

Arbeitsgruppe Morsleben (AG Morsleben)

**Zwischenbericht**

**Prüfungsphase C**

**im Rahmen der Prüfung der Unterlagen zum**

**Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive  
Abfälle Morsleben (ERAM) – Prüfkomplex: Schachtverschlussystem der  
Schächte Bartensleben und Marie**

**Unterlagen P 500, P 501, I 503**

**Auftraggeber:** Ministerium für Landwirtschaft und  
Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt  
Rahmenvertrag Nr. 29/02/1998  
Einzelauftrag Nr. 16/07/2011

**Auftragnehmer:** IHU Geologie und Analytik GmbH  
Dr.-Kurt-Schumacher-Straße 23  
39576 Stendal

**Verantwortliche  
Bearbeiter:** PD Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh TU-Clausthal  
Dr. U. Stahl IHU Stendal

Der Prüfbericht umfasst 54 Seiten

**Datum:** 11.02.2013

**Unterschrift:** .....  
(Dr. U. Stahl)

Der Prüfbericht wurde im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU LSA) erstellt. Das MLU LSA behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des MLU LSA zitiert, vervielfältigt oder Dritten zugänglich gemacht werden. Der Bericht gibt die Meinung und Ansicht der Verfasser wieder, diese muss nicht in jedem Falle mit der Meinung des MLU LSA übereinstimmen.

**Erklärung:**

Die Unterzeichnenden versichern, das Gutachten unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen frei von Ergebnisanweisungen erstellt zu haben.

**Datum:** 11. Februar 2013

**Unterschrift:**

.....  
(Dr. U. Stahl)

Mitglieder der Arbeitsgruppe Morsleben:

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

TU Clausthal  
Professur für Deponietechnik und Geomechanik  
Erzstraße 20  
38678 Clausthal-Zellerfeld

GTU Ingenieurbüro Prof. Dr. Knoll  
Berliner Straße 70  
14467 Potsdam

Nachauftragnehmer:

Brenk Systemplanung GmbH  
Heider-Hof-Weg 23  
52080 Aachen

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 Sachstand und Methodik der Prüfung</b>	<b>4</b>
1.1 Vorbemerkungen	4
1.2 Gegenstand der Prüfungen	5
1.3 Methodik der Prüfung	6
1.3 Stand der bisherigen Prüfungen	7
<b>2 Unterlagen zur vertiefenden Nachweisführung der Schachtverfüllung beim Schacht Marie (P 500)</b>	<b>10</b>
2.1 Vorbemerkungen	10
2.2 Prüfung "Vertiefende Planung - Schacht Marie"	10
2.2.1 Aussagen des Antragstellers	10
2.2.2 Bewertung der Unterlage	11
2.3 Prüfung Anlage 1: "Gesteinsmechanische Laboruntersuchungen und Ableitung von Stoffmodellparametern"	11
2.3.1 Aussagen des Antragstellers	11
2.3.2 Bewertung der Unterlage	12
2.4 Prüfung Anlage 2: "Numerische Modellierungen zur Bewertung der Situation im Bereich der Erkundungsgrubenbaue der 310m-Sohle des Schachtes Marie"	21
2.5 Prüfung Anlage 3: "Numerische Modellrechnungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Schachtverfüllung für den Schacht Marie"	22
<b>3 Numerische Modellrechnungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Schachtverfüllung für den Schacht Bartensleben (P 501)</b>	<b>23</b>
3.1 Aussagen des Antragstellers	23
3.2 Prüfung der Unterlage P501	24
3.2.1 Bewertung Gesamtkonzeption	24
3.2.2 Bewertung Berechnungsmodell	24
3.2.3 Bewertung Berechnungsergebnisse	26
<b>4 Bergtechnische Erprobung von Bitumen/Asphalt als Dichtmaterial in langzeitsicheren Schachtverschlussbauwerken (I 503)</b>	<b>30</b>
4.1 Vorbemerkungen	30
4.2 Vorbereitende Untersuchungen	30
4.2.1 Zielstellung der Untersuchungen	30
4.2.2 Auswahl der Baustoffe	32
4.2.3 Untersuchungen am Basaltschotter	33
4.2.4 Untersuchungen am Kalksteinfüller	35
4.2.5 Untersuchungen der Eigenschaften des Bitumens	36
4.3 Untersuchungen zur Optimierung der Benetzungsfähigkeit von Bitumen	38
4.3.1 Grundlagen und Zielstellung der Untersuchungen	38
4.3.2 Untersuchung zur Bestimmung der freien Oberflächenenergie	39
4.3.3 Untersuchungen zur Benetzungsfähigkeit von Bitumen	40
4.4 Halbtechnische Versuche zum Einguss von Bitumen in Basaltschotter	42
4.4.1 Grundlagen und Zielstellung der Untersuchungen	42
4.4.2 Untersuchungen zur Vergießbarkeit	42
4.4.3 Untersuchungen zum Abdichtverhalten	44
<b>5 Zusammenstellung der durch P500, P501 und I503 noch nicht bearbeiteten Fragestellungen aus Prüfungsphase</b>	<b>47</b>
<b>6 Liste der verwendeten Unterlagen</b>	<b>49</b>
<b>7 Zusammenstellung der Hinweise, Empfehlungen und Forderungen</b>	<b>51</b>

## **1 Sachstand und Methodik der Prüfung**

### **1.1 Vorbemerkungen**

Mit Datum vom 21.12.2005 wurde die AG Morsleben (im Weiteren als „Prüfer“ bezeichnet) durch das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) mit der Prüfung von Unterlagen zum Prüfkomples „Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie“ beauftragt. Für die Prüfung der Unterlagen wurde vereinbart, zunächst in einer so genannten Prüfungsphase (a) zu bewerten, ob die vom Antragsteller dokumentierten konzeptionellen Planungen zur konstruktiven Gestaltung der Schachtverschlüsse dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und darauf aufbauend in einer nachfolgenden Prüfungsphase (b) durch eigene, von der Vorgehensweise des Antragstellers unabhängige rechnerische Untersuchungen zu prüfen, ob die rechnerischen Nachweise die Forderungen an Standsicherheit, Dichtheit und Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung der relevanten Belastungsszenarien erfüllen und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Bearbeitung der Prüfungsphase (a) wurde mit Vorlage des Prüfberichtes /U11/ im Januar 2007 vorläufig abgeschlossen. Die im Rahmen von Prüfungsphase (b) durchgeführten rechnerischen Untersuchungen mit Bewertung der vorliegenden Berechnungsergebnisse hinsichtlich Standsicherheit, Dichtheit und Gebrauchstauglichkeit sind mit Datum vom 16.12.2009 durch den Prüfbericht /U12/ vorgelegt worden.

Der nachfolgende Zwischenbericht dokumentiert schließlich erste Ergebnisse der so genannten Prüfungsphase (c), in deren Rahmen die AG Morsleben durch das MLU LSA als Planfeststellungsbehörde für die Stilllegung und Verwahrung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) mit der Prüfung ausgewählter weiterführender Unterlagen zum Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie beauftragt wurde. Inhaltlich behandelt der Zwischenbericht die vom Antragsteller (AS bzw. BfS - Bundesamt für Strahlenschutz) mit P500 (/U1/), P501 (/U2/) und I503 (/U3/) bezeichneten Unterlagen.

## 1.2 Gegenstand der Prüfungen

Gegenstand der Prüfung im vorliegenden Zwischenbericht sind die Unterlagen P 500, P 501 und I 503 des Antragstellers wie folgt:

- /U1/ Unterlagen zur vertiefenden Nachweisführung der Schachtverfüllung beim Schacht Marie, BfS, Stielow, Stand 24.05.2011 (P 500)
- /U2/ Numerische Modellrechnungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Schachtverfüllung für den Schacht Bartensleben, IfG, Weise, Stand 17.11.2011 (P 501)
- /U3/ Bergtechnische Erprobung von Bitumen/Asphalt als Dichtmaterial in langzeitsicheren Schachtverschlussbauwerken; Labor- und halbtechnische Versuche, Abschlussbericht, TU Bergakademie Freiberg, Kudla, Glaubach, Hofmann, Stand: 16.09.2012 (I 503)

Soweit im Sachzusammenhang für erforderlich und relevant erachtet, wurden im Rahmen der Prüfung als weitere Unterlagen aus den Prüfungsphasen (a) und (b) berücksichtigt:

- /U4/ Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben (P 182)
- /U5/ Nachweisführungen zur Langzeitstabilität, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben (P 177)
- /U6/ Konzept- und Systembeschreibung Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie (G 183)
- /U7/ Planungsstudie zum Schachtverschluss der Schächte Bartensleben und Marie. Preuss, J. & Wellmann, P. L.; BfS; 2000
- /U8/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Bartensleben (I 107)
- /U9/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Marie (I 108)
- /U10/ Untersuchung zur Entwicklung und Bewertung von Stilllegungskonzepten nach dem Abdichtkonzept (I 114)

### 1.3 Methodik der Prüfung

Die nachfolgende Prüfung erfolgt jeweils getrennt für die **Unterlage P 500 in Abschnitt 2**, für die **Unterlage P 501 in Abschnitt 3** und für die **Unterlage I 503 in Abschnitt 4** des vorliegenden Zwischenberichtes. Die Prüfung erfolgt im Grundsatz abschnittsbezogen, wobei den Prüfergebnissen bzw. Bewertungen jeweils eine kurze Zusammenstellung des Inhaltes der betreffenden Abschnitte der Prüfunterlagen vorangestellt ist. Ziel dieser Zusammenstellung ist es, dem Leser in knapper und übersichtlicher Form einen Überblick über die wesentlichen und im Rahmen der Prüfung sachlich relevanten Inhalte zu ermöglichen. Danach werden die Prüfkriterien erläutert und die Ergebnisse der Bewertung dargestellt. Der methodische Aufbau des Prüfberichtes erfolgt damit in Anlehnung an die Anforderungen, die in der Rahmenrichtlinie über die Gestaltung von Sachverständigengutachten in atomrechtlichen Verwaltungsverfahren /U14/ genannt werden.

**Bewertungskriterien der Prüfung** sind soweit ohne eigene, von der Vorgehensweise des AS unabhängige Berechnungen und Materialuntersuchungen möglich, **Plausibilität, Vollständigkeit, sachliche Richtigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ausführungen**. Die Ergebnisse der Bewertung werden schließlich den Rubriken

- Hinweise,
- Empfehlungen und
- Forderungen

zugeordnet und fortlaufend nummeriert. Die Rubrik „**Hinweise**“ beinhaltet Angaben zu formalen Mängeln wie z.B. das Fehlen von Anlagen, unvollständige Erläuterungen oder fehlende Erklärungen und Definitionen zu verwendeten Formeln oder Symbolen etc.

Unter der Rubrik „**Empfehlungen**“ werden Vorschläge zusammengestellt, die nach Einschätzung der Prüfer zu einer umfassenderen und/oder transparenteren Darstellung der Ergebnisse führen. Angesichts der weitgehend fehlenden Normung im Bereich der sicherheitlichen Nachweisführung für untertägige geotechnische Anlagen und der damit verbundenen Notwendigkeit, individuell durch den jeweiligen Bearbeiter geprägte Einschätzungen und Beurteilungsmaßstäbe zu entwickeln, sind unter der Rubrik „Empfehlungen“ zusammengestellte Anmerkungen als Anregungen für eine fachliche Diskussion zu verstehen. Insofern stellen die unter „Empfehlungen“ zusammengestellten Anmerkungen keine sachlichen Mängel dar, sondern dokumentieren vielmehr unter dem Zugeständnis individueller Vorgehensweisen die

Bandbreite möglicher Einschätzungen und möglicher Nachweismethoden im jeweiligen Sachzusammenhang.

In der Rubrik „**Forderungen**“ werden schließlich diejenigen kritischen Anmerkungen und identifizierten Defizite zusammengefasst, die nach Einschätzung der Prüfer einer Nachbearbeitung bedürfen.

Eine Zusammenstellung der berichtsspezifisch abgeleiteten Hinweise, Empfehlungen und Forderungen erfolgt am Schluss des Prüfberichtes.

#### Hinweis:

Im Folgenden sind aus den Prüfunterlagen /U1/ bis /U3/ wörtlich zitierte Formulierungen zur Unterscheidung von den Formulierungen der Prüfer *kursiv* gedruckt.

### **1.3 Stand der bisherigen Prüfungen**

Die im Rahmen des Prüfkomplexes „Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie“ bisher erarbeiteten Aussagen und Einschätzungen der AG Morsleben wurden in zwei getrennten Prüfberichten dokumentiert:

Der mit Bearbeitungsphase (a) in 2007 dem MLU übergebene Prüfbericht /U11/ beinhaltet eine auf Plausibilität, Vollständigkeit und sachliche Richtigkeit ausgerichtete Bewertung der vom AS vorgelegten Unterlagen P 182, P 177, G 183 und der so genannten Planungsstudie (Preuss & Wellmann).

Die für eine abschließende Beurteilung der vorstehend genannten Unterlagen für erforderlich erachteten eigenen rechnerischen Untersuchungen zum langfristigen Tragverhalten und zur mechanisch / hydraulischen Integrität der Schächte bzw. der Schachtverschlussysteme wurden im Bericht zur Prüfungsphase (b) /U12/ dokumentiert.

Als zusammenfassendes Ergebnis der Bearbeitungsphasen (a) und (b) kamen die Prüfer zu der Einschätzung, dass keine begründeten Zweifel an der grundsätzlichen Machbarkeit und an der langzeitigen hydraulischen Leistungsfähigkeit des geplanten Schachtverschlussystems mit der geforderten Begrenzung des Lösungszu- bzw. Lösungsaustritts auf  $\dot{V}_{\max} = 2 \text{ m}^3/\text{a}$  bestehen, wenn die vom AS vorausgesetzten Anforderungen an die Materialeigenschaften der einzelnen Systemkomponenten und die damit verbundenen Wirkungsprinzipien gegeben sind. Es wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, dass mit den bis dahin vorgelegten und im Rahmen der Prü-

fung berücksichtigten Unterlagen die für eine Gewährleistung der vorausgesetzten Anforderungen erforderlichen Belege zu den Materialeigenschaften und Wirkprinzipien noch nicht bzw. nicht abschließend erbracht war.

Die im Prüfbericht der Bearbeitungsphase (b) dokumentierten rechnerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass über die in Bearbeitungsphase (a) zusammengestellten Hinweise, Empfehlungen und Forderungen hinaus im Rahmen der weiteren Planungen insbesondere zu belegen ist, dass das Abdichtungsmaterial der Verschlussysteme DE3 und DE2 die vom AS angesetzte selbstabdichtende Wirkung besitzt, d.h. axial angreifende Fluiddrücke in Folge eines duktilen (plastisch-viskosen) Materialverhaltens unmittelbar in zumindest bereichsweise gleich große radial wirkende Kontaktzonedrücke umgesetzt werden.

Eine wesentliche aus den rechnerischen Untersuchungen der Bearbeitungsphase (b) abgeleitete Forderung besteht darin, dass die selbstabdichtende Wirkung des Verschlussmaterials durch geeignete Labor- und Technikumsversuche hinreichend dokumentiert und gegenständlich belegt wird. Für die Asphalt-Schotter-Dichtelemente wurden entsprechende weiterführende Untersuchungen mit der Unterlage I 503 /U3/ vorgelegt. Die Prüfung erfolgt in Kapitel 4.

Eine zweite, aus den rechnerischen Untersuchungen der Bearbeitungsphase (b) abgeleitete wesentliche Forderung resultiert aus der Notwendigkeit, die vom AS vorausgesetzten Einschätzungen zu den hydraulischen und mechanischen Eigenschaften der Dichtelementbaustoffe und der Kontaktzone zwischen Gebirge und Dammbauwerk zu belegen. Für die weiterführenden Planungen wurde gefordert, dass durch den AS entsprechende Belege beigebracht werden. Eine gleich lautende Aussage gilt für die Absicherung der im Rahmen der rechnerischen Untersuchungen durch den Prüfer TUC eingeschätzten Materialeigenschaften des anstehenden Salzgebirges bezüglich seiner Dilatanzfestigkeit und der Abhängigkeit zwischen Porosität und Permeabilität. Diese Untersuchungen sind Teil der Unterlagen P 500 und P 501, deren Prüfung in Kapitel 2 und Kapitel 3 dokumentiert ist.

Eine dritte Forderung der Bearbeitungsphase (b) resultiert aus der Notwendigkeit, im Rahmen der rechnerischen Analysen die möglichen Setzungen der Schachtverschlussysteme hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Standsicherheit und Dichtheit zu bewerten. Hierzu erforderlich sind Untersuchungen zu Einbaudichte und Kompressibilität der im Verschlussystem verwendeten Baustoffe unter Berücksichtigung der jeweils zwischen Gebirge und Baustoff wirkenden Reibungskräfte.

Schließlich ist unter Bezug auf die Ausführungen in /U12/ darauf hinzuweisen, dass als vierte Forderung der Bearbeitungsphase (b) eine Modifikation der Komponenten des Verschlussystems zur Gewährleistung der Diversität gegenüber aufsteigenden Wässern für erforderlich erachtet wurde, da hinsichtlich der abdichtenden Funktion der Verschlussbauwerke gegenüber aufsteigenden Wässern lediglich der Aspekt der Redundanz durch die hierfür vorgesehenen Dichtelemente DE2 und DE3 vom AS berücksichtigt worden ist. Dagegen wird dem Anspruch der Diversität durch die baugleiche Materialausführung (Schotter/Asphalt) der Dichtelemente DE2 und DE3 nicht entsprochen.

## **2 Unterlagen zur vertiefenden Nachweisführung der Schachtverfüllung beim Schacht Marie (P 500)**

### **2.1 Vorbemerkungen**

Der Bericht P 500 - "Unterlagen zur vertiefenden Nachweisführung der Schachtverfüllung beim Schacht Marie" besteht aus drei, im Unterauftrag der ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau GmbH durch das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) erstellten Unterlagen sowie einem vorangestellten Kurztext des BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) wie folgt:

- Vertiefende Planung - Schacht Marie (Stand: 24.05.2011; Verfasser: B. Stielow - BfS; 16 Seiten),
- Anlage 1 - Gesteinsmechanische Laboruntersuchungen und Ableitung von Stoffmodellparametern (Stand: 31.03.2011; Bearbeiter: R.-M. Günther et. al. - IfG; 48 Seiten),
- Anlage 2 - Numerische Modellierungen zur Bewertung der Situation im Bereich der Erkundungsgrubenbaue der 310m-Sohle des Schachtes Marie (Stand: 31.03.2011; Bearbeiter: D. Weise & K. Salzer - IfG; 96 Seiten),
- Anlage 3 - Numerische Modellrechnungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Schachtverfüllung für den Schacht Marie (Stand: 31.03.2011; Bearbeiter: D. Weise et. al. - IfG; 111Seiten).

### **2.2 Prüfung "Vertiefende Planung - Schacht Marie"**

#### ***2.2.1 Aussagen des Antragstellers***

Ziel der Unterlage ist es, den Inhalt und die Ergebnisse der in den Anlagen 1 bis 3 dokumentierten Untersuchungen zusammenzufassen und in den Sachzusammenhang einzuordnen. Sie beinhaltet keine über die in den Anlagen 1 bis 3 dokumentierten Sachverhalte hinausgehenden Informationen. Auf eine kapitelbezogene Prüfung der Inhalte der Unterlage wird daher verzichtet.

### ***2.2.2 Bewertung der Unterlage***

Bezüglich der Gesamtkonzeption bleibt festzuhalten, dass die Unterlage nach Einschätzung der Prüfer nicht den Anforderungen an eine technisch-wissenschaftlich präzise und strukturierte Berichtsfassung entspricht, in Teilen umgangssprachliche Formulierungen enthält und zumindest ohne genaue Kenntnis des Inhaltes der Anlagen 1 bis 3 wenig geeignet erscheint, die Zielsetzung der Untersuchungen und die Unterlagenstruktur zu verdeutlichen. Es wird daher empfohlen, die Unterlage entweder neu zu fassen oder auf die einleitenden Ausführungen zu verzichten.

## **2.3 Prüfung Anlage 1: "Gesteinsmechanische Laboruntersuchungen und Ableitung von Stoffmodellparametern"**

### ***2.3.1 Aussagen des Antragstellers***

Die Unterlage dokumentiert die Durchführung und Auswertung gesteinsmechanischer Laboruntersuchungen an Prüfkörpermaterial des Staßfurtsteinsalzes (z2HS) aus dem Nahbereich des Schachtes Marie (-231m-Sohle, Nordstoß im Westquerschlag). Ziel der im Unterauftrag der ERCOSPLAN GmbH durch das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) durchgeführten Laboruntersuchungen ist die Ableitung standortspezifischer Stoffmodellkennwerte für numerische Modellierungen zum Nachweis der insbesondere durch offene Grubenbaue im Bereich des Dichtelementes DE2 beeinflussten Standsicherheit und Gebrauchtauglichkeit des geplanten Schachtverschlussystems im Schacht Marie. Die Unterlage beschreibt in Abschnitt 2.1.1 die Probenahme und Prüfkörperherstellung und gibt einen tabellarischen Überblick über das Versuchsprogramm. Danach ist das im Rahmen der Laboruntersuchungen verwendete Prüfkörpermaterial am IfG aus einem durch Loch-an-Loch-Bohrungen aus dem Gebirgsverband gelösten Steinsalzblock der Dimension Breite x Höhe x Länge = 0,5m x 0,3m x 1,5m erbohrt worden. Entsprechend der Zusammenstellung in Tabelle 2.1-1, S.5 der Unterlage umfasst das Versuchsprogramm insgesamt 11 triaxiale Kompressionsversuche (TC) mit Mantelspannungen zwischen minimal  $\min\sigma_3 = 0,2$  MPa und maximal  $\max\sigma_3 = 20$  MPa sowie 5 triaxiale Kriechversuche (TCc) mit jeweils 2 Laststufen. Gemäß Abschnitt 2.1.2 der Unterlage sind zur petrophysikalischen Charakterisierung des verwendeten Prüfkörpermaterials die aus Prüfkörpermasse und Prüfkörpervolumen ermittelten Dichten  $\rho$ , die durch lastfreie Ultraschallwellenmessungen ermittelten Schallwellenlaufzeiten  $v_p$  (Primär- bzw. Longitudinalschallwellengeschwindigkeit) und  $v_s$  (Sekundär- bzw. Transversalschallwellengeschwindigkeit)

keit) sowie die aus Dichte und Schallwellenlaufzeiten abgeleiteten dynamischen Kennwerte  $E_{\text{dyn}}$  (dynamischer Elastizitätsmodul),  $G_{\text{dyn}}$  (dynamischer Schubmodul),  $K_{\text{dyn}}$  (dynamischer Kompressionsmodul) und  $\nu_{\text{dyn}}$  (dynamische Poissonzahl) ermittelt und in Anlage 2.1.3 tabellarisch zusammengestellt worden. Aufbauend auf einer Kurzbeschreibung der eingesetzten Versuchstechnik in Abschnitt 2.1.3 dokumentieren die Abschnitte 2.2 und 2.3 die Ergebnisse der durchgeführten TC- und TCc-Versuche. Der abschließende Abschnitt 3 der Unterlage beinhaltet schließlich Ausführungen zum Stoffmodell *Günther&Salzer* und zur Ableitung der zugehörigen Stoffmodellparameter. Eine Zusammenstellung der auf Basis der durchgeführten Laboruntersuchungen an Staßfurtsteinsalz vom Typ z2HS abgeleiteten Parameter dokumentiert Anlage 3.6-1. Mit dem Hinweis, dass eine Gewinnung von Probenmaterial aus dem Bereich des Kaliflözes der Korkenzieherwendel nicht möglich war, sind zur mechanischen Charakterisierung des Kaliflözes in Anlage 3.6-2 Stoffmodellparameter für den Staßfurtcarnallit der Grube Teutschenthal zusammengestellt.

### ***2.3.2 Bewertung der Unterlage***

#### Bewertung Gesamtkonzeption:

Inhalt, Form und Aufbau der Unterlage entsprechen den in einschlägigen Empfehlungen und Richtlinien dokumentierten Anforderungen an Vorbereitung, Durchführung und Auswertung gesteinsmechanischer Laborversuche. Die Ausführungen zur Durchführung und Auswertung der Laborversuche werden soweit prüfbar als vollständig und inhaltlich nachvollziehbar eingeschätzt. Die Größenordnung der ermittelten Bruchfestigkeiten, Dilatanzfestigkeiten und Kriechraten werden als im Grundsatz plausibel bewertet. Der auf S. 11 dokumentierten Einschätzung, dass die Versuchsergebnisse zum Kriechverhalten des untersuchten Staßfurtsteinsalzes in guter Übereinstimmung sind mit der in /U15/ von BGR empfohlenen Kriechklasse, wird durch die Prüfer jedoch ausdrücklich nicht entsprochen. Eine gleich lautende Aussage gilt unter Verweis auf die nachfolgenden Ausführungen bzgl. der abgeleiteten Stoffmodellparameter zur Charakterisierung des standortspezifischen Kriechvermögens.

#### Bewertung triaxiale Kompressionsversuche:

Bild 2.1 zeigt eine zu Abb. 2.2-2, S. 10 der Prüfunterlage analoge Auftragung der von IfG laborativ ermittelten Bruch- und Dilatanzfestigkeiten sowie eine Auftragung der von IfG eingeschätzten Ausgleichskurven der minimalspannungsabhängigen Bruch- und Dilatanzfestigkeiten. Die Berechnung der Ausgleichskurve der minimalspannungsabhängigen Dilatanzfes-

tigkeit erfolgte entsprechend Anlage 3.6-1 der Prüfunterlage mit Gl. (2.1). Die Laborwerte der in Bild 2.1 gezeigten Dilatanzfestigkeiten wurden in Ermangelung einer zahlenmäßigen Angabe graphisch aus Abb. 2.2-2 der Prüfunterlage entnommen.

$$\sigma_{\text{eff-dil}} = \sigma_3 \cdot \left( \frac{D_1}{D_2 + \sigma_3} + D_3 \right) \quad (2.1)$$

**Hinweis H1:** Die versuchstechnisch ermittelten Dilatanzfestigkeiten werden lediglich graphisch, nicht jedoch zahlenmäßig dokumentiert.

Im Ergebnis der Gegenüberstellung bleibt festzuhalten, dass die versuchstechnisch ermittelten Dilatanzfestigkeiten in hinreichender Übereinstimmung mit der von IfG eingeschätzten Ausgleichsfunktion sind, d.h. die von IfG abgeleitete Größenordnung der Stoffmodellparameter  $D_1$ ,  $D_2$  und  $D_3$  als plausibel eingeschätzt wird. Darauf hinzuweisen ist jedoch, dass die von IfG zur Charakterisierung der minimalspannungsabhängigen Dilatanzfestigkeit angesetzte Gl. (2.1) ohne ergänzende Angaben nicht geeignet ist, die bei großen Minimalspannungen beobachtete vollständige Plastifizierung von Steinsalz physikalisch abzubilden. Im vorliegenden Fall zeigt Bild 2.1 als physikalisch unsinniges Ergebnis, dass für Minimalspannungen von  $\sigma_3 \geq 37$  MPa die mit Gl. (2.1) berechnete Dilatanzfestigkeit zahlenmäßig größer ist als die Bruchfestigkeit. In der Konsequenz ist somit zumindest formal ein lokations- bzw. materialbezogener Minimalspannungsbereich für die Gültigkeit von Gl. (2.1) zu definieren.

**Hinweis H2:** Für die zur Charakterisierung der minimalspannungsabhängigen Dilatanzfestigkeit verwendete Gleichung Gl. (2.1) ist ein lokations- bzw. materialbezogener Gültigkeitsbereich zu formulieren.

Die weiterhin in Bild 2.1 gezeigte Gegenüberstellung der Laborversuchswerte der Bruchfestigkeit entsprechend Tab. 2.1-1, S. 5 der Prüfunterlage und der mit Gl. (2.2) berechneten Ausgleichsfunktion zeigt analog zur Dilatanzfestigkeit eine vergleichsweise gute Übereinstimmung, d.h. die von IfG abgeleitete Ausgleichsfunktion der minimalspannungsabhängigen Bruchfestigkeit wird als plausibel eingeschätzt.

$$\sigma_{\text{eff-max}} = \sigma_D + \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_D}{\sigma_\phi + \sigma_{\text{min}}} \cdot \sigma_{\text{min}} \quad (2.2)$$

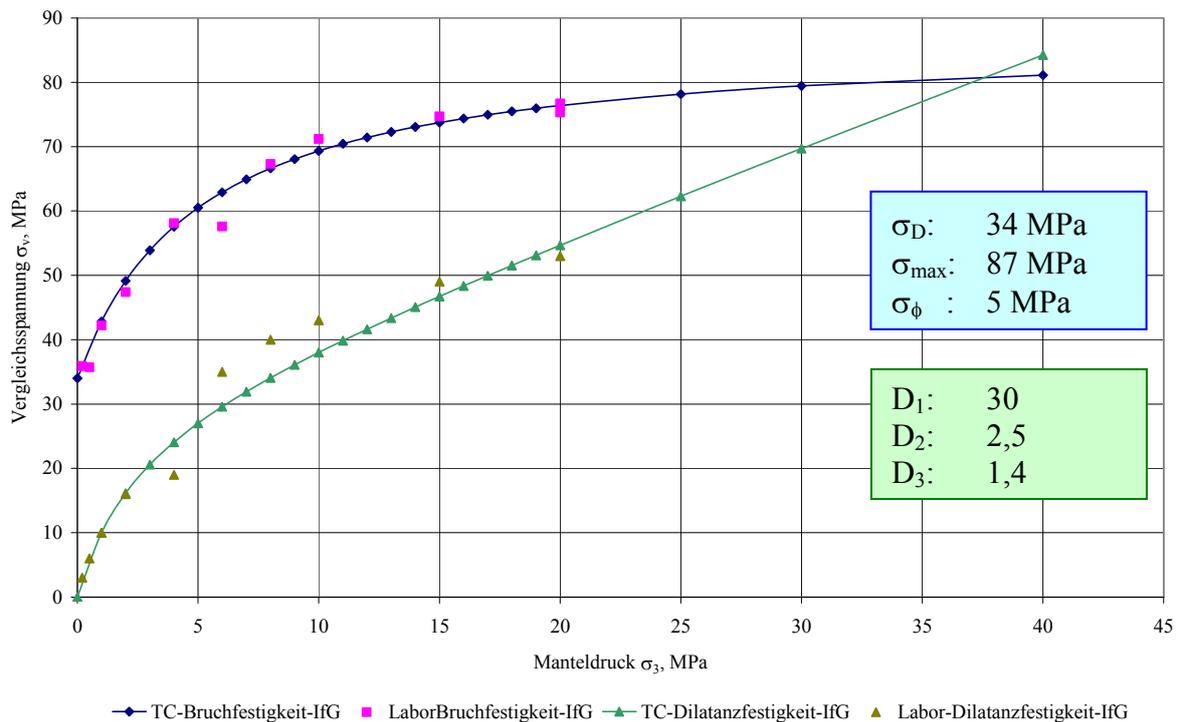


Bild 2.1: Ergebnisse triaxialer Festigkeitsversuche an Staßfurtsteinsalz vom Typ z2HS

Darauf hinzuweisen ist jedoch, dass in der Prüfunterlage weder Gl. (2.2) noch die in Gl. (2.2) eingehenden Stoffmodellparameter  $\sigma_D$ ,  $\sigma_{max}$  und  $\sigma_\phi$  genannt werden.

**Hinweis H3:** Die Funktionsgleichung zur Berechnung der in Abb. 2.2-2 der Prüfunterlage gezeigten Ausgleichsfunktion der minimalspannungsabhängigen Bruchfestigkeit und die zur Berechnung der Ausgleichsfunktion verwendeten Stoffmodellparameter werden nicht dokumentiert.

Zur Prüfung der Plausibilität der Versuchsergebnisse triaxialer Kompressionsversuche zeigen die Bilder 2.2 und 2.3 eine Gegenüberstellung der von IfG an z2HS der Lokation Marie ermittelten Bruch- und Dilatanzfestigkeiten mit den vom Prüfer TUC gemäß /U16/ an z2HS2 und z2HS3 der Lokation Bartensleben ermittelten Bruch- und Dilatanzfestigkeiten. Während die in Bild 2.2 dokumentierte Gegenüberstellung der Bruchfestigkeiten eine im Rahmen des natürlichen Streubreitenbandes vergleichsweise gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse dokumentiert, bleibt bezüglich der in Bild 2.3 gezeigten Gegenüberstellung der Dilatanzfestigkeiten festzuhalten, dass für das Bohrkernmaterial der Lokation Marie im Minimalspannungsbereich von  $\sigma_3 \geq 6$  MPa deutlich größere Dilatanzfestigkeiten ausgewiesen werden als für das Bohrkernmaterial der Lokation Bartensleben. Für den in /U16/ versuchstechnisch

nicht belegten Minimalspannungsbereich von  $\sigma_3 \leq 0,5$  MPa werden deutlich geringere Dilatanzfestigkeiten ausgewiesen als für das Bohrkernmaterial der Lokation Bartensleben regressiv eingeschätzt. Die erfahrungsbasierte überschlägige Einschätzung, dass die einaxiale Dilatanzfestigkeit von Steinsalz in etwa zu 20% bis 30% der einaxialen Bruchfestigkeit angesetzt werden kann, wird durch die an Steinsalz des z2HS der Lokation Marie ermittelten Versuchsergebnisse somit nicht bestätigt. Die bei Mantelspannungen von  $\sigma_3 = 0,2$  MPa (*Probe ERAM416/7*) bzw.  $\sigma_3 = 0,5$  MPa (*Probe ERAM416/6*) ermittelten Bruch- und Dilatanzfestigkeiten weisen gegenüber der erfahrungsbasierten Einschätzung mit

$$\text{Probe ERAM416/7: } \frac{\sigma_{1,dil}}{\sigma_{1,max}} = \frac{3MPa}{36,05MPa} = 0,083 \Rightarrow 8,3\% \text{ und}$$

$$\text{Probe ERAM416/6: } \frac{\sigma_{1,dil}}{\sigma_{1,max}} = \frac{6MPa}{36,21MPa} = 0,166 \Rightarrow 16,6\%$$

deutlich geringere Relationen zwischen Dilatanz- und Bruchfestigkeit aus. Ob bzw. inwieweit der vorstehende Befund durch eine lokationsbezogene Systematik oder auf das natürliche, ggf. im Bereich kleiner Minimalspannungen vergrößertes Streubreitenband zurückzuführen ist, kann anhand der vorliegenden Versuche nicht ausgesagt werden.

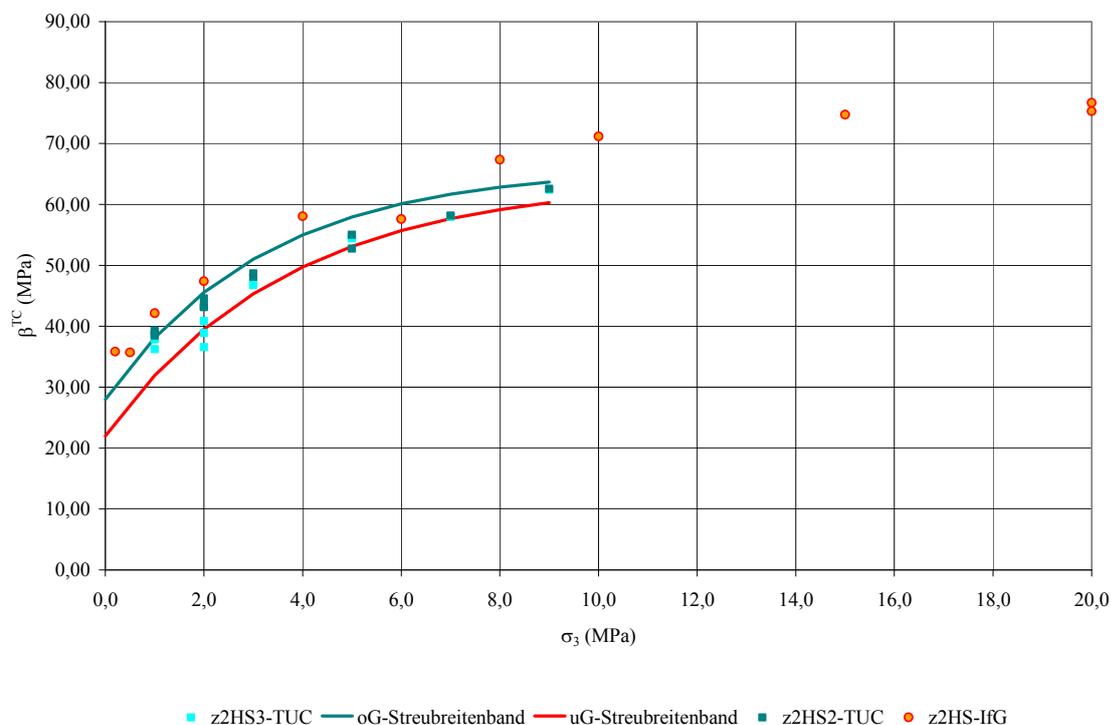


Bild 2.2: Gegenüberstellung der Bruchfestigkeiten z2HS-Lokation Marie mit Bruchfestigkeiten z2HS2 und z2HS3 der Lokation Bartensleben

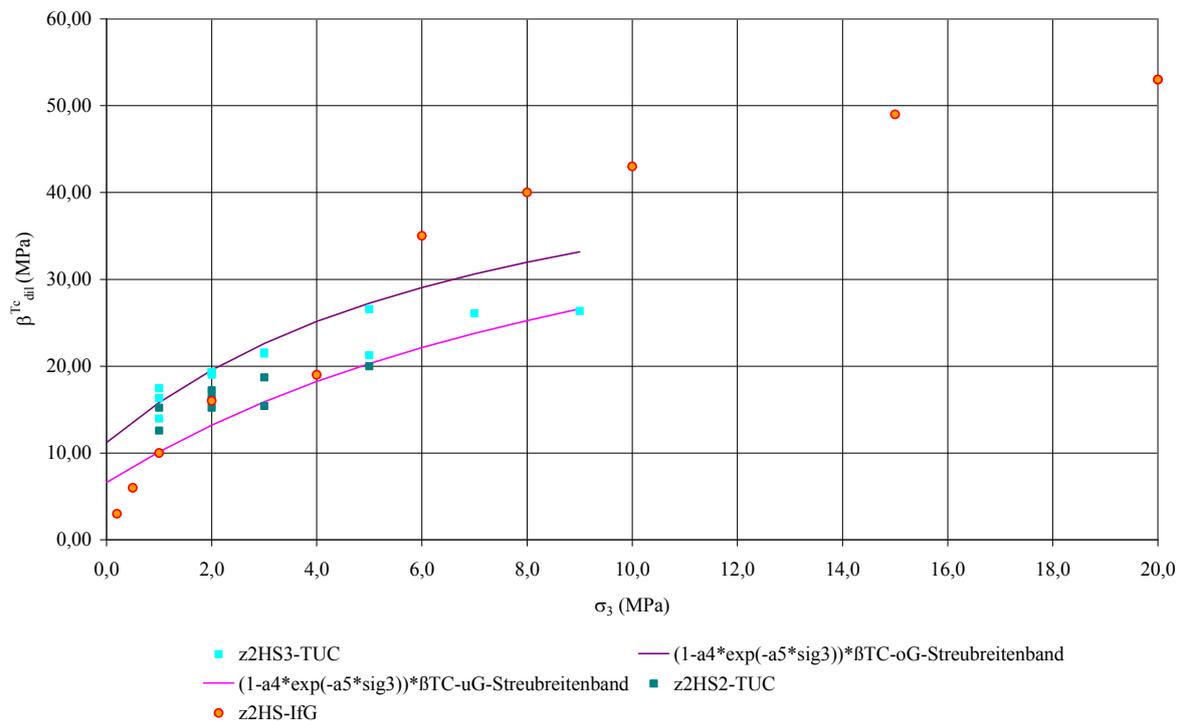


Bild 2.3: Gegenüberstellung der Dilatanzfestigkeiten z2HS-Lokation Marie mit Dilatanzfestigkeiten z2HS2 und z2HS3 der Lokation Bartensleben

Die in Bild 2.4 gezeigte Gegenüberstellung der an Prüfkörpern des z2HS der Lokation Marie ermittelten Bruchstauchungen mit den entsprechend /U16/ an Prüfkörpern des z2HS2 und z2HS3 der Lokation Bartensleben ermittelten Bruchstauchungen zeigt schließlich, dass das Staßfurtsteinsalz der Lokation Marie offensichtlich eine geringere Verformungsfähigkeit besitzt als das Staßfurtsteinsalz der Lokation Bartensleben. Vorstehende Aussage gilt auch und insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Verzerrungsrate der an z2HS der Lokation Marie durchgeführten Versuche mit  $\dot{\epsilon}_1 = 2,5 \cdot 10^{-5} s^{-1} = 0,15\%/min$  deutlich geringer gewählt wurde als die mit  $\dot{\epsilon}_1 = 4,17 \cdot 10^{-5} s^{-1} = 0,25\%/min$  vorgegebene Verzerrungsrate der Versuche an Prüfkörpermaterial des z2HS2 und z2HS3 der Lokation Bartensleben. Da in Folge der Duktilität von Steinsalz eine Verringerung der versuchstechnisch vorgegebenen Verzerrungsrate im Grundsatz eine Erhöhung der Bruchstauchung erwarten lässt, bleibt als Konsequenz der Gegenüberstellung insgesamt einzuschätzen, dass die im Vergleich zum z2HS2 und z2HS3 der Lokation Bartensleben beobachtete geringere Verformungsfähigkeit von z2HS der Lokation Marie mit dem Befund einer erhöhten Bruchfestigkeit korreliert, d.h. als plausibel eingeschätzt wird.

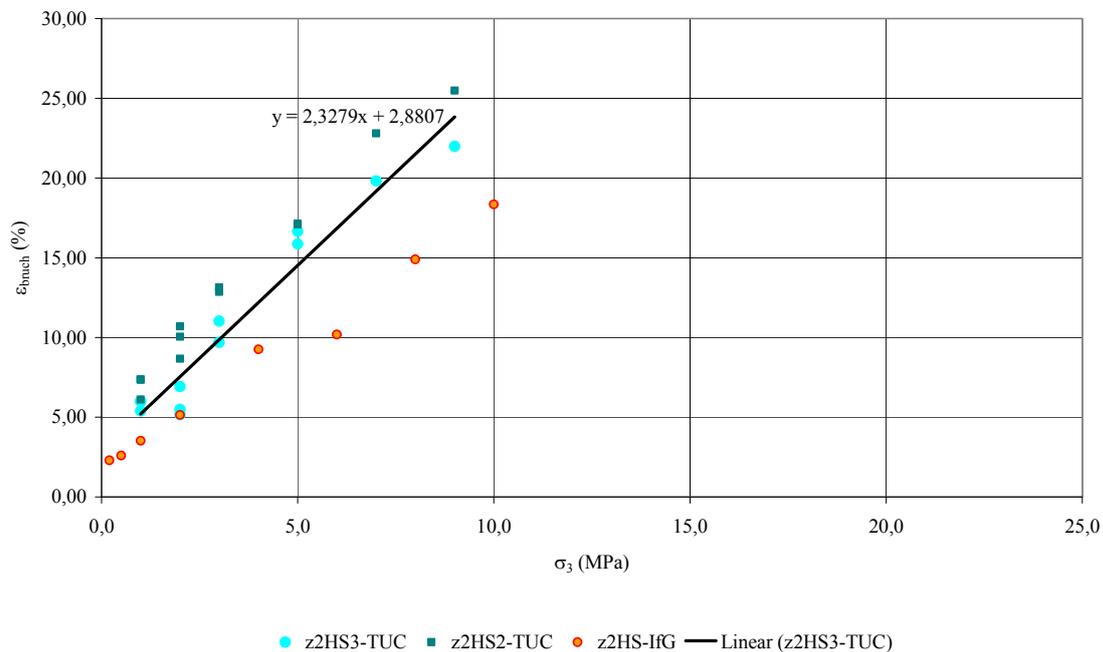


Bild 2.4: Gegenüberstellung der Bruchstauchungen z2HS-Lokation Marie mit Bruchstauchungen z2HS2 und z2HS3 der Lokation Bartensleben

#### Bewertung triaxiale Kriechversuche:

Zur Ableitung der lokationsbezogenen Stoffmodellparameter für das schädigungsfreie Kriechen sind entsprechend Tab. 2.3-1, S. 11 der Prüfunterlage insgesamt 5 zweistufige Kriechversuche an zylindrischen Prüfkörpern der Dimension  $h = 80\text{mm}$  und  $d = 40\text{mm}$  durchgeführt worden. Die Versuchszeit der mit  $\min\sigma_v = 10\text{ MPa}$  bis  $\max\sigma_v = 24\text{ MPa}$  und  $T = 299\text{ K}$  vorgegebenen Laststufen betrug entsprechend Anlage 2.3-1 bis 2.3-10 jeweils 50d.

**Hinweis H4:** Die in Tab. 2.1-1, S. 5 dokumentierten Axialspannungen der Kriechversuche sind falsch bzw. nicht in Übereinstimmung mit den Angaben in Tab. 2.3-1, S. 11 und den Angaben in Anlage 2.3-1 bis 2.3-10.

**Hinweis H5:** Es fehlt eine photographische Dokumentation der für Kriechversuche verwendeten Prüfkörper jeweils vor und nach Durchführung der Versuche.

Bild 2.5 zeigt eine zu Abb. 2.3-1, S. 12 analoge Auftragung der messtechnisch ermittelten stationären Kriechraten von z2HS der Lokation Marie in Abhängigkeit von der Vergleichsspannung. Ausdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass die in Abb. 2.3-1, S. 12 der Prüfunterlage dokumentierten Auftragungen zumindest in Teilen nicht identisch sind mit den Versuchsergebnissen der Anlagen 2.3-1 bis 2.3-10. Aufgetragen sind in Abb. 2.3-1, S. 12 der Prüfunterlage beispielsweise mehrere Versuchswerte bei  $\sigma_v = 10$  MPa, obwohl im Rahmen der Laboruntersuchungen lediglich eine Laststufe bei dieser Vergleichsspannung realisiert wurde. Dagegen fehlen in Abb. 2.3-1 die bei einer Vergleichsspannung von  $\sigma_v = 24$  MPa ermittelten Kriechraten.

**Hinweis H6:** Die in Abb. 2.3-1, S. 12 aufgetragenen Wertepaare dokumentieren nicht die Versuchsergebnisse der an z2HS der Lokation Marie durchgeführten Kriechversuche.

**Forderung F1:** Abb. 2.3-1 ist entsprechend den tatsächlich ermittelten Versuchsergebnissen zu korrigieren.

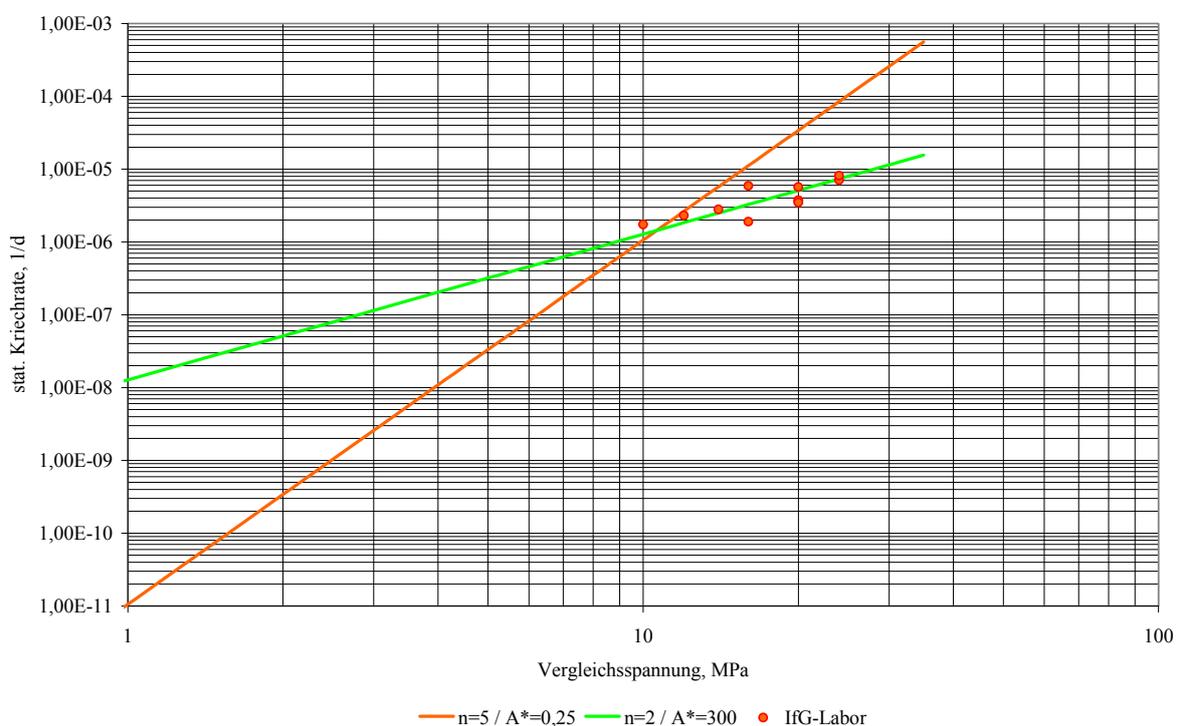


Bild 2.5: Stationäre Kriechrate von z2HS der Lokation Marie

Analog zu Abb. 2.3-1, S. 12 der Prüfunterlage ist in Bild 2.5 die gemäß /U15/ von BGR für das Staßfurt-Hauptsalz Marie empfohlene Kriechcharakteristik entsprechend Gl. (2.3) eingetragen.

$$\dot{\epsilon}_s = A^* \cdot A \cdot \exp[-Q/(R \cdot T)] \cdot (\sigma / \sigma^*)^n \quad (2.3)$$

mit

$A^*$	1/4
$A$	0,18 d <sup>-1</sup>
$Q$	54 kJ/mol
$R$	8,314 · 10 <sup>-3</sup> kJ/(mol·K)
$T$	299K
$n$	5
$\sigma^*$	1 MPa

Gemäß Aussage auf S.11 der Prüfunterlage zeigt die Gegenüberstellung *eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit der Empfehlung der BGR* ( $A^* = 1/4$ ). Der vorstehenden Aussage wird weder unter Berücksichtigung der nachweislich fehlerhaften Darstellung in Abb. 2.3-1, S. 12 der Prüfunterlage noch unter Berücksichtigung der tatsächlich ermittelten Kriechraten entsprechend Bild 2.5 entsprochen. Eine durch den Prüfer TUC durchgeführte Regression zeigt entsprechend Bild 2.5, dass die an z2HS der Lokation Marie ermittelte Spannungsabhängigkeit der stationären Kriechrate vergleichsweise gut abgebildet wird, wenn für  $A^*$  ein Zahlenwert von  $A^* = 300$  ( $= 1200 \cdot 0,25!$ ) und für  $n = 2$  anstelle von  $n = 5$  gewählt wird. Welche Gründe den AS veranlasst haben, trotz der offensichtlich signifikanten Unterschiede zwischen dem messtechnisch dokumentierten Kriechverhalten und der in /U15/ empfohlenen Kriechcharakteristik eine *gute Übereinstimmung* zu testieren, kann anhand der vorliegenden Unterlage durch die Prüfer nicht nachvollzogen werden.

**Forderung F2:** Die Einschätzung, dass ungeachtet der signifikanten Unterschiede zwischen den laborativen Befunden und der von BGR für Staßfurt-Hauptsalz Marie empfohlenen Kriechformel *eine Gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit der Empfehlung der BGR* ( $A^* = 1/4$ ) besteht, ist zu begründen.

### Bewertung Parameterableitung:

Basierend auf den in Anlage 3.6.1 der Prüfunterlage zusammengestellten Stoffmodellparametern für den erweiterten Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz nach *Günther&Salzer* sind durch IfG entsprechend Abb. 3.6-1, S. 24 die triaxialen Festigkeitsversuche nachgerechnet worden. Für eine Plausibilitätsprüfung der Parameterableitung bzw. der in Abb. 3.6-1 der Prüfunterlage gezeigten Nachrechnung der Versuchsergebnisse ist der Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz nach *Günther&Salzer* - soweit auf Basis einer Excel-Tabellenkalkulation möglich - durch den Prüfer TUC programmiert worden. Im Ergebnis der Programmierung zeigt Bild 2.6, dass die in Abb. 3.6-1 der Prüfunterlage dokumentierten Berechnungsergebnisse qualitativ sehr gut nachvollzogen werden können. Bezüglich der Quantität der berechneten Zahlenwerte gilt vorstehende Aussage nur mit der Einschränkung einer mit der Größe der Mantelspannung zunehmenden Abweichung von maximal ca. 10%. Ursächlich hierfür ist, dass im Rahmen der Excel-Programmierung die elastischen Deformationsanteile nicht berücksichtigt werden konnten bzw. die Anzahl der für eine exakte Berechnung erforderlichen Iterationen die Möglichkeiten des Tabellenkalkulationsprogramms überschreitet. Dessen ungeachtet wird durch die Prüfer eingeschätzt, dass die in Anlage 3.6.1 der Prüfunterlage zusammengestellten Stoffmodellparameter geeignet sind, das im Kurzzeitversuch beobachtete Spannungs-Verzerrungs-Verhalten abzubilden. Die zumindest formal noch zu bestätigende quantitative Richtigkeit der Stoffmodellparameter erfolgt planmäßig im Rahmen der rechnerischen Prüfung der Unterlagen nach Implementierung des Stoffmodells *Günther&Salzer* in den vom Prüfer verwendeten FDM-Code.

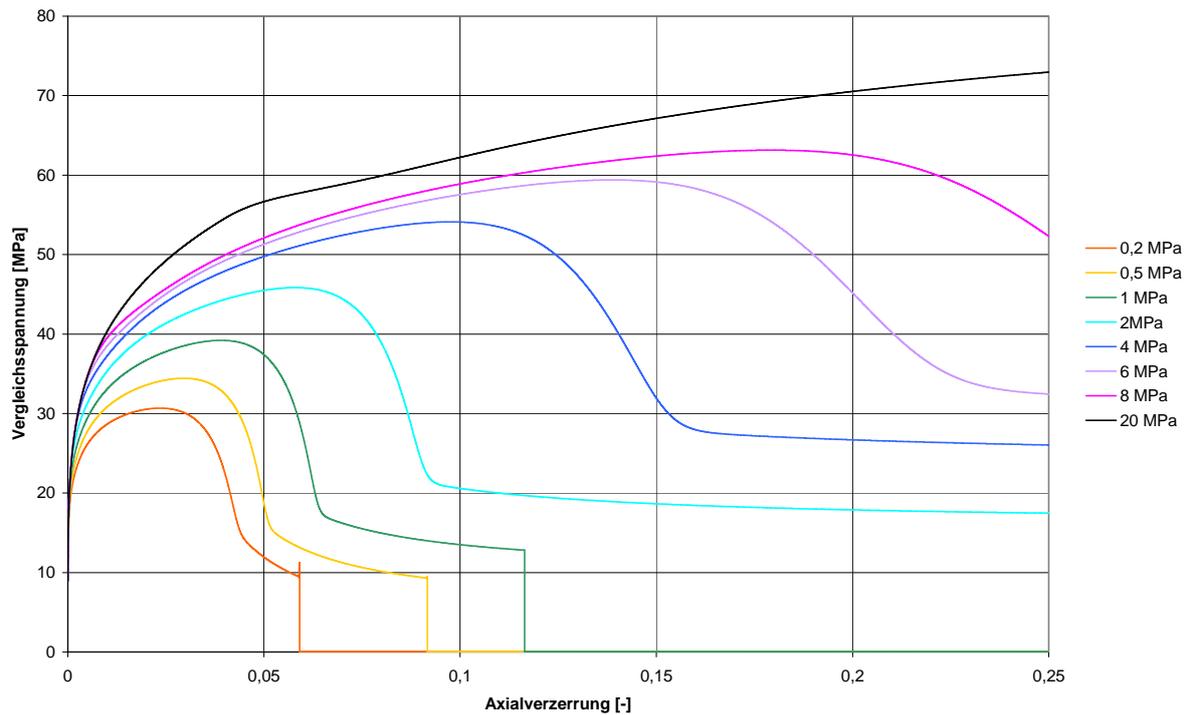


Bild 2.6: Nachrechnung triaxialer Festigkeitsversuche entsprechend Abb. 3-6.1

## 2.4 Prüfung Anlage 2: "Numerische Modellierungen zur Bewertung der Situation im Bereich der Erkundungsgrubenbaue der 310m-Sohle des Schachtes Marie"

Die in Anlage 2 dokumentierten rechnerischen Untersuchungen zum Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für das Schachtverschlussystem Marie unter besonderer Berücksichtigung der Sondersituation von offenen, schachtnahen Erkundungsgrubenbauen im Teufenbereich des geplanten Widerlager-Dichteelementes DE2 und dem Teufenbereich des geplanten asphaltgedichteten Kerns basieren u.a. auf den in Anlage 1 abgeleiteten Kriecheigenschaften des anstehenden Steinsalzes. Im Ergebnis der mit den Hinweisen H4 und H6 sowie den Forderungen F1 und F2 gegebenen Bewertung ist davon auszugehen, dass das in den numerischen Berechnungen angesetzte Kriechverhalten nicht geeignet ist, die zeitabhängigen Deformationsprozesse den realen Verhältnissen in situ entsprechend abzubilden. In der Konsequenz ist eine weitergehende Prüfung der Ausführungen in Anlage 2 bzw. der in Anlage 2 dokumentierten Berechnungsergebnisse und der darauf aufbauenden Schlussfolgerungen nicht zielführend. Eine detaillierte Prüfung der Ausführungen in Anlage 2 erfolgt unter Verweis auf Forderung F3 nicht.

**Forderung F3:** Die rechnerischen Untersuchungen zum Tragverhalten des Schachtverschlussystems Marie sind auf der Grundlage standortbezogener Materialkennwerte zum Kriechverhalten des anstehenden Salzgebirges durchzuführen.

### **2.5 Prüfung Anlage 3: "Numerische Modellrechnungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Schachtverfüllung für den Schacht Marie"**

Die in Anlage 3 dokumentierten rechnerischen Untersuchungen zum Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für das Schachtverschlussystem Marie basieren u.a. auf den in Anlage 1 abgeleiteten Kriecheigenschaften des anstehenden Steinsalzes. Im Ergebnis der mit den Hinweisen H4 und H6 sowie den Forderungen F1 und F2 gegebenen Bewertung ist davon auszugehen, dass das in den numerischen Berechnungen angesetzte Kriechverhalten nicht geeignet ist, die zeitabhängigen Deformationsprozesse den realen Verhältnissen in situ entsprechend abzubilden. In der Konsequenz ist eine weitergehende Prüfung der Ausführungen in Anlage 3 bzw. der in Anlage 3 dokumentierten Berechnungsergebnisse und der darauf aufbauenden Schlussfolgerungen nicht zielführend. Eine detaillierte Prüfung der Ausführungen in Anlage 3 erfolgt unter Verweis auf Forderung F3 nicht. Dessen ungeachtet wird darauf hingewiesen, dass durch den dokumentierten Verzicht auf die Notwendigkeit des Bentonit-Dichtelementes DE1 eine diversitäre Auslegung des Schachtverschlussystems für den Lastfall "Zulaufphase" nicht gegeben ist.

### **3 Numerische Modellrechnungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Schachtverfüllung für den Schacht Bartensleben (P 501)**

#### **3.1 Aussagen des Antragstellers**

Die im Unterauftrag der ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft durch das IfG Leipzig erstellte Unterlage dokumentiert rechnerische Untersuchungen für den Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Schachtverschlussystems Bartensleben.

Aufbauend auf einer Kurzbeschreibung des geplanten Abdichtungssystems sowie der anstehenden Geologie werden in Kapitel 2 der Prüfunterlage zunächst Fließwege für potenziell zu bzw. austretende Lösungen sowie die verwendeten Kriterien für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit erläutert. Unter Bezug auf die Modellberechnungen zur radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse wird als Gebrauchstauglichkeitskriterium ein *maximal zulässiger Lösungsfluss* durch das Verschlussystem und die angrenzende Auflockerungszone von  $0,1\text{m}^3/\text{a}$  genannt. *Der Nachweis der Tragfähigkeit (Standicherheit) auf Grundlage numerischer Berechnungen ist geführt, wenn sich im Ergebnis der numerischen Berechnungen stabile Gleichgewichtszustände einstellen und die Verschiebungen gering sind.*

Die konzeptionelle Vorgehensweise der Nachweisführung ist charakterisiert durch:

- (a) Kapitel 3: Numerischer Modellberechnungen zur Quantifizierung von Mächtigkeit und Durchlässigkeit der aktuell bestehenden Auflockerungszone in der Schachtkontur mit dem Ziel, die erforderliche Nachschnitttiefe im Bereich der Dichtelemente DE2 und DE3 festzulegen. Durch eine nachfolgende rechnerische Simulation des Nachschnitts der aktuell bestehenden Auflockerungszone mit Variation der mechanischen Kennwerte der geplanten Abdichtungselemente werden schließlich die ggf. nach dem Nachschnitt entstehende Auflockerungszone und die zugehörige Sekundärpermeabilität quantifiziert.
- (b) Kapitel 4: Analytische Berechnungen zum Nachweis der Einhaltung des Gebrauchstauglichkeitskriteriums auf Grundlage der in Kapitel 3 numerisch berechneten Mächtigkeit und Sekundärpermeabilität der ALZ der Schachtkontur unter Verwendung des Strömungsmodells von *Darcy*.
- (c) Kapitel 5: Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die Nachbetriebsphase unter Berücksichtigung einer Fluidruckbelastung für die Dichtelemente DE2 und DE3 auf der Grundlage von Plausibilitätsbetrachtungen und einseitig mechanisch-hydraulisch gekoppelten Berechnungen.
- (d) Kapitel 6: Tragfähigkeitsnachweis

## **3.2 Prüfung der Unterlage P 501**

### ***3.2.1 Bewertung Gesamtkonzeption***

Die vom AS gewählte Konzeption der Nachweisführung entspricht im Grundsatz der in /U12/ vom Prüfer gewählten Methodik. Wesentliche Unterschiede in der Nachweisführung resultieren aus der Verwendung des Stoffmodells *Günther&Salzer* zur rechnerischen Quantifizierung der ALZ der Schachtkontur (→ *Lux/Wolters* in /U12/), unterschiedlicher Materialcharakteristiken für die physikalische Modellierung des anstehenden Salzgebirges (→ Asse-Kennwerte in /U12/; Kennwerte z2HS-Marie in P501) sowie eine modifizierte Nachweisführung der Gebrauchstauglichkeit (→ zweiseitig mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnung zur Quantifizierung der zeitabhängigen Lösungsmigration durch die ALZ in /U12/; einseitig mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnung der Lösungsmigration durch die ALZ mit mechanisch begründeter Negierung der Notwendigkeit einer zweiseitigen Kopplung mechanischer und hydraulischer Prozesse). Die Gesamtkonzeption der Prüfunterlage wird als in sich schlüssig, nachvollziehbar und bezüglich der mitgeteilten Ergebnisdokumentation als plausibel eingeschätzt. Die Gesamtkonzeption entspricht damit den grundsätzlichen Anforderungen, die an die Dokumentation einer auf der Grundlage numerischer Berechnungen geführten Analyse des Tragverhaltens und der Dichtigkeit untertägiger Strukturen gestellt werden.

### ***3.2.2 Bewertung Berechnungsmodell***

Das Berechnungsmodell wird bezüglich seiner Abmessungen, der verwendeten Stoffmodellen, der simulierten Lastfälle, der Nachweiskriterien und der eingesetzten EDV Software als für die rechnerische Untersuchung der dokumentierten Fragestellungen als im Grundsatz für geeignet eingeschätzt. Eine gleich lautende Aussage gilt unter Berücksichtigung des aktuellen Planungsstandes auch für die vom AS entsprechend Bild 3.1 gewählte Homogenbereichseinteilung, d.h. die Idealisierung des anstehenden Steinsalzgebirges durch lediglich einen Homogenbereich ohne weitere Differenzierung in die tatsächlich anstehende Folge steil stehender Steinsalzvarietäten des z2HS3, z2SF, z3BK/BD, z3AM, z3SS und des z3UE.

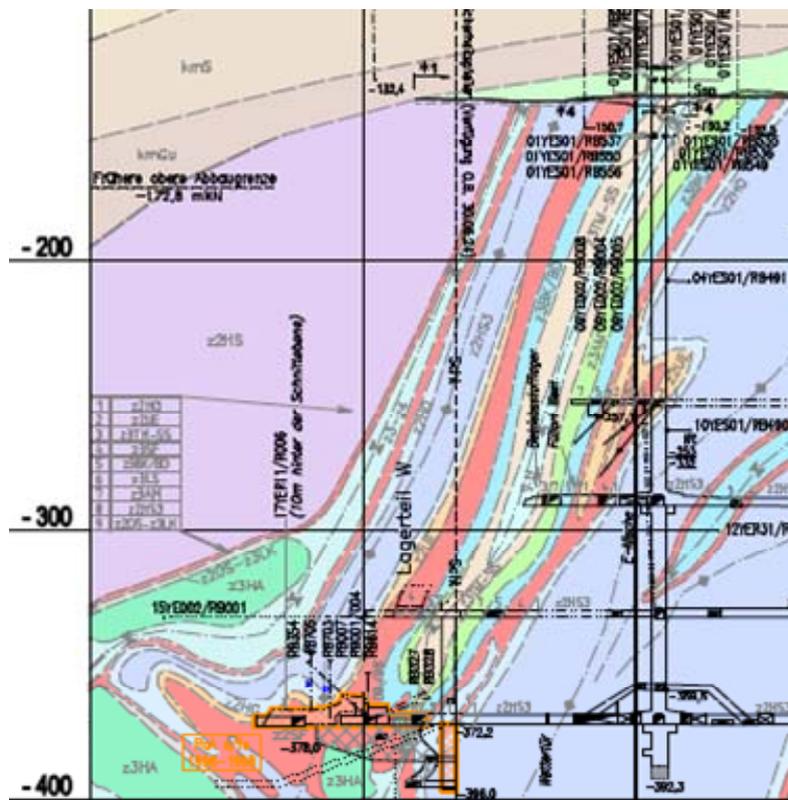
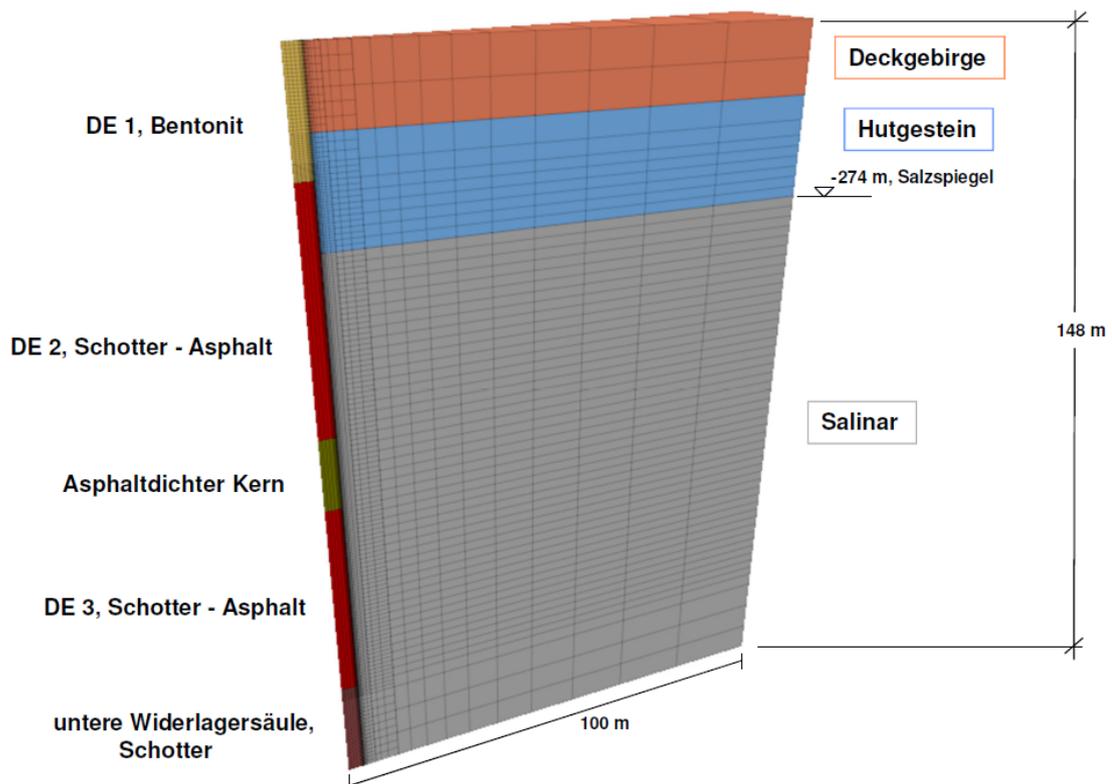


Bild 3.1: Diskretisiertes Berechnungsmodell mit Homogenbereichen gemäß P501 (oben) und geologisches Profil Schacht Bartensleben gemäß Schnitttriss 3.1 (unten)

Angesichts der herausragenden Bedeutung der ALZ für den Nachweis der Dichtheit bzw. der Gebrauchstauglichkeit wird unter Bezug auf die vorstehenden Ausführungen durch die Prüfer eingeschätzt, dass zumindest nach abschließender Festlegung des Schachtverschlussystems im Rahmen der Ausführungsplanung ein rechnerischer Nachweis unter Berücksichtigung der tatsächlich anstehenden Geologie und der zugehörigen Materialkennwerte erforderlich ist.

Bezüglich der in P 501 verwendeten Materialparameter bleibt darauf hinzuweisen, dass die Einschätzungen zum Festigkeits- und Kriechverhalten des anstehenden Steinsalzgebirges auf der Grundlage von Laboruntersuchungen an Bohrkernmaterial des z2HS aus dem Schachtbereich Marie erfolgt sind, d.h. ein standortbezogener Beleg für die Eignung der Stoffmodellparameter das anstehende Salzgebirge hinreichend repräsentativ abzubilden, nicht vorliegt. Weiterhin zu berücksichtigen ist, dass unter Bezug auf die Bewertungen zu P 500 das Kriechverhalten des z2HS offensichtlich nicht entsprechend den Untersuchungsbefunden parametrisiert wurde. In der Konsequenz ist nach Einschätzung der Prüfer davon auszugehen, dass auch unter Annahme der vom AS unterstellten Übertragbarkeit des für die Lokation Schacht Marie ermittelten Materialverhaltens auf die Lokation Schacht Bartensleben die verwendeten Stoffmodellparameter zur Charakterisierung des Kriechverhaltens in Folge der fehlerhaften Auswertung nicht geeignet sind, das Kriechverhalten des Steinsalzgebirges im Bereich des Schachtes Bartensleben hinreichend repräsentativ abzubilden.

**Forderung F4:** Das Materialverhalten des anstehenden Steinsalzgebirges ist standortbezogen zu belegen.

### **3.2.3 Bewertung Berechnungsergebnisse**

Die in den Kapiteln 3 bis 5 der Prüfunterlage P 501 dokumentierten und interpretierten Berechnungsergebnisse werden als insgesamt plausibel eingeschätzt. Grundlage für vorstehende Aussage ist ein überschlägiger Vergleich der in P 501 dokumentierten Berechnungsergebnisse mit den in /U12/ dokumentierten Berechnungsergebnissen. In toto zeigt die Gegenüberstellung der rechnerischen Befunde, dass die in P 501 für den Zeitpunkt vor rechnerischer Initialisierung des Verschlussystems ermittelte Mächtigkeit der ALZ der Schachtkontur (→ Gebirgsbereich mit Überschreitung der Dilatanzfestigkeit und in der Folge erhöhter Sekundärpermeabilität) mit ca. 20cm deutlich geringer ist als die in /U12/ mit ca. 50cm berechnete Mächtigkeit der Konturzone (→ Teilmodell, Anlage A). Wesentlich ursächlich hierfür sind nach Einschätzung der Prüfer insbesondere Unterschiede in der angesetzten Dilatanzfestigkeit

des anstehenden Steinsalzgebirges und seiner Kriechcharakteristik. Entsprechend der in Bild 3.2 gezeigten Gegenüberstellung der in P501 bzw. /U12/ angesetzten minimalspannungsabhängigen Bruch- und Dilatanzfestigkeit ist die in /U12/ angesetzte Dilatanzfestigkeit signifikant kleiner als die in P 501 angesetzte Dilatanzfestigkeit. In der Konsequenz wird die in P 501 und /U12/ unterschiedlich ausgewiesene Mächtigkeit der ALZ als plausibel eingeschätzt.

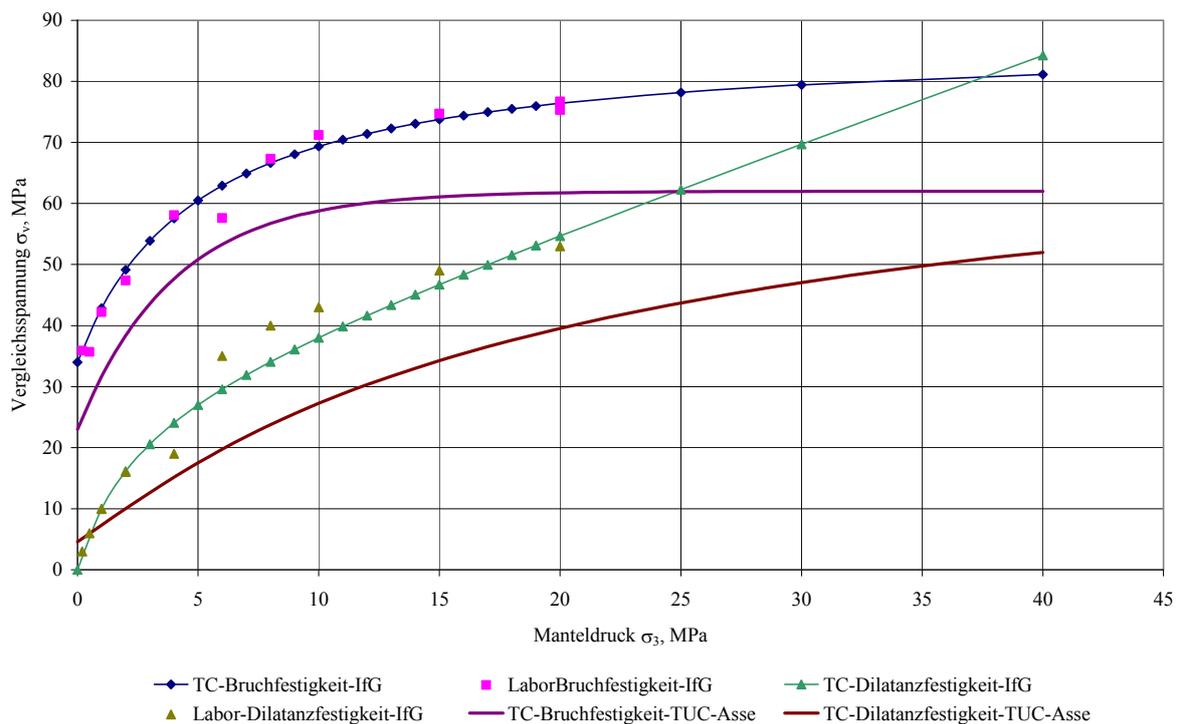


Bild 3.2: Gegenüberstellung der in P501 und der in /U12/ verwendeten Abhängigkeit zwischen Minimalspannung und Bruch- bzw. Dilatanzfestigkeit

Eine im Grundsatz analoge Aussage gilt auch bei Berücksichtigung der in P 501 und /U12/ angesetzten Kriechcharakteristik des anstehenden Steinsalzgebirges gemäß Bild 3.3. Danach ist im relevanten Spannungsbereich zwischen  $\sigma_v = 3$  MPa und 15 MPa das in /U12/ angesetzte Kriechvermögen geringer als das in P 501 angesetzte Kriechvermögen. Damit ist zumindest in der Tendenz davon auszugehen, dass die Umlagerung deviatorischer Spannungen bei den in /U12/ dokumentierten Berechnungen langsamer erfolgt als bei den in P 501 dokumentierten Berechnungen. In Verbindung mit der jeweils angesetzten Dilatanzfestigkeit ist hieraus zu schlussfolgern, dass Beanspruchungszustände oberhalb der Dilatanzfestigkeit bei den in /U12/ dokumentierten Berechnungen tendenziell länger einwirken als bei den in P 501 dokumentier-

ten Berechnungen, sodass auch das angesetzte Kriechverhalten die Unterschiede in der Mächtigkeit der rechnerisch ermittelten Zone dilatant verformter Gebirgsbereiche plausibel erscheinen lassen.

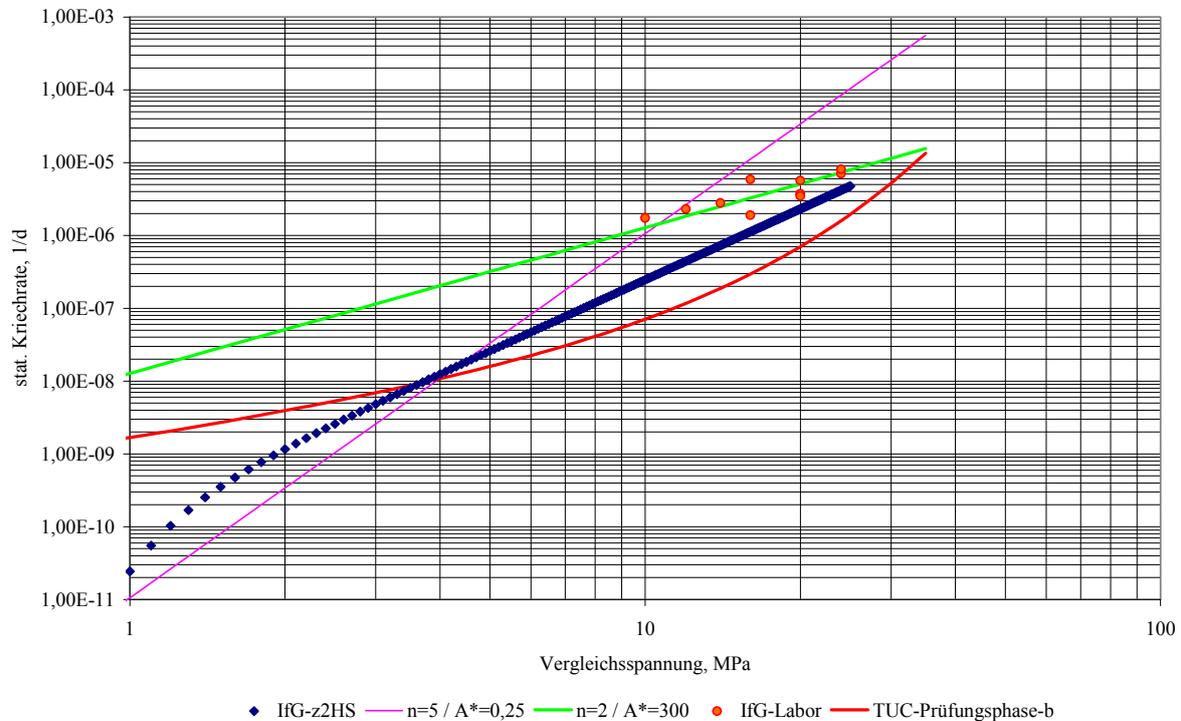


Bild 3.3: Gegenüberstellung der in P 501 und der in /U12/ verwendeten Abhängigkeit zwischen stationärer Kriechrate und Vergleichsspannung

Der in P 501 und /U12/ aus der Mächtigkeit der umlaufigen Dilatanzzone, der Größe der Dilatanz und der Abhängigkeit zwischen Dilatanz bzw. Sekundärporosität und Permeabilität abgeleitete Volumenstrom einer die Abdichtungsbauwerke DE2 und DE3 potenziell umströmenden Lösung wird in P 501 zu minimal 0,0013l/a und maximal 0,02l/a berechnet. Im Vergleich zu den in /U12/ mit ca. 0,48l/a bzw. 0,52l/a quantifizierten Volumenströmen beträgt die Differenz der in P 501 bzw. /U12/ ausgewiesenen Volumenströme damit etwa ein bis zwei Größenordnungen. Unter Berücksichtigung einer im Berechnungsmodell /U12/ ca. vierfach größeren Strömungsquerschnittsfläche (→ resultierend aus der Mächtigkeit der ALZ), einer innerhalb der ALZ unterschiedlich verteilten Größe der Dilatanz, der grundsätzlichen Sensitivität der Abhängigkeit zwischen Porosität und Permeabilität (→ gemäß exemplarischer Darstellung in Bild 3.4 resultiert aus einer geringfügigen Erhöhung der Dilatanz von 0,1‰ auf 0,2‰ eine Erhöhung der Permeabilität um ca. 1 Zehnerpotenz) werden die Differenzen in den berechneten Volumenströmen als im Grundsatz plausibel eingeschätzt.

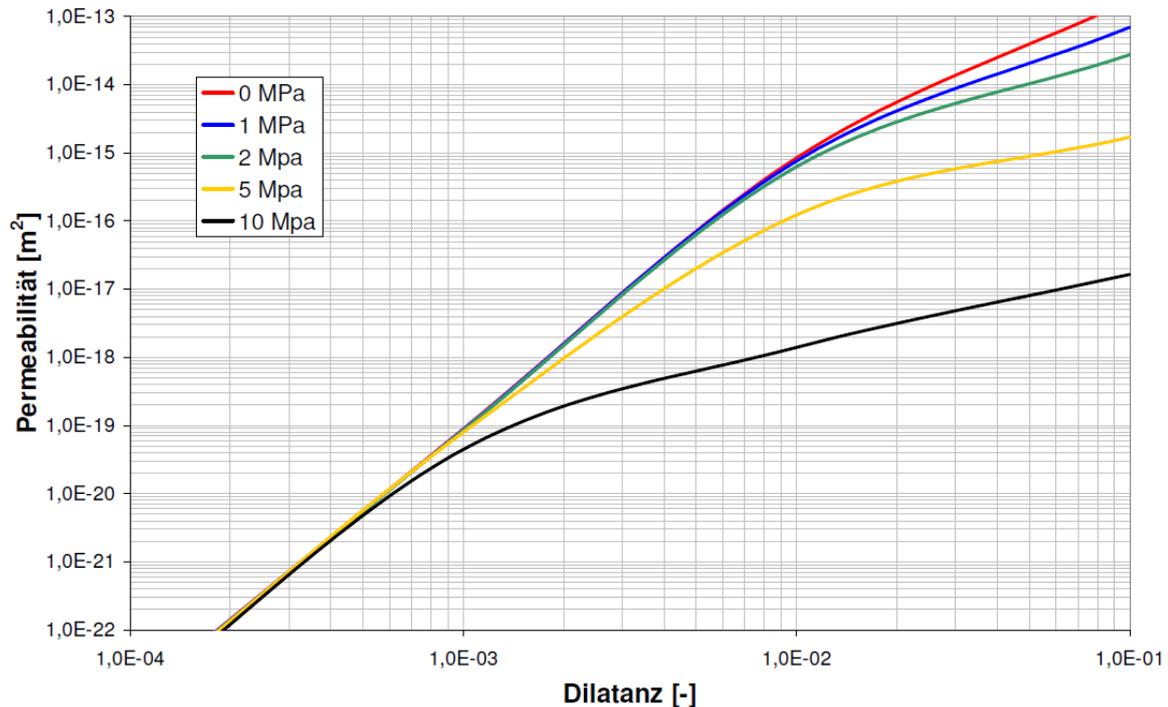


Bild 3.4: Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung nach Heemann & Heusermann gemäß Anlage 3.4-5 P501

Als Kriterium für den Nachweis der Tragfähigkeit wird auf S.7, P 501 genannt: *Der Nachweis der Tragfähigkeit (Standicherheit) auf Grundlage numerischer Berechnungen ist geführt, wenn sich im Ergebnis der numerischen Berechnungen stabile Gleichgewichtszustände einstellen und die Verschiebungen gering sind.* Gemäß Aussage auf S.9, P 501 erfolgt der Nachweis in Kapitel 6 auf der Grundlage einer Bewertung der Ergebnisse aller in den Kapiteln 3 und 5 durchgeführten numerischen Berechnungen. Auf S.37, P 501 wird zum Nachweis der Tragfähigkeit jedoch lediglich ausgeführt: *Die Tragfähigkeit (Standicherheit) der geplanten Verfüllung für den Schacht Bartensleben ist belegt, da bei den numerischen Berechnungsfällen der Kapitel 3 und 5 stabile Gleichgewichtszustände und geringe Verschiebungen ausgewiesen wurden.* Da in P 501 keine Analyse der Verschiebungen bzw. Verzerrungen dokumentiert wird, ist der Nachweis der Tragfähigkeit nicht vollständig erbracht.

**Forderung F5:** Für den Nachweis der Tragfähigkeit ist eine Verzerrungsanalyse zu ergänzen, bzw. ist die Geringfügigkeit der Verschiebungen zu dokumentieren und zu begründen.

## **4 Bergtechnische Erprobung von Bitumen/Asphalt als Dichtmaterial in langzeitsicheren Schachtverschlussbauwerken (I 503)**

### **4.1 Vorbemerkungen**

Im Unterauftrag der ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau GmbH, Erfurt erfolgten bei der TU Bergakademie Freiberg am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau die Erprobung von Bitumen-Asphalt als Dichtmaterial für langzeitsichere Schachtverschlussbauwerke.

Der Abschlussbericht zur bergtechnischen „Erprobung von Bitumen/Asphalt als Dichtmaterial in langzeitsicheren Schachtverschlussbauwerken; Labor- und halbtechnische Versuche“ [U3, I 503] besteht aus den 3 Zwischenberichten:

- Vorbereitende Untersuchungen (Stand: 27.07.2011),
- Untersuchungen zur Optimierung der Benetzungsfähigkeit von Bitumen (Stand: 25.02.2012) und
- Halbtechnische Versuche zum Einguss von Bitumen in Basaltschotter (Stand: 21.06.2012).

Zwischenergebnisse wurden in den Fachgesprächen am 31.05.2011 in Freiberg und am 30.08.2011 in Morsleben vorgestellt. Mittlerweile begannen auch die großmaßstäblichen Versuche der Schachtabdichtung über Tage in einem Asphaltmischwerk in Hermsdorf. Erste Ergebnisse der großmaßstäblichen Versuche wurden bei einer Versuchsbefahrung am 22.08.2012 vorgestellt. Die obertägigen großmaßstäblichen Versuche sind nicht Gegenstand des aktuellen Prüfberichtes. Ihre Bewertung erfolgt erst nach Vorlage der Abschlussdokumentation.

### **4.2 Vorbereitende Untersuchungen**

#### ***4.2.1 Zielstellung der Untersuchungen***

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 1, Kapitel 2, 3):

*Von der Arbeitsgemeinschaft TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, der K+S Consulting GmbH sowie der ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH (ERCOSPLAN) wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) im Zeitraum von 2001 bis 2004 die Konzeptplanung für langzeitstabile Verschlussbau-*

*werke für die Schächte Marie und Bartensleben des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERA Morsleben) einschließlich der erforderlichen Nachweisführungen zur Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit sowie Langzeitstabilität der einzusetzenden Verschlussbaustoffe erarbeitet [U4].*

*In der Unterlage [U4] wird die Dimensionierung der bitumenhaltigen Abdichtmaterialien hinsichtlich Dichte und temperaturabhängiger Viskosität beispielhaft mit Kennwerten aus der Literatur aufgezeigt. Für eine Ausführungsplanung ist nach [U4] eine begründete Auswahl der Bitumensorten und einer Rezeptur für das gefüllte Bitumen zu treffen. Als Grundlage für eine Ausführungsplanung, für die Dimensionierung der Baustoffe und auch für ein Qualitätssicherungsprogramm müssen Kennwerte für die wahrscheinlich eingesetzten Baustoffe ermittelt werden.*

*Um bestehende, offene fachliche Fragen hinsichtlich der Herstellung und Errichtung von bitumenverfüllten Schottersäulen zu klären, wurde vom BfS ein Untersuchungsprogramm mit dem Titel „Bergtechnische Erprobung von Bitumen/Asphalten als Dichtmaterialien in langzeitstabilen Schachtverschlussbauwerken“ initiiert. Die Untersuchungen werden im Auftrag der Firma ERCOSPLAN durch die TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau vorgenommen.*

#### Bewertungskriterien:

- zielgerichtete Bearbeitung offener Fragestellungen
- systematische Fortführung der Planungen
- Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit der Aussagen
- Stand von Wissenschaft und Technik

#### Bewertung:

Die weiterführenden Untersuchungen entsprechen den Anforderungen zur Bearbeitung der offenen Fragen aus der Konzeptplanung zu den Materialeigenschaften und zum Verhalten der Asphalt-Schotter-Dichtelemente der Schachtverschlussysteme (kombinierte Widerlager-Dichtelemente DE2, DE3). Die schrittweise Bearbeitung entsprechend der Abfolge der 3 Teilberichte von I 503 /U3/ ist sinnvoll und angemessen.

Die Unterlage beinhaltet ausschließlich Ausführungen zu den Asphalt-Schotter-Dichte-  
elementen. Vertiefende Planungen bezüglich der weiteren Elemente der Schachtverschluss-  
systeme (Bentonit-Dichteelement DE1, Trenn- und Filterschichten) sowie den Herrichtungsarbei-  
ten sind in I 503 /U3/ nicht dokumentiert.

#### **4.2.2 Auswahl der Baustoffe**

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 1, Kapitel 4):

*Für die geplanten Versuche im Rahmen des Arbeitsprogramms zur Bergtechnischen Erpro-  
bung von Bitumen / Asphalten als Dichtmaterialien in langzeitstabilen Schachtverschluss-  
bauwerken ist ein Schotter entsprechend den Anforderungen in der Konzeptplanung [U4]  
ausgewählt worden. Diese Anforderungen werden im Allgemeinen von Basaltschotter, wel-  
cher der Norm DIN EN 13450 genügt, erfüllt. Deshalb wurde zusätzlich eine Auswahl hin-  
sichtlich der Kriterien „Mineralbestand“ und „Verfügbarkeit“ getroffen und der Basaltschot-  
ter des Steinbruches Bramburg bei Adelebsen ausgewählt. Der Basalt wird zu Gleisschotter  
31,5 / 63 mm nach DIN EN 13450 verarbeitet. Der Steinbruch befindet sich 15 km nordwest-  
lich von Göttingen und liegt in Deutschlands nördlichsten größeren Basaltvorkommen. Die  
Transportentfernung zum ERAM beträgt ca.170 km.*

*Bitumen wird in erster Linie in großem Maßstab als Bindemittel im Asphalt-Straßenbau ein-  
gesetzt. Da es sich bei Bitumen um ein natürliches Endprodukt aus der Petrochemie handelt,  
unterliegt Bitumen in seinen Eigenschaften gewissen Schwankungen, welche von der Herkunft  
des Rohöls und der Raffinerie abhängig sind. ... Die maßgebliche Norm für Straßenbaubitu-  
men ist in Europa die Europäische Norm DIN EN 12591. ... Das maßgebliche Kriterium für  
die Zuordnung eines Bitumens zu einer gewissen Sorte ist dabei die Nadelpenetration nach  
DIN EN 1426. ... In der Unterlage [10] werden Bitumen der Sorten „B80“ und „B200“ aus-  
gewiesen. Diese Sorten sind äquivalent zu den Sorten „70/100“ und „160/220“ und haben  
nach DIN EN 12591 die in Tabelle 5 angegebenen Eigenschaften. In Deutschland gibt es eine  
Vielzahl von Bitumenherstellern, welche Bitumen nach Norm DIN EN 12591 produzieren und  
vermarkten. Die Auswahl der Bitumenhersteller für diese Untersuchungen erfolgte unter dem  
Gesichtspunkt der schnellen Beschaffbarkeit.*

### Bewertung:

Die Auswahl eines Lieferanten von Basaltschotter für die Versuche, der aufgrund der räumlichen Lage des Steinbruches und damit auch aus wirtschaftlichen Gründen für die geplanten Schachverfüllungen geeignet erscheint, ist plausibel. Basalt ist ein alkalisches Gestein mit günstigen Benetzungseigenschaften durch Asphalt. Die Qualität des Baumaterials entspricht den Anforderungen der Konzeptplanung.

Die ausgewählten und untersuchten Bitumensorten erfüllen die Kriterien der Voruntersuchungen. Bei dem genormten und weit verbreiteten Bitumen wird es für zulässig angesehen, den Baustoff nach dem Kriterium der Verfügbarkeit auszuwählen. Die Reproduzierbarkeit der Eigenschaften ist durch geeignete Qualitätssicherungsmaßnahmen zu gewährleisten.

#### **4.2.3 Untersuchungen am Basaltschotter**

##### Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 1, Kapitel 5):

*Für die Erstellung der setzungsstabilen Verfüllsäule wird nach [U4] ein Hartgesteinsschotter aus Basalt nach DIN EN 13450 präferiert. Der Nachweis der Langzeitstabilität gegenüber salinaren Lösungen wird in [U4] geführt. Für die Durchführung der halbtechnischen Versuche zur bergtechnischen Erprobung von Bitumen und Asphalt und auch für die Ableitung von Qualitätskriterien sind die Eigenschaften des Schotters von elementarer Bedeutung. Diese sind*

- *der Feuchtegehalt im Anlieferungszustand,*
- *der Staubgehalt im Anlieferungszustand,*
- *die Korndichte.*

Gemäß Aussage in I 503 wurden 3 Chargen Basaltschotter mit einer Gesamtmasse von 2.700 kg beschafft und untersucht. Eine hohe Feuchte und/oder ein hoher Staubgehalt vermindern die Benetzungsfähigkeit des Schotters durch das Bitumen. Es wurde geprüft, ob der Anlieferungszustand eine untertägige Verwendung ohne zusätzliche Trocknung oder Reinigung ermöglicht.

### Bewertungskriterien:

- Nachvollziehbarkeit der Untersuchungsmethoden
- Stand von Wissenschaft und Technik

### Bewertung:

Die Parameter Feuchte- und Staubgehalt im Anlieferungszustand sowie die Korndichte des Basaltschotters wurden systematisch untersucht. Nach Tabelle 8, S.17, I 503 wurden für die Feuchte bei Anlieferung Werte zwischen 0,30 und 0,53 % ermittelt. Feuchtigkeitsgehalte von ca. 0,5 % werden in der Praxis als zulässig betrachtet. Ob dies für die konkrete Aufgabenstellung der Schotter-Asphalt-Dichtelemente auch gilt, wurde im Rahmen der durchgeführten Eingießversuche geprüft. Die Messbedingungen (Wägung vor und nach Trocknung) und der Rechenweg sind nachvollziehbar dokumentiert. Der Probenumfang ist ausreichend. Eine gleiche Einschätzung gilt für die Bestimmung der Staubbelastung. Tabelle 9, S.17, I 503 dokumentiert Massenanteile zwischen 0,14 und 0,68 Prozent. In I 503 wird gezeigt, dass bei den vorstehend genannten Anlieferungsbedingungen auf Trocknung und Reinigung verzichtet werden kann.

Die Korndichte des Basaltschotters ist eine wichtige Kenngröße um den Porenvolumenanteil einer Schotterschüttung bei bekannter Schüttungsmasse und Schüttungsvolumen zu bestimmen. Um den hohen Genauigkeitsanforderungen und den Wechselwirkungen zwischen Schotter und Bitumen zu entsprechen, wurde das Kornvolumen von präparierten Basaltscheiben mittels Tauchwägung in einem inerten Fluid (Silikonöl Elbesil B10) bestimmt. Das Gewicht der Proben wurde unter Berücksichtigung des Auftriebs in der Luft durch Wägung ermittelt.

*Es wurden 20 Proben gemessen und es zeigte sich eine relativ geringe Streuung der Messergebnisse. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Messungen vergleichbar dargestellt. Die mittlere Dichte des Basaltschotters beträgt  $2,8883 \pm 0,0125 \text{ g/cm}^3$ .*

### Bewertung:

Die verwendeten Untersuchungsmethoden sind gut dokumentiert, entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik und wurden gemäß Dokumentation in I 503 qualitätsgerecht umgesetzt. Die Reproduzierbarkeit der Eigenschaften der Baustoffe ist bei einem geplanten Einsatz durch geeignete Qualitätssicherungsmaßnahmen zu gewährleisten. Das hierfür erforderliche Qualitätssicherungsprogramm ist entsprechend auszugestalten.

**Hinweis H7:** Die Angabe der Standardabweichung für die Korndichte  $\pm 0,0125 \text{ g/cm}^3$  sollte auf eine signifikante Anzahl von Dezimalstellen reduziert werden. Eine statistische Auswertung von 20 Proben erlaubt keine 3 signifikanten Dezimalstellen für die Standardabweichung.

#### **4.2.4 Untersuchungen am Kalksteinfüller**

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 1, Kapitel 6):

*Die Dichte von Bitumen liegt im Allgemeinen im Bereich zwischen 1,00 und 1,05 g/cm<sup>3</sup>. Dadurch erfahren bitumenhaltige Abdichtmaterialien gegenüber salinaren Lösungen einen Auftrieb. Dieser Auftrieb muss immer stabilisierend auf die Abdichtung wirken. Somit ergibt sich die Notwendigkeit, dass bei einem Laugenangriff an der Oberseite der Abdichtung, die Dichte des Abdichtmaterials höher als die Dichte der angreifenden Lösung sein muss. Dazu kann es erforderlich sein, dass die Dichte des Bitumens auf mehr als 1,300 g/cm<sup>3</sup> erhöht wird. In der Praxis erfolgt dies durch die Zugabe eines feinkörnigen mineralischen Füllers.*

*Der Feuchtegehalt des Kalkfüllers Saxolith HE2 beträgt durchschnittlich 0,2 Masse%. Der Füller kann damit als trocken bezeichnet und ohne weitere Behandlung weiterverarbeitet werden.*

*Die mittlere Korndichte des Saxolith HE2, welche mit dem Gaspyknometer bestimmt wurde, beträgt  $2,7928 \pm 0,0096 \text{ g/cm}^3$ .*

*Der Kalkfüller Saxolith HE2 wird in Verbindung mit dem Destillationsbitumen der Spezifikation 160-220 (B200) zur Herstellung eines gefüllerten Bitumens verwendet. Dieses gefüllerte Bitumen kann als Suspension betrachtet werden und unterliegt damit dem Effekt der Sedimentation. Dabei sinken die Füllerteilchen unter der Wirkung der Schwerkraft nach unten. Es bildet sich eine Sedimentationsschicht mit einer natürlichen Ablagerungsdichte und darüber ein Bereich, in dem sich deutlich weniger Füllerpartikel befinden.*

*Der Volumenanteil des Füllers in der Rezeptur nach der Unterlage [U4] wird mit 16 Vol% angegeben. Damit liegt dieser unterhalb des natürlichen Absatzvolumenanteils und es besteht ein relativ hohes Risiko, dass sich das gefüllerte heiße Bitumen entmischt, sobald kein Einfluss homogenisierender Bewegung im Mischgut vorhanden ist. Dieser Effekt wurde während der Laborversuche mit gefüllertem Bitumen B200 mit 16 Vol% Füller bestätigt. Ein gefüllertes Bitumen, welches einen Volumenanteil von mindestens 21,1 Vol% Kalksteinfüller besitzt, ist im ruhenden Zustand sedimentationsstabil. Während der Handhabung und dem*

*Transport untertage, empfiehlt es sich, dass aber auch dieses Material durch Rührwerke bis zum Einguss homogen gehalten wird.*

Bewertungskriterien:

- Nachvollziehbarkeit der Untersuchungsmethoden und Ergebnisse

Bewertung:

Die im Rahmen der Konzeptplanung geplante Rezeptur für das gefüllte Bitumen wurde konkret untersetzt. Dazu wurden die Eingangsparameter (Feuchte, Korndichte, Kornverteilung) des Kalksteinfüllers systematisch untersucht. Die Herstellerangabe des mittleren Korndurchmessers von 2 µm wurde durch laseroptische Messungen mit einem  $d_{50}$ -Wert von 2,53 µm weitgehend bestätigt.

Von Bedeutung für die Gebrauchstauglichkeit des gefüllten Bitumens ist die Homogenität. Die zur Analyse der Homogenität des gefüllten Bitumens durchgeführten Sedimentationsversuche haben gezeigt, dass abhängig vom Volumenanteil des Füllers relevante Entmischungsprozesse durch Sedimentation des Füllers beobachtet werden.

**Hinweis H8:** Die Angabe der Standardabweichung für die Korndichte  $\pm 0,0096 \text{ g/cm}^3$  sollte auf die signifikante Anzahl von Dezimalstellen reduziert werden ( $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ), siehe auch H7.

**Empfehlung E1:** Die Sedimentationsversuche sollten mit der endgültigen Rezeptur wiederholt werden, um konkrete Anforderungen an die Mischvorgänge und mögliche Standzeiten formulieren zu können. Das Sedimentationsverhalten ist im Rahmen der QS-Maßnahmen der Schachtverwahrung zu berücksichtigen.

#### **4.2.5 Untersuchungen der Eigenschaften des Bitumens**

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 1, Kapitel 7 bis 9):

*Für die geplanten Eingießversuche ist eine genaue Bilanzierung des verfüllten Hohlraumvolumens des Schotters nötig. ... Mit dem Anspruch, Volumenbilanzen im Bereich von unter 2 % durchzuführen, muss nicht nur die Masse genau bestimmt werden, sondern auch die Dichte der Baustoffe genau bekannt sein.*

*Für eine thermodynamische Betrachtung des Eingießprozesses, aber auch für thermodynamische Auslegungen zum untertägigen Transport von heißen Vergussmassen ist die Kenntnis der*

*Parameter Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität eine unabdingbare Grundlage.*

*Mit Hilfe des „Hot Disk Verfahrens“ (ISO 22007-2) wurde die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von 3 Materialien an jeweils 2 Proben gemessen. Pro Probe wurden jeweils 3 bzw. 4 Messungen durchgeführt. Die Schwankungsbreite ist als Variationskoeffizient bzw. als relative Standardabweichung angegeben.*

*Da die Fließfähigkeit eines Bitumens bzw. eines gefüllerten Bitumens stark von der Temperatur abhängig ist, muss für die Planung und Bewertung der Einbautechnologie der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Fließfähigkeit bekannt sein. ... Ein direktes Maß für die Fließfähigkeit bzw. für die Verformungseigenschaften ist dabei die Viskosität.*

#### Bewertungskriterien:

- Nachvollziehbarkeit der Untersuchungsmethoden und Ergebnisse

#### Bewertung:

Die temperaturabhängige Dichte der ungefüllten Bitumen B80 und B200 wurde zwischen 25 und 50 °C nach dem Stand der Technik systematisch ermittelt und beschrieben. Weitere Messungen erfolgten mit Fülleranteilen zwischen 16 und 22,5 Prozent. Ab einem Fülleranteil von ca. 17,7 Vol% des Kalksteinfüllers Saxolith wurde eine Mischungsdichte von  $\rho > 1,3 \text{ g/cm}^3$  erreicht. Diese Bedingung wurde bei den im Teilbericht 3: EV3, DV2, EV4 dokumentierten Eingieß- und Druckzellenversuchen mit gefülltem Bitumen B200 mit 22,56% Saxolith (SXD2-2256) eingehalten.

Die bitumenhaltigen Vergussmassen besitzen eine 7 bis 34 fach geringere Wärmeleitfähigkeit als der eingebettete Basaltschotter und das umgebende Gebirge (Steinsalz, Anhydrit). In der Konsequenz resultiert an den Kontaktflächen ein vergleichsweise hoher Temperaturgradienten und in der Folge eine schnelle Abkühlung. Zugleich führt die geringe Wärmeleitfähigkeit und die relativ hohe spez. Wärmekapazität zu relativ langen Abkühlzeiten im Inneren der bitumenhaltigen Vergussmassen. Die ermittelten Daten bilden die Grundlage zur numerischen Modellierung des thermodynamischen Verhaltens des Systems Dichtelement–Gebirge während der Bauphase.

Die Bestimmung der dynamischen Viskosität erfolgte nach dem Stand der Technik mit einem temperierbaren dynamischen Scher-Rheometer. Während bei Temperaturen von 165°C die

gemessene Viskosität über den Messzeitraum annähernd konstant ist, konnte bei Versuchstemperaturen von 25°C über den Messzeitraum zunächst ein Anstieg der Viskosität bis zu einem Spitzenwert mit nachfolgender Abnahme der Viskosität auf ca. 50% des Spitzenwertes beobachtet werden des Bitumens (Abbildung 28 / 29, S.45, I503). Die ermittelten Messwerte sowie ihre Abhängigkeiten von der Bitumenart, der Temperatur und der Füllermenge entsprechen den aus Voruntersuchungen abgeleiteten Erwartungen. Die ermittelten Viskositäten gewährleisten ein holraumarmes Ausgießen von Schotterlagen.

Die methodisch sehr sorgfältig ausgeführte Ermittlung von Basisdaten der Baustoffe für die Schotter-Asphalt-Dichtlemente ist nach Einschätzung der Prüfer eine gute und belastbare Grundlage für die weitere Versuchsdurchführung.

### **4.3 Untersuchungen zur Optimierung der Benetzungsfähigkeit von Bitumen**

#### **4.3.1 Grundlagen und Zielstellung der Untersuchungen**

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 2, Kapitel 1 bis 3):

*Das Konzept der „Bitumenverfüllten Schottersäule“ sieht vor, dass der Schacht mit einer setzungsstabilen Schottersäule aus Hartgesteinsschotter verfüllt wird. ... Hinsichtlich des Einbringens von Bitumen in die Schottersäule, dessen Machbarkeit prinzipiell nicht angezweifelt wird, besteht noch ein relativ geringer Kenntnisstand bei der Umsetzung, weil diese noch nicht ausreichend erprobt ist. Daraus leitet sich der Untersuchungsbedarf ab, bis zu welcher Lagenmächtigkeit des Schotters das Bitumen den Porenraum nahezu hohlraumfrei füllen kann.*

*Für die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit von bitumenhaltigen Abdichtelementen ist eine gute Benetzung des Bitumens an allen Grenzflächen von großer Bedeutung und muss deshalb sichergestellt sein.*

*Das Ziel des vorliegenden Untersuchungsprogramms war es, ein Additiv und dessen optimale Konzentration zu finden, mit welchem die Benetzungsfähigkeit der im ERAM vorgesehenen Vergussmaterialien B80 und SX2D2 verbessert werden kann. Durch eine Verbesserung der Benetzungsfähigkeit der Vergussmaterialien wird deren Heißeinbau in den Porenraum einer stützenden Schottersäule maßgeblich verbessert. Es wurden 3 verschiedene Additive zur Erhöhung der Benetzungsfähigkeit der ausgewählten Bitumensorten untersucht, miteinander verglichen und die Ergebnisse dargestellt.*

### Bewertung:

Die Kapitel 1 bis 3 ermöglichen dem Leser eine gute Einordnung der konkreten Versuchsprogramme in den Gesamtkomplex der Planungen und Untersuchungen zu den Schachtverschlussystemen. In Kapitel 3 werden die physikalischen Grundlagen für das Benetzungsverhalten allgemeinverständlich dargestellt. Die Ausführungen sind geeignet, auch einem sachfremden Leser das Verständnis für die nachfolgend dokumentierten Untersuchungen zu vermitteln.

#### **4.3.2 Untersuchung zur Bestimmung der freien Oberflächenenergie**

##### Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 2, Kapitel 4):

*Um die freie Oberflächenenergie von Steinsalz und Basalt zu bestimmen, wird die indirekte Methode des liegenden Tropfens verwendet. ... In der Praxis hat sich das Modell von OWENS, WENDT, RABEL und KAEBLE (OWRK-Modell) bewährt. ... Für die Auswahl der Messflüssigkeiten ist es wichtig, dass mindestens eine Flüssigkeit ausgeprägt polar und mindestens eine Flüssigkeit ausgeprägt unpolar bzw. dispers ist.*

### Bewertung

Die Methodik ist im Kapitel 4.1 nachvollziehbar dargestellt. Die freie Oberflächenenergie wurde an Proben des verwendeten Basaltschotters sowie repräsentativen Proben des schachtnahen Gebirges (Steinsalz, Anhydrit) ermittelt. Die Probenvorbereitung ist im Kapitel 4.4 ausreichend erläutert. Im Gegensatz zum Basalt waren die Messungen an Steinsalz wegen der Inhomogenität und Anisotropie der Proben mit deutlichen Porositäten an Korngrenzen erschwert. Die sehr geringen Randwinkel der Steinsalzproben führten zu erhöhten Messfehlern. In Tabelle 2, Anlage 2, S.19, I 503 werden die Oberflächenenergien von Basalt und Steinsalz sowie ihre polaren und unpolaren (dispersen) Anteile ausgewiesen. Im Basalt dominiert der disperse Anteil der Oberflächenenergie, im Steinsalz der polare Anteil. Die Konsequenzen, die sich daraus für die weitere Optimierung des Benetzungsverhaltens ergeben, sind im Kapitel 4.7 nachvollziehbar beschrieben. Als ein Ergebnis der Ausführungen resultiert die Schwierigkeit, einen Zuschlagstoff zu finden, der die Benetzungseigenschaften sowohl gegenüber Schotter als auch gegenüber Steinsalz verbessern kann.

### **4.3.3 Untersuchungen zur Benetzungsfähigkeit von Bitumen**

#### Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 2, Kapitel 5):

*Bei den gegenständlichen Untersuchungen wird die Benetzung von Bitumen auf Basalt, Steinsalz, Anhydrit und Gips gemessen. Da bei diesen Materialien, bis auf Basalt, keine Erfahrungen zur Benetzbarkeit mit Bitumen vorliegen, wurde ein neuer Ansatz entwickelt, um mittels einer einzigen Messung den Randwinkel des Tropfens integral zu bestimmen. Für diesen Ansatz gilt die Annahme, dass die zu messenden Tropfen annähernd die Form eines Kugelabschnittes besitzen.*

- B80 ohne Additive (Seite 32): Randwinkel auf Basalt 23°, Steinsalz 15,5° und Anhydrit 20°,
- B80 mit Additiven auf Steinsalz (Seite 34): geringe Änderung der Randwinkel, Verkürzung der Benetzungszeit um ca. 30%,
- B80 mit Additiven auf Basalt (Seite 40): beste Benetzung mit T6841, Verkürzung der Benetzungszeit um ca. 20 bis 80%,
- B80 mit Additiven auf Anhydrit (Seite 46): beste Benetzung mit T6841, Verkürzung der Benetzungszeit um ca. 40 bis 50%,
- Gefüllertes Bitumen ohne Additive (Seite 49): Randwinkel 17,2 – 18,5°, kaum Unterschiede zwischen den Trägermaterialien,
- Gefüllertes Bitumen mit Additiven auf Steinsalz (Seite 51): beste Benetzung mit OLBS, Verkürzung der Benetzungszeit bis 56%,
- Gefüllertes Bitumen mit Additiven auf Basalt (Seite 59): geringste Randwinkel und Verkürzung der Benetzungszeit bis zu 59% mit 0,4 M% T6841,
- Gefüllertes Bitumen mit Additiven auf Gips (Seite 64): nur T6841 getestet, Verkürzung der Benetzungszeit bis ca. 75 %,

Schlussfolgerungen (Seite 72):

*Wie sich gezeigt hat, ist im Gegensatz zu den gemessenen Randwinkeln die Verringerung der Benetzungszeiten am Versuchsende bei modifiziertem Bitumen in Relation zum unmodifizierten Bitumen ein deutlich charakteristischeres Kriterium zur Beurteilung der Wirkung der Additive.*

*Da für den Eingießprozess des heißen Vergussmaterials in den Schotterporenraum die schnelle Benetzung am Basaltschotter von großer Bedeutung ist, kann mit einer Zugabe des Additivs TEGOPREN 6841 das vergleichsweise bestmögliche Ergebnis erzielt werden. Aus wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Sicht ist eine Zugabe von TEGOPREN 6841 mit 0,8M% zum Vergussmaterial (B80 und SX2D2) zu empfehlen.*

### Bewertung

Der Randwinkel von Bitumentropfen wird von der TU Freiberg rechnerisch aus dem Radius und dem Volumen ermittelt (Formel 7, Anlage 2, S.24, I 503). Der Tropfenradius wird dabei mittels Bildbearbeitung von digitalen Fotos unter einem temperierbaren Mikroskop bestimmt. Dazu wurde ein spezieller Auswertalgorithmus entwickelt. Die Masse der Probekörper (Bitumen) wird gemessen und daraus das Volumen bestimmt. Die temperaturabhängige Dichte wurde im Teilbericht von Anlage 2 bestimmt. Zum sicheren Erreichen des stationären Zustands bei unterschiedlichen Temperaturen wurde die Entwicklung der Tropfen grundsätzlich über 2,75 h beobachtet und ausgewertet. Die automatisierte Bildauswertung erlaubte eine detaillierte Untersuchung der Zeitabhängigkeit des Benetzungsverhaltens.

Die Versuchsmethodik ist gut nachvollziehbar und durch verwendete Berechnungsgleichungen und Abbildungen dargelegt. Lediglich die gewählten Abkürzungen SMS für „Steinsalz aus Morsleben der Staßfurt-Serie“ und AM für „Anhydrit aus Morsleben“ sind aus geologischer Sicht gewöhnungsbedürftig.

Um die Versuchsanzahl zu begrenzen, wurden nur die Kombinationen aus Bitumensorte und Wirtsgestein bzw. Schotter untersucht, welche auch für die technologische Umsetzung des Konzeptes der Bitumen verfüllten Schottersäule relevant sind. Die Wirksamkeit der theoretisch-optimalen Additive für Steinsalz und Basalt wurde auch gegenüber Anhydrit und Gips untersucht, um die gegenläufigen Wirkungen von polaren und dispersen Medien berücksichtigen zu können. Die Additive wurden von den marktführenden Herstellern „Evonik“ und „Akzo Nobel“ bezogen, siehe Tabelle 5, Anlage 2, S. 30, I 503.

Das Versuchsprogramm wurde nach Einschätzung der Prüfer zielführend aufgestellt und systematisch abgearbeitet. Alle wesentlichen Materialkombinationen wurden betrachtet. Es könnte sich jedoch ein ergänzender Untersuchungsbedarf ergeben, wenn bei der Beraubung der Schachtausmauerung lokale Salzfazies festgestellt werden sollten, die einen besonderen Umgang erfordern. Beim Auftreten von stark hygroskopischen Salzgesteinen, wie Carnallit, kann eine spezielle Oberflächenbehandlung erforderlich sein, beispielsweise eine Schutz-

schicht aus Epoxidharz. In solchen Fällen könnte eine Prüfung zusätzlicher Materialkombinationen bzw. -eigenschaften erforderlich werden.

**Empfehlung E2:** Beim Einsatz spezieller Materialien zur Beschichtung bzw. Stabilisierung des anstehenden Gebirges (Bsp. Carnallit) sollten die möglichen Wechselwirkungen mit den Versatzbaustoffen, insbesondere mit den Bitumenmischungen überprüft werden.

Die Versuchsauswertung berücksichtigt neben technischen auch wirtschaftliche Aspekte des Einsatzes von Additiven. Die Bewertung von 0,8 Masseprozent des Additivs TEGOPREN 6841 (T6841) als optimale Variante lässt sich an Hand der Versuchsergebnisse gut nachvollziehen.

#### **4.4 Halbtechnische Versuche zum Einguss von Bitumen in Basaltschotter**

##### ***4.4.1 Grundlagen und Zielstellung der Untersuchungen***

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 3, Kapitel 1 und 2):

*Im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen wurden 4 Eingießversuche in Glasrohren und 3 Druckversuche in Stahlrohren mit Druckbeaufschlagung durchgeführt. Ziel war es, Erkenntnisse zur Einbautechnologie und zum Abdichtverhalten einer bitumenverfüllten Schottersäule zu gewinnen.*

Bewertung:

Die Darstellungen der Grundlagen sowie der Zielstellung ordnet die Versuche der Teilunterlage I 503, Anlage 3 eindeutig in das Gesamtprogramm der weiterführenden Planungen „Bitumenverfüllte Schottersäule als Dichtelement der Schachtverschlüsse“ ein. Die Berichtsstruktur ist logisch und nachvollziehbar aufgebaut. Der Berichtsteil Anlage 3 enthält auf 87 Seiten insgesamt 113 Abbildungen und 13 Tabellen. Zusätzlich existieren mehrere Videos der Versuchsdurchführungen.

##### ***4.4.2 Untersuchungen zur Vergießbarkeit***

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 3, Kapitel 3):

*Die geplanten Untersuchungen dienen dem Nachweis des hohlraumarmen Vergusses des offenen Porenraumes einer Schottersäule mit Bitumen B80 bzw. mit gefüllertem Bitumen SX2D2-2256 (mit Kalkfüller "Saxolith HE2" gefüllertes B200).*

*Es sollen Erkenntnisse gewonnen werden, bis zu welchen Schotterlagenmächtigkeiten sich der Schotter sofort hohlraumarm mit heißem Bitumen verfüllen lässt.*

- Eingießversuch EV1 – B80 bei 60 cm Schotterlage (Seite 18): unmittelbar nach Eingießen betrug die Sättigung des Schotterporenraumes 97,6%, nach 24 h 99,1% bzw. die Gesamtporosität 0,34 Vol.%; schneller Eingießvorgang.
- Eingießversuch EV2 – B80 bei 120 cm Schotterlage (Seite 23): Sättigung des Schotterporenraumes: unmittelbar nach Eingießen betrug die Sättigung des Schotterporenraumes 97,5%, nach 24 h 99,6% bzw. die Gesamtporosität 0,13 Vol.%; über die Lage von 120 cm verlangsamter Eingießprozess wegen Abkühlung.
- Eingießversuch EV3 – B200 gefüllt bei 60 cm Schotterlage (Seite 27): unmittelbar nach Eingießen betrug die Sättigung des Schotterporenraumes 88,1%, nach 48 h >99,1% bzw. die Gesamtporosität <0,1 Vol.; schnelleres Abkühlen und langsames Nachkriechen als B80.
- Eingießversuch EV4 – B200 gefüllt mit 0,8% T6841, 120 cm Schotterlage (Seite 232): Bitumen fließt nicht bis zur Basis der Schottersäule, Eindringtiefe zunächst nur ca. 69 cm, nach 14 Tagen ca. 92 cm.

#### Bewertung:

Die halbtechnischen Versuche zum Eingießverhalten wurden methodisch begründet und gut nachvollziehbar ausgeführt. Sie lieferten ein anschauliches Prozessverständnis für die Bedingungen und Abläufe beim Vergießen von Schottersäulen mit Bitumen. Die Ergebnisse identifizieren die maximal zu vergießende Lagenstärke und sind eindeutig geeignete Grundlage für die Planung und Durchführung weiterer Versuche (Druckversuche im Technikum, großmaßstäblicher Eingießversuch über Tage und in situ Versuch im ERAM). Der in Anlage 3, I503 dokumentierten Einschätzung, dass die ermittelten Zahlenwerte für die möglichen Lagenstärken zunächst nur für die konkreten Versuchsbedingungen (Glasrohr mit 30 cm Durchmesser) Gültigkeit besitzen, wird von den Prüfern in gleicher Weise beurteilt. Bei einem realen Schachtdurchmesser von ca. 8 m ist vorbehaltlich entsprechender Untersuchungen die Möglichkeit eines geänderten Fließverhaltens zu berücksichtigen.

**Forderung F6:** Die technische Machbarkeit und Gebrauchstauglichkeit von Bitumen-Schotter Dichtelementen ist großmaßstäblich und unter Berücksichtigung der bergbautechnischen Bedingungen in situ gegenständlich nachzuweisen. (Das weitere Versuchsprogramm wurde bereits mit AS abgestimmt und initiiert.)

#### **4.4.3 Untersuchungen zum Abdichtverhalten**

Angaben der Prüfunterlage (I 503, Anlage 3, Kapitel 4):

*Die Abdichtwirkung des Vergussmaterials gegenüber dem angreifenden Fluid beruht auf dem chemisch inerten Verhalten von Bitumen zu wässrigen Lösungen und dem Dichteunterschied zwischen den beiden Flüssigkeiten Bitumen und Salzlösung bzw. gefüllertem Bitumen und Salzlösung. Bei einem Fluidangriff von der Unterseite her (Abbildung 40) muss das Abdichtfluid (Bitumen) leichter als das angreifende Fluid (Salzlösung) sein. Dadurch steht das abdichtende und leichtere Fluid unter Auftrieb gegenüber dem angreifenden und schwereren Fluid. Bei einem Fluidangriff von der Oberseite her (Abbildung 41) muss das Abdichtfluid (gefüllertes Bitumen) schwerer als das angreifende Fluid (Salzlösung) sein. Dadurch steht das abdichtende und schwerere Fluid unter einem höheren hydrostatischen Druck als das angreifende und leichtere Fluid.*

*Im Belastungsfall wird der Druck des angreifenden Fluids auf das Abdichtfluid nahezu sofort übertragen. Gleichzeitig muss aber auch das Abdichtfluid am Wirtsgestein benetzen.*

*Insgesamt ergeben sich daraus folgende Versuchsziele:*

- 1. Nachweis des hydrostatischen Verhaltens von reinem Bitumen B80 und gefüllertem Bitumen SX2D2-2256*
  - 2. Bestimmung des Druckanstiegs im Vergussmaterial Bitumen B80 bei schneller Druckbelastung in einem Druckzellenvorversuch*
  - 3. Nachweis der technischen Dichtheit des Abdichtsystems aus bitumenverfülltem Schotter gegenüber Wasser bei Fluiddrücken bis zu 2 MPa*
- Druckversuch DV1 mit B80 (Seite 44): Sättigung des Porenraumes 99,7%; Nachweis einer schnellen isotropen Druckausbreitung; Wasser- und Bitumenausstritte aus Messkabeln; unter Laugendruck Bildung lokaler Absenkungen im Bitumenspiegel („viscous fingering“); beim Rückbau wurden mehrere Wassereinschlüsse in der Schottersäule festgestellt.

- Druckversuch DV2 mit gefülltertem B200 mit Additiv (Seite 62): Sättigung des Porenraumes 96,9 % bzw. 99,44% nach 1. und 2. Verguss; langsamer Druckanstieg bis 2 MPa; Auspressung an Kabeldurchführung; keine Hinweise auf „viscous fingering“; Einsatz eines Fluorescein-Tracers.
- Druckversuch DV3 mit B80 ohne Instrumentierung (Seite 78): Geotextil und Filterschicht mit weit gestufter Kornverteilung; Versuchsdauer 62 Tage; kein Bitumenaustritt.

### Bewertung:

Die Druckversuche wurden methodisch gut nachvollziehbar durchgeführt und dokumentiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass innerhalb der bitumenverfüllten Schottersäule eine schnelle isotrope Druckausbreitung erfolgt. → Isotrope Druckausbreitung ist zentrale Voraussetzung für die selbstabdichtende Wirkung des Schotter-Bitumen-Gemisches bei Einsatz als Dichtelementbaustoff.

Die Versuche zeigten aber auch die hohen technischen Anforderungen, die zur Gewährleistung der Dichtigkeit der Kontaktflächen zwischen Schotter-Bitumen-Gemisch und Filterschicht bzw. Widerlager erfüllt werden müssen. Im Versuch DV3 erfolgten erste weitergehende Untersuchungen zur Optimierung der Filterschichten. Durch die Prüfer wird eingeschätzt, dass im Rahmen der Ausführungsplanung zu den Schachtverschlussystemen diesbezüglich vertiefende Untersuchungen erforderlich sind. Der Untersuchungsbedarf wird durch die Erfahrungen aus dem ersten obertägigen Großversuch von Hermsdorf bestätigt, bei dem Bitumen aus der Verschalung austrat.

**Forderung F7:** Spezifizierung der Anforderungen und Optimierung der asphaltlichten Trennschichten bzw. Widerlager.

Durch Umläufigkeiten an der Instrumentierung wurde eine Durchströmung der Versuchszelle beobachtet. Im DV1 betrug der Volumenstrom bei 2 MPa bis zu  $0,04 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Durch die Strömungsprozesse bildeten sich röhrenartige Vertiefungen und auch Wassereinschlüsse im Bitumen. Dieser Effekt wird als „viscous fingering“ oder „Saffman-Taylor-Instabilität“ beschrieben. Dadurch wird eine stabile Phasengrenze zwischen dem Bitumen und dem anstehenden Fluid verhindert bzw. gestört. Für den Versuch DV1 wurde eine kritische Grenzgeschwindigkeit abgeleitet, unter der die Phasengrenze stabil bleiben sollte. Die durchgeführten „ersten Überschlagsberechnungen“ und die Aussage auf Seite 62, Anlage 3, I503, *der Effekt*

*des viscous fingering wird nach den gegenwärtigen Modellvorstellungen bei den Verschlüssen der Schächte Bartensleben und Marie nicht auftreten*, sind für eine sichere Nachweisführung der Gebrauchstauglichkeit der Dichtelemente nicht hinreichend. In der Konsequenz wird auf die vorstehend genannten Forderungen F6 und F7 verwiesen, da unzulässige Durchströmungen nur bei einer hinreichend dichten Kapselung des Bitumens ausgeschlossen werden können.

**Forderung F8:** Prüfung und Ausschluss von Bedingungen unter denen das sogenannte „viscous fingering“ in den Schachtverschlussystemen auftreten könnte.

## **5 Zusammenstellung der durch P 500, P 501 und I 503 noch nicht bearbeiteten Fragestellungen aus Prüfungsphase**

Die nachfolgende Zusammenstellung verzichtet ausdrücklich auf die Dokumentation von Fragestellungen, zu deren Beantwortung durch den AS bereits Untersuchungen initiiert worden sind, auch wenn diese Untersuchungen aufgrund des aktuellen Bearbeitungsstandes noch nicht bzw. noch nicht abschließend geeignet sind, die Fragestellungen im Sinne der Anforderungen an die Nachweisführung zu beantworten.

1. Um der konzeptionell vorgesehenen Lösungsoptimierung zu entsprechen, sind zwei geeignete Grundmodelle zu entwickeln, die Eingang in den Optimierungsprozess finden (E1 aus /U12/).
2. Es ist zu prüfen, ob ein langfristig wirksam werdendes Dichtelement "verdichteter Salzgrus" im Bereich des anstehenden Salzgesteins in die Schachtverschlussysteme integriert werden kann bzw. muss (F1 aus /U12/).
3. Ein quantitativer Nachweis für die Setzungsstabilität aller Filterschichten ist gegenständig zu erbringen (F9). Die Setzungsstabilität der vorgesehenen Filterschichtmaterialien aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden ist nachzuweisen (F10).
4. Es ist zu untersuchen, welche Wandrauhigkeit in Abhängigkeit von der vorgesehenen Beraubetechnik erreicht wird. Der Nachweis der Setzungsstabilität ist mit diesen Wandeigenschaften zu führen (F11).
5. Die Übertragbarkeitseignung der gesammelten Erfahrungen durch Versuche am Schacht Salzdetfurth II auf die Schachtverschlüsse ERAM muss hinsichtlich Setzungen bzw. Sackungen, der unterschiedlichen Schachtdurchmesser und der gezielten Bewässerung des Bentonit-Dichtelementes nachgewiesen werden (F12). Es ist zu untersuchen und zu bewerten, welchen Einfluss eine Teildurchfeuchtung des Bentonit-Dichtelementes auf die Wirksamkeit der restlichen Bentonitbereiche hat. Die Auswirkungen von Setzungen der Dichtelemente auf die Dichtigkeitsfunktion sind zu untersuchen und ihre Unbedenklichkeit zu belegen (F13).
6. Die Problematik von möglichen Ankern, die eine Störung hinsichtlich der Dichtigkeit des anstehenden Wirtsgesteins darstellt, ist in der Nachweisführung angemessen zu berücksichtigen (F14).
7. Es ist ein petrostatischer Druck als ungünstigster Lastfall für den Fluiddruck anzusetzen (F15).

8. Es ist eine Konzeptplanung für die konstruktive Ausgestaltung der Füllörter auszuarbeiten. Die Sicherheit der dabei gewählten Konstruktion ist quantitativ zu beurteilen (F16).
9. Die Problematik des Bereichs unterhalb von 400m im Schacht Marie mit Mauerwerksabriss und Laugenstand ist in der Planung zu berücksichtigen. Es sind Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen und ihre Machbarkeit betriebs- sowie gerätetechnisch nachzuweisen (F17).

## **6 Liste der verwendeten Unterlagen**

- /U1/ Unterlagen zur vertiefenden Nachweisführung der Schachtverfüllung beim Schacht Marie, BfS, Stielow, Stand 24.05.2011 (P-500)
- /U2/ Numerische Modellrechnungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Schachtverfüllung für den Schacht Bartensleben, IfG, Weise, Stand 17.11.2011 (P-501)
- /U3/ Bergtechnische Erprobung von Bitumen/Asphalt als Dichtmaterial in langzeitsicheren Schachtverschlussbauwerken; Labor- und halbtechnische Versuche, Abschlussbericht, TU Bergakademie Freiberg, Kudla, Glaubach, Hofmann, Stand: 16.09.2012 (I-503)
- /U4/ Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben (P 182)
- /U5/ Nachweisführungen zur Langzeitstabilität, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben (P 177)
- /U6/ Konzept- und Systembeschreibung Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie (G 183)
- /U7/ Planungsstudie zum Schachtverschluss der Schächte Bartensleben und Marie. Preuss, J. & Wellmann, P. L.; BfS; 2000
- /U8/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Bartensleben (I 107)
- /U9/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Marie (I 108)
- /U10/ Untersuchung zur Entwicklung und Bewertung von Stilllegungskonzepten nach dem Abdichtkonzept (I 114)
- /U11/ Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) – Prüfkomplex: Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie - Unterlagen P 182, P 177, G 183, Planungsstudie (Preuss & Wellmann) AG Morsleben, 12.03.2007
- /U12/ Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM); Stellungnahme im Rahmen der Prüfung der Unterlagen zum Prüfkomplex Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie - Prüfungsphase (b) – Unterlagen P182, P177, G183, Planungsstudie (Preuss & Wellmann); AG Morsleben, 16.12.2009

- /U13/ Beratertätigkeit des LAGB im Planfeststellungsverfahren Stilllegung des ERA Morsleben; Kurzstellungnahme zu den Unterlagen P 500 und P 501  
Landesamt für Geologie und Bergwesen; 02.04.2012
- /U14/ Rahmenrichtlinie über die Gestaltung von Sachverständigengutachten in atomrechtlichen Verwaltungsverfahren, Bekanntmachung des BMI vom 15.12.1983 - RSI6-513820/4.
- /U15/ BGR (2001): ERA Morsleben, Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere der Schachanlage Marie, Abschlussbericht, P113.
- /U16/ Düsterloh, U.; Lux, K.-H. (2012): Experimentelle Untersuchungen zum Materialverhalten, Prüfkomplex 8: Geomechanik / Standsicherheit - Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des ERA Morsleben, Clausthal, Dez. 2012.
- /U17/ BGR (1998): Geologische Gesamtbewertung der Lösungszutritte in den Gruben Bartensleben und Marie, Dezember 1998, I58.

## 7 Zusammenstellung der Hinweise, Empfehlungen und Forderungen

Hinweis H	Empfehlung E	Forderung F	Seite	Stichwort
Laufende Nummer				
1			13	Dilatanzfestigkeiten nicht zahlenmäßig dokumentiert.
2			13	Für Gleichung zur Charakterisierung der minimalspannungsabhängigen Dilatanzfestigkeit ist in Gültigkeitsbereich zu formulieren.
3			14	Gleichung für Berechnung der minimalspannungsabhängigen Bruchfestigkeit wird nicht dokumentiert.
4			17	Axialspannungen der Kriechversuche in Tab. 2-2.1 sind falsch.
5			17	Fotographische Dokumentation der für Kriechversuche verwendeten Prüfkörper fehlt.
6			18	In Abb. 2.3-1 aufgetragene Wertepaare dokumentieren nicht die Versuchsergebnisse.
		1	18	Abb. 2.3-1 ist entsprechend der tatsächlich ermittelten Versuchsergebnissen zu korrigieren.
		2	19	Begründung für Einschätzung, dass Versuchsergebnisse in guter Übereinstimmung mit empfohlener Kriechformel BGR.

Hinweis <b>H</b>	Empfehlung <b>E</b>	Forderung <b>F</b>	Seite	Stichwort
		3	22	Rechnerische Untersuchungen zum Tragverhalten Schacht Marie sind auf der Grundlage standortspezifischer Materialparameter durchzuführen.
		4	26	Materialverhalten des anstehenden Gebirges ist standortbezogen zu belegen.
		5	29	Für den Nachweis der Tragfähigkeit ist die geringfügigkeit der Verschiebung zu dokumentieren und zu begründen.
7			35	Nur signifikante Dezimalstellen der Korndichte angeben
8			36	Nur signifikante Dezimalstellen der Korndichte angeben
	1		36	Die Sedimentationsversuche sollten mit der endgültigen Rezeptur wiederholt werden
	2		42	Beim Einsatz spezieller Materialien zur Beschichtung des Gebirges sind die möglichen Wechselwirkungen mit den Bitumenmischungen zu überprüfen.
		6	44	Großmaßstäblicher Versuch unter Berücksichtigung der bergbautechnischen in situ Bedingungen (bereits in Bearbeitung)
		7	45	Spezifizierung der Anforderungen und Optimierung der asphaltlichten Trennschichten bzw. Widerlager

Hinweis H	Empfehlung E	Forderung F	Seite	Stichwort
		8	46	Prüfung von Bedingungen unter denen das sogenannte „viscous fingering“ in den Schachtverschlussystemen auftreten könnte.
		9	47	Nachweis für die Setzungsstabilität aller Filterschichten ist gegenständlich zu erbringen
		10	47	Die Setzungsstabilität der vorgesehenen Filterschichtmaterialien aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden ist nachzuweisen
		11	47	Der Nachweis der Setzungsstabilität ist mit diesen Wandeigenschaften zu führen
		12	47	Übertragbarkeit der Versuche am Schacht Salzdettfurth II auf ERAM betreffs Setzungen bzw. Befeuchtung des Bentonit nachgewiesen
		13	47	Untersuchung der Einflüsse einer Teildurchfeuchtung des Bentonit-Dichtelementes
		14	47	Problematik von Ankern u.ä. hinsichtlich der Dichtigkeit des Wirtsgesteins angemessen berücksichtigen
		15	47	petrostatischen Druck als ungünstigsten Lastfall für den Fluidruck anzusetzen
		16	48	Konzeptplanung für die konstruktive Ausgestaltung der Füllörter auszuarbeiten

Hinweis <b>H</b>	Empfeh- lung <b>E</b>	Forderung <b>F</b>	Seite	Stichwort
		17	48	Der Bereich unterhalb von 400m Schacht Marie mit Mauerwerksabriss und Laugenstand ist in der Planung zu berücksichtigen