feststellung reduziert, dass ohne Risse auch keine rissgedundene Wasserwegsamkeit vorhanden sein kann. Für die KF und die AZ kann dieser Schritt der Nachweisführung dagegen komplexer werden.

- (10) Die Nachweisführung zur Rissbegrenzung TNW 1+2.x.2.1 (a) soll gegenständlich am In-situ-Bauwerk (bzw. an dort entnommenen Proben) durchgeführt werden und besteht deshalb analog zu (3) jeweils aus dem gegenständlichen Nachweis am In-situ-Bauwerk TNW 1+2.x.2.1.1 (a) und dem Nachweis der Übertragbarkeit auf die Abdichtungen TNW 1+2.x.2.1.2 (a).
- (11) Parallel hierzu soll für den Salzbeton – als Teil des Nachweises für die Übertragbarkeit – eine modelltechnische Nachweisführung erfolgen, die aus dem rechnerischen Nachweis TNW 1.1.2.1.3 (a) und dem Nachweis der Modelleignung TNW 1.1.2.1.4 (a) besteht.
- Für die AZ werden ebenfalls parallel hierzu Untersuchungen zu ihrer zeitlichen Entwicklung (analog zu (7)) durchgeführt. Neben den ermittelten Risszuständen sind auch hier wieder die Nachweise der Übertragbarkeit zu erbringen (TNW 1+2.3.2.1.3 (a) und TNW 1+2.3.2.1.4 (a)).
- (12) Die Nachweisführung für die Nachbetriebsphase erfolgt weiterhin so wie in [P 195] beschrieben, beginnend mit der Aufspaltung in einen (thermo)mechanisch-hydraulischen TNW 1 (b) und einen Teilnachweis zur chemischen Beständigkeit (TNW 2 (b)).

Bzgl. des Nachweises zur chemischen Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit (5) wird auf S. 28 angegeben, dass dieser mit [P 299] für den Salzbeton M2 vorliegt. Für das vorgesehene Injektionsmittel Ultrafin 12 „*wird er an anderer Stelle geführt*“. Diese Stelle wird jedoch nicht benannt.

Tabelle 3.2-4: Im Rahmen des In-situ-Versuchs vorgesehene Untersuchungen (gemäß [I 366])

Nr.	Textseite in [I 366]	Kurzbeschreibung der Untersuchungen
[U1]	53	Spannungsmessungen am Versuchsstandort mittels Hydrofrac-Messungen
[U2]	54	In-situ-Permeabilitätsmessg. in Bohrungen vor dem Nachschnitt (Auflockerungszone Versuchsstrecke)
[U3]	54	In-situ-Permeabilitätsmessungen in Bohrungen und mit Oberflächenpackern (Auflockerungszone Begleitstrecke)
[U4]	54	Untersuchung von Dünnschliffen aus Bohrkernen hinsichtlich Rissstruktur der Auflockerungszone nach Nachschnitt (Begleitstrecke)
[U5]	54	Geologische Detailaufnahme mittels Stoßkartierung und Videoendoskopie der Messbohrungen (Versuchs- und Begleitstrecke)
[U6]	54	Klimamessstellen vor dem Nachschnitt
[U7]	54	Extensometermessungen vor dem Nachschnitt
[U8]	54	Konvergenzmessquerschnitt vor und nach dem Nachschnitt
[U9]	55	3D-Laserscannermessungen der Streckenkontur vor und nach dem Nachschnitt
[U10]	38	Temperaturmessungen im Abdichtbauwerk
[U11]	38	Spannungsmessungen im Abdichtbauwerk
[U12]	38	Verschiebungs-/Verformungsmessungen im Abdichtbauwerk
[U13]	38	Festigkeitsuntersuchungen an Salzbeton-Probekörpern
[U14]	38	Ermittlung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten an Salzbeton-Probekörpern
[U15]	38	Ermittlung der Gesamtporosität an Salzbeton-Probekörpern

Tabelle 3.2-4: Im Rahmen des In-situ-Versuchs vorgesehene Untersuchungen (gemäß [I 366])
(Fortsetzung)

Nr.	Textseite in [I 366]	Kurzbeschreibung der Untersuchungen
[U16]	38	Ermittlung der Permeabilität von Salzbeton-Probekörpern
[U17]	39	Ermittlung des Sättigungszustands von Salzbeton-Probekörpern
[U18]	39	(ggf.) Untersuchung des Kriechverhaltens an Salzbeton-Probekörpern
[U19]	40	Ermittlung der Endfestigkeit an Bohrkernen aus dem Salzbeton-Bauwerk
[U20]	40	Dünnschliffuntersuchungen an Bohrkernen aus der injizierten Kontaktfuge
[U21]	40	Videoendoskopie von Bohrlochwandungen in der injizierten Kontaktfuge
[U22]	40	Festigkeitsuntersuchungen an Bohrkernen aus der injizierten Kontaktfuge
[U23]	40	Permeabilitätsmessungen an Bohrkernen aus dem Salzbetonsegment
[U24]	40	Permeabilitätsmessungen an Bohrkernen aus der injizierten Kontaktfuge
[U25]	40	Permeabilitätsmessungen an Bohrkernen aus der Auflockerungszone
[U26]	40	Permeabilitätsmessungen an Bohrkernen aus dem verfüllten Hüllrohrbereich
[U27]	40	Videoendoskopie von Bohrlochwandungen im Salzbetonsegment
[U28]	40	Videoendoskopie von Bohrlochwandungen in der injizierten Kontaktfuge
[U29]	40	Videoendoskopie von Bohrlochwandungen in der Auflockerungszone
[U30]	40	Videoendoskopie von Bohrlochwandungen im verfüllten Hüllrohrbereich
[U31]	40	Permeabilitätsmessungen in Bohrlöchern im Salzbetonsegment
[U32]	40	Permeabilitätsmessungen in Bohrlöchern in der injizierten Kontaktfuge
[U33]	40	Permeabilitätsmessungen in Bohrlöchern in der Auflockerungszone
[U34]	40	Permeabilitätsmessungen in Bohrlöchern im verfüllten Hüllrohrbereich
[U35]	41	Messungen zur Injektionsüberwachung
[U36]	41	WD-Tests im Rahmen der Injektionsmaßnahmen *)
[U37]	41	Druckkammerversuch
[U38]	41	Messung der Bauwerkseinspannung mittels Hydrofracs
[U39]	42	Extensometermessungen im Salzbetonbauwerk
[U40]	61	Konvergenzmessungen in einer alten Strecke
[U41]	61	Extensometermessungen in einer alten Strecke
[U42]	61	Permeabilitätsmessungen in Bohrlöchern in einer alten Strecke vor dem Nachschnitt
[U43]	61	Ermittlung des Spannungszustands in einer alten Strecke mit Hydrofracs vor Nachschn.
[U44]	61	Permeabilitätsmessungen in einer alten Strecke nach dem Nachschnitt mittels Oberflächenpackern
[U45]	56	Erst- und ggf. Güteüberwachung nach QM-Plan für den Salzbeton
[U46]	56	Erst- und ggf. Güteüberwachung nach QM-Plan für das Injektionsmittel
[U47]	61	Messungen mit großmaßstäblichen Oberflächenpackern analog CARLA

*) Diese Tests sollen vermutlich vor der Injizierung durchgeführt werden und werden daher hier nicht berücksichtigt.

Tabelle 3.2-5: Zuordnung der Untersuchungen nach Tab. 3.2-4 zu Abdichtungssegmenten bzw. Materialien

Abdichtungssegment bzw. Material	Probekörper aus Salzbeton	Salzbeton-Bauwerk	Bohrung im Salzbeton-Bauwerk	Bohrkern aus dem Salzbeton-Bauwerk	Kontakt-fuge	Injektions-mittel	Bohrung in der Kontakt-fuge	Bohrkern aus der Kontakt-fuge	Strecken-kontur / Auflocke-rungszone	Bohrung in der Auflocke-rungszone	Bohrkern aus der Auflocke-rungszone	Bohrung im Hüllrohr-bereich	Bohrkern aus dem Hüllrohr-bereich
Art der Untersuchung													
Spannungsmessungen		[U11]								[U1][U43]			
Permeabilitätsmessungen	[U16]		[U31]	[U23]	[U36]		[U32]	[U24]	[U3][U44]	[U2][U33]	[U25][U42]	[U34]	[U26]
Dünnschliffuntersuchungen								[U20]		[U4]			
Videoendoskopie			[U27]				[U21][U28]			[U5][U29]		[U30]	
Klimamessungen									[U6]				
Extensometermessungen		[U39]							[U7][U41]				
Konvergenzmessungen									[U8][U40]				
3D-Laserscannermessungen									[U9]				
Temperaturmessungen		[U10]											
Verformungsmessungen		[U12]											
Festigkeitsuntersuchungen	[U13]			[U19]				[U22]					
Bestimmung der Gesamtporosität	[U15]												
Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeff.	[U14]												
Bestimmung des Sättigungszustands	[U17]												
Ermittlung des Kriechverhaltens	[U18]												
Messungen zur Injektionsüberwachung					[U35]								
Druckkammerversuch		[U37a]			[U37b]	[U37c]					[U37d]		
Ermittlung der Bauwerkseinspannung			[U38a]				[U38b]			[U38c]			
Qualitätssicherung		[U45]				[U46]							
Messungen mit großmaßstäblichen Oberflächenpackern									[U47]				

3.2.4.3. Bewertung der Vorgehensweise des BfS

Die Methodik des BfS, ausgehend von den Anforderungen an die Abdichtungen Nachweiserfordernisse aufzustellen und diese in Teilnachweise zu zerlegen, ist sachgerecht und alternativlos. Ihre Umsetzung in den Unterlagen [P 195], [P 255] und [I 366] weist jedoch folgende Schwachstellen auf:

- Die in [P 195] und [I 366] enthaltenen Nachweisführungen sind nicht klar strukturiert. Es wird nicht abgeleitet bzw. begründet, weshalb die aufgeführten Nachweiserfordernisse – und nur diese – bestehen. Es wird nicht immer angegeben, wie die einzelnen Teilnachweise und Untersuchungen in den Gesamtnachweis eingeordnet sind. Die Prüfung der Vollständigkeit der Nachweisführung setzt eine solche Einordnung jedoch voraus.
- Die Nachweiserfordernisse werden nicht klar definiert.
 - Das Nachweiserfordernis der ausreichend geringen integralen Permeabilität wird nicht klar definiert. Es bleibt unklar, ob hiermit die gesamte Nachweisführung (inkl. Rissbeschränkung, Standsicherheit und chemischer Beständigkeit) oder nur ein Teilschritt (z. B. der Nachweis der ausreichend geringen integralen Permeabilität unter der Voraussetzung der – an anderer Stelle nachzuweisenden – Werkstoffpermeabilitäten und der Rissfreiheit) bezeichnet wird.
 - Das Nachweiserfordernis „Rissbeschränkung“ wird nicht klar definiert. Für den Salzbetonkörper kann es aus den Kapiteln 5.3 und 6 aus [P 195] erschlossen werden (als Abwesenheit von Rissen im SB mit einer streckenachsenparallelen Richtungskomponente). Für die Kontaktfuge ist dies jedoch nicht eindeutig (d. h. ohne Interpretation seitens des Lesers) möglich.
 - Es fehlen eine Definition der Begriffe „Lagebeständigkeit“ und „hinreichende Festigkeit“, eine Begründung dieser Nachweiserfordernisse und der Maßstab für ihre Bewertung.
 - Es fehlt eine Definition des Begriffs Langzeitbeständigkeit/Dauerhaftigkeit (gegenüber chemischen Angriffen).

In [I 366] wird das Nachweisziel „Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit“ aufgeführt, ohne dass dies (wie in [P 195] Tabelle 5.1-1 erfolgt) auf den chemischen Angriff eingeschränkt wird. Wir gehen davon aus, dass auch in [I 366] lediglich die Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit gegenüber chemischen Angriffen gemeint ist, da bzgl. dieses Nachweises auf die Unterlage [P 299] verwiesen wird, die die chemische Korrosion von Salzbeton zum Thema hat.

- Die in beiden Unterlagen aufgeführten Nachweiserfordernisse scheinen zwar in ihrer Summe, nicht aber im Einzelnen deckungsgleich zu sein.

In [I 366] werden die Nachweiserfordernisse (1) bis (5) nebeneinander gestellt, was den Eindruck der gleichen Hierarchiestufe erweckt. Tatsächlich ist (1) (NW der ausreichend geringen integralen (System-)Permeabilität) jedoch das übergeordnete Nachweiserfordernis, das (2) bis (5) beinhaltet bzw. voraussetzt. Allerdings sind (2) bis (5) hierzu nicht ausreichend, sondern es sind weitere Nachweise zu erbringen, wie z. B. die der ausreichend geringen Werkstoffpermeabilitäten. Die Vorgehensweise in [P 195] ist besser strukturiert. Hier werden

Teilnachweise benannt, die in ihrer Summe den Nachweis der ausreichend geringen integralen (System-)Permeabilität liefern sollen.

- Es werden nicht immer die impliziten Annahmen und Voraussetzungen benannt, die mit der Einführung der Teilnachweise verbunden sind. Im Rahmen der bislang durchgeführten Prüfungen haben wir folgende impliziten Annahmen des BfS identifiziert:
 - Die Reaktion des Abdichtungssystems auf äußere mechanische Einwirkungen erfolgt unabhängig von den äußeren chemischen Einflüssen³¹.
 - Die Reaktion des Abdichtungssystems auf den chemischen Angriff („Korrosion“) erfolgt unabhängig von den äußeren mechanischen Einflüssen.
 - Die Permeabilität der Werkstoffe kann sich nur dann verändern, wenn Lauge in die Abdichtungen eindringt:
 - Die (Werkstoff-)Permeabilität ändert sich nicht aufgrund von Alterungsprozessen (ohne äußere Einflüsse).
 - Die (Werkstoff-)Permeabilität ändert sich nicht aufgrund von äußeren mechanischen Kräften oder durch diese hervorgerufenen Kriechbewegungen.
 - In die Abdichtungen dringt entweder kein Gas ein oder das eindringende Gas verursacht keine Reaktionen mit Einfluss auf die Permeabilität.
 - In den Abdichtungen (als System aus SB, KF und AZ) findet kein Stofftransport aufgrund von Diffusionsprozessen statt oder dieser Stofftransport verursacht keine Reaktionen mit Einfluss auf die Permeabilität.
- Die Entkopplung der Nachweise zur Rissbeständigkeit (inkl. Festigkeit) und zur chemischen Langzeitstabilität basiert auf den Annahmen, dass sich die chemische Einwirkung auf die Abdichtungen aus Salzbeton innerhalb des Betrachtungszeitraums von hier 30.000 Jahre auf die ersten 0,3 m bis 0,6 m der Abdichtungen beschränkt und dass es keine Vorzugsfließwege innerhalb der Abdichtung oder/und der Kontaktfuge gibt. Die erste Annahme steht im Widerspruch zu den Ergebnissen der LSA. Die zweite Annahme ist nachzuweisen. Dieser Punkt ist von großer Relevanz, da der chemische Angriff zur vollständigen mechanischen Entfestigung der Baustoffe und zur drastischen Erhöhung der Permeabilität des Salzbetons³² führt.
- Eine weitere, zumindest formale Schwachstelle ist, dass der Nachweiszeitraum in [P 195] auf 30.000 Jahre begrenzt wird, sich aus der LSA jedoch auch Anforderungen an die Abdichtungen zu späteren Zeitpunkten ergeben.
- Die Zeitintervalle, für die die Nachweise zu führen sind, und die Gültigkeitsbereiche der Teilnachweise werden nicht immer klar definiert.

Nach Abschnitt 3.1 ist der Nachweis der ausreichend geringen Permeabilität unter Berücksichtigung der mechanischen und chemischen Einwirkungen ab dem Zeitpunkt zu erbringen, an

³¹ Diese Annahme wird in [P 195] mit der nur geringen Eindringtiefe der Korrosionsfront in die Abdichtungen begründet, s. u..

³² Für das Injektionsmittel liegen gegenwärtig keine entsprechenden Untersuchungen vor.

dem erstmalig Lauge an einer Abdichtung ansteht. Das BfS hat den Beginn des Nachweiszeitraums jedoch vorverlegt, da es für die Nachbetriebsphase nur ein das Ausbleiben einer Verschlechterung des Systemverhaltens nachweisen kann (s. o.)

Führt man den Nachweis auf diese Art, ist es zwingend erforderlich, dass der Zeitpunkt, für den der Nachweis (erstmalig) erbracht wird, klar definiert ist, und dass der Nachweis der ausbleibenden Verschlechterung den gesamten Zeitraum ab diesem Zeitpunkt lückenlos abdeckt. Hierzu ist es zweckmäßig, die folgenden Zeitpunkte zu definieren³³:

- t_A Zeitpunkt des Nachschneidens der Strecke
- t_B Zeitpunkt des Einbringens des SB
- t_C Zeitpunkt der Injektion
- t_D Zeitpunkt, für den die Nachweisführung am In-situ-Bauwerk für die vorliegende Abdichtung repräsentativ ist
- t_E Zeitpunkt, ab dem die Abbindeprozesse und die Folgen ihres Feuchte- und Wärmeeintrags vernachlässigt werden können
- t_F Zeitpunkt, an dem erstmalig Lauge an der Abdichtung ansteht
- t_G Ende des Betrachtungszeitraums

3.3. Vorliegende Nachweise

Aus den vom BfS im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens vorgelegten Unterlagen [P 195] und [P 255] geht nicht hervor, ob sie aus Sicht des BfS die in Abbildung 3.2-1 aufgeführten (Teil-) Nachweise beinhalten, oder ob es sich bei diesen Unterlagen um nicht mehr aktuelle Nachweisführungen bzw. um Erläuterungen noch zu führender Nachweise handelt:

- In [P 195] Kapitel 6 wird angegeben, dass dieses Kapitel eine exemplarische Nachweisführung (für die Abdichtung in der Nördlichen Verbindungsstrecke 15YKA26R001 auf der 3. Sohle zwischen Lager B und Lager C) beinhaltet. Die Bedeutung der „exemplarischen Nachweisführung“ bleibt unklar. U. E. bestehen drei Interpretationsmöglichkeiten:
 - Die Nachweisführung in [P 195] dient als beispielhafte Erläuterung, wie die (zu einem späteren Zeitpunkt vorzulegenden) Nachweise geführt werden sollen.
 - Die Nachweisführung in [P 195] stellt den Nachweis für diese Abdichtung dar. An ihr ist erkennbar, wie die (zu einem späteren Zeitpunkt vorzulegenden) Nachweise für die übrigen Abdichtungen geführt werden sollen.
 - Die Nachweisführung in [P 195] stellt den Nachweis für diese Abdichtung dar. Aufgrund des standortunabhängigen Charakters der Nachweisführung kann dieser Nachweis auf alle übrigen Abdichtungen aus Salzbeton übertragen werden. Die Vorlage zusätzlicher Nachweise für die übrigen Abdichtungen ist nicht mehr erforderlich.

³³ Die Zeitpunkte t_E und t_F trennen Zeiträume, in denen unterschiedliche FEP wirken. Sofern weitere zeitlich begrenzte relevante FEP auftreten, sind ggf. weitere Zeitpunkte zu definieren.

Aufgrund der Ausführungen in [I 366] gehen wir von der ersten Interpretation aus.

- In [I 366] wird angegeben, dass im Rahmen des In-situ-Versuchs Materialparameter gemessen werden sollen und mit diesen dann die rechnerischen Nachweise geführt werden sollen. Dies impliziert, dass die bislang vorliegenden Rechnungen (in [P 195] und [P 255]) keine Nachweise darstellen können.
- In [P 195] wird gefordert und vorausgesetzt, dass der Wert 10^{-18} m^2 für die hydraulische Permeabilität lokal einzuhalten ist. Dies entspricht jedoch nicht mehr dem Vorgehen in [I 366] und [P 298], nach denen die querschnittsintegrierte Permeabilität begrenzt wird. Die Unterlage [P 195] ist somit nicht mehr aktuell. Vom BfS sollte eindeutig dargelegt werden, welche Teile der Unterlage [P 195] noch gültig sind und welche nicht.
- Es ist unklar, ob der Nachweis der ausreichend geringen Werkstoffpermeabilität noch vorgelegt werden soll (wie in [P 195] auf S. 46 angekündigt) oder ob [G 296] i. V. m. [P 192] vom BfS als Nachweis angesehen wird. Letzteres wäre inkonsistent mit den Angaben in [P 195], wo auf S. 46 auch auf [P 192] verwiesen wird, aber „genauere Auswertungen“ zur Ermittlung der Permeabilität für erforderlich angesehen werden.

Aus der Unterlagen [G 296] geht nicht eindeutig hervor, ob die dort in Abschnitt 5.2 geforderten Eignungsprüfungen als erbracht angesehen werden (und wenn ja, durch welche Unterlage), oder ob sie noch zu erbringen sind.

Wir gehen deshalb davon aus, dass mit den Unterlagen [P 195], [P 255] und [I 366] keine Nachweise erbracht werden, sondern dass diese Unterlagen lediglich zur Erläuterung der Methode der später vorzulegenden Nachweise dienen. Vom BfS sollte angegeben werden, wann und in welcher Form die Nachweise erbracht werden sollen.

3.4. Prüffragen

Sobald Unterlagen des BfS vorliegen, in denen die erforderlichen Nachweise geführt werden, sind diese unter Berücksichtigung der folgenden grundsätzlichen Prüffragen zu prüfen:

Prüffragen zur Nachweismethode

- Zerlegung der Nachweisführung in Teilnachweise
 - Ist die Zerlegung des Nachweises in die verschiedenen Teilnachweise dargestellt?
 - Ist die Nachweisführung vollständig, d. h. bilden die Teilnachweise eines Zerlegungsschritts jeweils den übergeordneten (Teil-)Nachweis?
- Zu jedem Teilnachweis
 - Ist das Nachweisziel bzw. die nachzuweisende Aussage des Teilnachweises klar und eindeutig formuliert?
 - Sind die eventuell getroffenen Annahmen und Näherungen klar und eindeutig formuliert?
 - Sind die eventuell getroffenen Annahmen und Näherungen begründet?

Prüffragen zu Modellprognosen

- übergeordnet:
 - Wo und wie ist die Modellprognose in das Schema der Nachweisführung eingeordnet?
 - Ist die primäre Fragestellung an die Modellprognose klar und richtig formuliert?
 - Welche Fragestellung ist formuliert?
 - Ist die Fragestellung aus Sicht des Prüfers richtig und vollständig?
- Sofern die primäre Fragestellung nicht vom Modell beantwortet werden kann:
- Sind die (Ersatz-)Fragestellungen an das Modell verständlich, eindeutig und richtig formuliert?
 - Welche Fragestellungen sind formuliert?
 - Reichen diese Fragestellung aus für die vollständige Abdeckung der primären Fragestellung? (Bspw.: Wird eine eigentlich notwendige 3D-Prognose ausreichend durch das Ergebnis einer 2D-Modellierung angenähert?)
 - Sind die Ersatz-Fragestellungen aus Sicht des Prüfers richtig und vollständig?
- zum Programm:
 - Entspricht das verwendete Programm dem Stand von Wissenschaft und Technik für die beabsichtigte Anwendung?
 - Ist das Programm qualitätsgesichert, d. h. liegt ein Nachweis vor, dass es fehlerfrei programmiert wurde?
 - Welche FEP werden von diesem Programm erfasst?
 - Wird begründet bzw. ist offensichtlich, dass die vom Programm nicht erfassten FEP vernachlässigt werden können?
- zum Modell:
 - Ist der Modellaufbau sinnvoll? (Z. B. hinsichtlich der Größe des Modellgebiets, der Form der Einheiten/Zusammenfassungen/Vereinfachungen etc..)
 - Ist die räumliche und zeitliche Diskretisierung sinnvoll?
 - Wird die Parameterwahl ausreichend belegt?
 - Werden die Modellrandbedingungen sinnvoll gewählt?
- zu den Modellläufen:
 - Erfolgte eine Qualitätssicherung der Eingabedaten?
 - Wurden alle nötigen Rechen- bzw. Betrachtungsfälle/Szenarien abgedeckt?
 - Ist der gewählte Betrachtungszeitraum sinnvoll bzw. ausreichend?

- zu den Modellergebnissen:
 - Wurden die Zielgrößen der Berechnung sinnvoll gewählt?
 - Sind die Bewertungskriterien sinnvoll und ausreichend?
 - Bestätigen die Modellergebnisse die für den Nachweis erforderliche Aussage?
 - Sind die Modellergebnisse plausibel (Phase 1 der Bewertung) bzw. richtig (Phase 2 der Bewertung)?

Prüffragen zu Messungen

- übergeordnet:
 - Wo und wie ist die Messung in das Schema der Nachweisführung eingeordnet?
 - Wurden die Fragestellung an die Messung klar und richtig formuliert?
 - Welche Fragestellung ist formuliert?
 - Ist die Fragestellung aus Sicht des Prüfers richtig und vollständig?
 - Ist die vorgesehene Messung sinnvoll bzw. ausreichend zur Beantwortung der Fragestellung?
 - Ist der Messzeitraum sinnvoll und ausreichend?
- zur Messtechnik:
 - Entsprechen die Messungen dem Stand von Wissenschaft und Technik?
 - Werden alle relevanten Einflüsse erfasst bzw. berücksichtigt?
 - Erfolgte eine ausreichende Qualitätssicherung zur Messtechnik (bzgl. Eichung/Kalibrierung/Wartung)?
- zum Versuch:
 - Ist der gewählte Versuchsaufbau sinnvoll?
 - Wurde der Versuch korrekt durchgeführt (von der Vorbereitung bis zur Dokumentation)?
- zu den Versuchsergebnissen
 - Wurden alle Ergebnisse vollständig und in nachvollziehbarer Form vorgelegt?
 - Ist die Versuchsauswertung sachlich korrekt und nachvollziehbar?
 - Sind die Ergebnisse plausibel?
 - Werden die Ergebnisse richtig interpretiert?
 - Beantworten die Ergebnisse die Fragestellung vollständig?
 - Ist die Antwort positiv (d. h. liefern die Messungen den gewünschten Nachweis)?

3.5. Sonstige Bewertungen

In [P 195] wird angegeben, dass - um stirnseitigen Rissen und chemischen Angriffen Rechnung zu tragen - bei der Nachweisführung zur Wirksamkeit der Abdichtungen nur von 80 % ihrer Länge Kredit genommen wird. Dies entspricht jedoch nicht den Ansätzen in den vorliegenden LSA:

- In [P 278] (Tab. 26, S. 170) werden für die modellierten Abdichtungen die folgenden Längen angesetzt:
 - 26 m für die Abdichtung zum West/Süd-Feld (Salzbeton),
 - 150 m Abdichtung zum Ostfeld (2. Sohle, Salzbeton),
 - 110 m Abdichtung zum Ostfeld (4. Sohle, Magnesiabeton).

Bei den Abdichtungen aus Salzbeton entspricht dies 100 % der jeweils vorgesehenen Abdichtungslänge.

- In [P 277] wird bei den deterministischen Berechnungen (Referenzfälle) ebenfalls 100 % der vorgesehenen Abdichtungslängen angesetzt. Bei der probabilistischen Modellierung wird eine Normalverteilung der Länge zwischen 80 % bis 150 % angesetzt (S. C-28). Das bedeutet, dass auch bei den probabilistischen Modellierungen die Abdichtungslängen stets über 80 % liegen. Mit den in [P 277] gewählten Parametern liegt das 50%-Perzentil der Verteilung sogar bei 106 %.

4. LAUGENDRUCK AUF DIE ABDICHTUNGEN

4.1. Abschätzung des Laugendrucks in der Restgrube

4.1.1. Hohraumbilanz

Als Basis für Abschätzungen zum Flutungsverlauf und zum Laugendruck in der Restgrube des ERAM wurde eine detaillierte teufenabhängige Hohraumbilanz der Grubenbaue Bartensleben und Marie erstellt. Grundlage dieser Hohraumbilanz ist das ERAM-HIS [DBE 06] mit Stand vom 08.08.2006, das den Grubenbaubestand am 30.06.2002 sowie die zugehörigen Daten der Verfüllplanung beinhaltet.

Aus dem uns im pdf-Dateiformat vorliegenden ERAM-HIS wurden zu jedem der dort verzeichneten 3.409 Grubenhohlräume insbesondere folgende für die Hohraumbilanz relevante Daten entnommen:

- Sohlenniveau in [m NN],
- Höhe des Hohlraums,
- Volumen des aufgefahrenen Gesamthohlraums,
- Volumen des Altversatzes,
- zusätzliches Verfüllvolumen gemäß Verfüllplanung,
- Resthohlraumvolumen und
- Zuordnung des Hohlraums zu den verschiedenen Grubenfeldern.

Fehlende bzw. nicht plausible Angaben in Einzeldatenblättern des ERAM-HIS wurden ausgeglichen. Hohlräume, die im ERAM-HIS als Zusammenfassung mehrerer Einzelhohlräume angegeben sind, wurden i. d. R. in diese Einzelhohlräume aufgesplittet.

Unter Berücksichtigung dieser Daten wurde im Rahmen der Bilanzierung für jeden Einzelhohlraum die Größe ‚Flutungshohlraum‘ berechnet, die sich aus dem o. g. Wert ‚Resthohlraum‘ (= offenes Hohlraumvolumen nach Abschluss der vorgesehenen Verfüllmaßnahmen) und dem Porenvolumen des jeweils vorhandenen Altversatzes zusammensetzt, das mit 40 Vol.-% angenommen wurde.

Die Zuordnung zu den Feldesteilen erfolgt im ERAM-HIS nach der markscheiderischen Feldeinteilung und zusätzlich auch nach der Einteilung des Grubengebäudes, die für die Langzeitsicherheitsanalyse (LSA) vorgenommen wurde. Diese Zuordnungen unterscheiden sich gemäß ERAM-HIS insbesondere durch den für die LSA zusätzlich ausgewiesenen Feldesteil ‚Zentralteil‘, der im Zentrum des Grubengebäudes Bartensleben gelegene Teile des Nordfelds und des Südostfelds umfasst. Unserer Hohraumbilanzierung liegt die letztgenannte für die LSA vorgenommene Einteilung zugrunde, die auch in den tabellarischen Zusammenstellungen des ERAM-HIS und auf den Einzeldatenblättern des ERAM-HIS in der Rubrik ‚Angaben zur Langzeitsicherheitsanalyse / (Teil-)Bereiche‘ enthalten ist. Hohlräume, die im ERAM-HIS keinen Grubenfeldern zugerechnet werden (feldübergreifende Grubenteilbereiche („k. A.“) sowie Schächte und Füllorte („Sh“)), wurden den Feldesteilen von uns nach i. W. hydraulischen Kriterien zugeordnet.

Unsere Hohlräumbilanzierung erfolgte mit der Auflösung von einem Teufenmeter. In der Tabelle 4-1 sind die resultierenden Hohlraumvolumina (Flutungshohlraum) für das Südfeld, das Westfeld, das Ostfeld, die Restgrube Bartensleben (einschließlich der Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil) sowie das Grubengebäude Marie im Vergleich zu den jeweiligen in der LSA [P 278] verwendeten Daten zusammengestellt.

Tabelle 4-1: Flutungshohlraum in [m³] (nach eigener Hohlräumbilanzierung und Angaben aus [P 278])

Bereiche	Flutungshohlraum BS	Flutungshohlraum gemäß [P 278]
Südfeld Bartensleben	462.467	489.318
Westfeld Bartensleben	26.048	25.994
Ostfeld Bartensleben	86.886	86.886
Restgrube Bartensleben*	993.112	966.313
Grube Bartensleben gesamt	1.568.513	1.568.511
Grube Marie	919.007	919.009

* einschließlich Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil

Diese Gegenüberstellung zeigt hinsichtlich der Gesamtvolumina der Grubengebäude Bartensleben und Marie sowie für das West- und das Ostfeld eine gute bis exakte Übereinstimmung. Nennenswerte Abweichungen ergeben sich nur bezüglich der Zuordnung eines Flutungshohlraumvolumens von ca. 26.800 m³ zu den Feldesteilen Südfeld (in [P 278]) bzw. der Restgrube Bartensleben (gemäß der von uns vorgenommenen und auf den Angaben des ERAM-HIS basierenden Zuordnung). Die Ursache für diese Abweichungen ist uns gegenwärtig unbekannt, da wir die Grundlage der Angaben in [P 278] nicht kennen.

Aus unserer Hohlräumbilanzierung resultieren die in Abbildung 4-1 dargestellten teufenabhängigen Verteilungen für die Restgrube Bartensleben (Nordfeld, Zentralteil und Südostfeld) ohne und mit Berücksichtigung des Flutungsvolumens des Grubengebäudes Marie. Die entsprechenden summarischen Verteilungen sind Abbildung 4-2 zu entnehmen.

Oberhalb des Niveaus -175 mNN existiert lediglich der vernachlässigbare Flutungshohlraum der Schachtröhren sowie schachtnaher Grubenbaue, so dass dieser Bereich in der Hohlraumverteilung nicht berücksichtigt wurde. Unterhalb des Niveaus -387 mNN ist für die Restgrube Bartensleben mit Ausnahme eines Rolllochs im Zentralteil, dessen Sohle sich auf -410 mNN befindet, auf der Grundlage des ERAM-HIS kein Flutungshohlraum zu verzeichnen. Das Sohlniveau der untersten dort für die Grube Marie angegebenen Hohlräume liegt im Bereich von -372 m NN.

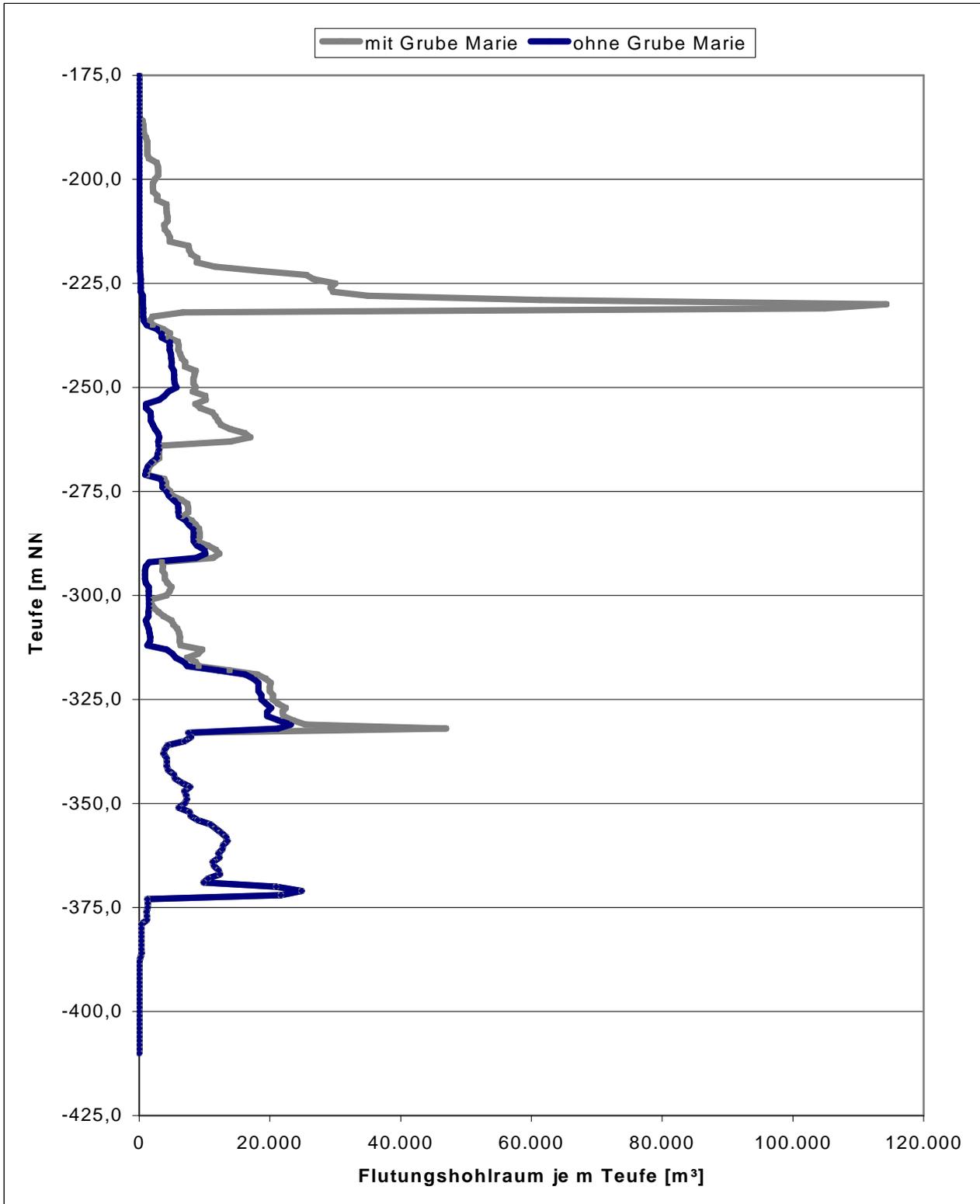


Abbildung 4-1: Teufenabhängige Hohlraumverteilung der Restgrube Bartensleben ohne und mit Grube Marie, Auflösung 1 Höhenmeter

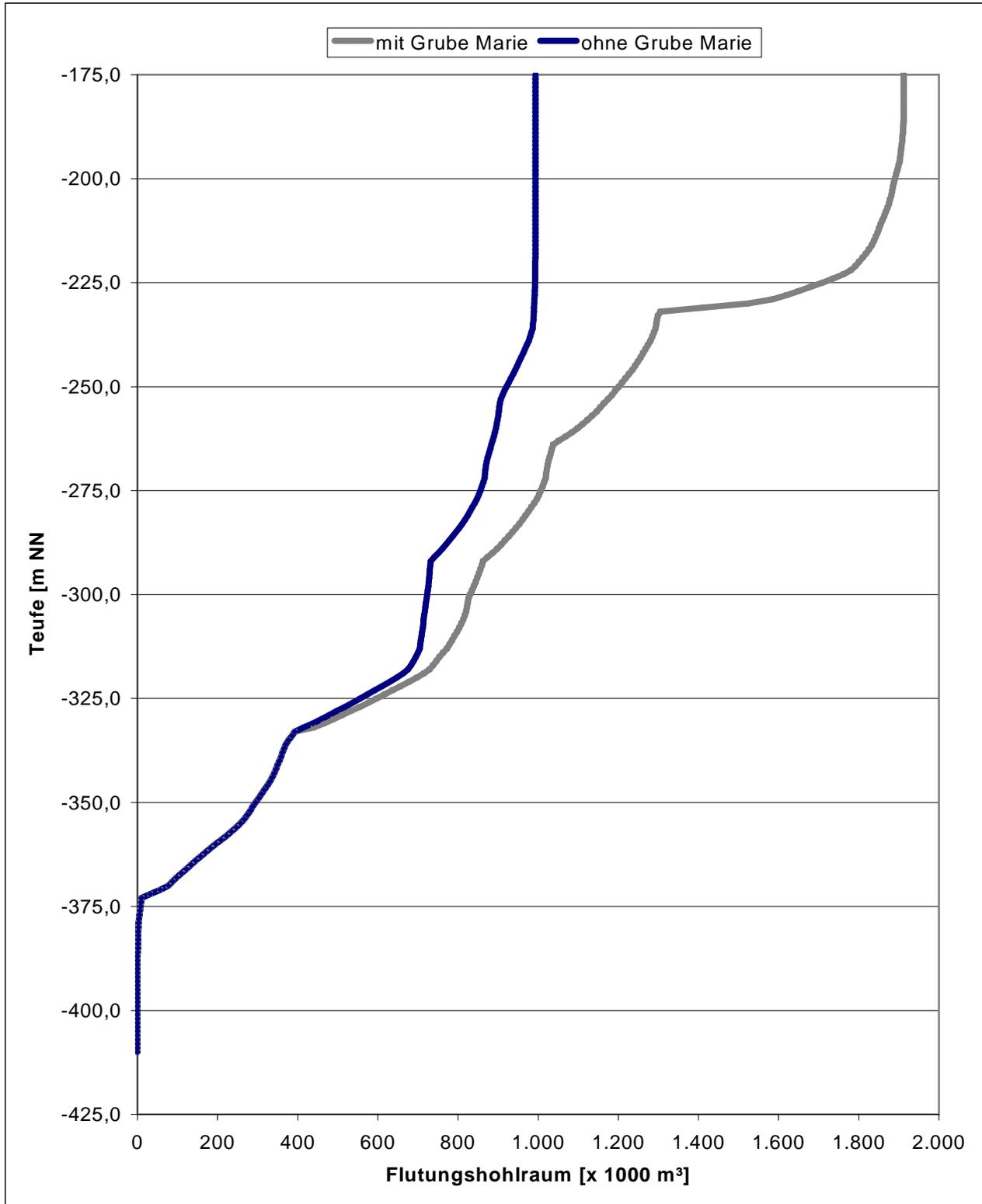


Abbildung 4-2: Summarische Hohlraumverteilung der Restgrube Bartensleben ohne und mit Grube Marie

4.1.2. Flutungsverlauf

Um den Flutungsverlauf im ERAM hinsichtlich Zeitdauer und Druckentwicklung einschätzen zu können, wurde ein Modell erstellt, das – ausgehend von der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen teufenabhängigen Hohlraumbilanz – eine Berechnung der zeitabhängigen Entwicklung von Flutungswasserstand und Laugendruck ermöglicht.

In diesem Modell können die Flutungsrate (konstant oder dynamisch, Dynamisierung ist wählbar), die Teufenlage der zu betrachtenden Abdichtung, die Bandbreite des einzubeziehenden (Gesamt-) Druckbereichs sowie weitere Randbedingungen z. B. zur Laugendichte und zum Gasvolumen, vorgegeben werden.

Im gegenwärtigen Bearbeitungszustand werden in dem Modell die Konvergenz und die Gasbildung in der Restgrube vernachlässigt, so dass das Modell die Druckentwicklung nur näherungsweise berechnen kann. Die Kompression des anfänglich in der Grube befindlichen Luftvolumens wird dagegen berücksichtigt.

Es wurden folgende Rechenläufe für die unterste Abdichtung auf der -372 mNN-Sohle durchgeführt:

- Lauf 1: Die Flutungsrate steigt von 12,5 m³/a bis auf maximal 600 m³/a an. Dabei wird angesetzt, dass sich die Flutungsrate alle 100 Jahre verdoppelt, bis die maximale Flutungsrate erreicht ist, und dann auf diesem Maximalniveau konstant bleibt. Das Maximum des Gesamtdrucks (Summe aus Gasdruck und Laugendruck) wird mit 6 MPa angesetzt.
- Lauf 2: Dieser Lauf unterscheidet sich von Lauf 1 nur durch die auf 6.000 m³/a angehobene maximale Flutungsrate.
- Lauf 3: In diesem Fall wird die Flutungsrate als konstant angesetzt und mit einem Wert von 260 m³/a berücksichtigt. Das Maximum des Gesamtdrucks ist wird auch hier mit 6 MPa gewählt.
- Lauf 4: Dieser Lauf entspricht Lauf 3 mit Ausnahme der Flutungsrate, der ein Wert von 600 m³/a zugewiesen wurde.

Die Läufe 1 und 2 entsprechen dem Referenzzulauf bzw. dem Zulauf der „kritischen Variante“ in [BS 09]. Lauf 3 entspricht dem Ansatz in [P 255]. Die Rechenläufe wurden jeweils für die Restgrube Bartensleben sowie zusätzlich für den Fall durchgeführt, dass eine hydraulische Verbindung zwischen der Restgrube Bartensleben und der Grube Marie besteht. Das Höhenniveau dieser hydraulischen Verbindung wird mit -332 m NN angesetzt.

In den nachfolgenden Tabellen 4-2 und 4-3 sind als Ergebnis der vier Rechenläufe jeweils die Zeitpunkte (Jahre nach Flutungsbeginn) angegeben, an denen an einer auf der -372 m NN-Sohle errichteten Abdichtung ein ganzzahliger Wert des Gesamtdrucks zwischen 1 und 6 MPa erreicht wird.

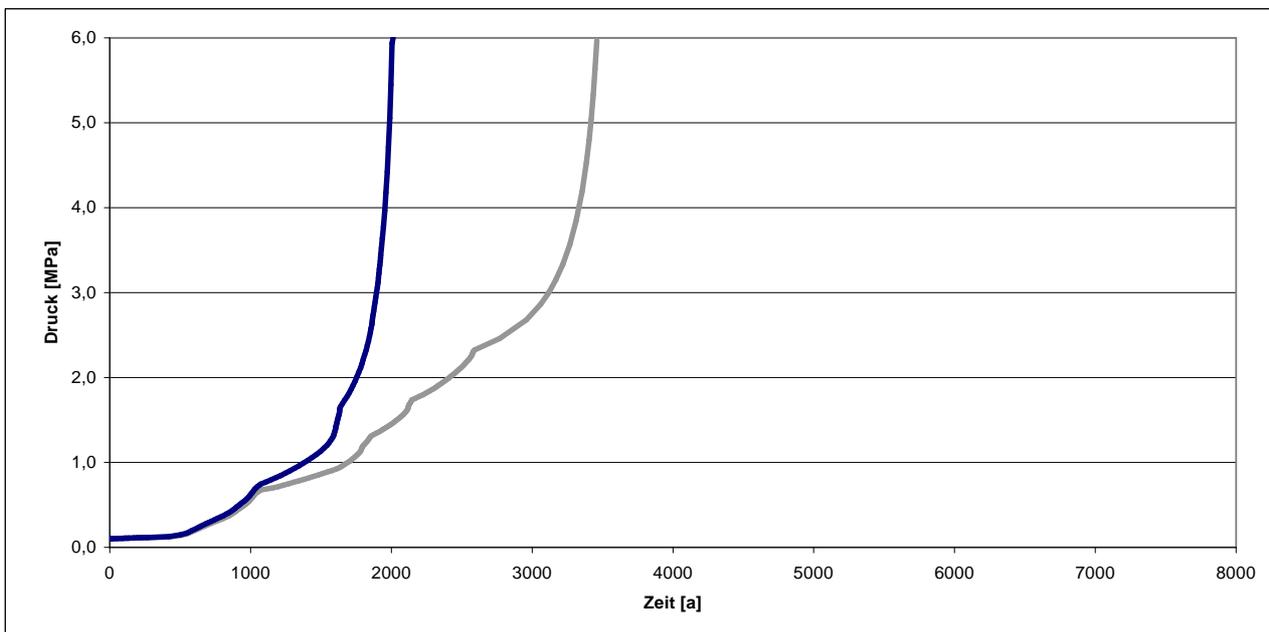
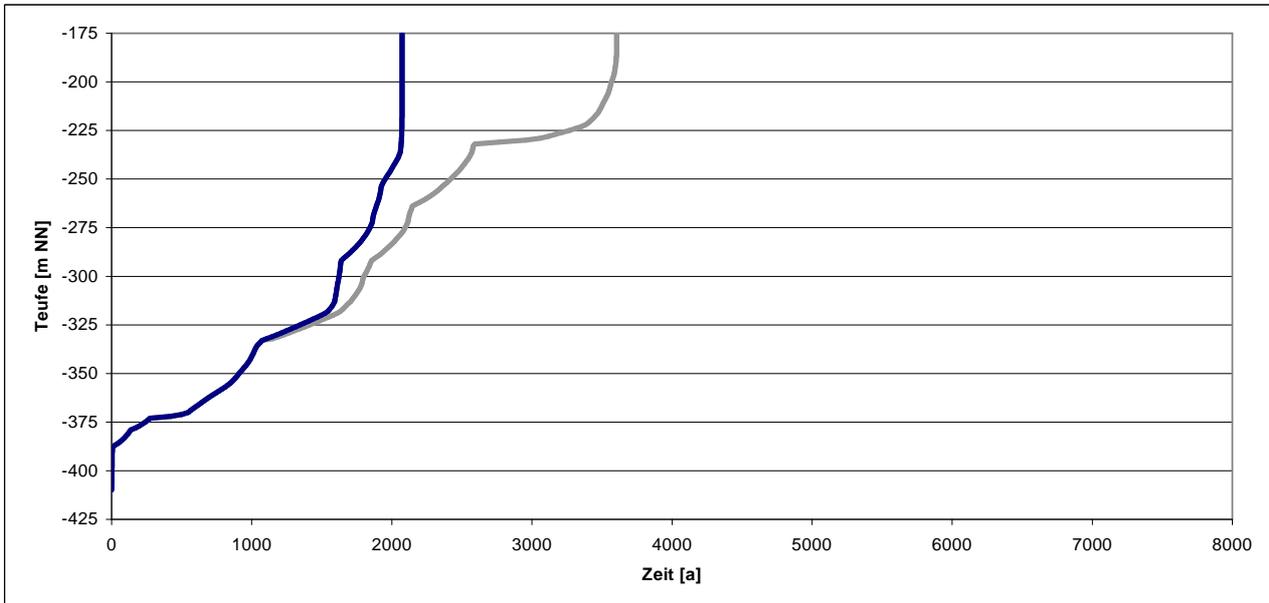
Tabelle 4-2: Zeitabhängige Entwicklung des Gesamtdrucks für eine Abdichtung auf der -372 m NN-Sohle Bartensleben; ohne Berücksichtigung der Grube Marie (,BoM'; Angaben in [a])

Zuflussvariante	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
12,5 m ³ /a → 600 m ³ /a	1.384	1.754	1.895	1.955	1.987	2.014
12,5 m ³ /a → 6.000 m ³ /a	841	884	897	903	906	908
260 m ³ /a	2.128	3.010	3.366	3.512	3.596	3.664
600 m ³ /a	998	1.351	1.485	1.543	1.574	1.596

Tabelle 4-3: Zeitabhängige Entwicklung des Gesamtdrucks für eine Abdichtung auf der -372 m NN-Sohle Bartensleben; mit Berücksichtigung der Grube Marie (,BmM'; Angaben in [a])

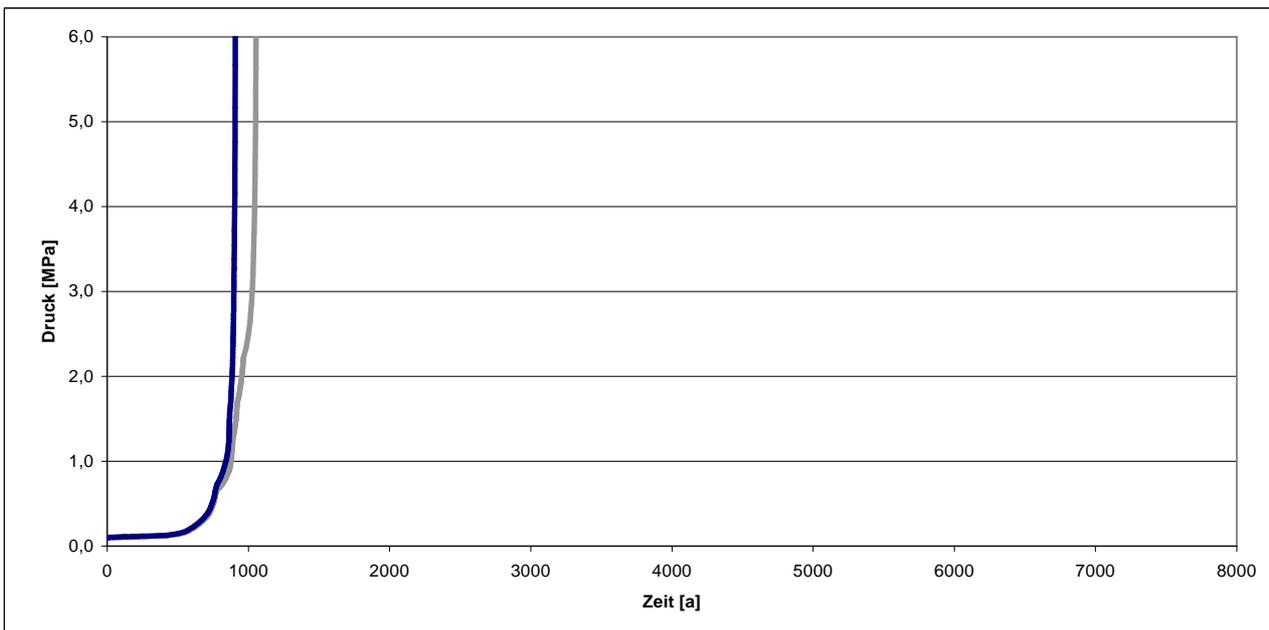
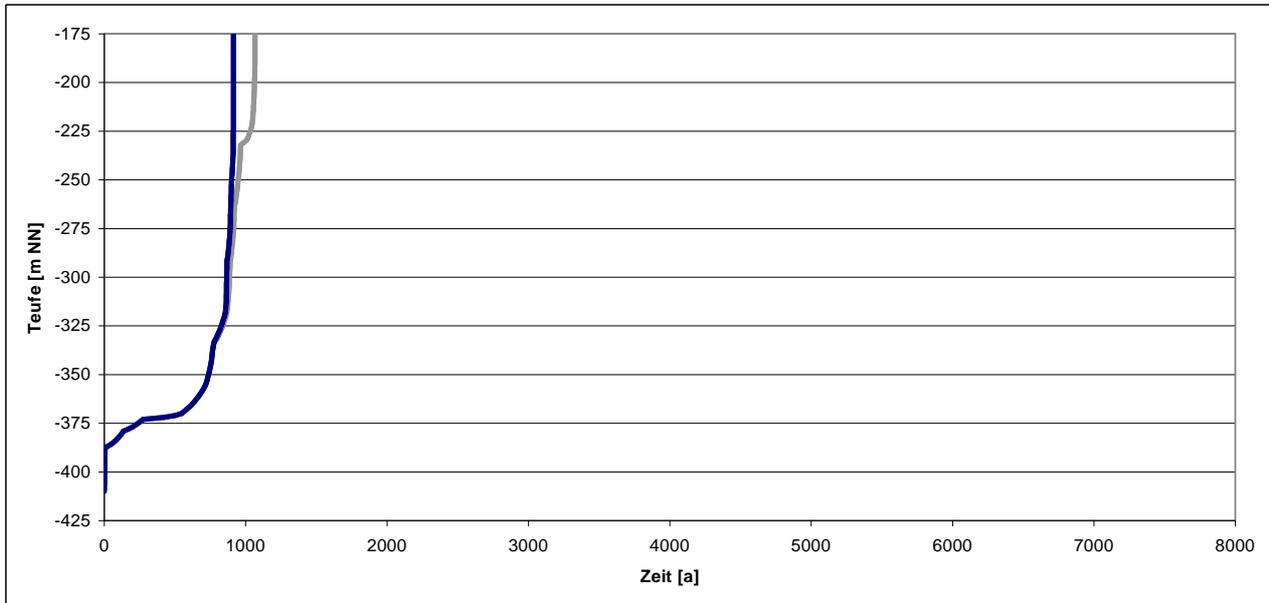
Zuflussvariante	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
12,5 m ³ /a → 600 m ³ /a	1.689	2.412	3.118	3.331	3.417	3.473
12,5 m ³ /a → 6.000 m ³ /a	877	953	1.027	1.044	1.051	1.055
260 m ³ /a	2.869	4.508	6.138	6.677	6.888	7.021
600 m ³ /a	1.288	2.008	2.711	2.920	3.003	3.055

In den Abbildungen 4-3 bis 4-6 sind für diese Rechenläufe (ohne und mit Berücksichtigung der Grube Marie) jeweils die zeitabhängige Entwicklung des Flutungsniveaus sowie die zeitabhängige Entwicklung des Gesamtdrucks (Gasdruck und Fluiddruck) für eine auf der -372 m NN-Sohle im Grubengebäude Bartensleben positionierte Abdichtung dargestellt.



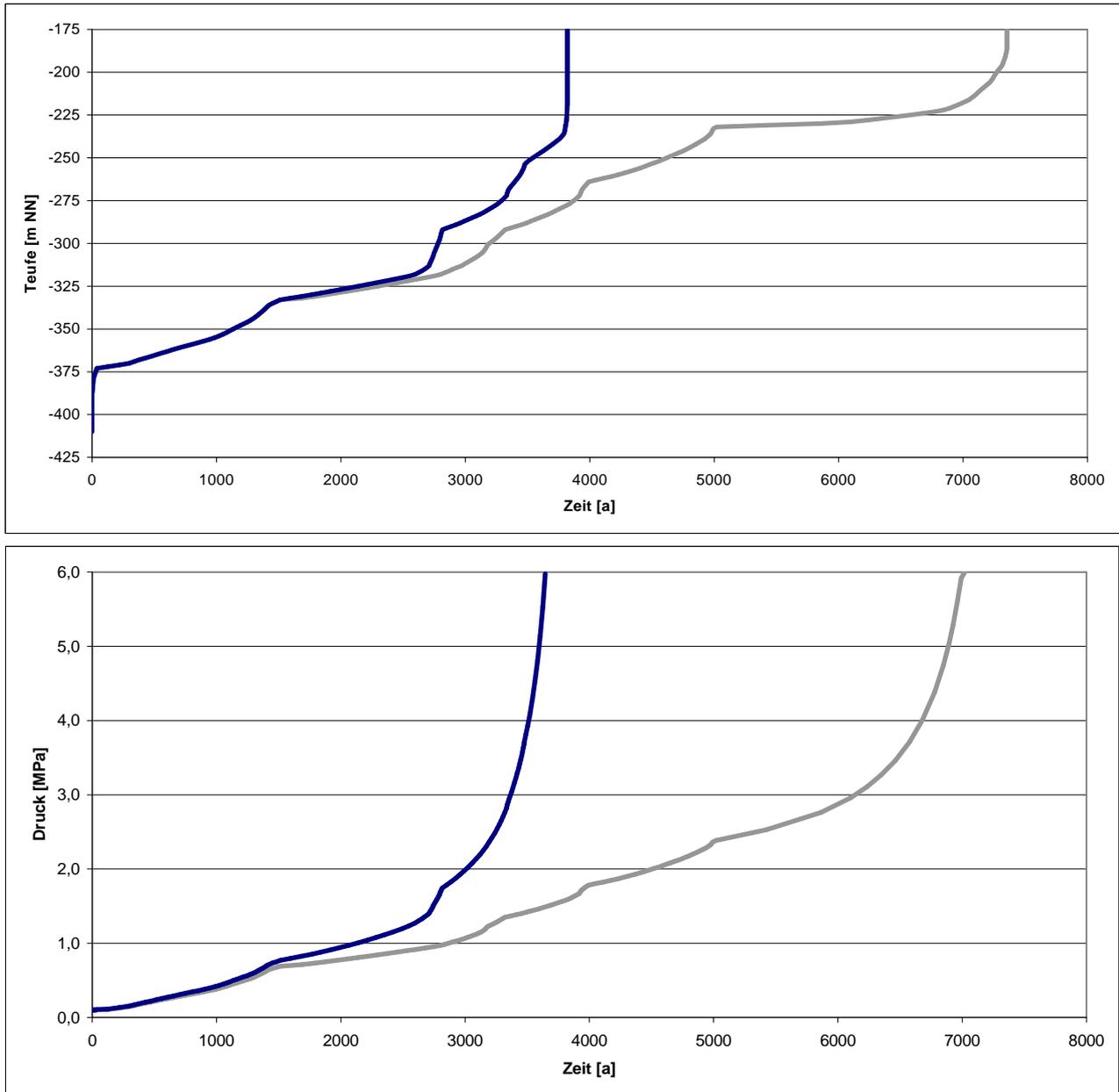
Flutungsrate: 12,5 m³/a bis 600 m³/a

Abbildung 4-3: Zeitabhängige Entwicklung des Flutungsniveaus und des auf eine Abdichtung im Niveau -372 m NN restgrubenseitig einwirkenden Gesamtdrucks aus Gas- und Laugendruck (dunkel: Restgrube Bartensleben, hell: Restgrube und Grube Marie)



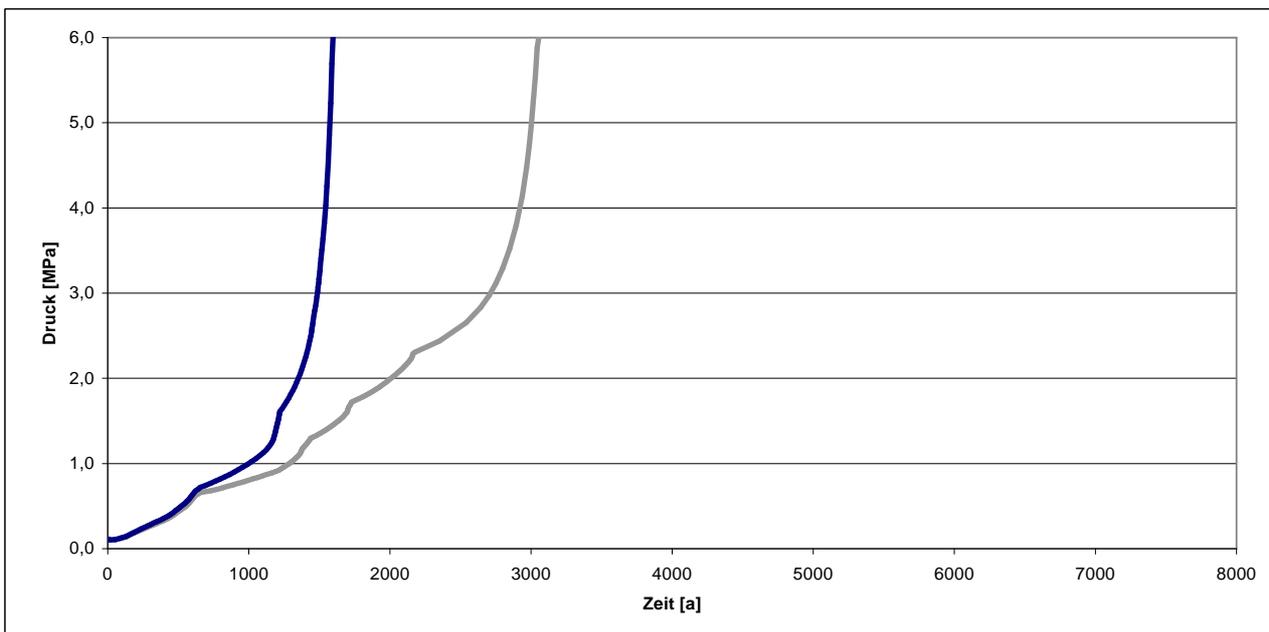
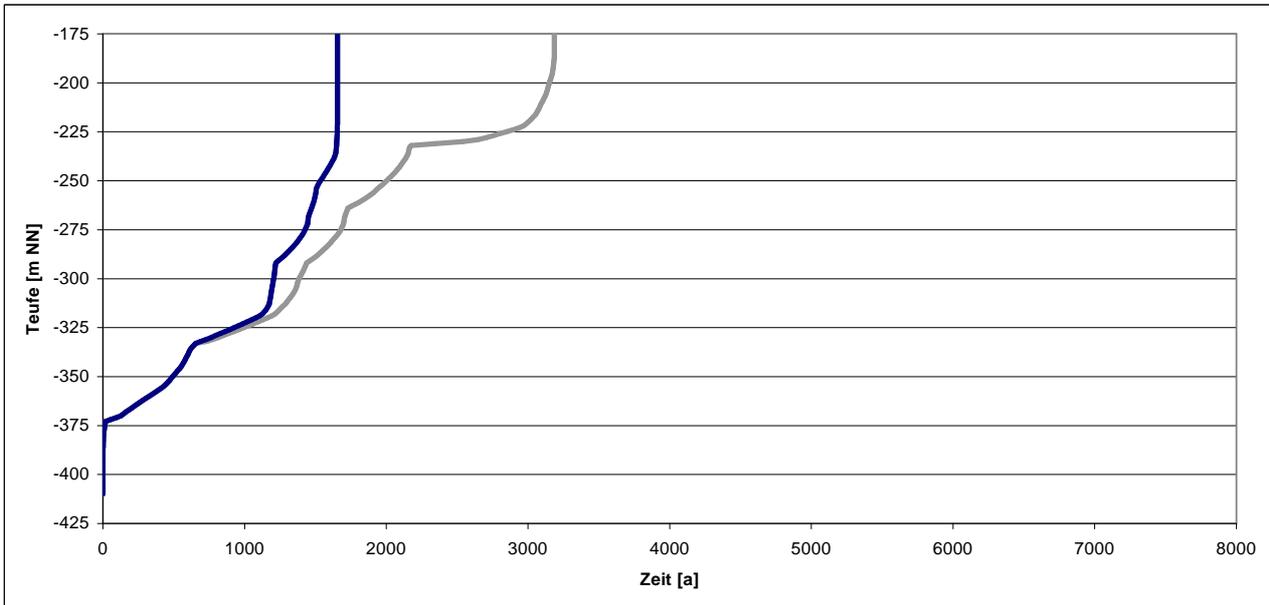
Flutungsrate: 12,5 m³/a bis 6.000 m³/a

Abbildung 4-4: Zeitabhängige Entwicklung des Flutungsniveaus und des auf eine Abdichtung im Niveau -372 m NN restgrubenseitig einwirkenden Gesamtdrucks aus Gas- und Laugendruck (dunkel: Restgrube Bartensleben, hell: Restgrube und Grube Marie)



Flutungsrate: 260 m³/a

Abbildung 4-5: Zeitabhängige Entwicklung des Flutungsniveaus und des auf eine Abdichtung im Niveau -372 m NN restgrubenseitig einwirkenden Gesamtdrucks aus Gas- und Laugendruck (dunkel: Restgrube Bartensleben, hell: Restgrube und Grube Marie)



Flutungsrate: 600 m³/a

Abbildung4-6: Zeitabhängige Entwicklung des Flutungsniveaus und des auf eine Abdichtung im Niveau -372 m NN restgrubenseitig einwirkenden Gesamtdrucks aus Gas- und Laugendruck (dunkel: Restgrube Bartensleben, hell: Restgrube und Grube Marie)

4.2. Vergleich mit den Angaben in den Planunterlagen

In den Abbildungen 4-7 und 4-8 sind die in [P 195] und [P 255] abgeschätzten Flutungsverläufe wiedergegeben.

In [P 195] werden für die Langzeitphase 4 Szenarien („Berechnungsfälle“ BF) betrachtet, von denen die Szenarien BF 3 und BF 4 eine Flutung des ERAM innerhalb von 2.500 Jahren beinhalten. Diese Zeitdauer wird damit begründet, dass sie „im Langzeitsicherheitsnachweis“ (es wird nicht angegeben, im welchem) als weitaus realistischer angesehen wird als eine Sofortflutung ([P 195] S. 19 f). Im Szenario BF 3 wird unterstellt, dass die Flutung nach 100 Jahren einsetzt und dass sich der Fluiddruck mit der Zeit linear erhöht, bis er den Wert 6 MPa erreicht hat. Im Szenario BF 4 setzt die Flutung nach 2.400 Jahren ein und der Fluiddruck erhöht sich innerhalb von 100 Jahren auf 6 MPa, wobei auch hier ein linearer Anstieg unterstellt wird. Damit ergeben sich die in Tabelle 4-4 angegebenen Flutungszeiten.

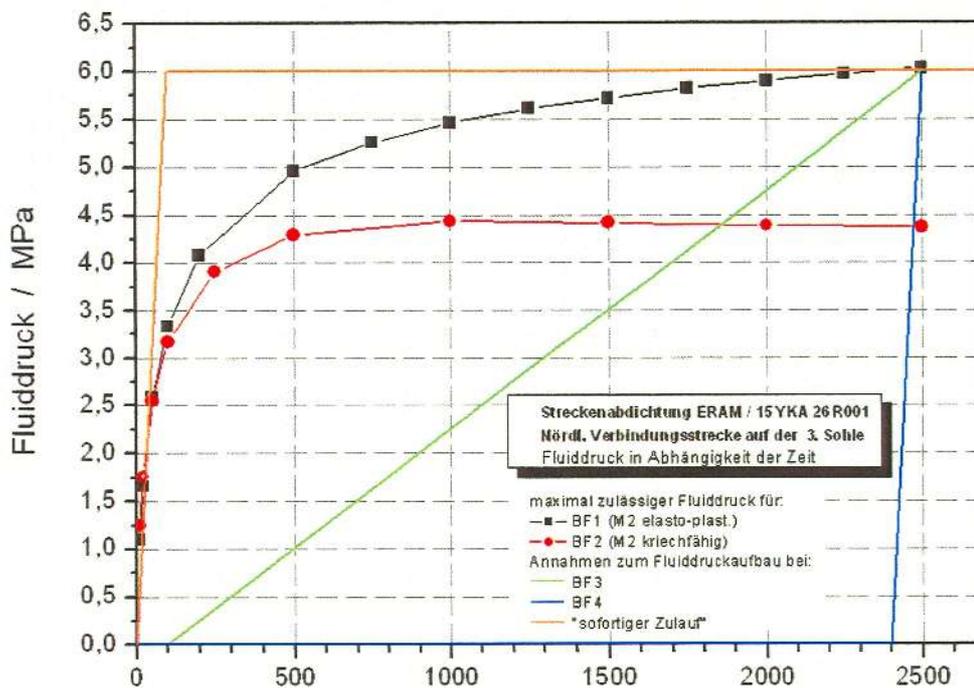


Abbildung 4-7: Zeitabhängige Entwicklung (in Jahren) des Fluiddruckaufbaus (grüne und blaue Kurve) aus [P 195] (dort Abbildung 6.5-12).

Tabelle 4-4: Zeitabhängige Entwicklung des Fluiddrucks für eine Abdichtung auf der -372 m NN-Sohle Bartensleben nach [P 195] (Angaben in [a])

Zuflussvariante	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
BF 3	500	900	1.300	1.700	2.100	2.500
BF 4	2.417	2.433	2.450	2.467	2.483	2.500

In [P 255] wird der Anstieg des Fluiddrucks unter den folgenden Annahmen berechnet³⁴:

- Die Grube wird mit IP 21-Lauge geflutet. Eine Hohlräume Neubildung durch (Um-)Löseprozesse wird ausgeschlossen.
- Der Lösungszutritt erfolgt in der Grube Bartensleben und ein Übertritt von Lösung in die Grube Marie wird ausgeschlossen.
- Es wird nur der offene (d. h. der nicht versetzte) Hohlraum der Restgrube Bartensleben berücksichtigt. Porenhohlraum im Altversatz wird vernachlässigt. Unter Verweis auf [P 220] werden die folgenden Hohlraumdaten angegeben:
 - 4. Sohle bis unter 3. Sohle: 284.429 m³
 - 3. Sohle bis unter 2. Sohle: 322.781 m³
 - 2. Sohle bis unter 1. Sohle: 123.317 m³
 - 1. Sohle und darüber: 78.622 m³

Es wird angenommen, dass der Hohlraum in jeder dieser vier Stufen gleichmäßig über die Teufe verteilt ist.

- Die Flutung der Grube erfolgt gleichmäßig mit 260 m³/a.
- Der Grubenhohlraum verringert sich durch Konvergenz mit einer konstanten Konvergenzrate von $4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ bzw. $1 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$. Dies impliziert, dass der Stützdruck durch Lauge und Gas vernachlässigt wird und dass die Konvergenzrate unabhängig von der Teufe ist.
- Der Gasdruck wird vernachlässigt.

Die Rate des Lösungszutritts und die Konvergenzraten werden mit einem Verweis auf [P 189] begründet. Für die Abdichtungen auf der 4. Sohle (-372 mNN) ergeben sich die in Tabelle 4-5 angegebenen Werte (von uns graphisch aus Abbildung 4-8 ermittelt). Zum Vergleich sind unsere Ergebnisse für diese Zutrittsvariante ebenfalls angegeben.

Tabelle 4-5: Zeitabhängige Entwicklung des Fluiddrucks für eine Abdichtung auf der -372 m NN-Sohle Bartensleben nach [P 195] (Angaben in [a]). Unsere Ergebnisse für diese Zutrittsvariante sind zum Vergleich kursiv dargestellt.

Konvergenzrate	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
$4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$	2.250	2.530	2.590	2.650	2.710	2.770
$1 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$	1.830	2.270	2.310	2.350	2.390	2.430
<i>Zuflussvariante</i>	<i>1 MPa</i>	<i>2 MPa</i>	<i>3 MPa</i>	<i>4 MPa</i>	<i>5 MPa</i>	<i>6 MPa</i>
<i>260 m³/a</i>	<i>2.128</i>	<i>3.010</i>	<i>3.366</i>	<i>3.512</i>	<i>3.596</i>	<i>3.664</i>

³⁴ Manche dieser Annahmen werden in [P 255] nicht explizit benannt, sie lassen sich aber aus den Ergebnissen ableiten.

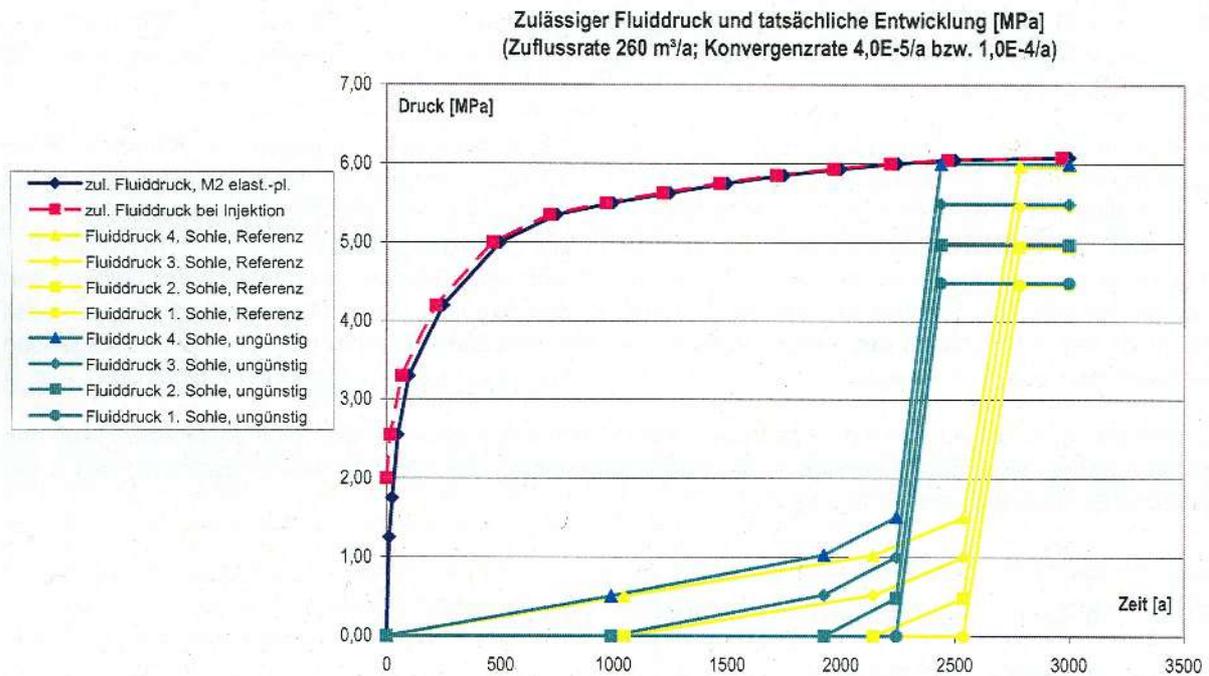


Abbildung4-8: Zeitabhängige Entwicklung des Fluiddruckaufbaus (blaue und gelbe Kurven) aus [P 255] (dort Abbildung 58).

Die Unterschiede sind zum einen darauf zurückzuführen, dass wir die Konvergenz nicht berücksichtigen. Diese macht sich insbesondere bei den höheren Drücken deutlich bemerkbar. Weiterhin zeigen sich deutliche Unterschiede in der von uns verwendeten Hohraumbilanz und den Annahmen in [P 255] (s. Tabelle 4-6). In einer späteren Bearbeitungsphase sollte die Ursache für die Differenzen in der Hohraumbilanz geklärt werden und es sollte die Konvergenz berücksichtigt werden.

Tabelle 4-6: Bilanz des unversetzten Hohraums in der Restgrube Bartensleben nach [P 255] und nach ERAM-HIS.

Teufenbereich	Hohlraum	
	nach [P 255]	nach ERAM-HIS (von uns verwendet)
4. Sohle bis unter 3. Sohle	284.429 m ³	378.184 m ³
3. Sohle bis unter 2. Sohle	322.781 m ³	262.525 m ³
2. Sohle bis unter 1. Sohle	123.317 m ³	124.051 m ³
1. Sohle und darüber	78.622 m ³	62.817 m ³
Summe	809.149 m ³	827.577 m ³

5. GASDRUCK AUF DIE ABDICHTUNGEN

5.1. Abschätzung des Gasdrucks in den ELB

In den abgedichteten Einlagerungsbereichen kommt es zu einem Druckaufbau, der folgende Ursachen hat:

- (1) Die in den Einlagerungsbereichen eingelagerten Metalle und organischen Stoffe können u. a. mit Wasser reagieren und dabei Gase freisetzen.
- (2) Durch die Konvergenz wird das Hohlraumvolumen verringert, so dass die ursprünglich in den Einlagerungsbereichen enthaltene Luft sowie die freigesetzten Gase zusammengepresst werden.
- (3) Sofern in die Einlagerungsbereiche Wässer bzw. Laugen eindringen, verringern diese das für die Gasphase zur Verfügung stehende Hohlraumvolumen und erhöhen damit den Gasdruck.

In diesem Kapitel wird der sich in den Einlagerungsbereichen aufbauende Gasdruck aufgrund der Prozesse (1) und (2) abgeschätzt. Punkt (3) wird hier aus folgenden Gründen ausgeklammert:

- Ein Zutritt von signifikanten Mengen an Wässern bzw. Laugen direkt, d. h. unter Umströmung der Abdichtungen, in die Einlagerungsbereiche würde das Abdichtungskonzept als Ganzes in Frage stellen. Ein Versagen der Abdichtungen wäre in diesem Fall bedeutungslos, da sie ihre Wirkung verloren hätten.³⁵
- Damit Lauge aus der Restgrube in die Einlagerungsbereiche eindringt, muss die Restgrube (zumindest teilweise) geflutet sein und der Fluiddruck müsste dort höher sein als in den Einlagerungsbereichen. Die hierdurch entstehenden Lastfälle werden durch die Abschätzungen in Kapitel 4 abgedeckt.

Für die Abschätzung wird das in [BS 09] dokumentierte Modell verwendet (siehe dort die Abschnitte 5.1 und 5.2), wobei in diesem Gutachten nur der in den ELB entstehende Gasdruck von Interesse ist und angegeben wird.

Die hier durchgeführten Rechnungen basieren auf dem Referenzfall des Szenarios „bestehender Wasserweg – korrodierende Abdichtungen“ in [BS 09]. Dabei wurden gegenüber diesem Fall die folgenden Parameter geändert:

- Der Parameter Gaseindringdruck wurde für alle Barrieren auf 10 MPa gesetzt, um ein Ausströmen von Gas aus den Einlagerungsbereichen im Modell zu verhindern. Ein Ausströmen von Gas aus den Einlagerungsbereichen verringert den Druck in den Einlagerungsbereichen.
- Der Wasserzutritt in die Grube wurde im Modell auf 0 gesetzt, da eine Erhöhung des Drucks durch eindringende Wässer bzw. Laugen nicht betrachtet werden soll.

³⁵ Der Ausschluss des Zutritts von signifikanten Laugenmengen in die Einlagerungsbereiche ist noch zu prüfen. Das Ergebnis der Prüfung betrifft das ganze Abdichtungskonzept, hat aber keine Auswirkung auf die in diesem Bericht abgeleiteten Anforderungen.

Für die Abschätzung des Gasdrucks relevante Parameter sind:

- die anfängliche Konvergenzrate in den ELB,
- der Konvergenzexponent m , der die Änderung der Konvergenzrate durch den Druckaufbau charakterisiert,
- die Stützporosität des Altversatzes,
- der Anteil der Gasbildner, der tatsächlich zur Gasbildung beiträgt,
- die Gasbildungsrate in den gefluteten Einlagerungsbereichen, d. h. in Lauge (getrennt nach Metallen und Organika),
- der Reduktionsfaktor der Gasbildungsraten für die ungefluteten (trockenen) Einlagerungsbereiche (getrennt nach Metallen und Organika).

Da hier nur ungeflutete (trockene) Einlagerungsbereiche betrachtet werden, wird die Gasbildung in der Rechnung nur durch das Produkt aus der Gasbildungsrate in den gefluteten Einlagerungsbereichen und dem Reduktionsfaktor der Gasbildungsraten für die ungefluteten (trockenen) Einlagerungsbereiche bestimmt.

Konservativ im Hinblick auf einen hohen Gasdruck sind eine hohe Konvergenzrate und eine hohe Gasbildung³⁶. Eine hohe Konvergenzrate wird unterstützt durch eine hohe anfängliche Konvergenzrate, einen niedrigen Konvergenzexponent m und eine niedrige Stützporosität des Altversatzes. Die beiden letzteren Faktoren geben an, wie stark die Konvergenzrate durch Gegendruck (durch Gas bzw. Versatz) verringert wird. Eine hohe Gasbildung wird erreicht durch einen hohen Anteil an Gasbildnern, hohe Gasbildungsraten in Lauge und eine nur geringe (bzw. fehlende) Reduktion der Gasbildungsraten im trockenen Milieu.

In den Tabellen 5-1 und 5-2 sind die hier verwendeten Werte der relevanten Modellparameter wiedergegeben. Sie entsprechen den in [BS 09] verwendeten Parameterwerten. In Tabelle 5-3 sind die berechneten Varianten zusammengestellt.

Die Abbildungen 5-1 bzw. 5-2 zeigen die zeitliche Entwicklung des Gasdrucks in den Einlagerungsbereichen West-/Südfeld und Ostfeld für den Referenzfall (Nr. 1 aus Tabelle 5-3) bzw. für die Variante mit der ungünstigsten Parameterkombination (Nr. 64 aus Tabelle 5-3). In den Tabellen 5-4 und 5-5 sind für alle 64 Varianten die Zeitpunkte angegeben, zu denen der Gasdruck die Werte 1 MPa, 2 MPa, 3 MPa, 4 MPa, 5 MPa und 6 MPa im Süd- und Westfeld bzw. im Ostfeld überschreitet.

- In der Anfangsphase (ca. 1.000 Jahre) ist der Gasdruck weitgehend unabhängig von der Konvergenz. Die Erhöhung des Gasdrucks wird dominiert durch die Umsetzung der Metalle. Das Ostfeld zeigt aufgrund des im Vergleich zur Masse der Metalle kleineren Hohlraums einen schnelleren Anstieg des Gasdrucks als das Süd- und Westfeld. Im ungünstigsten Fall (schnelle

³⁶ Diese Aussage gilt streng nur in der Anfangsphase (bis ca. 10.000 Jahre). Nach diesem Zeitraum sind auch Varianten konstruierbar, bei denen niedrigere (anfängliche) Gasbildungsraten zu (langfristig) höheren Drücken führen, da in diesen Fällen die Konvergenz zwischenzeitlich durch den geringeren Gasegendruck weniger stark gebremst wurde.

Gasbildung) wird im Ostfeld ein Druck von 1 MPa nach 105 a überschritten, nach 255 Jahren beträgt der Druck 2 MPa.

- Auf die Zeitpunkte, zu denen Drücke von 3 MPa bis 6 MPa erreicht werden, haben sowohl die Parameter der Konvergenz als auch der Gasbildung hohen Einfluss. Aufgrund der höheren Konvergenzrate werden hohe Drücke (5 MPa oder 6 MPa) im Süd- und Westfeld schneller erreicht als im Ostfeld. Im ungünstigsten Fall (schnelle Gasbildung und Konvergenz) wird im Süd- und Westfeld ein Druck von 5 MPa nach 2.505 a überschritten, nach 3.525 Jahren beträgt der Druck 6 MPa.

Tabelle 5-1: Parameterwerte (fest)

	anfängliches Volumen [m ³]		anfängliche Konvergenzrate (Referenz) [a ⁻¹]	Referenzhöhe für den lithostatischen Druck
	offen	Versatz		
Südfeld – 1. Sohle	13.055	8.372	4·10 ⁻⁵	-253 mNN
Südfeld – 2. Sohle	67.590	95.994	4·10 ⁻⁵	-275 mNN
Südfeld – 3. Sohle	78.903	68.345	4·10 ⁻⁵	-332 mNN
Südfeld – 4. Sohle	92.135	32.540	4·10 ⁻⁵	-372 mNN
Südfeld – 5. bis 7. Sohle	59.239	240.603	4·10 ⁻⁵	-400 mNN
Westfeld	2.309	59.213	5·10 ⁻⁶	-372 mNN
Ostfeld – 2. und 3. Sohle	30.855	1.460	1·10 ⁻⁵	-300 mNN
Ostfeld – 4. Sohle	33.107	55.850	1·10 ⁻⁵	-332 mNN

Tabelle 5-2: Parameterwerte (variabel)

			Referenz	Extremwert
Faktor für die anfängliche Konvergenzrate	f _{Konv}		1	10
Konvergenzexponent	m		3,5	1,5
Stützporosität des Altversatzes	ε _{Stütz}		30 %	20 %
Anteil der Gasbildner	η _{Gas}		80 %	130 %
Reaktionsrate Metall in Lauge	r _{Me}	[a ⁻¹]	5·10 ⁻⁴	5·10 ⁻³
Reaktionsrate Organika in Lauge	r _{Org}	[a ⁻¹]	1·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁴
relative Reaktionsrate der Metalle (trocken)	r _{Me,rel}		0,01	1
relative Reaktionsrate der Organika (trocken)	r _{Org,rel}		0,1	1

Tabelle 5-3: Übersicht über die berechneten Varianten

lfd. Nr.	f_{Konv}	m	$\epsilon_{\text{Stütz}}$	η_{Gas}	Faktor $\Gamma_{\text{Me}}, \Gamma_{\text{Org}}$	$\Gamma_{\text{Me,rel}}, \Gamma_{\text{Org,rel}}$
1	1	3,5	30 %	80 %	1	0,01 / 0,1
2	1	3,5	30 %	80 %	1	1
3	1	3,5	30 %	80 %	10	0,01 / 0,1
4	1	3,5	30 %	80 %	10	1
5	1	3,5	30 %	130 %	1	0,01 / 0,1
6	1	3,5	30 %	130 %	1	1
7	1	3,5	30 %	130 %	10	0,01 / 0,1
8	1	3,5	30 %	130 %	10	1
9	1	3,5	20 %	80 %	1	0,01 / 0,1
10	1	3,5	20 %	80 %	1	1
11	1	3,5	20 %	80 %	10	0,01 / 0,1
12	1	3,5	20 %	80 %	10	1
13	1	3,5	20 %	130 %	1	0,01 / 0,1
14	1	3,5	20 %	130 %	1	1
15	1	3,5	20 %	130 %	10	0,01 / 0,1
16	1	3,5	20 %	130 %	10	1
17	1	1,5	30 %	80 %	1	0,01 / 0,1
18	1	1,5	30 %	80 %	1	1
19	1	1,5	30 %	80 %	10	0,01 / 0,1
20	1	1,5	30 %	80 %	10	1
21	1	1,5	30 %	130 %	1	0,01 / 0,1
22	1	1,5	30 %	130 %	1	1
23	1	1,5	30 %	130 %	10	0,01 / 0,1
24	1	1,5	30 %	130 %	10	1
25	1	1,5	20 %	80 %	1	0,01 / 0,1
26	1	1,5	20 %	80 %	1	1
27	1	1,5	20 %	80 %	10	0,01 / 0,1
28	1	1,5	20 %	80 %	10	1
29	1	1,5	20 %	130 %	1	0,01 / 0,1
30	1	1,5	20 %	130 %	1	1
31	1	1,5	20 %	130 %	10	0,01 / 0,1
32	1	1,5	20 %	130 %	10	1

Tabelle 5-3: Übersicht über die berechneten Varianten (*Fortsetzung*)

lfd. Nr.	f_{Konv}	m	$\epsilon_{\text{Stütz}}$	η_{Gas}	Faktor $\Gamma_{\text{Me}}, \Gamma_{\text{Org}}$	$\Gamma_{\text{Me,rel}}, \Gamma_{\text{Org,rel}}$
33	10	3,5	30 %	80 %	1	0,01 / 0,1
34	10	3,5	30 %	80 %	1	1
35	10	3,5	30 %	80 %	10	0,01 / 0,1
36	10	3,5	30 %	80 %	10	1
37	10	3,5	30 %	130 %	1	0,01 / 0,1
38	10	3,5	30 %	130 %	1	1
39	10	3,5	30 %	130 %	10	0,01 / 0,1
40	10	3,5	30 %	130 %	10	1
41	10	3,5	20 %	80 %	1	0,01 / 0,1
42	10	3,5	20 %	80 %	1	1
43	10	3,5	20 %	80 %	10	0,01 / 0,1
44	10	3,5	20 %	80 %	10	1
45	10	3,5	20 %	130 %	1	0,01 / 0,1
46	10	3,5	20 %	130 %	1	1
47	10	3,5	20 %	130 %	10	0,01 / 0,1
48	10	3,5	20 %	130 %	10	1
49	10	1,5	30 %	80 %	1	0,01 / 0,1
50	10	1,5	30 %	80 %	1	1
51	10	1,5	30 %	80 %	10	0,01 / 0,1
52	10	1,5	30 %	80 %	10	1
53	10	1,5	30 %	130 %	1	0,01 / 0,1
54	10	1,5	30 %	130 %	1	1
55	10	1,5	30 %	130 %	10	0,01 / 0,1
56	10	1,5	30 %	130 %	10	1
57	10	1,5	20 %	80 %	1	0,01 / 0,1
58	10	1,5	20 %	80 %	1	1
59	10	1,5	20 %	80 %	10	0,01 / 0,1
60	10	1,5	20 %	80 %	10	1
61	10	1,5	20 %	130 %	1	0,01 / 0,1
62	10	1,5	20 %	130 %	1	1
63	10	1,5	20 %	130 %	10	0,01 / 0,1
64	10	1,5	20 %	130 %	10	1

Abbildung 5-1: Zeitliche Entwicklung des Gasdrucks in den ELB WF/SF und OF für den Referenzfall (Nr. 1 aus Tabelle 5-3).

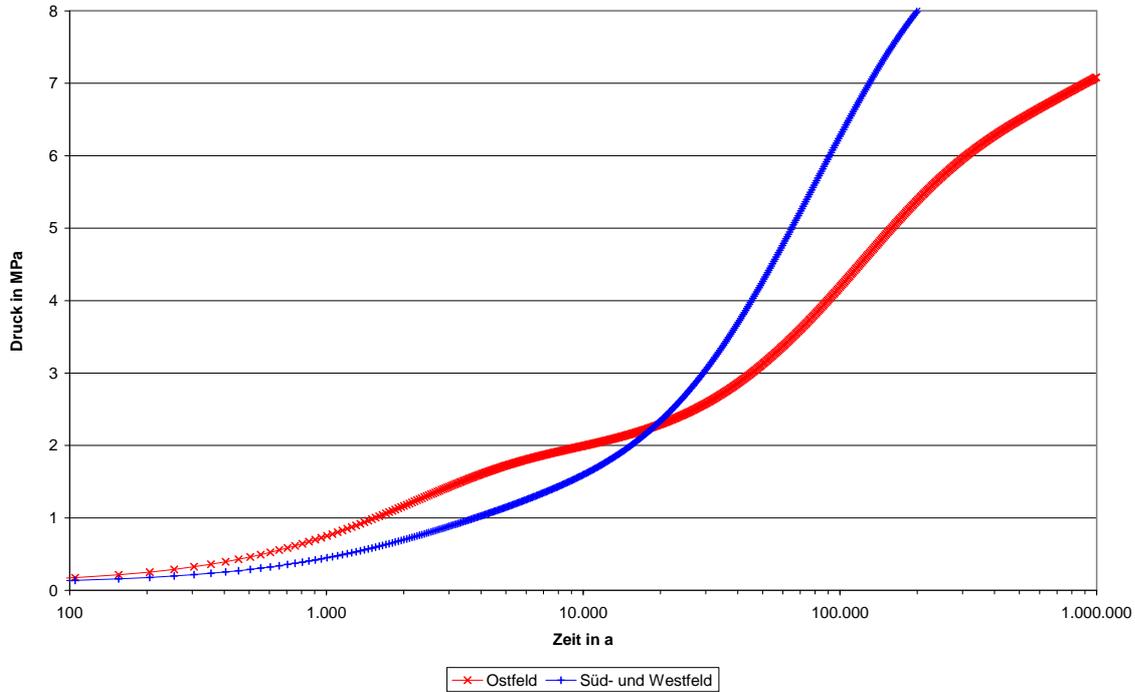


Abbildung 5-2: Zeitliche Entwicklung des Gasdrucks in den ELB WF/SF und OF für die Variante mit der ungünstigsten Parameterkombination (Nr. 64 aus Tabelle 5-3).

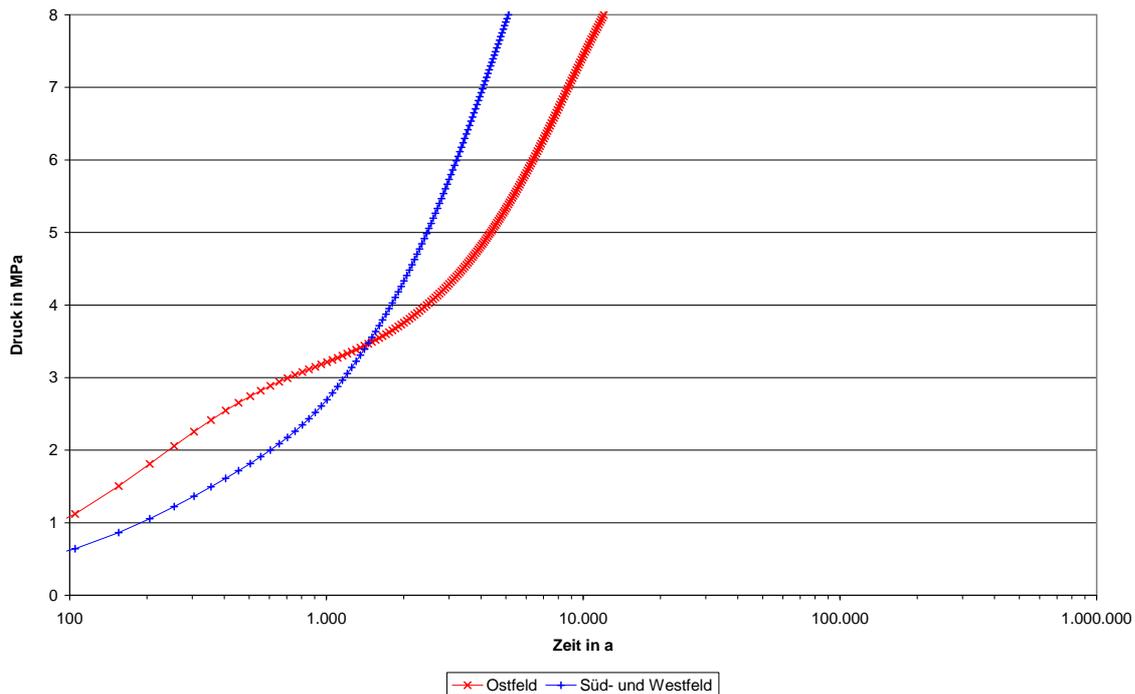


Tabelle 5-4: Zeitpunkte in Jahren, bei denen der Gasdruck im WF und SF die jeweiligen Werte überschreitet.

Ifd. Nr. der Variante	Gasdruck					
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
1	32.585	52.875	71.125	90.530	112.730	137.305
2	3.805	15.360	29.510	45.335	65.145	91.530
3	10.520	20.040	30.165	42.440	57.730	79.370
4	705	5.535	11.895	22.145	46.850	107.895
5	26.425	43.385	58.370	74.315	91.530	111.500
6	1.855	7.025	17.350	29.835	44.840	64.435
7	7.265	14.055	21.185	29.185	39.725	52.875
8	255	1.905	5.470	10.175	17.940	37.190
9	29.835	48.960	65.865	82.930	102.140	124.415
10	3.805	13.900	26.135	40.610	58.370	82.930
11	9.950	18.340	27.315	38.435	52.295	71.125
12	705	5.535	11.635	20.490	38.015	85.705
13	24.190	40.165	54.050	68.820	84.770	102.140
14	1.855	7.025	16.055	26.425	39.725	57.100
15	7.185	13.150	19.385	26.720	35.585	47.370
16	255	1.905	5.470	10.175	17.740	35.195
17	30.500	47.370	60.325	71.910	83.845	96.690
18	3.655	12.720	22.390	31.525	40.610	50.600
19	10.060	18.140	25.565	32.585	40.610	48.960
20	655	4.885	9.410	14.855	21.660	31.525
21	25.005	38.860	50.045	59.665	69.580	79.370
22	1.805	5.995	12.860	20.265	27.925	36.380
23	7.025	13.005	18.340	23.660	29.510	35.585
24	255	1.755	4.720	7.860	11.505	16.415
25	28.235	43.865	55.250	65.865	75.965	85.705
26	3.655	11.375	19.600	28.235	36.785	46.340
27	9.515	16.600	23.400	29.835	36.785	44.840
28	655	4.885	9.200	13.445	18.960	26.720
29	22.890	35.980	46.340	55.250	64.435	72.705
30	1.805	5.995	11.765	17.940	24.730	32.230
31	6.945	12.030	16.785	21.660	26.720	32.585
32	255	1.755	4.720	7.770	11.250	15.190

Tabelle 5-4: Zeitpunkte in Jahren, bei denen der Gasdruck im WF und SF die jeweiligen Werte überschreitet (*Fortsetzung*).

Ifd. Nr. der Variante	Gasdruck					
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
33	5.995	10.060	14.055	18.750	23.925	30.165
34	1.405	2.805	4.455	6.790	10.290	15.360
35	3.255	5.290	7.105	9.095	11.250	13.745
36	405	1.555	2.955	4.555	6.490	9.200
37	5.470	8.995	12.300	16.055	20.040	24.730
38	1.005	1.955	3.055	4.610	7.025	11.125
39	2.655	4.305	5.860	7.430	9.095	11.125
40	205	705	1.755	3.005	4.505	6.415
41	5.410	8.600	11.635	15.020	18.960	23.660
42	1.305	2.505	4.005	6.065	9.200	13.900
43	3.005	4.885	6.565	8.315	10.290	12.440
44	405	1.405	2.605	4.055	5.860	8.220
45	4.995	7.950	10.520	13.295	16.600	20.265
46	955	1.805	2.755	4.105	6.135	9.730
47	2.455	4.005	5.410	6.865	8.505	10.290
48	205	705	1.655	2.655	4.005	5.730
49	5.535	8.695	11.505	14.210	17.160	20.265
50	1.355	2.455	3.505	4.610	5.860	7.265
51	3.055	4.720	6.065	7.265	8.410	9.620
52	405	1.305	2.255	3.155	4.055	5.050
53	5.110	7.860	10.175	12.440	14.690	17.160
54	955	1.755	2.555	3.355	4.255	5.350
55	2.505	3.905	4.995	5.995	6.945	7.950
56	205	655	1.305	2.055	2.805	3.605
57	4.995	7.515	9.410	11.250	13.150	15.190
58	1.255	2.255	3.205	4.155	5.290	6.565
59	2.855	4.355	5.535	6.565	7.600	8.600
60	405	1.155	2.005	2.805	3.705	4.610
61	4.610	6.945	8.695	10.290	11.895	13.595
62	905	1.605	2.305	3.005	3.855	4.775
63	2.305	3.605	4.665	5.535	6.415	7.265
64	205	605	1.205	1.805	2.505	3.255

Tabelle 5-5: Zeitpunkte in Jahren, bei denen der Gasdruck im OF die jeweiligen Werte überschreitet.

Ifd. Nr. der Variante	Gasdruck					
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
1	51.725	92.540	132.865	178.605	232.315	302.135
2	1.555	10.175	45.335	89.545	160.075	312.225
3	10.175	24.460	45.335	79.370	140.350	270.800
4	205	1.805	11.375	52.875	186.605	457.995
5	37.600	68.070	98.835	131.415	170.945	217.540
6	855	2.405	8.130	35.980	74.315	134.330
7	6.065	14.055	24.190	38.435	61.665	104.405
8	105	255	1.155	5.995	15.360	123.060
9	48.960	86.650	124.415	165.425	215.170	279.840
10	1.555	10.175	45.335	86.650	143.460	256.370
11	10.175	24.460	44.840	75.135	124.415	222.355
12	205	1.805	11.375	52.875	174.735	380.225
13	36.380	64.435	92.540	123.060	158.330	199.280
14	855	2.405	8.130	35.980	74.315	134.330
15	6.065	14.055	24.190	38.435	61.665	103.265
16	105	255	1.155	5.995	15.360	123.060
17	49.500	83.845	112.730	140.350	169.085	197.110
18	1.555	8.795	32.945	57.730	84.770	117.785
19	9.950	22.640	38.015	57.100	81.130	111.500
20	205	1.755	9.840	26.135	58.370	107.895
21	35.980	63.035	85.705	107.895	128.570	153.210
22	855	2.355	7.105	24.730	43.865	66.590
23	5.995	13.445	21.900	32.230	44.840	60.990
24	105	255	1.105	5.470	12.440	27.015
25	46.850	78.505	105.555	131.415	156.605	184.570
26	1.555	8.795	32.585	54.050	76.805	105.555
27	9.950	22.640	36.785	52.875	72.705	98.835
28	205	1.755	9.840	26.135	55.860	92.540
29	34.810	59.015	80.245	99.925	120.395	141.895
30	855	2.355	7.105	24.730	43.865	63.730
31	5.995	13.445	21.900	31.875	43.865	58.370
32	105	255	1.105	5.470	12.440	27.015

Tabelle 5-5: Zeitpunkte in Jahren, bei denen der Gasdruck im OF die jeweiligen Werte überschreitet (*Fortsetzung*).

Ifd. Nr. der Variante	Gasdruck					
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
33	14.530	22.890	30.500	38.015	46.850	57.100
34	1.305	3.405	7.685	15.880	27.315	43.865
35	5.170	9.305	13.295	17.740	23.145	30.165
36	205	1.055	4.555	8.995	15.880	31.180
37	12.165	19.385	25.850	32.230	39.725	47.895
38	755	1.855	3.455	6.945	15.360	28.865
39	3.755	6.865	9.840	13.150	16.970	21.660
40	105	255	855	3.605	7.430	13.445
41	13.595	21.420	28.235	35.195	43.385	52.295
42	1.305	3.355	6.945	13.595	24.190	39.725
43	4.885	8.695	12.440	16.600	21.420	27.925
44	205	1.055	4.555	8.695	14.370	25.850
45	11.375	18.140	24.190	30.165	36.785	44.350
46	755	1.855	3.455	6.715	13.595	25.005
47	3.655	6.415	9.200	12.300	15.705	20.040
48	105	255	855	3.605	7.430	13.445
49	13.595	20.265	25.565	30.165	34.430	39.290
50	1.255	3.055	5.535	8.995	13.295	18.140
51	4.995	8.410	11.375	14.055	16.785	19.820
52	205	905	3.305	5.795	8.505	11.765
53	11.505	17.350	21.900	25.850	29.510	33.680
54	755	1.755	2.955	4.665	7.265	11.125
55	3.605	6.275	8.600	10.760	13.005	15.190
56	105	255	755	2.505	4.405	6.640
57	12.720	18.960	23.400	27.620	31.525	35.585
58	1.255	3.005	5.050	7.950	11.765	16.415
59	4.665	7.860	10.640	13.150	15.705	18.545
60	205	905	3.305	5.410	7.685	10.520
61	10.760	16.235	20.265	23.925	27.315	30.840
62	755	1.755	2.955	4.455	6.490	9.515
63	3.505	5.925	8.040	10.060	12.030	14.210
64	105	255	755	2.505	4.355	6.415

5.2. Vergleich mit den Angaben in den Planunterlagen

In den Planunterlagen zu den Abdichtungen werden keine Angaben zum Gasdruck gemacht. In der LSA [P 278] wird der zeitabhängige Gasdruck für den Referenzfall in Abschnitt 8.2 graphisch dargestellt (s. Abbildung 5-3). Näherungsweise können hieraus die in Tabelle 5-5 angegebenen Zeiten abgelesen werden.

- In der Anfangsphase (bis ca. 1.000 Jahre) ist der Gasdruck weitgehend unabhängig von der Konvergenz. Die Erhöhung des Gasdrucks wird dominiert durch die Umsetzung der Metalle. Hier sind die Ergebnisse des Referenzfalls aus [P 278] vergleichbar mit der Variante mit der ungünstigsten Parameterkombination (Nr. 64 aus Tabelle 5-3) aus diesem Gutachten. Dies ist zu erwarten, da die Gasbildungsrate für Metalle in [P 278] ($4 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$) etwa mit der Gasbildungsrate der Variante Nr. 64 aus Tabelle 5-3 ($5 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$) vergleichbar ist.
- Die Zeitpunkte, zu denen im Referenzfall nach [P 278] Drücke von 5 MPa bzw. 6 MPa erreicht werden, sind vergleichbar mit der Variante Nr. 2 aus Tabelle 5-3 aus diesem Gutachten. Die für den langfristigen Druckaufbau relevanten Parameter (Konvergenzrate und Gasbildungsrate Organika) sind bei dem Referenzfall aus [P 278] und der Variante Nr. 2 aus Tabelle 5-3 aus diesem Gutachten ähnlich.
- Generell liegen die Zeitpunkte des Druckaufbaus des Referenzfalls aus [P 278] in dem durch die 64 Varianten aufgespannten Intervall der Ergebnisse aus diesem Gutachten.

Tabelle 5-5: Zeitpunkte des Druckaufbaus des Referenzfalls aus [P 278]

Druck	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa
Zeitpunkt WF / SF	440	11.000	24.000	38.000	55.000	80.000
Zeitpunkt OF	150	550	27.000	70.000	140.000	300.000

Abbildung 5-3: Druckaufbau im West-Südfeld und im Ostfeld für den Referenzfall bei gasundurchlässigen Abdichtungen (aus [P 278], Abbildungen 8.2 und 8.3).

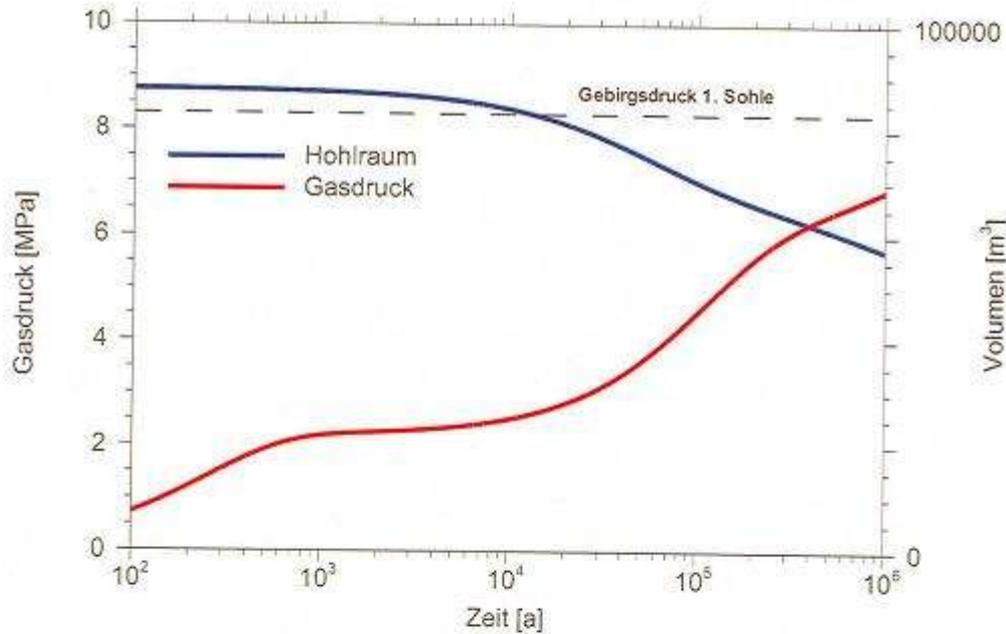


Abb. 8.2 Druckaufbau im Ostfeld bei gasundurchlässiger Abdichtung

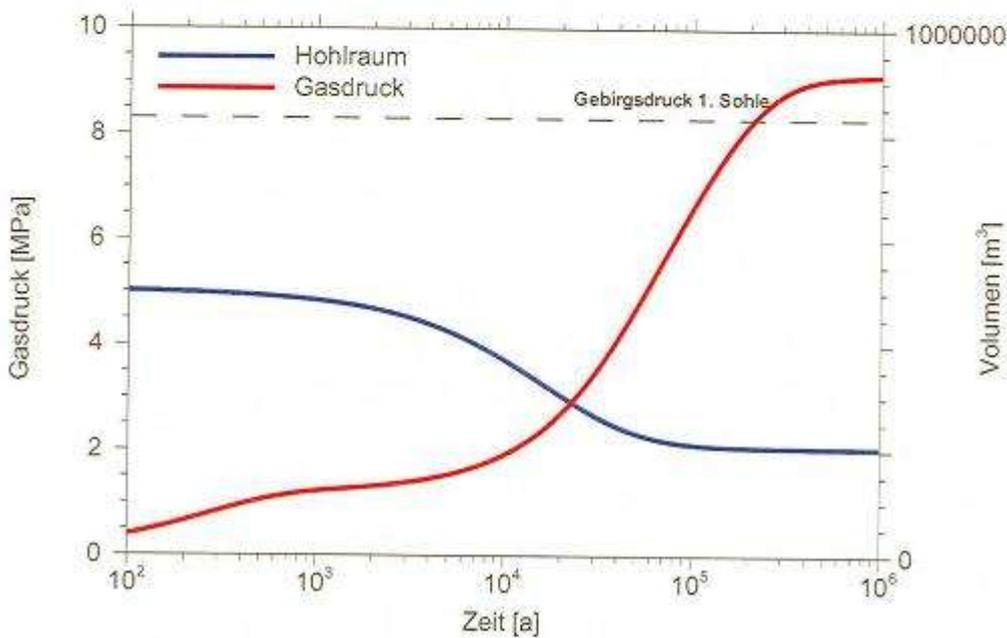


Abb. 8.3 Druckaufbau im West-Südfeld bei gasundurchlässiger Abdichtung

6. ZUR BEDEUTUNG VON INHOMOGENITÄTEN

6.1. Bedeutung der Auflockerungs- und der Kontaktzone

6.1.1. Bewertung der Angaben des BfS

6.1.1.1. Angaben in [A 281Q]

Auf die Bedeutung der Auflockerungszone und der Kontaktzone für die Wirksamkeit der Streckenabdichtungen wird im Plan an den folgenden Stellen eingegangen:

„Die Auflockerungszone um Einzelstrecken ist weniger als 1 m mächtig. Im stoßnahen Bereich (bis 20 cm Tiefe) werden Permeabilitäten kleiner als 10^{-15} m² gemessen.“ (S. 74)

„Eine Abdichtung besteht ... aus dem Abdichtungskörper mit dem umliegenden Gebirgsbereich einschließlich des dazwischen liegenden Übergangsbereichs (Kontaktzone).“ (S. 164)

„In den Streckenabschnitten, in denen die Abdichtungsbauwerke errichtet werden, wird die Auflockerungszone gemäß ihrer Ausbildung entlang der gesamten Ausbruchskontur gebirgsschonend ... herausgenommen, um eine Schädigung des Gebirges zu vermeiden.“ (S. 165)

„Injektionsmaßnahmen der Kontaktzone Streckensaum/Betonkörper werden an jeder Abdichtungslokation [im Steinsalz] vorgesehen. Die Injektion erfolgt mit einer Zementsuspension, um eine sofortige Dichtheit der Kontaktzone zu gewährleisten. Durch das aufkriechende Salzgebirge ist die Dichtheit der Kontaktzone auch bei mit Lösung vollgelaufenen Grubengebäuden gewährleistet. Die injizierten Abdichtungssegmente gewährleisten eine Anfangspermeabilität von 10^{-18} m² oder kleiner ... Sie können Belastungen aus Gebirgsdruck, Beanspruchungen durch Fluiddrücke, chemischen Angriff durch Lösungen und Hydratationswärme ausreichend lange (siehe Kapitel 5.4) versagensfrei ertragen.“ (S. 166)

„Im Gegensatz zum Steinsalz ist der Hauptanhydrit nicht kriechfähig, was zur Folge hat, dass das Bauwerk die Permeabilitätsanforderung instantan bzw. direkt nach Errichtung erfüllen muss. Dies wird durch den Einsatz eines quellfähigen Baustoffs (Magnesiabeton) als Abdichtungsmaterial erfüllt. Der entstehende Quelldruck sorgt zwischen Bauwerk und Gebirge für eine dauerhafte Abdichtwirkung gegenüber dem möglichen Lösungsdruck.“ (S. 167)

„Die für die Abdichtungsbauwerke vorgesehenen Streckenabschnitte werden nach dem Entfernen der Auflockerungszonen firstbündig und qualitativ hochwertig verfüllt. Die Abdichtungen müssen unmittelbar nach Errichtung eine Dichtfunktion aufweisen. Aus diesem Grunde wird die Kontaktzone der Abdichtungen im Steinsalz zwischen Salzgestein und Salzbeton mit Feinstbindemittel injiziert. ... Für die Abdichtungen wird gefordert, dass sie eine Anfangspermeabilität von 10^{-18} m² oder kleiner aufweisen, die Gebrauchstauglichkeit über ca. 20.000 Jahre erhalten bleibt und die folgenden Belastungen für diesen Zeitraum versagensfrei ertragen werden:

- Gebirgsdruck
- Beanspruchung durch Fluiddrücke

- *Chemischer Angriff durch Lösungen*
- *Hydratationswärme“ (S. 253)*

Es wird auf die Unterlagen [P 192], [P 195], [P 255], [P 266], [P 277], [P 278] und [G 296] verwiesen.

Bewertung: Der Plan vermittelt den Eindruck, dass die Abdichtsysteme keine Auflockerungszonen beinhalten, da diese entfernt wurden, und dass die Kontaktzonen nach Errichtung der Abdichtung dicht sind, weil entweder die Injektion ihre Dichtheit gewährleistet (Salzbetonabdichtungen) oder das Quellen des Baustoffs die Kontaktzone abdichtet (Magnesiabetonabdichtung). Die Möglichkeit einer inhomogenen Durchströmung der Abdichtsysteme und deren mögliche Folgen werden nicht angesprochen und implizit ausgeschlossen.

Weiterhin wird angegeben, dass die Abdichtsysteme unmittelbar nach ihrer Errichtung eine Permeabilität $\leq 10^{-18}$ m² aufweisen, wobei nicht zwischen der Systempermeabilität und der lokalen Permeabilität unterschieden wird.

Im Folgenden geben wir die Angaben aus den angegebenen Literaturverweisen zur (In-)Homogenität der Abdichtungen und der Folgen für ihre Systempermeabilität wieder und bewerten sie hinsichtlich Vollständigkeit und Plausibilität. Die Frage der Homogenität und Rissfreiheit der Betonkörper klammern wir hierbei aus und beschränken uns auf die Auflockerungszone und die Kontaktzone als mögliche Vorzugswasserwege gegenüber dem (stets als homogen unterstellten) Betonkörper.

Zunächst gehen wir auf die Unterlagen [G 296] und [P 192] ein, die ausschließlich Angaben zum Verfüllmaterial Salzbeton (und nicht zur Auflockerungszone bzw. Kontaktzone) enthalten. Anschließend prüfen wir die Unterlagen [P 195], [P 255] und [P 298], in denen die Rolle der Auflockerungszone und der Kontaktzone bei einer Abdichtung aus Salzbeton untersucht wird³⁷. Dann erfolgt die Untersuchung der Unterlagen [P 266], [P 278] und [P 277], in denen auf die Rolle der Auflockerungszone bei einer Abdichtung aus Magnesiabeton eingegangen wird. (Die Existenz einer wasserwegsamem Kontaktzone wird in diesen Unterlagen ausgeschlossen bzw. nicht angesprochen.)

6.1.1.2. Angaben in [G 296]

Die Unterlage [G 296] beinhaltet „Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Salzbeton“. Sie geht deshalb nicht unmittelbar auf die Auflockerungszone und die Kontaktzone einer Abdichtung ein. Es werden jedoch u. a. die folgenden Anforderungen an den Salzbeton formuliert, die in anderen Unterlagen bei der Abschätzung der Bedeutung der Auflockerungszone und der Kontaktzone von Relevanz sind:

„Für den Salzbeton M2 ist hierbei [für die maximal zulässige Schwinddehnung] eine Obergrenze von 0,5 mm/m, entsprechend 0,05 % im Mittel einzuhalten.“ (S. 19)

³⁷ Die Unterlage [P 298] wird im Plan [A 281Q] nicht als Quelle angegeben. Da sie vom BfS als „Prüfunterlage“ eingereicht wurde, berücksichtigen wir sie hier trotzdem.

„Für den Salzbeton M2 wird eine Obergrenze bei Lagerung im Normalklimat 20/65 aus der Differenz Endschwindmaß minus Gesamtschwindmaß ... nach 56 Tagen ... mit $\leq 0,2$ mm/m definiert.“ (S. 19)

„Zur Gewährleistung des erforderlichen hydraulischen Widerstands der Abdichtungsbauwerke muss die Permeabilität des Abdichtungsstoffs $< 10^{-19}$ m² betragen.“ (S. 19)

Bewertung:

Schwinddehnung:

- Die Methoden zur Ermittlung der Schwinddehnung und des Endschwindmaßes sind nicht angegeben und sollten vorgeben werden.
- Es ist zu klären, wie das o. g. Mittel definiert ist bzw. wie es zu bestimmen ist.
- Es ist darzulegen, wie mit diesem Mittel die (gleichzahlige) Obergrenze eingehalten wird.
- Da die Unterlage [G 296] auch andere Baustoffe als M2 zur Herstellung der Streckenabdichtungen zulässt, ist unklar, weshalb die Forderungen bzgl. der Schwinddehnung und dem Endschwindmaß nur für M2, nicht aber für die anderen Baustoffe gelten.

Permeabilität:

Da die Permeabilität des Salzbetons stark von dem Fluid und dem Sättigungsgrad des Porenraums (an Flüssigkeiten) abhängt, müssen in [G 296] die Angaben zur Permeabilität konkretisiert werden bzgl.

- Fluid,
- Sättigungsgrad des Porenraums bzgl. Flüssigkeiten und
- Mess-/Auswertemethode zur Bestimmung der Permeabilität.

6.1.1.3. Angaben in [P 192]

Die Unterlage [P 192] enthält eine Zusammenstellung von Untersuchungen, die an Salzbeton der Rezeptur M2 durchgeführt wurden³⁸. Die Unterlage geht deshalb nicht auf die Auflockerungszone und die Kontaktzone einer Abdichtung ein. Zu den im vorigen Abschnitt erwähnten Größen „maximale Schwinddehnung“, „Differenz Endschwindmaß minus Gesamtschwindmaß nach 56 Tagen“ und Permeabilität werden u. a. die folgenden Angaben gemacht:

Schwinddehnung:

Die Ermittlung des Schwindverhaltens erfolgte nach Heft 422 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), Abschnitt 2.6. Es wurden Prüfzylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm hergestellt. Nach einer Abbindezeit von 7 Tagen wurden die Prüfkörper entnommen und eine 200 mm lange Messstrecke markiert ($l_0 = 200$ mm). Nach unterschiedlichen Zeiten wurde die Länge der (sich durch das Schwinden verkürzenden) Messstrecke $l(t)$ bestimmt

³⁸ Bei einigen Untersuchungen wurde die Rezeptur variiert, um die Abhängigkeit des untersuchten Materialparameters von der Rezeptur zu ermitteln.

und das Schwindmaß als $(l_0 - l(t)) / l_0$ berechnet. Die Untersuchungen unter Normalklimat 20/65³⁹ wurden an zwei Serien zu je 3 Proben durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind auszugsweise in Tabelle 6.1.3-1 wiedergegeben.

Tabelle 6.1.3-1: Ergebnisse der Schwindmessungen an Proben aus M2 unter Normalklimat (20/65).

Abbindezeit	Prüfalter	Schwindmaß ϵ_s [‰]	
		Serie 1	Serie 2
38 d	31 d	0,862	0,861
65 d	58 d	0,942	0,957
273 d	266 d	n. b.	1,048
367 d	360 d	1,032	n. b.

Wir vermuten, dass es sich bei den in [P 192] angegebenen Werten für das Schwindmaß um die Mittelwerte der 3 Probekörper aus der jeweiligen Serie handelt.

Permeabilität:

- Die Gaspermeabilität (N_2) bei getrockneten Proben⁴⁰ lag zwischen $1,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ und $5,4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$.
- Die Gaspermeabilität (N_2) bei feucht gelagerten Proben⁴¹ (Normalklimat 20/65) lag zwischen $1,5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ und $6,1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$.
- Die Permeabilität bzgl. NaCl-Lösung und Q-Lösung lag unter der jeweiligen Nachweisgrenze von $6 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$ bzw. $3 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$.⁴²

Bewertung: Aus den Angaben in [P 192] kann geschlossen werden, wie die in [G 296] geforderte Bestimmung der Schwinddehnung erfolgen soll. Allerdings erfüllen die in [P 192] untersuchten Proben nicht die in [G 296] gestellte Bedingung $\epsilon_s \leq 0,05 \%$.

Die großen Unterschiede in der Permeabilität in Abhängigkeit vom Fluid und vom Feuchtegehalt der Probe zeigt die Notwendigkeit zur Präzision der in [G 296] gestellten Anforderungen an die Permeabilität.

6.1.1.4. Angaben in [P 195]

In [P 195] Abschnitt 4.3 wird die Nachweisführung für den Nachweis der ausreichenden hydraulischen Dichtheit der Abdichtungen aus Salzbeton als Systeme beschrieben. Hierbei wird die Abdichtung als ein System aus Betonkörper, Kontaktfuge und Auflockerungszone beschrieben.

Zur chemischen Korrosion wird angemerkt:

³⁹ Lagerung des Prüfkörpers bei 20 °C und 65 % relative Luftfeuchte.

⁴⁰ Die Abbindezeit betrug 92 Tage.

⁴¹ Die Abbindezeit betrug 92 Tage.

⁴² Die Abbindezeit der Proben betrug 108 bis 118 Tage.

- „Chemischer Angriff [erfolgt] durch gesättigte Salzlösungen, die durch gesättigte NaCl-Lösung und IP21-Lösung repräsentiert sind. Eine genauere Präzisierung der Salzlösungen ist nicht möglich.“ (S. 63 in [P 195])
- „... dass im Fall erfolgreicher Rissbeschränkung [innerhalb des Salzbetonkörpers] Korrosionsprozesse sehr langsam verlaufen. Im Nachweiszeitraum tritt daher nur eine geringe Schädigungstiefe (von weniger als 30 bis 60 cm) auf. ... Damit wird das Gefährdungsbild des chemischen Angriffs auf das Gefährdungsbild zum Nachweis der Rissbeschränkung zurückgeführt.“ (S. 75 in [P 195])

Die chemische Korrosion wird deshalb bei den Abschätzungen nicht berücksichtigt. Statt dessen wird hierzu die Forderung aufgestellt: „Als Nebenbedingung ist zu beachten, dass für Abdichtungskörper und Kontaktzone der Grenzwert [10^{-18} m²] an jeder Stelle des Querschnittes eingehalten werden muss, um lokal erhöhte Korrosion auszuschließen.“ (S. 38 in [P 195])

Zur Ermittlung des Flusses durch eine Abdichtung (als System) wird in [P 195] unterstellt, dass sich die drei Systemteile Salzbetonkörper, Kontaktfuge und Auflockerungszone wie parallel geschaltete hydraulische Widerstände verhalten und es wird für jeden Systemteil der jeweilige Lösungsfluss ermittelt. Es wird ein einseitiger Lösungsdruck (und damit eine Druckdifferenz Δp) von 6 MPa und eine Viskosität der Lösung η von 3 mPa·s angesetzt.⁴³ Im Folgenden werden die Abschätzungen für die Abdichtung in 17YEQ01/R001 (Ostquerschlag B/C auf der 4. Sohle) wiedergegeben:

- Der Fluss durch den Salzbeton wird mit 0,0742 m³/a angegeben (Permeabilität 10^{-18} m², Querschnittsfläche nach Nachriss 26 m² (5,7 m x 4,6 m), Länge der Abdichtung $\Delta l = 26$ m). Um riss-erzeugenden Zwangsbeanspruchungen und Korrosion an den Stirnflächen Rechnung zu tragen, wird eine wirksame Länge der Abdichtung von 80 % („Teilsicherheitsbeiwert 1,25“) vorgeschlagen. Hiermit beträgt der Fluss 0,0928 m³/a.
- Für die Auflockerungszone wird eine Tiefe von 20 cm und eine Permeabilität von 10^{-16} m² angesetzt. „Diese Permeabilität kann man einer sorgfältig vor weniger als 3 Monaten nachgerissenen Auflockerungszone in Strecken ohne weitere Untersuchungen zuordnen /18/“ ([P 195], S. 54). Der Fluss durch die AZ wird mit 1,22 m³/a angegeben (Querschnittsfläche 4,28 m², durchströmte Länge 26 m).
- Zur Charakterisierung der Kontaktzone wird in [P 195] ein 0,06 mm breiter Spalt entlang des gesamten Umfangs des Betonkörpers angesetzt. Für den längenspezifischen Fluss q durch diesen Spalt (m³/s je m Spalllänge) werden in [P 195] drei Ansätze aufgeführt:

(1) Hagen-Poiseulle: $q = w^3/12 \cdot 1/\eta \cdot \Delta p/\Delta l$

$w =$ Spaltbreite

(2) Tsukamoto (DAfStb Heft 481): $q = \xi \cdot w^3/12 \cdot 1/\eta \cdot \Delta p/\Delta l$ mit $\xi = 561,9 \cdot w - 0,007$

$w =$ Spaltbreite in [m] (hier 0,00006)

⁴³ Zum Vergleich: Die Viskosität von gesättigter NaCl-Lösung beträgt 2 mPa·s, die von IP21-Lösung 5,6 mPa·s.

- (3) Imhof-Zeitler (DAfStb Heft 460): $q = \xi \cdot w^3/12 \cdot 1/\eta \cdot \Delta p/\Delta l$ mit $\xi = 0,82 \cdot w^{0,6} \cdot (\eta/\rho)^{1/2}$
 w = Spaltbreite in [mm] (hier 0,06)
 η = dynamische Viskosität in [Pa·s] (hier 0,002)
 ρ = Dichte in [kg/m³] (hier 1.200)

Der Ansatz (1) von Hagen-Poiseulle gilt für laminare Strömung zwischen zwei glatten Platten. ξ ist ein Beiwert, der die Rauigkeit des Risses berücksichtigt. In [P 195] werden unter Verweis auf die Hefte 460 und 481 des DAfStB nur die Ansätze (2) und (3) verwendet⁴⁴. Für eine Spaltbreite von 0,06 mm ergibt sich bei der hier betrachteten Abdichtung ein Fluss von 28,6 m³/a (Ansatz (2)) bzw. 0,254 m³/a (Ansatz (3)).

Durch Normierung des längenspezifischen Flusses q auf die Spaltquerschnittsfläche kann dem Spalt eine Permeabilität zugeordnet werden. Diese beträgt $\xi \cdot w^2/12$. Für eine Spaltbreite von 0,06 mm ergibt sich eine Permeabilität von $4,1 \cdot 10^{-11}$ m² (Ansatz (2)) bzw. $7,2 \cdot 10^{-14}$ m² (Ansatz (3)).

Hieraus wird in [P 195] der folgende Schluss gezogen: „Die Ergebnisse zeigen, dass die Einhaltung der Anforderung von $k \leq 10^{-18}$ m² auf der Basis des Trennrissmodells lokal nicht gezeigt werden kann. Deshalb sind genauere Untersuchungen erforderlich, die die Modellvorstellung belegen, dass die Kontaktzone keine besondere Schwächezone darstellt und die Permeabilitätsanforderung erfüllt.“ (S. 51). Weiter heißt es auf S. 57: „Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass ohne genauere Untersuchungen eine für den Langzeitsicherheitsnachweis ausreichend geringe Permeabilität $k \leq 10^{-18}$ m² von keinem Element der Abdichtung erreicht wird, und ein vereinfachter Nachweis durch sinngemäße Anwendung des technischen Regelwerkes nicht geführt werden kann. Die für den Nachweis notwendigen genaueren Untersuchungen wurden zwischenzeitlich durchgeführt bzw. begonnen. Aus der bereits vorliegenden Datenbasis lässt sich ableiten, dass das Ziel erreicht werden kann, eine querschnittsgemittelte Permeabilität von 10^{-18} m² nachzuweisen.“

In den folgenden Kapiteln 5 und 6 wird für eine Abdichtung exemplarisch dargelegt,

- dass sich in der Herstellungsphase innerhalb des Salzbetons und in der Kontaktzone bei Einhaltung des Temperaturkriteriums⁴⁵ keine Risse bilden können (u. a. weil das Schwinden vernachlässigt werden kann), und
- dass in der AZ nach Errichtung der Abdichtung kein Wachstum ggf. vorhandener Risse erfolgt,

⁴⁴ Ansatz (2) entstammt einer Promotion von 1991, in der der Durchfluss von Wasser bzw. Heizöl an 6 cm mächtigen gerissenen Betonplatten für Rissbreiten $\geq 0,1$ mm bzw. $\geq 0,06$ mm ermittelt wurde. Ansatz (3) entstammt einer Untersuchung, in der gerissene Betonquader (20 cm Breite) zur Reduzierung der Rissbreite auf Werte bis 0,02 mm unter Druckspannung gesetzt wurden. Der Gültigkeitsbereich des Ansatzes beträgt 0,02 mm bis 0,06 mm. Diese Durchströmungsversuche wurden nur mit Ölen als Fluid durchgeführt.

Die Rissbreiten wurden jeweils an der Oberfläche der Betonkörper ermittelt. Aufgrund theoretischer Überlegungen zur inneren Rissoberfläche auf Basis der Kornstruktur des Betons ist zu unterstellen, dass die Rissbreite im Betoninneren z. T. erheblich niedriger ist.

⁴⁵ Dieses begrenzt die Temperaturunterschiede im Betonkörper infolge des Abbindungsprozesses auf 20 K. In [P 255] entfällt dieses Kriterium.

- da sich der potentiell gestörte Bereich der AZ, in dem das Dilatanzkriterium verletzt ist, nicht weiter vergrößert, und
- da bei Berücksichtigung des zeitlichen Flutungsverlaufs das Fluidkriterium auf mindestens 80 % der Länge der Abdichtung eingehalten wird.

Bewertung: Nach unserem Verständnis handelt es sich bei der Unterlage [P 195] nicht um einen Nachweis, dass die Abdichtungen als Systeme die an sie gestellten Anforderungen erfüllen, sondern um eine Darlegung, wie dieser Nachweis (später) erbracht werden soll und weshalb schon gegenwärtig⁴⁶ zu erwarten ist, dass diese Nachweisführung gelingen wird.

Weiterhin ist die Argumentation zum Ausschluss einer inhomogenen Korrosion inkonsistent:

- Die lokale chemische Korrosion wird bei den Abschätzungen nicht berücksichtigt mit dem Verweis auf die Nebenbedingung, dass der Grenzwert von 10^{-18} m² an jeder Stelle des Querschnitts eingehalten werden muss.
- Dann wird gezeigt, dass die Einhaltung dieser Nebenbestimmung nicht nachgewiesen werden kann und durch einen (zu erbringenden) Nachweis ersetzt werden soll, dass die querschnittsgemittelte Permeabilität den Wert 10^{-18} m² nicht überschreitet.
- In der folgenden Darlegung in den Kapiteln 5 und 6 fehlt der Nachweis, dass sich die AZ zwischen Nachschneiden und Abschluss der Errichtung der Abdichtung nicht wieder nachbildet. Es wird lediglich gezeigt, dass sich der Zustand der AZ nach Errichtung der Abdichtung nicht weiter verschlechtert.

Als Folge müsste also die Wirkung einer inhomogenen Korrosion aufgrund von Vorzugsfließwegen untersucht werden. Dies erfolgt aber nicht.

Weiterhin ist noch begründet darzulegen, welche Permeabilität der AZ aufgrund von Auflockerungsprozessen zwischen dem Nachschneiden und dem Abschluss der Errichtung der Abdichtung als obere Grenze zugeordnet werden kann.

Der in [P 195] geführte Nachweis, dass sich in der Herstellungsphase der Abdichtung in der Kontaktzone keine Risse bilden können, ist mittlerweile hinfällig. Er wird in [P 255] aufgegeben, da das Schwinden entgegen der Annahme in [P 195] doch nicht vernachlässigt werden kann. Bei der Ermittlung der Wirkung von Vorzugsfließwegen ist auch dies zu berücksichtigen.

6.1.1.5. Angaben in [P 255]

Die Unterlage [P 255] enthält Nachweisführungen zu den folgenden Aussagen:

- In den Betonkörpern der Salzbetonabdichtungen entstehen keine Risse längs der Achse der Abdichtung (also in der Ausbreitungsrichtung des Fluids).
- Sofern sich im Abdichtungssystem ein Riss in Ausbreitungsrichtung ausbildet, bildet sich dieser in der Kontaktzone von Salzbetonkörper und Gebirge.

⁴⁶ D. h. zum Zeitpunkt der Erstellung der Unterlage (Stand 28.06.2004).

- Eine ggf. bestehende Auflockerungszone um eine Abdichtung im Steinsalz bildet sich innerhalb von spätestens 1.000 Jahren soweit zurück, dass ihre Permeabilität $\leq 10^{-18}$ m² ist. (Nachweisführung durch Verweis auf den Asse-Vordamm und Skalierung auf die Verhältnisse im ERAM).
- Führt man bei den Abdichtungen im Steinsalz eine Injektion derart durch, dass die Kontaktzone mit einer Vorspannung von 2 MPa (vollständig) abgedichtet wird, dann bewirkt die Konvergenz eine ausreichend schnelle Überdrückung der Kontaktzone, so dass die Kontaktzone auch bei größeren Laugendrücken (infolge einer Flutung des ERAM) dicht bleibt.

Bewertung: Die Nachweisführung zur Kontakt- und Auflockerungszone in [P 255] basiert auf der Annahme, dass die Kontaktfuge und die Auflockerungszone (auch später) keine Vorzugsfließwege darstellen können, sofern sie nach einer Injektion mit 2 MPa (anfänglich) dicht sind. Es wird in [P 255] nicht untersucht, ob diese anfängliche Dichtheit auch tatsächlich erreicht wird bzw. welche Wirkung eine verbleibende Wasserwegsamkeit haben würde.

6.1.1.6. Angaben in [P 298]

In [P 298] wird abgeschätzt, welchen Einfluss die Kontaktzone bei einem Abdichtungsbauwerk aus Salzbeton nach Durchführung von Injektionsmaßnahmen auf die effektive (System-)Permeabilität hat und ob eine Systempermeabilität von $\leq 10^{-18}$ m² erreicht werden kann. Die Abschätzungen gelten für den Zeitpunkt unmittelbar nach der Herstellung des Bauwerks. Es wird weder die Konvergenz (die zum Schließen der Fuge führen kann) noch die Korrosion durch magnesiumhaltige Lösung berücksichtigt.

Analog zu [P 195] wird unterstellt, dass sich die verschiedenen Systemteile (Salzbetonkörper, Kontaktfuge und Auflockerungszone) wie parallel geschaltete hydraulische Widerstände verhalten und es wird für jeden Systemteil der jeweilige Anteil am Lösungsfluss ermittelt. Im Gegensatz zu [P 195] wird nun die Kontaktfuge differenziert in einen Teil, der (vollständig) mit Injektionsmaterial verfüllt wurde und einen Teil, der aufgrund seiner geringen Breite unverfüllt geblieben ist.

In Abbildung 6-1 ist die Modellvorstellung aus [P 298] dargestellt. Das Abdichtungssystem besteht danach aus der Auflockerungszone AZ (grau), dem Salzbetonkörper S (braun), dem verfüllten Teil der Kontaktzone F („Fuge“, gelb) und dem unverfüllten Teil der Kontaktzone R („Riss“, weiß). Es wird unterstellt, dass sich die Höhe des Salzbetonkörpers aufgrund des Schwindens um den Anteil ε verringert hat und dieser Anteil dem Schwindmaß (nach DAfStb Heft 422) entspricht. Weiterhin wird unterstellt, dass sich der Salzbetonkörper in Querrichtung ebenfalls aufgrund des Schwindens zusammenzieht. Das Ausmaß des Schwindens in Querrichtung wird jedoch als höhenabhängig angesetzt: Im Bereich der Firste verringert sich die Breite des Salzbetonkörpers ebenfalls um einen Anteil ε , im Bereich der Sohle bleibt die Breite dagegen konstant. Zwischen diesen Bereichen wird ein mit der Höhe linearer Anteil angenommen. Hierdurch entsteht an beiden Seiten des Betonkörpers eine Fuge mit dreieckiger Querschnittsfläche. Da die Breite der Fuge in Richtung Sohle auf Null abfällt, kann der untere Teil der Fuge (mit der vertikalen Länge l) nicht mit Injektionsmaterial verfüllt werden. Es wird unterstellt, dass bei einer kritischen Breite w der Verfüllgrad sprunghaft von 1 auf 0 abfällt.

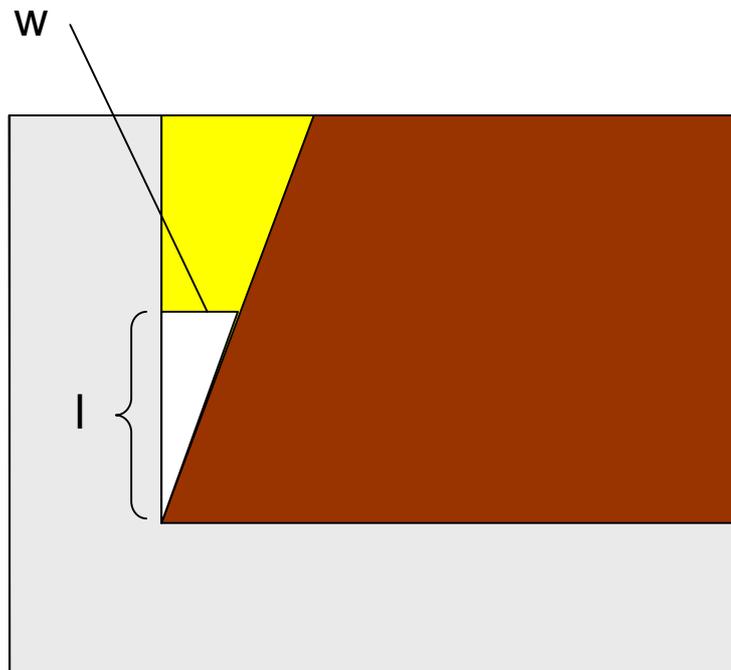
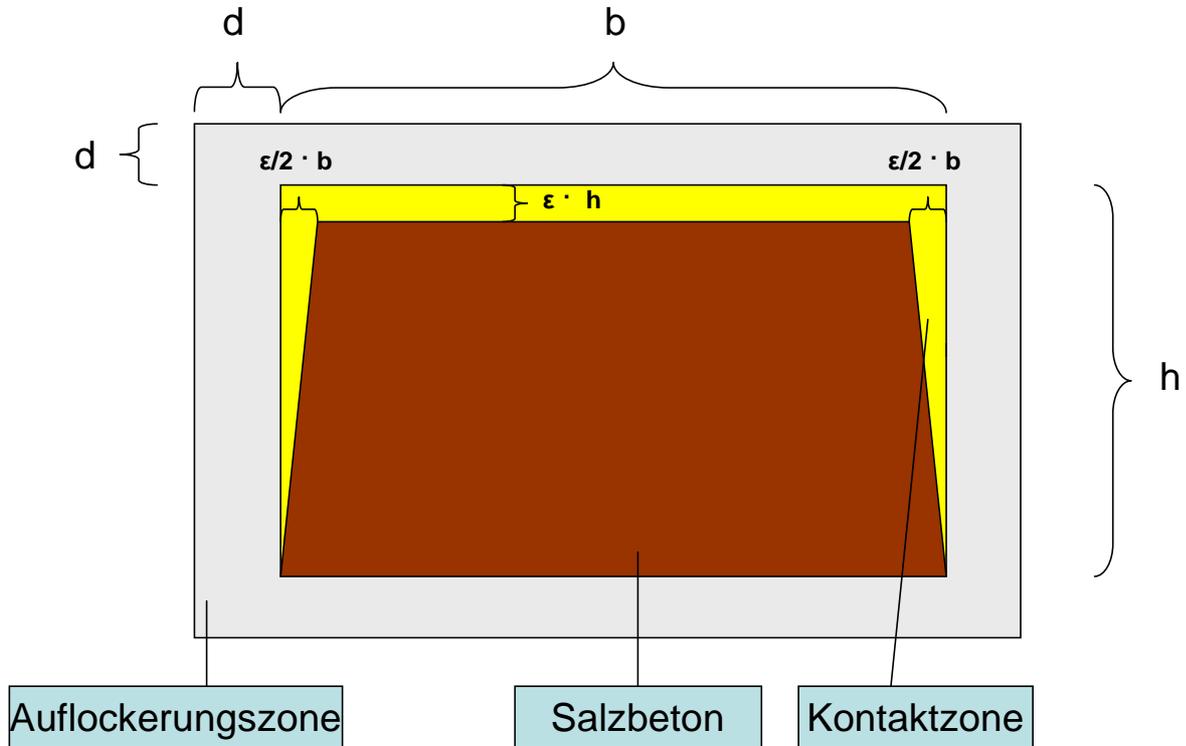


Abbildung 6-1: Modellvorstellung zur Auflockerungszone und zur Kontaktfuge nach [P 298]

Der Fluss durch das Abdichtsystem ist proportional zur querschnittsintegrierten Permeabilität QiP_{ges} des Gesamtsystems und diese ist die Summe aus der querschnittsintegrierten Permeabilität der vier Teilsysteme:

$$QiP_{ges} = QiP_{AZ} + QiP_S + QiP_F + QiP_R$$

Mit den Längenbezeichnungen aus Abbildung 6-1 und den obigen Annahmen gilt:

$$QiP_{AZ} = K_{AZ} \cdot A_{AZ} = K_{AZ} \cdot 2 \cdot d \cdot (b + h + 2 \cdot d)$$

$$QiP_S = K_S \cdot A_S = K_S \cdot b \cdot h \quad (\text{wg. Fuge nur näherungsweise})^{47}$$

$$QiP_F = K_F \cdot A_F = K_F \cdot 1,5 \cdot \varepsilon \cdot b \cdot h$$

mit

K_{AZ}, K_S, K_F = Permeabilitäten der Teilsysteme

A_{AZ}, A_S, A_F = Querschnittsflächen der Teilsysteme

Für die Wasserwegsamkeit des unverfüllten Teils der Fuge wird analog zu [P 195] der Ansatz von Tsukamoto verwendet. Nach diesem beträgt die über die Rissbreite x integrierte Permeabilität eines Risses

$$RiP = \xi \cdot x^3 / 12 \quad \text{mit } \xi = 561,9 \cdot x - 0,007 \text{ und } x = \text{Spaltbreite in [m].}$$

Um hieraus die querschnittsintegrierte Permeabilität zu erhalten, muss noch über die Länge des unverfüllten Teils der Fuge integriert werden, wobei hierbei die Breite der Fuge vom Ort abhängt. In [P 298] wird dieses Integral näherungsweise berechnet und es wird für die querschnittsintegrierte Permeabilität beider Fugenteile (links und rechts) in Summe das folgende Ergebnis angegeben:

$$QiP_R = 1/30 \cdot \xi \cdot w^3 \cdot l \quad \text{mit } \xi = 561,9 \cdot w - 0,007 \text{ und } w = \text{Spaltbreite bei } l \text{ in [m]}^{48}$$

w ist hierbei die (maximale) offene Spaltbreite am oberen Ende. Mit

$$w/l = (\varepsilon/2 \cdot b)/h$$

ergibt sich hieraus

$$QiP_R = 1/15 \cdot \xi \cdot h/b \cdot 1/\varepsilon \cdot w^4 \quad \text{mit } \xi = 561,9 \cdot w - 0,007 \text{ und } w = \text{Spaltbreite bei } l \text{ in [m].}$$

Definiert man die (effektive) Systempermeabilität als

$$K_{System} = QiP_{ges} / A_{System},$$

kann sie als Funktion von $b, h, d, w, \varepsilon, K_{AZ}, K_S$ und K_F berechnen. Zu beachten ist, dass die Größe K_{System} davon abhängt, wie die Querschnittsfläche des Abdichtsystems definiert wird. In [P 298] wird hierzu die Fläche des Streckenquerschnitts und der Auflockerungszone gewählt:

$$A_{System} = A_S + A_{AZ}$$

⁴⁷ In [P 298] wird zusätzlich noch ein Korrekturfaktor α eingeführt, der einer unvollständigen Verfüllung der Fuge auch in horizontaler Richtung Rechnung tragen soll. Da er auf das Ergebnis praktisch keinen Einfluss hat, vernachlässigen wir ihn aus Gründen der einfacheren Darstellung.

⁴⁸ Bei exakter Lösung des Integrals erhält man

$$QiP_R = 1/30 \cdot \xi^* \cdot w^3 \cdot l \quad \text{mit } \xi^* = 561,9 \cdot w - 0,00875 \text{ und } w = \text{Spaltbreite bei } l \text{ in [m]}$$

Mit $d = 0,2 \text{ m}$, $K_{AZ} = 10^{-18} \text{ m}^2$, $K_S = 10^{-19} \text{ m}^2$ und $K_F = 10^{-18} \text{ m}^2$ werden in [P 298] die in Tabelle 6-2 wiedergegebenen mittleren Systempermeabilitäten berechnet. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass das Injektionsmittel geeignet sein muss, Risse bis zu einer Breite von $50 \mu\text{m}$ verschließen zu können.

Tabelle 6-2: Mittlere Systempermeabilität einer Abdichtung in Abhängigkeit des Streckenquerschnitts, des Schwindmaßes des Salzbetons ε und der kritischen Spaltbreite w für die Injektion nach [P 298].

	Streckenquerschnitt		
	$b = 4 \text{ m} / h = 3 \text{ m}$	$b = 5 \text{ m} / h = 4 \text{ m}$	$b = 6,3 \text{ m} / h = 4,6 \text{ m}$
$\varepsilon = 0,1 \% / w = 50 \mu\text{m}$	$0,72 \cdot 10^{-18}$	$0,54 \cdot 10^{-18}$	$0,41 \cdot 10^{-18}$
$\varepsilon = 0,1 \% / w = 60 \mu\text{m}$	$1,4 \cdot 10^{-18}$	$1,0 \cdot 10^{-18} *$	$0,73 \cdot 10^{-18}$
$\varepsilon = 0,05 \% / w = 50 \mu\text{m}$	$1,2 \cdot 10^{-18}$	$0,84 \cdot 10^{-18}$	$0,61 \cdot 10^{-18}$
$\varepsilon = 0,05 \% / w = 60 \mu\text{m}$	$2,6 \cdot 10^{-18}$	$1,8 \cdot 10^{-18} *$	$1,2 \cdot 10^{-18}$

*) Bei der Angabe in [P 298] Tabelle 6.1 (10^{-19} m^2) handelt es sich um einen Schreibfehler.

Bewertung:

In Tabelle 6-3 sind die Systempermeabilitäten bei Verwendung der Ansätze und Annahmen aus [P 298], jedoch bei exakter Integration über RiP angegeben, ergänzt um die relativen Anteile, die die verschiedenen Teilsysteme Auflockerungszone (AZ), Salzbetonkörper (S), mit Injektionsmittel verfüllte Kontaktzone (F) und unverfüllte Kontaktzone (R) hierzu beitragen.

Tabelle 6-3: Mittlere Systempermeabilität einer Abdichtung in Abhängigkeit des Streckenquerschnitts und der kritischen Spaltbreite für die Injektion nach [P 298] sowie Angabe der relativen Beiträge durch die Teilsysteme (ergänzt von uns).

	Streckenquerschnitt		
	$b = 4 \text{ m} / h = 3 \text{ m}$	$b = 5 \text{ m} / h = 4 \text{ m}$	$b = 6,3 \text{ m} / h = 4,6 \text{ m}$
$\varepsilon = 0,1 \% / w = 50 \mu\text{m}$			
A_{System}	$0,68 \cdot 10^{-18}$	$0,52 \cdot 10^{-18}$	$0,40 \cdot 10^{-18}$
Anteil AZ	28,95%	30,72%	33,87%
Anteil S	11,74%	16,34%	21,71%
Anteil F	0,18%	0,25%	0,33%
Anteil R	59,13%	52,69%	44,10%
$\varepsilon = 0,05 \% / w = 50 \mu\text{m}$			
A_{System}	$1,09 \cdot 10^{-18}$	$0,79 \cdot 10^{-18}$	$0,57 \cdot 10^{-18}$
Anteil AZ	18,20%	20,14%	23,53%
Anteil S	7,38%	10,71%	15,09%
Anteil F	0,06%	0,08%	0,11%
Anteil R	74,36%	69,07%	61,27%

Es zeigt sich, dass unter den getroffenen Annahmen die unverfüllte Kontaktzone und die Auflockerungszone die dominierenden Wasserwege sind. Der Beitrag der verfüllten Kontaktzone ist dagegen vernachlässigbar.

Mittels

$$K_R = Q_i P_R / (w \cdot l)$$

lässt sich für die unverfüllte Kontaktzone eine effektive Permeabilität K_R berechnen. Diese beträgt $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ für $w = 50 \text{ }\mu\text{m}$ und $9,1 \cdot 10^{-14}$ für $w = 24 \text{ }\mu\text{m}$ (der Spaltenbreite, in die nach [P 298] das Injektionsmittel Ultrafin 12 auch nicht mehr teilweise eindringen kann). Dies zeigt, dass die in [P 195] geforderte lokale Einhaltung eines Permeabilitätswerts von 10^{-18} m^2 nach Abschluss der Injektionsarbeiten vermutlich nicht realisierbar ist. Dies ist jedoch die Voraussetzung für die Vernachlässigung der (inhomogenen) Korrosion bei der Nachweisführung.

Die in [P 298] durchgeführten Berechnungen sind u. E. auch kein Nachweis, dass die Permeabilität des Abdichtungssystems im Mittel den Wert 10^{-18} m^2 unterschreitet. Die Rechnungen weisen die Kontaktzone als die potentielle Schwachstelle des Systems aus. Gerade deren Modellannahmen sind mit erheblichen Unsicherheiten verbunden:

- Die angenommene Form der Kontaktfuge ist idealisiert und nicht nachgewiesen. Es ist plausibel, dass sich im Bereich der Firste eine größere, leicht verpressbare Fuge ausbildet. Es ist jedoch unsicher, welche konkrete Form die Kontaktfuge im unteren Teil des Streckenquerschnitts annimmt. Der Modellansatz unterstellt, dass insgesamt nur 15 cm (für $\varepsilon = 0,1 \text{ } \%$; dies entspricht dem für M2 messtechnisch ermittelten Wert) bzw. 30 cm (für $\varepsilon = 0,05 \text{ } \%$; dies entspricht dem in [G 296] für den Salzbeton geforderten Höchstwert) der Fuge eine Breite von $\leq 50 \text{ }\mu\text{m}$ aufweist. Es ist jedoch denkbar, dass auch an anderer Stelle und ggf. sogar an der Sohle lokale Ablösungen mit sehr dünner Spaltbreite entstehen können.
- Das konzeptionelle Modell schließt aus, dass sich durch nachträgliches Schrumpfen des Betonkörpers an der Firste erneut Risse bilden könnten. Die Abschätzungen in [P 298] zeigen, dass diese selbst dann von Bedeutung sind, wenn sie nur 1 % der Breite des ursprünglichen Risses aufweisen. Weiterhin wird ausgeschlossen, dass sich aus dem Injektionsmittel Überschusslösung absetzt und an exponierten Stellen (z. B. in den Ecken an der Firste) sammelt.
- Der Modellansatz von Tsukamoto wurde für Risse in 6 cm mächtigen Betonplatten ermittelt. Er kann zur Abschätzung der möglichen Größenordnung der Wasserwegsamkeit einer Kontaktfuge dienen, für eine quantitative Nachweisführung ist er jedoch nicht geeignet:
 - In der Arbeit von Tsukamoto wurde die Rissbreite ausschließlich an der Oberfläche der Betonplatte ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass die effektive Rissbreite im Inneren des Betons niedriger war. Der experimentell ermittelte Zusammenhang besteht deshalb zwischen Durchflussrate und äußerer Rissbreite, nicht zwischen Durchflussrate und innerer Rissbreite. Der Verfüllgrad der Kontaktfuge wird von der inneren Rissbreite bestimmt. Für diese dürfte der Ansatz von Tsukamoto zu niedrige Durchflussraten liefern.
 - Die Experimente wurden für einen Kontaktbereich Beton-Beton durchgeführt. Die Übertragbarkeit auf einen Kontaktbereich Salzgestein-Salzbeton ist wegen der unterschiedlichen Kornstrukturen an den inneren Oberflächen nicht nachgewiesen.

- Die Experimente wurden mit wässriger Lösung nur bis 100 µm Rissbreite durchgeführt. Die Extrapolation auf kleinere Breiten birgt zusätzliche Unsicherheiten.

Die Abschätzungen in [P 298] zeigen nach unserer Auffassung deshalb lediglich, dass eine Injektion im Hinblick auf die angestrebte Systempermeabilität erfolgreich sein kann. Der Nachweis hierfür ist jedoch experimentell zu erbringen.

Weiterhin möchten wir darauf hinweisen, dass der Auflockerungszone hier eine Mächtigkeit von 20 cm und eine Permeabilität von 10^{-18} m² zugeordnet wurde. Der Permeabilitätswert liegt damit um den Faktor 100 unter dem in [P 195] angesetzten Wert. Auch hierzu ist ein experimenteller Nachweis zu erbringen.

6.1.1.7. Angaben in [P 266]

In [P 266] wird die effektive Permeabilität einer Abdichtung aus Magnesiabeton (auf der 4. Sohle zwischen der Restgrube Bartensleben und dem Ostfeld) abgeschätzt. Analog zu [P 195] wird die Abdichtung als ein System aus Auflockerungszone, Magnesiabetonkörper und Kontaktzone beschrieben. Es wird unterstellt, dass sich die drei Systemteile wie parallel geschaltete hydraulische Widerstände verhalten. Da der Magnesiabeton beim Abbinden quillt, wird in [P 266] davon ausgegangen, dass die Kontaktzone keine Hohlräume enthält und es werden keine Injektionsmaßnahmen vorgesehen. In dem konzeptionellen Modell wird die Kontaktzone als schmale Zone mit erhöhter Permeabilität im Anschluss an den Magnesiabetonkörper behandelt (wobei in [P 266] entweder eine AZ oder eine Kontaktzone unterstellt wird, aber nicht beides gleichzeitig, s. u.). Die querschnittsintegrierte Permeabilität des Abdichtsystems setzt sich aus der Summe der querschnittsintegrierten Permeabilität der drei Teilsysteme zusammen:

$$Q_i P_{ges} = Q_i P_{AZ} + Q_i P_S + Q_i P_F$$

und

$$Q_i P_{AZ} = K_{AZ} \cdot A_{AZ} = K_{AZ} \cdot 2 \cdot d_{AZ} \cdot (b + h + 2 \cdot d_{AZ})$$

$$Q_i P_S = K_S \cdot A_S = K_S \cdot b \cdot h$$

$$Q_i P_F = K_F \cdot A_F = K_F \cdot 2 \cdot d_F \cdot (b + h + 2 \cdot d_F)$$

mit

K_{AZ}, K_S, K_F = Permeabilitäten der Teilsysteme

A_{AZ}, A_S, A_F = Querschnittsflächen der Teilsysteme

b und h = Breite und Höhe der Auffahrung

d_{AZ}, d_F = Dicke der Auflockerungszone bzw. der Kontaktzone.

Die (effektive) Systempermeabilität wird als

$$K_{System} = Q_i P_{ges} / A_{System}$$

ermittelt, wobei als Systemquerschnittsfläche A_{System} die in den LSA [P 277] und [P 278] angesetzte Fläche von 22,5 m² verwendet wird.

Die Systempermeabilität wird für drei Fälle ermittelt:

- (1) Kein Berauben der AZ und $K_{AZ} = 10^{-18} \text{ m}^2$, keine erhöhte Durchlässigkeit der Kontaktzone
- (2) Kein Berauben der AZ und $K_{AZ} = 10^{-16} \text{ m}^2$, keine erhöhte Durchlässigkeit der Kontaktzone
- (3) Berauben der AZ, erhöhte Durchlässigkeit der Kontaktzone

Die Modellparameter und die hieraus ermittelten Systempermeabilitäten sind in Tabelle 6-4 wiedergegeben.

Tabelle 6-4: Parameter und berechnete Systempermeabilitäten für die Abdichtung aus Magnesiabeton [P 266] (AZ = Auflockerungszone; KZ = Kontaktzone).

	Fall 1 AZ, keine KZ	Fall 2 AZ, keine KZ	Fall 3 KZ, keine AZ
K_{AZ}	10^{-18} m^2	10^{-16} m^2	0
K_S	$4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$	$4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$	$4 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$
K_F	0	0	10^{-17} m^2
b	5 m	5 m	6 m
h	4 m	4 m	5 m
d_{AZ}	0,5 m	0,5 m	0
d_F	0	0	0,025 m
K_{System}	$8,0 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$	$4,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$	$7,8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$

Hieraus wird der Schluss gezogen, dass ein Nachschneiden der AZ nur dann erforderlich ist, wenn sie eine hohe Permeabilität aufweist (wie im Fall 2). Über das Nachschneiden ist deshalb erst nach der Erkundung der AZ zu entscheiden.

Als Anhang liegt [P 266] eine Unterlage bei, in der die Korrosion der Magnesiabetonabdichtung bei Durchströmung mit gesättigter NaCl-Lösung geochemisch modelliert wird. Hierbei wird die (gleichmäßige) Durchströmung (nur) des Magnesiabetons unterstellt.

Bewertung:

Die hier wiedergegebenen Ausführungen aus [P 266] sind u. E. kein Nachweis dafür, dass die Systempermeabilität dieser Abdichtung 10^{-18} m^2 oder weniger beträgt bzw. dass das Abdichtungssystem keine bedeutsamen hydraulischen Inhomogenitäten aufweist. Die Ausführungen legen dar, dass dies von den Autoren vermutet wird. Die Nachweise für die angesetzten Parameter (K_{AZ} , K_S , K_F , d_{AZ} , d_F) sind gegenständlich (d. h. mittels Messungen) zu erbringen. Die Ausführungen in [P 266] zeigen nur, dass bei Einhaltung dieser Parameter die Systempermeabilität der Abdichtung den Zielwert 10^{-18} m^2 einhält.

Welchen Einfluss eine inhomogene Durchströmung des Abdichtungssystems auf die Korrosionsbeständigkeit der Abdichtung hat, geht aus [P 266] nicht hervor.

6.1.1.8. Angaben in [P 278]

In dem in [P 278] verwendeten LSA-Modell wird i. d. R. eine homogene Durchströmung der Abdichtungen unterstellt und die mögliche Existenz einer Kontaktfuge und einer Auflockerungszone vernachlässigt. Der Laugenfluss erfolgt somit ausschließlich durch den Betonkörper der Abdichtung und die Korrosion schreitet als ebene, senkrecht zur Fließrichtung stehende Front durch den Betonkörper. In einer Variante (Abschnitt 9.2.7 in [P 278]) wird jedoch für die Abdichtung aus Magnesiabeton (auf der 4. Sohle zwischen der Restgrube Bartensleben und dem Ostfeld) die (mögliche) Existenz einer Auflockerungszone berücksichtigt.

Das konzeptionelle Modell für diese Variante wird in Abschnitt 7.7.5 von [P 278] erläutert. Danach setzt sich der hydraulische Widerstand der Abdichtung aus 2 Teilen zusammen (s. Abbildung 6-2, aus [P 278]):

- dem hydraulischen Widerstand im Bereich des korrodierten Teils der Abdichtung und
- dem hydraulischen Widerstand im Bereich des nicht korrodierten Teils der Abdichtung.

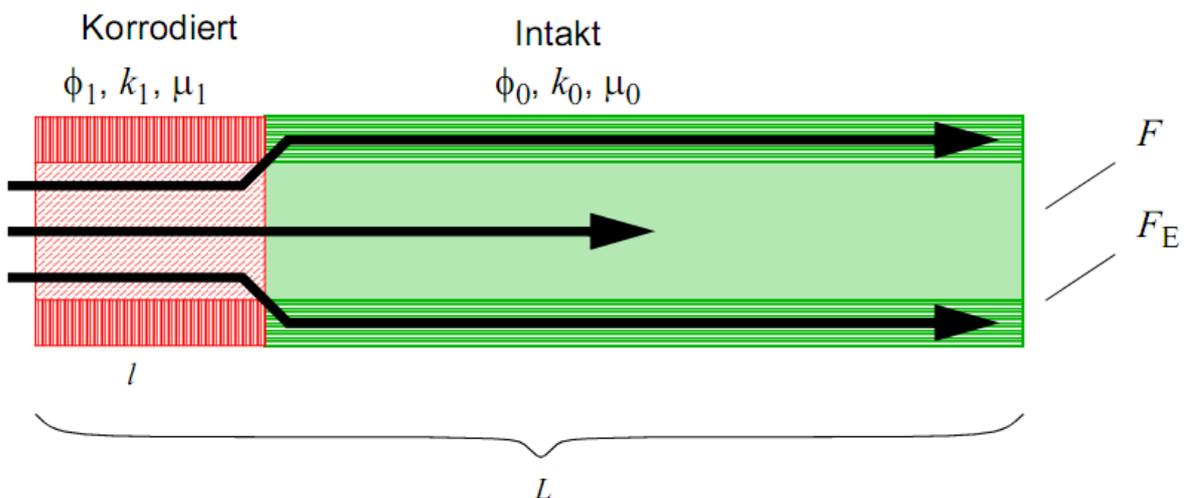


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung zum analytischen Modell der Korrosion einer Abdichtung mit Auflockerungszone (Abbildung 7.15 aus [P 278]).

In [P 278] wird die Annahme getroffen, dass die Permeabilität der AZ sehr viel kleiner als die des korrodierten Abdichtungsmaterials ist, so dass im korrodierten Bereich der Abdichtung der Laugenfluss durch die AZ vernachlässigt werden kann. Der hydraulische Widerstand in diesem Bereich ist somit der der korrodierten Abdichtung.

Im Bereich der nicht korrodierten Abdichtung kann die Lauge sowohl durch den Abdichtungskörper als auch durch die AZ fließen. Den hydraulischen Gesamtwiderstand für diesen Bereich kann man also durch eine Parallelschaltung aus dem Widerstand des (nicht korrodierten) Abdichtungskörpers und dem Widerstand der AZ beschreiben. Hierdurch erhöht sich der Fluss durch das Abdichtungssystem. Es wird angenommen, dass die gesamte, durch das System strömende Lauge zur Korrosion

beiträgt⁴⁹. Dabei wird unterstellt, dass die Korrosion auch bei dieser Variante in einer scharfen Front senkrecht zu Achse der Abdichtung erfolgt.

Mit den in [P 278] (dort Tab. 7.26) verwendeten Parametern ergibt sich eine Querschnittsfläche der AZ von 1,713 m² und – mit einer Permeabilität von 10⁻¹⁶ m² – eine querschnittsintegrierte Permeabilität der AZ von 1,713·10⁻¹⁶ m⁴. Da die Querschnittsfläche des Abdichtungskörpers 22,5 m² und somit seine querschnittsintegrierte Permeabilität 2,25·10⁻¹⁷ m⁴ beträgt, führt die Berücksichtigung der AZ zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit des Abdichtungssystems im nicht korrodierten Teil um einen Faktor 8,6. Da der Fluss durch die Abdichtung durch den nicht korrodierten Teil bestimmt wird, entspricht dies näherungsweise einer Erhöhung der anfänglichen effektiven Permeabilität der Abdichtung von 10⁻¹⁸ m² auf 8·10⁻¹⁸ m².

Bewertung: Das hydraulische Modell für die Abdichtung (als „Parallelschaltung“ von Betonkörper und AZ) ist nur unter der Annahme zutreffend, dass die Korrosion auch in diesem Fall in einer scharfen Front senkrecht zur Achse der Abdichtung erfolgt. Diese Annahme wird nicht begründet. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass die durch die AZ fließende Lauge die Abdichtung von der Seite her korrodiert und so einen Vorzugsfließweg in der Abdichtung im Kontaktbereich zur AZ schafft. Hierdurch könnte es zu einem vorzeitigen Anstieg des Laugenflusses durch die Abdichtung und zu einem früheren Ausfall der Dichtwirkung kommen. Dies wird in [P 278] nicht diskutiert bzw. berücksichtigt.

6.1.1.9. Angaben in [P 277]

Grundsätzlich wird auch in dem in [P 277] verwendeten LSA-Modell eine homogene Durchströmung des Betonkörpers einer Abdichtung unterstellt und die Kontaktfuge und die Auflockerungszone vernachlässigt. In Anlage L zu [P 277] wird jedoch ebenfalls der Fall untersucht, dass sich um die Abdichtung aus Magnesiabeton (auf der 4. Sohle zwischen der Restgrube Bartensleben und dem Ostfeld) eine Auflockerungszone mit einer erhöhten Permeabilität befindet. Die geometrischen und hydraulischen Annahmen entsprechen denen in [P 278]. Anders als in [P 278] wird hier jedoch auch der Korrosionsprozess ortsaufgelöst modelliert, so dass die Korrosion der Abdichtung von der Seite her durch die AZ abfließende Lösung explizit erfasst wird. Bei den Modellrechnungen wird für die Abdichtung als Näherung eine Zylindergeometrie angesetzt.

Die in [P 278] Anlage L berücksichtigten Prozesse sind

- der hydraulische Fluss von Lauge durch den Betonkörper der Abdichtung und die Kontaktfuge,
- die Freisetzung von Magnesium im Betonkörper bei Anwesenheit magnesiumuntersättigter⁵⁰ Lauge (modelliert als Freisetzungsrates, die von der lokal mobilisierbaren Mg-Konzentration im Feststoff und der Mg-Konzentration in der lokal anstehenden Lösung abhängt) und
- der Stofftransport infolge von Konvektion, Dispersion und Diffusion.

Da die Permeabilität des Betonkörpers als abhängig von der mobilisierbaren Mg-Konzentration im Feststoff angesetzt wird, sind die Prozesse miteinander gekoppelt.

⁴⁹ Dies ist aufgrund der Diffusion eine realistische Annahme, s. u..

⁵⁰ Untersättigung gegenüber Lösungsgleichgewicht mit der 3-1-8-Sorelphase.

Die Modellrechnungen weisen u. a. die folgenden Ergebnisse aus:

- (1) Die Reaktionszone innerhalb der Abdichtung (in horizontaler Richtung) ist schmal (für den Referenzfall im Zentrum ca. 1 m und am Rand der Abdichtung ca. 5 m; zu anderen Fällen werden keine Angaben gemacht), so dass sie näherungsweise durch eine scharfe Reaktionsfront beschrieben werden kann.
- (2) Die Reaktionsfront hat am Rand der Abdichtung nur vergleichsweise wenig Vorlauf gegenüber dem Zentrum der Abdichtung (für den Referenzfall ca. 10 m bei 110 m Abdichtungslänge; zu anderen Fällen werden keine Angaben gemacht).

Die Reaktionsfront für den Referenzfall ist in Abbildung 6-3 (Abbildung L-3 aus [P 277]) dargestellt. Zu beachten ist der unterschiedliche Maßstab in radialer und horizontaler Richtung.

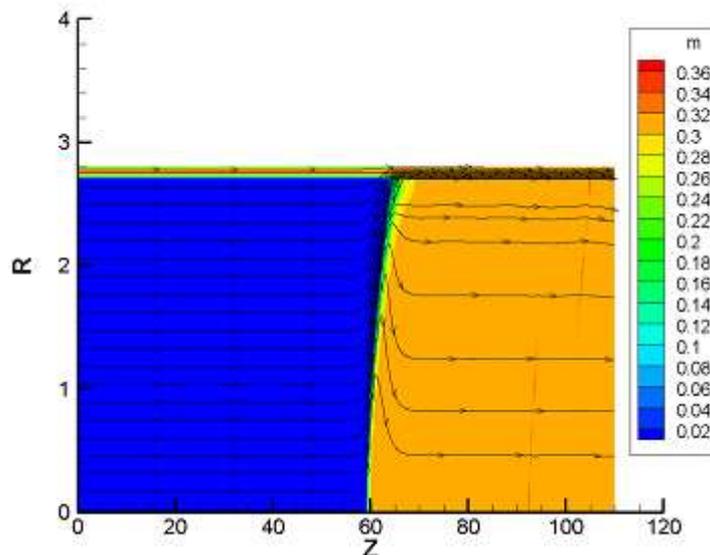


Abbildung 6-3: Reaktionszone in der Abdichtung aus Magnesiabeton im Referenzfall (Abbildung L-3 aus [P 277])

Das erste Ergebnis wird in [L 277] auf den vergleichsweise schnellen Ablauf der Korrosionsreaktion zurückgeführt. Das zweite Ergebnis ist eine Folge des diffusiven Stoffaustauschs in der Abdichtung in radialer Richtung.

Die Reaktionsrate wird

- als linear zum eluierbaren Magnesiumgehalt im Baustoff (C_S) und
- als linear zur Magnesiumuntersättigung der lokal anstehenden Lösung ($C_E - C_L$)

angesetzt, wobei C_L hierbei die Magnesiumkonzentration der lokal anstehenden Lösung und C_E die Magnesiumkonzentration der Lösung bei Gleichgewicht mit dem noch nicht vollständig korrodierten Baustoff ist⁵¹:

$$R = R_0 \cdot f_S \cdot f_L$$

mit $f_S = C_S / C_{S,0}$ und $C_{S,0}$ = eluierbarer Magnesiumgehalt im unkorrodierten Baustoff

$$f_L = (C_E - C_L) / C_E$$

Die Funktionen f_S und f_L nehmen Werte zwischen 0 und 1 an. Für R_0 wird im Referenzfall ein Wert von $3,88 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ bzw. $(8,2 \text{ Jahre})^{-1}$ angesetzt, was nach Einschätzung der Autoren in [P 277] ein niedriger Wert ist. (Ein höherer Wert würde zu einer noch schärferen Korrosionsfront führen.)

Für die Porendiffusionskonstante⁵² im Magnesiabeton wird im Referenzfall ein Wert von $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ angesetzt. Die Porendiffusionskonstante D_p wird definiert über den Stofffluss durch Diffusion:

$$J_{\text{Diff}} = - \text{div} (\varepsilon D_p \text{ grad } C)$$

mit J_{Diff} = Stofffluss pro (Beton-)Querschnitt

C = Konzentration in der flüssigen Phase

ε = Gesamtporosität

Mit den Modellergebnissen (1) und (2) wird in [P 277] begründet, dass der Effekt einer inhomogenen Korrosion des Betonkörpers (von der AZ her) vernachlässigt und die Korrosion durch ein 1-dimensionales Modell beschrieben werden kann, sofern hierbei der Laugenfluss durch die AZ dem Fluss durch die Abdichtung zugeschlagen wird. (Dies entspricht dem in Abschnitt 6.1.1 geschilderten Modell aus [P 278] sowie dem in [P 277] für die LSA verwendeten Modell.)

Bewertung: Die Argumentation in [P 277] Anlage L ist schlüssig, sofern die in Anlage L durchgeführte Modellierung sachgerecht ist. Dies ist jedoch gegenwärtig zweifelhaft. In [P 277] Anlage L werden die Modellergebnisse richtigerweise so interpretiert, dass die (im Modell angesetzte) hohe Diffusion innerhalb des Betonkörpers zu einem vergleichsweise raschen (transversalen) Konzentrationsausgleich

- zwischen der Porenflüssigkeit im Betonkörper und der Flüssigkeit in der AZ sowie
- der Porenflüssigkeit innerhalb des Betonkörpers

⁵¹ Zur Vereinfachung der Darstellung geben wir hier nur die Reaktionsrate für den Fall der Lösungsuntersättigung wieder (Fall „ $C_L \leq C_E$ in Gleichung L-7 in [P 277]). R_0 entspricht in [P 277] $k_f \cdot C_{S,0} \cdot C_E$, so dass der in [P 278] für k_f angesetzte Wert 10^7 s^{-1} einem R_0 von $3,88 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ entspricht.

⁵² Der in [P 278] Anlage L verwendete Begriff „Porendiffusionskonstante“ ist unüblich. In der Literatur wird die Diffusion in einem porösen Medium üblicherweise durch die „effektive Diffusionskonstante“ beschrieben. Dieser Begriff wird in der Literatur jedoch nicht einheitlich verwendet: Es werden zwei unterschiedliche Definitionen verwendet, die sich durch die Porosität voneinander unterscheiden. Mehrheitlich wird der Begriff „effektive Diffusionskonstante“ in der Literatur jedoch für die Größe verwendet, die in [P 278] Anlage L mit Porendiffusionskonstante bezeichnet wird. Wir übernehmen hier den Begriff Porendiffusionskonstante, um eine eindeutige Bezeichnungsweise zu erhalten und den Vergleich mit [P 277] zu erleichtern.

führt. Dies führt zu der vergleichsweise gering gebogenen Reaktionsfront innerhalb des Betonkörpers der Abdichtung. Würde die Diffusion im Betonkörper jedoch deutlich niedriger liegen als im Modell angesetzt, wären die Ergebnisse vermutlich deutlich andere.

Der in [P 277] Anlage L für die Porendiffusionskonstante angesetzte Wert von $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ beruht auf einer „Expertenschätzung“ für Salzbeton und wird nicht begründet. Wir gehen davon aus, dass die Porendiffusionskonstante von Salzbeton und vermutlich auch die von Magnesiabeton deutlich niedriger liegen. Der in [P 277] angesetzte Wert entspricht etwa dem von Mg in einem Wasserkörper ($7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). In einem porösen Medium liegt dieser Wert niedriger, da

- die effektiven Weglängen über die Porenkanäle länger sind (ausgedrückt als „Tortuosität“),
- kleine Poren einen zusätzlichen Reibungswiderstand gegenüber Diffusionsprozessen aufweisen (ausgedrückt als „Konstriktivität“) und
- ein Teil der Poren tote Enden darstellen.

Sofern es zu chemischen Reaktionen (z. B. Sorption) zwischen dem Stoff und dem porösen Medium kommt, verzögert sich die Diffusion noch weiter.

Die Rückhalte Mechanismen wirken um so stärker, je kleiner die Poren sind. Da Betone i. d. R. einen hohen Anteil an Feinporen aufweisen, sind die Rückhalte Mechanismen hier typischerweise sehr hoch. In der Literatur werden für Beton für den Tracer Chlorid (Cl) effektive Diffusionskonstanten (dies entspricht der Porendiffusionskonstante in [P 277]) von $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ angegeben. Ein niedriger w/z-Wert sowie der Einsatz von Hochofenzementen und Flugaschen führen zu kleineren Porengrößen und damit zu niedrigen Porendiffusionskonstanten. Uns vorliegende Untersuchungen an Betonen aus Hochofenzementen weisen für Cl Werte zwischen $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ und $3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ aus [BS 05]. Sie liegen etwa um eine Größenordnung unter den entsprechenden Werten von Betonproben aus reinem Portlandzement.

Der korrodierte Beton dürfte eine wesentlich höhere Porendiffusionskonstante aufweisen, da sein Anteil an Großporen deutlich höher sein dürfte. Dies zeigt seine erhöhte Permeabilität.

Wir kommen deshalb zu dem Ergebnis, dass entweder die in [P 277] angesetzte Porendiffusionskonstante experimentell belegt werden sollte oder die Gültigkeit der Schlussfolgerungen in [P 277] Anhang L auch für Porendiffusionskonstanten im unkorrodierten Beton bis $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ nachzuweisen ist.

6.1.2. Bewertung der Konsistenz der Unterlagen

In [P 195] (nicht zurückgezogen und in [A 281Q] als Quelle angegeben) wird die Anforderung erhoben, dass die Permeabilität im Abdichtsystem lokal $\leq 10^{-18} \text{ m}^2$ betragen muss. Dies dient als Argument, dass ein (inhomogener) chemischer Angriff bei der Nachweisführung nicht berücksichtigt werden braucht. Für die Kontaktzone und die Auflockerungszone wird dieser Nachweis für die Permeabilitätsbegrenzung jedoch nicht geführt. Statt dessen werden die folgenden Teilnachweise geführt:

- [P 195] enthält eine Nachweisführung, dass sich die Spannungszustände (und damit die Permeabilität) in der Auflockerungszone im Laufe der Zeit gegenüber dem Anfangszustand nicht verschlechtern.
- [P 255] enthält eine Nachweisführung, dass die Permeabilitäten in der Auflockerungszone spätestens nach 1.000 Jahren auf den Wert 10^{-18} m² abgesunken ist.
- [P 255] enthält eine Nachweisführung, dass die Kontaktzone im Laufe der Zeit (bei steigendem hydrostatischen Druck) hydraulisch dicht bleibt. Die Nachweisführung setzt implizit voraus, dass die folgenden Bedingungen erfüllt sind:
 - Die Kontaktzone ist zu Beginn hydraulisch dicht.
 - Die Vorspannung in der Kontaktzone beträgt 2 MPa.
 - Chemischer Angriff kann in der Kontaktzone vernachlässigt werden.

Es fehlen die Nachweise,

- dass die Auflockerungszone schon unmittelbar nach Errichtung der Abdichtung eine Permeabilität von $\leq 10^{-18}$ m² aufweist, und
- dass die Kontaktzone schon unmittelbar nach Errichtung der Abdichtung eine Permeabilität von $\leq 10^{-18}$ m² aufweist.

Statt dessen wird dargelegt, dass der zuletzt genannte Nachweis nicht ohne weitergehende Untersuchungen führbar ist. Wir gehen davon aus, dass diese Nachweise experimentell und in situ zu führen sind. Theoretische Überlegungen auf der Basis von Literaturstudien werden hierzu nicht ausreichend sein.

In der Unterlage [P 298] wird dagegen eine andere Nachweismethodik verfolgt. Hier wird zugelassen, dass die Permeabilität im Abdichtungsbauwerk lokal über 10^{-18} m² liegen darf. Es wird jedoch gefordert, dass die über den Bauwerksquerschnitt gemittelte Permeabilität diesen Wert unterschreitet. Dies setzt jedoch voraus, dass die Auswirkungen einer inhomogenen Durchströmung auf die Korrosion der Abdichtung vernachlässigt werden kann. Dieser Nachweis liegt nicht vor.

Wir kommen deshalb bzgl. der Vollständigkeit der Unterlagen zu folgenden Ergebnissen:

- Vom BfS sollte dargelegt werden, auf welcher Nachweismethodik⁵³ der als Sicherheitsbericht fungierende Plan beruht: Ist es die Nachweismethodik entsprechend der als Quellen angegebenen unterlagen [P 195] und [P 255] oder die entsprechend [P 298]?
- Die Nachweisführung ist entsprechend der gewählten Nachweismethodik zu vervollständigen.

Die sachliche Richtigkeit der vorliegenden Teilnachweise wurde nicht geprüft.

⁵³ Bzgl. des Nachweises der Funktionsfähigkeit der Abdichtungen im Steinsalz.

6.1.3. Abschätzung der Relevanz der Inhomogenität einer Durchströmung

Der wesentliche Mechanismus, der bei den Abdichtungen zu einem vorzeitigen Versagen der Abdichtwirkung führen kann, ist eine Aufweitung von Vorzugsfließwegen durch Korrosion. Um schädigend zu wirken, müssen sich die Fließwege möglichst rasch auf ihrer gesamten Länge aufweiten. Würde sich die Aufweitung nur auf den Anfangsbereich des Fließwegs beschränken, würde der Fluss durch den hydraulischen Widerstand des (noch nicht aufgeweiteten) hinteren Abschnitts begrenzt und kaum zunehmen. Würde sich der Fließweg dagegen möglichst gleichmäßig auf seiner gesamten Länge aufweiten, würde sich der Fluss durch den Fließweg schon zu einem frühen Zeitpunkt deutlich erhöhen. Damit würde auch das in die Abdichtung eindringende Korrosionspotential frühzeitig ansteigen und zu einem vorzeitigen Versagen der Abdichtungs-
wirkung führen.

Aus dieser Überlegung folgt, dass ein lokales Vorseilen der Reaktionszone (hier am Rand des Betonkörpers) vor der eigentlichen Reaktionsfront (hier im Zentrum des Betonkörpers) schädlich ist, eine möglichst gleichmäßige, wenig gekrümmte Reaktionsfront dagegen von Vorteil. Damit es zu einem lokalen Vorseilen der Reaktionszone kommt, darf die (an dieser Stelle vorseilende) Lösung nicht zu schnell mit dem benachbarten Abdichtungsmaterial reagieren. Andernfalls würde die Lösung ihr Korrosionspotential rasch abbauen und könnte es nicht in den hinteren Abschnitt des Vorzugsfließwegs hineinragen. Da die eigentliche Korrosionsreaktion relativ schnell ablaufen dürfte, ist der die Korrosionsreaktion verzögernde bzw. begrenzende Schritt vermutlich die Diffusion des Korrosionspotentials⁵⁴ aus dem Vorzugsfließweg in den Betonkörper hinein. Dieser Schritt darf allerdings auch nicht zu langsam erfolgen. Andernfalls würde das Korrosionspotential am Ende der Abdichtung ausgetragen werden, ohne reagiert zu haben.

Der diffusive Stofffluss zwischen Vorzugsfließweg und (nicht bzw. nicht vollständig korrodiertem) Beton hängt neben der Diffusionskonstante auch vom Konzentrationsgradient in der Porenlösung ab. Dieser ist um so höher, je geringer der Abstand zwischen Vorzugsfließweg und reaktionsfähigem Beton ist. Es ist deshalb von großer Bedeutung, wie nahe der Vorzugsfließweg an dem reagierenden Beton liegt. Werden beide durch eine Zone voneinander getrennt, in der die Mg-Freisetzung (bzw. im Fall des Salzbetons die Mg-Aufnahme) aus dem Feststoff schon weitgehend abgelaufen ist, die aber trotzdem noch immer eine vergleichsweise niedrige Permeabilität aufweist (z. B. weil zur Permeabilitätserhöhung noch weitere Umlagerungsprozesse ablaufen müssen), dann führt dies zu einer Reaktionsverzögerung und damit zu einer geringeren Abreichung des Korrosionspotentials der Lösung im Vorzugsfließweg.

Bei einer quantitativen Abschätzung der Wirkung von Vorzugsfließwegen auf die Korrosion einer Abdichtung sind deshalb die folgenden Zusammenhänge zu beachten und im Modell abzubilden:

- Die Korrosion des Betons in Abhängigkeit der lokalen Lösungszusammensetzung.

⁵⁴ Im Fall der Abdichtungen aus Salzbeton besteht das Korrosionspotential i. W. aus den Mg-Ionen der Lösung. Im Fall der Abdichtungen aus Magnesiabeton besteht das Korrosionspotential dagegen aus dem Magnesiummangel (d. h. der Magnesiumuntersättigung) der Lösung. Auf mikroskopischer Ebene diffundiert hier eigentlich Magnesium aus dem Magnesiabeton in die Lauge im Vorzugsfließweg und nicht ein „Magnesiummangel“ als dem Vorzugsfließweg in den Magnesiabeton. Für die Überlegungen ist dies jedoch ohne Belang.

- Die Diffusionskonstante im Beton in Abhängigkeit seines Korrosionsgrads (hierbei sind möglicherweise stattfindende Verzögerungsmechanismen zu berücksichtigen, s. o.).
- Die Permeabilität im Beton in Abhängigkeit seines Korrosionsgrads (hierbei sind möglicherweise stattfindende Verzögerungsmechanismen zu berücksichtigen, s. o.).
- Die Veränderung der Fließwege im Abhängigkeit der sich verändernden Permeabilität des Betons.

Aufgrund dieser Kopplungen ist eine einfache analytische Abschätzung der Wirkung von Vorzugsfließwegen auf die Korrosion einer Abdichtung nicht möglich. Allerdings kann durch eine einfache Abschätzung verdeutlicht werden, dass es bei einer niedrigen Diffusionsrate im Betonkörper durchaus zu einer der eigentlichen Reaktionsfront vorausseilenden Korrosion des Rands der Abdichtung und damit zur Ausbildung eines Vorzugsfließwegs am Rand der Abdichtung kommen kann.

Mit den Modellparametern aus [P 277] Anlage L

Permeabilität der AZ =	10^{-16} m^2
Porosität der AZ =	1 %
Viskosität =	$2,04 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (NaCl-gesättigte Lösung)
Druckdifferenz auf die Abdichtung:	5,4 MPa
Länge der Abdichtung:	110 m

erhalten wir für die Abstandsgeschwindigkeit in der AZ einen Wert von 7,6 m/a.⁵⁵ Die Aufenthaltszeit der Porenlösung in der 110 m langen AZ beträgt somit 14,5 Jahre. Bei einer Diffusionskonstanten im Beton von $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ beträgt die Eindringtiefe für Stoffe aus der AZ in den Betonkörper in dieser Zeit $(D \cdot t)^{1/2} = 5 \text{ mm}$. Das Porenvolumen in der AZ (Mächtigkeit 10 cm, Porosität 1 %) und in der Eindringzone des Betons (Mächtigkeit 5 mm, Porosität 20 %) liegen somit in der gleichen Größenordnung. Dies zeigt, dass die in die AZ einströmende Lösung ihr Korrosionspotential weit in die AZ eintragen kann und dieses nicht schon nach wenigen Metern abgebaut ist.

Zur Quantifizierung dieses Effekts ist eine numerische Simulation (mittels FEM) erforderlich.

6.2. Bedeutung von Querrissen

Risse quer zur Längsachse der Abdichtungen führen unmittelbar zu keiner Erhöhung des Fluidflusses durch die Abdichtung. Bestehen in der Abdichtung jedoch auch Vorzugsfließwege in Richtung der Längsachse, können die Querrisse die effektive Permeabilität der Abdichtung indirekt beeinflussen:

- Sofern es in der Abdichtung (einschließlich KF und AZ) räumlich begrenzte, zunächst isolierte Vorzugsfließwege in Richtung der Längsachse der Abdichtungen gibt, können diese durch die Querrisse miteinander hydraulisch verbunden werden. Dadurch steigt die Systempermeabilität.

⁵⁵ In [P 278] Anlage L werden 13 m/a angegeben. Diesen Wert können wir nicht nachvollziehen.



- Wenn es in der Abdichtung Vorzugsfließwege in Richtung der Längsachse der Abdichtungen gibt und wenn korrodierende Fluide auf diesen Fließwegen die Abdichtung durchfließen, dann führen die Querrisse zu einer stärkeren Verteilung der korrodierenden Stoffe in der Abdichtung, so dass die lokale Korrosion im Bereich der Vorzugsfließwege verzögert wird. Der lokale Durchbruch (d. h. das Entstehen eines vollständig korrodierten, vergleichsweise hoch leitfähigen lokalen Fließwegs) wird hierdurch verzögert.

7. GLOSSAR

Eigenschaft	Merkmal eines (Teil-)Systems, das seine Reaktionsweise auf Zustandsänderungen charakterisiert
Ereignis	(zeitlicher) Ablauf einer Zustandsänderung, die ihre Ursache außerhalb des betrachteten (Teil-)Systems hat (entspricht dem englischen „event“)
FEP	feature(s), event(s), process(es) (Merkmal(e), Ereignis(se), Prozess(e)) (Abk. wird für Singular und Plural verwendet.)
Kenngroße	mathematische Größe zur makroskopischen Beschreibung einer Eigenschaft eines (Teil-)Systems
Materialeigenschaft	Merkmal eines Materials zur Charakterisierung seiner Reaktionsweise auf Zustandsänderungen
Materialkenngroße	mathematische Größe zur makroskopischen Beschreibung einer Materialeigenschaft
Merkmal	Zustand oder Eigenschaft eines (Teil-)Systems (entspricht dem englischen „feature“)
Prozess	(zeitlicher) Ablauf einer Zustandsänderung, die ihre Ursache innerhalb des betrachteten (Teil-)Systems hat (entspricht dem englischen „process“)
Zustandsgröße	Mathematische Größe zur Beschreibung eines (Teil-) Systemzustands

8. LITERATUR

- [A 281Q] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ
Quellennachweis für Aussagen im
Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben
(einschließlich der Endlagerung bereits zwischengelagerter radioaktiver Abfälle und
noch anfallender betrieblicher radioaktiver Abfälle)
Salzgitter, 13. Januar 2009
- [BS 05] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH
Verbundprojekt Kontaminierter Beton: Betonfreigabe – Betonrezyklierung
Schlussbericht zum Fördervorhaben BMBF 02 S 7900
Aachen, 31.05.2005
- [BS 09] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH
ERA Morsleben – Bewertung der Langzeitsicherheitsanalyse
- Wasserpfad -
Ableitung von Anforderungen an das Verfüllmaterial (AP 8 bis 10)
Aachen, 07.10.2009
- [DBE 06] WEIDENBACH
ERAM - HIS
DBE, 08.08.2006
- [G 296] SCHRÖPFER
Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz
DBE, 26.01.2009
- [I 343] GUTSCH, A.-W., SEIFRIED, A.
Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton von Strecken-
verfüllungen, ERA Morsleben Streckenabschlüsse T2
Nachweise, Verbundversuche, Berechnungen
Untersuchungsbericht
iBMB / MPA-TU Braunschweig, Braunschweig, 06.03.2007
- [I 366] SCHRÖPFER
ERAM – Planungsstudie zum In-situ-Versuch „Abdichtbauwerk im Steinsalz“
DBE, 28.09.2009

- [IBMB 01] SCHMIDT-DÖHL, F.
Dauerhaftigkeitsmodellierung für mineralische Baustoffe
in: Beiträge zum 40. Forschungskolloquium des DAfSTb am 11. und 12. Oktober in
Braunschweig
IBMB, H. 160, 2001
(Literaturstelle /27/ aus [P 195], liegt uns nicht vor)
- [IBMB 03] SCHMIDT-DÖHL, F.
Ermittlung von Parametern zur Bewertung der Langzeitstabilität von Salzbeton im
Kontakt mit salinaren Lösungen
Bericht zum AP 9M 22345021
Braunschweig, IBMB, 2003
(Literaturstelle /28/ aus [P 195], liegt uns nicht vor)
- [NEA 00] OECD / NEA
Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste
OECD / NEA, Paris, 2000
- [P 146] MEYER, T. ET AL.
Endlager Morsleben - Zementkorrosion
Geochemische, geomechanische und strömungsmechanische Untersuchungen zur
Absicherung der Modellansätze von Langzeitsicherheitsanalysen
Abschlussbericht
GRS und iBMB, Braunschweig, 01.04.2002
- [P 180] MEYER, T. ET AL.
Endlager Morsleben - Korrosion von Salzbeton durch salinare Lösungen
Abschlussbericht
GRS und iBMB/MPA, Braunschweig, 31.10.2003
- [P 189] NIEMEYER ET AL.
Endlager Morsleben - Langzeitsicherheitsnachweis für das verfüllte und verschlossene
Endlager mit dem Programm PROSA
Colenco Power Engineering, Baden/CH, 04.07.2004
- [P 192] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS)
Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Materialeigenschaften und
Materialkennwerte Salzbeton M2
17.11.2004

- [P 195] MÜLLER-HOEPPE, POLSTER
Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen – Konzeptplanung und
Nachweisführung
DBE, 28.06.2004
- [P 255] MAUKE, R.; LASKE, D.
Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen
Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der
Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweiskonzept für das südliche Wetterrollloch
BfS, 16.03.2007
- [P 256] MAUKE, R.
Stilllegung Endlager Morsleben
Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen
Konzept- und Systembeschreibung
BfS, Salzgitter, 14.03.2007.
- [P 262] MOHLFELD, M., STIELOW, B.
Numerische Untersuchungen zur Übertragbarkeit der exemplarischen
Nachweisführung der Streckenabdichtung von der 3. auf die 4. Sohle
Zerna Ingenieure, Bochum, 30.05.2007
- [P 263] HEIMER, S., MOHLFELD, M., SCHOLZEN, A.
Konzeptplanung und Nachweisführung für das Abdichten des südlichen
Wetterrolllochs
Zerna Ingenieure, Bochum, 14.02.2007
- [P 264] PETTENPOHL, H. U.A.
Endlager Morsleben
Die Errichtung und Nachweisführung für die Funktionstüchtigkeit von temporären
Abdichtungen
DMT GmbH, Essen, 31.01.2007
- [P 266] K-UTEC AG SALT TECHNOLOGIES
Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit
aus Magnesiabeton
Sondershausen, 17.09.2008
- [P 277] AF-COLENCO AG
Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager
mit dem Programm PROSA
Baden (CH), März 2009

- [P 278] GRS
Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager
mit dem Programmpaket EMOS
Braunschweig, 27.03.2009
- [P 298] IGH INGENIEURGESELLSCHAFT GRUNDBAUINSTITUT
Injektion von Abdichtungssegmenten mit Feinstsuspension
Hannover, 26.02.2009
- [P 299] HAGEMANN, S., XIE, M., HERBERT, H.-J.
Endlager Morsleben
Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Korrosion von Salzbeton durch saline
Lösungen
GRS, 30.03.2009