

Fachgespräch

„Verschlusssysteme – Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung“

Freiberg, 03.-04.05.2017

- Materialienband -

Das Fachgespräch wurde gemeinsam von der TU Bergakademie Freiberg



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

und dem Projektträger Karlsruhe



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Projektträger für das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

veranstaltet.

Herausgeber:
Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Internet: www.ptka.kit.edu

August 2017



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Vorwort

Zum Fachgespräch "Verschlusssysteme – Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung" in den Tagungsräumen der „Alten Mensa“ der TU Bergakademie Freiberg hatten sich 95 Teilnehmer angemeldet. Mit der Veranstaltung wird die Reihe der Fachgespräche zu Verschlussbauwerken, Verschlussmaßnahmen bzw. Verschlusssystemen (2003 Freiberg, 2004 Braunschweig, 2005 Teutschenthal, 2009 Freiberg und 2015 Freiberg) fortgesetzt. Das Fachgespräch wurde unter Bezugnahme auf die Endlagerforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) durchgeführt und es wurde von der TU Bergakademie Freiberg und dem Projektträger Karlsruhe gemeinsam veranstaltet.

Die Fachvorträge hatten überwiegend direkten Bezug zu gerade abgeschlossenen oder noch bearbeiteten Projekten im Rahmen der BMWi geförderten Endlagerforschung und befassten sich mit anwendungsbezogener Grundlagenforschung zu den drei Themenbereichen „Konzepte“, „Baustoffe“ sowie „Simulation, Demonstration und Anwendung“. In dem Fachgespräch wurde der aktuelle Erkenntnisstand zu diesen Themenbereichen dargelegt und diskutiert. Außerdem wurden neue Projektideen (z. B. zum Einsatz eutektischer Salzschnmelzen) und Planungen zu Anschlussvorhaben (z. B. STROEFUN, GESAV II und SANDWICH-VP) vorgestellt. Praxisorientierte und teilweise standortbezogene Beiträge der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), der Asse-GmbH und der DBE GmbH zu untertägigen Großversuchen und zur Qualitätssicherung rundeten das Vortragsprogramm ab.

Durch die wissenschaftlichen Vorträge und die sich daraus ergebenden Diskussionen wurde deutlich, dass die anwendungsbezogene Grundlagenforschung des BMWi zum Thema Verschlusssysteme und Arbeiten zu Endlagerprojekten im Zuständigkeitsbereich des BMUB zum einen sehr klar gegeneinander abgrenzbar, zum anderen aber auch effektiv verzahnt sind und sich fachlich sehr gut ergänzen.

Allen Vortragenden und Teilnehmern sowie in besonderem Maße den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der TU Bergakademie Freiberg sei nochmals für ihr Engagement und die gewährte Unterstützung gedankt.

Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr. H. Pitterich
Dipl.-Ing. M. Bühler

Diese Zusammenstellung der Vortragsunterlagen ist vornehmlich zur Information der Teilnehmer des Fachgesprächs bestimmt.

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) übernimmt keine Gewähr insbesondere für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

Eine auszugsweise oder vollständige Vervielfältigung ist erlaubt, wenn die Zustimmung der betroffenen Autoren vorliegt.

Berichte und Publikationen zu Projektstatusgesprächen, Kolloquien und Fachgesprächen sind über die Internetseite

www.ptka.kit.edu/wte/171.php

des PTKA zu finden.

Inhaltsverzeichnis

Veranstaltungsprogramm	1
<u>W. Kudla</u> , M. Gruner, TU Bergakademie Freiberg; M. Jobmann, DBE Technology GmbH, Peine.	3
<i>ELSA-II - Konzepte für Schachtverschlüsse für Endlager im Steinsalz und im Tonstein</i>	
O. Langefeld, TU Clausthal	17
<i>Strömungstechnischer Funktionsnachweis: Konzept zum gegenständlichen Dichtigkeitsnachweis für Verschlussbauwerke – Ergebnisse aus Phase I und Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten</i>	
U. Düsterloh, TU Clausthal.....	35
<i>Konzeption, Untersuchung und Modellierung eines Abdichtungselementes aus Salzschnittblöcken zum Nachweis der Barrierenintegrität</i>	
<u>W. Minkley</u> , IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig; W. Bollingerfehr, DBE Technology GmbH, Peine	45
<i>Eutektische Salzschnmelzen als Verfüll- und Verschlussmaterial</i>	
<u>H. Mischo</u> , <u>S. Becker</u> , TU Bergakademie Freiberg	63
<i>Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Ergebnisse der Projektphase I und Ausblick</i>	
D. Freyer, TU Bergakademie Freiberg	81
<i>Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff</i>	
K. Jantschik, <u>O. Czaikowski</u> , GRS, Braunschweig.....	99
<i>Aktuelle Untersuchungen der Dichtfunktion zementbasierter Baustoffe bei Durchströmung mit salinärer Lösung</i>	
<u>M. Gruner</u> , D. Freyer, TU Bergakademie Freiberg; T. Popp, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig	111
<i>MgO-SEAL - Verhalten von MgO-Spritzbeton bei Angriff von MgCl₂-Lösung</i>	
R. Schuhmann, KIT-CMM, Karlsruhe.....	123
<i>Das SANDWICH-Verschlussystem mit Äquipotenzialsegmenten</i>	
<u>U. Glaubach</u> , IBeWa, Freiberg; W. Kudla, TU Bergakademie Freiberg	137
<i>ELSA-II - Asphalt und Bitumen als Baustoffe für Verschlussysteme</i>	
B. Stielow, J. Wollrath, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Salzgitter; <u>M. Kreienmeyer</u> , T. Schröpfer, J. Bauer, DBE GmbH, Peine	151
<i>Untertägiger Großversuch für vertikale Abdichtelemente aus Schotter und heiß eingebautem Bitumen</i>	
<u>Ph. Herold</u> , DBE Technology GmbH, Peine; Th. Wilsnack, IBeWa, Freiberg	167
<i>ELSA-II - Modellierungen zu Bitumen- und Bentonitdichtsystemen im Tongestein</i>	

R. Wendling, Asse-GmbH, Remlingen	181
<i>QS-Programm zur Sicherstellung der Baustoffeigenschaften von Sorelbeton A1 für Strömungsbarrieren</i>	
<u>R. Mauke</u> , J. Wollrath, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Salzgitter; M. Kreienmeyer, F. Manthee, DBE GmbH, Peine	193
<i>In-situ-Versuch für ein Abdichtbauwerk im Steinsalz im ERAM - aktuelle Ergebnisse und Erkenntnisgewinn</i>	

Veranstaltungsort

Studentenhaus „Alte Mensa“ - Großer Saal
TU Bergakademie Freiberg
Petersstr. 5
09599 Freiberg

Hinweise zur Anfahrt:

<http://tu-freiberg.de/universitaet/profil/campusplan>

Die Teilnahme ist kostenlos.

Organisation

Professur für Erdbau und Spezialtiefbau
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
TU Bergakademie Freiberg
Gustav-Zeuner-Str.1A
09599 Freiberg

Dr. Matthias Gruner
Telefon: 03731 39 2517
Matthias.Gruner@mabb.tu-freiberg.de

Anmeldeformulare senden Sie bitte an
Frau Karin Küttner
Telefon: 03731 39 2893
Karin.Kuettner@mabb.tu-freiberg.de



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Das Fachgespräch wird gemeinsam von der
TU Bergakademie Freiberg und dem
Projekträger Karlsruhe im Auftrag des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
veranstaltet.

Information

Projekträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Campus Nord
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Dipl.-Ing. Michael Bühler
Telefon: 0721 608 24844
michael.buehler@kit.edu



Stand: 26.04.2017

www.ptka.kit.edu/wte

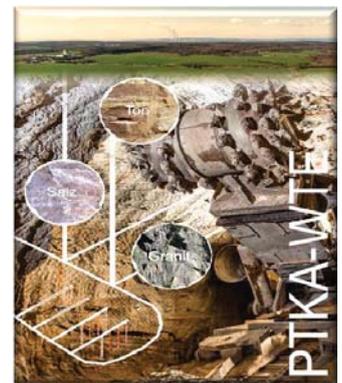


Fachgespräch

Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation,
Demonstration und Anwendung

Freiberg
03.05. - 04.05.2017

Projekträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)



KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

www.kit.edu

Programm

Mittwoch, 03. Mai 2017

13:00
Begrüßung

Themenbereich I: Konzepte

13:10 - 13:40
ELSA-II - Konzepte für Schachtverschlüsse für Endlager im Steinsalz und im Tonstein
W. Kudla, M. Gruner, TU Bergakademie Freiberg;
M. Jobmann, DBE Technology GmbH, Peine

13:40 - 14:10
Strömungstechnischer Funktionsnachweis: Konzept zum gegenständlichen Dichtigkeitsnachweis für Verschlussbauwerke – Ergebnisse aus Phase I und Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten
O. Langefeld, TU Clausthal

14:10 - 14:40
Konzeption, Untersuchung und Modellierung eines Abdichtungselementes aus Salzschnittblöcken zum Nachweis der Barrierenintegrität
U. Düsterloh, TU Clausthal

14:40 - 15:10
Eutektische Salzschnmelzen als Verfüll- und Verschlussmaterial
W. Minkley, IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig;
W. Bollingerfehr, DBE Technology GmbH, Peine

Kaffeepause

Themenbereich II: Baustoffe

15:40 - 16:10
Gefügestabiler Salzgrusversatz - Ergebnisse der Projektphase I und Ausblick
H. Mischo, S. Becker, TU Bergakademie Freiberg

16:10 - 16:40
Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff
D. Freyer, TU Bergakademie Freiberg

16:40 - 17:10
Aktuelle Untersuchungen der Dichtfunktion zementbasierter Baustoffe bei Durchströmung mit salinärer Lösung
K. Jantschik, O. Czaikowski, GRS, Braunschweig

17:10 - 17:40
MgO-SEAL - Verhalten von MgO-Spritzbeton bei Angriff von MgCl₂-Lösung
M. Gruner & D. Freyer, TU Bergakademie Freiberg;
T. Popp, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

ab ca. 18:00
Abendveranstaltung im BrauhoF
(Freiberg, Kömerstr. 2)

Donnerstag, 04. Mai 2017

09:00 - 09:30
Das SANDWICH-Verschlussystem mit Äquipotenzialsegmenten
R. Schuhmann, KIT-CMM, Karlsruhe

09:30 - 10:00
ELSA-II - Asphalt und Bitumen als Baustoffe für Verschlussysteme
U. Glaubach, IBeWa, Freiberg; W. Kudla, TU Bergakademie Freiberg

10:00 - 10:30

Untertägiger Großversuch für vertikale Abdichtelemente aus Schotter und heiß eingebautem Bitumen
B. Stielow, J. Wollrath, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Salzgitter;
M. Kreienmeyer, T. Schröpfer, J. Bauer, DBE GmbH, Peine

Kaffeepause

Themenbereich III: Simulation, Demonstration und Anwendung

11:00 - 11:30
ELSA-II - Modellierungen zu Bitumen- und Bentonitdichtsystemen im Tongestein
Ph. Herold, DBE Technology GmbH, Peine;
Th. Wilsnack, IBeWa, Freiberg

11:30 - 12:00
QS-Programm zur Sicherstellung der Baustoffeigenschaften von Sorelbeton A1 für Strömungsbarrieren
R. Wendling, Asse-GmbH, Remlingen

12:00 - 12:30
In-situ-Versuch für ein Abdichtbauwerk im Steinsalz im ERAM - aktuelle Ergebnisse und Erkenntnisgewinn
R. Mauke, J. Wollrath, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Salzgitter;
M. Kreienmeyer, F. Manthee, DBE GmbH, Peine

Abschlussdiskussion
ca. 13:00 **Schlusswort**

Mittagsimbiss

ELSA II – Konzepte für Schachtverschlüsse für Endlager im Steinsalz und im Tonstein

Wolfram Kudla, Matthias Gruner, Michael Jobmann, Philipp Herold

Fachgespräch Verschlusssysteme: 3. – 4. Mai 2017 in Freiberg

Gefördert durch:



FKZ: 02E11193A / 02E11193B

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsvorhaben ELSA 2

1. Schachtverschlusskonzepte für HAW-Endlager im Salz und Tonstein (und ALZ)
2. Verschlusselement verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch (vorgestellt beim Statusgespräch 11/2016)
3. Bohrlochversuche mit Verschlusselementen aus Bitumen / Asphalt (siehe Vortrag Glaubach / Kudla; teils vorgestellt beim Statusgespräch 11/2016)
4. MgO-Beton (C3) in situ-Versuch im Steinsalz (siehe teilweise Vortrag Gruner / Freyer)
5. Modellierungen zu Bitumen- und Bentonitdichtsystemen im Tonstein (siehe Vortrag Herold / Wilsnack morgen)

1. **Schachtverschlusskonzept für HAW-EL im Tonstein und im Steinsalz in flacher Lagerung**
2. **Auflockerungszone und Optimierung der Nachschnitttiefe der Kontur**
3. **Zusammenfassung**

Wesentliche Verschlusselemente:

1. Bentonitdichtungen (binäre Gemische aus Bentonitbriketts/-pellets und Granulat, möglichst hoch verdichtet) (ev. mit Äquipotentialsegmenten)
2. Bitumen verfüllte Schottersäulen
3. Asphalt- und Bitumensäulen bzw. –schichten (neu entwickelter Stein-Asphalt)
4. Füllsäulen aus Schotter (möglichst setzungsarm)
5. (Zement-)Betonwiderlager (möglichst gering durchlässig, wenn möglich low-pH-Beton, unbewehrt oder nur gering bewehrt)
6. Salzgrus-Ton-Gemische (STG) hoch verdichtet
7. Solebeton und MgO-Beton (möglichst gering durchlässig, unbewehrt)

im Salz
und
Tonstein

im
Tonstein

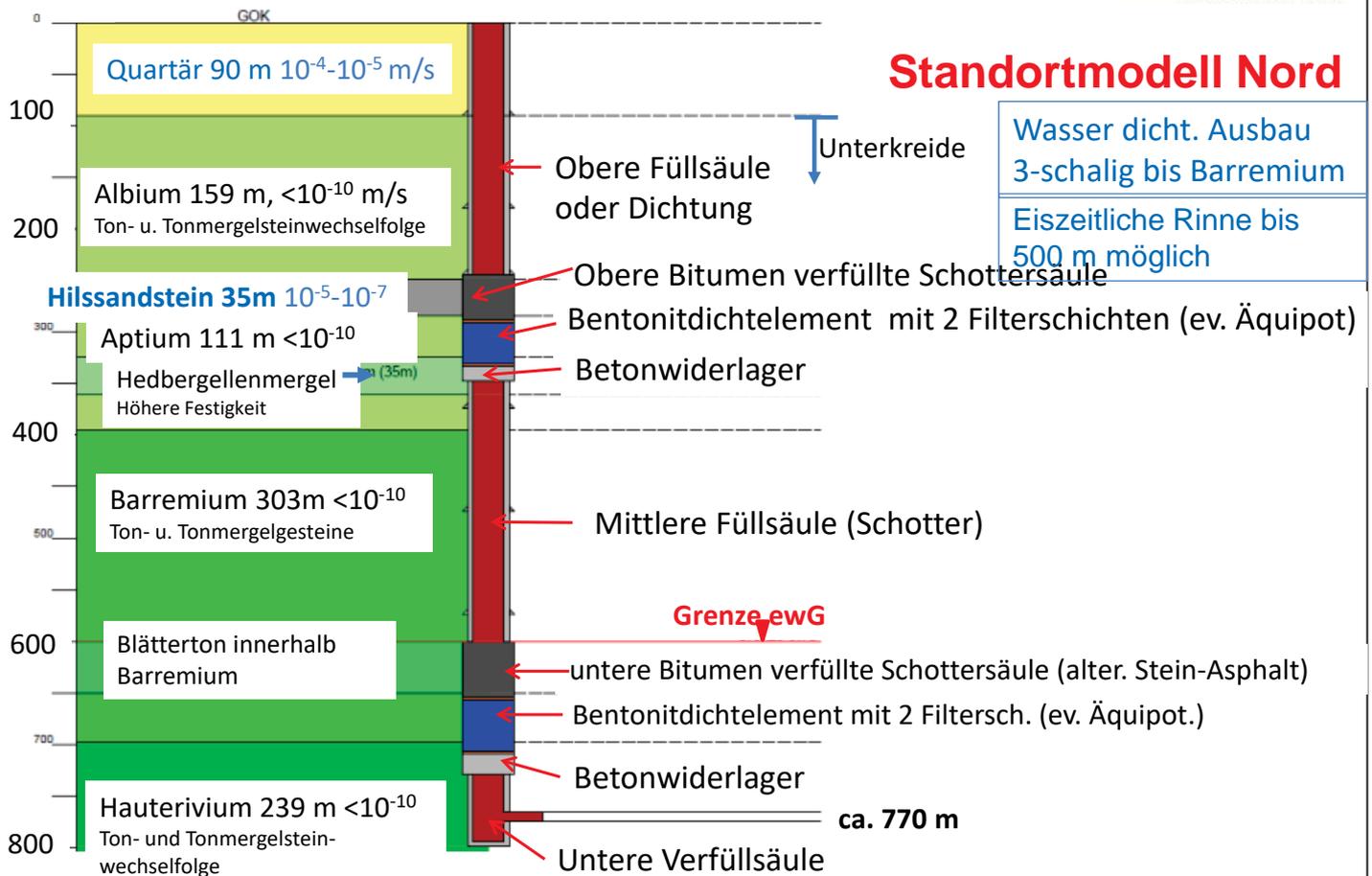
im Salz

Eckpunkte für Schachtverschlüsse im Tonstein und Salz:

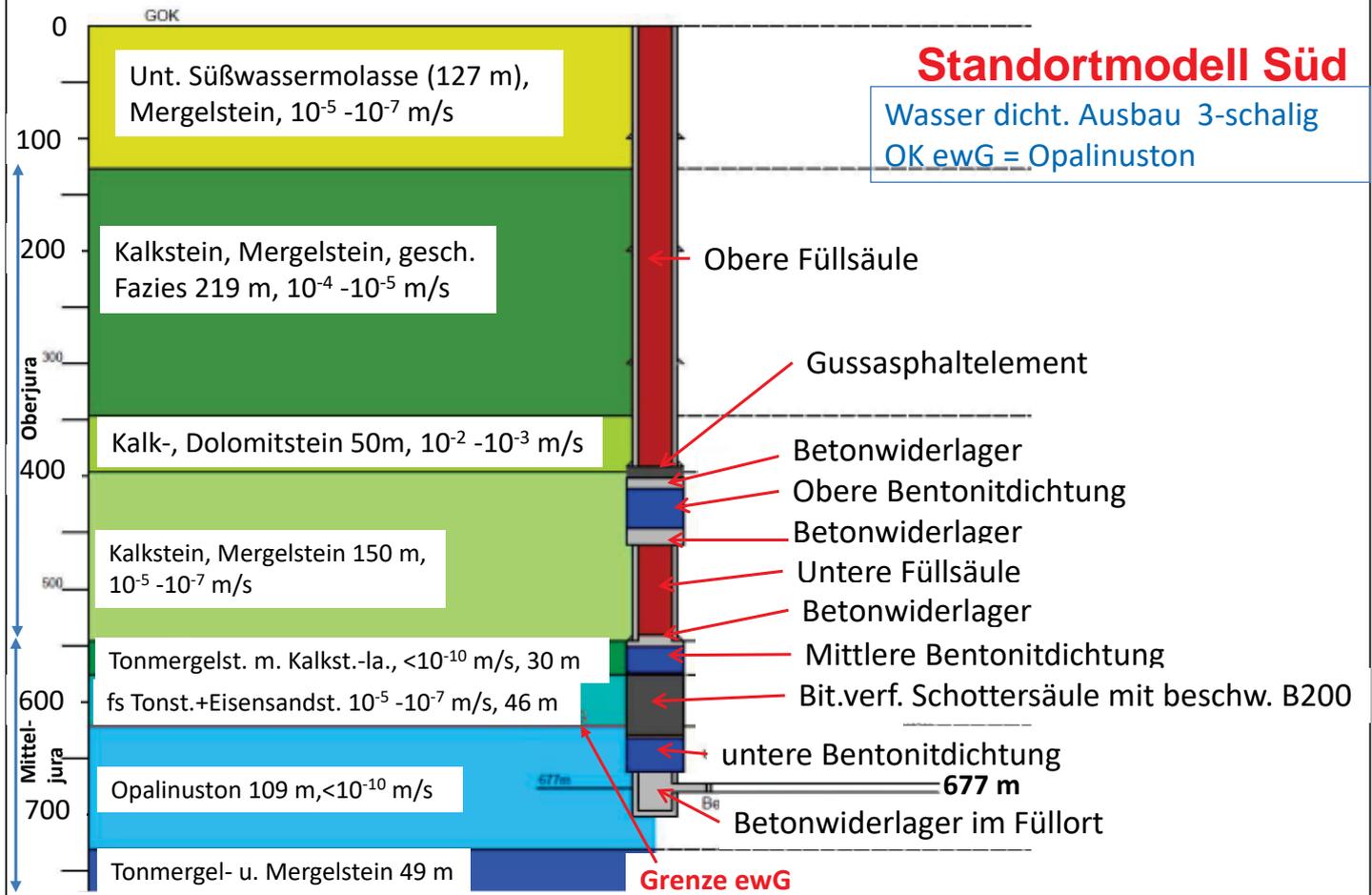
1. Redundanter und diversitärer Aufbau
2. Modularer Aufbau zur Anpassung an verschiedene geologische Formationen
3. Aquifere in verschiedenen Horizonten durch zusätzliche Dichtungen trennen (Deckgebirgsdichtungen)

Schachtverschlusskonzepte im Tonstein

1. Geologische Verhältnisse übernommen aus dem Projekt
ANSICHT
2. Daraus zwei Schachtverschlusskonzepte entwickelt für
 - a) „Standortmodell Nord“ (Unterkreidetone)
 - b) „Standortmodell Süd“ (Opalinuston)



Verschlusselement	Teufe [m]	Funktion	Material
Obere Verfüllsäule	0 - 244	Setzungsarme Vollverfüllung	Hartgesteinsschotter
Obere bitumenverfüllte Schottersäule	244 - 289	Dichtfunktion bis zur vollständigen Aufsättigung des Bentonitdichtelementes	Hartgesteinsschottersäule mit beschwertem Bitumen (B200) verfüllt
Filterschicht	289 - 291	Erosions- und Suffosionsschutz	abgestufte, mineralische Schüttung
Obere Bentonitdichtung	291 - 331	Dichtfunktion	Binäres Gemisch aus Briketts und Bentonitgranulat
Filterschicht	331 - 333	Erosions- und Suffosionsschutz	abgestufte, mineralische Schüttung
Widerlager	333 - 348	Lagestabilität der Bentonitdichtung	Beton
Mittlere Verfüllsäule	348 - 600	Setzungsarme Vollverfüllung	Hartgesteinsschotter
Untere bitumenverfüllte Schottersäule	600 - 655	Dichtfunktion bis zur vollständigen Aufsättigung des Bentonitelementes	Hartgesteinsschottersäule mit beschwertem Bitumen (B200) verfüllt
Filterschicht	655 - 657	Erosions- und Suffosionsschutz	abgestufte, mineralische Schüttung
untere Bentonitdichtung	657 - 707	Dichtfunktion	Binäres Gemisch aus Briketts und Bentonitgranulat
Filterschicht	707 - 709	Erosions- und Suffosionsschutz	abgestufte, mineralische Schüttung
Widerlager	709 - 729	Lagestabilität der Bentonitdichtung	Beton
Untere Verfüllsäule	729 - Ende	Setzungsarme Vollverfüllung	Hartgesteinsschotter



Schachtverschlusskonzept Standortmodell Süd

Verschlusselement	Teufe [m]	Funktion	Material
Obere Verfüllsäule	0 - 391	Setzungsarme Vollverfüllung	Hartgesteinsschotter
Gussasphaltelement	391 - 401	Dichtfunktion bis zur vollständigen Aufsättigung des Bentonitelementes	Gussasphalt
Widerlager	401 - 411	Lagestabilität der Bentonitdichtung	Beton
Obere Bentonitdichtung	401 - 436	Dichtfunktion	Binäres Gemisch aus Briketts und Bentonitgranulat
Widerlager	436 - 441	Lagestabilität der Bentonitdichtung	Beton
Mittlere Verfüllsäule	441 - 521	Setzungsarme Vollverfüllung	Hartgesteinsschotter
Widerlager	521 - 531	Lagestabilität der Bentonitdichtung	Beton
mittlere Bentonitdichtung	531 - 554	Dichtfunktion	Binäres Gemisch aus Briketts und Bentonitgranulat
Filterschicht	554 - 556	Erosions- und Suffosionsschutz	abgestufte, mineralische Schüttung
Bitumenverfüllte Schottersäule	556 - 610	Dichtfunktion bis zur vollständigen Aufsättigung des Bentonitelementes	Hartgesteinsschottersäule mit beschwertem Bitumen (B200) verfüllt
Filterschicht	610 - 612	Erosions- und Suffosionsschutz	abgestufte, mineralische Schüttung
untere Bentonitdichtung	612 - 642,5	Dichtfunktion	Binäres Gemisch aus Briketts und Bentonitgranulat
Widerlager	642,5 - Ende	Lagestabilität der Bentonitdichtung	Beton

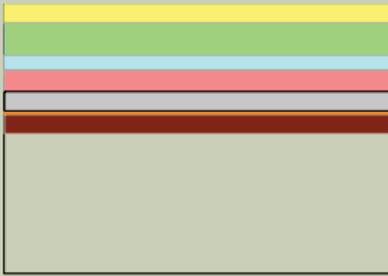
Vorbemessung:

1. Vorbemessung hinsichtlich mechanischer, hydraulischer, chemischer und biologischer Gesichtspunkte
2. Zur Berechnung der Tiefe der Auflockerungszone; siehe Vortrag Herold

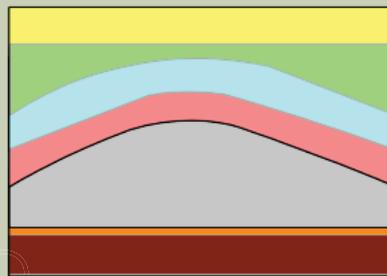
Schachtverschlusskonzepte im Steinsalz

Lagerungsformen - flach

a) flache Lagerung

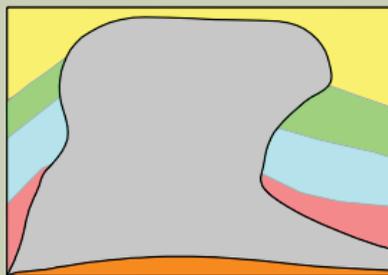


b) Sattel bzw. Salzkippen

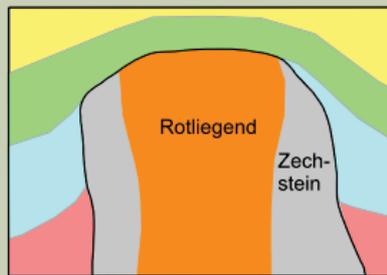


Lagerungsformen - steil

c) Salzdiapir



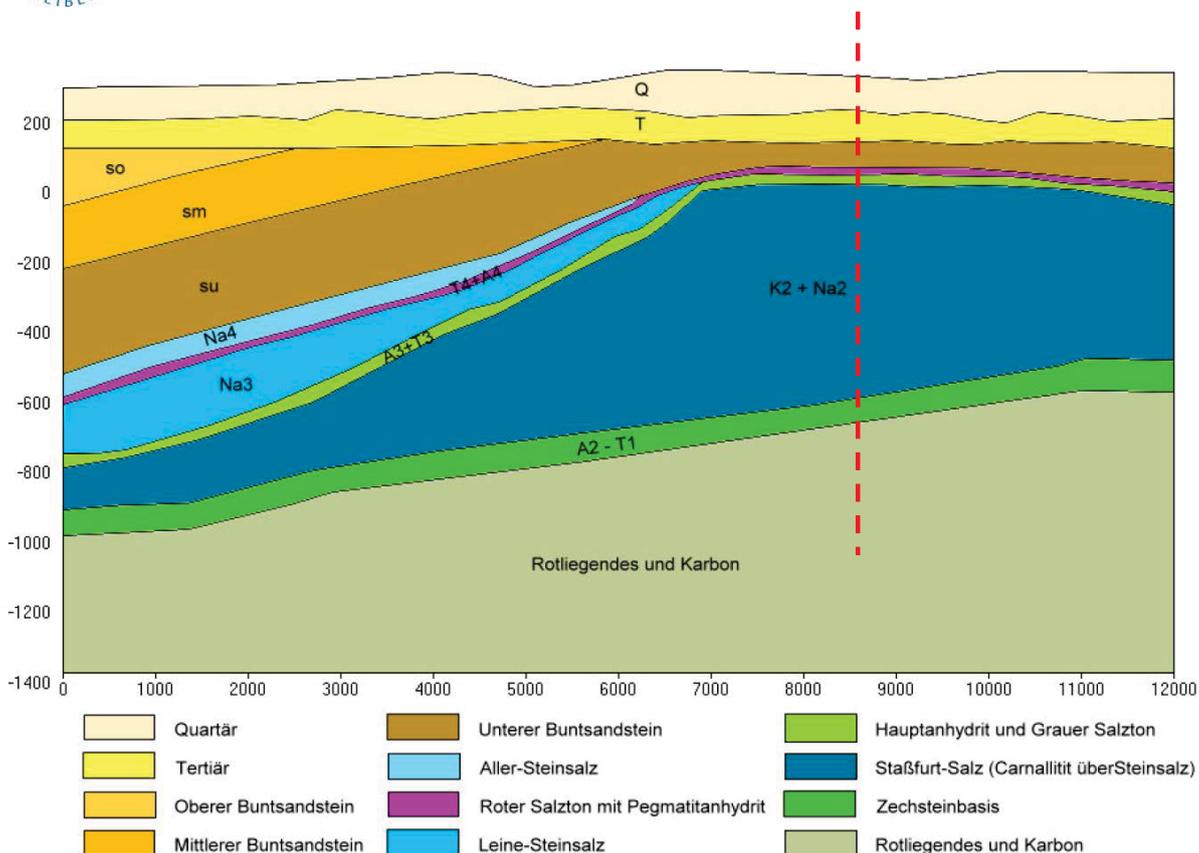
d) Doppelsalinar



nach Minkley et.al. 2010

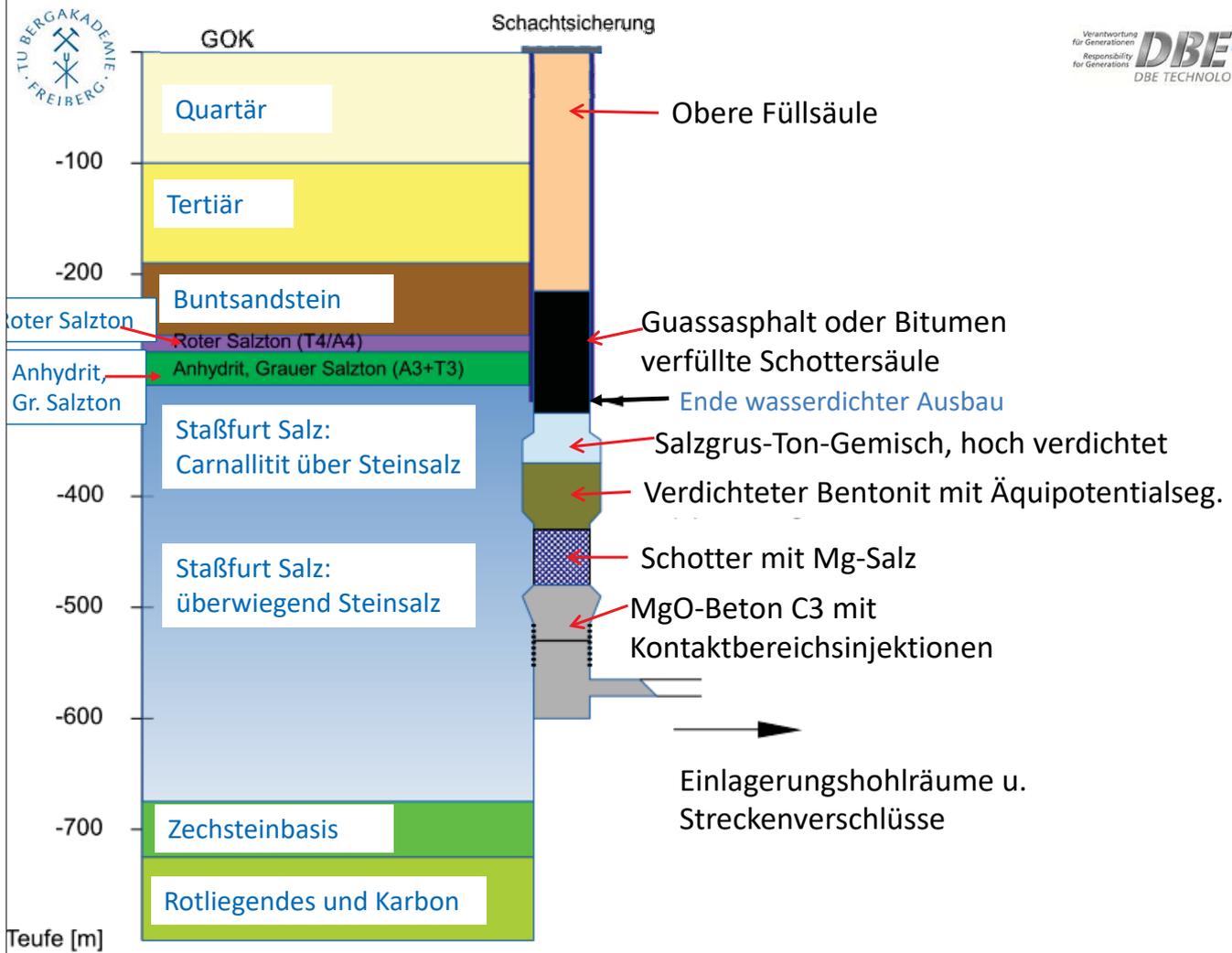
1. Schachtverschlusskonzept in Steinsalz in flacher Lagerung nachfolgend; Betrachtungen beziehen sich auf flache Lagerung und flache Salzkippen (bis zu mehreren 100 Meter mächtig).

2. Schachtverschlusskonzept in Steinsalz in steiler Lagerung; siehe VSG (gilt auch für hohe Salzkippen, Salzstück und Salzmauern)



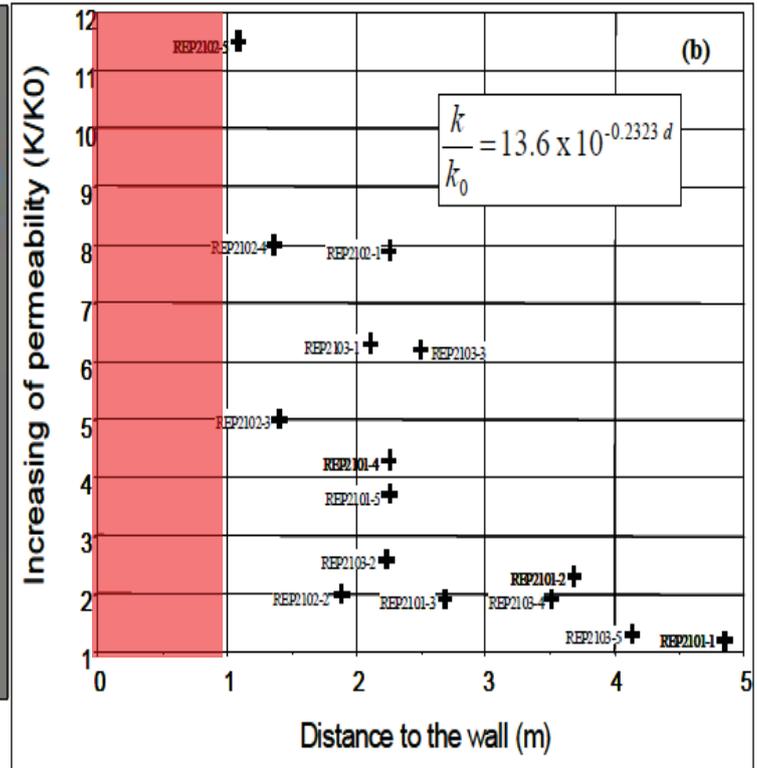
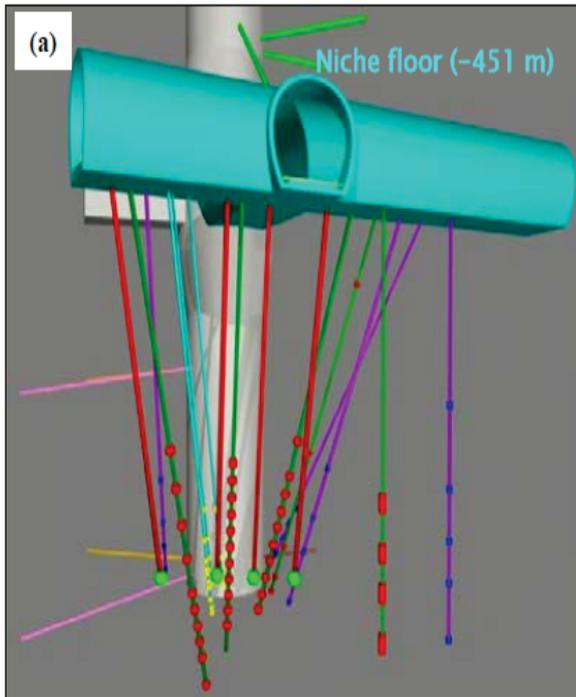
Zechsteinsalze (Staufurt, Leine, Aller) in 300 bis 1100 m Tiefe

nach Minkley et.al. 2010



ALZ eines Schachtes im Tonstein

- Nur wenige Kenntnisse zur Ausprägung und den Eigenschaften der ALZ um einen Schacht im Tonstein vorhanden.
- Beispiel **REP-Experiment im URL Bure** (siehe Souley 2007)



Souley 2007

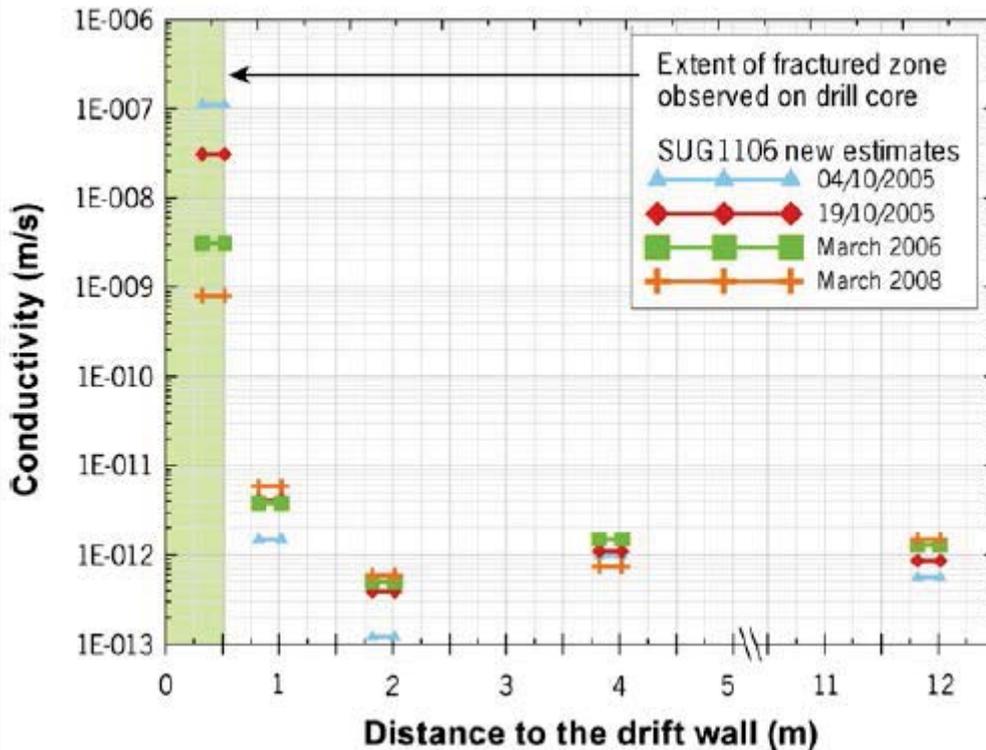
ungestört $4 \cdot 10^{-21}$ bis $7 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$

d = Distanz zur Schachtkontur

Ergebnisse der In-situ-Untersuchungen im Bure URL im Schacht

- Versuchsdurchführung begleitend zur Schachtteufe
- $K = 7 \cdot 10^{-20}$ bis $4 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ für ungestörten Cavollo-Oxfordian Tonstein
- Veränderung der Permeabilität in der ALZ sehr klein (nur Faktor 10)
- **keine Daten für < 1,1 m Entfernung zur Schachtkontur (technisch bedingt),**
- **keine Daten zur zeitlichen Veränderung**

Ergebnisse einer In-situ-Untersuchung im Bure URL in der Strecke



- horizontale Bohrung aus einer Strecke heraus
- Messung der hydraulischen Leitfähigkeit
- ($k_f = 10^{-12} \frac{m}{s}$ entspricht für Wasser bei 20°C $K = 1 \cdot 10^{-19} m^2$)
- Erfassung der zeitlichen Veränderungen über 4 Jahre

Baechler, S. et al. Physics and Chemistry of the Earth, 2011,36, S. 1922-1931

Aus 7 Literaturquellen:

- a) Auflockerungszone im Schacht: 1 bis 2, 5 m
- b) Auflockerungszone in der Strecke: 0,6 bis 1,8 m
- c) Auflockerungszone im Boom Clay: 6 bis 8 m

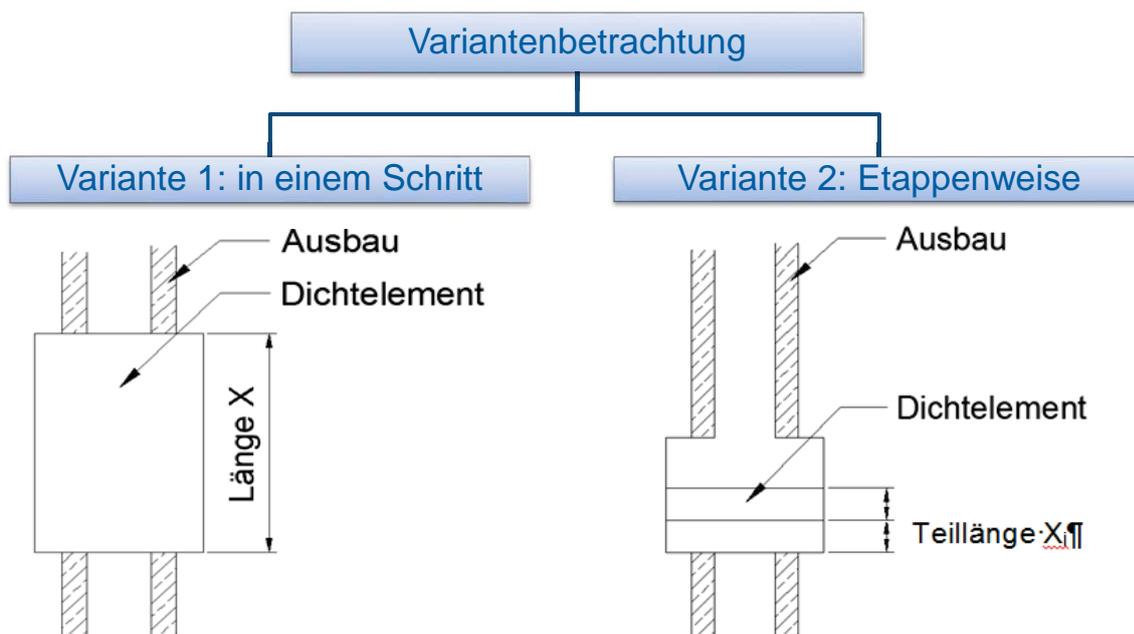
aber generelle Defizite:

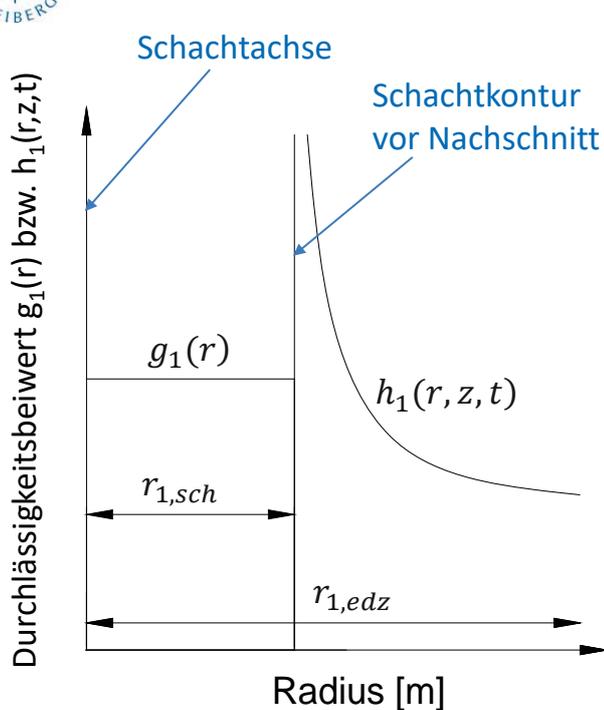
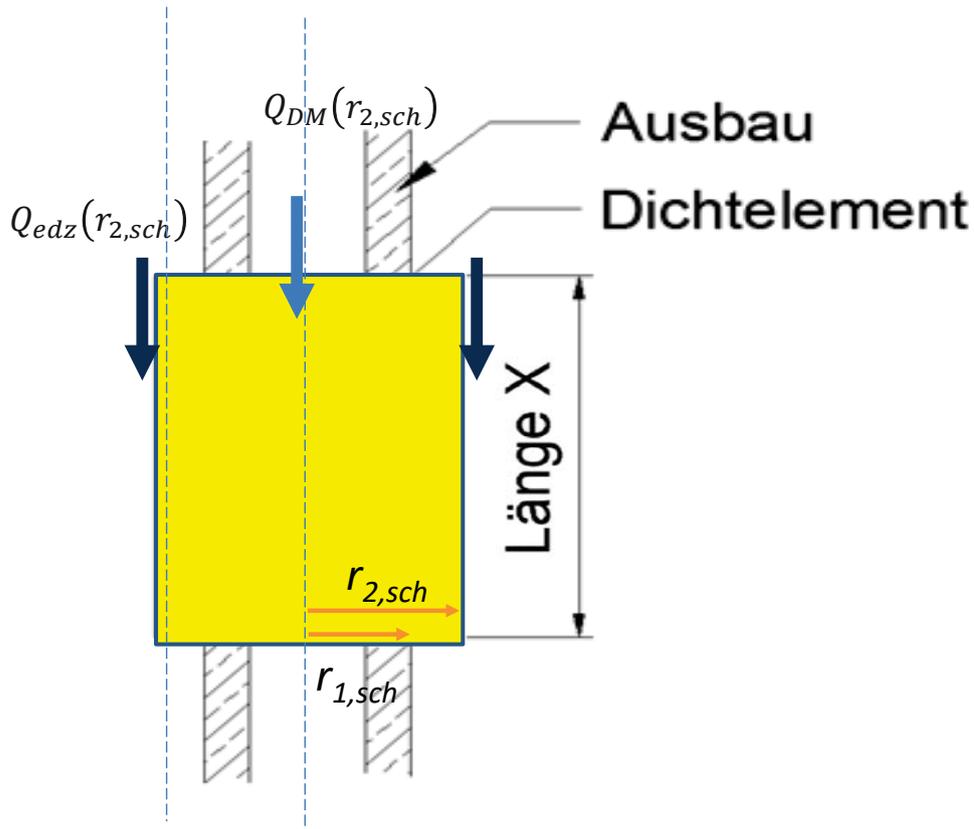
- Werte stark von der lokalen Klüftung im Tonstein abhängig (bzw. bereits vorh. Mikrorissen)
- keine Permeabilitätsmessungen direkt an der Kontur
- kein einheitliches Untersuchungsregime
- keine Langzeitversuche zum Langzeitverhalten der ALZ im Schacht
- Keine verifizierten math. Funktionen für den Permeabilitätsverlauf in der Auflockerungszone

Ziel: Herleitung der optimalen Nachschnitttiefe

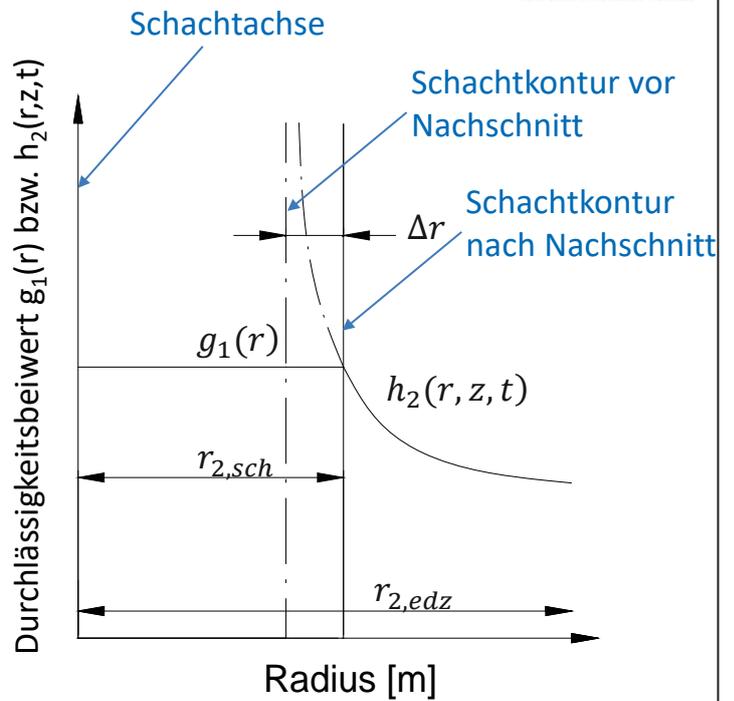
AP 1.4.1:

Voraussetzungen für die Technologie des Beraubens des Schachtausbaus mit nachfolgendem auflockerungsminimierendem Nachschnitt der Gebirgskontur im Tongestein.





Ausgangszustand



nach Nachschnitt

$h_1(r,z,t)$ und $h_2(r,z,t)$ Verlauf des Durchlässigkeitsbeiwertes über den Radius r in der Tiefe z über die Zeit t in der Auflockerungszone

Optimierungsansatz für den Konturnachschnitt mit dem Ziel, den Volumenstrom zu minimieren

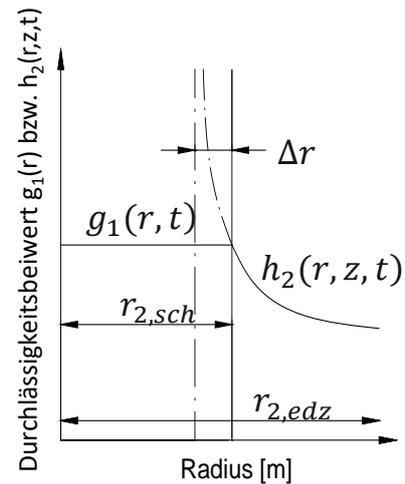
Darcy-Gesetz: $Q=A \cdot k \cdot i$

$$Q(r_{2,sch}, t) = Q_{DM}(r_{2,sch}, t) + Q_{edz}(r_{2,sch}, t)$$

$$Q(r_{2,sch}, t) = A_{2,sch} g_1(r, t) i + \int_0^{A_{edz}} h(r, r_{2,sch}, t) i dA$$

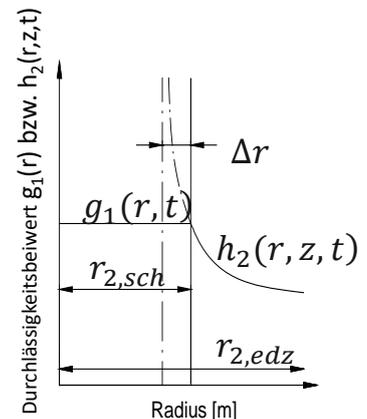
$$Q(r_{2,sch}, t) = r_{2,sch}^2 \pi g_1(r, t) i + \int_{r_{2,sch}}^{r_{edz}} \int_0^{360^\circ} h(r, r_{2,sch}, t) i r d\varphi dr$$

$$Q(r_{2,sch}, t) = r_{2,sch}^2 \pi g_1(r, t) i + 2\pi \int_{r_{2,sch}}^{r_{edz}} h(r, r_{2,sch}, t) i r dr$$



Optimierungsansatz für den Konturnachschnitt mit dem Ziel, den Volumenstrom zu minimieren

$$Q(r_{2,sch}, t) = r_{2,sch}^2 \pi g_1(r, t) i + 2\pi \int_{r_{2,sch}}^{r_{edz}} h(r, r_{2,sch}, t) i r dr$$



$Q(r_{2,sch}, t)$ ist minimal, wenn die Ableitung nach $r_{2,sch}$ Null ist.

$$\frac{dQ(r_{2,sch}, t)}{dr_{2,sch}} = 2 r_{2,sch} \pi g_1(r, t) i + \frac{\left(2\pi \int_{r_{2,sch}}^{r_{edz}} h(r, r_{2,sch}, t) i r dr \right)}{dr_{2,sch}} \quad \begin{matrix} ! \\ = 0 \end{matrix}$$

Auflösung nach $r_{2,sch}$ ergibt den optimalen Schachtradius hinsichtlich des minimalen Volumenstromes.

1. Für die Standortmodelle „Nord“ und „Süd“ im Tonstein und für ein Modellstandort „Salz in flacher Lagerung“ wurden Schachtverschlusskonzepte entwickelt, begründet und vorbemessen.
2. Die Schachtverschlusskonzepte sind modular aufgebaut und lassen sich an jeweils ähnliche geologische Verhältnisse anpassen.
3. „Knackpunkte“ sind im Tonstein:
 - a. die Ausbildung der ALZ (Dicke, Permeabilität, zeitlicher Verlauf).
 - b. die Frage, ob der Ausbau verbleibt oder nicht.Dazu liegen zu wenig Daten vor (keine Daten für die Unterkreidetone)!! Wenn hier in Deutschland ein EL-Standort auch im Tonstein gesucht wird, muss dazu die Datenlage erheblich verbessert werden hinsichtlich
 - a. Permeabilität der ALZ über die Tiefe und Breite (mit und ohne Ausbau)
 - b. Zeitlicher Verlauf der Permeabilität (mit und ohne Ausbau)
4. Schachtverschlusskonzepte im Salz in flacher Lagerung (Salzkissen) sind prinzipiell ähnlich den Schachtverschlusskonzepten in steiler Lagerung.
5. Ein Ansatz zur Optimierung der Nachschnitttiefe wurde vorgestellt (ist weiter in Bearbeitung).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



STROEFUN

**Strömungstechnischer Funktionsnachweis:
Konzept zum gegenständlichen Dichtigkeitsnachweis für
Verschlussbauwerke
Ergebnisse aus Phase I und
Ausblick auf weitere Forschungsvorhaben**

Förderkennzeichen: 02E11253

03. Mai 2017

Beteiligte Institutionen

**Technische Universität Clausthal -
Institut für Bergbau
Abteilung für Maschinelle
Betriebsmittel und Verfahren im
Bergbau unter Tage**



DBE Technology GmbH



**IBeWa – Ingenieurpartnerschaft für
Bergbau, Wasser- und
Deponietechnik**



K-UTEK Salt Technologies



Gefördert durch:

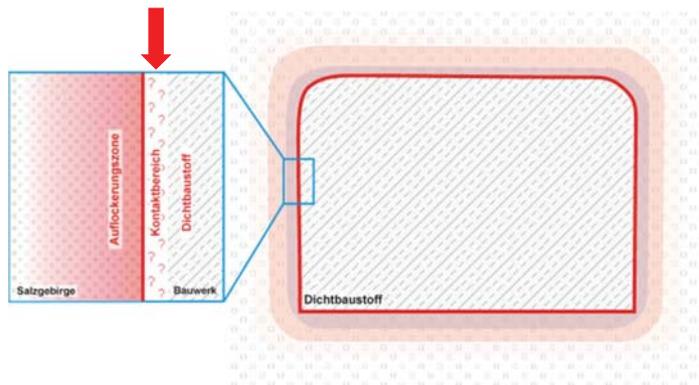


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

STROEFUN Phase I und Ausblick

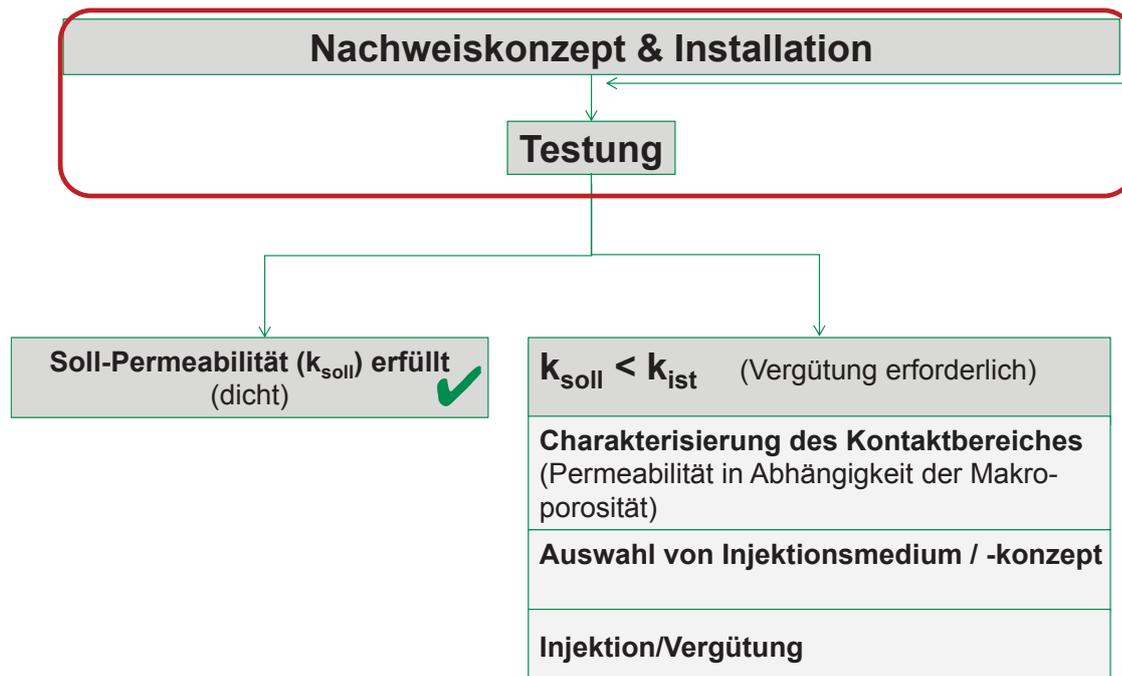
Konzept Strömungstechnischer Funktionsnachweis

- Strömungstechnischer Funktionsnachweis Verschlussbauwerke – **gegenständlicher Nachweis gefordert**
- Problem: **Kontaktbereich** zwischen hydraulisch abbindendem Baustoff / Gebirge ist erfahrungsgemäß **höher permeabel**
- **Volumenveränderung** hydraulisch abbindender Baustoffe durch thermische Prozesse und/oder beim Abbinden → Überschreiten der Haftzugfestigkeit Baustoff/Gebirge führt zur **Kontaktfugenbildung**
- im Ergebnis **Funktionsnachweis** ist ggf. Handlungsoption erforderlich → z.B. **Nachvergütung**



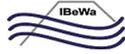
Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

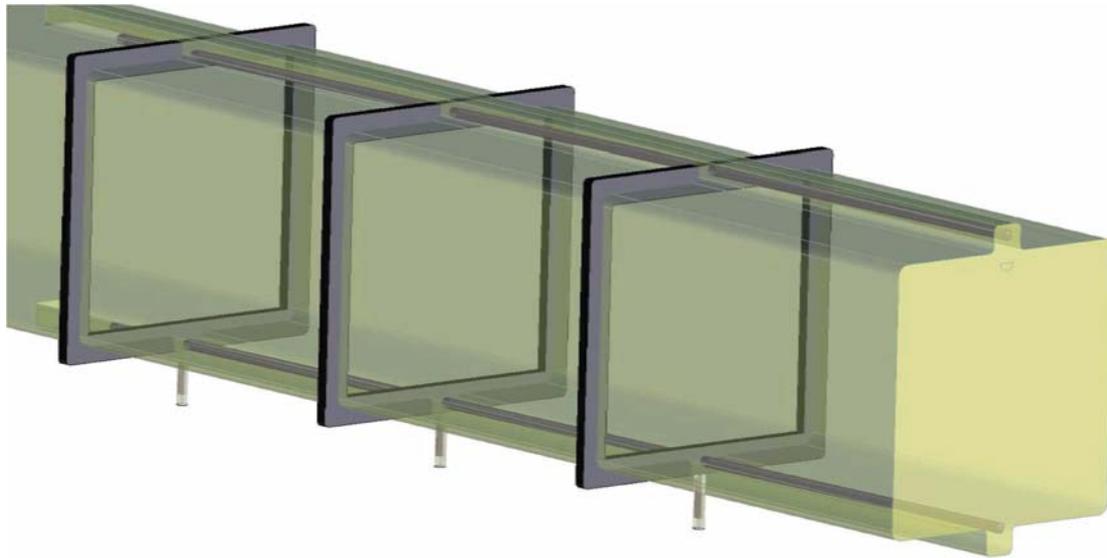


Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

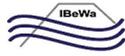


Konzept Strömungstechnischer Funktionsnachweis



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

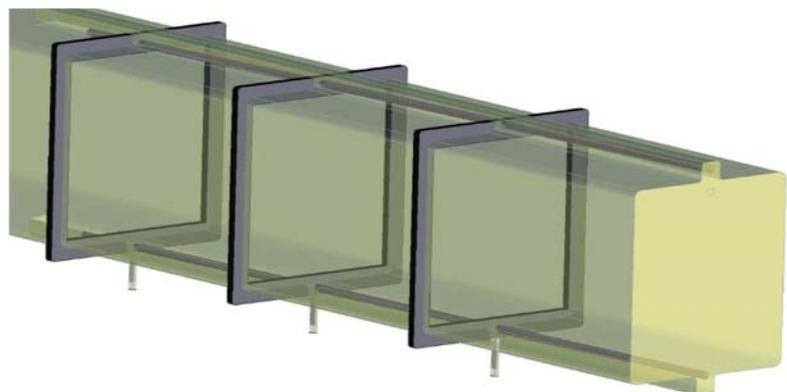
STROEFUN Phase I und Ausblick



Konzept Strömungstechnischer Funktionsnachweis

Prämissen des Testkonzeptes

- Ringkammern → keine Testung des gesamten Querschnittes
- Kombination aus mindestens zwei Kammern für Injektion und Testung mit Gas und Flüssigkeit
- Kammern werden als Rahmenkonstruktionen ausgeführt und teilweise in Gebirgskontur eingelassen
- alle Kammern werden über eine Befüllbohrung im Bauwerkstiefsten und eine Entlüftungsleitung im Bauwerkshöchsten angeschlossen → Bohrungen im Baustoff favorisiert
- Bohrungen und Kammern werden abschließend verfüllt
- messtechnische Überwachung (p, T) erfolgt über bidirektional kommunizierende, kabellose Sensorik



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Konzept Strömungstechnischer Funktionsnachweis

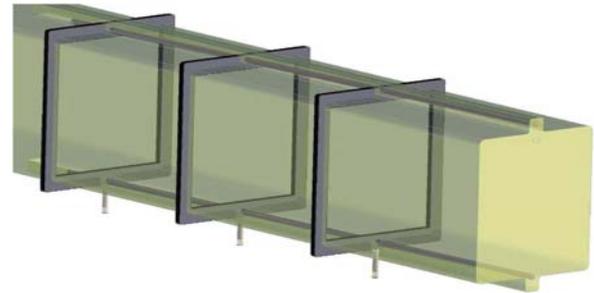
Rahmenkammern

■ Vorteile

- präzise Installation möglich
- präzise Volumina der Kammern
- begrenzte Anzahl Bohrungen
- Bohrungen technisch sicher herstellbar → Vorgabe Bohrungsverlauf
- Bohrungen sicher verfüllbar
- gezielte Injektion/Testung über Packer möglich
- kabellose Datenübertragung → keine Kabel im Bauwerk
- bergtechnisch machbar

■ Nachteile

- Mehrfachpacker erforderlich für Minimierung Bohrungsanzahl
- möglicherweise Schwierigkeiten mit Spülen

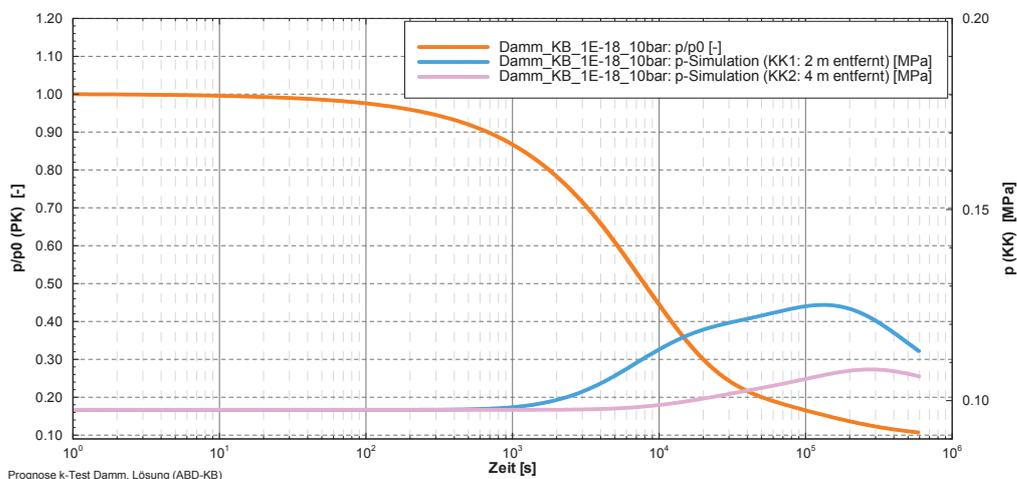


STROEFUN Phase I und Ausblick

Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

Konzept Strömungstechnischer Funktionsnachweis

Prognose in situ-Bauwerkstest mit 1 MPa Lösungsdruckbeaufschlagung



Strömungsfluid – gesättigte NaCl-Lösung

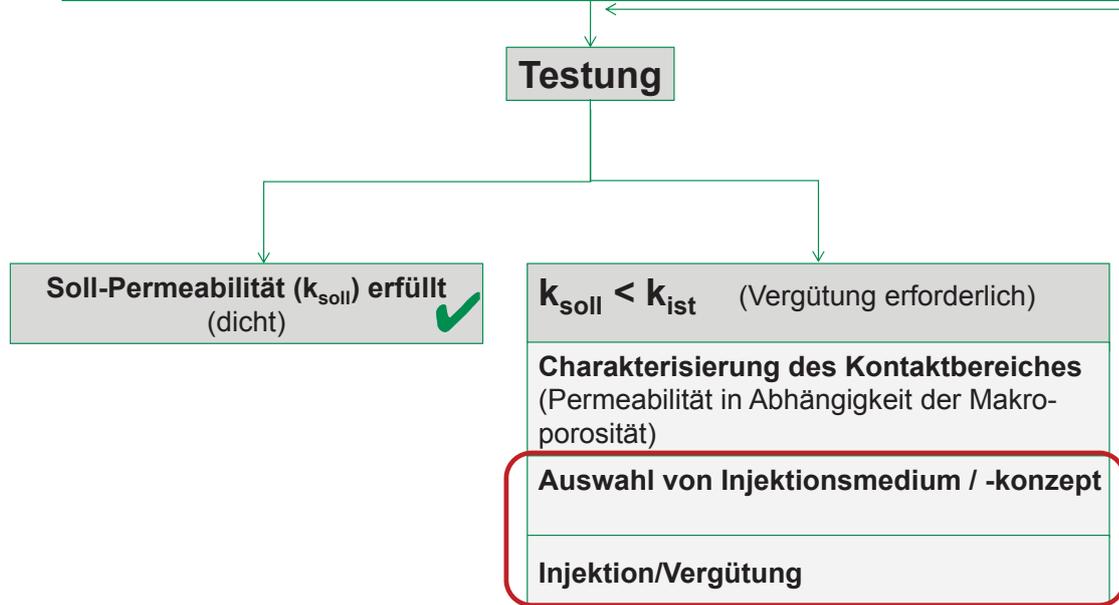
- Gesamtmineralisation: 0,3221 kg/l
- dynamische Viskosität: 2,0 mPas

Dichte: 1204 kg/m³
Temperatur: 20°C

STROEFUN Phase I und Ausblick

Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

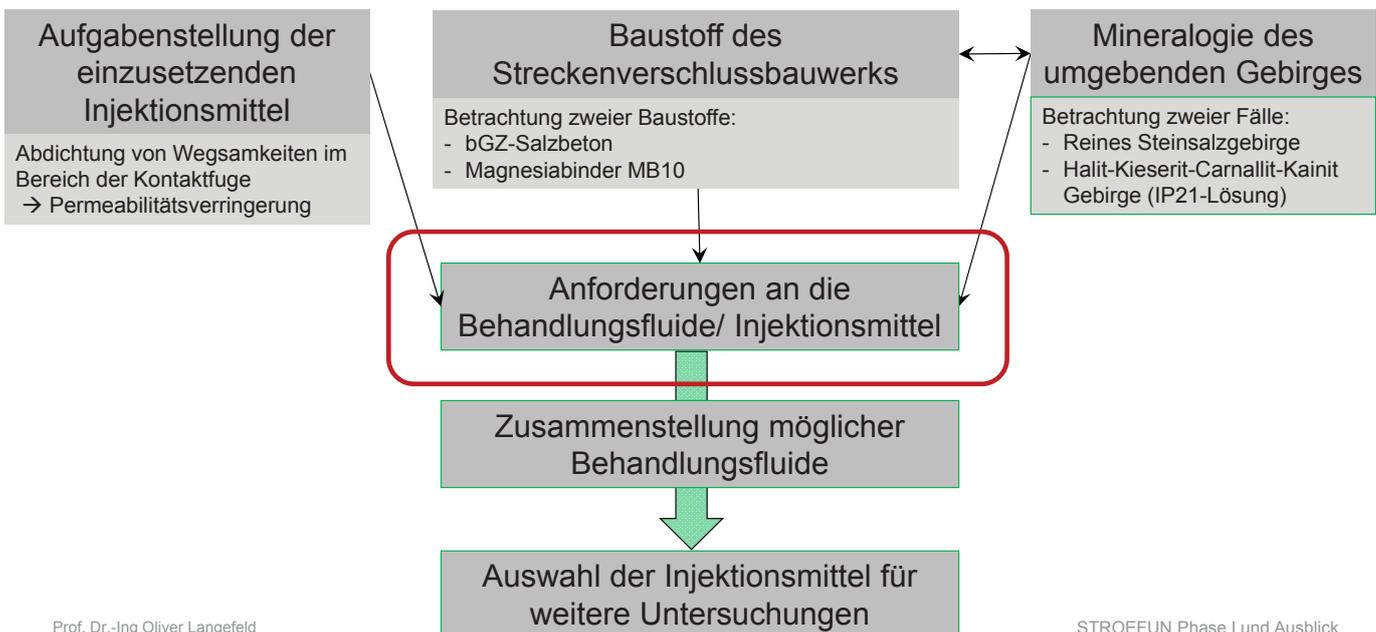
Nachweiskonzept & Installation



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel

Anforderungen an die Behandlungsfluide/ Injektionsmittel

Transport + Lagerung

- Einfacher Transport zum Einsatzort (z.B. als Sackware)
- Lagerung über mehrere Wochen oder Monate ohne chemische und physikalische Veränderungen

Verarbeitbarkeit

Verarbeitbar mit Standardmaschinen

Arbeits-/ Gesundheitsschutz

Zulassung gemäß GesBergV

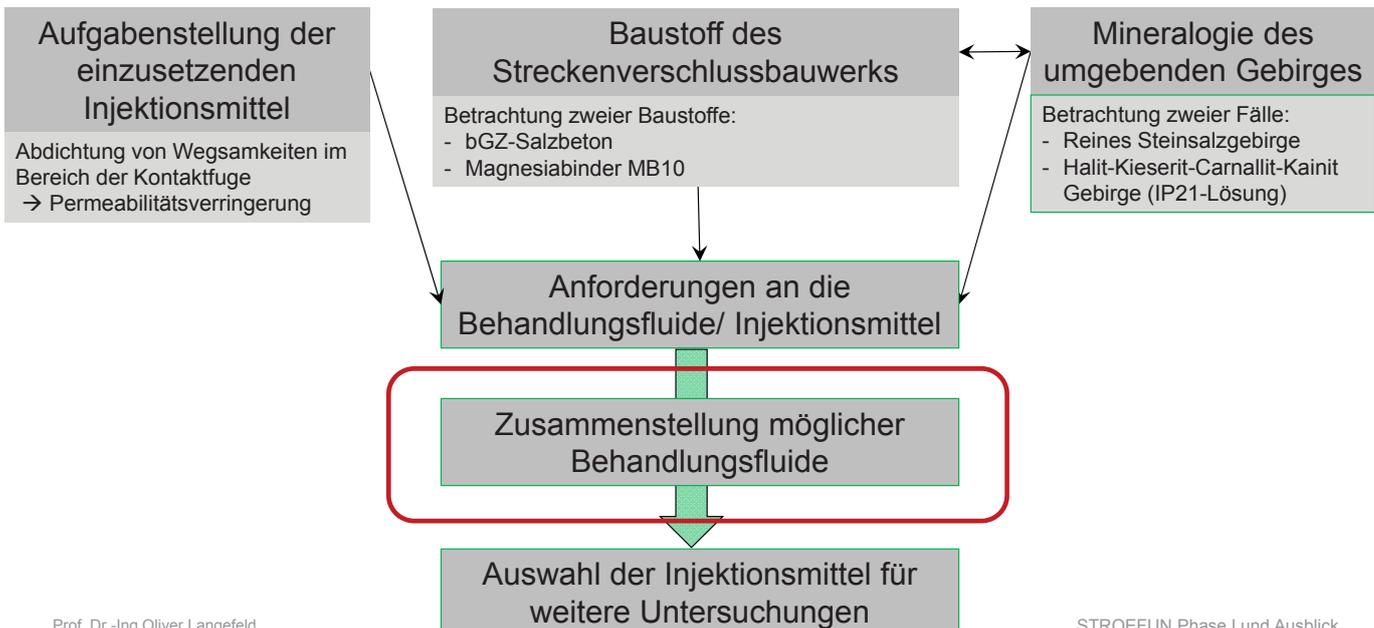
Beständigkeit gegenüber salinaren Lösungen

- Zwei verschiedene Lösungszusammensetzungen:
- NaCl-gesättigt
 - Lösungen mit >50 g/l MgCl₂

Partikelgröße unter 30 µm

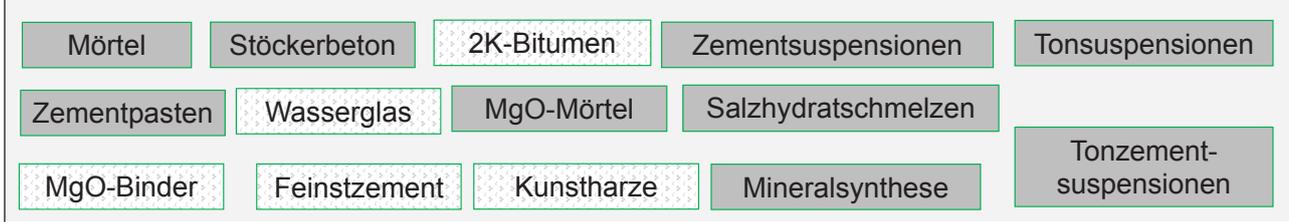
Damit wird ein Eindringen in Wegsamkeiten mit Öffnungsweiten unter 150 µm ermöglicht

Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel



Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel

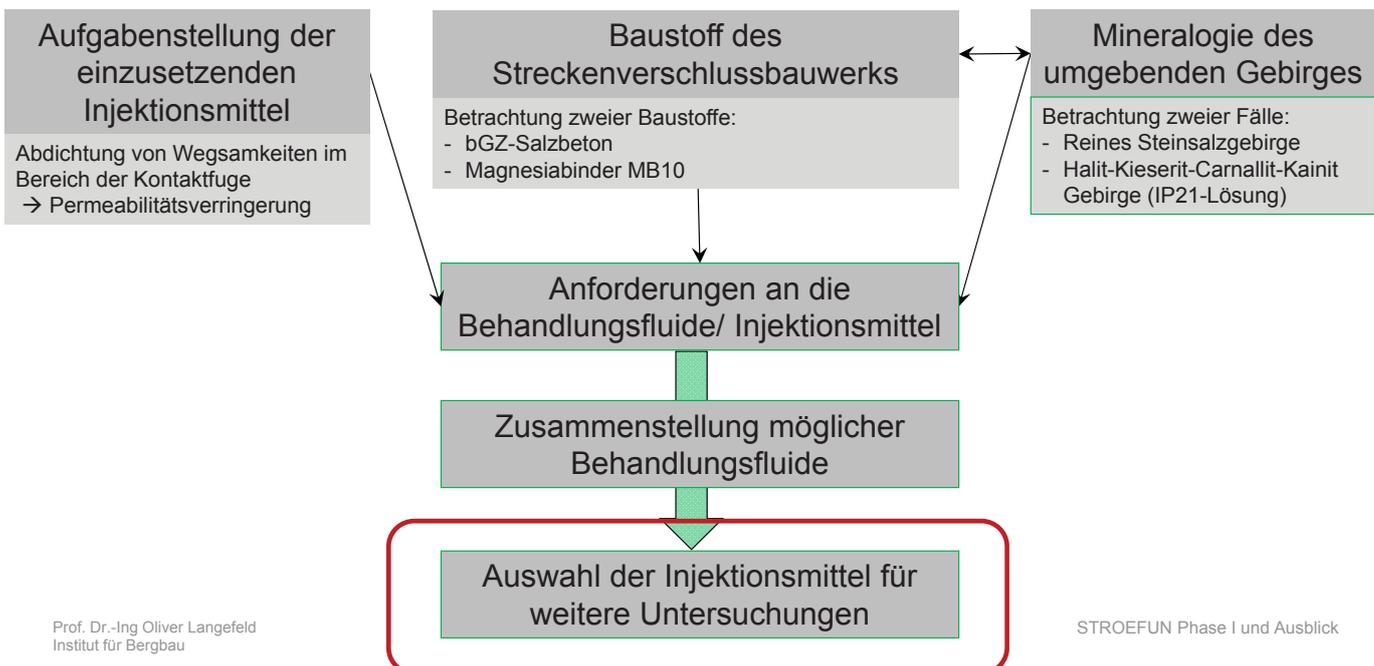
Zusammenstellung möglicher Behandlungsfluide Injektionsmittel



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Untersuchungen laborative Charakterisierung

- Rahmenbedingungen der Untersuchungen der laborativen Charakterisierung
 - Messung bei bergbautypischen Temperaturen
 - 6 Wiederholungen pro Messung

Durchgeführte Messungen	Erkenntnisgewinn der Messung
Dichte	QS und Rechenwert
Oberflächenspannung	Aussage über das Eindringverhalten in poröse Medien
Kontaktwinkel	Aussage über das Eindringverhalten in poröse Medien
Viskosität	Aussage über das Fließverhalten
Marshzeit	Aussage über das Fließverhalten

Untersuchungen laborative Charakterisierung

- Beispiele zeigen bei höheren Temperaturen größere Kontaktwinkel
 - Beim Bitumen und Denepox 40 allerdings nur im geringen Maße feststellbar
- Je kleiner der Kontaktwinkel, desto besser das Eindringverhalten in poröse Medien

Mittelwerte der Kontaktwinkelmessungen [°]									
Ultrafin 12		IM 4+		Denepox 40		2K-Bitumen		Wasserglas	
30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C
25,4	32,8	43,7	48,5	29,7	29	17,8	19	41,76	48,4

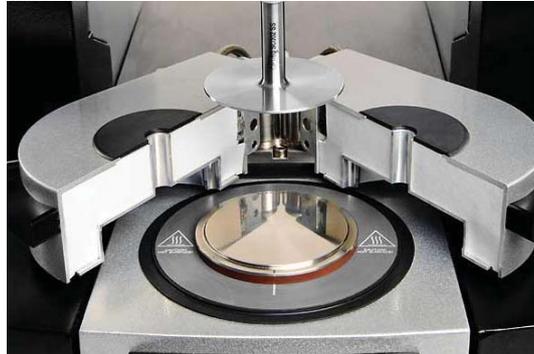
Untersuchungen laborative Charakterisierung

Zwei verschiedene Rheometer kamen zum Einsatz



Rotationsviskosimeter

- Ultrafin 12
- Wasserglas
- 2K-Bitumen



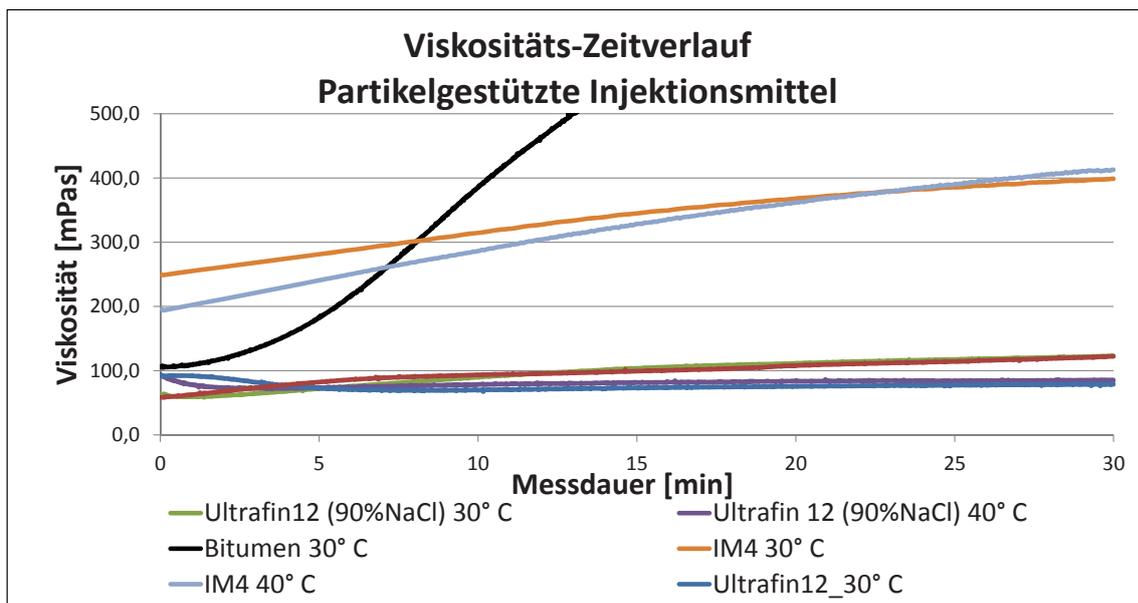
Scherrheometer Platte-Platte Verfahren

- Denepox 40
- IM4+

Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

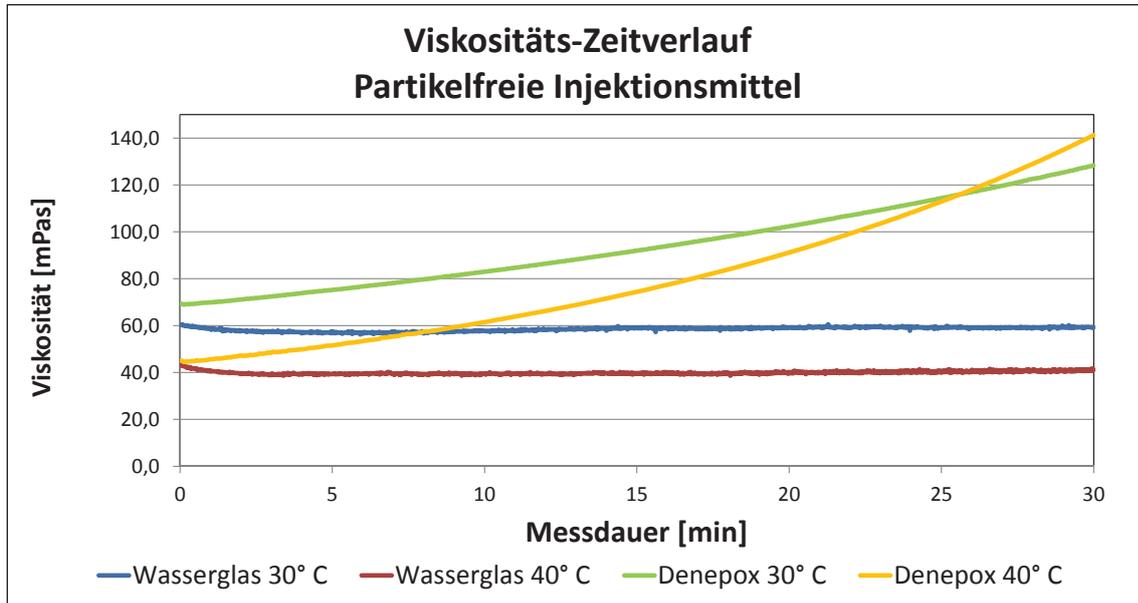
Untersuchungen laborative Charakterisierung



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Untersuchungen laborative Charakterisierung



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Untersuchungen laborative Charakterisierung

Marschzeiten – Konsistenzprüfungsverfahren

- Abnahme der Auslaufzeit beim IM4+ und Wasserglas bei höherer Temperatur
- Insgesamt niedrigste Auslaufzeit wurde mit dem Ultrafin 12 bei 30° C gemessen

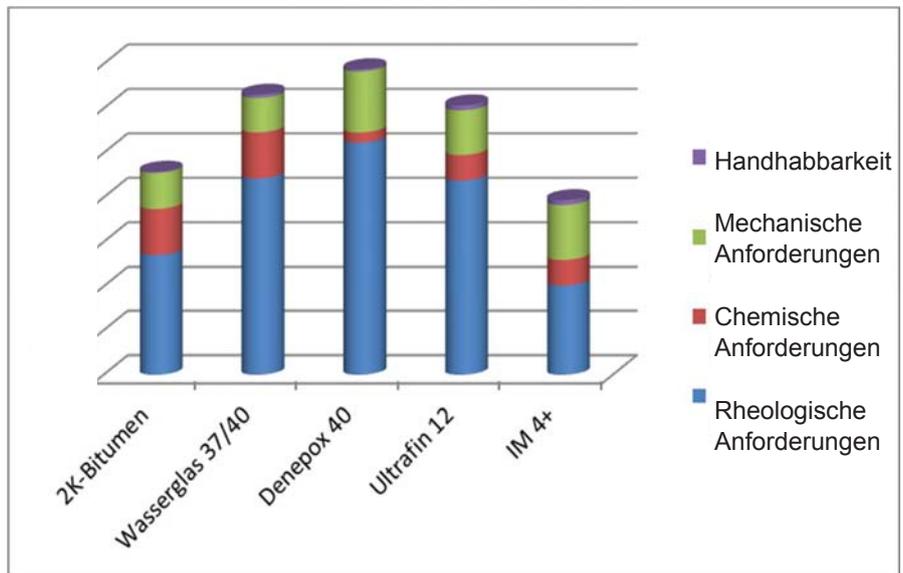
Mittelwerte der Marshzeiten (in Sekunden) der untersuchten Injektionsmittel							
Ultrafin 12		IM 4+		Wasserglas		2K-Bitumen	
30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C
10,45	10,93	27,34	23,7	17,88	16,26	40,83	-

Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Bewertung der untersuchten Injektionsmittel

Injektionsmittel für verschiedene Anwendungen.
Injektionsmittel haben unterschiedliche Stärken z.B. bzgl. Abdichtung und Verarbeitung.



Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Nachweiskonzept & Installation

Testung

Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Überblick Phase II: Prämissen des Testkonzeptes (Seite 1)

Gebirge	Steinsalz
Ausgangsbedingungen Gebirge	<ul style="list-style-type: none"> - trocken – bedingt durch Baustofffeuchte beeinflusste ALZ - Temperatur 20 – 40°C - relative Luftfeuchte 35 % - löslich - nicht expansionsfähig - keine Berücksichtigung von zeitabhängiger Konvergenz
Dichtbaustoff	- Magnesiabeton A1
Ausgangsbedingungen Dichtbaustoff	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatur 20 – 40°C – abgekühlt $\Delta T_{\text{Gebirge}} \pm 2$ bis 3 K - Einhaltung der betontechnisch gültigen Rissbeschränkungen - Berücksichtigung von zeitabhängiger Verformung – Schwinden, Expandieren bei Hydratation, thermische Ausdehnung und Kontraktion - Injektionsdruck=f(Einspannung)
strömende Flüssigkeit	- gesättigte IP21-Lösung

Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Überblick Phase II: Prämissen des Testkonzeptes (Seite 2)

konstruktive Vorgaben	<ul style="list-style-type: none"> - keine Streckenstummel - keine Verzahnung - beliebige Streckenkontur – rund, quadratisch - Streckendamm mit Zugang von einer Ortsbrust
Vergütungs- und Testkonzept	<p>Zielstellung: Nachweis der Dichtheit und ggf. Vergütung eines repräsentativen Bauwerksabschnittes (nicht ganzes Bauwerk) → Konzept unabhängig von der Vergütung/-Injektion des gesamten Bauwerkes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dichtheitskriterium: $k_{int}=1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ - Integrale Betrachtung des Kontaktbereiches, keine Beschränkung auf lokale Teilbereiche - keine Testung des gesamten Bauwerksquerschnittes Testdruck $\leq 1 \text{ MPa}$ - maximaler Injektionsdruck 2 – 3 MPa
Injektionsmaterialien	- IM4+, 2K-Bitumen, Wasserglas, Denepox

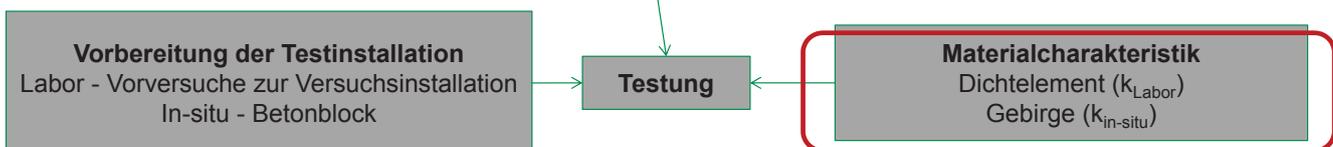
Nachweiskonzept & Installation



Vorversuche

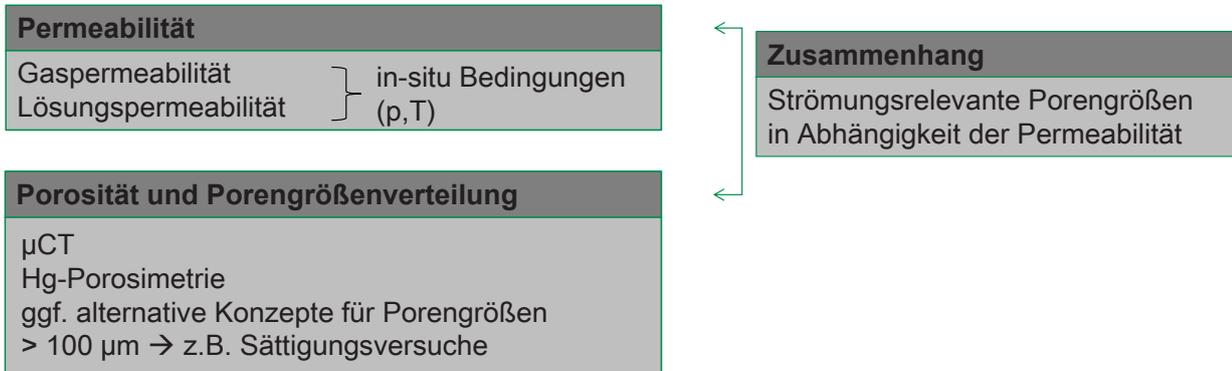
- Konstruktive Auslegung der Rahmenkammern
- Auswahl der Materialien der Rahmenkammern
 - Werkstoff Rahmenkammer
 - Glasfaservlies (Filtrationswirkung gegenüber Baustoffschlempe)
 - Optimale Einbindung in den Gebirgsstoß
- Erprobung im in-situ Versuch an einem Betonblock

Nachweiskonzept & Installation

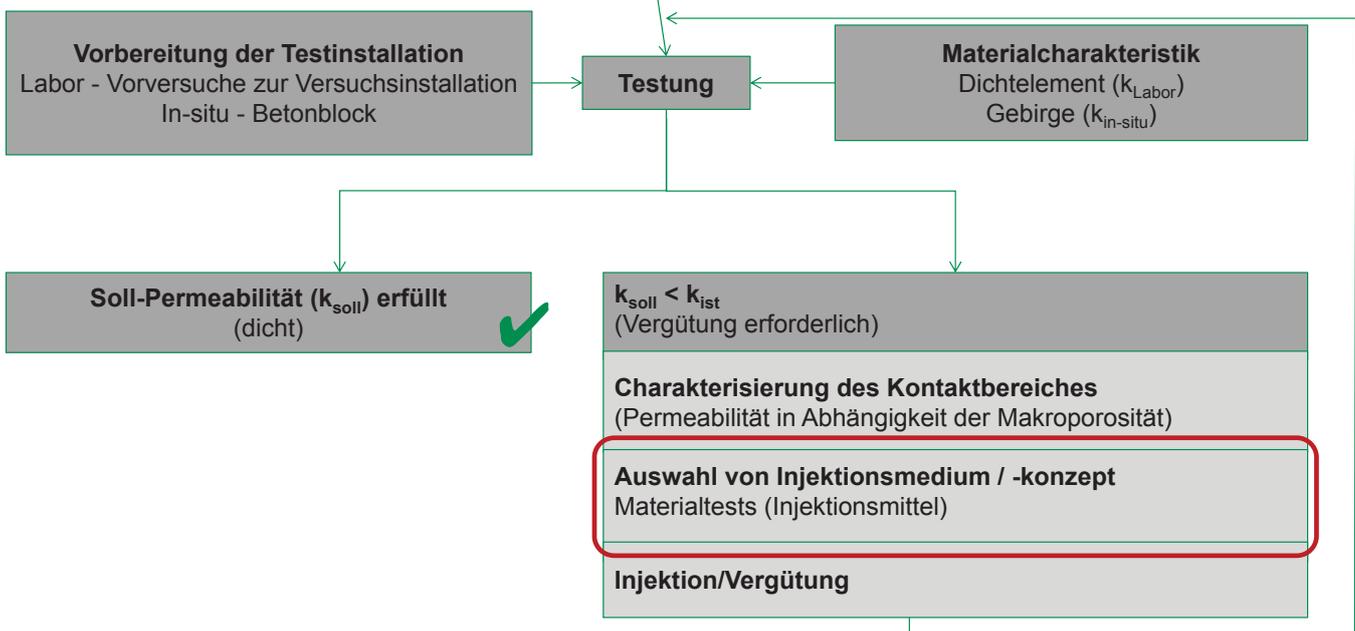


Permeabilitätstest und Porengrößenverteilung

Bohrlochversuche und Laborversuche



Nachweiskonzept & Installation



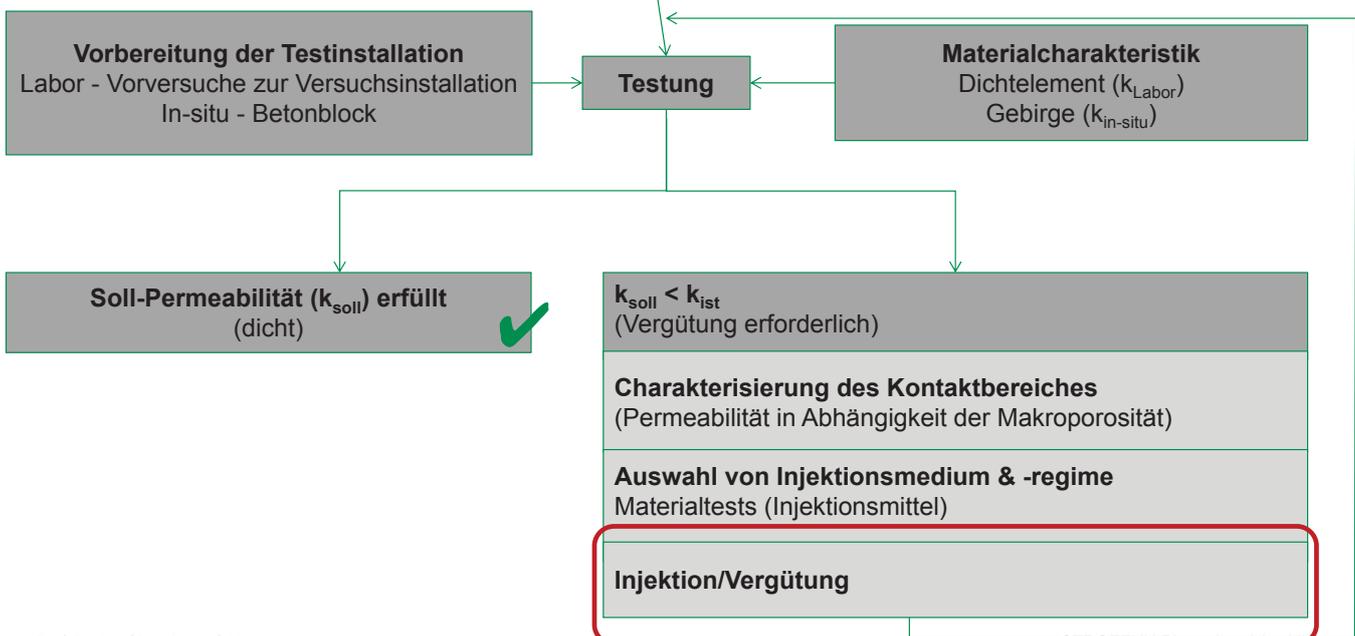
Weiterführende Charakterisierung der Injektionsmittel

- Untersuchung von
 - Viskosität
 - Grenzflächenspannung
 - Kontaktwinkel
 - Thixotropie

- Variation von
 - Topfzeiten
 - Temperaturen
 - Energieeintrag des Anmischvorgangs → möglichst Nachbildung der in-situ Bedingungen

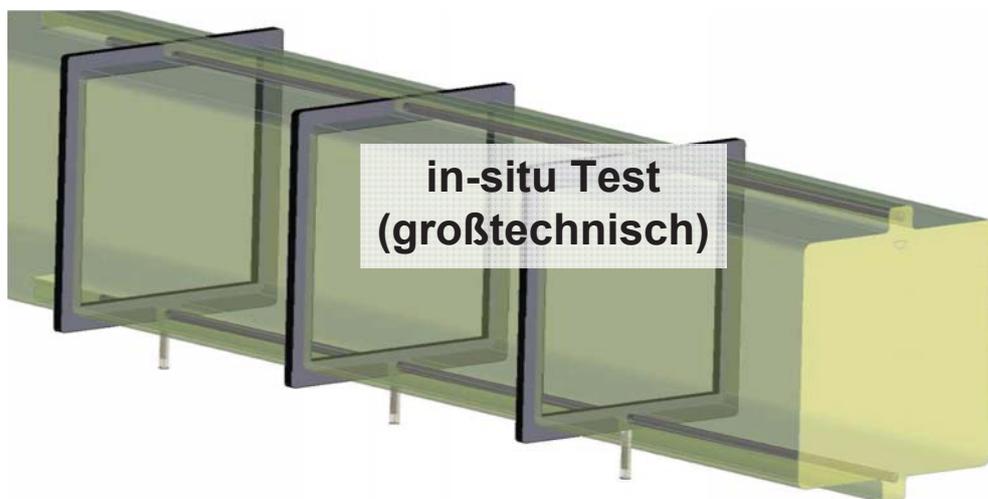
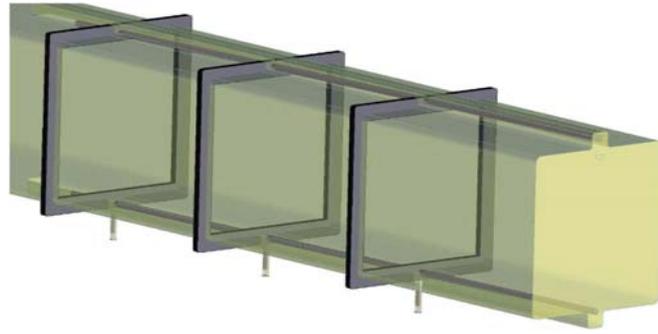
- Zuerst im Labormaßstab, dann Übertragung auf eingesetzte Mischtechnik für großtechnische Anwendung

Nachweiskonzept & Installation



Injektionsversuche

- Bohrlochversuche
- Versuche am Betonblock
 - Testung Rahmenkammern
 - Testung Injektion
 - Testung Prüfkonzept
 - Probengewinnung aus Kontakt Baustoff - Gebirge
 - Probenuntersuchung → Auswertung von Permeabilität und Porengrößenverteilung durch Laborversuche und μ CT
 - Testung von Möglichkeiten begleitender Geophysik



Glückauf!

Fragen?

Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

Bewertung der untersuchten Injektionsmittel



Prof. Dr.-Ing Oliver Langefeld
Institut für Bergbau

STROEFUN Phase I und Ausblick

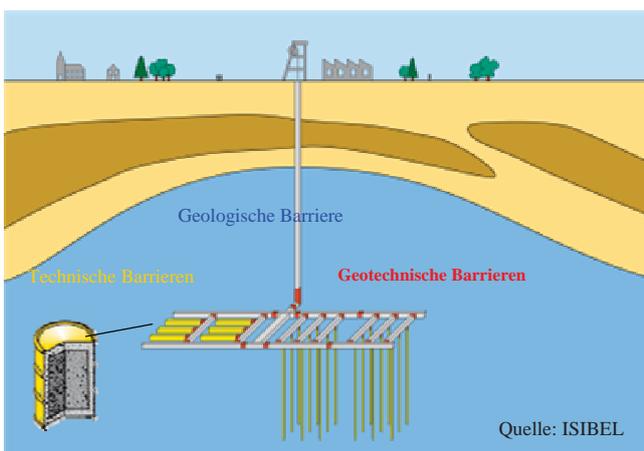
Konzeption, Untersuchung und Modellierung eines Abdichtungselementes aus Salzschnittblöcken zum Nachweis der Barrierenintegrität

Fachgespräch Verschlussysteme - Konzepte/Baustoffe/Demonstration/Anwendung

Freiberg – 03. – 04. Mai 2017

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Konzeption Endlagerung im Salzgestein



Analogon 1: Trias - 270 Mio.a

Salinarformation dicht gegenüber Zutritt von Lösungen aus Deck- und Nebengebirge

Analogon 2: CO₂-Ausbrüche (80 Mio.a)

Unverritztes Salzgestein dicht gegenüber Flüssigkeiten und Gasen

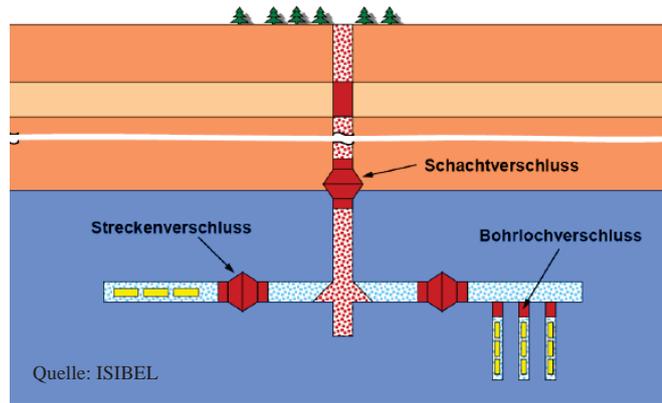
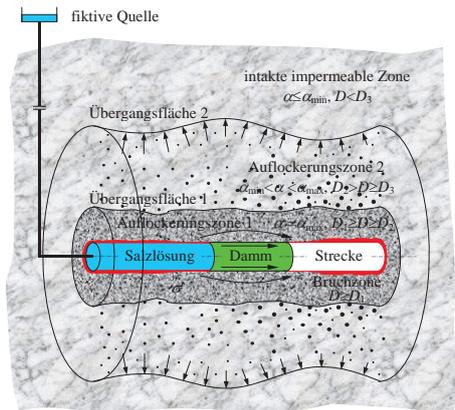
Salzgestein ist geeignet, radioaktive Abfälle langfristig aus der Biosphäre zu entfernen.

Voraussetzung für die langfristige Isolation radioaktiver Abfälle im Salzgestein ist der Nachweis, dass die unvermeidbaren Perforationen der geologischen Barriere durch geotechnische Barrieren in einer dem unverritzten Gebirge entsprechenden Qualität abgedichtet werden.

Konzeption geotechnische Barriere im Salzgestein

Geotechnische Barriere = viergliedriges System aus:

- Bautechnische Konstruktion
- Kontaktzone
- Auflockerungszone
- Unverritztes Gebirge

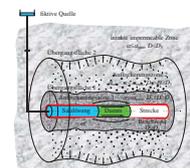


apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017

Grundsätzliche Anforderungen an geotechnische Barrieren

- (1) Laborativer Beleg der THMC-Materialeigenschaften von Bauwerk und Gebirge
- (2) Standort in einem möglichst homogenen und tektonisch unbeeinflussten Gebirgsbereich
- (3) Standortbezogene Nachweisführung (→ Verbundtragsystem)
- (4) Frühzeitige Konvergenzmessungen zur Einschätzung der rheologischen Gebirgseigenschaften
- (5) Bidirektionale Auslegung (→ Zu- und Austritt von Fluiden)
- (6) **Redundante und diversitäre Auslegung**
- (7) Durchlässigkeit in der Größenordnung des umgeben Gebirges
- (8) Trennung von Dicht- und Tragwirkung (→ Undichtigkeiten Kontaktzone)
- (9) Drucktechnische Auslegung gegen hydrostatischen Flüssigkeitsdruck
- (10) Dichtwirkung mit Standzeit zunehmend (→ Nachweiszeitraum bis 1 Mio a)
- (11) **Kurzzeit- und Langzeitdichtelemente (→ Verheilung der geologischen Barriere)**
- (12) Wartungsfreie Ausführung (→ Endlagerung = nachsorgefrei)
- (13) Langzeitbeständige Baumaterialien (→ natürliche Analoga)
- (14) Demonstrationsversuch für bautechnische Machbarkeit
- (15) Konstruktive Auslegung unter Berücksichtigung der lokationsspezifischen Eigenschaften des umgebenden Gebirges
- (16) Demonstrationsversuch für Funktionalität
- (17) Qualitätsmanagementsystem

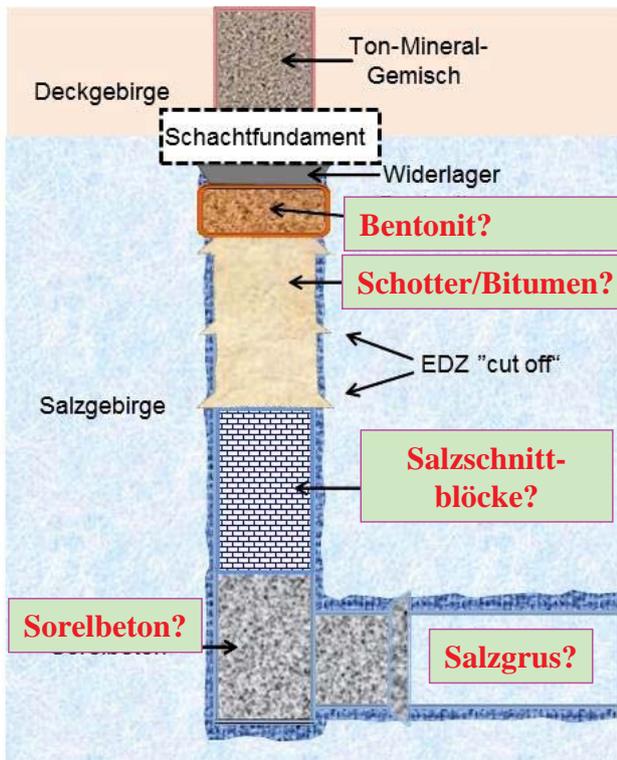


apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017



Redundante und Diversitäre Auslegung



apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Dusterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

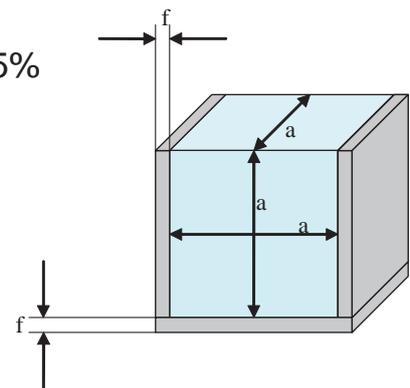
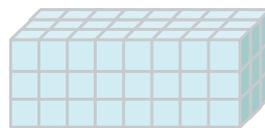
Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017



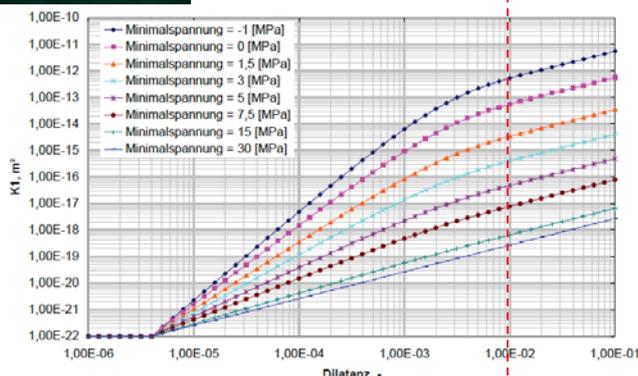
Konzeption eines Abdichtungselementes aus Salzschnittblöcken



Anfangsporosität $\Phi \approx 1\% - 5\%$



Anfangsporosität $\Phi \approx 40\%$



apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Dusterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017



Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



Schnittfläche ohne Mineralisation



Schnittfläche 2mm Mineralisation



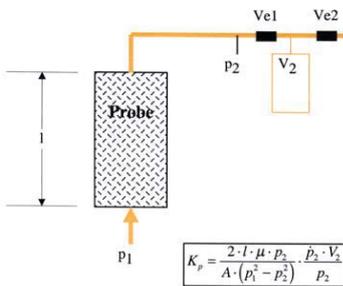
Schnittfläche 5mm Mineralisation

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

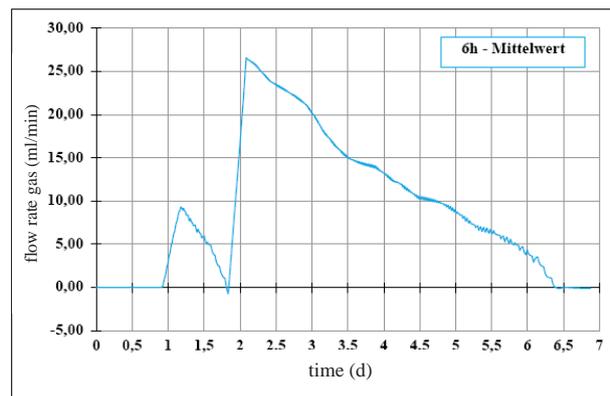
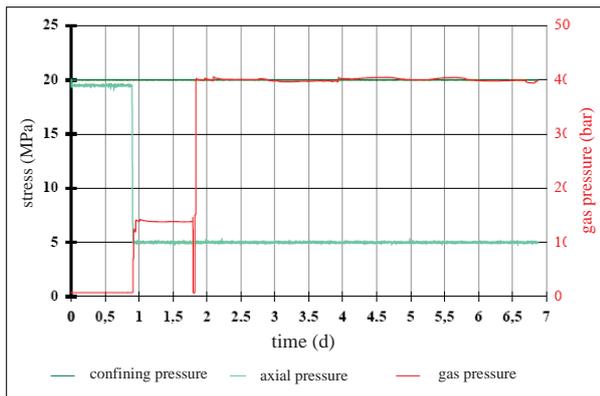
Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017



Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



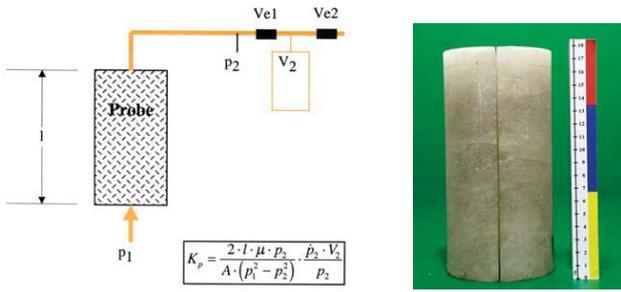
nicht mineralisierte Fuge
Trockengas



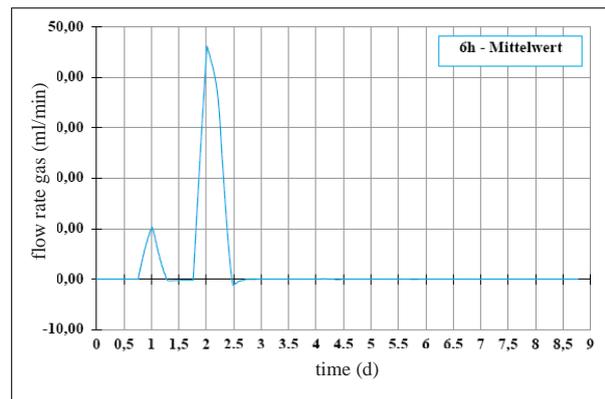
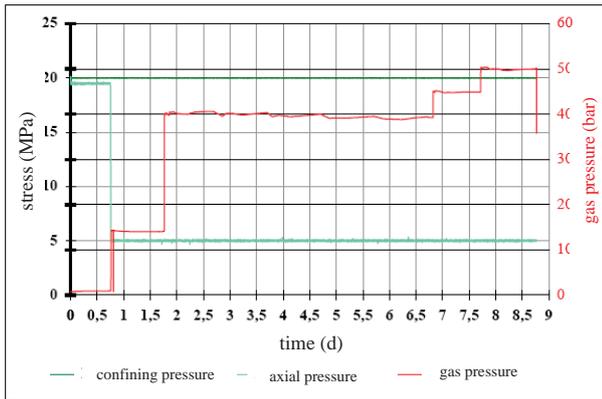
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017

Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



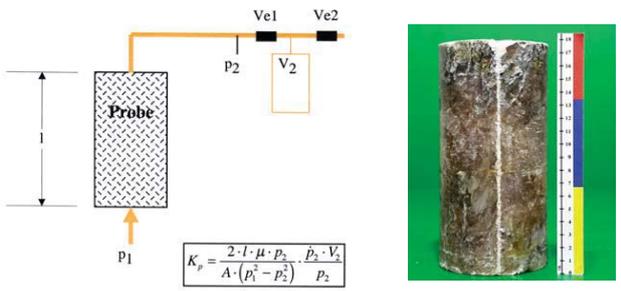
nicht mineralisierte Fuge
Feuchtgas



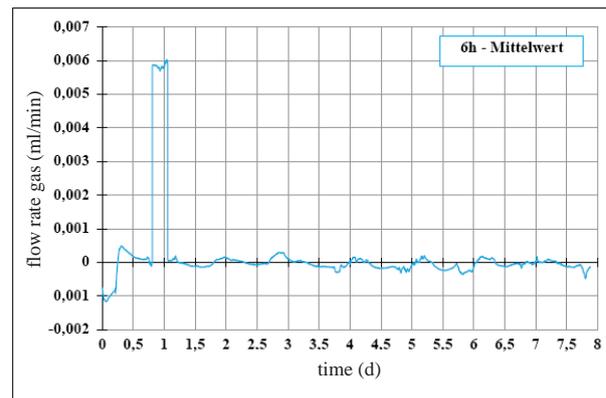
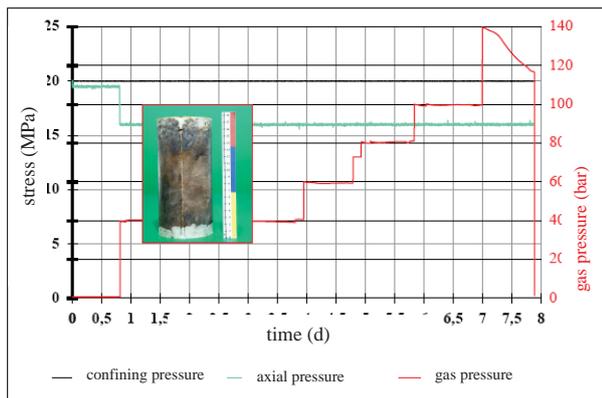
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Dusterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017

Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



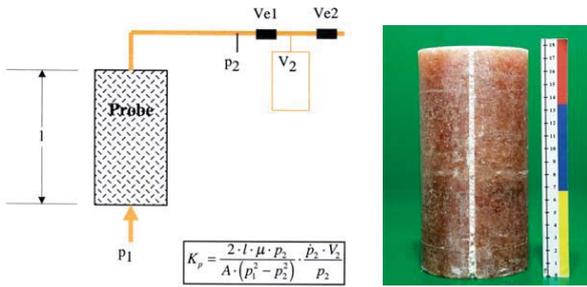
mineralisierte Fuge 2mm
Feuchtgas



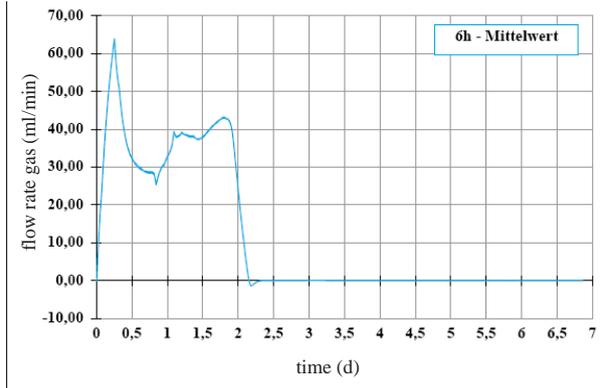
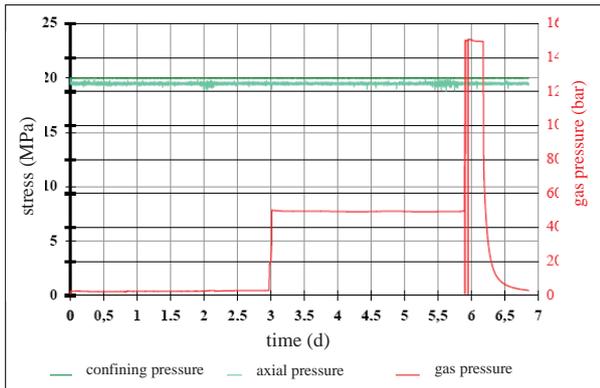
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Dusterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017

Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



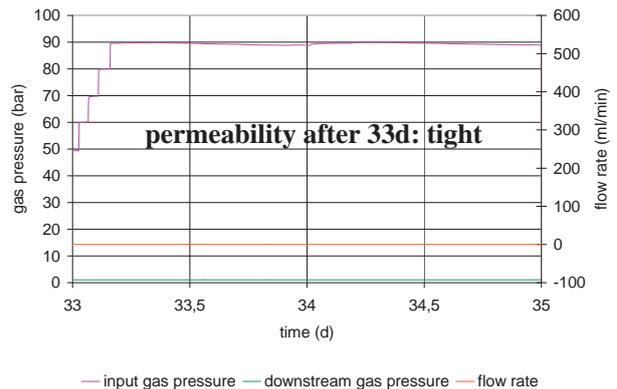
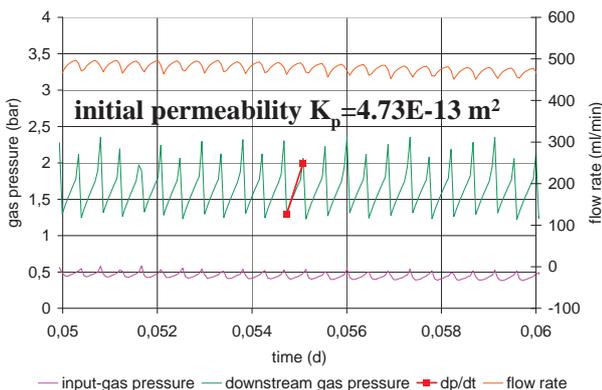
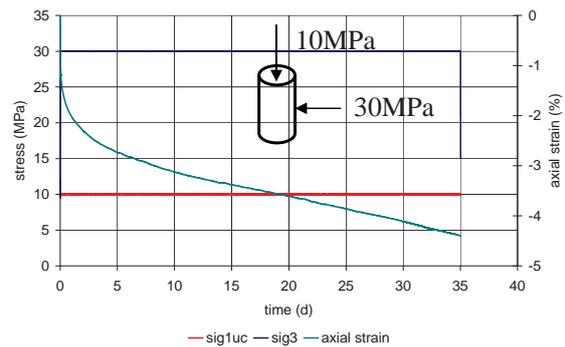
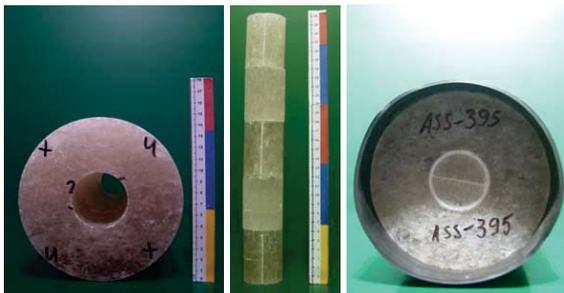
mineralisierte Fuge 5mm
Feuchtgas



apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Dusterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017

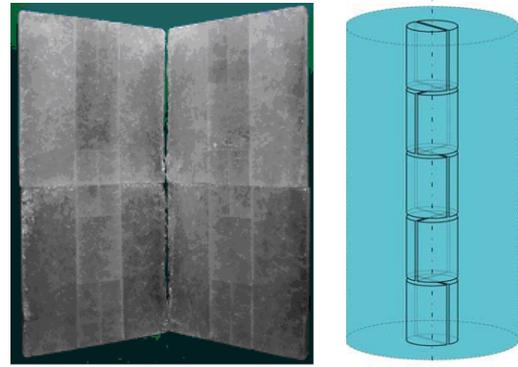
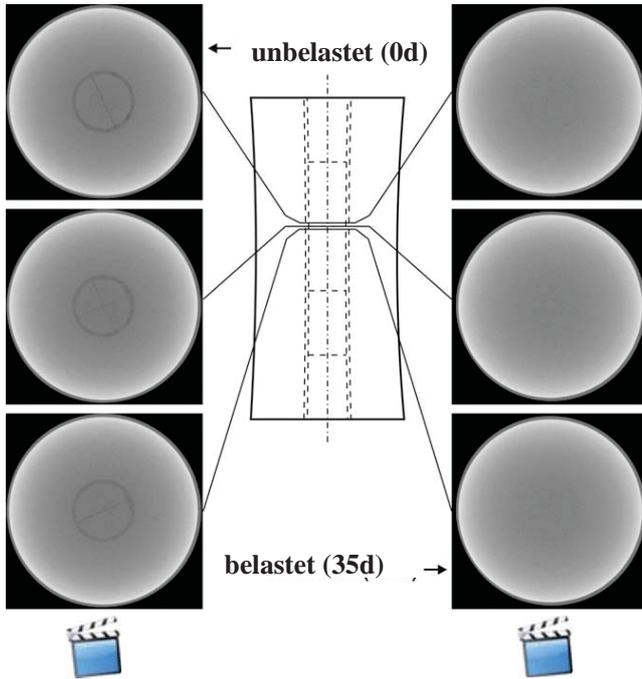
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



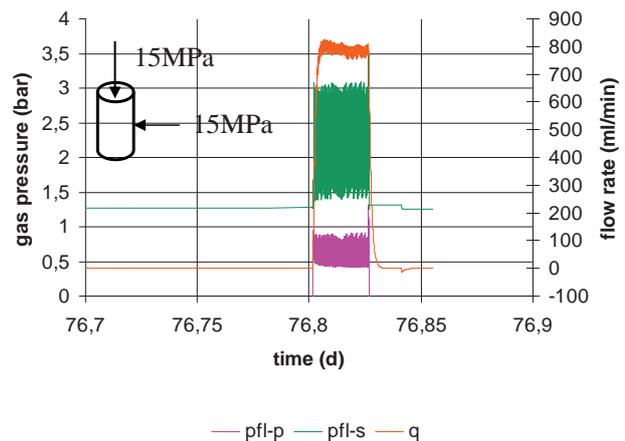
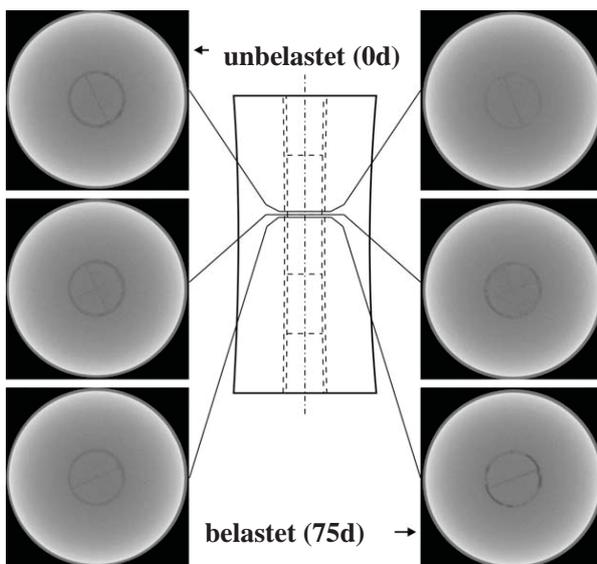
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Dusterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017

Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken

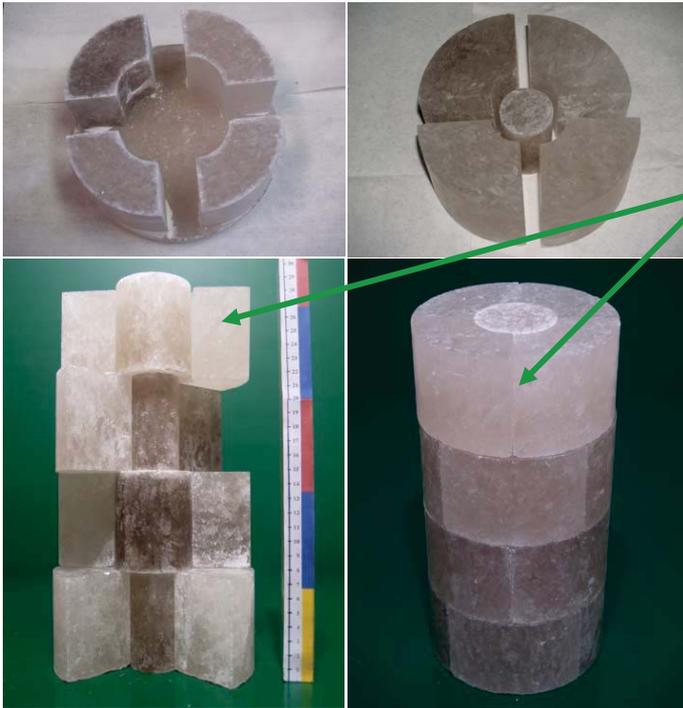


Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



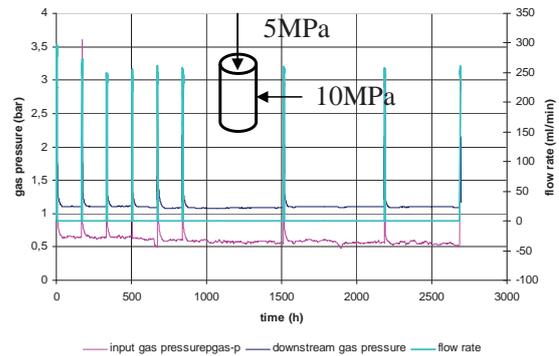
Keine signifikante Reduktion der Permeabilität bei isotroper Belastung / keine abschließende Kompaktion der Fugenfüllung

Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



20 Salzschnittblöcke unterschiedlicher Geometrie
Vermeidung durchschlägiger Kontaktflächen in Fließrichtung Kontaktflächen befeuchtet.

Wöchentliche / monatliche Permeabilitätsmessung mit Trockengas N_2 resultiert in Austrocknung



Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



Durchmesser: 1.4m
Höhe: 3.5m
Masse: 18t
 F_{ax} : 11MN
 σ_3 : 25MPa
Prüfkörper: $d = 75\text{cm}$ $h = 150\text{cm}$



Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



17t Steinsalz

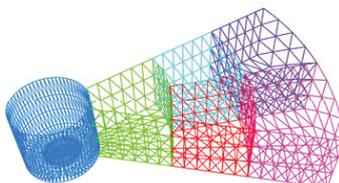
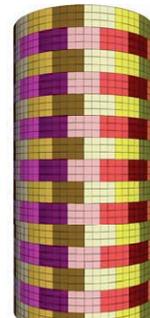
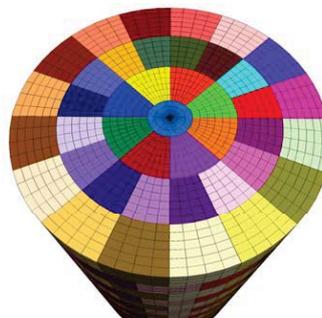
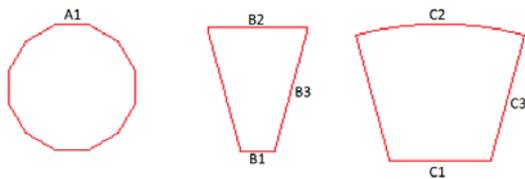
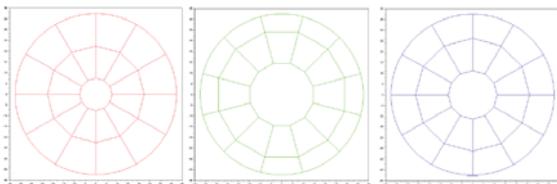


apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017



Rechnerische Modellierung von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



	Volumen (cm ³)	Benötigte Stückzahl	Gesamtvolumen (cm ³)
Zentralstück (A)	1687,5	5	8437,5
Trapez Typ 1 (A)	1125,0	60 (5 x 12)	67500
Trapez Typ 2 (A)	2415,9289	60 (5 x 12)	144955,73
Zentralstück (B)	6750,0	5	33750
Trapez Typ 1 (B)	1687,5	60 (5 x 12)	101250
Trapez Typ 2 (B)	1431,5539	60 (5 x 12)	85893,234
Zentralstück (C)	3796,875	5	18984,375
Trapez Typ 1 (C)	1406,25	60 (5 x 12)	84375
Trapez Typ 2 (C)	1958,8976	60 (5 x 12)	117533,86
		375	662679,7

Tabelle: Anzahl, Volumina der Schnittblöcke, Gesamtvolumen (unter der Annahme h = 10 cm)

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03.05.2017

Eutektische Salzschnmelzen als Verfüll- und Verschlussmaterial

W. Minkley
IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

W. Bollingerfehr
DBE Technology GmbH, Peine

Fachgespräch Verschlussysteme, Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg 03.05. – 04.05.2017



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

Themenschwerpunkte

- Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung
- natürliche Analoga zum vollständigen Einschluss
- Diffusion als Transportmechanismus
- Anwendungsbereiche von Salzschnmelzen
- Rückholung und Bergung
- eutektischer Salzschnmelzen als Verfüllmaterial
- Ausblick



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

Sicherheitsanforderungen

- **Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU, 2010)**
 - Maßgeblich für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen in der Nachverschlussphase ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die radioaktiven Abfälle müssen in diesem Gebirgsbereich so eingeschlossen sein, **dass sie dort verbleiben** und allenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen können.
- **SANDIA REPORT ,SAND2012-6032:**
 - A salt repository could potentially achieve **complete containment**, with no releases to the environment in undisturbed scenarios for as long as the region is geologically stable (Hansen and Leigh 2011).
 - **Neben Integrität der geologischen Barrieren (ewG) Dichtigkeit der geotechnischen Verschlussysteme von entscheidender Bedeutung.**



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Natural demonstration of complete containment in salt rocks



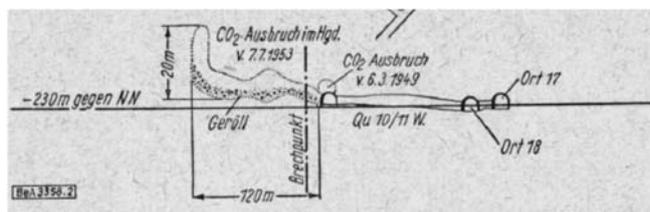
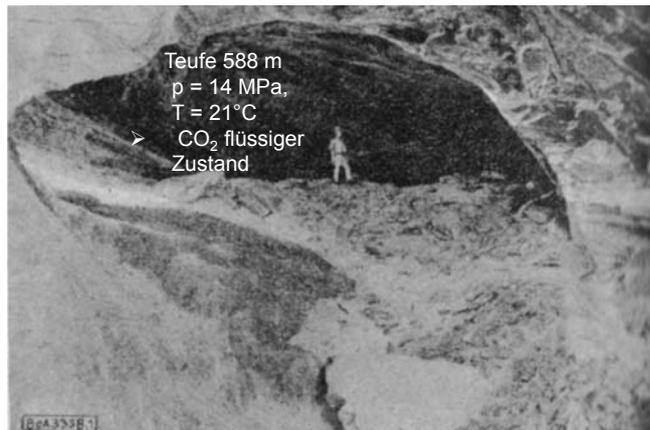
**2003 - salt mine "Untere Breitzbach"
CO₂-glacier after an underground
blow-out (CO₂ becomes solid
below -70°C)**



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

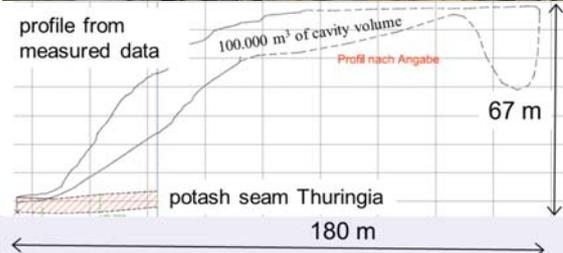
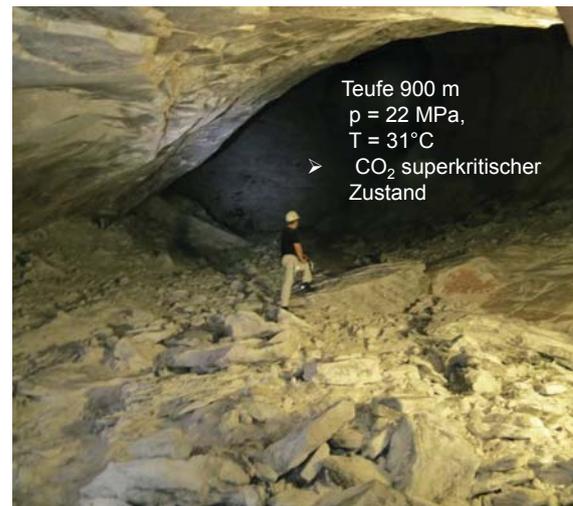
Dichter Einschluss von CO₂ im superkritischen und flüssigen Aggregatzustand im Salzgestein

CO₂ Ausbruch 07.07.1953, Menzengraben



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
 Research • Testing • Consulting • Expertise

CO₂ Ausbruch 01.10.2013, Unterbreizbach



Einschlussvermögen und Integrität von Salinarbarrieren durch "geologische Langzeitexperimente" (natürliche Analoga) auf eindrucksvolle Weise gegenständlich belegt

Natürliches Analoga zum vollständigen Einschluss:

- 100.000 m³ CO₂ im superkritischen Aggregatzustand ca. 20 Mio. Jahre eingeschlossen!

Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktive Abfälle

- 30.000 m³ radioaktive Abfälle im festen Aggregatzustand für 1 Mio. Jahre einzuschließen

Transportmechanismus in Salinarbarriere

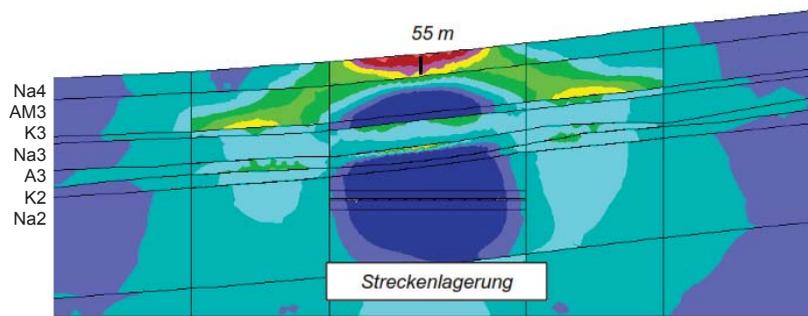
- Festkörperdiffusion bei $p_{\text{Fluid}} < \sigma_{\text{Min}}$
- Advektion bei $p_{\text{Fluid}} \geq \sigma_{\text{Min}}$

Hierin liegt ein Unterschied zu anderen potentiellen Wirtsgesteinen wie z.B. Tonstein, wo Diffusion im flüssigkeitsgefüllten Porenraum mit um mehrere Größenordnung höherer Geschwindigkeit abläuft oder bei Kristallingesteinen, wo zusätzlich Advektion als Transportprozess in der Barriere stattfinden kann.

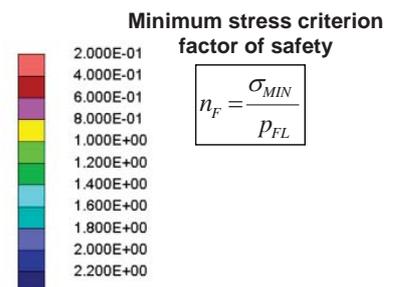
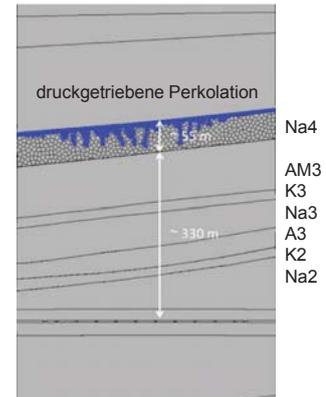
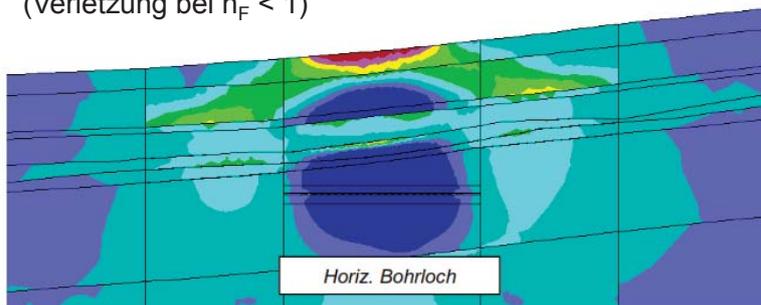


Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
 Research • Testing • Consulting • Expertise

Integrität der geologischen Barriere bei thermomechanischen Beanspruchungen (generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben)



Minimalspannungskriterium 30 Jahre nach Einlagerung
(Verletzung bei $n_F < 1$)



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Bestmögliche Sicherheit nach dem Stand von Wissenschaft und Technik

(Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016)

Wesentlicher Mechanismus für eine mögliche Radionuklid-Freisetzung aus einem Endlager im Salz ist die Diffusion in der flüssigen Phase über die geotechnische Barriere und die EDZ:

- Diffusion in der flüssigen Phase über vernetzten Porenraum im Salzgrusversatz bzw. über Flüssigkeitsfilme entlang der Korngrenzen in der EDZ

Keine Lösungen im Kontakt mit Abfallbehältern, dann im Salzgestein nur Festkörperdiffusion möglich:

- vollständiger Einschluss

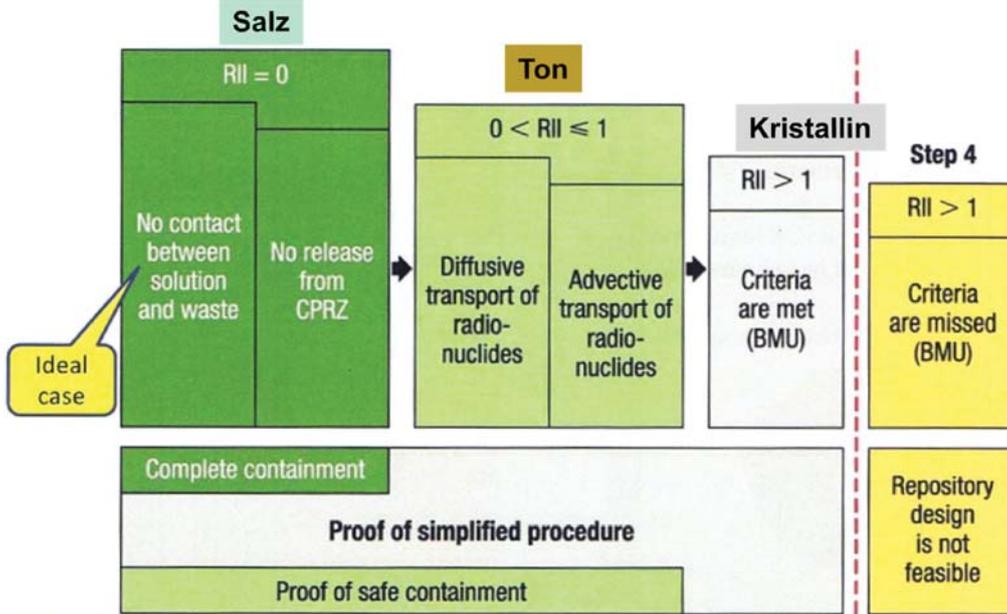


Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Bewertung des Einschusses der Radionuklide im ewG



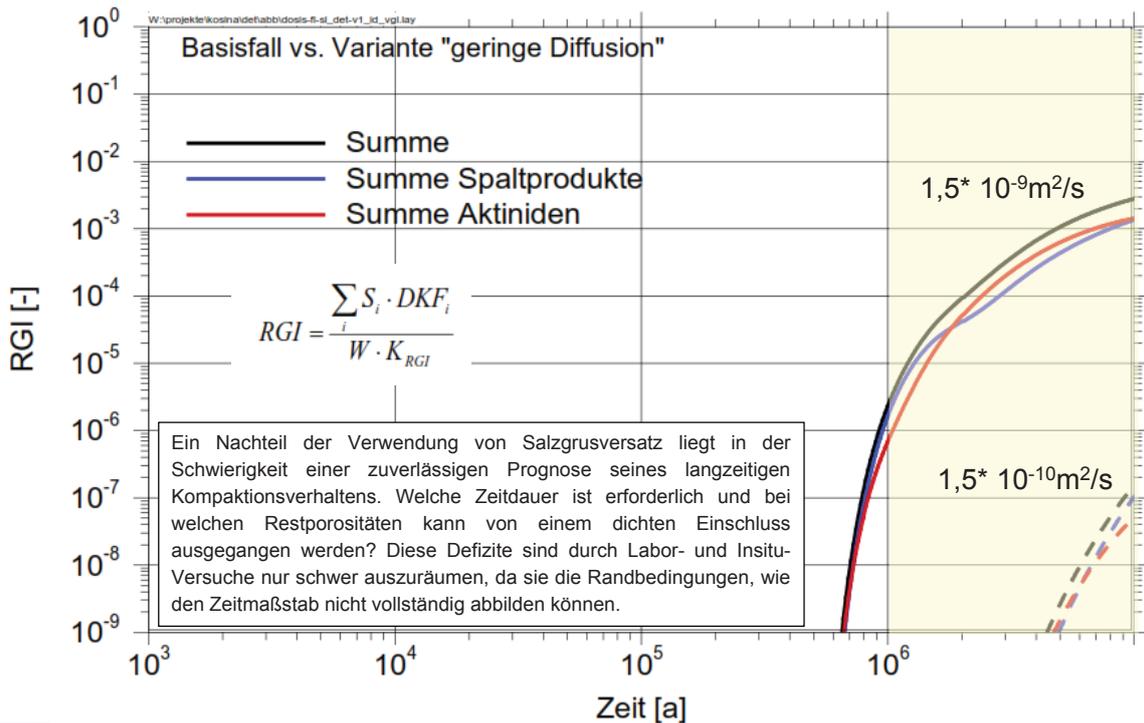
Safety and demonstration concept for a simplified radiological statement: radiological insignificance index, RII (0,1 mSv/a)



Workshop „Final Disposal in Deep Bore Holes ...“, June 5th & 6th, 2015, Berlin
Research • Testing • Consulting • Expertise

21

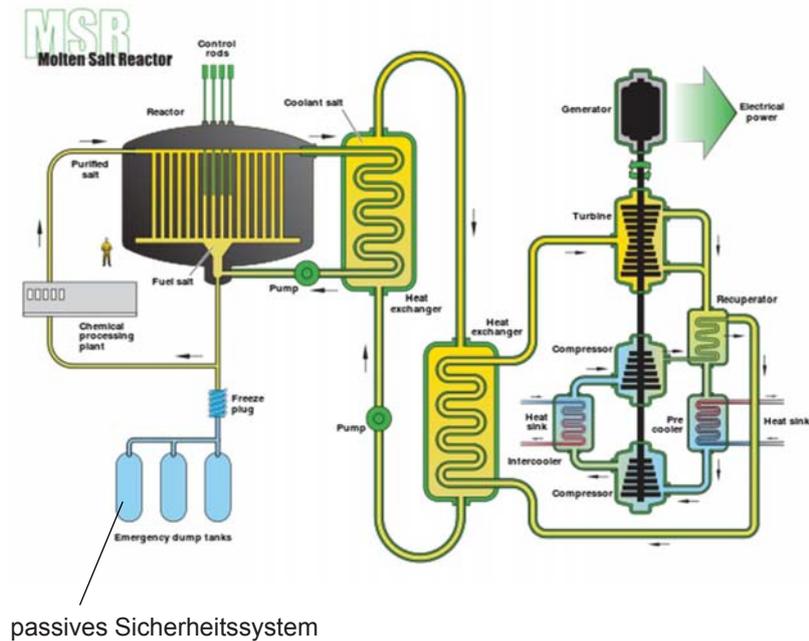
Prüfung Radiologischer Geringfügigkeitsindex 0 < RGI < 1 Diffusion über flüssige Phase im Salzgrus



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Sicherer Einschluss von Radionukliden in rekrystallisierten Salzschnmelzen als passives Sicherheitselement bei Liquid Fluorid Thorium Reactor LFTR (4. Generation von Kernreaktoren)

70% LiF, 20% BeF₂, 8% ThF₄, 1% UF₄ und UF₃



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Large-scale industrial applications of eutectic salt mixtures as heat exchange and storage medium in solar thermal power plants



28.500 t Salz • 1.020 MWh • ca. 7,5h Grundlast
Andasol 1 • Andalusien • Spanien • 50 MW • 2009

- Nitratsalzmischung (Natriumnitrat • Kaliumnitrat)
- 60% NaNO₃ • 40% KNO₃
 - Schmelzpunkt: 223 °C
 - Kalter Tank: 292 °C
 - Heißer Tank: 386 °C



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Selected TES Candidate Salt Mixtures with Cost Estimates

Salt #	Material	Composition	Melting Point	Heat Capacity	Energy Density (500C-M.P.)	Salt Compd. Price	2 Tank System Cost / Stored Energy
		Wt%	(°C)	(J/g-K)	(MJ/m ³)	(\$/kg)	(\$/kW-h _{thermal})
	Today's Solar Salt	40% KNO₃ 60% NaNO₃	222	1.5381	756	\$1.080	\$31.21
1	Baseline Ternary (in proposal)	KNO ₃ – LiNO ₃ – NaNO ₃	117*	2.32	1524*	\$2.206	\$14.66
2	Nitrate-nitrite Ternary	KNO ₃ – NaNO ₂ – NaNO ₃	99	1.4623	1080*	\$1.266	\$15.87
3	UA K-Nitrate-nitrite Quaternary	KNO ₃ – NaNO ₂ – LiNO ₂ – NaNO ₃	79	1.5048	1073	\$1.928	\$19.11
4	"AB" nitrate compound	KNO ₃ – LiNO ₃ NaNO ₃ – MgK* * 2KNO ₃ .Mg(NO ₃) ₂	101	1.5788	1181	\$1.537	\$16.15
5	UA Na-nitrate-nitrite Quaternary	LiNO ₃ – NaNO ₂ NaNO ₃ – KNO ₃	99	1.5569	1114	\$1.809	\$18.27
6	UA Na-K-nitrate-nitrite Quinary	LiNO ₃ – NaNO ₂ NaNO ₃ – KNO ₂ – KNO ₃	95.7	1.5455	1110	\$1.797	\$18.23

16 | Solar Energy Technologies Program

eere.energy.gov

Niedrigschmelzende Salzmischungen auf Basis NaCl/KCl

Probe	AlCl ₃ [mol-%]	MCl [mol-%]	T _{m(theo.)} [°C]	T _{m(exp.)} [°C]	T _{f(exp.)} [°C]	
M = Li	50,2	49,8	145,3	143,7	110,2	
M = Na	50,2	49,8	156,1	154,7 155,3 155,2	126,4 119,1 110,5	
M = K	50,2	49,8	257,1	257,8	235,9	
	FeCl ₃ [mol-%]	NaCl [mol-%]	KCl [mol-%]	T _{m(theo.)} [°C]	T _{m(exp.)} [°C]	T _{f(exp.)} [°C]
	48,3	–	51,7	234,5	–	–
	50,2	49,8	–	162,0	162,6	147,8
	50,0	31,8	18,2	124,2	140,1	132,6
	51,6	29,0	19,4	114,8	–	–

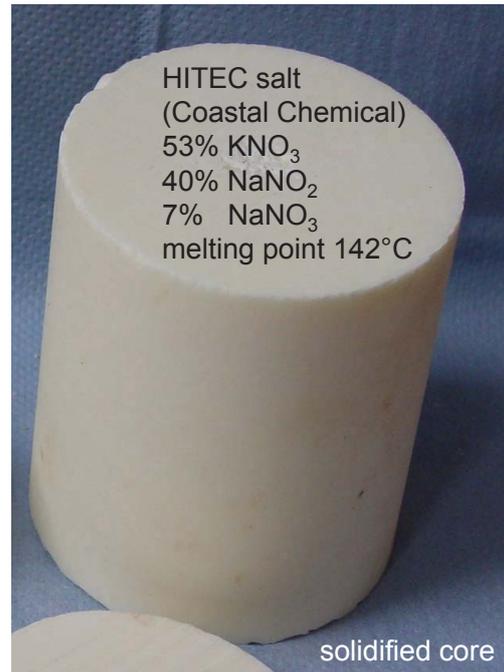
(Linsinger & Radtke, 2013)
K+S Forschungsinstitut



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

Molten salt as an alternative backfill and sealing material in salt formation



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Technical device for melting eutectic salt mixture

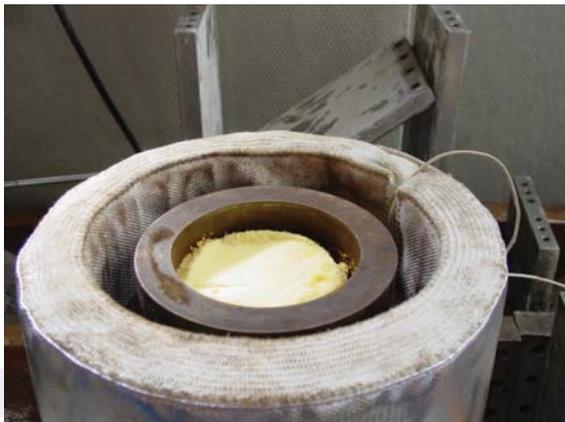


electric heating sleeve



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Melting of eutectic salt mixture



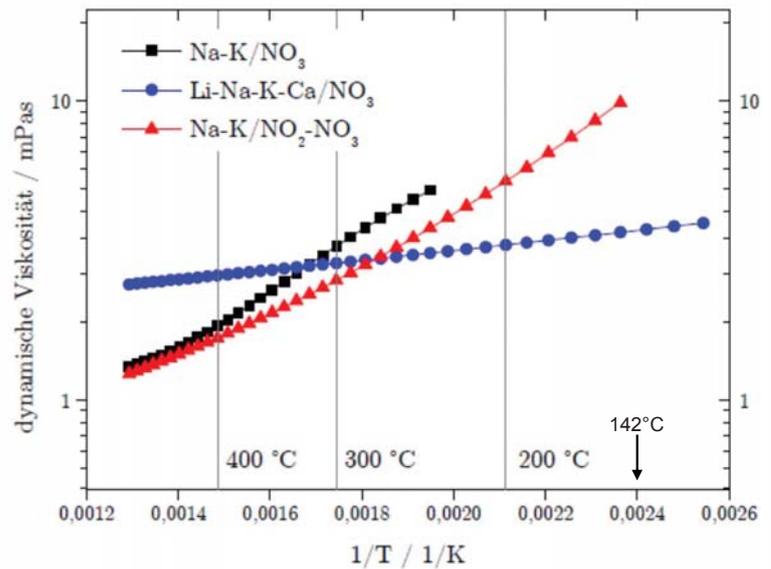
eutectic molten salt



Viscosity of eutectic molten salts

viscosity at 20°C in mPa* s:

water: 1
 Honey: 10^4
 rock salt: $10^{18} \dots 10^{21}$

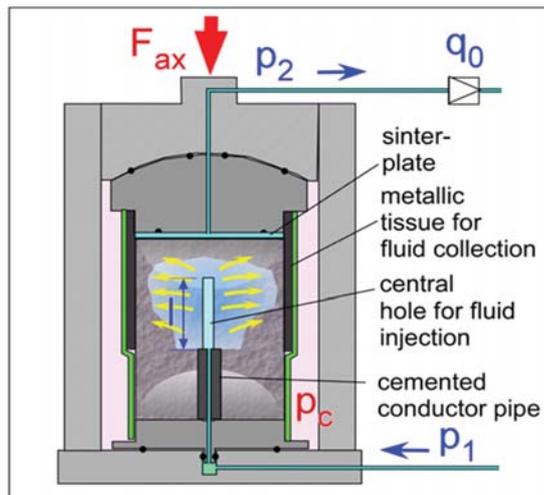


(P. Heilmann, 2013)



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
 Research • Testing • Consulting • Expertise

Integrity test on solidified molten salt



HITEC sample

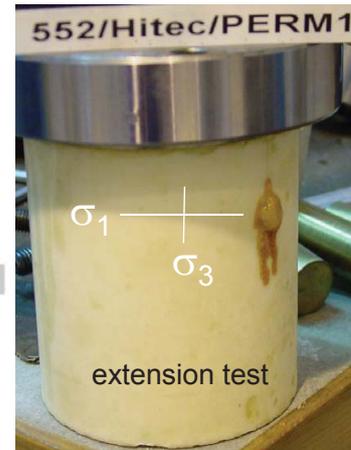
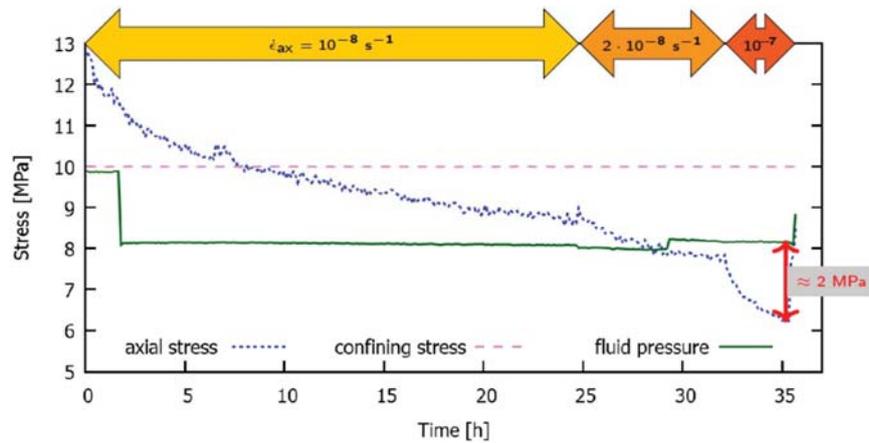


Figure 1: Servohydraulic testing machine and experimental setup for permeability measurements. Flow rates are measured at the top (labelled by q_0).



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
 Research • Testing • Consulting • Expertise

Integrity of solidified molten salt



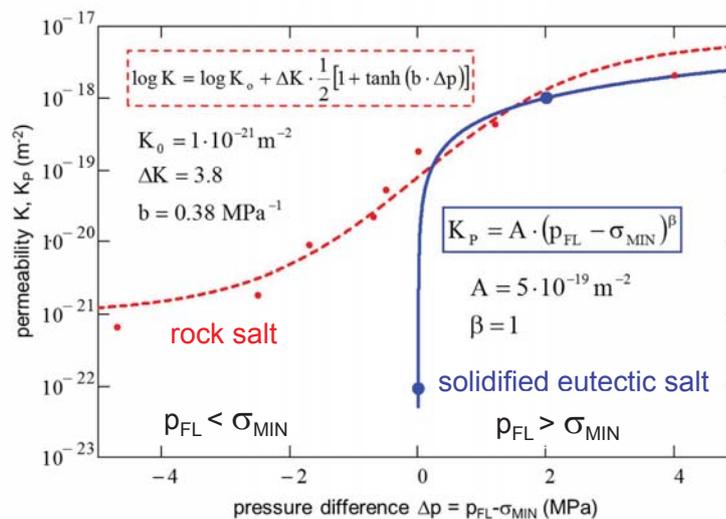
- Constant $\sigma_{\text{conf}} = 10 \text{ MPa}$ and $p_{\text{fluid}} = 8 \text{ MPa}$
- Axial stress lowered via strain-controlled extension
- No fluid flow up to $p_{\text{fluid}} - \sigma_{\text{conf}} \sim 2 \text{ MPa}$, then fracture occurs

HITEC sample after percolation test, with the fluid indicated by the tracer and bubble. The leakage is localised to a small spot.



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Permeability of salt as a function of pressure difference: $\Delta p = p_{\text{FLUID}} - \sigma_{\text{MIN}}$



Permeability of rock salt (red, dashed) and HITEC (blue, solid). The power-law behaviour is predicted by fluid percolation models.



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Vorteile von eutektischen Salzschnmelzen als alternatives Versatzmaterial

- Rekristallisiertes eutektisches Salz ist impermeabel gegenüber Fluiden analog natürlichen Salzgesteinen und verliert seine Dichtheit und Integrität erst bei Fluidrücken größer als die minimale Hauptspannung
- Es besitzt im Unterschied zu natürlichem Steinsalz keine Restfeuchte und keine Flüssigkeitsfilme entlang der Korngrenzen, sodass als Transportmechanismus ausschließlich Festkörperdiffusion in Frage kommt:
 - Einschluss der radioaktiven Abfälle neben Glasschnmelzen zusätzlich in Salzschnmelzen
 - vollständiger Einschluss
- Da rekristallisierte Salzschnmelzen keine Porosität aufweisen wie Salzgrusversatz, läuft die konvergenzbedingte Verheilung der aufgelockerten Zone (EDZ) verüllter Hohlräume wesentlich schneller ab



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Rückholung und Bergung

Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU, 2010)

- In der Betriebsphase bis zum Verschluss des Endlagers muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.
- Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung für einen Zeitraum von 500 Jahren

„Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder der Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.“

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016)

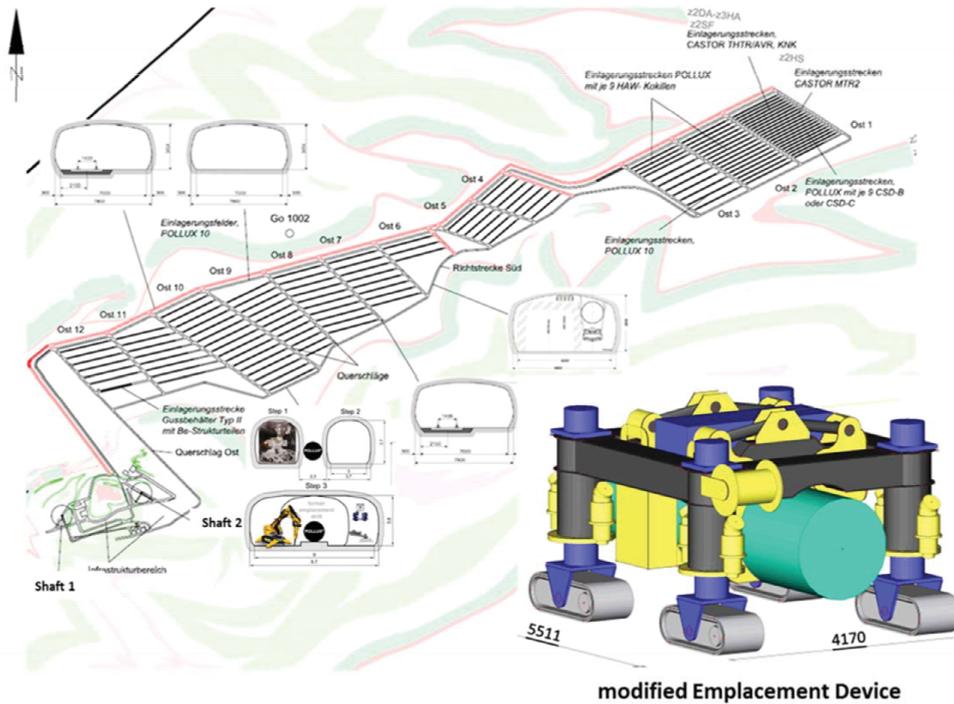
Man kann zwar sagen, dass die Rückholung oder Bergung der Abfälle nur eine Frage des Aufwandes sei. In jeder tiefengeologischen Konstellation ist sie „im Prinzip“ möglich. Der Aufwand und die Risiken einer Rückholung/Bergung können jedoch extrem unterschiedlich sein.

Dementsprechend macht es einen großen Unterschied, ob Reversibilitätsaspekte bereits von Anfang an unter bestimmten Bedingungen und in bestimmten Zeiträumen vorgesehen sind, oder ob ein möglichst schneller Verschluss des Endlagerbergwerks ohne Rücksicht auf Reversibilität angestrebt wird.



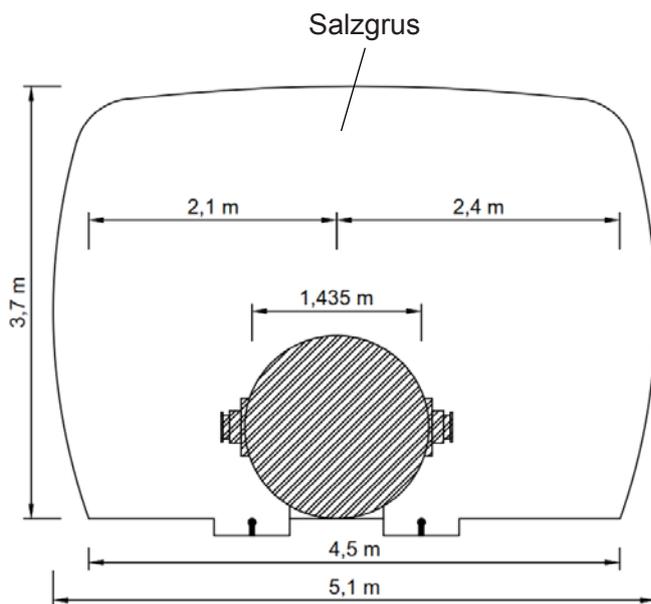
Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Re-Mining Strategy for Drift Disposal of POLLUX Casks (ISIBEL, 2017)

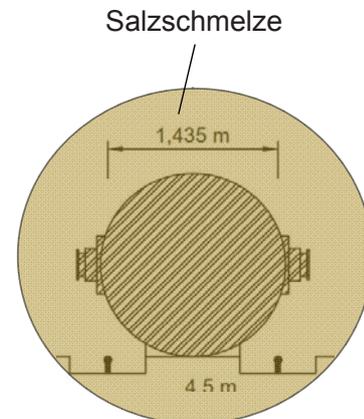


Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Streckenlagerung mit Versatz Salzgrus und eutektischer Salzschnmelze



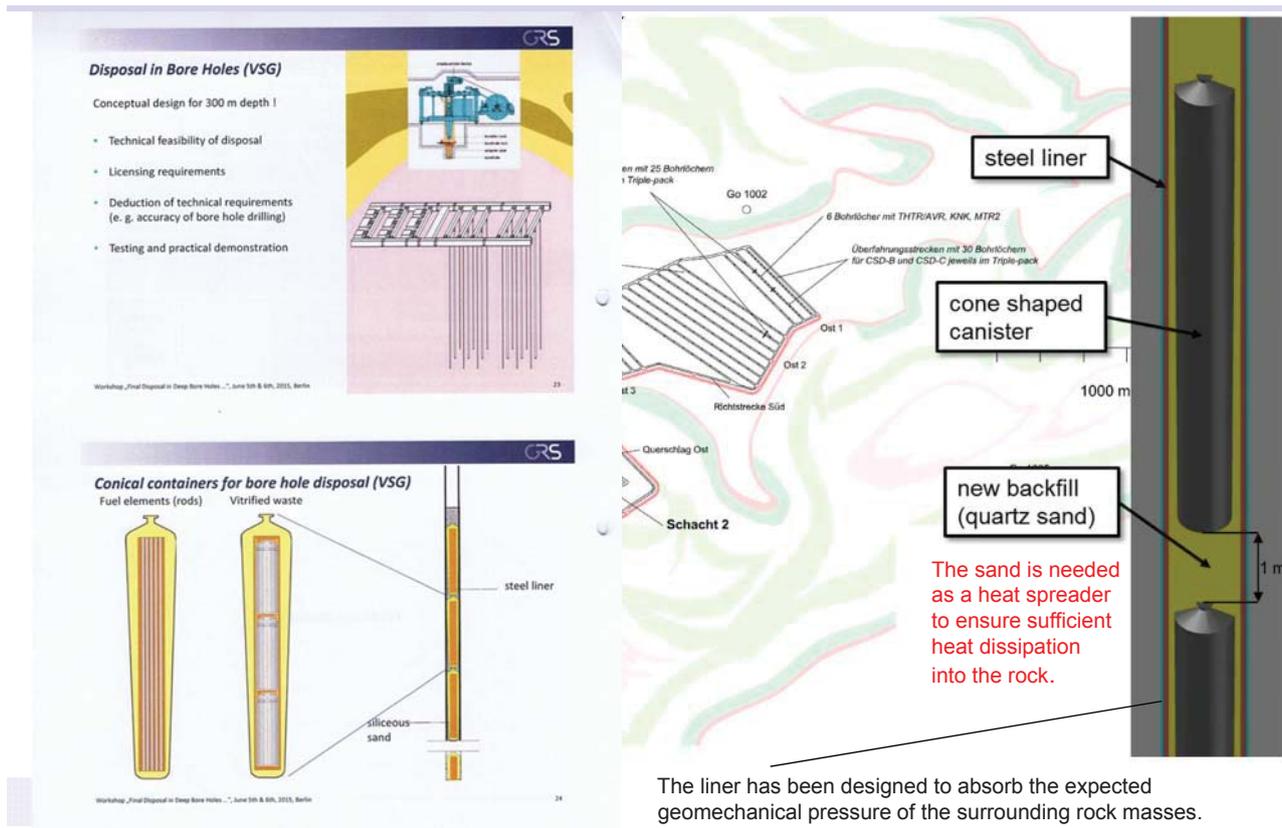
Einfache weniger aufwendige Rückholung durch herausziehen der Abfallbehälter aus eutektischer Salzschnmelze



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Deep vertical Borehole disposal of Spent Fuel Canisters

lined vertical boreholes of diameter 700 mm (ISIBEL, 2017)

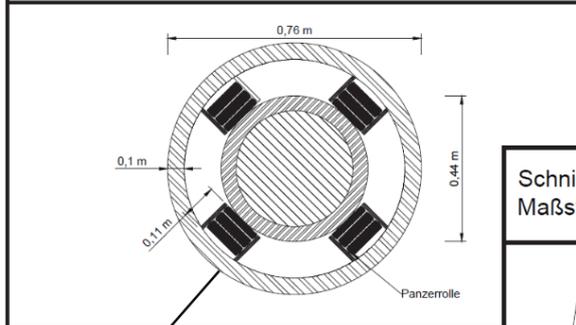


Auswirkungen der Forderung nach Rückholbarkeit (VSG, 2010)

- Bei den bisher verfolgten Einlagerungskonzepten wird von einer max. Auslegungstemperatur von 200 °C ausgegangen, die noch in der Betriebsphase des Endlagers erreicht wird
- Nach dem Stand der Technik ist Bergbau hingegen nur bei max. Wassertemperaturen von ca. 70 °C und Gebirgstemperaturen von ca. 100 °C sicher beherrschbar
- Wenn die angegebenen Temperaturlimits überschritten werden, können diese Faktoren bei einer Rückholung sowie der Bergung der Behälter zu Problemen führen
- Sollte sich die Notwendigkeit einer Absenkung der maximalen Auslegungstemperatur ergeben, ist zu bewerten, welche sicherheitstechnischen Auswirkungen sich daraus neben dem größeren Flächenbedarf ergeben
- Auch eine ggf. notwendige Verrohrung des Einlagerungsbohrloches führt bei der Bohrlochlagerung zwangsläufig zu einem Verlust von sicherheitstechnischen Vorteilen. So wird der sicherheitstechnisch angestrebte frühzeitige sichere Einschluss jedes einzelnen Abfallbehälters verhindert, die Möglichkeit des potenziellen Zutritts von Laugen an die Abfallbehälter gefördert

horizontale Bohrlochlagerung in verrohrten Bohrungen

Schnitt F-F, Einlagerungsbohrloch;
Maßstab 1:10

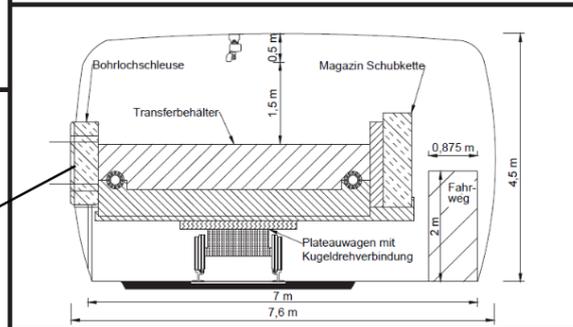


0,1 m Stahlliner

Massiver
Bohrloch-
verschluss

Ferner können wegen des Ringspalts zwischen Verrohrung und Behälter, im Falle eines Lösungszutritts größere Lösungsmengen in Kontakt mit allen Behältern eines Bohrlochs treten, diese korrodieren und letztlich erhebliche Teile des Inventars mobilisieren. Durch die Korrosion der Verrohrung ist darüber hinaus mit deren Versagen zu rechnen, wodurch die kontaminierten Lösungen ausgepresst werden (VSG, 2010).

Schnitt H-H, Querschlag;
Maßstab 1:60

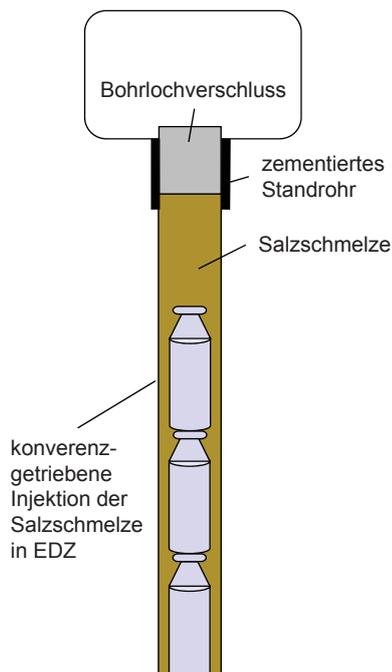


Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

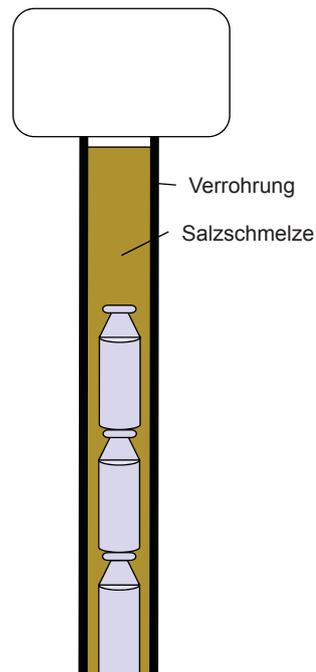
Research • Testing • Consulting • Expertise

vollständiger Einschluss und Rückholungsmöglichkeit bei Verwendung eutektischer Salzschnmelzen als Verfüllmaterial

unverrohrte Bohrlochlagerung



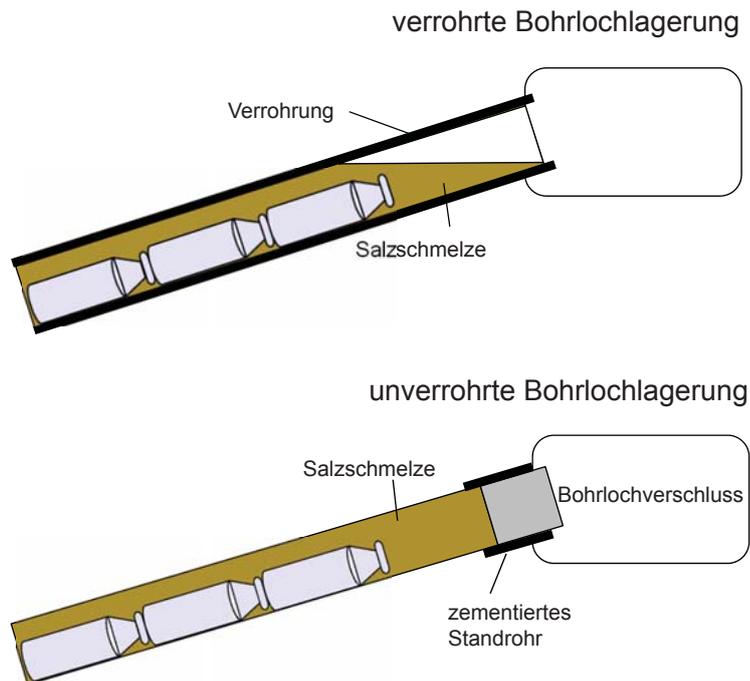
verrohrte Bohrlochlagerung



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

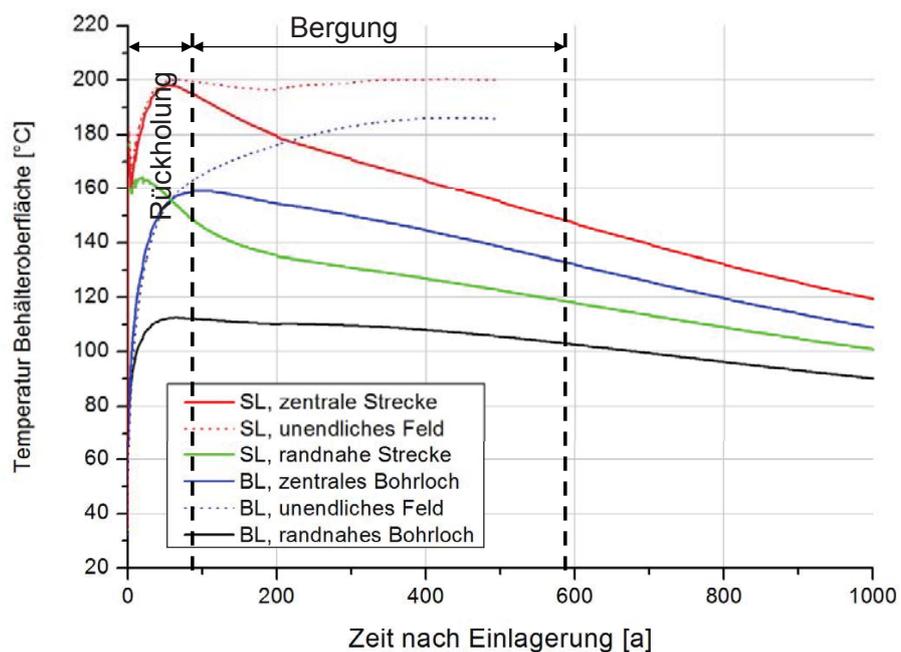
Research • Testing • Consulting • Expertise

vollständiger Einschluss und Rückholungsmöglichkeit bei Verwendung eutektischer Salzschnmelzen als Verfüllmaterial



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
 Research • Testing • Consulting • Expertise

Temperaturrentwicklung Strecken- und Bohrlochlagerung (KOSINA)



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
 Research • Testing • Consulting • Expertise

Schlussfolgerungen eutektischer Salzgemische als Verfüll- und Verschlussmaterial

- Instantaner vollständiger Einschluss der Abfallbehälter in der Salzschnmelze und später im auskristallisierten Salz ($T_{\text{Schmelz}} \sim 100^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$)
- Verhinderung des Zutritts von wässrigen Lösungen an die radioaktiven Abfälle aufgrund der hohen Dichte der Salzschnmelze
- inkompressibles, nicht poröses Versatzmaterial wodurch der Antriebsmechanismus für ein durch Konvergenz getriebenes Auspressen von kontaminierten Lösungen ausscheidet
- Transportmechanismus von Radionukliden ausschließlich Festkörperdiffusion, d.h. vollständiger Einschluss
- technologisch einfache, vollständige Verfüllung durch Salzschnmelzen mit geringer Viskosität, speziell auch in Bohrungen
- Technisch einfache und weniger aufwendige Rückholungsmöglichkeit bei $T_{\text{Auslegung}} = 200^{\circ}\text{C}$ in der Betriebsphase und Bergung solange die Schnmelze noch nicht erstarrt ist
- Nach Auskristallisation Rückholung/Bergung durch Aufheizung oder selektive Solung möglich



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

Weitere Anwendungsmöglichkeiten und Ausblick

eutektischer Salzgemische als Verschlussmaterial

(Gebirgsbereiche in denen Schmelztemperaturen nicht erreicht werden)

- Streckenverschluss
- Bohrlochverschluss
- Komponenten für Schachtverschlüsse

Ausblick

- Auswahl geeigneter eutektischer Salzschnmelzen
- Langzeitverhalten
- Experimentelle Untersuchungen im Labor und in situ



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise



Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase I und Ausblick

Dipl.-Ing. Sebastian Becker
TU Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Fuchsmühlenweg 9
09599 Freiberg
Tel.: 03731 – 39 3847
E-Mail: Sebastian.Becker@mabb.tu-freiberg.de

Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo
TU Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Fuchsmühlenweg 9
09599 Freiberg
Tel.: 03731 – 39 2060
E-Mail: Helmut.Mischo@mabb.tu-freiberg.de

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker



Gliederung

- 1 Motivation zur Entwicklung eines gefügestabilisierten Salzgrusversatzes**
- 2 Rezepturentwicklung**
- 3 Ergebnisse der labortechnischen Prüfung**
- 4 Charakterisierung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes**
- 5 Ausblick**
- 6 Zusammenfassung**

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

1 Motivation zur Entwicklung eines gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

1 Motivation zur Entwicklung eines gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

Verfügbare Versatzmaterialien für HAW-Endlager im Salinar

- Trockener oder angefeuchteter Salzgrusversatz:
 - + Lagerstättentypisches Material
 - + Technisch einfacher Einbau unter Tage
 - + Langfristige Angleichung der Materialeigenschaften an das Wirtsgestein
 - Entwicklung einer Stütz- und Dichtwirkung erst mit zunehmender Kompaktion
 - Hohe Porosität und Permeabilität nach dem Einbau
 - Ungünstige Setzungseigenschaften
- Salinare Baustoffe:
 - + Vollständige Verfüllung untertägiger Hohlräume möglich
 - + Sofortige Stütz- und Dichtwirkung erreichbar
 - Hoher Lösungsgehalt im Versatzmaterial
 - Hoher technischer und logistischer Aufwand beim Einbau (Widerlager, Drainagen, etc.)

Weitere Versatzmaterialien basierend auf den oben genannten Versatzmaterialien:

- Salzgrusversatz mit trockenen Zusätzen (Tone oder hydratisierende Baustoffe)
- Mineralische Korngemische (Basalt oder Diabas)

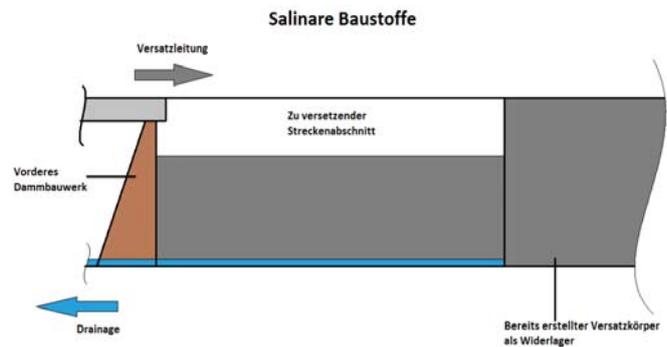
Der gefügestabilisierte Salzgrusversatz bildet ein Bindeglied zwischen den zwei Versatzstoffarten und vereinigt die Vorteile, um die jeweiligen Nachteile abzumindern!

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Verfügbare Versatzmaterialien für ein HAW-Endlager im Salinar



Quelle: Mischo, H.; Untersuchung an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge. Dissertation an der TU Clausthal. Aachen: Shaker Verlag, 2002. - bearbeitet

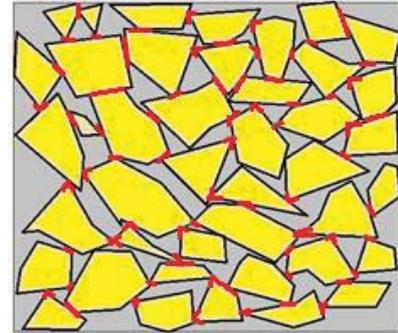


Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

2 Rezepturentwicklung

Grundlagen der Gefügestabilisierung

- Gefügestabilisierung der Kornkontakflächen des Steinsalzgruses durch Polyhalit
- Versatzmaterial basierend auf **Salzgrus** (optimiert hinsichtlich der Zielstellungen)
- Minimaler Bindemittelgehalt (**Salzbinder**) (Lösungsgehalt minimiert)



■ Gefügestabilisierende Salzmineralisationen
■ Offener Porenraum
■ Steinsalz

Angelehnt an Lingen, P., Theelen, J.; Versickerungssystem, Patentanmeldung EP1252393 B1; Eingetragen 2. Februar 2001



Gefügestabilisierter Salzgrusversatz	
Salzgrus	Salzbinder (reaktive Phase)
<ul style="list-style-type: none"> • Optimierte Steinsalzgruskörnungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Feste Salzbinderkomponente • Flüssige Salzbinderkomponente (< 4 Masse-% im Versatz)

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Die Salzgrusausgangskomponenten

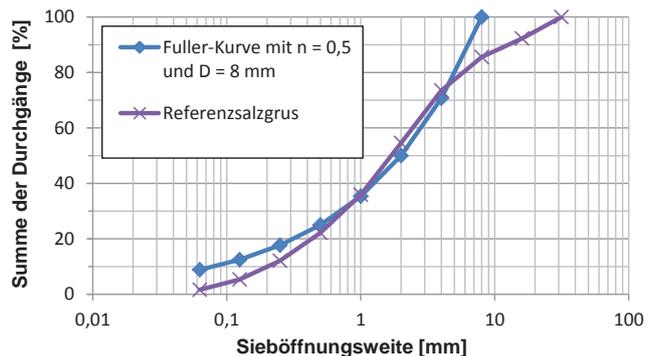
Bedingungen an Salzgruskörnungen:

- Salzgrus aus der bergmännischen Gewinnung
- Ähnlichkeit zur Fullerkurve (Idealsieblinie)
- Ausreichende Verfügbarkeit



Materialauswahl:

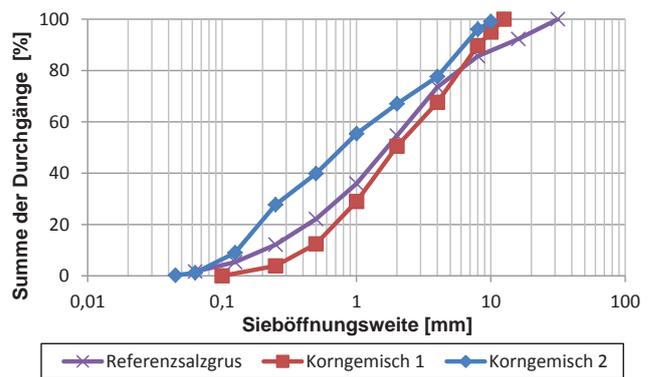
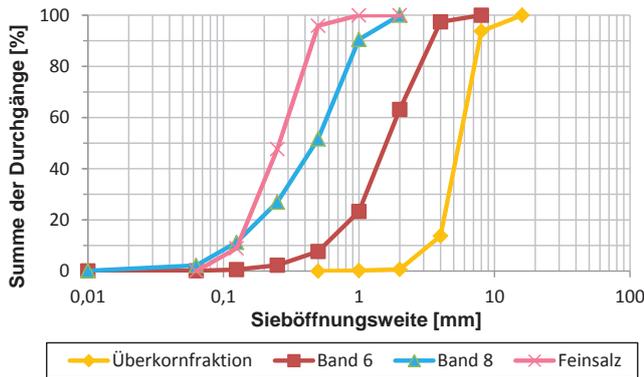
- Untersuchung verschiedener Salzgruskornmischungen
- Entscheidung für Salzgrusprodukte aus der Grube Sondershausen



Bestandteil	Anteil	Bestandteil	Anteil
NaCl	98,753	NaBr	0,017
MgCl ₂	0,012	MgSO ₄	0,045
K ₂ SO ₄	0,186	CaSO ₄	0,34
Na ₂ SO ₄	0,052	Feuchte	0,03
Unlösliches	0,168	CaCl ₂ u. KCl	< 0,01

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Erstellung optimierter Salzgruskorngemische



Komponente	Korngemisch 1	Korngemisch 2
Überkorn	29,00 %	23,20 %
Band 6	27,00 %	21,60 %
Band 8	44,00 %	35,20 %
Feinsalz	0,00 %	20,00 %
Summe	100 %	100 %

Zielstellung

Korngemisch 1 = Geringe spezifische Oberfläche

Korngemisch 2 = Höhere Anzahl an Kornkontaktflächen und geringere Porosität

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Entwicklung der Salzbinderrezeptur

Gefügestabilisierung durch Polyhalitbildung ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Untersuchung verschiedener Sulfatkomponenten und Hydratstufen am IfAC.

Ergebnis der Untersuchungen zur Polyhalitbildung:

Kaliumkomponente	Magnesiumkomponente	Calciumkomponente	Lösungskomponente
Arkanit: K_2SO_4 Fa. Reachim (99 %)	$MgSO_4 \cdot H_2O$ techn. Kieserit Fa. ESTA	$\alpha-CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$ oder $\beta-CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$ Fa. Knauf Gips KG	5 molale $MgCl_2$ -Lösung (DEUSA)

48,14 % $CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$
 28,91 % K_2SO_4
 22,95 % $MgSO_4 \cdot H_2O$

} Polyhalittrockengemisch

Salzbinder: Polyhalittrockengemisch (75 %) + flüssige Phase (25 %)

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Gesamtrezeptur des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

Abschließende Rezeptur des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes:

- 85 % Salzgrus

Korngemisch 1	Korngemisch 2
27,0 % Überkorn	21,6 % Überkorn
29,0 % Band 6	23,2 % Band 6
44,0 % Band 8	35,2 % Band 8
	20,0 % Feinsalz

- 15 % Salzbinder

11,15 % Polyhalittrockengemisch	3,85 % fünf molale MgCl ₂ -Lösung
48,15 % CaSO ₄ *0,5H ₂ O	100 % Lösungsanteil
28,91 % K ₂ SO ₄	
22,95 % MgSO ₄ *H ₂ O	

*Alle Angaben in Masse-%

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

3 Ergebnisse der labortechnischen Prüfung

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

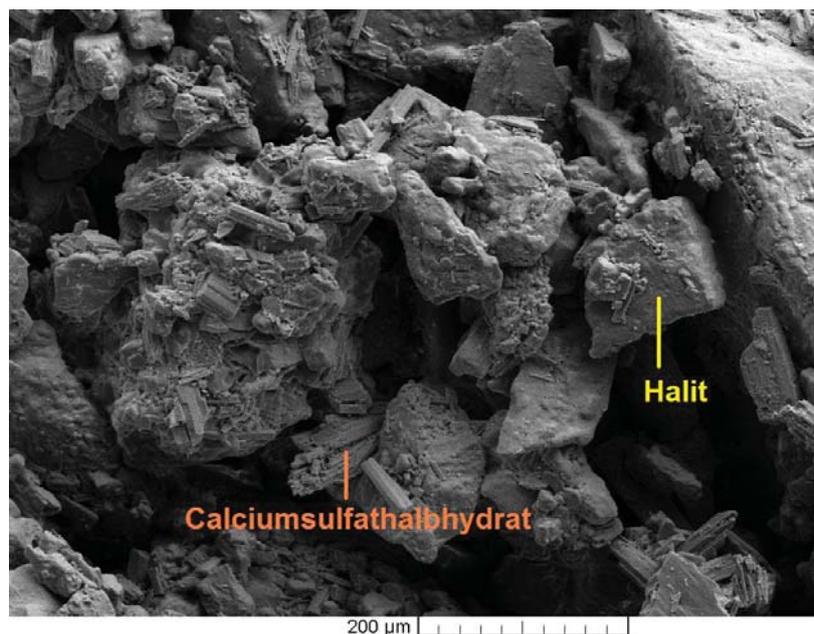
Untersuchte Materialeigenschaften zur Versatzcharakterisierung

Die vorgestellten Versuche wurden sowohl am IfBuS, IfAC der TU Bergakademie Freiberg sowie am Institut für Gebirgsmechanik GmbH in Leipzig durchgeführt

Eigenschaft	Untersuchungsverfahren
Phasenbestand	Pulver-Röntgendiffraktometrie (P-XRD)
Gefügeentwicklung	Rasterelektronenmikroskopie (REM)
Porosität	Gas-Porosimeter
Permeabilität	Triaxiale Druckzelle ($k < 10^{-14} \text{ m}^2$) oder Staudruckmessung bei durchfluss geregelter Probendurchströmung ($k > 10^{-14} \text{ m}^2$)
Scherfestigkeit	Kastenschergerät
Kompaktionsverhalten	Isostatische Kompaktionsversuche mit Aufbau zur Porositätsbestimmung und Durchströmungsaufbau für Gaspermeabilitäten
Langzeitkriechverhalten	Triaxiale Belastungsversuche

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

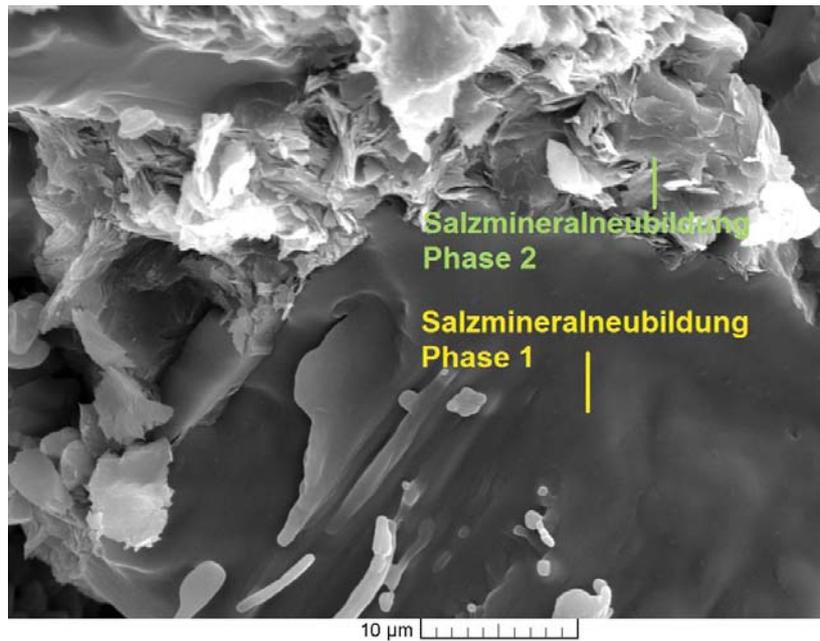
Gefügeanalyse zum Zeitpunkt $t = 3 \text{ d}$



- Salzbinderkomponenten auf den Salzgrusoberflächen verteilt
- Keine Lösungs- bzw. Salzneubildungsprozesse erkennbar

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

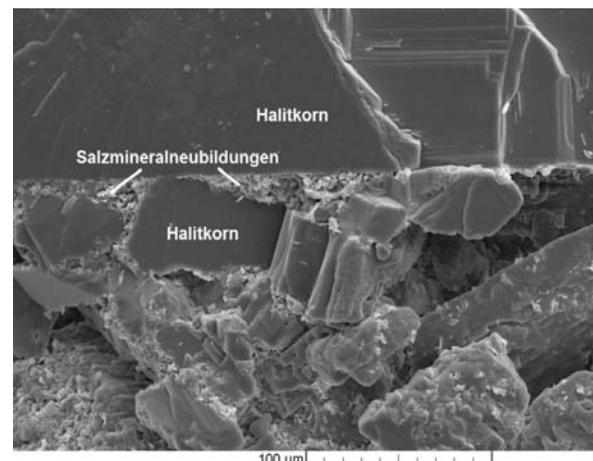
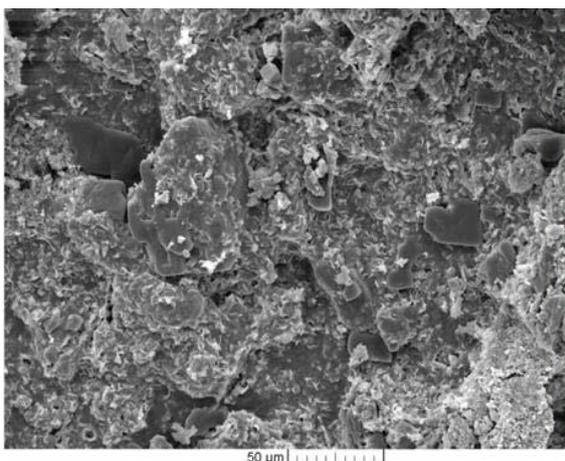
Gefügeanalyse zum Zeitpunkt $t = 81$ d



- Salzmineralneubildungen an den Steinsalzoberflächen nachweisbar
- Neugebildete Salzminerale grenzen aneinander

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

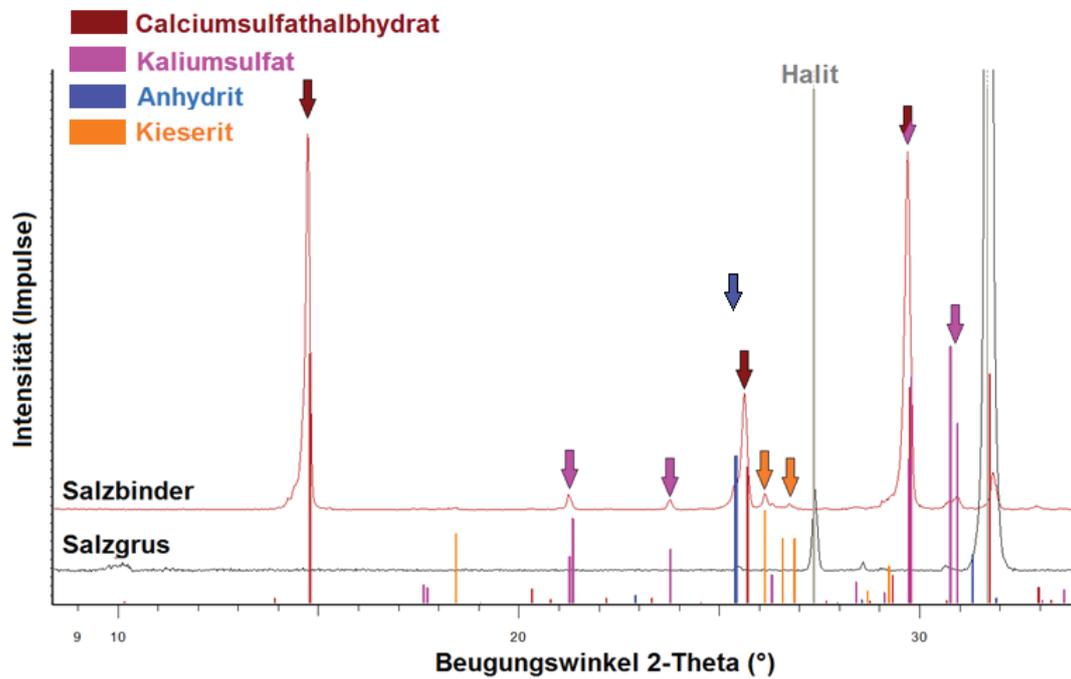
Gefügeanalyse zum Zeitpunkt $t = 29$ Monate



- Ausbildung neuer Salzmineralphasen an den Steinsalzoberflächen im gesamten Korngerüst
- Keine vollständige Porenraumfüllung durch die Salzmineralneubildungen
- Nachweis von Salzmineralbrücken an den Kornkontaktstellen der Steinsalzgruskörnung

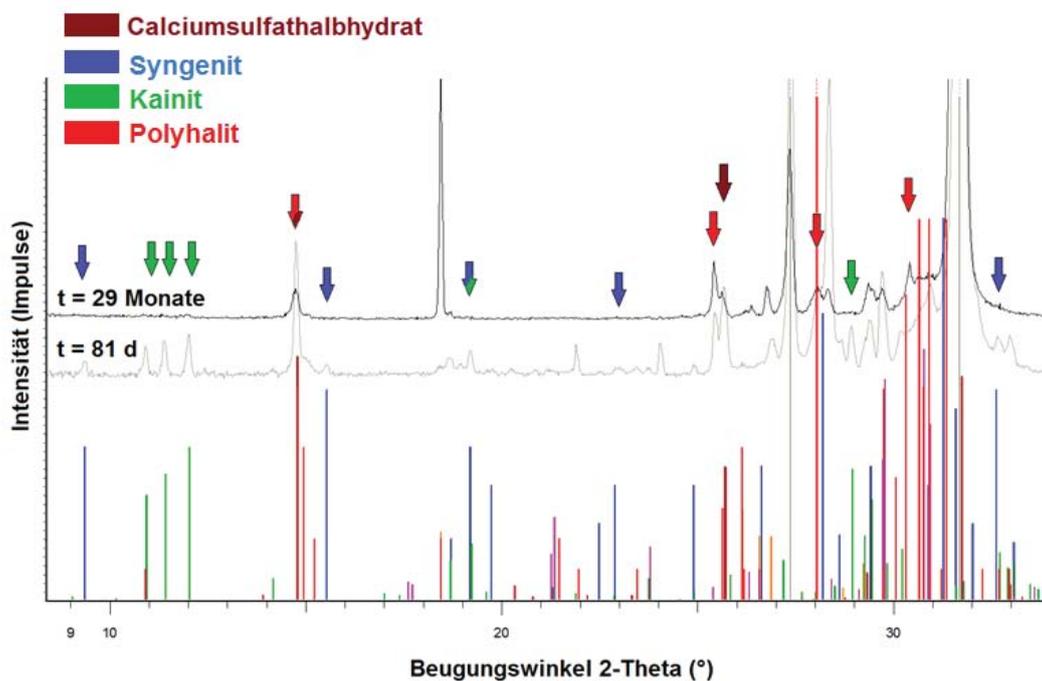
Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Phasenbestand zum Zeitpunkt t = 0 d



Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

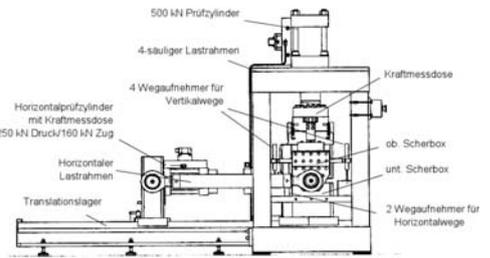
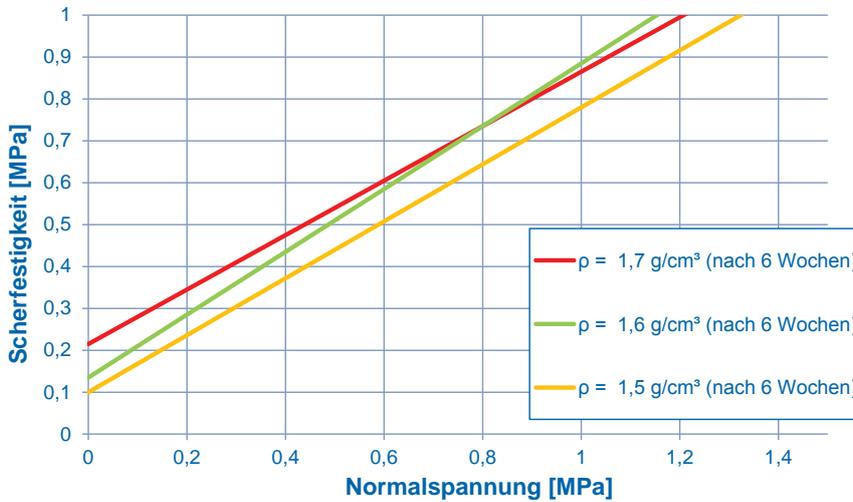
Phasenbestand zum Zeitpunkt t = 81 d und t = 29 Monate



Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Scherfestigkeitsuntersuchungen

Einflussfaktor: Einbaudichte



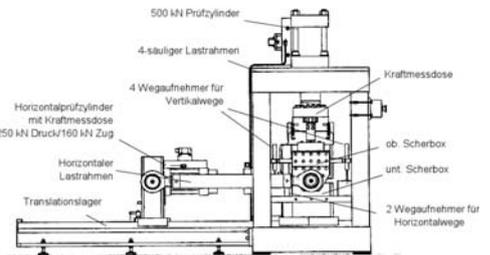
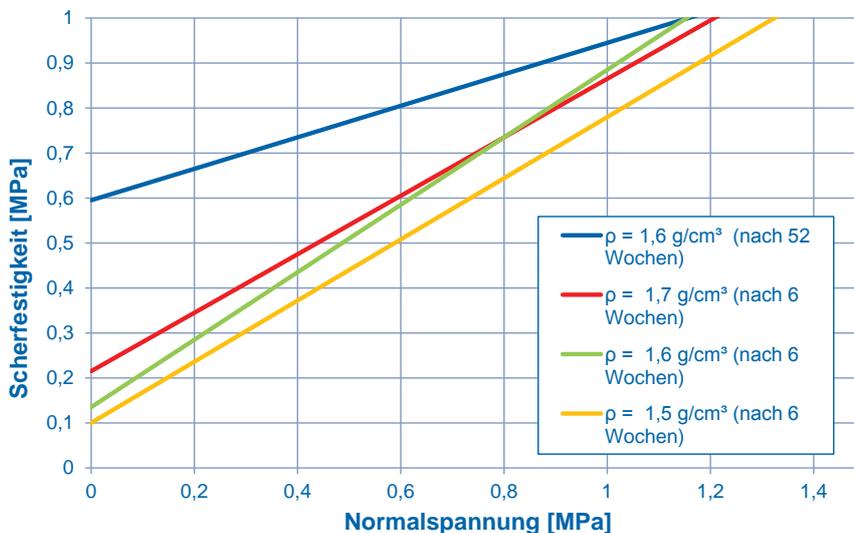
- Scherfestigkeit abhängig von Einbaudichte
- Zunahme der Einbaudichte bewirkt eine Zunahme der Scherfestigkeit
- Parallelität der Schergeraden durch statistische Einflüsse verschoben

Quelle: Popp, T., und C. Rölke. *Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV)*. Vorläufiges labortechnisches Gutachten des in GESAV Phase I entwickelten Versatzmaterials, Leipzig: Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 2015 - bearbeitet

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Scherfestigkeitsuntersuchungen

Einflussfaktoren: Probenalter

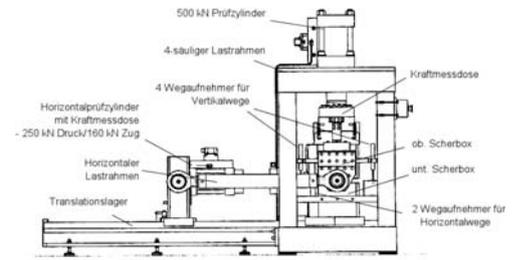


- Zunahme der Probenfestigkeit mit steigendem Probenalter
- Probenfestigkeit nimmt mit zunehmender Salzmineralneubildung sowie Umbildungsprozessen zu

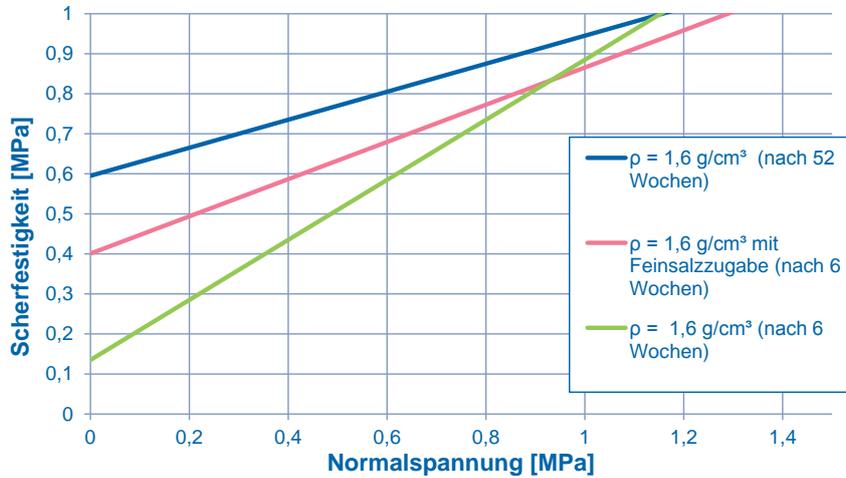
Quelle: Popp, T., und C. Rölke. *Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV)*. Vorläufiges labortechnisches Gutachten des in GESAV Phase I entwickelten Versatzmaterials, Leipzig: Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 2015 - bearbeitet

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Scherfestigkeitsuntersuchungen



Einflussfaktoren: spez. Oberfläche (Korngemisch 1 und Korngemisch 2)

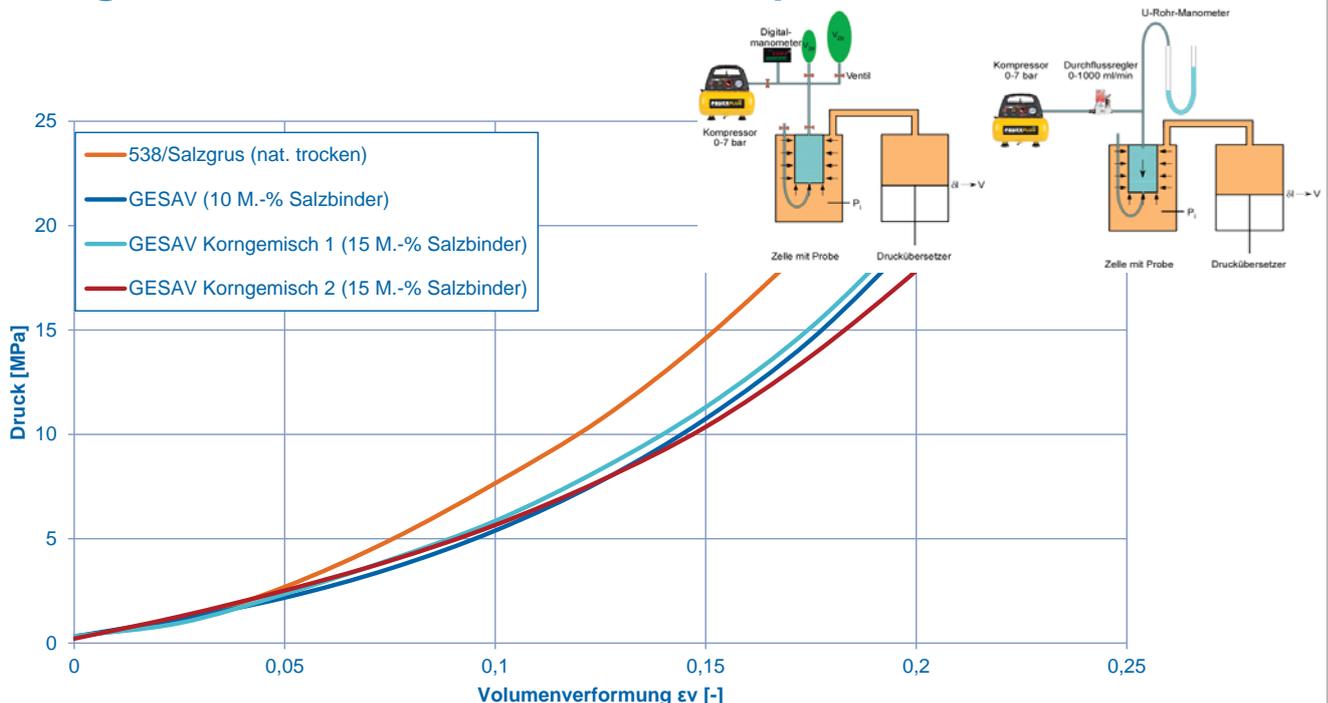


- Erhöhung der spez. Oberfläche bewirkt eine Erhöhung der Festigkeit
- Festigkeit abhängig von der Anzahl an Kornkontaktstellen

Quelle: Popp, T., und C. Rölke. *Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV)*. Vorläufiges labortechnisches Gutachten des in GESAV Phase I entwickelten Versatzmaterials, Leipzig: Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 2015 - bearbeitet

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Ergebnisse des isostatischen Kompaktionsversuchs

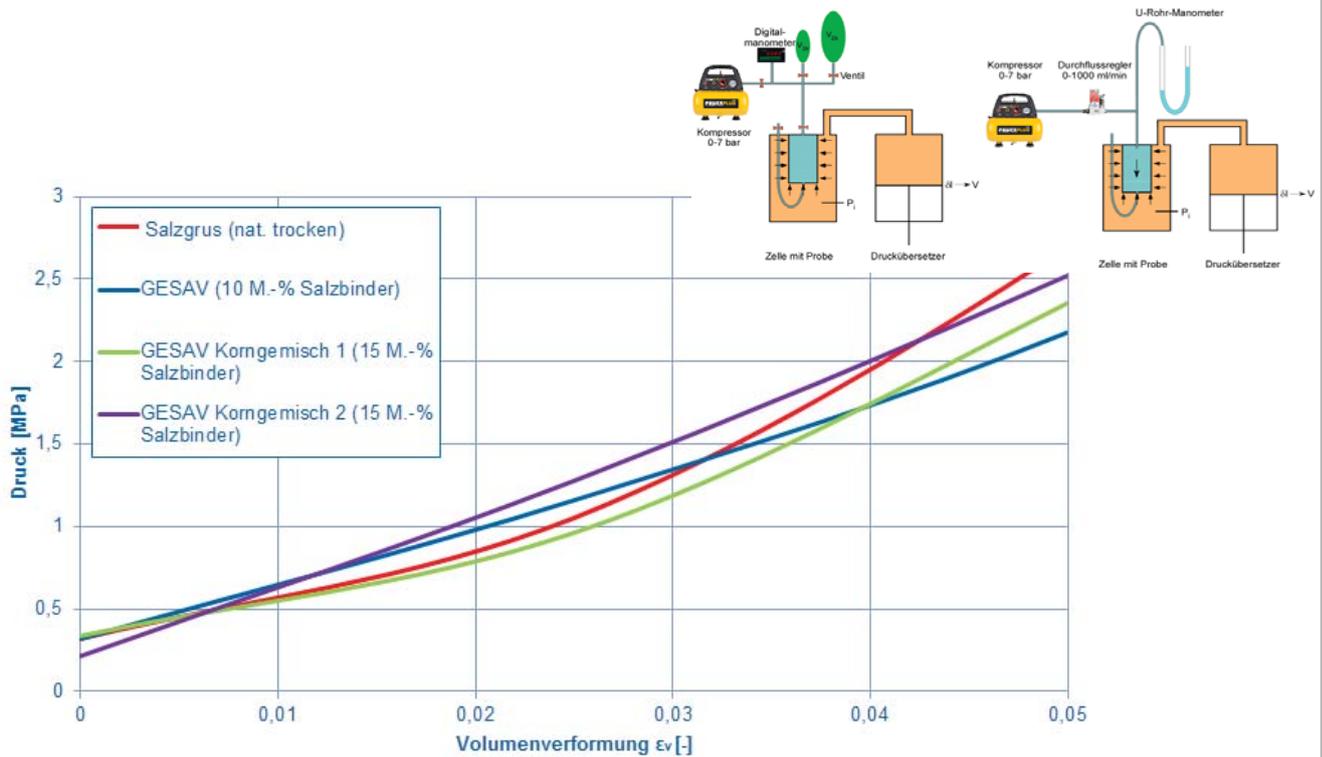


Quelle: Popp, T., und C. Rölke. *Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV)*. Vorläufiges labortechnisches Gutachten des in GESAV Phase I entwickelten Versatzmaterials, Leipzig: Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 2015 - bearbeitet

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Ergebnisse des isostatischen Kompaktionsversuchs

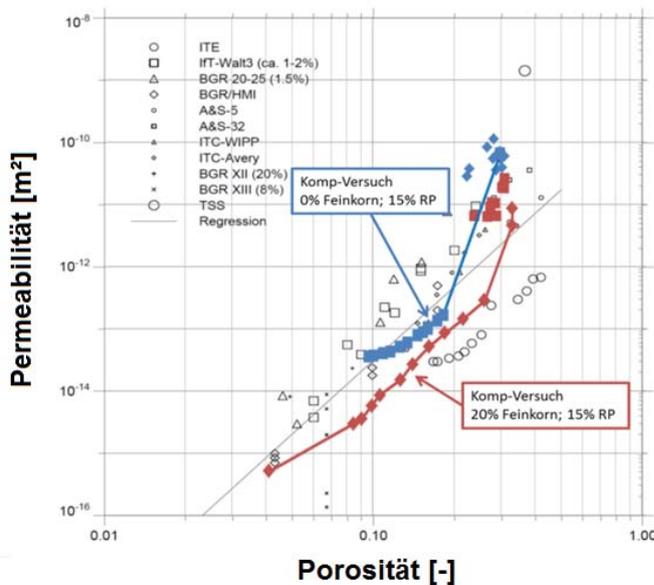
Quelle: Popp, T., und C. Rölke. Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV). Vorläufiges labortechnisches Gutachten des in GESAV Phase I entwickelten Versatzmaterials, Leipzig: Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 2015 - bearbeitet



Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Porositäts-Permeabilitätsbeziehung während der Kompaktion

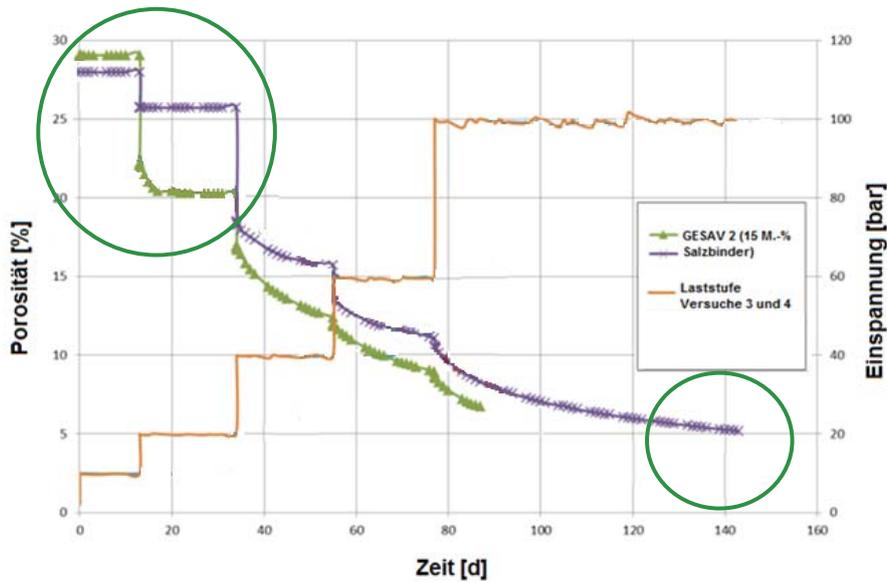
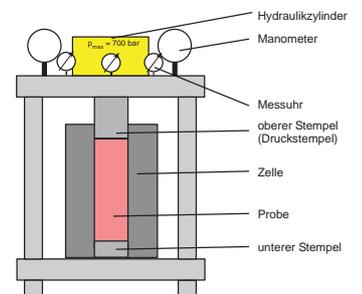
Quelle: Popp, T., und C. Rölke. Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV). Vorläufiges labortechnisches Gutachten des in GESAV Phase I entwickelten Versatzmaterials, Leipzig: Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 2015 - bearbeitet



- Porosität und Permeabilität im oberen Bereich der bekannten Salzgrusmaterialien im Einbauzustand
- Überdurchschnittlich hohe Permeabilitätsabnahme bei einer Kompaktion
- Proben mit dem Korngemisch 2 zeigten ein positives Materialverhalten
- Positive hydraulische Dichtwirkung des Versatzmaterials kann prognostiziert werden

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Ergebnisse des Langzeitkriechversuchs



- Proben mit 15 Masse-% Salzbinde zeigen ein optimiertes Kriechverhalten
- Zu Beginn Ausbildung von statischen Plateaus bis zum Überschreiten von 1 MPa bzw. 2 MPa
- Stetige Porositätsabnahme bis in geringe Porositätsbereiche

Quelle: Popp, T., und C. Rölke. *Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV)*. Vorläufiges labortechnisches Gutachten des in GESAV Phase I entwickelten Versatzmaterials, Leipzig: Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig, 2015 - bearbeitet

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

4 Charakterisierung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

4 Charakterisierung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

	Herkömmlicher Salzgrus	Gefügestab. Salzgrus	Salinare Baustoffe
Lösungsgehalt	Green	Yellow	Grey
Versatzfortschritt / Einbauaufwand	Green	Green	Grey
Porosität im Einbauzustand	Grey	Grey	Green
Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung	Yellow	Green	Green
Frühzeitige Gebirgsstabilisierung	Grey	Yellow	Green
Kompaktions- und Kriechverhalten	Grey	Green	Green
Kosten pro m ³	Green	Yellow	Grey
	Günstige endlagerrelevante Materialeigenschaft		
	Mittlere endlagerrelevante Materialeigenschaft		
	Ungünstige endlagerrelevante Materialeigenschaft		



Einfluss der Versatztechnologie ist zu beachten!

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

5 Ausblick

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

In-situ-Phase (GESAV – Phase 2)

In-situ-Phase zur Untersuchung des Einbauverhaltens und Identifizierung geeigneter Einbautechnologien und Einflussfaktoren:

- Untersuchung von herkömmlichen und innovativen Einbautechnologien (Blas-, Schleuder-, Schleuderstrahltechnologie und neuartiges Verfahren)
- Durchführung in-situ in der Grube Sondershausen
- Erstellung und messtechnische Überwachung von Versatzkörpern über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten
- Labortechnische Prüfung in-situ entnommener Probenkörper sowie Vergleich mit den Ergebnissen der Laborphase (GESAV Phase 1)

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker



Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 | Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

6 Zusammenfassung

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

6 Zusammenfassung

- Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz (GESAV) – Phase 1“ konnte ein neuartiges Versatzmaterial entwickelt werden, das auf der Stabilisierung eines Salzgruskorngemisches durch die Ausbildung von Polyhalit basiert.
- Als Ausgangskomponenten wurden eine optimierte Salzgruskörnung sowie ein Salz binder entwickelt und labortechnisch geprüft.
- Die Salz binderkomponenten führen über die Zwischenphasen Syngenit und Kainit zur Polyhalitbildung auf den Steinsalzoberflächen.
- Die Festigkeit im Sinne einer Kohäsion nimmt mit fortschreitender Salzmineralneubildung zu und wird durch die Faktoren Einbaudichte und spezifische Oberfläche beeinflusst.
- Die Permeabilität direkt nach dem Einbau unter Tage ist mit herkömmlichen Salzgruskorngemischen vergleichbar.
- Die Permeabilitätsabnahme mit fortschreitender Kompaktion ist signifikant höher als bei herkömmlichen Salzgruskorngemischen.

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

6 Zusammenfassung

- Das Kriechverhalten des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials ist hinsichtlich einer frühen Gebirgsstabilisation optimiert.
- Die Eigenschaften des Versatzmaterials sind unmittelbar von der Versatztechnologie abhängig und werden in einer anschließenden In-situ-Phase untersucht.
- Die Langzeitbeständigkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes ist durch die Ausbildung des Salzminerals Polyhalit gewährleistet, da dieser eine thermodynamisch stabile Mineralphase in maritimen Evaporitlagerstätten darstellt.

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Forschungsvorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02 E 11092 gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM

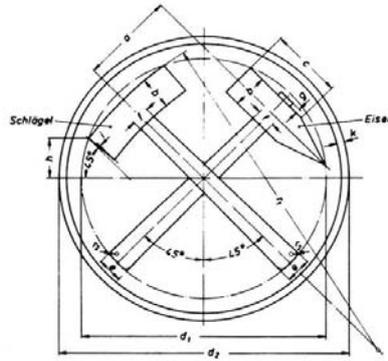


PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

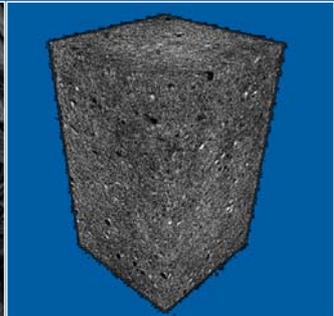
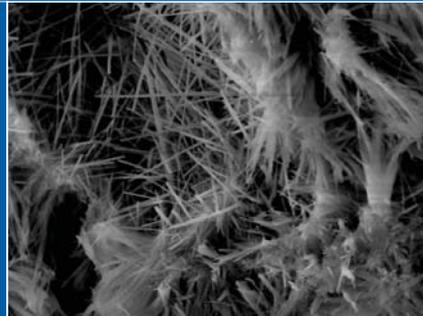
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Glück Auf!

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Ergebnisse der Projektphase 1 und Ausblick | Fachgespräch Verschlussysteme | Freiberg 03.05.2017 |
Vortragende: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Dipl.-Ing. Sebastian Becker

Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff



Dr. Daniela Freyer - Institut für Anorganische Chemie, Salz- & Mineralchemie

Fachgespräch Verschlussysteme – Freiberg 03/04.05.2017

COMPTES RENDUS
HERDOMADAIRES
1867 DES SÉANCES
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

CHIMIE APPLIQUÉE. — Sur un nouveau ciment magnésien. Note de M. SOREL, présentée par M. Dumas.
[Renvoi à la Section de Chimie.]
« J'ai l'honneur de soumettre au jugement de l'Académie un nouveau ciment qui est fondé sur le principe du ciment à l'oxychlorure de zinc que je lui ai présenté en 1855. C'est un oxychlorure de magnésium basique et hydraté.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DES COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES,
SUCCESSION DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55
1867

Die künstlichen
Fußböden-, Wändebelege
und Deckenverkleidungen

Von
Robert Scherer

Der Steinholz- oder Xylolithbelag.

Mit dem Namen Steinholz oder Xylolith bezeichnet man eine plastische Masse, die nach ihrer Erhärtung eine feine, eigentümliche Beschaffenheit zeigt und gleichzeitig auch Eigenschaften des Holzes besitzt und sich wie dieses bearbeiten lässt. Die Masse kann sowohl in Form eines Estrichs aufgetragen als auch in Platten gepreßt werden und liefert in beiden Fällen einen vorzüglichen Fußbodenbelag. Der Steinholzestrich wird ferner als Steinbelag.

Wien und Leipzig.
H. Hartleben's Verlag.
1922.

Anwendungen

seit der Entdeckung 1867, als

- Fußbodenmaterial
„Steinholzfußböden“

- Schleifsteine

- Innenputz

...



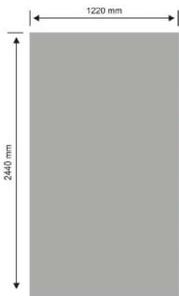
„Gartenstatue ... aus hochwertigem Magnesia-Zement-Gemisch ... wundervolle Dekoartikel ... für den Innen- und Aussenbereich geeignet, da wetter- und frostfest“ (www.amazon.de)



PB – M

Verbundplatte

Windsperr



Material

Es handelt sich um Verbundmaterial aus MgO, Perlit, Holzspitlern, MgCl₂ sowie zweifachem Glasfasernetz, natürlich vollkommen asbestfrei. Das Paneel wird in natürlichem Weiß geliefert und hat eine harte und haltbare Oberfläche.

Feuchtigkeitsbeständig

PB-M kann Feuchtigkeit uneingeschränkt aufnehmen und wieder abgeben, ohne Einfluss auf die Stärke des Materials.

Das Paneel ist dampfdurchlässig. Isolierung kann direkt auf der Rückseite angebracht werden.

Schimmel- und pilzresistent

PB-M verrottet nicht und verschlechtert sich nicht in feuchter Umgebung.

Der pH – Wert macht PB-M besonders beständig gegen Pilz und Schimmel. .

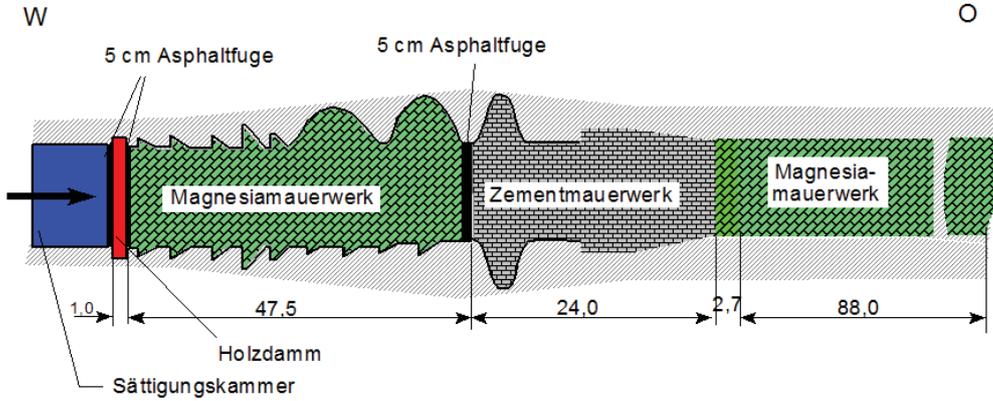
Anwendungen

Windsperr, Putzträger, Innen- und Außenwände, Feuchträume etc.

Technische Daten Windsperr PB-M – Verbundplatte

Abmessungen		
Länge Standard /max	mm	2400/2440/3000
Breite Standard/max	mm	1200/1220
Stärke Standard	mm	8
Weitere Stärken	mm	4 – 25
Farbe Standard		Weiß
Toleranz Stärke	mm	+/- 0,6
Toleranz Länge	mm	+/- 5
Toleranz Breite	mm	+/- 3
Glasfasernetz Standard/max		2 Lagen/5 Lagen
Dichte, trocken	kg/cbm	953 – 966
Gewicht	8 mm/kg/qm	7,6
Feuereigenschaft		
Feuerklassifizierung	EN 13501	A2-s1,d0
Feuerklasse Fassade PB-M 8 mm	EN 13501-2	K 10 A2 – s1,d0
Wasserdampfdurchlässigkeit	(23 Grad +/- 5% RH)	
Z Wert PB-M 8 mm	EN 12572	0,351
Z Wert PB-M 15 mm	EN 12572	0,884
Hygroskopische Eigenschaften, pH		
Wasseraufnahmefähigkeit	%	< 16
Ausdehnung von trocken zu nass	%	< 0,15
Feuchtigkeit bei Lieferung	%	< 7
pH Wert	pH	10
Thermische Eigenschaften		
Thermische Leitfähigkeit	W/mC°	0,3001
R Wert	qmK/W	0,104
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	mm/m C°	0,006
Biegestärke 15 mm		
Biegestärke längs Faser - trocken	EN 520 /MPa	12,2
Biegestärke quer Faser - trocken	EN 520/MPa	11,3
Zugfestigkeit 15 mm		
Duo Fast 2,5 x 50 mm	EN 14566	1241 N/Schraube
Widerstandsfestigkeit 15 mm		
Duo Fast 2,5 x 50 mm	EN 520	1320 N/Schraube
Wand – eine Seite PB-M 15 mm	50 mm Abstand Schrauben/kN/M	10,6
Geräuschdämmung		
>43dB bei Gebrauch von 12 mm PB-M + 50 mm Rockwool + 12 mm PB-M		
Bestellreferenz (Mindestbestellmenge 1 Palette = 85 St. = 244,8 qm)		
PB-M12002400	8 x 1200 x 2400 mm	

Streckenverschluss im Steinsalzquerschlag Leopoldshall (1898)



Ehemaliges Kaliwerk Leopoldshall

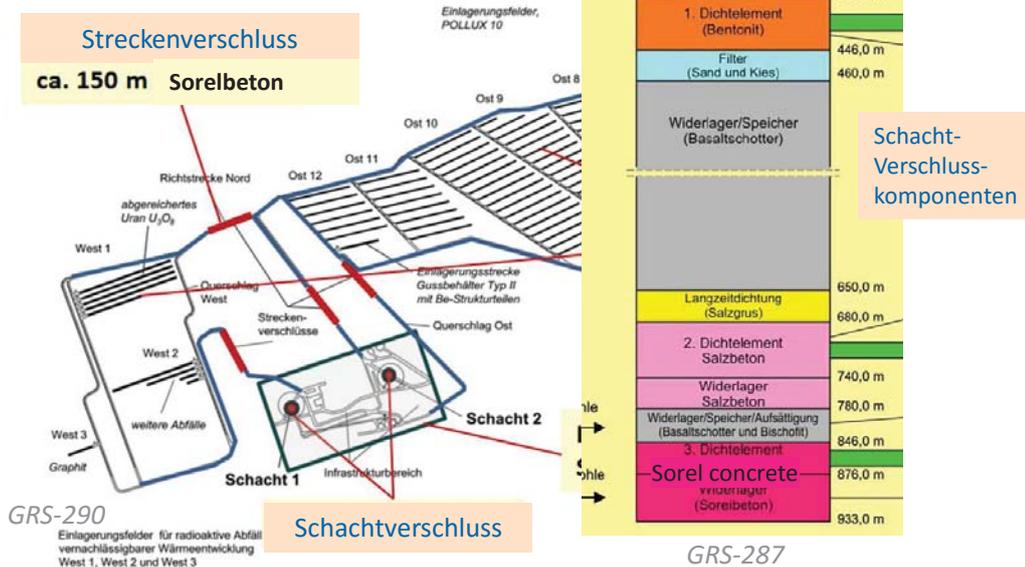
Der erste Damm im Kalibergbau wurde um die Jahrhundertwende im ehemaligen Kaliwerk Leopoldshall in 300 m Tiefe in einer Steinsalzstrecke gegenüber 3.3 MPa Laugendruck errichtet. Der 161.5 m lange, sorgfältig mit dem Gebirge verzahnte Damm ist in Zement- und Magnesiamauerwerk ausgeführt.

Quelle: Wasserdichte Verdämmung im Steinsalzgebirge. Glückauf 38 (1902) 14, S. 307 – 309.



MgO-Damm
im Carnallit, Bischoferode,
Lösungszutrittsseite

Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)



UB 6 (Lu2)
ca. MgO₂-Lsg.
22.3.04

Foto: U. Priestel / M. Gruner (IfBuS) 2004

...zwei Bilder von den von uns in Magnesium-Calciumchloridlösung gelagerten MgO-Proben. Diese Proben haben Sie etwa vor einem Jahr schon sehen können, seit dem sind starke Zerfallserscheinungen an den Proben aufgetreten. Wir würden gern mit Ihnen diese Erscheinungen diskutieren, da dies sehr wichtig für die Bewertung der Langzeitstabilität des Baustoffes ist. Vielleicht können Sie die Proben bei uns ebenfalls begutachten, um geeignete Untersuchungen für diese Problematik zu finden...

MgO-Zementprobekörper ...



Lagerdauer in Lsg. 14 Tage

↑ Porosität

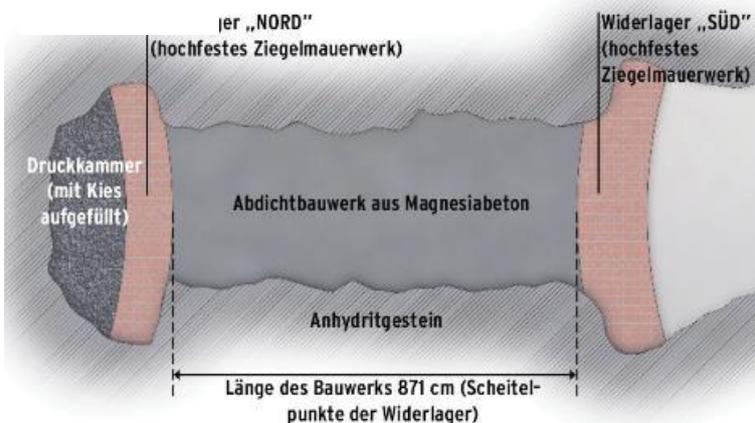


Lagerdauer in Lsg. 31 Tage



2010

Schematische Darstellung des Technikumversuchs im Anhydrit

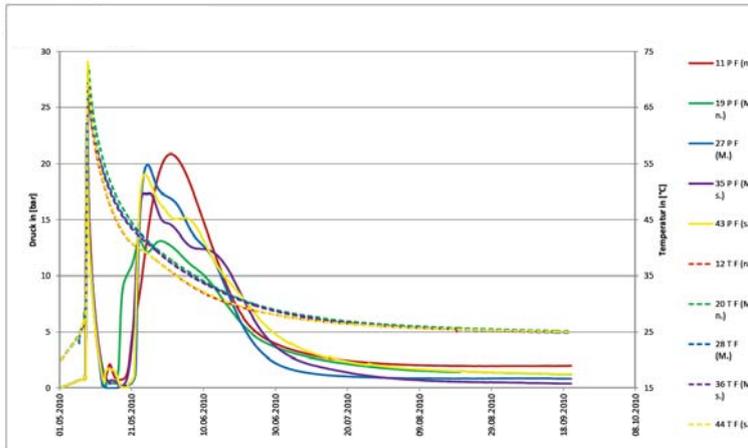


Schematische Darstellung des Technikumversuchs im Anhydrit

Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz

... im Salzbergwerk Bleicherode, einem mit dem Endlager Morsleben vergleichbaren Standort, hat das BfS deshalb ein Abdichtbauwerk im Anhydrit im Zeitraum vom 05.05. bis 07.05.2010 errichtet. Ein **Ziel des in-situ-Versuchs** bestand darin, dass der für das Abdichtbauwerk verwendete **Baustoff (Magnesiabeton) beim Aushärten quillt und sich dadurch im Gebirge verspannt** (Aufbau eines Quelldrucks). Anders als bei den zuvor erfolgten erfolgreichen Laborversuchen konnte dieses Ziel bei dem im Bergwerk Bleicherode durchgeführten in-situ-Versuch nicht erreicht werden.

2010



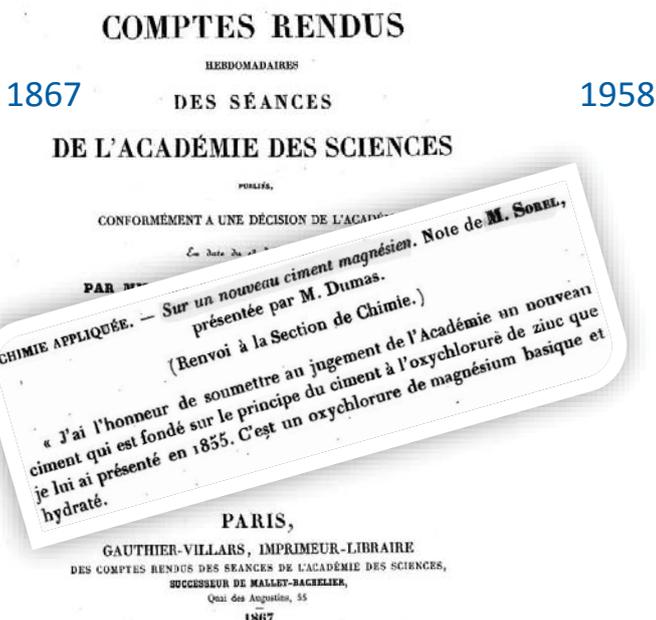
Anlage 4.2 Darstellung der Quelldruck- und Temperaturwerte Firste

... im Salzbergwerk Bleicherode, einem mit dem Endlager Morsleben vergleichbaren Standort, hat das Bfs deshalb ein Abdichtbauwerk im Anhydrit im Zeitraum vom 05.05. bis 07.05.2010 errichtet. Ein **Ziel des in-situ-Versuchs** bestand darin, dass der für das Abdichtbauwerk verwendete **Baustoff (Magnesiabeton) beim Aushärten quillt und sich dadurch im Gebirge verspannt** (Aufbau eines Quelldrucks). **Anders als bei den zuvor erfolgten erfolgreichen Laborversuchen konnte dieses Ziel bei dem im Bergwerk Bleicherode durchgeführten in-situ-Versuch nicht erreicht werden.**

Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz

TU Bergakademie Freiberg | Institut für Anorganische Chemie | Dr. Daniela Freyer | FG Verschlussysteme | Freiberg, 03.05.2017

Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff



TONINDUSTRIE-ZEITUNG UND KERAMISCHE RUNDschau
ZEITUNG FÜR DAS GESAMTGEBIET DER STEIN- UND TONINDUSTRIE

1958, 82, S. 290-291

Ein Beitrag zur Kenntnis der Bildung von Magnesiumhydroxychloriden und ihres thermischen Verhaltens

Von

Bruno Kaßner, Berlin

Seitdem Sorel (1) über die Reaktion von Magnesiumoxyd mit wässrigen Magnesiumchloridlösungen berichtet hat, ist eine Vielzahl von Veröffentlichungen und Patenten auf diesem Gebiet erschienen. Bei dem großen Umfang, der einige hundert diesbezügliche Arbeiten umfaßt, würde es zu weit führen, jede einzelne kritisch zu beurteilen. Wie kaum auf einem anderen Gebiet der anorganischen Chemie sind hier zudem oft die verschiedenartigsten Ergebnisse publiziert worden — häufig nicht reproduzierbar —, mit ungenauen oder lückenhaften Angaben. Bedeutende Forscher haben abweichende Werte erhalten und sich sogar selbst revidiert. Unter diesen Umständen und Voraussetzungen ist es außerordentlich schwer, die sicheren Grundlagen zu sondieren.

TU Bergakademie Freiberg | Institut für Anorganische Chemie | Dr. Daniela Freyer | FG Verschlussysteme | Freiberg, 03.05.2017



Systematische Grundlagenuntersuchungen zu existierenden Phasen und deren Bildungsbedingungen (Bindemittelphasen)

- ▶ Bestimmung der temperaturabhängigen Lösegleichgewichte der basischen Magnesium-Chlorid-Hydrate (x-y-z Phasen)
- ▶ Charakterisierung aller existierender Festphasen (Struktur, thermisches Verhalten, ...)

Mg(OH)₂ **3-1-8 Phase** **5-1-8 Phase**

9-1-4 Phase **2-1-4 Phase** **2-1-2 Phase**

Journal of chemical & engineering data

Article
pubs.acs.org/jced

Solubility Equilibria in the System Mg(OH)₂-MgCl₂-H₂O from 298 to 393 K

Melanie Pannach, Sebastian Bette, and Daniela Freyer[✉]

Institut für Anorganische Chemie, TU Bergakademie Freiberg

ABSTRACT: The solubility equilibria MgCl₂-H₂O were determined at temperature periods of up to 3.5 years stable magnesium chloride hydroxide ternary system within the investigated phase [3Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O], the 4H₂O, the 2-1-4 phase [2Mg(OH)₂·MgCl₂·4H₂O], and the 2-1-2 phase [2Mg(OH)₂·MgCl₂·2H₂O]. The also known 3-1-8 phase is metastable in the investigated system. The solubility data set is not only important for the magnesium building material industry but also for the demand of magnesium in salt solutions.

ARTICLE
DOI: 10.1021/acs.jced.6b00928

9Mg(OH)₂·MgCl₂·4H₂O, a High Temperature Phase of the Magnesia Binder System
Robert E. Dinnebier,¹ Daniela Freyer,² Sebastian Bette,¹ and Melanie Oestreich¹

¹Max-Planck-Institut für Fest-Struktur-Forschung, D-70569 Stuttgart, Germany, and ²TU Bergakademie Freiberg, Institute of Inorganic Chemistry, Leipziger Straße 29, D-95961 Freiberg, Germany

Received March 11, 2017

The metastable phase 9Mg(OH)₂·MgCl₂·4H₂O (9-1-4 phase) was found at the extended metastable solubility of Mg(OH)₂ in the system MgO-MgCl₂-H₂O at 120 °C and occurs as intermediate binder phase during curing of magnesium chloride to form a binder. The crystal structure of the 9-1-4 phase was determined from high-resolution laboratory X-ray powder diffraction data in space group *R*₃h (No. 148) with *a* = 1301(1) Å, *b* = 628.17(1) Å, *c* = 97.753(1) Å, *V* = 99.89(2) Å³, and *Z* = 1. The structure and phase relationships of the phase in the system MgO-MgCl₂-H₂O can be related, with a view to the development of the cement or concrete binder, to the 3-1-8 phase.

© 2017 American Chemical Society 1384

DOI: 10.1021/acs.jced.6b00928
J. Chem. Eng. Data 2017, 62, 1384–1396



Systematische Grundlagenuntersuchungen zu existierenden Phasen und deren Bildungsbedingungen (Bindemittelphasen)

- ▶ Bestimmung der temperaturabhängigen Lösegleichgewichte der basischen Magnesium-Chlorid-Hydrate (x-y-z Phasen)
- ▶ Charakterisierung aller existierender Festphasen (Struktur, thermisches Verhalten, ...)
- ▶ ▶ Abbindecharakteristik verschiedener Magnesia-Baustoff-Rezepturen bezüglich Phasenbestandsentwicklung unter dem Gesichtspunkt der Temperaturentwicklung und Korrelation zur Entwicklung mechanischer Parameter

Magnesiabaustoff mit verschiedenen Rezepturen ...



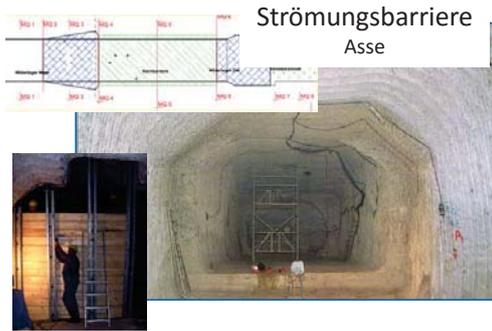
Bindemittelphase(n):
 basische Mg-Chlorid-Hydrate
 $x Mg(OH)_2 \cdot y MgCl_2 \cdot z H_2O$: x-y-z Phase

Zuschläge



... Rezepturen wurden entwickelt und getestet
 ... Labor → in-situ → Demonstrationsbauwerke

- ▶ technologische Aspekte der Materialverarbeitung
- ▶ Temperatur- und Vol./Druckentwicklung
- ▶ mechanische Parameter



/Heydorn (2015): Heydorn M. „Schachtanlage Asse II - Anwendungsversuch Pilotströmungsbarriere PSB A1.“ Fachgespräch Verschlussysteme aus Magnesiabaustoff, Freiberg 28.-29. April 2015/

TU Bergakademie

. Daniela

Schachtverschluss (Projekt ELSA)
 in-situ, Sondershausen

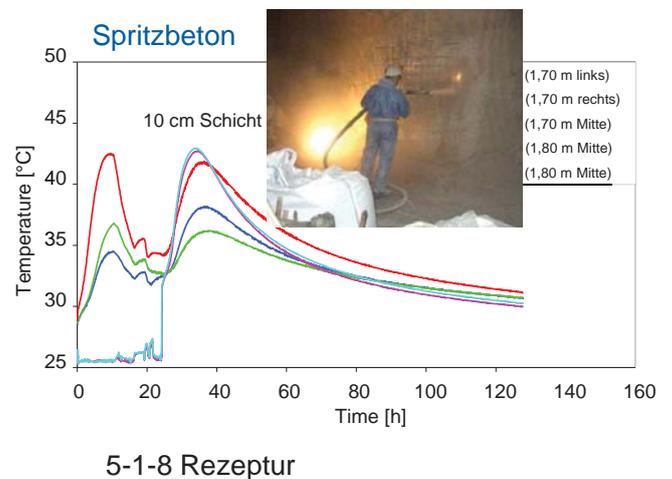
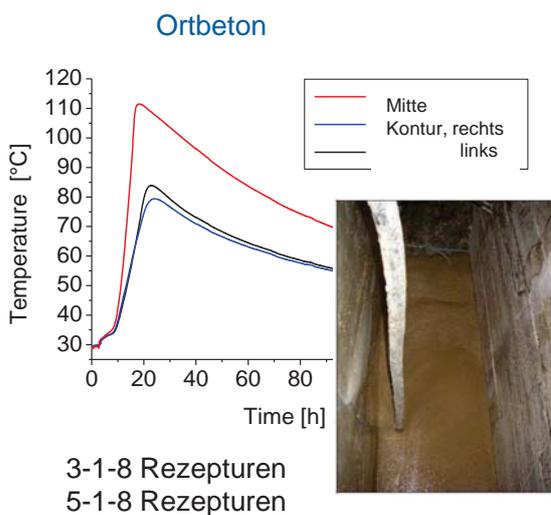


Streckenverschluss
 (Projekt CARLA)

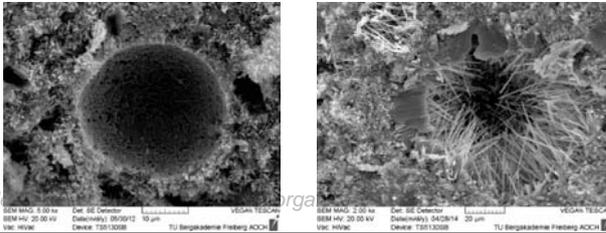
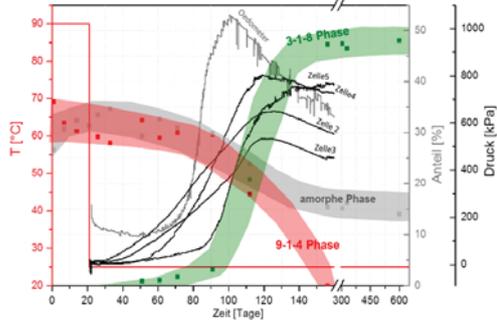
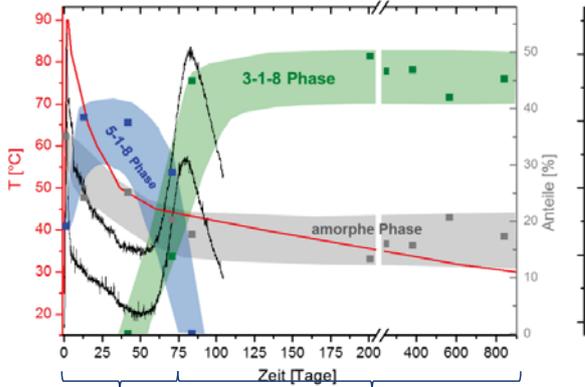


3.05.2017

Verarbeitung - Temperaturentwicklung



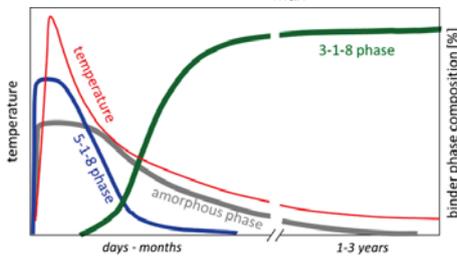
„3-1-8 Rezeptur“ (Ortbetonverarbeitung) Bindemittelphasenbildung beim Abbinden



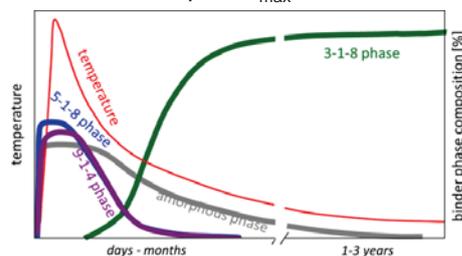
- 2-Phasen-Abbindereaktion mit zwischenzeitlicher Druckentwicklung (Krist.-dr.) im eingespannten Zustand
- Art und Weise der Gefügebildung bedingt die resultierenden geomechanischen Eigenschaften

Temperaturabhängige Bindemittelphasenentwicklung

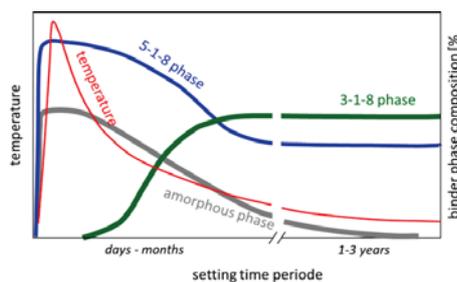
3-1-8 Rezeptur, $T_{max} < 90^{\circ}C$



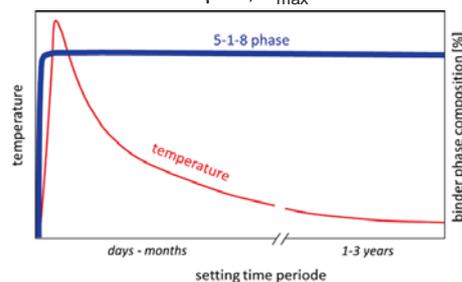
3-1-8 Rezeptur, $T_{max} > 90^{\circ}C$



3-1-8/5-1-8 Rezeptur, $T_{max} < 90^{\circ}C$

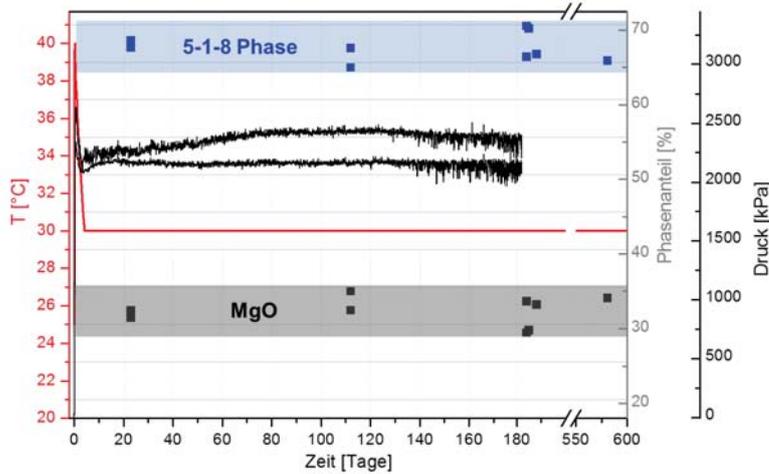


5-1-8 Rezeptur, $T_{max} < 90^{\circ}C$



„5-1-8 Rezeptur“ Bindemittelphasenbildung beim Abbinden

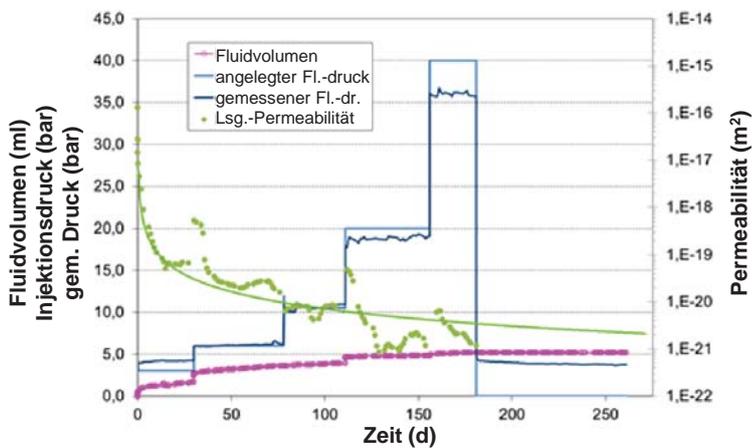
Temperaturprofil Spritzbetonverarbeitung



- „schnelle“ Abbindereaktion
- einphasig, direkte Bildung der 5-1-8 Phase
- keine Vol-/Druckänderungen

TU Bergakademie Freiberg | Institut für Anorganische Chemie | Dr. Daniela Freyer | FG Verschlussysteme | Freiberg, 03.05.2017

„5-1-8 Rezeptur“ Verhalten gegenüber Fluiddruck (integrale Lösungspermeabilität)



Versuchsanordnung für sekundären Lösungszutritt

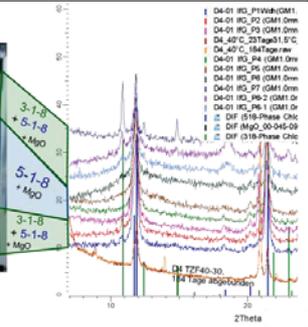
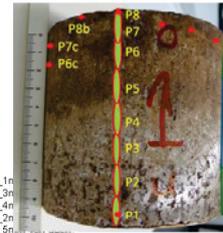
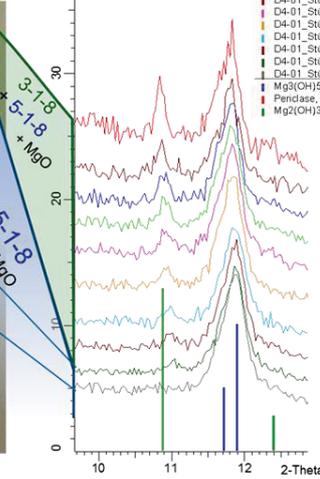
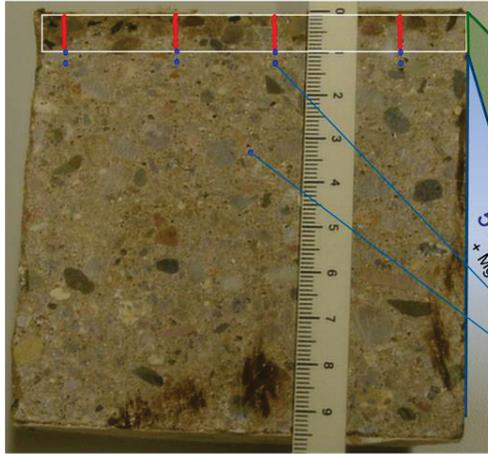


Probezelle
mit DMS
Ø = 100 mm
Proben-h = 100 mm

TU Bergakademie Freiberg | Institut für Anorganische Chemie | Dr. Daniela Freyer | FG Verschlussysteme | Freiberg, 03.05.2017

5-1-8 Beton-Rezeptur

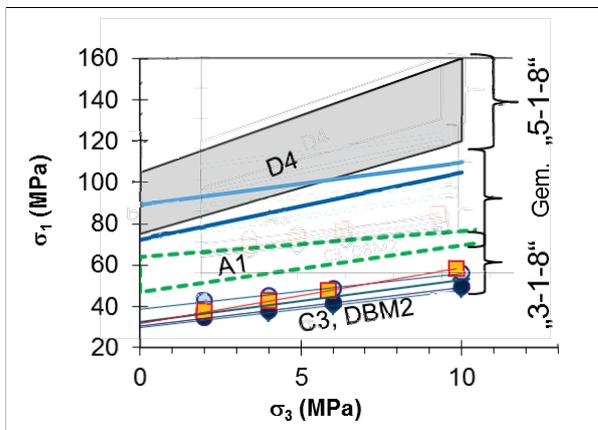
ortsaufgelöste Phasenanalyse



Mechanische Parameter



Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Untersuchung · Prüfung · Beratung · Begutachtung



MOHR-COULOMB-Diagramm
(Daten aus Mehrstufen-Druckversuchen)

Axiale Spannung (σ_1) vs. Hauptspannung (Manteldruck) (σ_3)

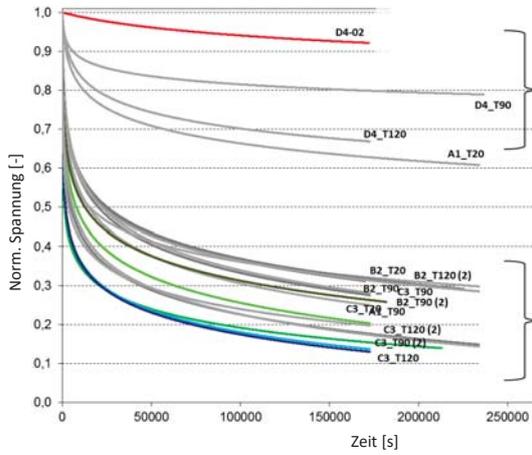
→ einaxiale Druckfestigkeit ($\sigma_3 = 0$)

3-1-8 Rezepturen: 30 - 50 MPa
5-1-8 Rezepturen: > 80 MPa

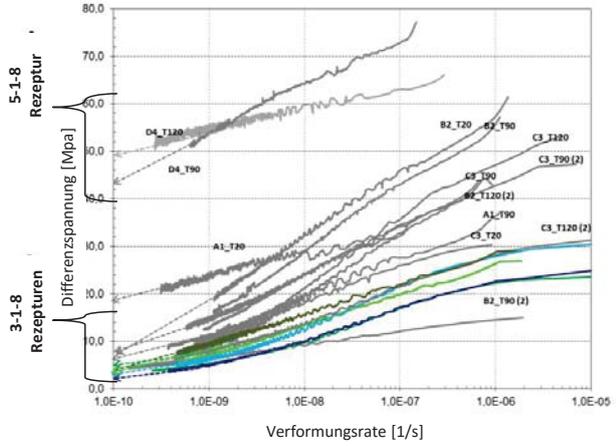
Relaxations- und Kriechverhalten (Langzeitverhalten)



Institut für Gebirgsmechanik GmbH
 Untersuchung · Prüfung · Beratung · Begutachtung



Triaxialer Verformungsversuch (def. Verf.-rate) bis 80% der erreichten Festigkeit



„Tragwiderstand“ in Abhängigkeit von der Verformungsrate
 Entlastung → zeitabhängig Relaxation

Rezeptur-Eigenschafts-„Bild“ des Magnesiabaustoffs

Rezepturtyp	„3-1-8“			„5-1-8“	
	Zuordnung bekannter Rezepturen	C3	DBM2	A1	D4 (MB10)
Molarer Ansatz MgO : MgCl ₂ : H ₂ O	3 : 1 : 11		(3 - 5) : 1 : (11 - 13)	5 : 1 : 13	(>5) : 1 : 13
Geomechanische Eigenschaften im relativen Vergleich					
Lösungspermeabilität (GG-Lösung)	$k \approx 10^{-18} \dots 10^{-19} \text{ m}^2$ $< 10^{-19} \text{ m}^2$ $\dots < 10^{-20} \text{ m}^2$ \dots undurchlässig				
Zuschläge	Zuschläge verschiedener Art und Körnung beeinflussen die geomechanischen Eigenschaften in gewissem Rahmen, bewirken aber keine grundlegenden Veränderungen der für die Bindemittelphasen typischen hydraulisch-mechanischen Bauwerkseigenschaften. Die Zuschläge sollten sich inert gegenüber den ablaufenden geochemischen Prozessen zum Erhalt/Nachweis der Langzeitbeständigkeit verhalten (keine Umbildungsreaktionen mit Salzlösung, wie z.B. Steinsalz (NaCl), Sand/Kies, kristallines Quarzmehl (SiO ₂), Anhydrit, Magnesit).				



FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

E 15

Naturwissenschaften

2015

Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs

Daniela Freyer, Matthias Gruner und Till Popp

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG

TU Berg

Dr. Daniela Freyer | FG Verschlussysteme | Freiberg, 03.05.2017



DE GRUYTER

Herbert Pöllmann (Ed.)

CEMENTITIOUS MATERIALS

COMPOSITION, PROPERTIES, APPLICATION

... planmäßige Erscheinung: Mai 2017

DE
G

TU

Dr. Daniela Freyer | FG Verschlussysteme | Freiberg, 03.05.2017

I. Cement composition and hydration

Ángeles G. De la Torre,¹ Isabel Santacruz,¹ Laura León-Reina,² Ana Cuesta,³ Miguel A. G. Aranda³

Diffraction and crystallography applied to anhydrous cements

Miguel A. G. Aranda,* Angeles G. De la Torre

Diffraction and crystallography applied to hydrating cements

Raab, Bastian. & Pöllmann, Herbert

Synthesis of high reactive pure cement phases

Winnefeld, Frank. , Lothenbach, Barbara

Cement hydration and thermodynamic modelling (Portland cements - Blended cements - CSA (CAC?))

II. Special cement and binder mineral phases

Artoli, Gilberto., Secco, M.

Role of hydrotalcite-type layered double hydroxides in delayed pozzolanic reactions and their bearing on mortar dating

Stöber, Stefan et.al.

Crystallography and crystal chemistry of AFm- and AFt- phases related to cement chemistry

Kaden Ronny. et.al.

Setting control of CAC by substituted acetic acids and their alkaline earth salts – crystal structures and thermal stability

III. Special cementitious and binder materials

X. Gao*, B. Yuan*, Q.L. Yu* and H.J.H. Brouwers

Chemistry, design and application of hybrid alkali activated binders

Pritzel, C. et.al.

Binding materials based on calcium sulphates

Freyer, Daniela

Magnesia Building Material (Sorel Phases) – from Basics to Application

Stemmermann, Peter

New CO₂-reduced cementitious systems

IV. Measurement and properties

Rößler, C., Ludwig, et.al.:

Characterization of cement microstructure by combination of high resolution scanning electron microscopy (SEM) imaging advanced energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and Electron Backscatter Diffraction (EBSD) techniques

Bier, Th. et.al.

Composition and properties of ternary binders

Westphal, Torsten. et.al.

Correlating XRD data with technological properties

Södje, Johannes. et.al.

No Cement production without refractories

Technologische
Verarbeitbarkeit

Magnesiabaustoff ...

ist verarbeitbar

als **Ortbeton**
mit 3-1-8 Rezeptur
mit 5-1-8 Rezeptur

als **Spritzbeton**

mit einer 5-1-8 Rezeptur

die **Temperaturentwicklung ist dabei hoch**

niedrig

Druckentwicklung (unter Einspannung)
für 3-1-8 Rezepturen
temporär (im ZF 5-1-8 → 3-1-8)
für 5-1-8 Rezepturen: keine Vol./Druckänderungen
(neben thermischen Dehnungen)

Geomechanische
Parameter

5-1-8 Rezepturen:
**sehr hohe Festigkeiten,
geringes Relaxationsverhalten
bei hohen Belastungsraten**

3-1-8 Rezepturen:
**hohe Festigkeiten, niedriger als für 5-1-8 R.
ausgeprägtes Relaxationsverhalten,
kriechfähig**

↓
**sehr "steifes" Material
(Widerlager)**

↓
ein eher "weiches" Material

Geochemische Eigenschaften
Langzeitbeständigkeit

Magnesiabaustoff mit

3-1-8 Bindemittelphase

5-1-8 Bindemittelphase

↓
thermodynamisch
stabil (bis 80°C)

↓
metastabil

in Gegenwart von Salzlösung*

* gesättigte NaCl-Lsg. mit mind. 0.5 mol Mg²⁺/kg H₂O

↓
Nachweis der Langzeitbeständigkeit

basiert auf

thermodynamischem
Lösegleichgewicht

Integritätsnachweis
(Erhalt der mechanisch-hydraulischen Eigenschaften,
da bei Lösungszutritt nur oberflächliche Umwandlung in
3-1-8 Phase: keine integrale Gefügeveränderungen)

Modellierung von Lösegleichgewichten der Sorelphasen (25-60°C) in Gegenwart von Salzlösungen aktuell möglich!

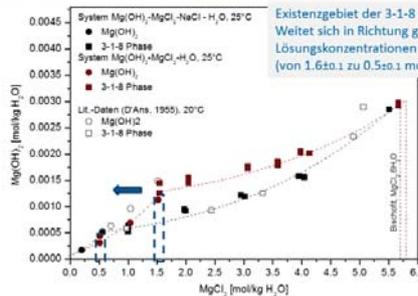
Ionen-Wechselwirkungsmodell nach Pitzer (Aktivitätskoeffizientenmodell)

$$\frac{G^{ex}}{w_W \cdot RT} = f(I_m) + \sum_i \sum_j \lambda_{ij} m_i m_j (I_m) + \sum_i \sum_j \sum_k \mu_{ijk} m_i m_j m_k (I_m)$$

1. Term 2. Term 3. Term

25, 40, 60°C	
Festphasen:	
Mg(OH) ₂ (s)	$\Delta_r G_{\text{Lösung}}^{\circ}$ [J/mol] -lg K _s
3-1-8 Phase	$\Delta_r G_{\text{Lösung}}^{\circ}$ [J/mol] -lg K _s
5-1-8 Phase	$\Delta_r G_{\text{Lösung}}^{\circ}$ [J/mol] -lg K _s
2-1-4 Phase	$\Delta_r G_{\text{Lösung}}^{\circ}$ [J/mol] -lg K _s
ionische Spezies:	
[Mg(OH)] ⁺	$\Delta_r G^{\circ}$ [J/mol]
[Mg ₂ (OH)] ²⁺	$\Delta_r G^{\circ}$ [J/mol]
Wechselwirkungsparameter	
$\beta^{(0)}$ ([Mg(OH)] ⁺ -Cl ⁻)	R · Δ _r G [°]
$\beta^{(1)}$ ([Mg(OH)] ⁺ -Cl ⁻)	R · Δ _r G [°]
c° ([Mg(OH)] ⁺ -Cl ⁻)	R · Δ _r G [°]
ψ (Na ⁺ -[Mg(OH)] ⁺ -Cl ⁻)	R · Δ _r G [°]
ψ (Mg ²⁺ -[Mg(OH)] ⁺ -Cl ⁻)	R · Δ _r G [°]
ψ (Na ⁺ -[Mg ₂ (OH)] ²⁺ -Cl ⁻)	R · Δ _r G [°]
ψ (Mg ²⁺ -[Mg ₂ (OH)] ²⁺ -Cl ⁻)	R · Δ _r G [°]

... Löslichkeiten bei NaCl-Sättigung (Steinsalz-Bedingungen)



Solubility Equilibria in the System Mg(OH)₂-MgCl₂-H₂O from 298 to 393 K

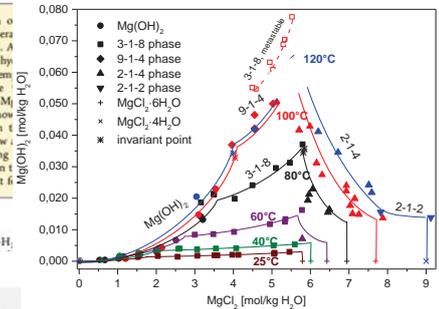
Melanie Pannach, Sebastian Bette, and Daniela Freyer

Institut für Anorganische Chemie, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 29, Germany

ABSTRACT: The solubility equilibria of MgCl₂-H₂O were determined at temperatures of up to 3.5 years. A stable magnesium chloride hydroxide ternary system within the investigated temperature range [3Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O, the 4H₂O, the 2-1-4 phase [2Mg(OH)₂·MgCl₂·2H₂O]. The also known 8H₂O was found to be metastable in this work, a reliable solubility data set is now available, a challenging demand on it as a barrier construction material in salt...

1. INTRODUCTION

The ternary system Mg(OH)₂-MgCl₂-H₂O



liquid, various...
containing brines. The potential application of magnesium cement or concrete in barrier constructions, as part of plug and sealing...
Received: November 4, 2016
Accepted: March 9, 2017
Published: March 23, 2017

DOI: 10.1021/acs.jced.6b00939
J. Chem. Eng. Data 2017, 62, 1384-1396

if society 1384

Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff

Die Chemie des Baustoffes ist im Zusammenhang mit der technologischen Verarbeitbarkeit und Temperaturentwicklung verstanden zusammen mit den draus resultierenden mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Kriechverhalten,...)

→ Baustoffrezepturen können gezielt für konkrete Anwendungen und Anforderungen an der Baustoff eingesetzt werden, detaillierten Fragestellungen kann gezielt nachgegangen werden!

Daten (thermodynamische Daten) stehen für Modelle /Anpassungen / Modellrechnungen zur Verfügung.

... Implementierung in THEREDA kann erfolgen!



Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff

Beteiligte Institutionen / Danksagung

Institut für Anorganische Chemie, TUBAF

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TUBAF



MPI für Festkörperforschung, Stuttgart



BETREUT VOM



FK 02C1204, CARLA

Gefördert durch:



FK 02E10880, MgO-Baustoff
FK 02E11435, MgO-SEAL

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Bundesamt für Strahlenschutz

„Auswahl geeigneter Füllmaterialien
anhand der nachweisbaren
Langzeitstabilität“ im Rahmen der
Entwurfsplanung der
Schachtverschlusssysteme für die
Schachtanlage Asse II (ESA)

Aktuelle Untersuchungen der Dichtfunktion zementbasierter Baustoffe bei Durchströmung mit salinärer Lösung

Kyra Jantschik, Oliver Czaikowski

03. Mai 2017

Fachgespräch Verschlussysteme 2017

Inhalt

- Motivation / Ziele

- Verfügbares Probenmaterial

- Laborexperimente
 - Geochemische Experimente
 - CHM-gekoppelte Experimente

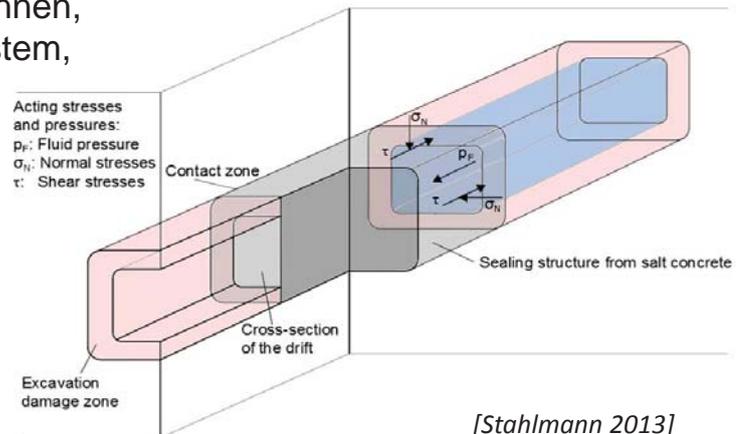
- Zusammenfassung und Ausblick

- Danksagung

Motivation / Ziele

- Um die Dichtfunktion eines Abdichtelements beurteilen zu können, muss das gesamte Verschlussystem, bestehend aus

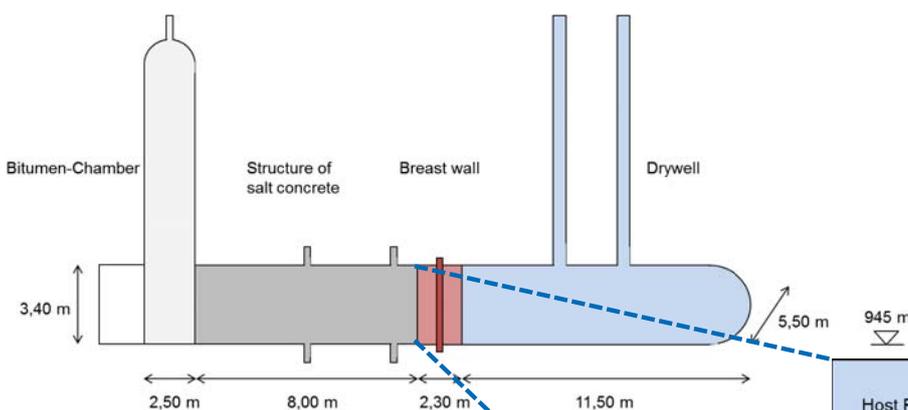
- Verschlussmaterial
- Kontaktzone und
- Auflockerungszone berücksichtigt werden.



- Im Rahmen der Vorhaben LAVA-2 und LASA-EDZ wurden
 - geochemische Versuche, zur Untersuchung der Korrosionsverhaltens von Salzbeton und
 - CHM-gekoppelte Untersuchungen zur Untersuchung der Dichtfunktion eines Abdichtelements bei Durchströmung mit salinaren Lösungen durchgeführt.

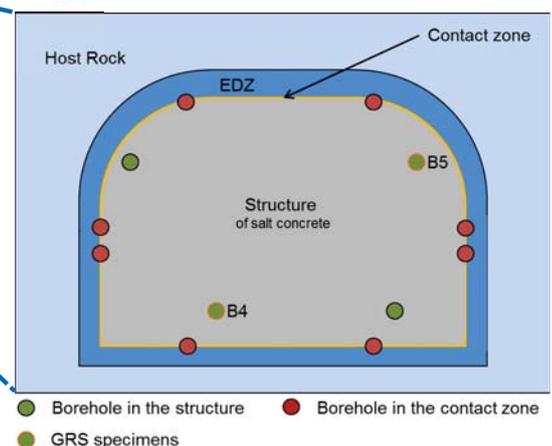
3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Verfügbares Probenmaterial für Laboruntersuchungen I



Verschlussbauwerk

- Errichtet auf der 945 m Sohle
- Fertigstellung: 1992
- Probenahme: 2003
- Material: Salzbeton
- Länge: 8,0 m, Tiefe: 5,5 m, Höhe: 3,4 m



3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

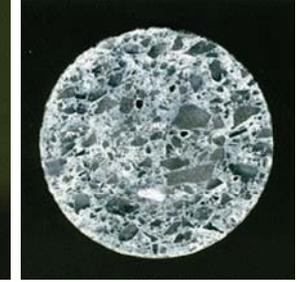
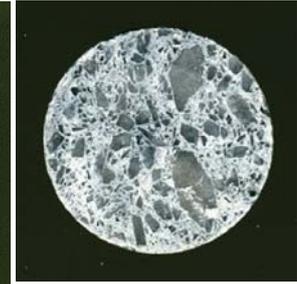
Verfügbares Probenmaterial für Laboruntersuchungen II

Steinsalz



Entnommen aus der Auflockerungszone (EDZ)

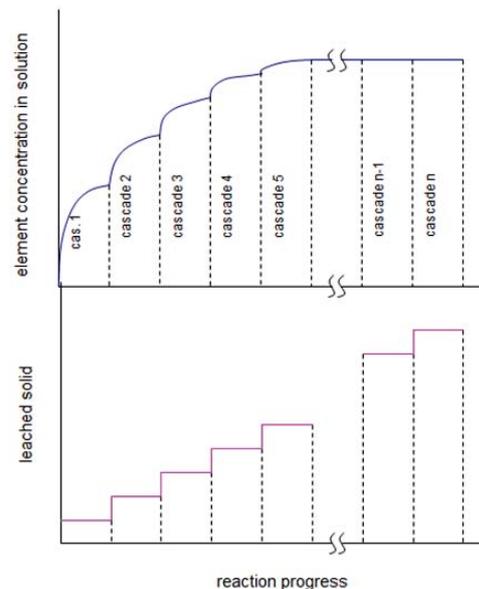
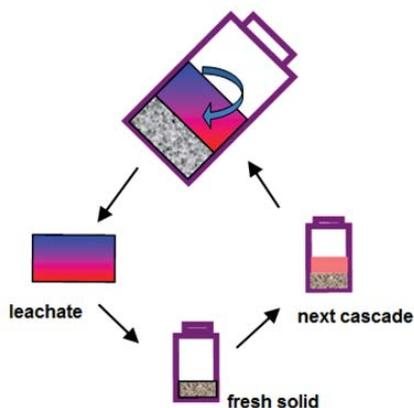
Salzbeton



Zementmatrix mit Salzgruseinschlüssen, bestehend aus:
72% Salzgrus
18% Hochofenzement
10% NaCl-Lösung

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Funktionsprinzip

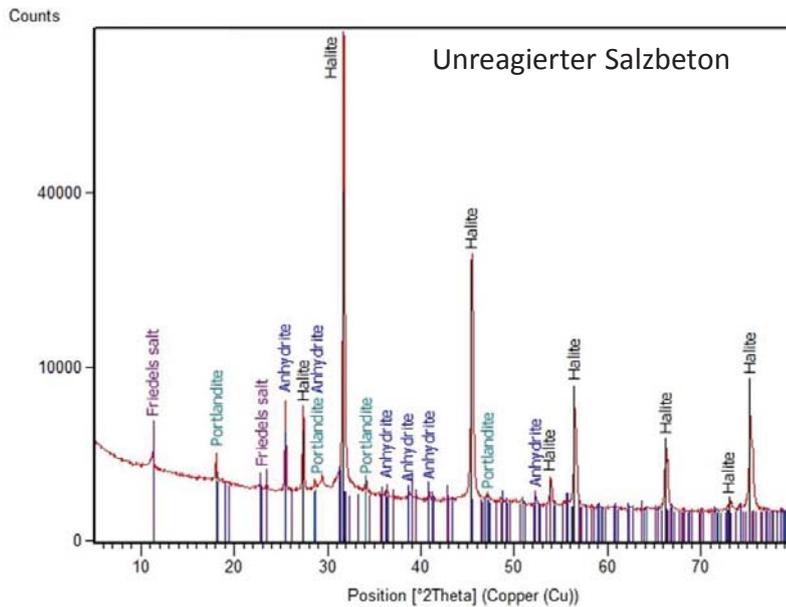


- Feststoff und saline Lösung werden in definierten Verhältnis gemischt und über festgelegten Zeitraum reagieren gelassen
- Am Ende der Kaskade werden Feststoff und Lösung separiert
- Zu der abfiltrierten, bereits reagierten Lösung wird neuer Feststoff hinzugegeben und das Gemisch erneut reagieren gelassen
- Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis keine Lösung mehr zurückgewonnen werden kann

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit $MgCl_2$ -Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

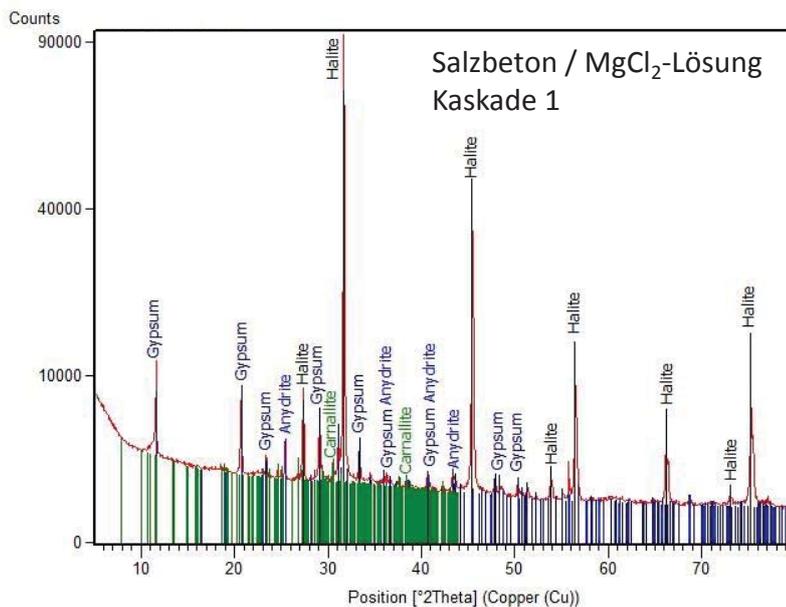
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit $MgCl_2$ -Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

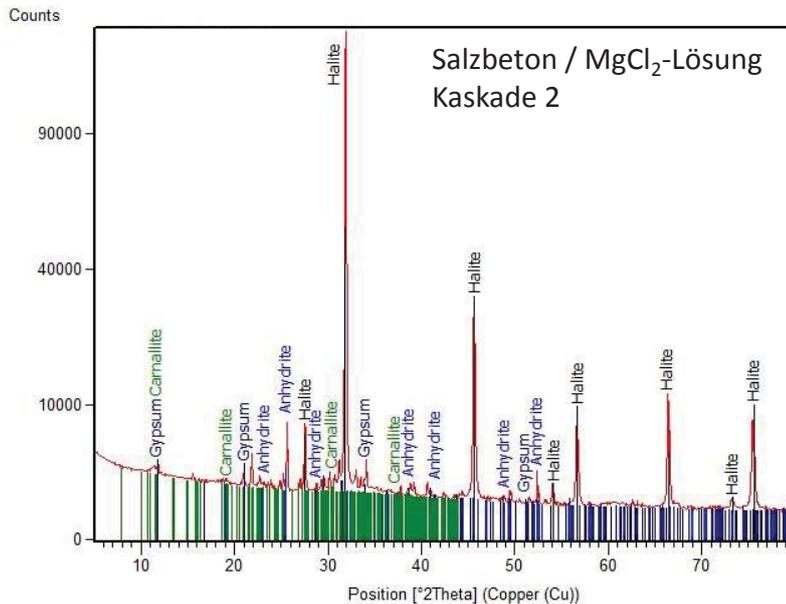
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit $MgCl_2$ -Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

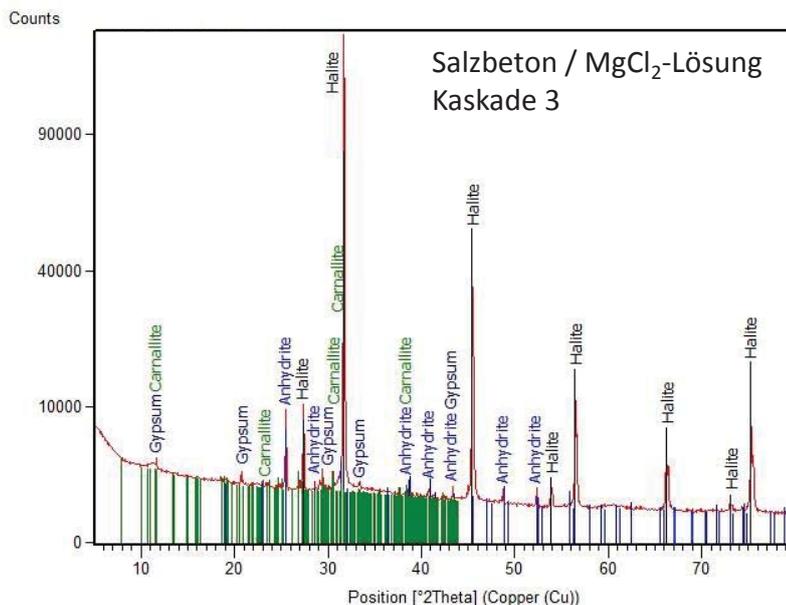
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit $MgCl_2$ -Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

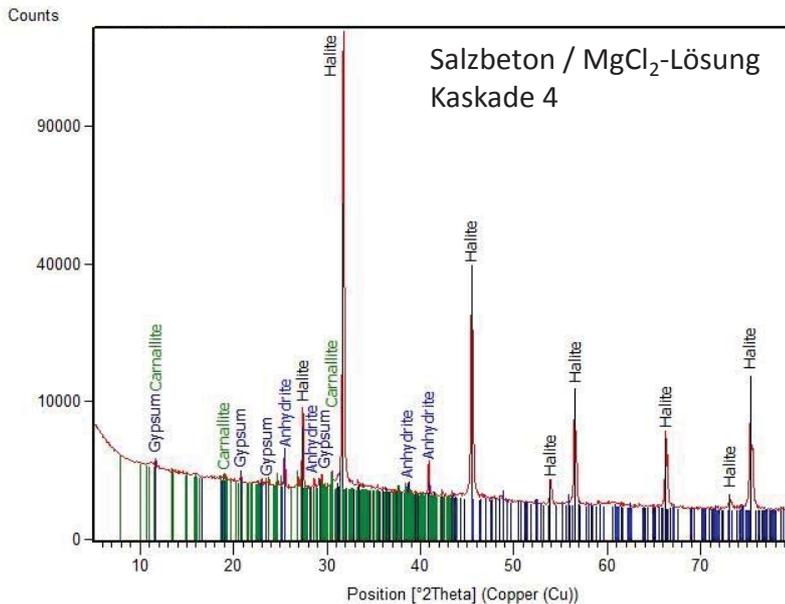
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit $MgCl_2$ -Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

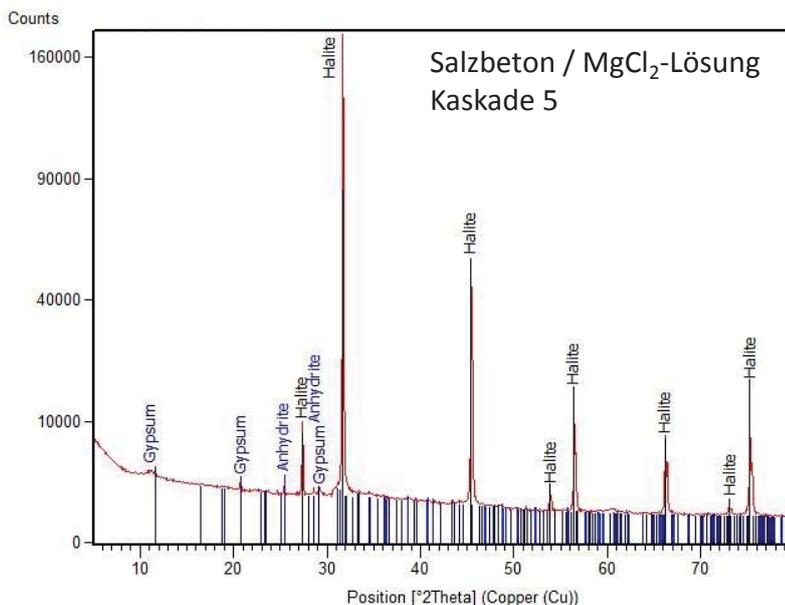
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit $MgCl_2$ -Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

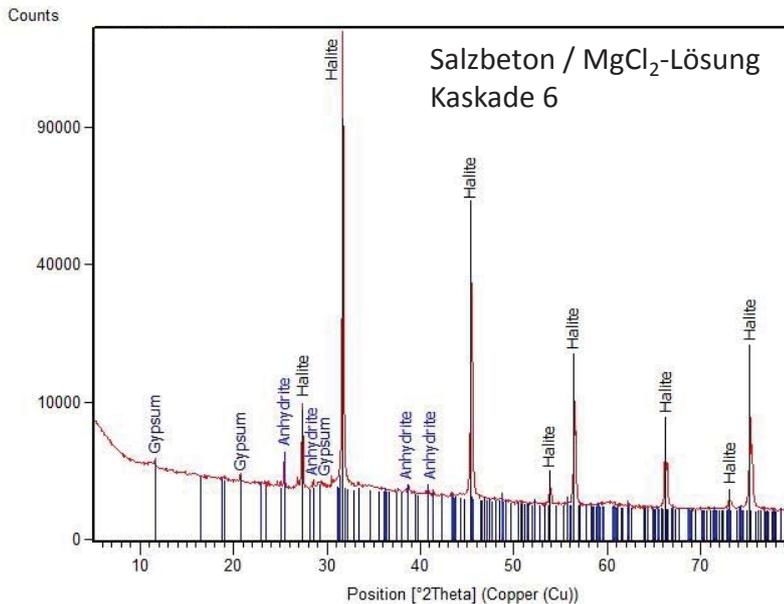
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – MgCl₂-Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit MgCl₂-Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

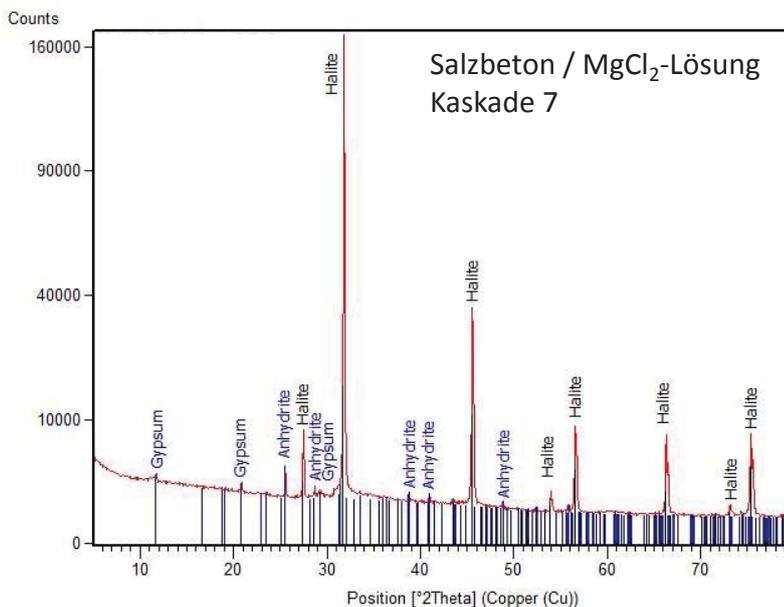
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – MgCl₂-Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit MgCl₂-Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

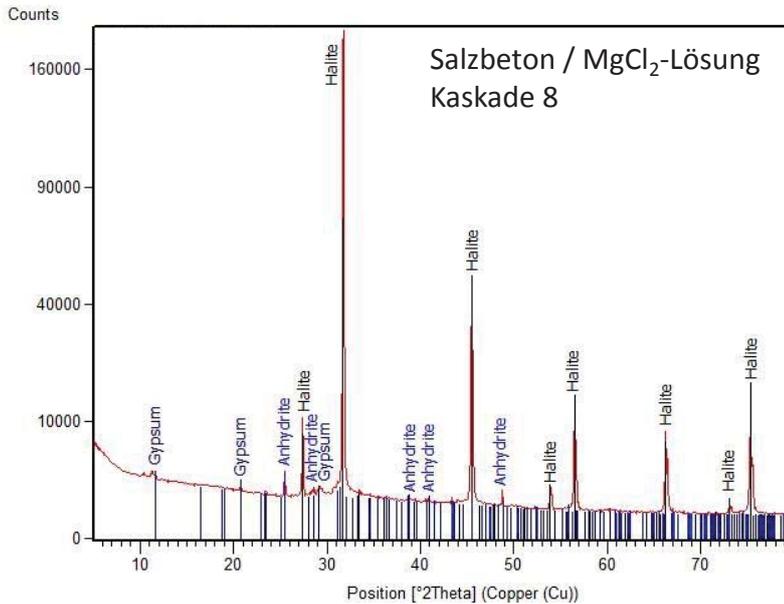
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Röntgenanalyse des Salzbetons (*Feststoff*):



Salzbeton besteht aus

- Anhydrit
- Friedelschem Salz
- Halit und
- Portlandit

Durch Reaktion mit $MgCl_2$ -Lösung lösen sich

- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

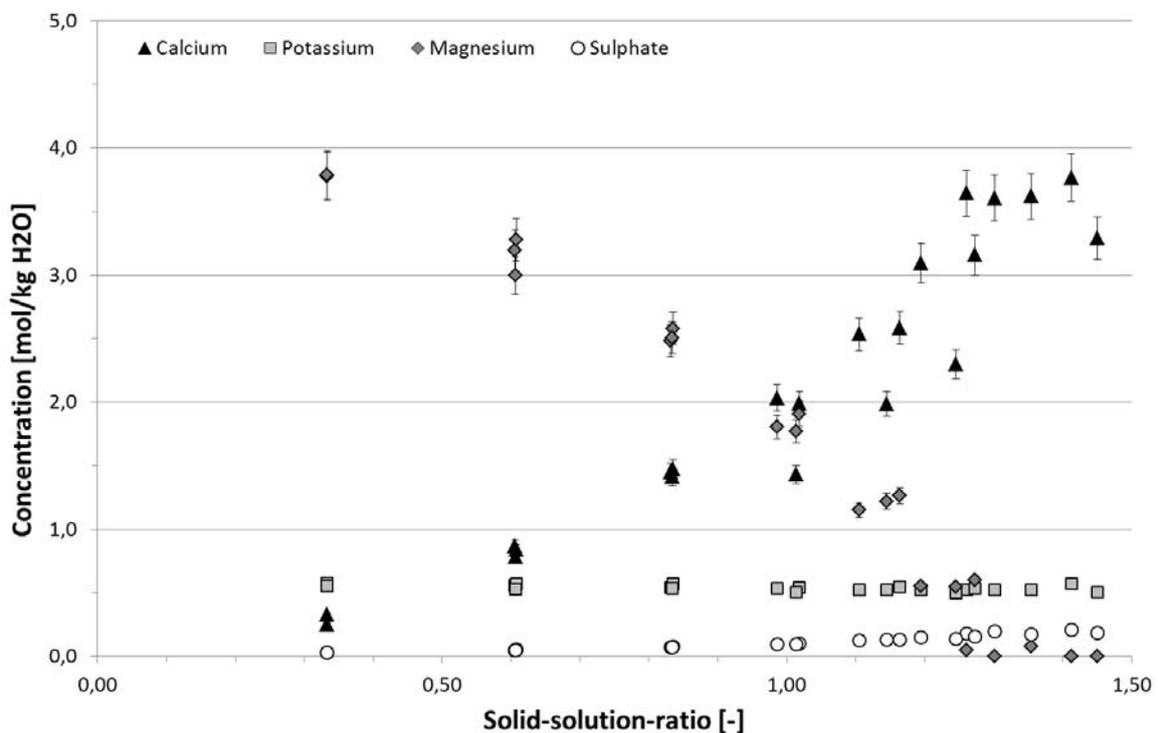
Als neue Phasen bilden sich

- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

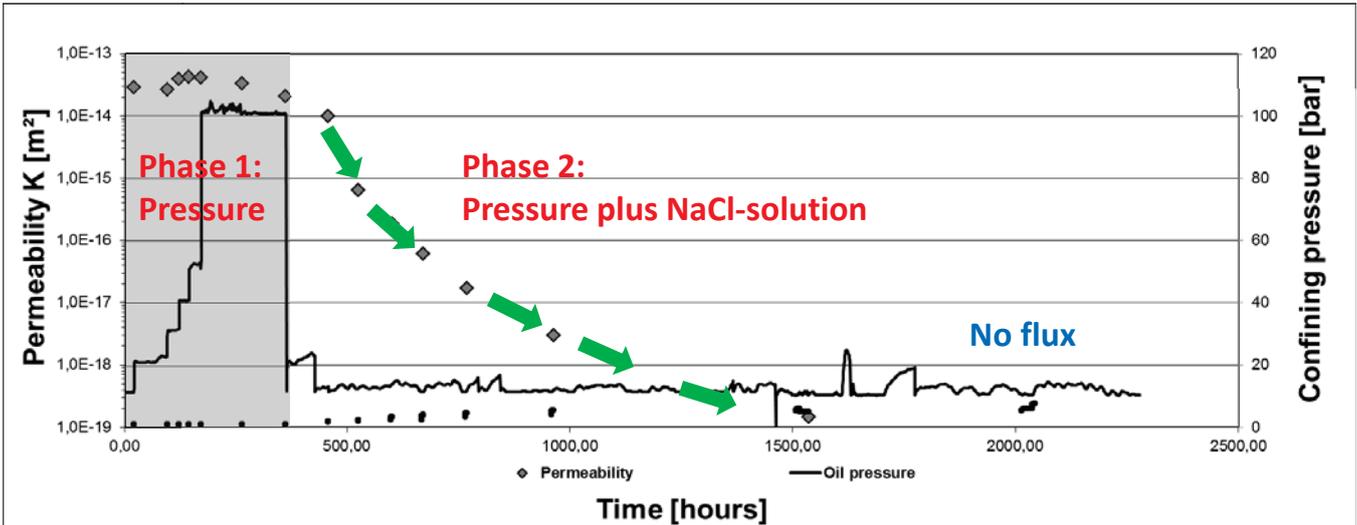
Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Lösungsanalyse:



3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

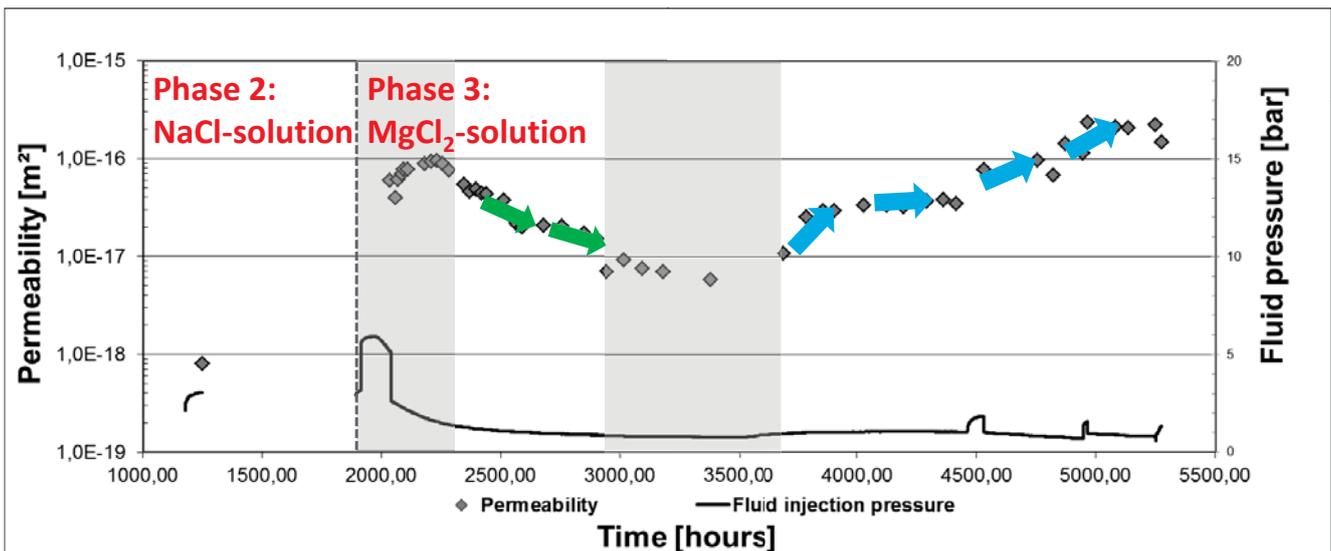
Hydraulisch-chemisch-mechanisch gekoppelte Experimente I



3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Hydraulisch-chemisch-mechanisch gekoppelte Experimente II

➡ Anschließend Ersetzen der NaCl-Lösung durch eine $MgCl_2$ -Lösung



Übergangsphase

Permeabilitätsabnahme durch Brucit-Bildung

Konstante Permeabilität

Permeabilitätsanstieg durch Lösungsprozesse

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Zusammenfassung

Geochemische Experimente

- $MgCl_2$ -Lösung korrodiert den Salzbeton
 - CSH-Phasen werden aufgelöst
 - Formation von MSH-Phasen

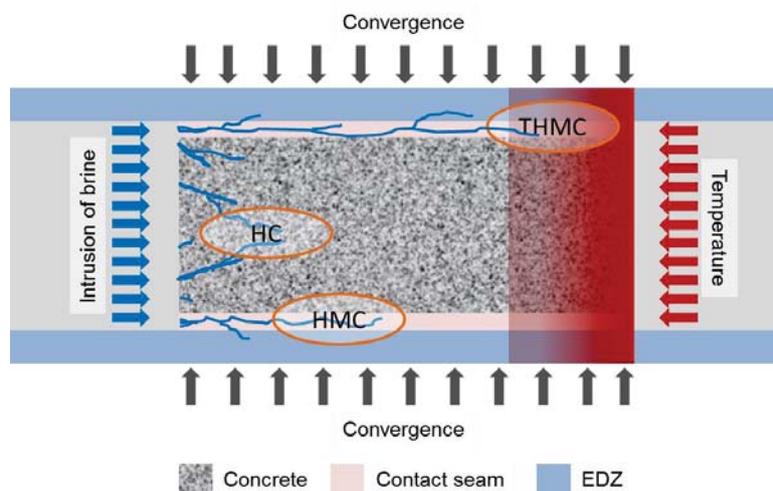
CHM-gekoppelte Experimente

- Minimalspannung und NaCl-Lösung führen zu einer Reduktion der Permeabilität auf der Kontaktfuge, möglicher Weise durch Kristallisationseffekte
- Analog zu den geochemischen Experimenten wird der vorgeschädigte Salzbeton durch $MgCl_2$ -Lösung korrodiert
 - Zunächst nimmt die Permeabilität ab, vermutlich aufgrund eines Verstopfens der Poren z.B. durch Brucit
 - Im weiteren Korrosionsprozess werden die CSH-Phasen instabil und lösen sich aus dem vorgeschädigten Salzbeton heraus. Daraus resultiert ein Anstieg der Permeabilität

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Ausblick

- Weitere Experimente an kombinierten Prüfkörpern werden aktuell in der GRS durchgeführt
- Mit weiterführenden Experimenten soll ein besseres Verständnis von THMC-gekoppelten Prozessen auf die Dichtfunktion von Verschlusselementen gewonnen werden



- Vorhabenskizze THyMeCZ

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Danksagung

Vielen Dank

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

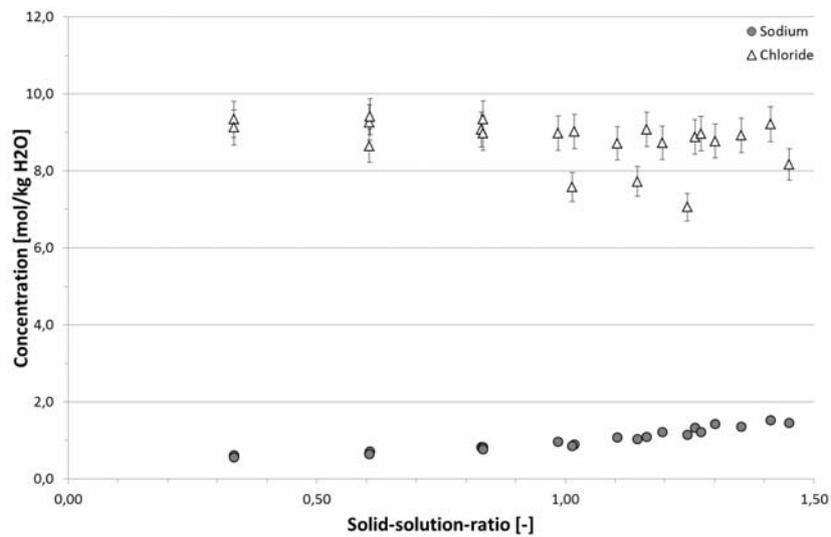
3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlusssysteme

Anhang

3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlusssysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

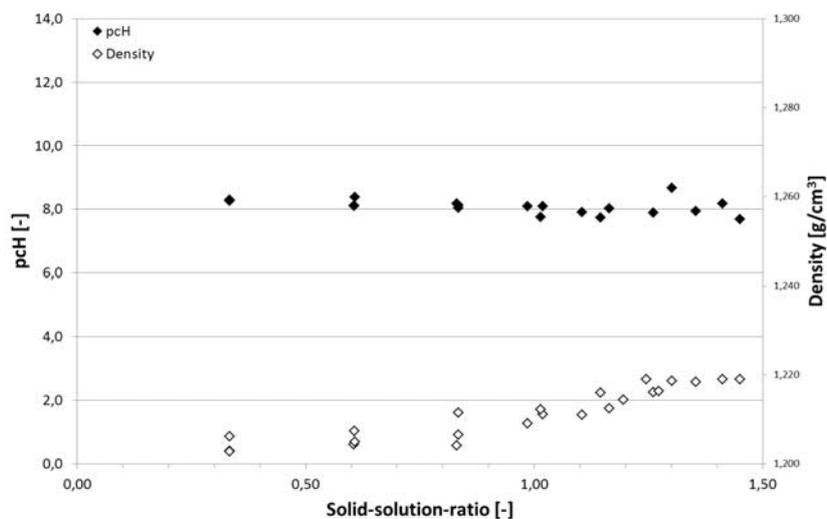
Lösungsanalyse Chlorid und Natrium:



3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Dichte und pCH-Wert:



3. Mai 2017 | Fachgespräch Verschlussysteme

MgO-SEAL – Verhalten von MgO-Spritzbeton bei Angriff von MgCl₂-Lösung

Matthias Gruner, Daniela Freyer, Till Popp

Fachgespräch Verschlusssysteme – 3. / 4. Mai 2017 in Freiberg

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FKZ: 02E11435

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Gliederung

1. Einführung: Vorgeschichte, MgO-Spritzbeton
2. Vorhaben MgO-SEAL
 - Arbeitsprogramm
 - Ergebnisse
3. Zukünftige Verbesserung des MgO-Spritzbetons

Vorgeschichte



- MgO-Beton als Baustoff für HAW-Endlager im Salinar vorgeschlagen (in Ortbetonbauweise als Widerlagermaterial mit Dichtfunktion für Schachtverschlüsse, in Spritzbetonbauweise für Streckenverschlüsse)
- In Teutschenthal sind in situ Bauwerke aus Ortbeton (GV1) und Spritzbeton (GV2) im Maßstab 1:1 vorhanden



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

MgO-Beton: Rezepturtypen

Rezeptur	„3-1-8“		„5-1-8“	
Zuordnung bekannter Rezepturen	C3 DBM2	A1	D4 (MB10)	
Bindemittelphasen-ausbildung nach Abbinden	3 Mg(OH) ₂ · MgCl ₂ · 8 H ₂ O (= Mg ₂ (OH) ₃ Cl · 4 H ₂ O)	3 Mg(OH) ₂ · MgCl ₂ · 8 H ₂ O + 5 Mg(OH) ₂ · MgCl ₂ · 8 H ₂ O	5 Mg(OH) ₂ · MgCl ₂ · 8 H ₂ O (= Mg ₃ (OH) ₅ Cl · 4 H ₂ O)	5 Mg(OH) ₂ · MgCl ₂ · 8 H ₂ O + MgO
Molarer Ansatz MgO : MgCl ₂ : H ₂ O	3 : 1 : 11	(3 - 5) : 1 : (11 - 13)	5 : 1 : 13	(>5) : 1 : 13
Ansatz Masse% MgO : MgCl ₂ : H ₂ O	29.18 : 22.98 : 47.84	29.18 - 37.95 : 22.98 - 17.93 : 47.84 - 44.11	37.95 : 17.93 : 44.11	>37.95 : 17.93 : 44.11
Bemerkung	Für technologische Anwendungen nur mit Zuschlag (Kornmehl-Art zur zwischenzeitlichen „Lösungsbindung“) verarbeitbar, ansonsten kommt es zur Sedimentation/ zum Ausbluten.			
Geomechanische Eigenschaften im relative Vergleich	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">Kriechverhalten, Relaxieren</div> <div style="width: 45%; text-align: right;">Festigkeit</div> </div>			
Geochemische Eigenschaften	Langzeitbeständigkeit bei Lösungszutritt			
	Positiver Nachweis über thermodynamisches Bindemittelphasen-Lösungs-Gleichgewicht im Fall der 3-1-8 Phase bis 80°C, oberhalb davon über die 9-1-4 Phase.	Positiver Nachweis über Integritätsnachweis: das im Bindemittelphasen-Lösungs-System metastabil existierende 5-1-8 Phasengefüge wird bei Lösungszutritt im Kontaktbereich durch die Kristallisation der 3-1-8 Phase eingeschlossen, da mit der Kristallisation gleichzeitig Lösungszugänglichkeiten verschlossen werden. Die Baustoffeigenschaften bleiben erhalten.		
Zuschläge	Zuschläge verschiedener Art und Körnung beeinflussen die geomechanischen Eigenschaften in gewissem Rahmen, bewirken aber keine grundlegenden Veränderungen. Die Zuschläge sollten sich inert gegenüber den ablaufenden geochemischen Prozessen zum Erhalt/Nachweis der Langzeitbeständigkeit verhalten (z.B. Steinsalz (NaCl), Sand, Kies, kristallines Quarzmehl (SiO ₂), Anhydrit, Magnesit).			

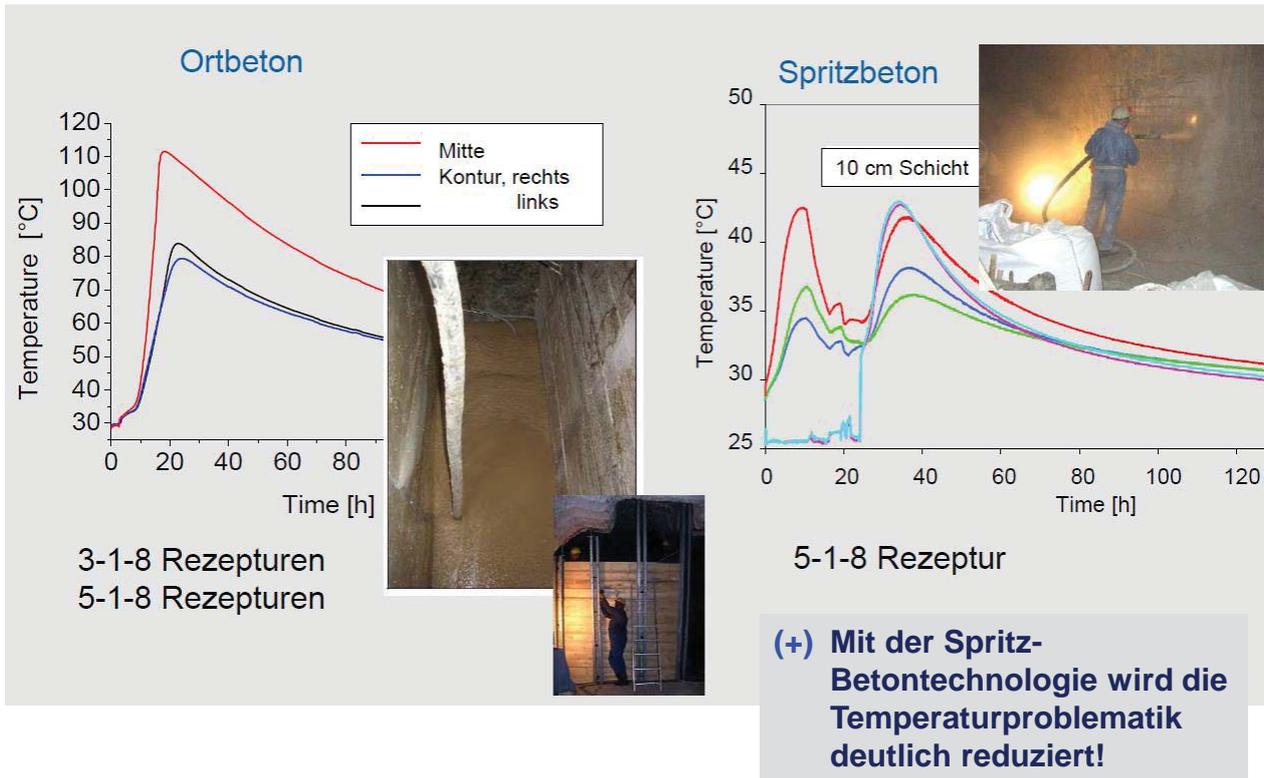
Quelle: D. Freyer, M. Gruner, T. Popp "Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs." Freiberg. Forschungsh. E15 – Naturwissenschaften, 1. Auflage, 2015, Verlag der TU Bergakademie Freiberg, ISBN 978-386012-516-8



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Temperaturverlauf im MgO-Baustoff - Vergleich Ort beton - Spritzbeton

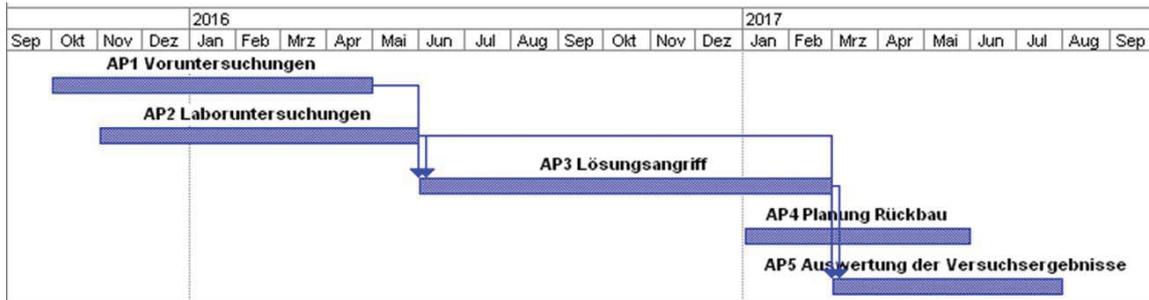


Ziele des Vorhabens MgO-SEAL

- Zustand des MgO-Spritzbeton-Bauwerkes GV2 nach 7 Jahren Standzeit
- Verhalten des Baustoffs bei Einwirkung der typischen Endlager-relevanten Lösung:
 - NaCl gesättigte Lösung + $MgCl_2$ (2 mol $Mg^{2+}/kg H_2O$)
 und der Lösung mit der stärksten Einwirkung:
 - Gesättigte NaCl-Lösung (Mg^{2+} - frei)
- Daten für den Nachweis der Integrität des MgO-Betons D4
→ Langzeitsicherheitsnachweis von Verschlusselementen aus MgO-Beton mit der 5-1-8-Bindemittelphase für zukünftige HAW-Endlager im Salinar
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des MgO-Betons erstmalig an einem realen Bauwerk



Planung des Vorhabens



Projektpartner:

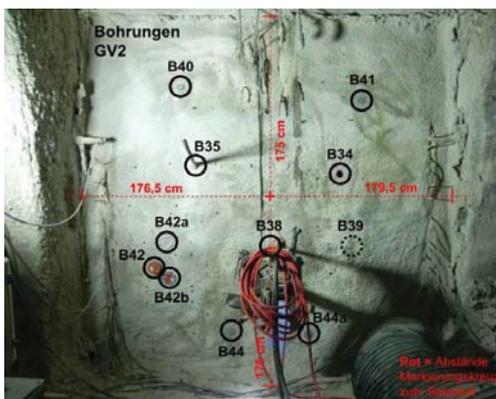
- Grube Teutschenthal
- IBeWa
- TS-Bau, NL Jena
- IfG Leipzig
- MFPA Weimar



IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Anpassung Arbeitsprogramm - Einwirkung von Lösung auf den Baustoff



MgCl₂-CaCl₂-Lösung (Tachyhydrit-stabil):

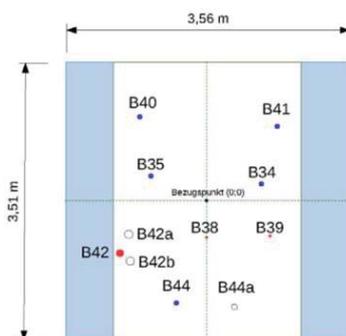
- B34 (Fortsetzung - IBeWa)
- B44 (zuerst Gaspermeabilität - IBeWa)
- Druckkammer (integrale effektive Permeabilität $k_{\text{Gas}} = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$)

Endlager-relevante Lösung (NaCl + Mg²⁺)

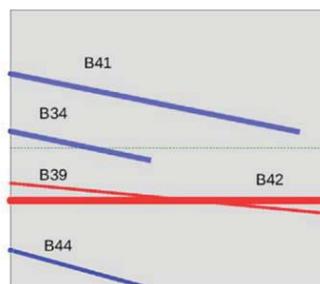
- B35 (zuerst Gaspermeabilität - IBeWa)
- B40 (zuerst Gaspermeabilität - IBeWa)
- B38 (zuerst Gaspermeabilität - IfG)

Gesättigte NaCl-Lösung („maximale Einwirkung“)

- B39 (zuerst Gaspermeabilität - IfG)
- B41 (zuerst Gaspermeabilität - IBeWa)



Querschnitt Ortsbrust



Längsschnitt

- Bohrkerne D = 130 mm: 1,19 m (B42b, B42a)
- Bohrkerne D = 100 mm: 4,1 m (B42)
- Bohrkerne D = 60 mm: 10,08 m (B40, B44, B44a)
- Bohrkerne D = 30 mm: 12,00 m (B38, B39)



IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

In situ Untersuchungen des MgO-Spritzbetons



In situ Permeabilitätsmessungen (IBeWa, IfG) direkt im MgO-Spritzbeton



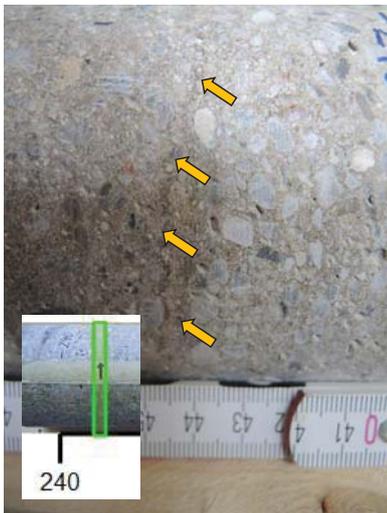
Pumpanlage zur Druckbeaufschlagung des GV2



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Detailaufnahmen an Bohrkernen (D = 100 mm)



Betonierabschnittsgrenze
2,43 m



Betonierabschnittsgrenze
unmittelbar neben Bruchfläche
0,94 m – 1,00 m



Poren an Betonierabschnittsgrenze
0,33 m

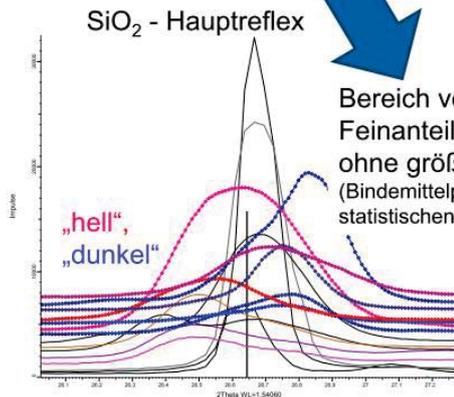
Abrißfläche an Betonierabschnittsgrenze
0,46 m



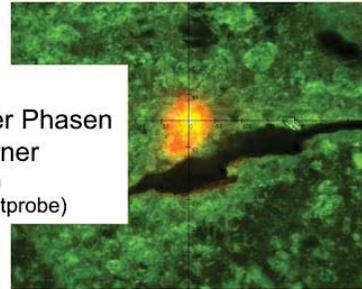
Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Untersuchungen an Bohrkernen - Phasenanalyse an Schwächezonen



Bereich von
Feinanteilen silikatischer Phasen
ohne größere Quarzkörner
(Bindemittelphasenbestand im
statistischen Mittel der Gesamtprobe)



9



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Zugfestigkeit an BAG's



11 Betonierabschnitte



HZV1



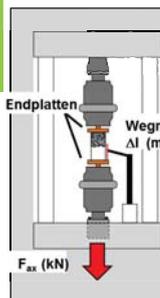
HZV2



HZV3



HZV4



HZV1a-2



HZV1b-2



HZV2-2



HZV3-2



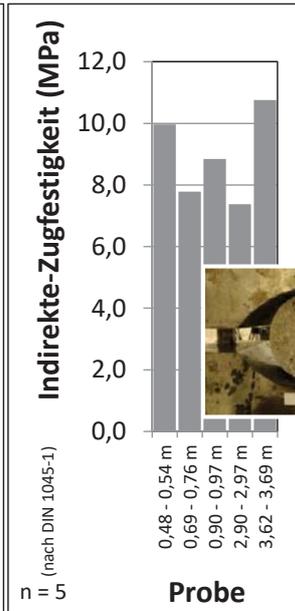
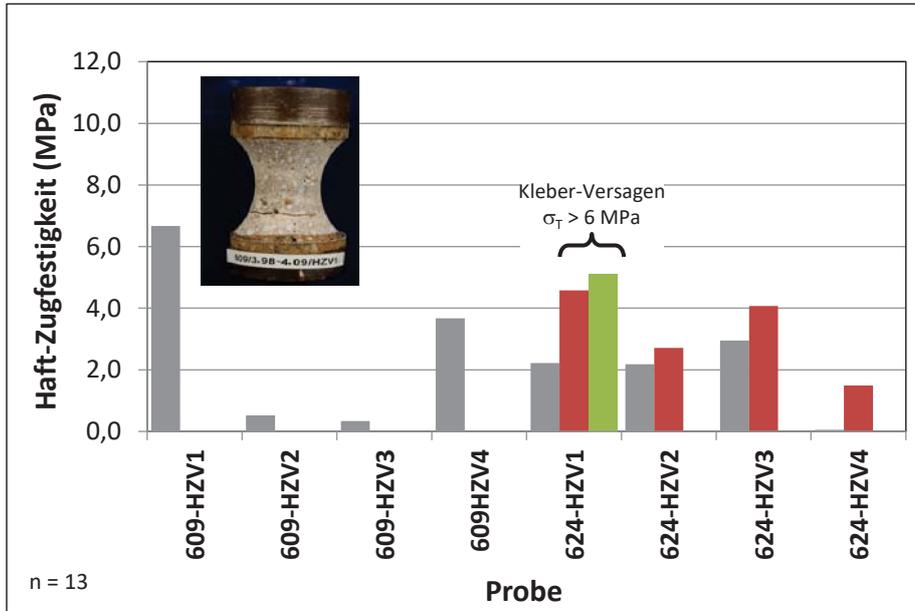
HZV4-2



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Zugfestigkeit an BAG's



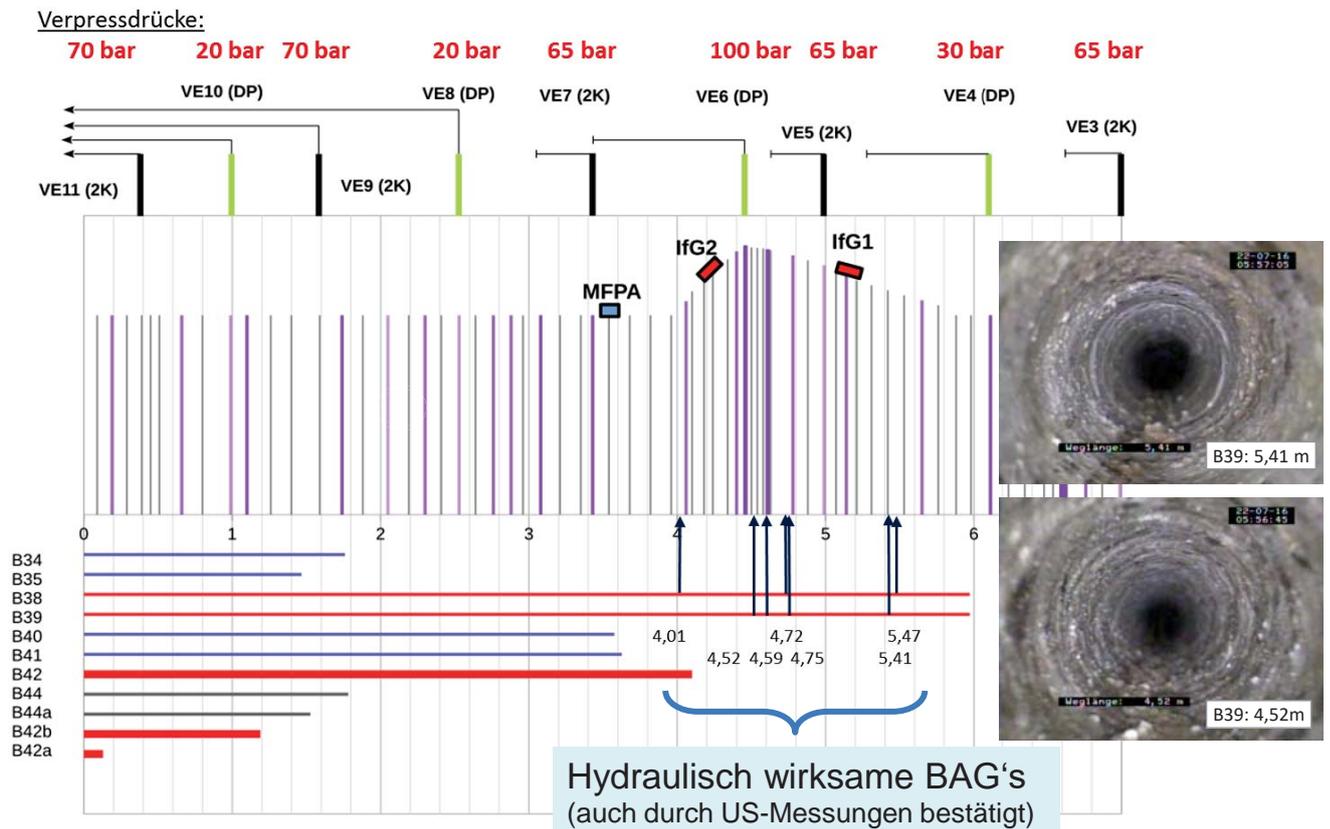
- SB-Matrixfestigkeiten sind hoch: $\sigma_{TMA} = 9,0 \pm 1,5 \text{ MPa}$
- BAG's weisen geringere Festigkeiten auf: $\sigma_{TBA} = 2,8 \pm 2,0 \text{ MPa}$



IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

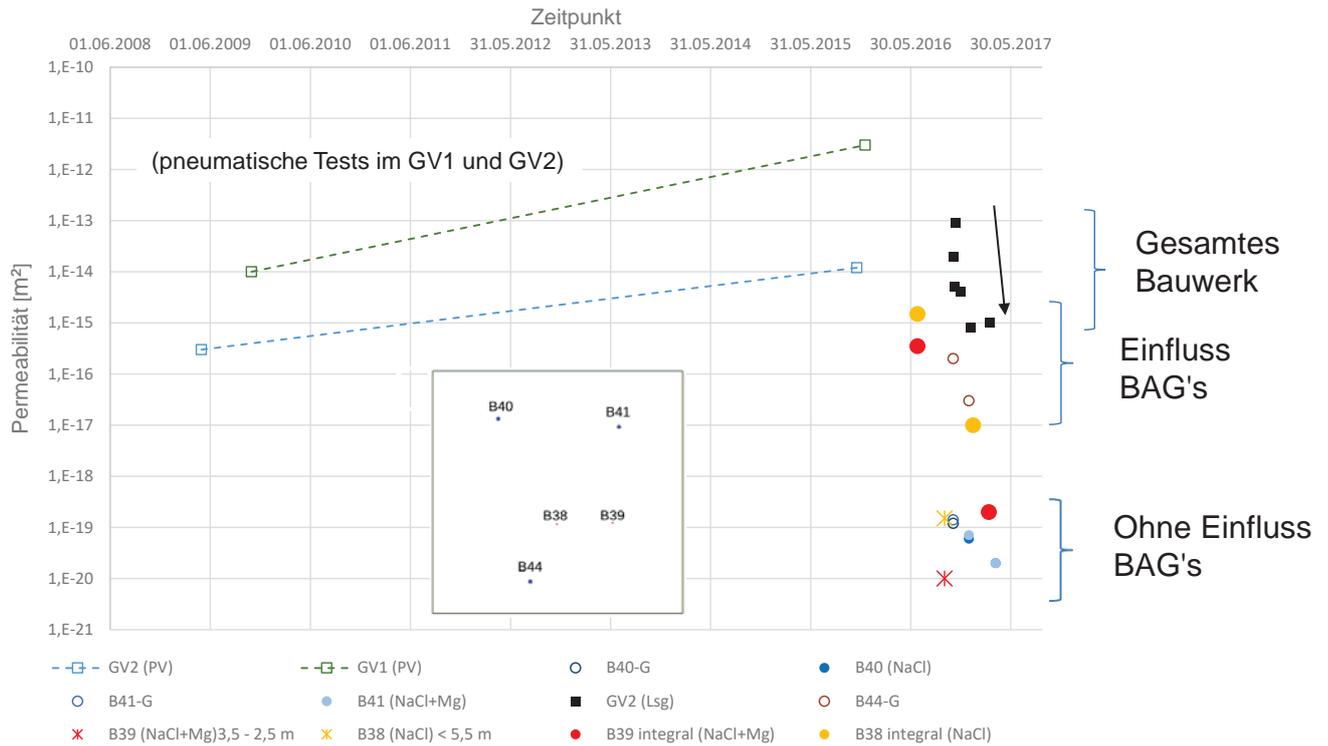
Lage der Schwachstellen (BAG's)



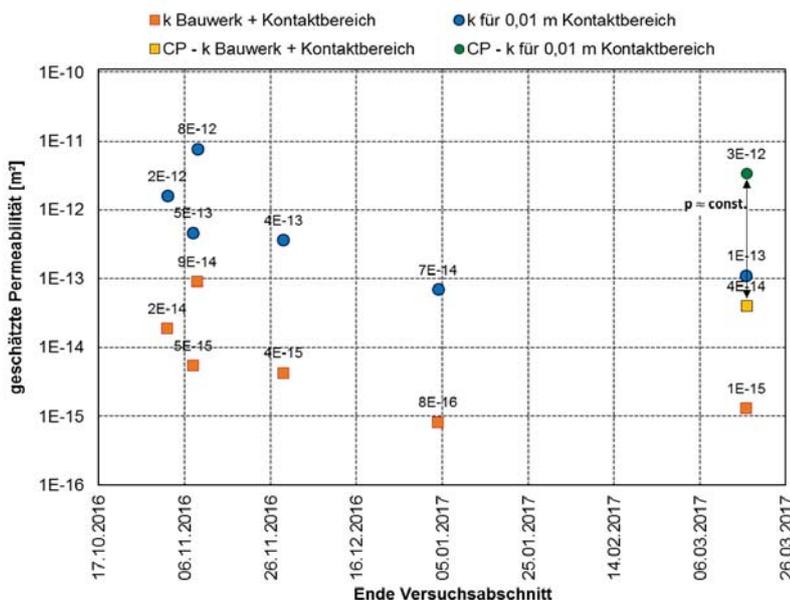
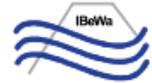
IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Permeabilitäten: - Integrale Messungen und lokale Messungen (Gas und Lösung)



Abschätzung der integralen Permeabilität des GV2 bei Lösungsangriff - Vorläufige Ergebnisse von IBeWa



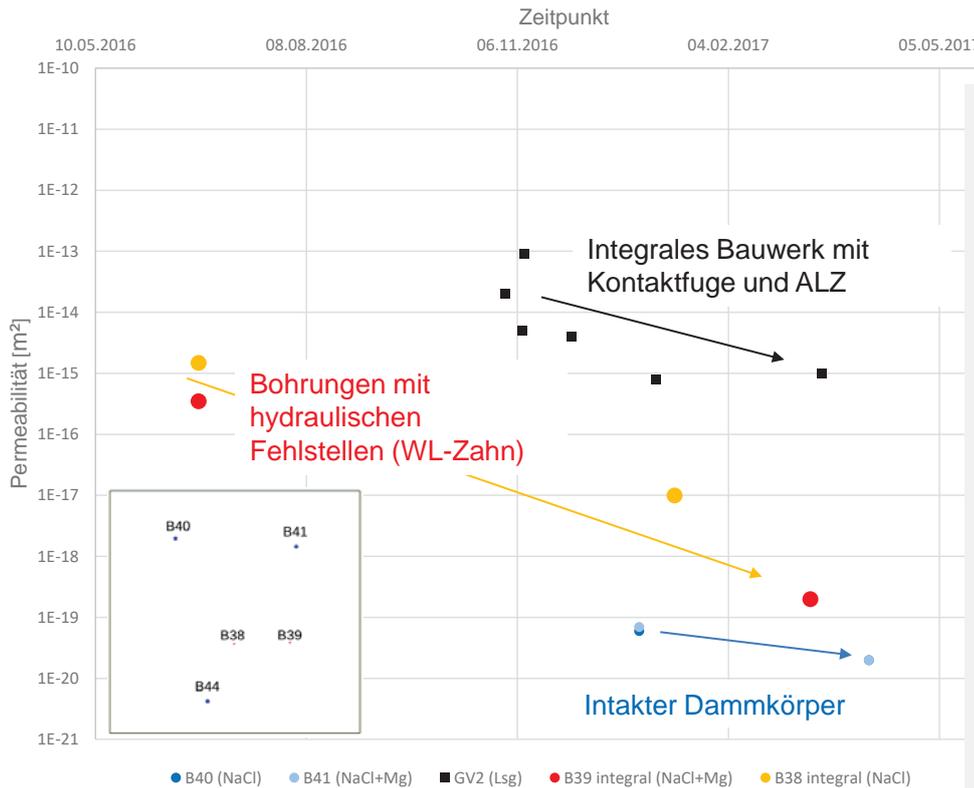
Niveau der Permeabilität aus CP:
 Kontaktbereich 8E-12 m²
 Bauwerk 4E-14 m²

Annahmen:

- Mächtigkeit Kontaktbereich (KB): 0,01 m
- dynamische Viskosität Lösung: 25,7 mPas (CaCl₂-MgCl₂-Lösung)
- Bauwerkslänge (Spritzbeton): 10,25 m
- vollständig flüssigkeitsgefüllte Druckkammer



Permeabilitäten: - Zeitliche Abnahme der Fluidpermeabilitäten



BAG's sind primäre hydraulische Schwächezonen

In situ Nachweis der Selbstabdichtung

Thermisch oder bautechnisch induzierte Risse im D4-Baustoff hydraulisch langfristig nicht relevant ?

Anderes Nachweiskonzept als für Salzbeton ?

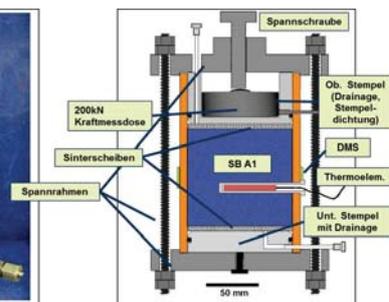
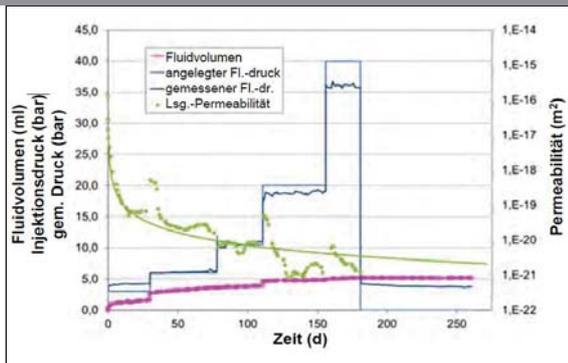


Ifg Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

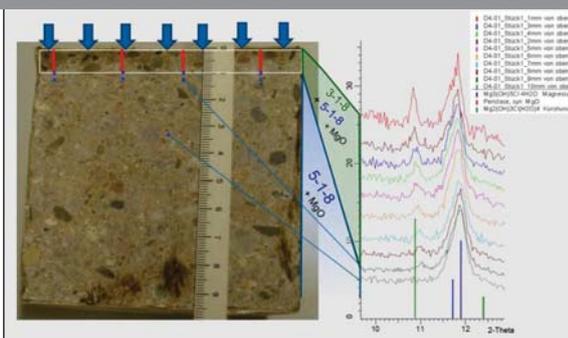
Integritätsnachweis bei Lösungszutritt

Aufsättning von D4-MgO-Beton mit Lösungsdruck



Probengröße:
d = 100mm x h = 95mm
V = ca. 750ml
Max. Zieldruck: 20 MPa

Ortsaufgelöste Phasenanalyse nach Aufsättning



- ☺ Ein Lösungsangriff führt hydraulisch zur „Selbstabdichtung“
 - ☺ Umwandlung 5-1-8 in die langzeitstabile 3-1-8-Phase
- Die begrenzte Reichweite des Lösungseindringens wird durch die Phasenanalyse belegt.

Quelle: D. Freyer, M. Gruner, T. Popp "Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs." Freiberg. Forschungsh. E15 – Naturwissenschaften, 1. Auflage, 2015, Verlag der TU Bergakademie Freiberg, ISBN 978-386012-516-8



Ifg Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Eigenschaften des MgO-Spritzbetons D4

- Einbau nach dem Trockenspritzverfahren (ohne Erstarrungsbeschleuniger)
- hohe mechanische Festigkeit (an der unteren Bandbreite des 5-1-8-Ortbetons D4); größer als 3-1-8-Beton (C3)
- geringe Durchlässigkeit ($< 10^{-18} \text{ m}^2$); kleiner als 3-1-8-Beton (C3)
- Selbstverheilungsmechanismus für potentielle (technologisch bedingte) Risse bei Zutreten von MgCl_2 -haltigen Lösungen mit Umwandlung in die langzeit-stabile 3-1-8-Phase ("Integritätsnachweis" bei Lösungszutritt- ohne signifikanten Festigkeitsverlust)
- Ergebnisse zum MgO-Spritzbeton aus CARLA sind übertragbar, allerdings sind Untersuchungen zum Kontaktverhalten (Haftfestigkeit, Permeabilität) und in situ Untersuchungen im Steinsalz erforderlich



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Umsetzung des MgO-Spritzbeton-Konzeptes für Endlager im Steinsalz - FuE-Bedarf aus MgO-SEAL

Verbesserung der
Baustofftechnologie

- Zugabe Feinsalzfraktion ($< 0,3 \text{ mm}$) → Konsistenz "klebriger"
- Zugabe Fasern (Glasfasern ? Schmelzbasaltfasern ?)
- Verbesserung der Vorort-Verarbeitungsprozesse (z.B. keine Unterbrechungen); verbessertes Handling durch Einsatz von Spritzrobotern
- Behandlung der Oberfläche (z.B. Reinigung, Bewetterung mit definierter Feuchte und Temperatur)

Schaffung einer
Datenbasis für Nachweise

- Untersuchungen zur Bewertung der Frühfestigkeit (Materialverhalten >1 bis 7 d); Konzeption eines Untersuchungsprogramms (Herausforderung: Realisierung Temp./ Zeitregime, Probennahme / Untersuchungsmethodik)
- Untersuchungen zum Kontaktverhalten Baustoff/Steinsalz; Konzeption eines Untersuchungsprogramms
- Zusammenfassende Untersuchungen zu Volumenänderungen des MgO-Betons; Konzeption eines Untersuchungsprogramms



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL

Umsetzung des MgO-Spritzbeton-Konzeptes für Endlager im Steinsalz - Arbeitskonzept für BMWi-Folgevorhaben (Projektskizze)

- (1) Partiieller Rückbau GV2:
 - Charakterisierung der BAG's
 - Verbandsfestigkeit
 - Lokale Permeabilität
 - Identifikation lokaler Fehlstellen
- (2) Verbesserung der Spritzbeton-Rezeptur / Technologie
 - Rezepturanpassung (Optimierung Zuschlagkörnung, MgO-Qualität)
 - Wirkung von Additiven (Fasern; Salzfraktion)
- (3) Handhabungsversuche zur Verbesserung der Spritzbeton-Technologie
- (4) Bereitstellung einer experimentellen Datenbasis
 - Kontaktverhalten zum Steinsalz (Hafffestigkeit, Permeabilität)
 - Untersuchungsprogramm zur Frühfestigkeit und zeitabhängiger Kompaktion, Abstimmung des Programms, Vergleichbarkeit mit anderen Materialien
- (5) Entwicklung einer geeigneten numerischen Nachweisführung



Das SANDWICH-Verschluss-System mit Äquipotenzialsegmenten

K. Emmerich, F. Königer, L. Delavernhe, R. Schuhmann

Kompetenzzentrum für Materialfeuchte - CMM



KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Großforschungszentrum in der Helmholtz Gemeinschaft

www.kit.edu

Inhalt



Struktur und Kompetenz des CMM



Idee zum SANDWICH-Verschluss-System



Funktionsnachweis im halb-technischen Maßstab



Untertägige Verschlüsse in Ibbenbüren



Zusammenfassung und Ausblick



Struktur und Kompetenz

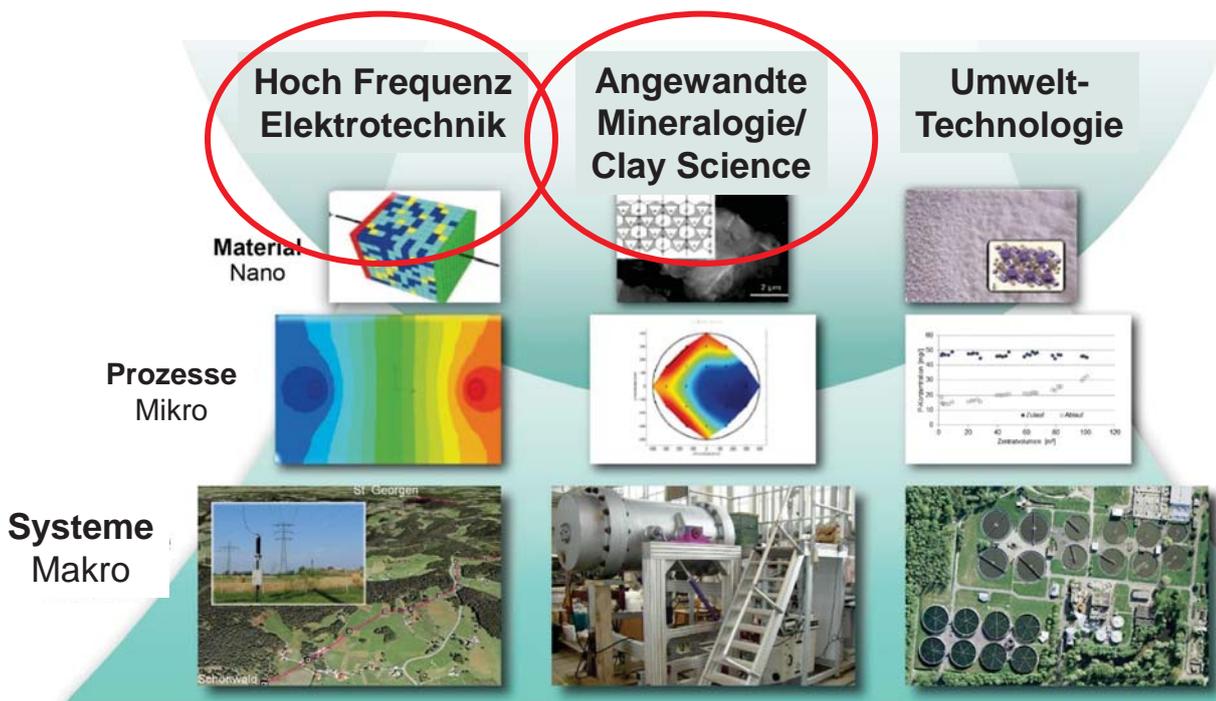


01. Oktober 2009

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



Struktur und Kompetenz



Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



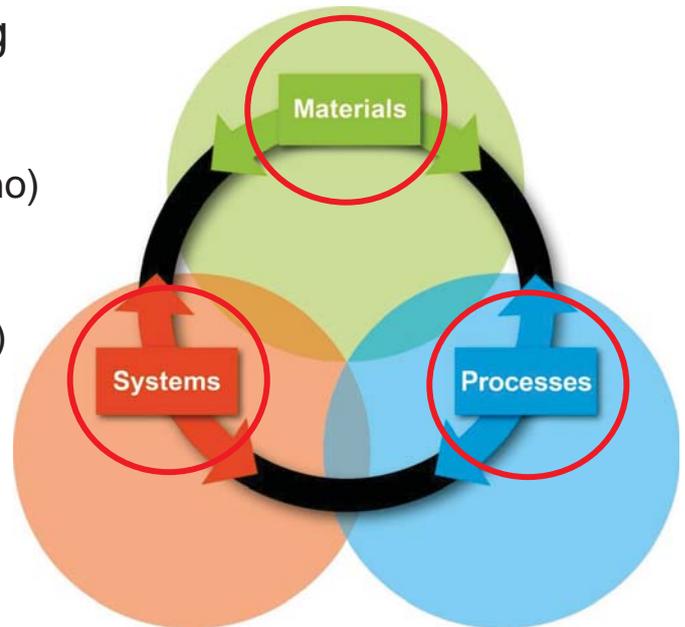


Struktur und Kompetenz



Grundlagen unserer Forschung

- ➔ Charakterisierung von Material (nano)
Angewandte Mineralogie
- ➔ Identifikation von Prozessen (mikro)
Sensor-Technologie
- ➔ Anwendung in Systemen (makro)
SANDWICH



Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



Idee zum SANDWICH-Verschluss-System



Anwendungen

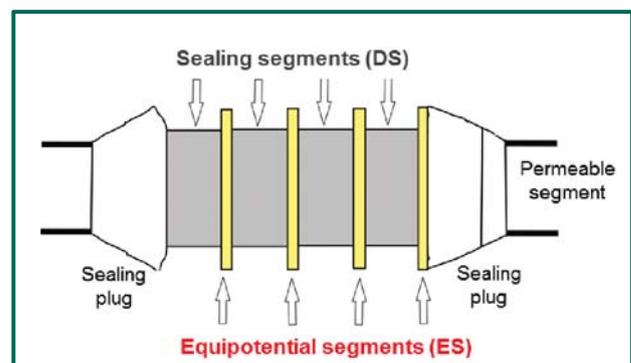
- Hydraulische Trennung untertägiger Grubenabschnitte
- Schacht- und Streckenverschluss von Grubenbauwerken und (End)-Lagerstätten von gefährlichen und radioaktiven Abfällen

Anforderungen

- Hydraulische Barriere
- Aufnahme mechanischer Kräfte
- Rückhalt gefährlicher Substanzen

Stand der Technik

- Monolithische Bentonitsegmente
Nachteile:
 - Vorlaufende Feuchtfrent/Fingering
 - Inhomogenes Quellen
 - Verformungen



Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.

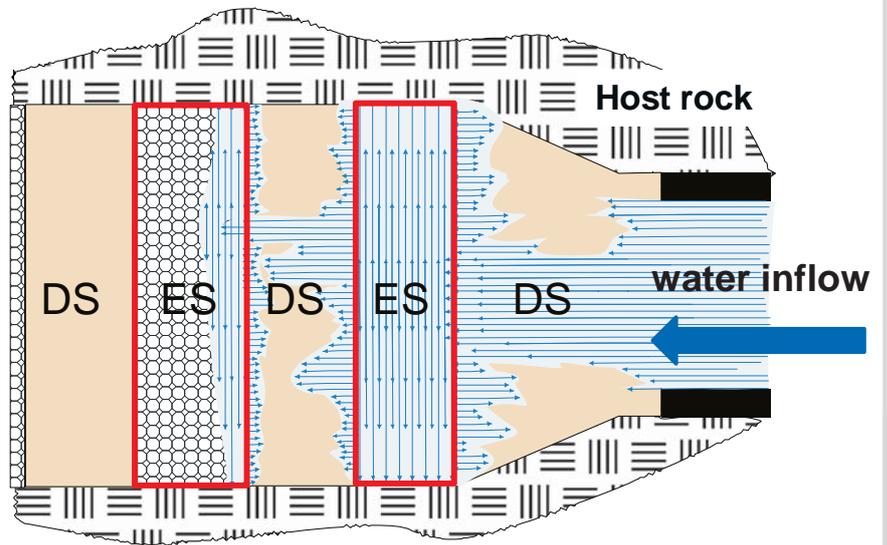




SANDWICH-Verschluss-System

Verschluss-System aus alternierenden Schichten aus Bentonit (DS) und rolligem Material (ES)

- DS: $k_f < 10^{-9}$ m/s
- ES: $k_f > 10^{-5}$ m/s
- Homogenes Bewässern und Quellen
- Selbstheilend
- Einstellbarer Quelldruck
- Plastische Eigenschaften



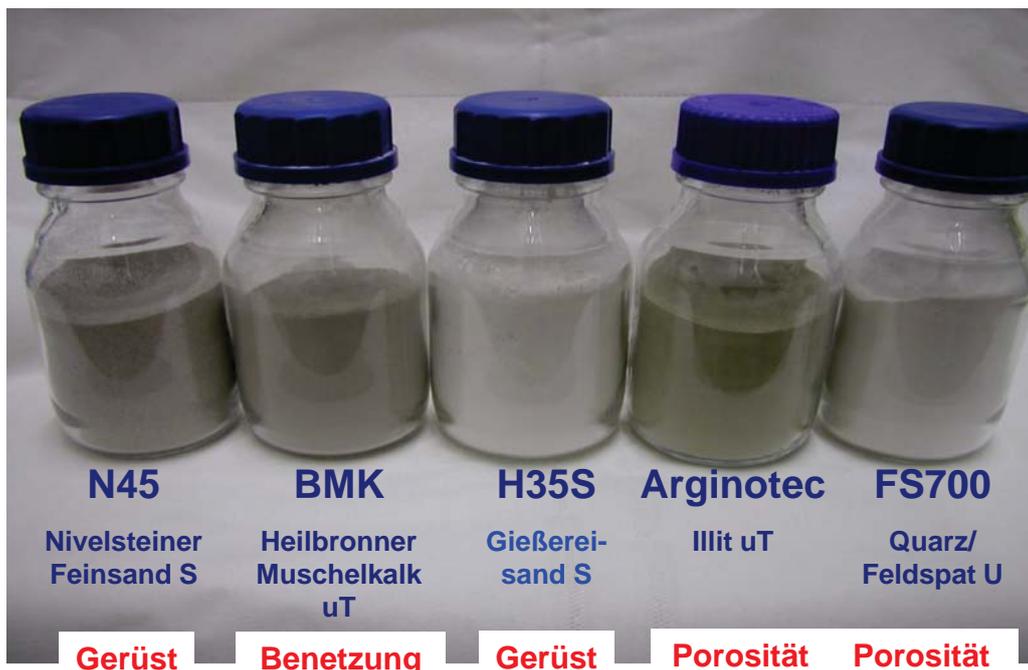
Deutsches Patent Nr. 10149972

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



SANDWICH-Verschluss-System

Das Äquipotenzial-Segment(ES)



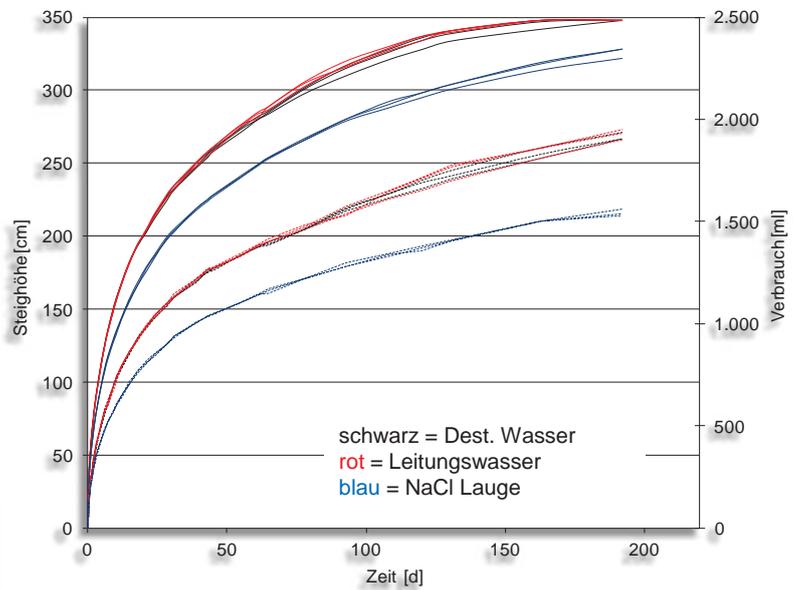
Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



SANDWICH-Verschluss-System



Das Äquipotenzial-Segment (ES)



Ergebnis: 3 Komponenten ohne Arginotec

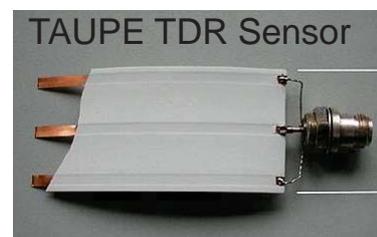
Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



SANDWICH-Verschluss-System



ES1 ES2 ES3 DS (Bentonit)



Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.





Funktionsnachweis im halbtechnischen Maßstab



HTV-1 und HTV-4:
Schacht-
verschluss



HTV-2 und HTV-3:
Strecken-
verschluss



Parameter	HTV-1	HTV-2	HTV-3	HTV-4
Dauer [d]	377	446	525	238 (269)
Dauer mit max. p [d]	202	140	508	127
Max. Druck [bar]	92.7	92.7	100	48
Fluid Volumen [L]	239	192	222	190

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



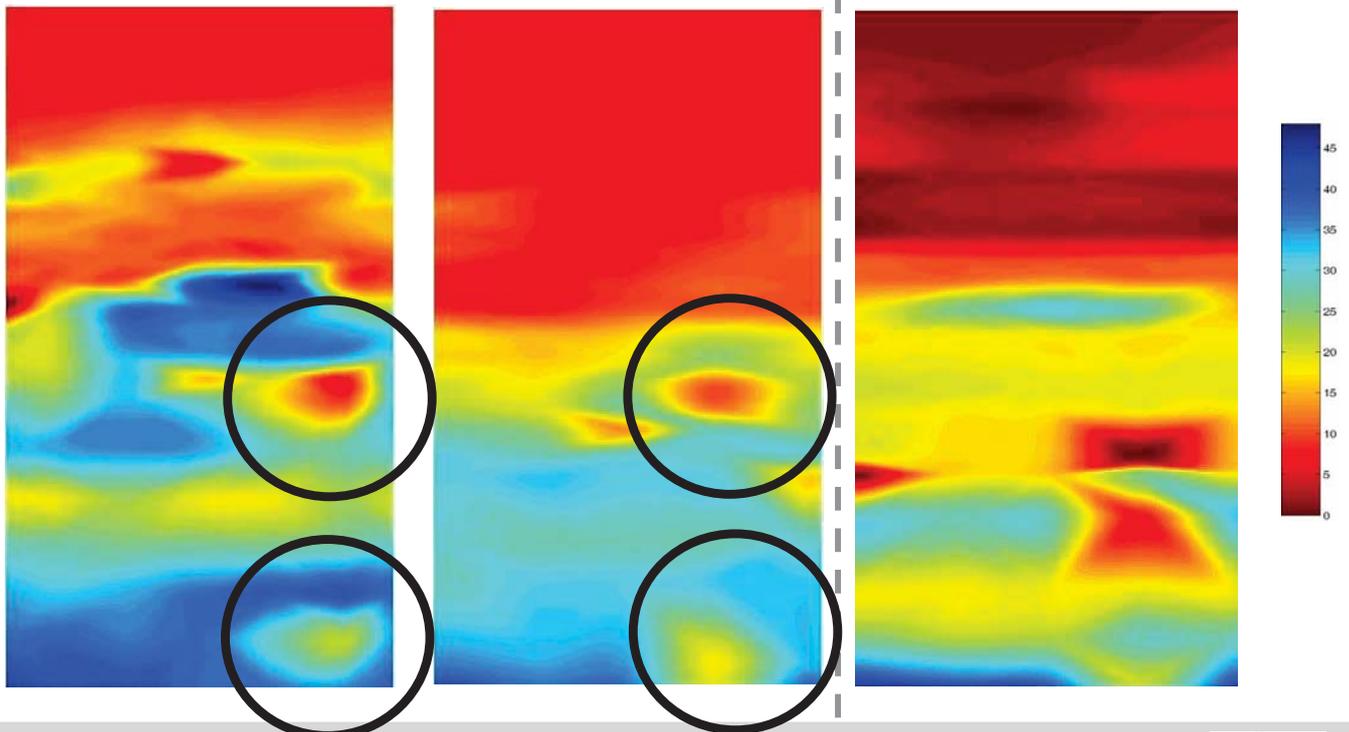
Funktionsnachweis im halbtechnischen Maßstab



HTV-1

HTV-2

HTV-3

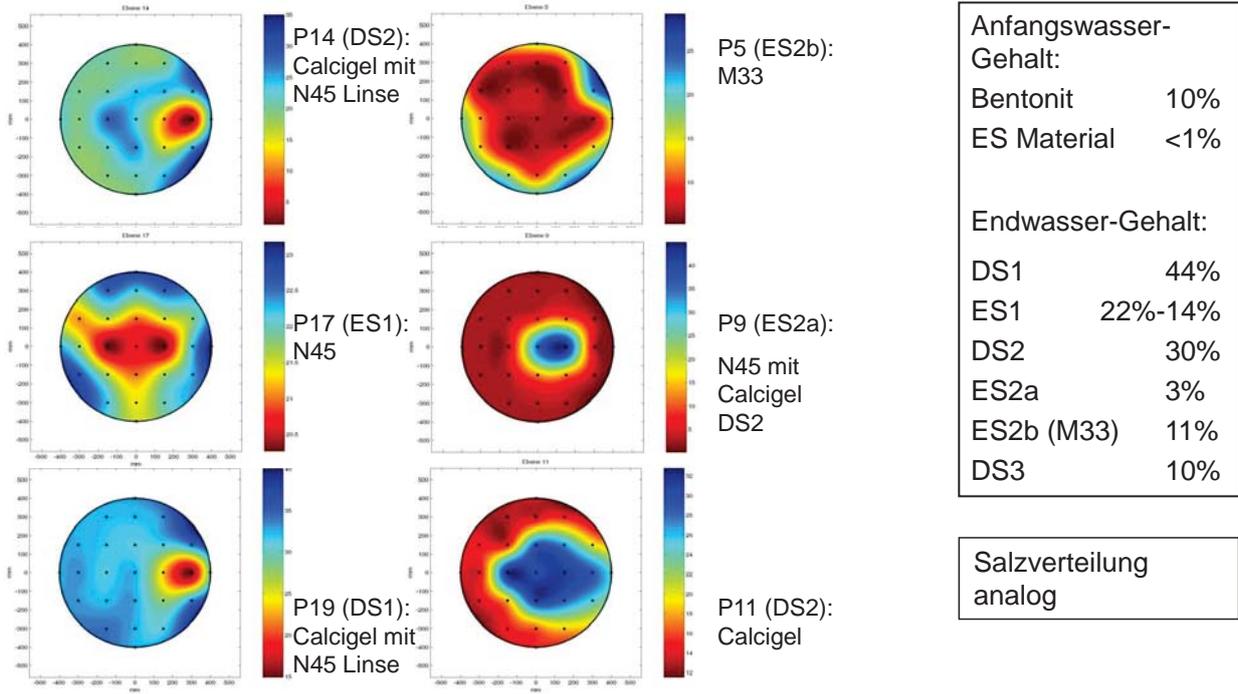


Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.





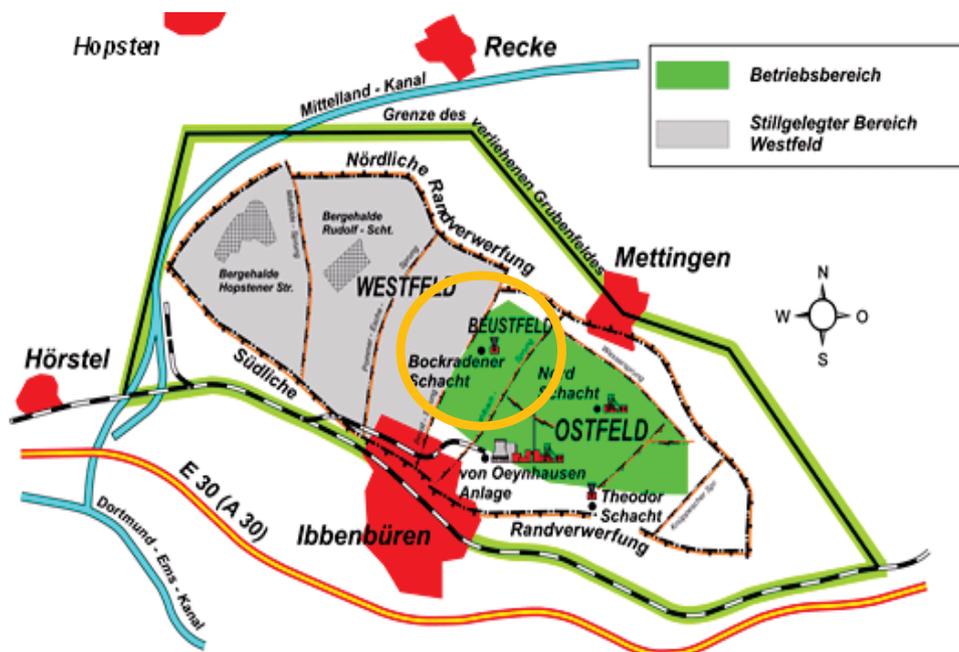
Funktionsnachweis im halbtechnischen Maßstab



Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



Grubenfeld in Ibbenbüren



Referenz: F. Wolters Clostermann

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.

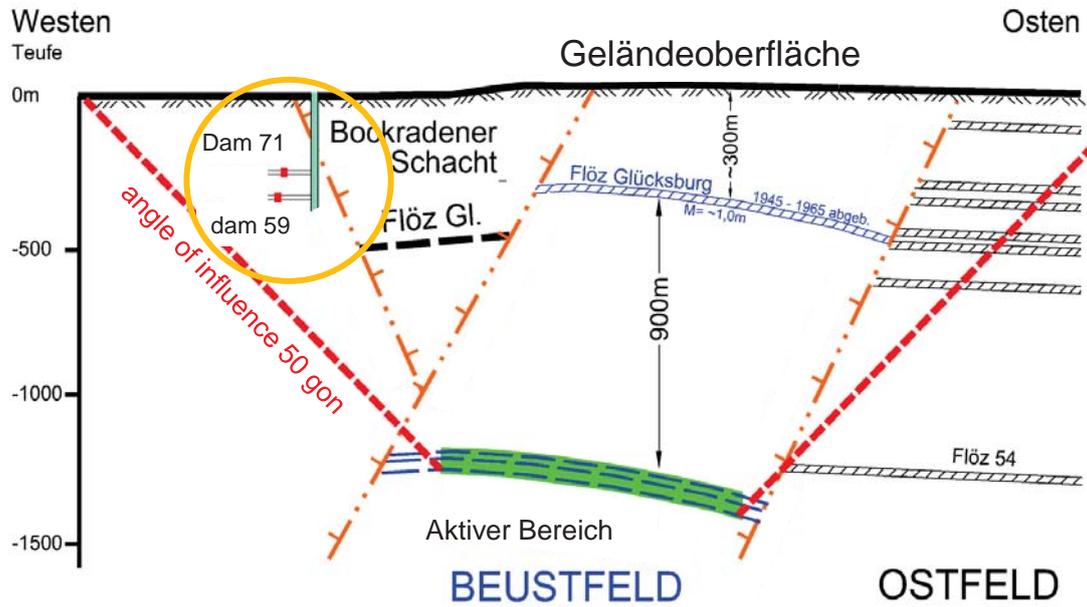




Grubenfeld in Ibbenbüren



Querschnitt



Referenz: F. Wolters Clostermann

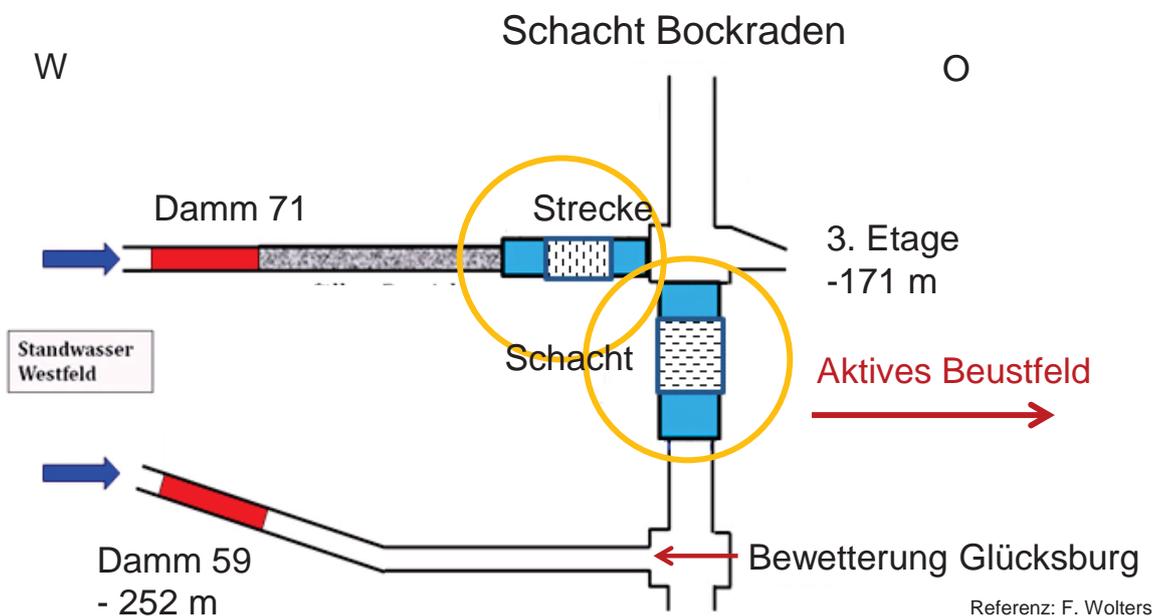
Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



Grubenfeld in Ibbenbüren



Bereiche der Verschlüsse



Referenz: F. Wolters Clostermann

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.

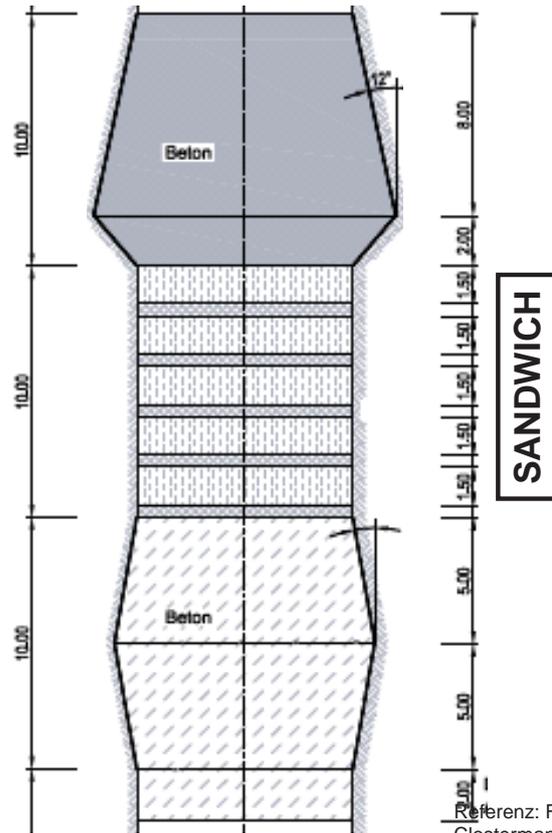




Grubenfeld in Ibbenbüren

Schachtverschluss

Bentonit-Dichte: 1.72 g/cm^3



Referenz: F. Wolters
Clostermann

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



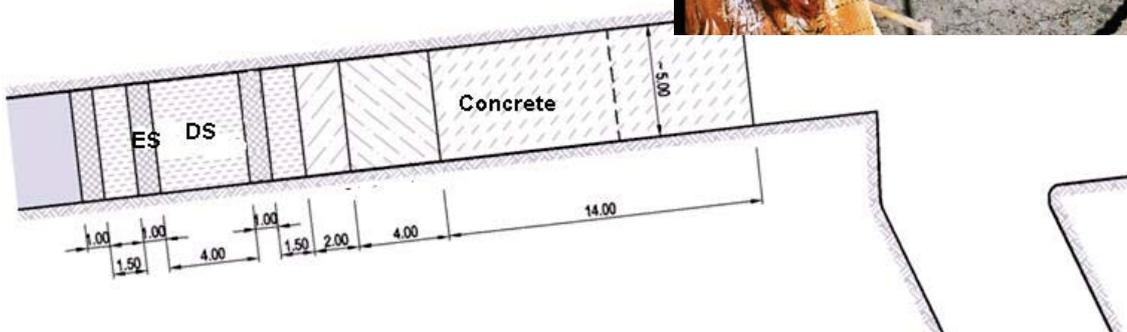
Grubenfeld in Ibbenbüren

Streckenverschluss

Dichte:

Äquipotenzialsegment 1.70 g/cm^3

Dichtsegment (Bentonit) 1.74 g/cm^3



Referenz: F. Wolters
Clostermann

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.





Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Funktion der Äquipotenzialsegmente und des SANDWICH Verschluss-Systems wurde für Schacht und Strecke nachgewiesen (halbtechnischer Maßstab)
- Full-Scale Umsetzung in Ibbenbüren
- Nachweis der bautechnischen Realisierbarkeit
- Bergrechtliche Zulassung in Ibbenbüren

Aber:

- Umsetzung im Kohlebergbau (Einfluss des Wirtsgesteins)
- Ziel: Mittelfristige Sicherheit, keine Langzeitsicherheit
- Kein Monitoring-System zum Funktionsnachweis



Zusammenfassung und Ausblick

Validierung des SANDWICH-Systems im Wirtsgestein „Ton“

Ort: Untertagelabor in Mont Terri

Vorprojekt (2 Jahre) mit

- Festlegung der Verschluss-Geometrie
- Festlegung der Materialien (ES und DS)
- Festlegung der Sensorik (hydraulisch und statisch)



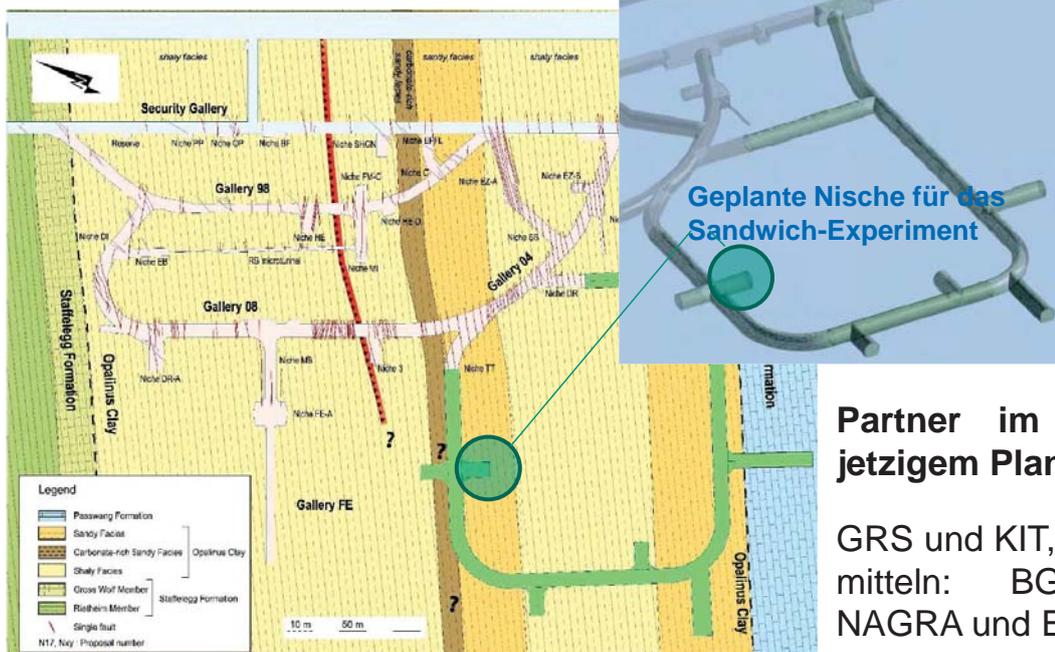
Zusammenfassung und Ausblick

HTV	Orientierung	DS	ES	Fluid	Test
1	Schacht	Calcigel (K+S)	N45/ N45,M33	4M NaCl	Anlage, Einbau, Sensorik, präferenzielle Wege
2	Strecke	Calcigel (K+S)	N45/ N45,M33	4M NaCl	Verhalten an der Firste
3	Strecke	Calcigel (K+S)	M1000/ M1000, N45	4M NaCl	Geometrie, Druckstufen (3x20 bar) (worst case)
4	Schacht	Calcigel (K+S)	N45	4M NaCl	Hydraulischer Kurz- schluss, Drucksensoren, Geometrie
5	Schacht	Calcigel (SSKG)	N45	Pearson	Fluid
6	Schacht	Ton SSKG	neu	Pearson	Material

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



Zusammenfassung und Ausblick



**Partner im Projekt (nach
jetzigem Planungsstand):**

GRS und KIT, sowie mit Eigen-
mitteln: BGR, Swisstopo,
NAGRA und ENRESA

Kooperationen: TU-BAF, Stephan Schmidt Gruppe (SSG), IfG-Leipzig, IBeWa und
ENSI (SW-B Mont Terri)

Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.

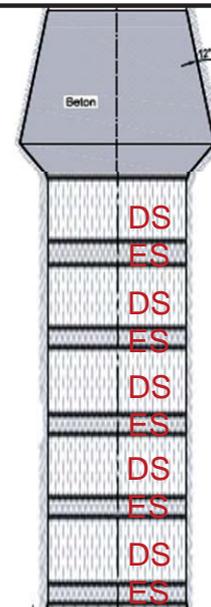


Zusammenfassung und Ausblick

Entwurf für das geplante Bauwerk (schematisch)

- Vertikalbohrung mit großem Durchmesser (Nischenabmessung richtet sich nach den Bauanforderungen, dem Bewässerungssystem und der Sensorik)
- SANDWICH-Verschluss-System (DS-ES)
- Künstliche Bewässerung (geplant von unten)
- Sensorausrüstung

Packer oder Betonabschluss



Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.



Danksagung

Herzlichen Dank ...

- TU-BAF, Prof. Kudla, M. Gruner, W. Gaßner, M. Hoffmann
- G. Kemper, E. Stefanescu, A. Steudel, D. Buqezi-Ahmeti, M. Heinle, G. Hefner, M. Krauss, L. Dusik, M. Grawert und dem Team des CMM

Förderungen

- TT Seed Fonds (KIT-IRM)
- PT-KA (BMBF Fördernummer 02C0922)
- Auftragsarbeiten als Beiträge zu ELSA 2 (TU-BAF)

Ibbenbüren - Team



Fachgespräch Verschlussysteme 03. - 04.05.2017 in Freiberg/Sa.

... und für Ihre Aufmerksamkeit

Kompetenzzentrum für Materialfeuchte - CMM



KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Großforschungszentrum in der Helmholtz Gemeinschaft

www.kit.edu

ELSA II - Asphalt und Bitumen als Baustoffe für Verschlussysteme



Uwe Glaubach – IBeWa Ingenieurpartnerschaft Freiberg
Wolfram Kudla – TU Bergakademie Freiberg

Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle
ELSA-Phase 2:
Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von
Funktionselementen (FKZ: 02E11193A)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

ELSA II - Asphalt und Bitumen als Baustoffe für Verschlussysteme

Gliederung

Bitumen als Abdichtmaterial

- Grundlagen
- Materialeigenschaften
- Abdichtprinzip
- Historie

Anwendungskonzepte

Untersuchungen

- Entwicklung eines Steinasphalts
- Bohrlochversuche

Zusammenfassung / Ausblick



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



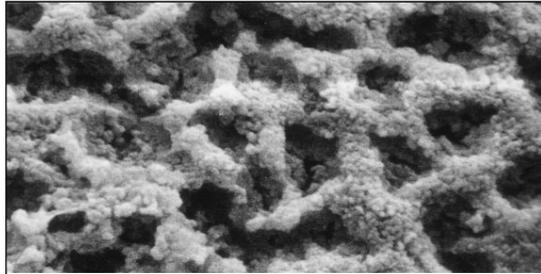
PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Chemie des Bitumens:

In einfachster Näherung handelt es sich bei Bitumen um eine Dispersion von hochmolekularen und polaren Asphalt-Harz-Verbindungen in einer weniger polaren öligen Maltenphase, wobei die Volumenkonzentration der Asphaltpartikel die temperaturabhängige Zähigkeit bestimmt.

Natürliche Bitumen und Asphaltvorkommen sind das „End“-Produkt einer vorangeschrittenen in situ Biodegradation von (Roh)-Erdöl im Zusammenspiel mit Wasser und Temperaturen unterhalb von 90 °C.

Die natürliche Biodegradation in Erdöllagerstätten (Bildung von Naturasphalt) vollzieht sich über Zeiträume von mehreren Millionen Jahren.



Loeber, L.; Sutton, O.; Morel, J., et al. (1996): "New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy"; Journal of Microscopy-Oxford; 182: S. 32-39

4 µm

kolloidale Netzwerkstruktur der Asphaltene in einem Bitumen



Naturasphaltsee auf Trinidad



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



Rheologie des Bitumens:

Stoffmodell	idealelastischer Körper	idealplastischer Körper	Idealviskose Flüssigkeit	komplexe Flüssigkeit
Vorstellung				
Material	Beton, Bentonit, Asphalt mit hohem Feststoffanteil			Bitumen



Konventionelle Vorstellungen aus der Festkörpermechanik spielen keine Rolle:

- Flüssigkeiten besitzen keine Steifigkeit sondern eine Zähigkeit
- Flüssigkeiten haben keine Festigkeit
- Flüssigkeiten haben dauerhaft keine Risse und durchgängige Poren- bzw. Blasennetzwerke

Optimale Abdichtbitumen müssen als einfache (zähe) Flüssigkeit vorliegen.

- läuft seit 1927 an der Universität von Queensland in Australien
- bisher 9 Tropfen gefallen (zuletzt 04/2014)
- Webcam-Bild von letzter Woche



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

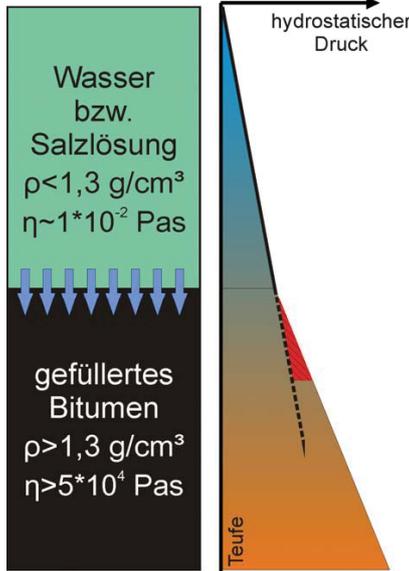


Aktives Abdichtungsprinzip:

- Die Abdichtungswirkung wird durch den Auftrieb und den Viskositätskontrast erzielt.
- Die Dichte (reines oder beschwertes Bitumen) steuert den Auftrieb.
- Die Viskosität steuert die Lagestabilität.
- Das Bitumen muss mobil (im Sinne einer Flüssigkeit) vorliegen.

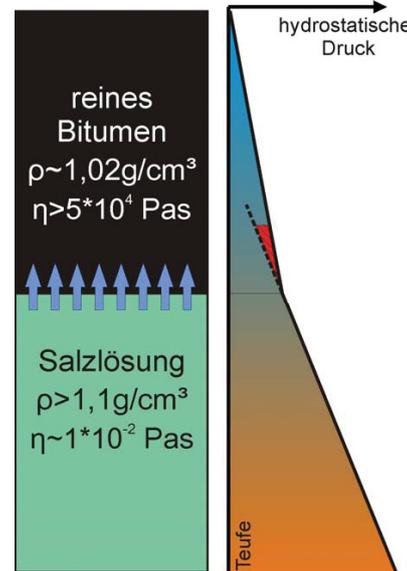
Bitumen als Abdichtmaterial

Lösungsangriff aus dem Hangenden



Hydrostatische Abdichtung

Lösungsangriff aus dem Liegenden



Hydraulische Abdichtung



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

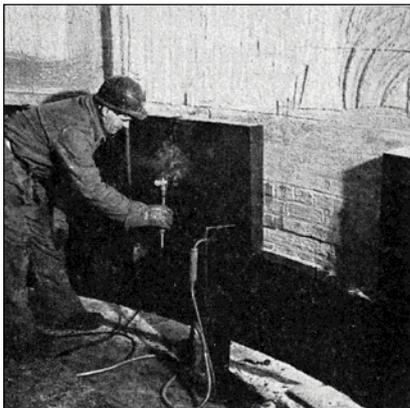


Verantwortung für Generationen
Responsibility for Generations
DBE TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Anwendung in Schächten:



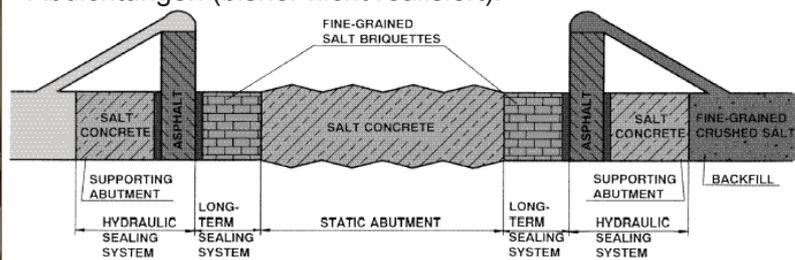
Bitumen als Abdichtmaterial

Gefüllerte Bitumen (weiche Bitumensorten) sind seit Jahrzehnten als aktives Dichtmittel im Schachtbau im wasserführenden nicht standfesten Gebirge eingesetzt worden (häufig bei Gefrierschächten). Anfänglich wurde der Asphalt als unterkühlte Blöcke „vormontiert“.

Später wurde das Material heiß vergossen, wobei auch der Verguss unter bis zu 400 m Stützsuspension (bei Schachtbohrverfahren) praktiziert wurde.

Prinzip einer dichtenden Asphaltfuge zwischen innerem und äußerem Ausbau.

Das Abdichtprinzip und der Flüssigkeitscharakter des Bitumens zwang zu Sonderkonzepten in horizontalen Abdichtungen (bisher nicht realisiert).



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



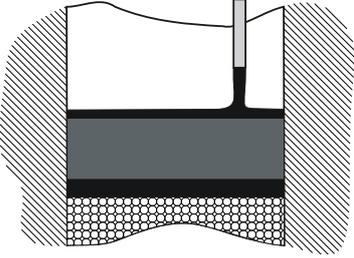
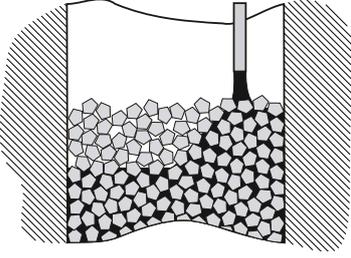
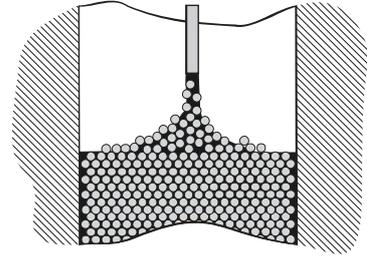
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



Verantwortung für Generationen
Responsibility for Generations
DBE TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

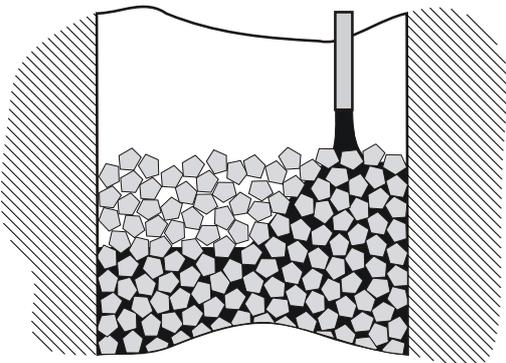
Bitumensandwich Harte Schale – Weicher Kern	Bitumen verfüllte Schottersäule	Dichter Steinasphalt ("selbstverdichtend")
Abdichtung	Abdichtung & Lastabtrag	Abdichtung & Lastabtrag
		
Destillations- und Oxidationsbitumen	Basaltschotter 32 / 63mm + Destillationsbitumen	Abgerundeter Basaltschotter 20 / 40 mm + Destillationsbitumen
KONRAD	ERAM	in Entwicklung



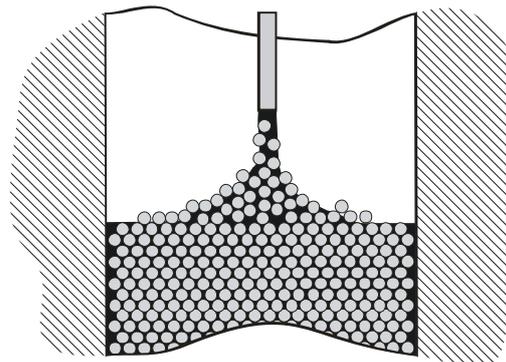
Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



Weiter-entwicklung



konventioneller Bitumenverguss

Vorteile Dichter Steinasphalt gegenüber der Bitumen verfüllten Schottersäule:

- kontinuierlicher und einfacher Einbau
- schnellerer Einbau
- vergleichsweise homogenere Einbauqualität
- höhere Temperaturen = bessere Benetzung und Penetration des Gebirgsstoßes (unter Inkaufnahme höherer Thermospannungen = Nachteil?)



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765





Auswahl eines geeigneten Stützkorns



Bemessung des optimalen Bindemittelgehalts

Praktikable Umsetzbarkeit



Untersuchungsschwerpunkte im Vergleich zum Stand von W. & T. :

- Korngrößen- & Kornformverteilung der Körnung
- Schüttverhalten der Körnung
- Drucksetzungsverhalten der Körnung

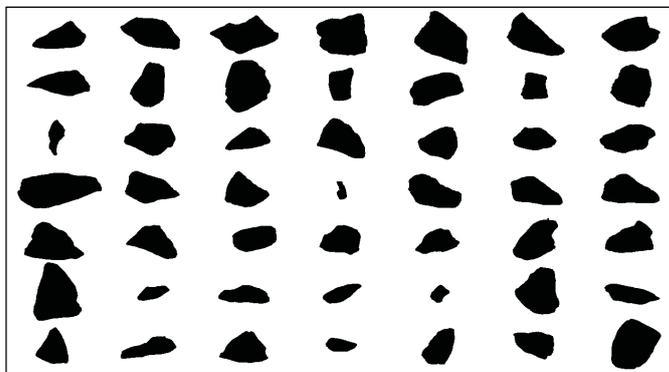
Nr.	Bez.	Kornband	Korndichte	Herkunft	Kornform
1	BK-20/32	20 – 32 mm	3046 kg/m ³	Pechbrunn /Bayern	Brechkorn
2	BK-32/56	32 – 56 mm	3046 kg/m ³	Pechbrunn /Bayern	Brechkorn
3	BK-32/63	32 – 63 mm	2888 kg/m ³	Adelebsen	Brechkorn
4	RK-20/40	20 – 40 mm	2965 kg/m ³	Tschechien	stark kantengerundetes Brechkorn
5	RK-40/80	40 – 80 mm	2965 kg/m ³	Tschechien	stark kantengerundetes Brechkorn



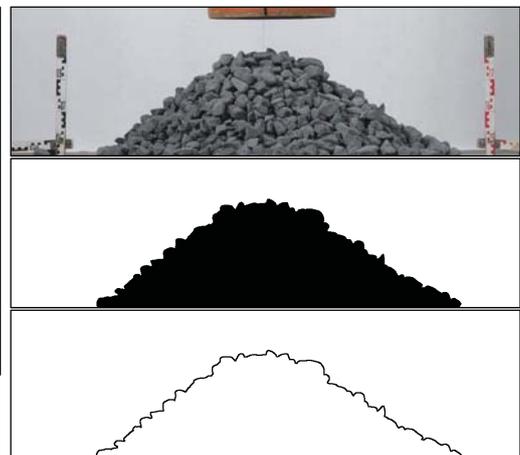
Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



Typische Kornformen eines Schotters 32/63 (CPA-Analyse)



Ergebnisse:

- Brechkorn besitzt eine vergleichsweise „sperrige“ Kornform mit ungünstigen Verdichtungseigenschaften
- Rundkornschotter erreicht bei vergleichbarer Korngrößenverteilung eine höhere Einbaudichte bzw. geringere Einbauporosität als Brechkornschotter
- geringere Reibungsbegabung des Rundkornschotters

Schotter	mittl. Porenanteil der Schüttung	mittl. Schüttwinkel
BK-20/32	0,453	41,6
BK-32/56	0,444	42,0
BK-32/63	0,420	43,3
RK-20/40	0,372	39,4

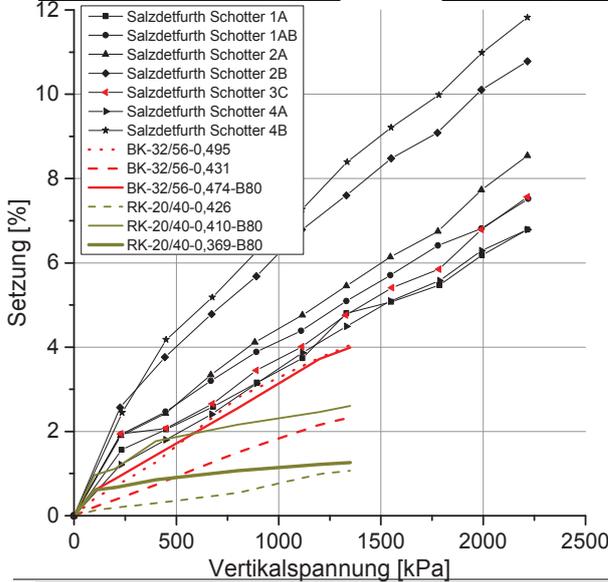


Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765





Versuchsergebnisse im Vergleich zu Brechkornschotter:

- Rundkornschotter zeigen bis zu 75 % weniger Kornbruch
- Rundkornschotter zeigen deutlich höhere Steifemoduln
- Bitumen als „Schmiermittel“ erhöht das Setzungspotential des Rundkornes
- Schüttungen aus bitumentumhüllten Rundkornschotter zeigen unter Belastungen bis zu 50 % geringere Setzungen



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

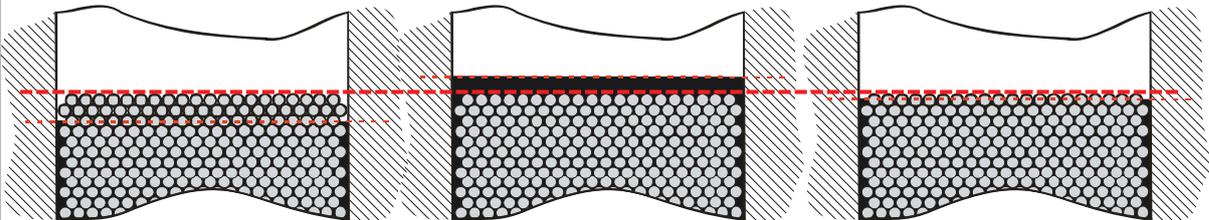


Verantwortung für Generationen
Responsibility for Generations
DBE TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Optimierung des Einbauverfahrens:



zu niedriger Bitumenspiegel bei zu niedrigem Bitumenanteil im Mischgut

zu hoher Bitumenspiegel bei zu hohem Bitumenanteil im Mischgut

optimaler Bitumenspiegel bei optimalem Bitumenanteil im Mischgut



Ergebnisse:

- optimaler Bindemittelanteil ~ 22 Ma.-%
- optimale Einbautemperatur 140 °C bei Bitumen 70/100
- Einbauporosität < 39,6 % (großmaßstäblich bis 37 % möglich)



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

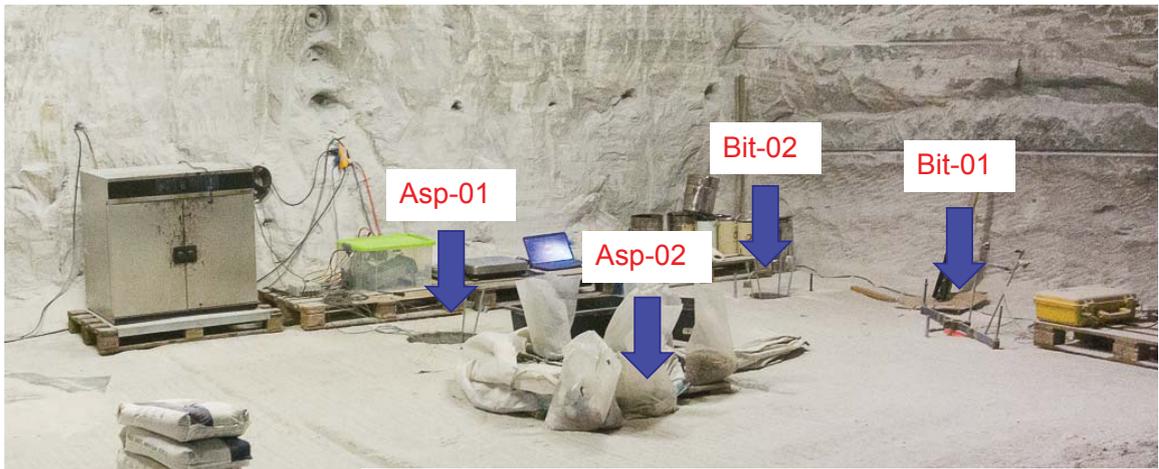


Verantwortung für Generationen
Responsibility for Generations
DBE TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH

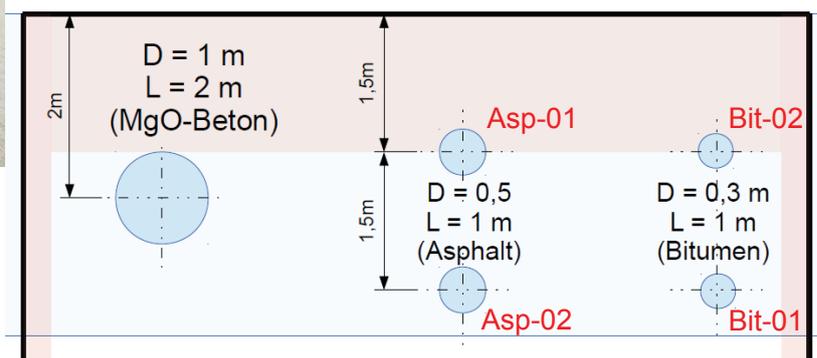


PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Versuchsstandort in der Grube Sondershausen:



Versuchsnische schonend
2014 aufgefahren, Na₂ γ
Sohle gefräst,
In situ Gaspermeabilität des
Gebirges 10⁻²² bis 10⁻²¹ m²



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



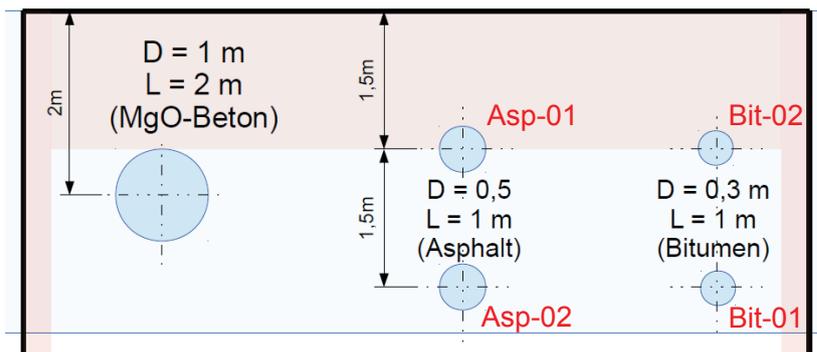
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Versuchsstandort in der Grube Sondershausen:

Versuch	Dichtungssystem	Dichtungsgeometrie	Untersuchungen	Status
Bit-01	Bitumen-sandwich	Ø = 30 cm L = 14 cm	Temperatur, integrale Gaspermeabilität, Rückbau	abgeschlossen
Bit-02	Bitumen-sandwich	Ø = 30 cm L = 9 cm	integrale Gas- und Lösungspereabilität, Rückbau	abgeschlossen
Asp-01	Bitumen verfüllter Schotter	Ø = 50 cm L = 30 cm	Temperatur, integrale Gas- und Lösungspereabilität, Rückbau	läuft
Asp-02	Steinasphalt	Ø = 50 cm L = 40 cm	Temperatur, integrale Gas- und Lösungspereabilität, Rückbau	läuft



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017

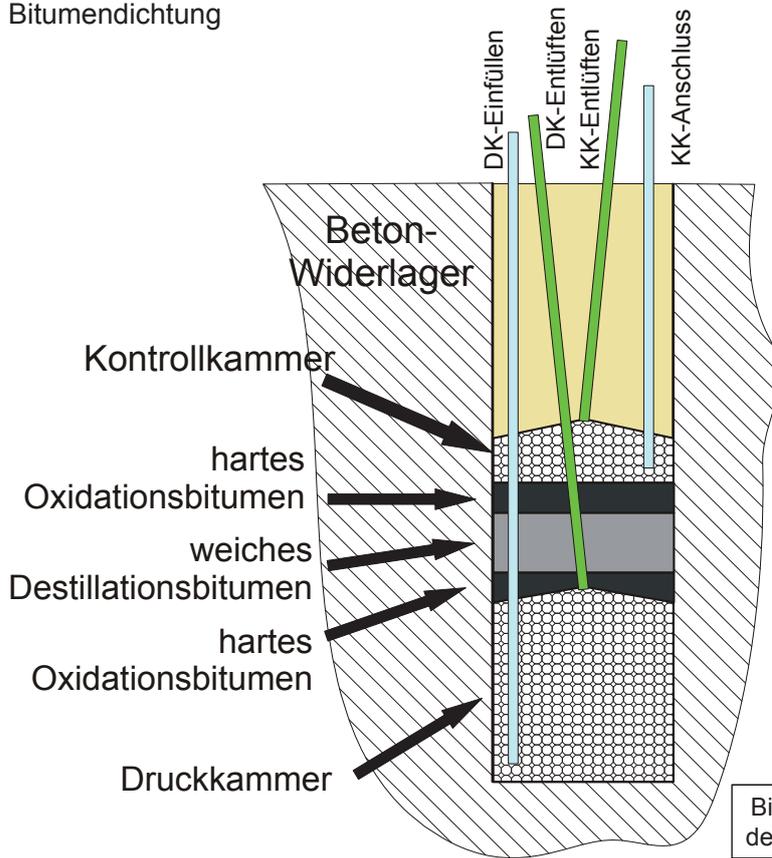


TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Bitumendichtung



Bitumenvoranstrich auf der Kontur der Dichtung



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

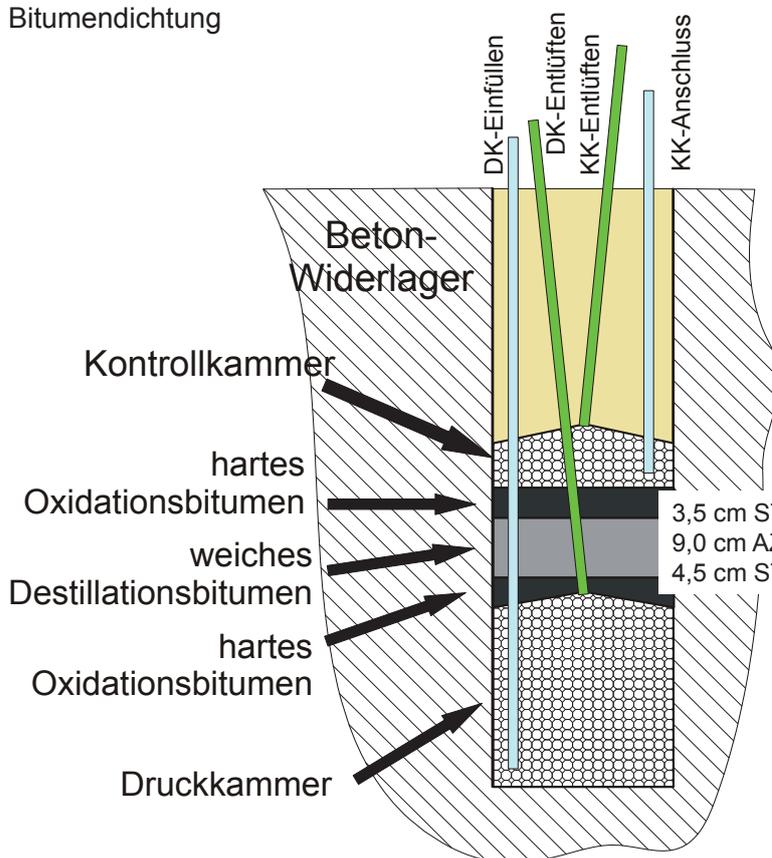


Verantwortung für Generationen
Responsibility for Generations
DBE TECHNOLOGY GmbH



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Bitumendichtung

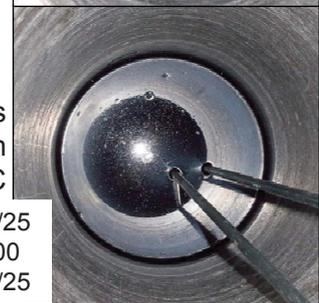


Hartes Bitumen
180 °C

Weiches Bitumen
170 °C

3,5 cm STELOX 85/25
9,0 cm AZALT 70/100
4,5 cm STELOX 85/25

Hartes Bitumen
180 °C



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

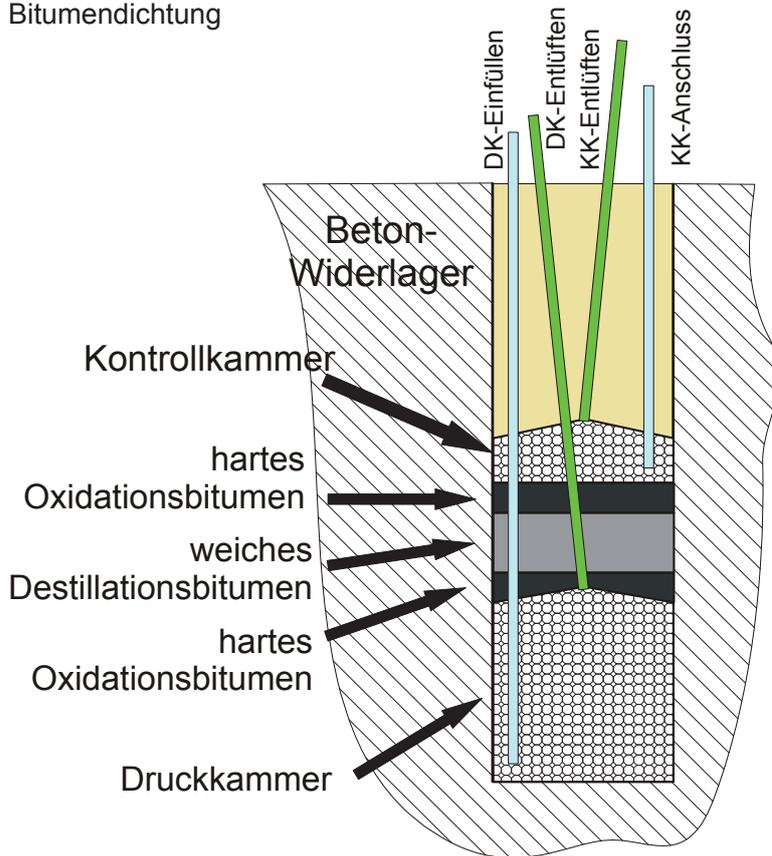


Verantwortung für Generationen
Responsibility for Generations
DBE TECHNOLOGY GmbH



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Bitumendichtung



Betonage des Widerlagers mit 80 kg MgO-Beton der Rezeptur C3
Widerlagerlänge ~ 50 cm



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Ergebnisse Permeabilitätsbestimmung (modellgestützte Analyse):

Bit-01 Bitumensandwich:

Initiale Permeabilität in der Pilotbohrung bestimmt $\rightarrow 6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
1,2 bar Gasdruck für 80 Tage \rightarrow Gaspermeabilität $< 3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$
10 bar Gasdruck für 23 Tage \rightarrow Gaspermeabilität $< 2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$
Keine Lösungsbeaufschlagung!

Bit-02 Bitumensandwich :

Initiale Permeabilität in der Pilotbohrung bestimmt $\rightarrow 5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
1,2 bar Gasdruck für 1 Tag \rightarrow keine Permeabilität sinnvoll bestimmbar
10 bar Gasdruck für 5 Tage \rightarrow Gaspermeabilität $< 6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$
11 bar Lösungsdruck für 12 Tage \rightarrow Lösungspereabilität $< 1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$

Asp-01 Bitumen verfüllte Schottersäule:

Initiale Permeabilität in der Pilotbohrung bestimmt $\rightarrow 2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
1 bar Gasdruck für 58 Tage \rightarrow Gaspermeabilität $< 4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$
Lösungsmessungen laufen gegenwärtig

Asp-02 Dichter Steinasphalt:

Initiale Permeabilität in der Pilotbohrung bestimmt $\rightarrow 1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
1,2 bar Gasdruck für 18 Tage \rightarrow Gaspermeabilität $< 2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$
Lösungsmessungen laufen gegenwärtig

Die Durchlässigkeiten der Versuchsaufbaue liegen 1 bis 2 Zehnerpotenzen über dem Niveau des Wirtsgesteins und sind aber mit $< 10^{-19} \text{ m}^2$ sehr niedrig.



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

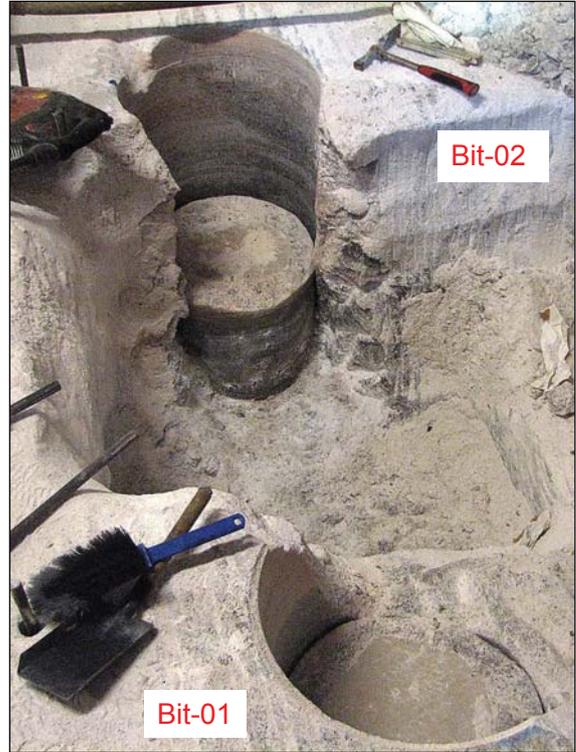


PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Ergebnisse Rückbau (Überbohren mit Ø 50 cm)

Angrenzendes Salzgestein im Konturbereich des Bit-02 deutlich feuchter (0,02 % → 0,16 %)

intakte Bergung des überbohrten Dichtungsbereiches bei Bit-02 misslang, da Steinsalz offensichtlich entfestigt



Freigelegte Sandwichdichtung des Bit-01 (Gasdruckbeaufschlagung 80 d @1 bar + 23 d @10 bar)



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765

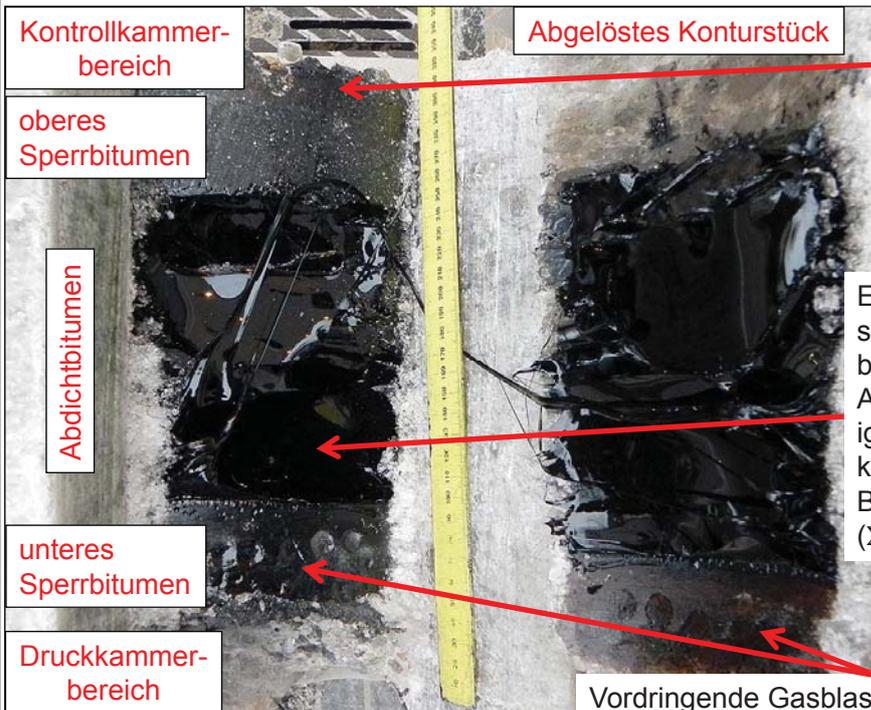


DBE-TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Ergebnisse Rückbau (Bit-01, Gasdruckbeaufschlagung 80 d @1 bar + 23 d @10 bar)



Oberes Sperrbitumen ist ca. 15 bis 20 mm in den Porenraum der Kontrollkammer eingedrungen.

Generell löste sich das Oxidationsbitumen vom Konturstück, während das Destillationsbitumen haftete.

Entlang der unteren Sperrschicht gedrungenes Gas bildete Gasblasen im Abdichtbitumen in Abhängigkeit des in die Kontrollkammer abgepressten Bitumenvolumens ($\Sigma \sim 100 \text{ cm}^3$)

Vordringende Gasblasen lösten das untere Sperrbitumen von der Kontur (Abdrücke von Gasblasen zwischen Sperrbitumen und Kontur)



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



DBE-TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH



PTKA
Project Management Agency Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology

Ergebnisse Rückbau (Bit-01, Gasdruckbeaufschlagung 80 d @1 bar + 23 d @10 bar)

Untersuchungen - Bohrlochversuche



Penetration des Sperrbitumens in den Porenraum der Kontrollkammer



Das Abdichtbitumen lies sich nachträglich händisch abziehen und offenbarte das mit Bitumen penetrierte Rissnetzwerk im Steinsalz.



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



Untersuchungen - Bohrlochversuche

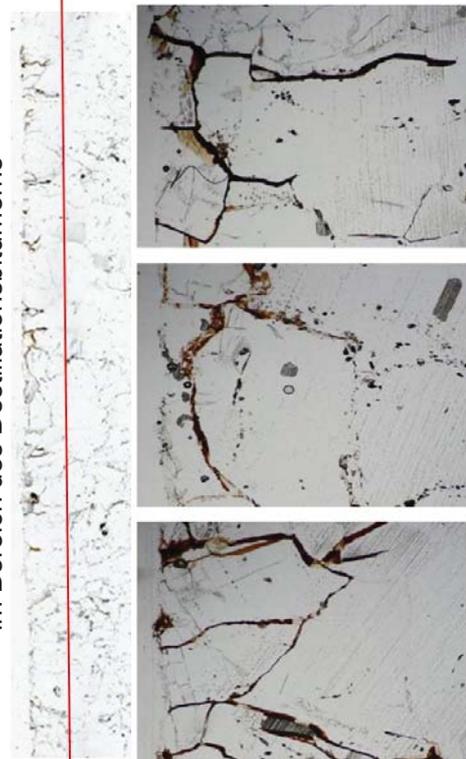
Ergebnisse Rückbau (Dünnschliffe DBEtec)

~ 5 mm
Steinsalz-Konutur
im Bereich des Destillationsbitumerns



Steinsalz-Konutur
im Bereich des Destillationsbitumerns

Bit-02



Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Freiberg, 03. - 04.05.2017

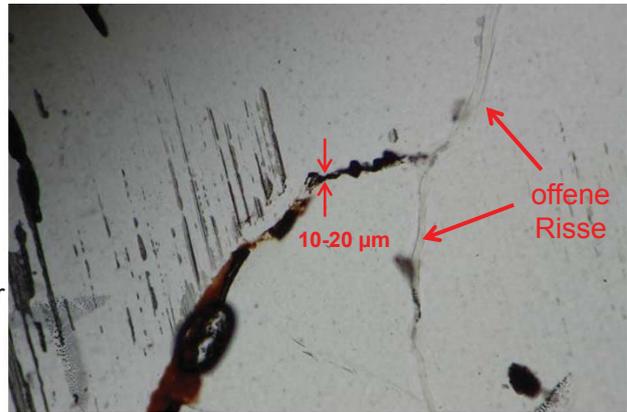


TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



Ergebnisse Rückbau (Dünnschliffe DBEtec)

- Das Destillationsbitumen ist bis max. 5 mm in den etwas aufgelockerten Saumbereich des Steinsalzes eingedrungen. Viel größer scheint die ALZ auch nicht zu sein.
- Feine Risse bis in den 10-er µm-Bereich werden vom Bitumen erreicht.
- Kleine Resthohlräume am inneren Rand der ALZ verbleiben lokal. Vermutlich ist des Bitumen dort bereits zu kalt bzw. zu dickflüssig für eine vollständige Ausfüllung im Versuchszeitraum.
- Unterscheidung zwischen Bitumenvoranstrich und Bitumenverguss mit Schwierigkeiten verbunden
- Höhere Konturtemperaturen bei alternativen Einbautechnologien könnten das Eindringen des Bitumens verbessern, jedoch eventuell auch mehr Risse initiieren.




 Rückbau der Asphalt-Versuche



Fachgespräch Verschlussysteme
 Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
 Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
 BERGAKADEMIE FREIBERG
 Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



PTKA
 Project Management Agency Karlsruhe
 Karlsruhe Institute of Technology

- Bitumen und Asphalte haben optimale Abdichteigenschaften, wenn der Flüssigkeitscharakter des Bindemittels *Bitumen* wirksam werden kann.
- Bitumen und Asphalte sind im wasserdichten Schachtausbau Stand der Technik.
- Bitumen unterliegt als organisches Material einer biologischen Degradation, wobei die Degradationsraten unter Endlagerbedingungen im Salinar z.Zt. nicht quantifiziert werden können. Natürliche Bitumenvorkommen sind ein Indiz für vernachlässigbar geringe Degradationsraten.
- Der entwickelte *Dichte Steinasphalt* ist eine Alternative zur Bitumen verfüllten Schotter säule. Die dabei eingesetzten Rundkornschotter zeigen als Korngerüst höhere Steifigkeiten und bessere Verarbeitungseigenschaften als gebrochener Schotter.
- In Bohrlochversuchen konnte gezeigt werden, dass Abdichtungen aus Bitumen eine wirksame Barriere gegenüber angreifenden Fluiden sind, wobei das Bitumen als aktives Abdichtmaterial permeable Wegsamkeiten penetriert.
- Durch den Heißeinbau des Bitumens wurden Thermospannungen in der Gebirgskontur initiiert, welche die technische Dichtheit des Gesamtsystems Salzgebirge – Bitumen nicht beeinträchtigen.
- Für die Modellierung des rheologischen Materialverhaltens des Bitumens und der physikochemischen Interaktion des Bitumens mit mineralischen Oberflächen sind gegenwärtig nur wenige Werkzeuge im Einsatz.
- Die Raster-Kraftmikroskopie und Simulationen auf Basis der Molekulardynamik werden in jüngerer Zeit zunehmend in der internationalen Asphaltforschung eingesetzt.
- In der *Endlager-community* ist Bitumen ein unterrepräsentierter Baustoff, obwohl er in nahezu allen gegenwärtigen Endlager-Verschlusskonzepten in Deutschland enthalten ist.



Fachgespräch Verschlussysteme
 Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
 Freiberg, 03. - 04.05.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
 BERGAKADEMIE FREIBERG
 Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



PTKA
 Project Management Agency Karlsruhe
 Karlsruhe Institute of Technology

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

GLÜCK AUF!



Dank an den Projektträger
PTKA-WTE und das BMWi.

Untertägiger Großversuch für vertikale Abdichtenelemente aus Schotter und heiß eingebautem Bitumen

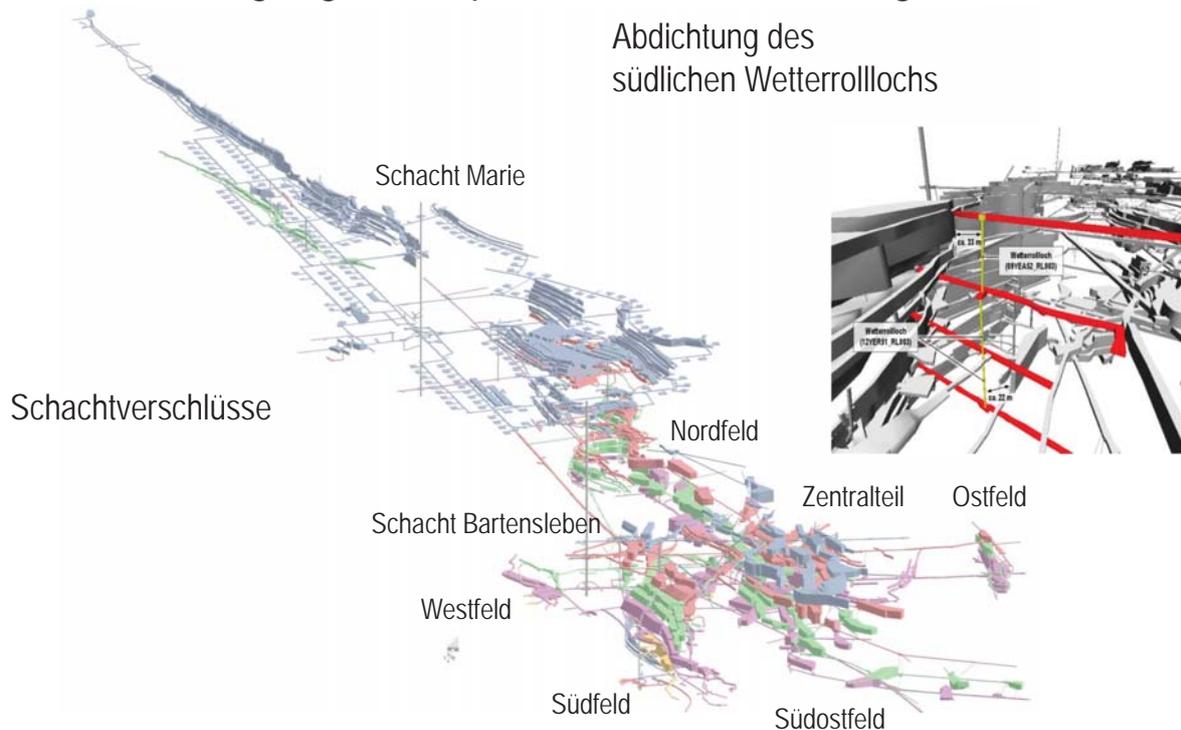
B. Stielow, J. Wollrath,
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Salzgitter;
M. Kreienmeyer, T. Schröpfer, J. Bauer,
Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine

Fachgespräch Verschlussysteme
Konzepte, Baustoffe, Simulation,
Demonstration und Anwendung
Freiberg
03.05. - 04.05.2017

www.dbe.de



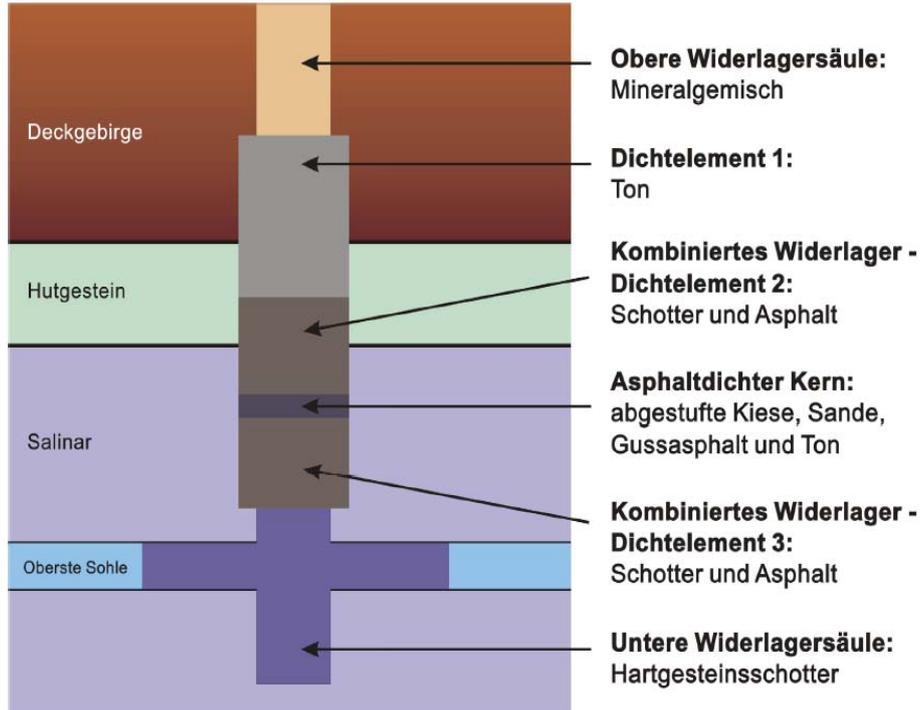
Stilllegungskonzept - Vertikale Abdichtungen



www.dbe.de



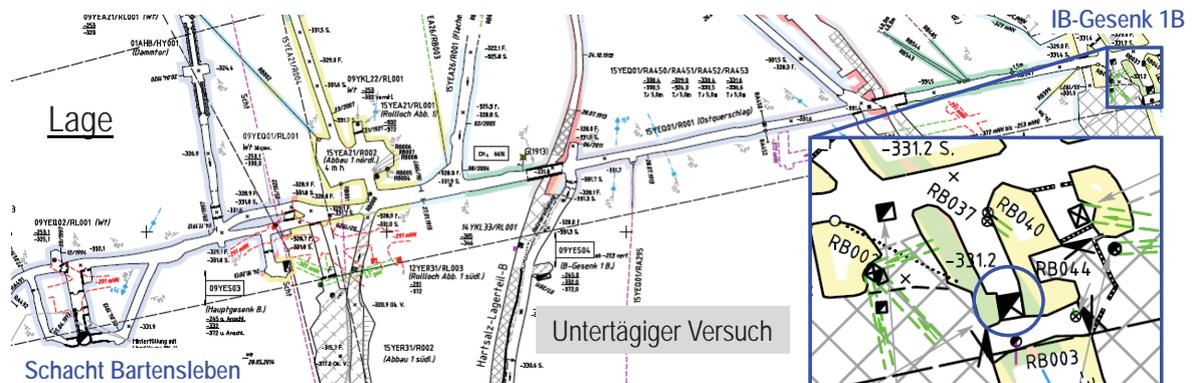
Verschlusskonzept für die Schächte



www.dbe.de



Gestuftes Versuchskonzept



www.dbe.de



Versuchsziele

Nachweis der Handhabbarkeit

- zur Logistik für die Bereitstellung und den Einbau,
- zu den QS-Maßnahmen,
- zu den Arbeits- und Emissionsschutzmaßnahmen

sowie

- Erfassung des thermischen Verhaltens des Systems Bitumen-Schotter-Steinsalz
- Nachweis der Funktionalität des Dichtelements über den hydrostatischen Bitumendruck

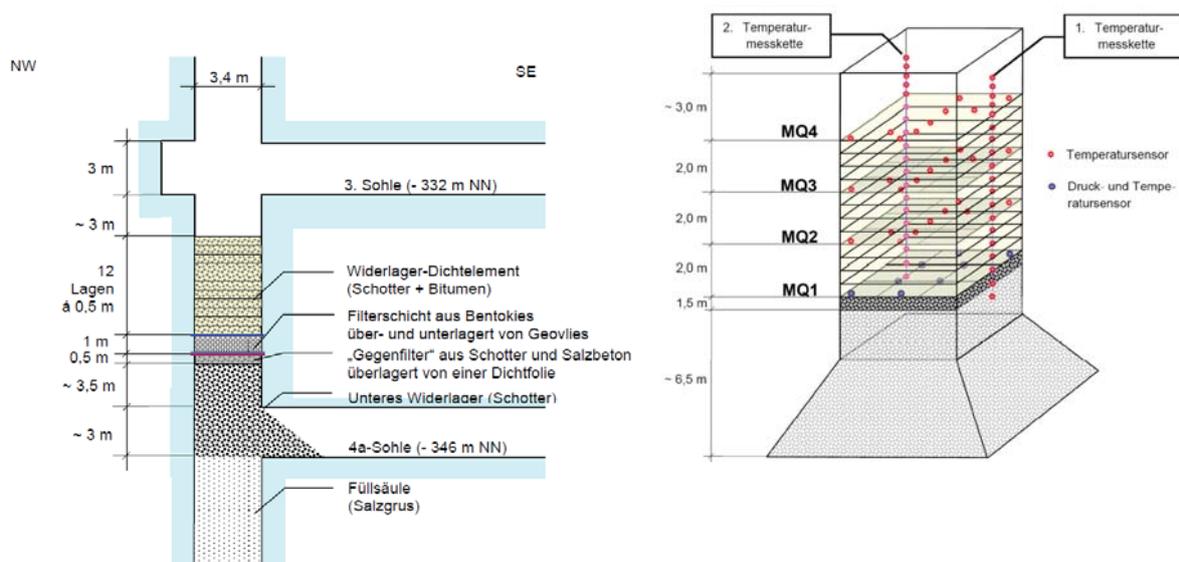
Zusätzlich erfolgt eine Bewertung der Restporosität (Zielwert < 3%).

Die aus dem Großversuch gewonnenen Erkenntnisse müssen auf die Schachtverschlüsse (und das südl. Wetterrollloch) übertragbar sein.

www.dbe.de



Bauwerksentwurf und Instrumentierung



www.dbe.de



Versuchsvorbereitung

Tests des Transports des Vergusskochers nach unter Tage (ohne und mit Bitumen)



www.dbe.de



Versuchsvorbereitung

Herstellung gefüllertes Bitumen

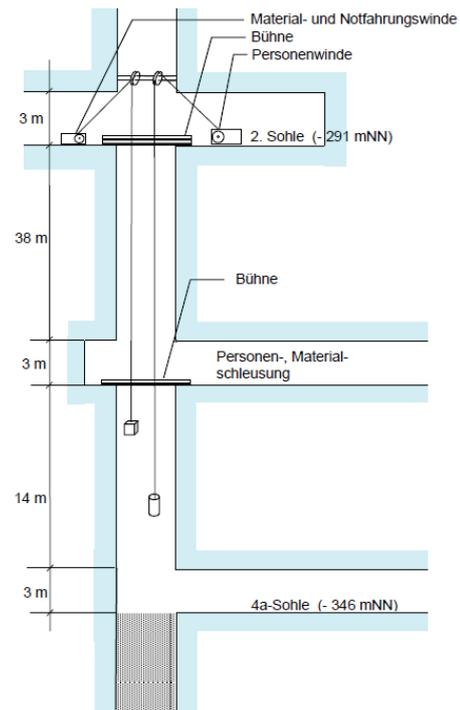


www.dbe.de



Bauablauf

- Feinstratigrafische Aufnahme am Stoß
- Scannen des IB-Gesenks (4a-Sohle bis 3. Sohle)
- Einbau vertikaler Temperaturmessketten
- Probeverdichtung des Schotters
- Bau des Widerlagers und der Filterschicht sowie Instrumentierung von MQ1
- Für 3 Abschnitte mit je 4 Schotterlagen:
 - Verdichtung der 0,5 m dicken Schotterlage, Voranstrich
 - Vergießen mit Bitumen (+ 1 Tag Abkühlzeit)
 - Installation MQ2 – MQ4



www.dbe.de



Verantwortung für Generationen

Arbeits- und Gesundheitsschutz

- | | |
|---------------------------------------|--|
| Absturz von Personen und Gegenständen | - Stets Abdecken oder Sichern offener Grubenbaue |
| | - Tragen von Höhensicherungsgerät in Gefährdungsbereichen |
| | - Personenführung nur mit zugelassener Winde |
| Abstürzende Gegenstände und Lasten | - Arbeiten nur in gesicherten bzw. freigegebenen Bereichen |
| | - Tragen der PSA |
| | - kein Aufenthalt unter schwebenden Lasten |
| Matte Wetter, Schadstoffe | - Arbeiten nur bei ausreichender Bewetterung (Sonderbewetterung), insbesondere in nicht durchschlagigen Grubenbauen |
| | - Kein Erhitzen des Bitumens über 200 °C, um Austreiben von Schadstoffen aus dem Bitumen zu vermeiden |
| Einzelarbeit | - Keine Arbeit einzelner Personen im Gesenk, d.h. dort Einsatz von mindestens zwei Personen |
| Spritzen von heißem Bitumen | - Erweiterte persönliche Arbeitsschutzausrüstung mit geeignetem Augen- und Gesichtsschutz, hitzeabweisender Kleidung, hitzeabweisenden Schuhen und Handschuhen |

www.dbe.de



Verantwortung für Generationen

Bauablauf

Einbau vertikaler Temperaturmessketten



Quelle: TU Freiberg

www.dbe.de



Verantwortung für Generationen 

Bauablauf

Probeverdichtung des Schotters



www.dbe.de



Verantwortung für Generationen 

Bauablauf

Bau des Widerlagers



www.dbe.de



Bauablauf

Einbau Gegenfilter und Filterschicht, inkl. Prüfung



www.dbe.de



Bauablauf

Voranstrich Halobit



www.dbe.de



Bauablauf

Einbau und Verdichtung des Schotters



www.dbe.de



Bauablauf

Anliefern, Erhitzen und Umfüllen des Bitumens



Quelle: ERCOSPLAN



www.dbe.de



Verantwortung für Generationen

Bauablauf

Transport des Vergusskochers nach u. T.



Quelle: ERCOSPLAN



www.dbe.de



Verantwortung für Generationen

Bauablauf

Herablassen des Vergusskochers in das IB-Gesenk



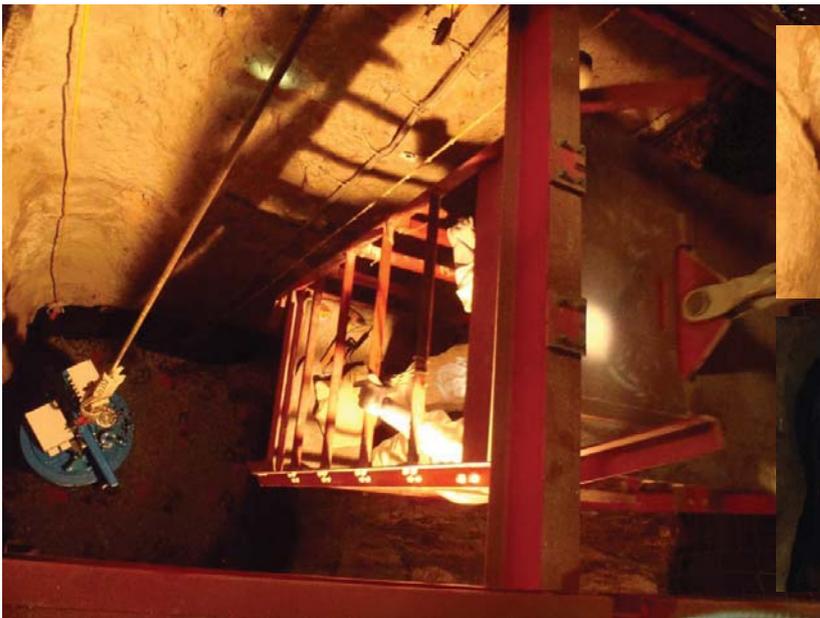
www.dbe.de



Verantwortung
für Generationen

Bauablauf

Einfahren des Personals in das IB-Gesenk



www.dbe.de



Verantwortung
für Generationen

Bauablauf

Vergießen mit Bitumen

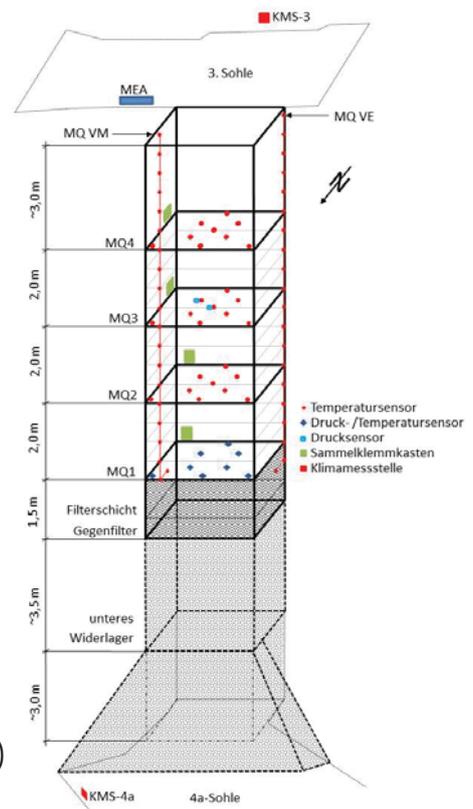


www.dbe.de



Geotechnische Messungen

- Erfassung des thermischen Verhaltens des Systems Bitumen/Schotter/Steinsalz in der Bau- und Abkühlphase
- Nachweis des hydrostatischen Bitumendrucks
- Temperaturmessungen
 - 2 vertikale Messketten mit je 20 Sensoren im Abstand von 50 cm an der Gebirgskontur
 - 1 Messhorizont mit 8 Temperatursensoren (MQ1)
 - 3 Messhorizonte mit je 9 Temperatursensoren im Abstand von 2,0 m (MQ2 - MQ4)
- Druckmessungen
 - 8 Porendrucksensoren im MQ1 (0,0 m)
 - 2 zusätzliche Porendrucksensoren im MQ3 (4,0 m)

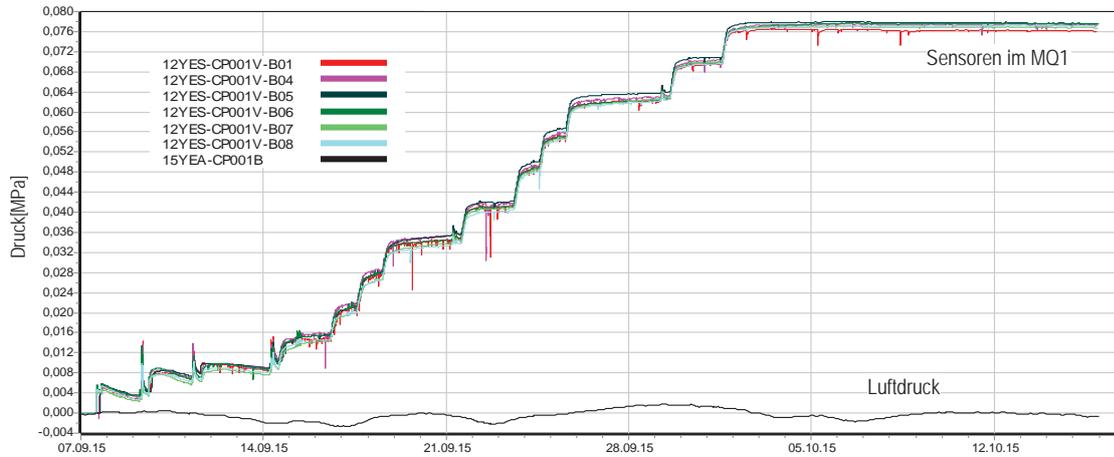


www.dbe.de



Ergebnisse

Messergebnisse Porendruckmessungen im MQ1 (0,0 m)

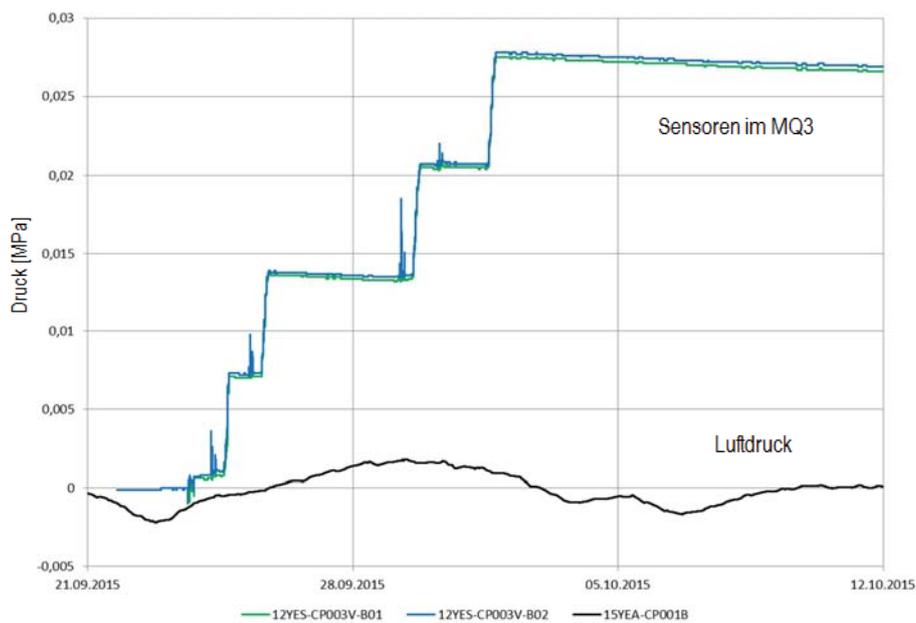


www.dbe.de



Ergebnisse

Messergebnisse Porendruckmessungen im MQ3 (4,0 m)

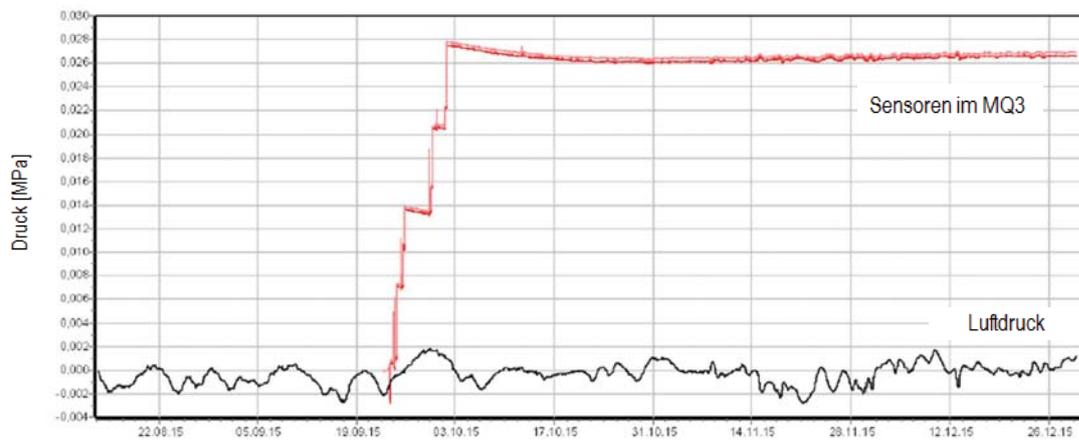


www.dbe.de



Ergebnisse

Messergebnisse Porendruckmessungen im MQ3 (4,0 m) bis 12/2015

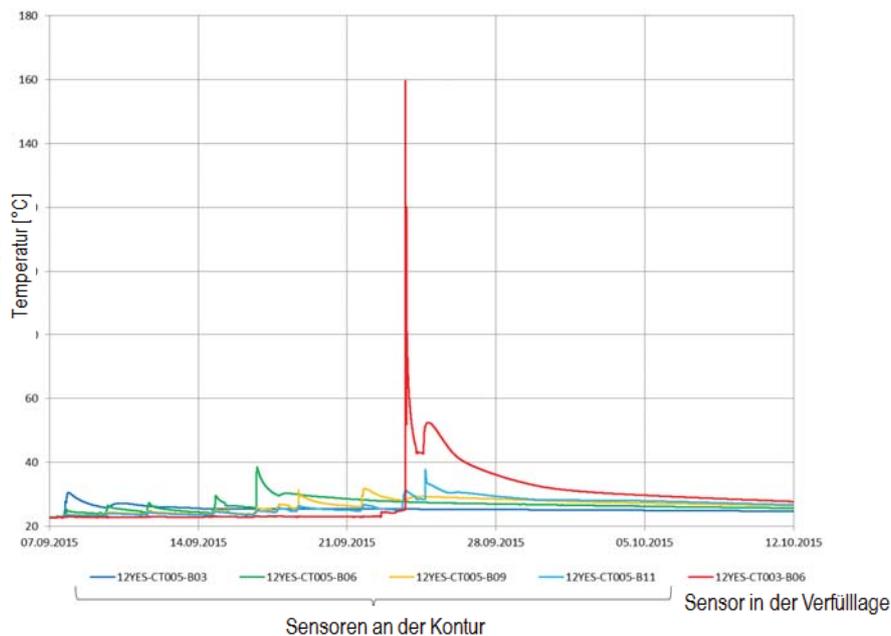


www.dbe.de



Ergebnisse

Messergebnisse Temperaturmessungen im MQ3 (4,0 m)



www.dbe.de



Restporosität

$$\text{Restporosität} = \frac{(\text{Volumen Gesenkabschnitt} - \text{Volumen Schotter} - \text{Volumen Bitumen})}{\text{Volumen Gesenkabschnitt}}$$

Ermittlung der Volumina durch

- Scannen des Hohlraumvolumens
- Messung der Kornrohddichte des Schotters
- Einwiegen von Schotter und Bitumen
- Messung der Dichte des Bitumens

Ermittlung lagenweise zur Einschätzung des Versuchsverlaufs

Ermittlung für das gesamte Versuchsbauwerk zur Bewertung des Versuchserfolgs

www.dbe.de



Ergebnisse

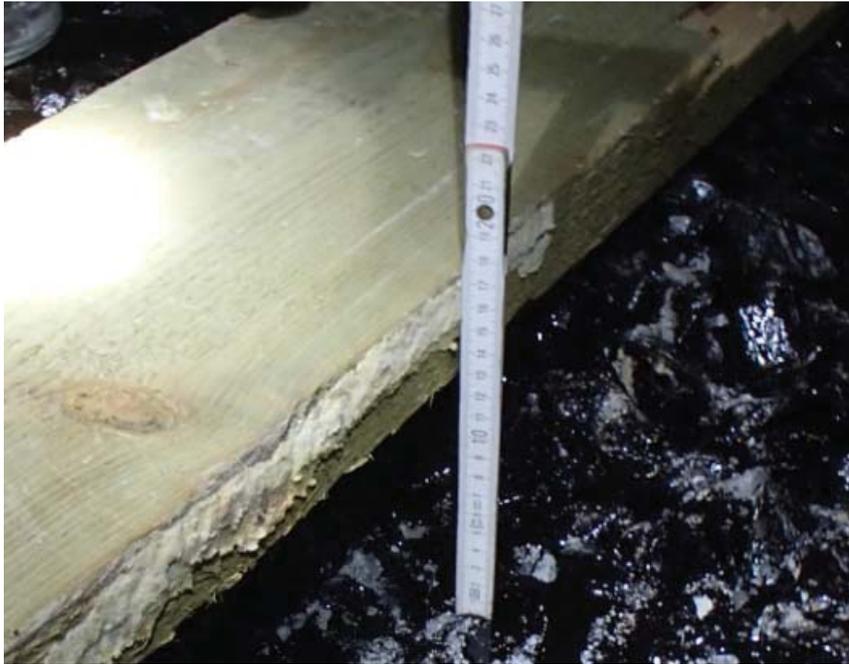
Restporosität

Lage	Restoffene Porosität bei 25 °C Einzellagen [%]	Restoffene Porosität bei 25 °C integral [%]
Lage 1	7,13	7,13
Lage 2a	-5,52	2,52
Lage 2b	-2,10	1,56
Lage 3	2,87	2,01
Lage 4	1,98	2,01
Lage 5	1,22	1,84
Lage 6	0,97	1,70
Lage 7	2,70	1,84
Lage 8	-1,97	1,32
Lage 9	3,74	1,58
Lage 10	1,47	1,57
Lage 11	-0,14	1,42
Lage 12	-0,31	1,28
(ohne Berücksichtigung der Schotterrestfeuchte)		

www.dbe.de



Absinken des Bitumenspiegels



www.dbe.de

Aktuelle Bewertung

- Handhabbarkeit gezeigt
 - unfallfreie Versuchsdurchführung
 - Temperatur auf Ausgangsniveau zurückgegangen
 - Ermittlung der integrale Restporosität bezogen auf den abgesunkenen Bitumenspiegel
 - aus Massenbilanz: ca. 0,9 % ± 1%
 - aus Druckmessungen: ca. 1,7 % ± 0,3%
- => Versuch erfolgreich durchgeführt!

www.dbe.de

Ende



www.dbe.de



ELSA II – Modellierungen zu Bitumen- und Bentonitdichtsystemen im Tongestein

*Philipp Herold¹, Christian Müller¹, Eric Kuate Simo¹,
Victoria Burlaka¹, Thomas Wilsnack²*

¹ DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine
² IBeWa Ingenieurpartnerschaft, Freiberg

Fachgespräch Verschlussysteme

Projektförderung:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Freiberg

03./04.05.2017

Projektbetreuung:

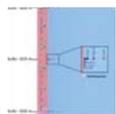


PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017

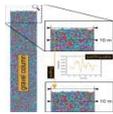


Inhalt



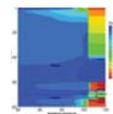
Einbau von Bitumen

- Materialverhalten von Bitumen
- Wechselwirkung mit dem umgebenden Gebirge beim Heißeinbau



Schotter säulen

- Numerische Simulation mit Hilfe eines partikelbasierten Codes
- Simulation von Setzungen in Folge eines Erdbebenereignisses



Strömungsprozesse im Bentonit

- Strömungsprozesse im initial ungesättigten Bentonitdichtelement und umgebenden Wirtsgestein
- Simulation des Quellvorgangs bei einsetzender Aufsättigung des Bentonitdichtelementes

Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



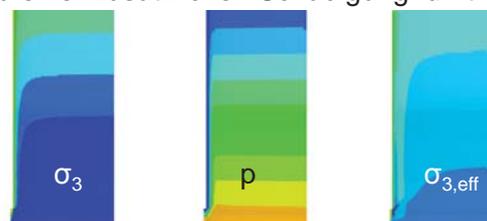
Einbau von Bitumen

Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Hintergrund

- Tongesteinsformationen in Nord- und Süddeutschland bekannt
 - Verschlusskonzepte sehen Einbau von Bitumen/Asphalt vor
 - Heißeinbau von Bitumen/Asphalt beeinflusst den konturnahen Gebirgsbereich
 - Auswirkungen auf Ausprägung der ALZ nicht genau bekannt
- (1) Ermittlung der Tiefe der Auflockerungszone durch das Abteufen des Schachtes
 - (2) Quantifizierung des Grades der Schädigung über die mit der Schädigung einhergehenden Permeabilitätserhöhung
 - (3) Untersuchungen, ob der Wärmeeintrag durch die Bitumensäule sich negativ auf das Wirtsgestein und die Auflockerungszone auswirkt und zu einer zusätzlichen Schädigung führt

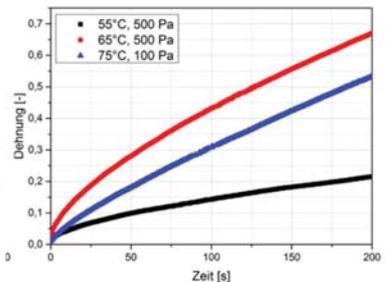
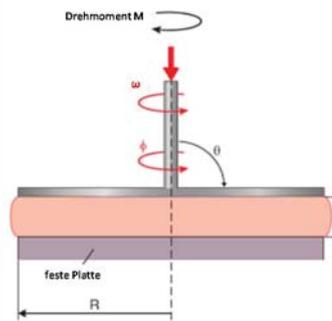
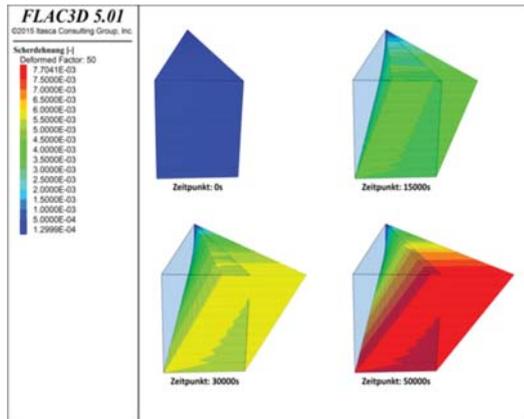
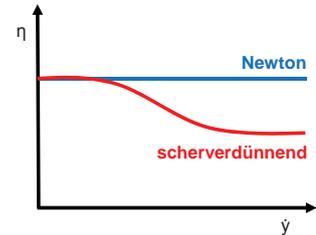
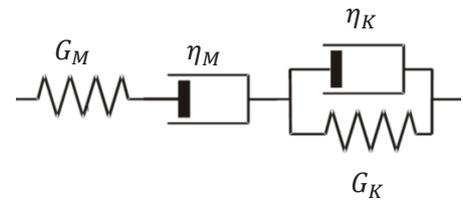


Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Materialverhalten Bitumen

- Kriechverhalten von Bitumen wird durch Burgers-Modell abgebildet
- Erweiterung um Strukturviskosität (Cross-WLF)
- Temperaturabhängigkeit über WLF-Funktion
- Einfluss des Kelvinanteils sinkt mit Temperaturanstieg
- Flüssigkeitscharakter (Viskosität des Maxwellkörpers) tritt in den Vordergrund



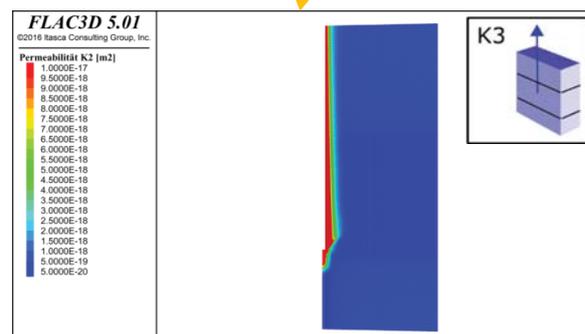
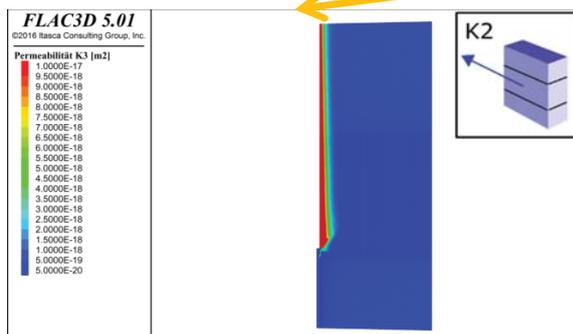
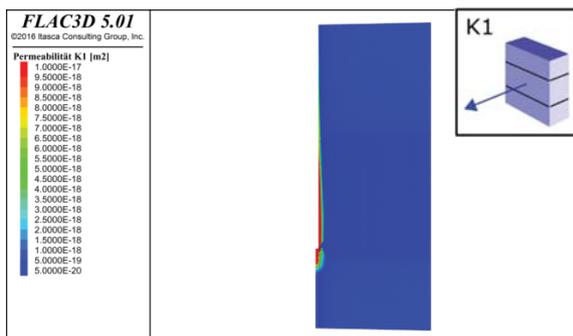
Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Permeabilitätswerte nach Schachtausbruch

Die Abschätzung der Permeabilität basiert auf einem in Vymlatil et al. (2012) beschriebenen Stoffmodell, dass die Permeabilität in Abhängigkeit der effektiven Spannungen und dem Vektor der plastischen Dehnung berechnet

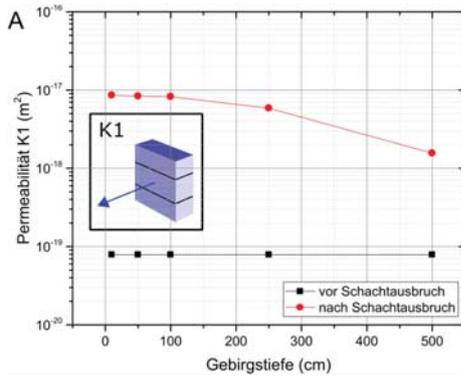
Parallel zur Schachtwand ergeben sich höhere Permeabilitätswerte



Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Permeabilitätswerte vor vs. nach Schachtausbruch

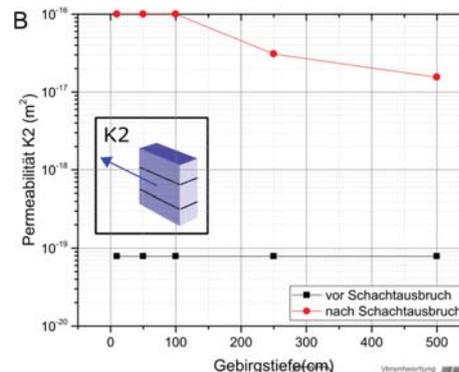
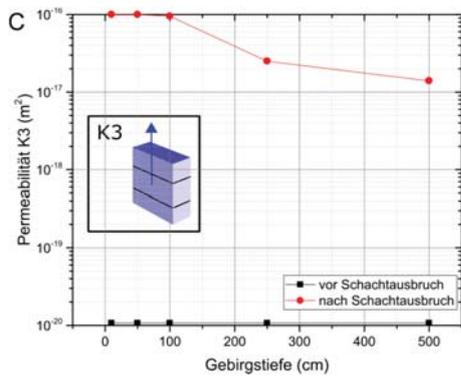


K1 steigt von $7,9E-20m^2$ auf $8,6E-18m^2 - 1,6E-18m^2$

K2 steigt von $7,9E-20m^2$ auf $1,0E-16m^2 - 1,6E-17m^2$

K3 steigt von $1,1E-20m^2$ auf $1,0E-16m^2 - 1,6E-17m^2$

Parallel zur Schachtwandung ist die Permeabilität um eine Größenordnung höher

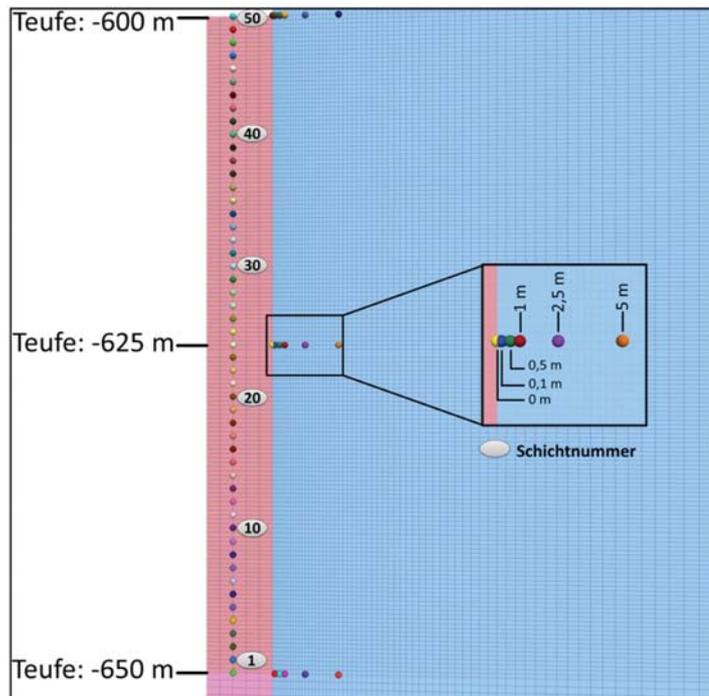
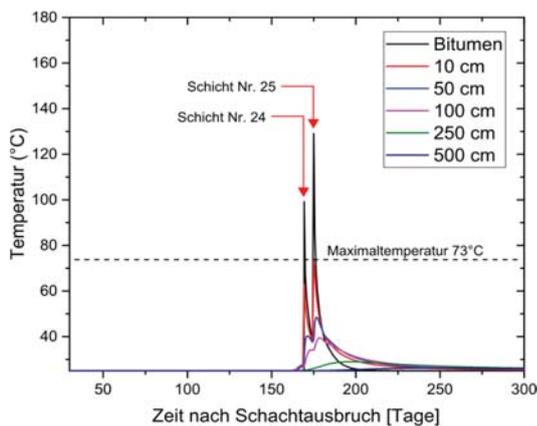


Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



schichtweiser Einbau Bitumensäule

- Einbau von 50 Schichten
- Auswertung des Gebirgsbereichs in 625m Tiefe für verschiedene Gebirgstiefen ab Kontur: 0,1m, 0,5m, 1m, 2,5m sowie 5m

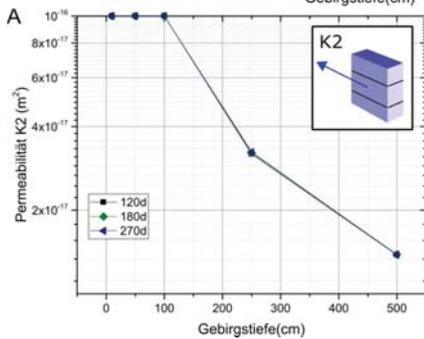
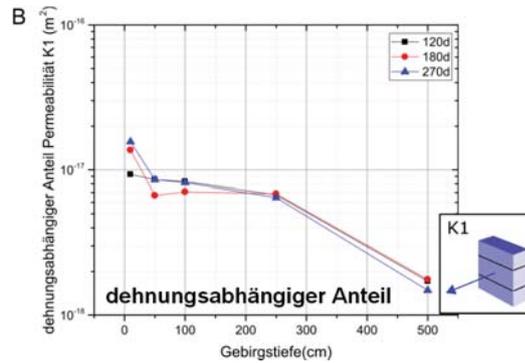
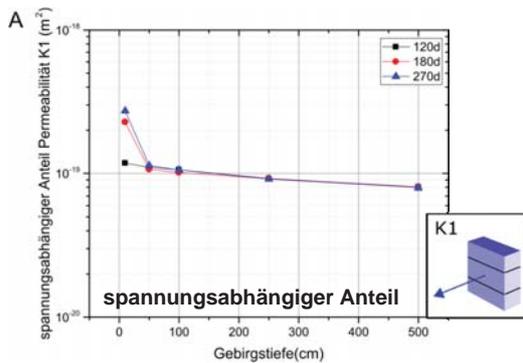


Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017

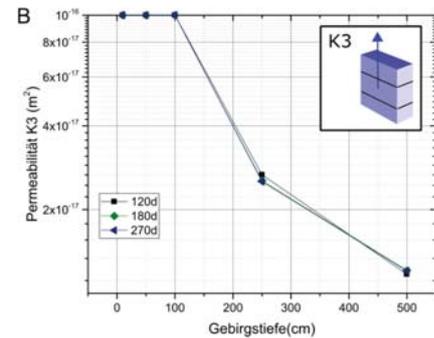


schichtweiser Einbau Bitumensäule

- senkrecht zur Schachtwandung: der durch die Thermik induzierte plastische Dehnungsanteil ist maßgeblich für die Permeabilität



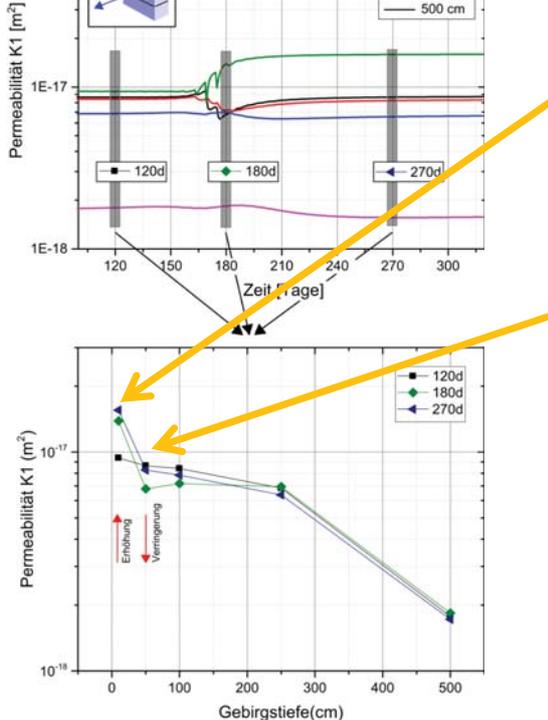
- Einfluss Heißeinbau nur konturnah (> 1 m Tiefe)
- Permeabilität bereits nach Ausbruch durch definierten Maximalwert gedeckelt
- zusätzliche Dehnungs- und Spannungsänderungen durch die Bitumenschichten unwirksam bleiben



Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



schichtweiser Einbau Bitumensäule



- der Wärmeeintrag des Bitumens in das Gebirge führt im angrenzenden Gebirgsbereich in 10cm Tiefe zu einer Erhöhung der Permeabilität von $9,4E-18m^2$ auf $1,4E-17m^2$.
- die Dehnungen in der Gebirgskontur bis 10cm Tiefe haben gleichzeitig einen Einfluss auf tieferliegende, noch nicht vollständig erhitze Gebirgsbereiche. Sie führen dort zu einer Stauchung und damit verbundenen Permeabilitätsverringerng von $8,7E-18m^2$ auf $6,8E-18m^2$.
- Langfristig (Zeitpunkt 270d) spielt der Einfluss des Wärmeeintrags durch das Bitumen auf die Permeabilität nur in den äußeren Gebirgsbereichen (10cm Tiefe) eine Rolle.

Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Schottersäulen

Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017

repräsentative Partikelproben

➔ partikelbasierter Rechengode PFC

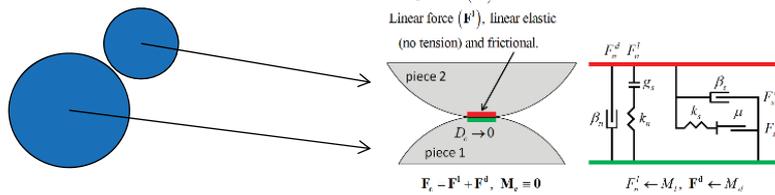
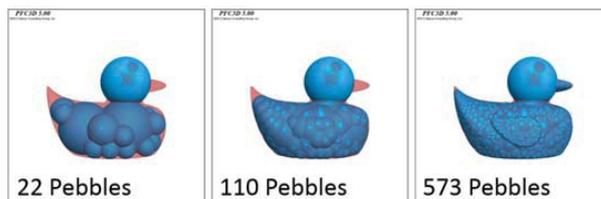
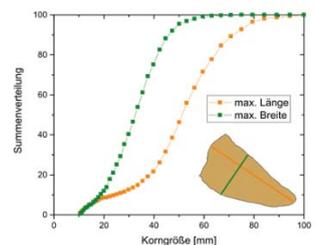


Figure 1: Behavior and rheological components of the linear model.

➔ Clump-Logik erlaubt realistische Abbildung beliebig geformter Partikel



➔ Schaffung von repräsentativen Partikelproben bestehend aus Schotterpartikeln unterschiedlicher Form und Größe auf Basis einer CPA -Analyse



Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017

repräsentative Partikelproben

- ➔ Erstellung geeigneter Formen mit Hilfe weniger Partikel
- ➔ Ausgangspunkt ist das Länge-zu-Breite Verhältnis mit Unterteilung in fünf Formklassen

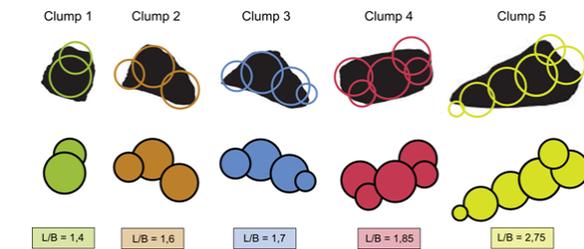
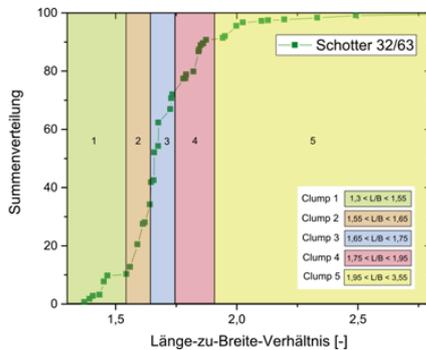


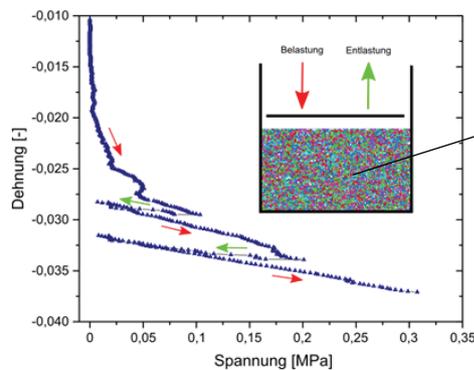
Abb. 5: Darstellung der generierten Partikelformen.

- ➔ Aus jeder Kornformklasse wurde eine Partikelform ausgewählt, die jeweils repräsentativ für die Kornformklasse ist. Durch Aneinanderreihung/Überlappung in Längsrichtung und Querrichtung wird die Länge und ein L/B-Verhältnis nachempfunden.

Kennwertermittlung

Elastizitätsmodul der Kontakte (E^*)

- ➔ Bestimmung des Spannungs-Setzungs-Verhaltens an einfachen Kompressionsversuchen zur Abschätzung des E-Moduls



interner E-Modul
 $2 \times 10^8 \text{ Pa}$

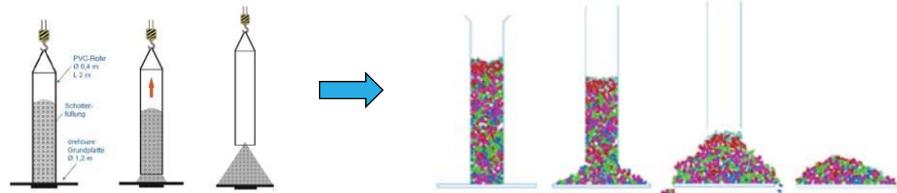
- ➔ Aus der Hysteresekurve zwischen Ent- und Wiederbelastung konnte ein Steifemodul von $\sim 0,5 \text{ GPa}$ abgeschätzt werden

Kennwertermittlung

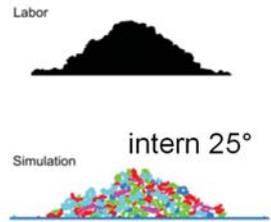
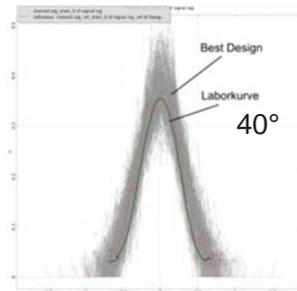
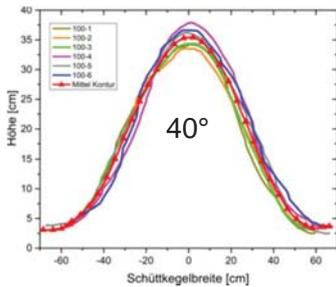
Reibungskoeffizient (μ)



Bestimmung des Reibungskoeffizienten durch die Nachrechnung eines Schüttversuchs im Labor



Ausmessung des Schüttkegels und Abgleich des Verlaufs mit Simulationsergebnissen



Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017

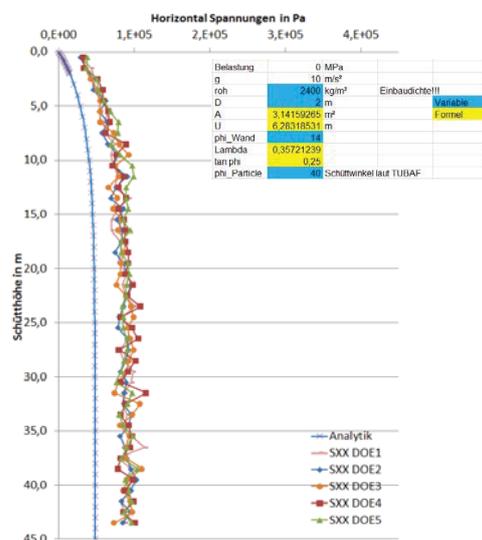
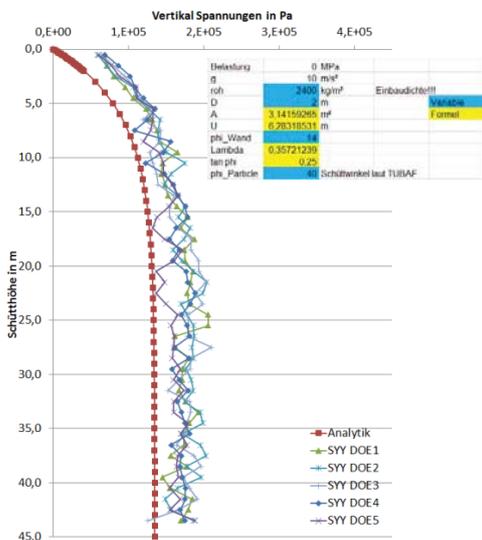


Setzung einer Schottersäule

Ergebnisse bei Wandreibungskoeffizienten von 0,25 ; Dämpfung 0,5-0,9

sy

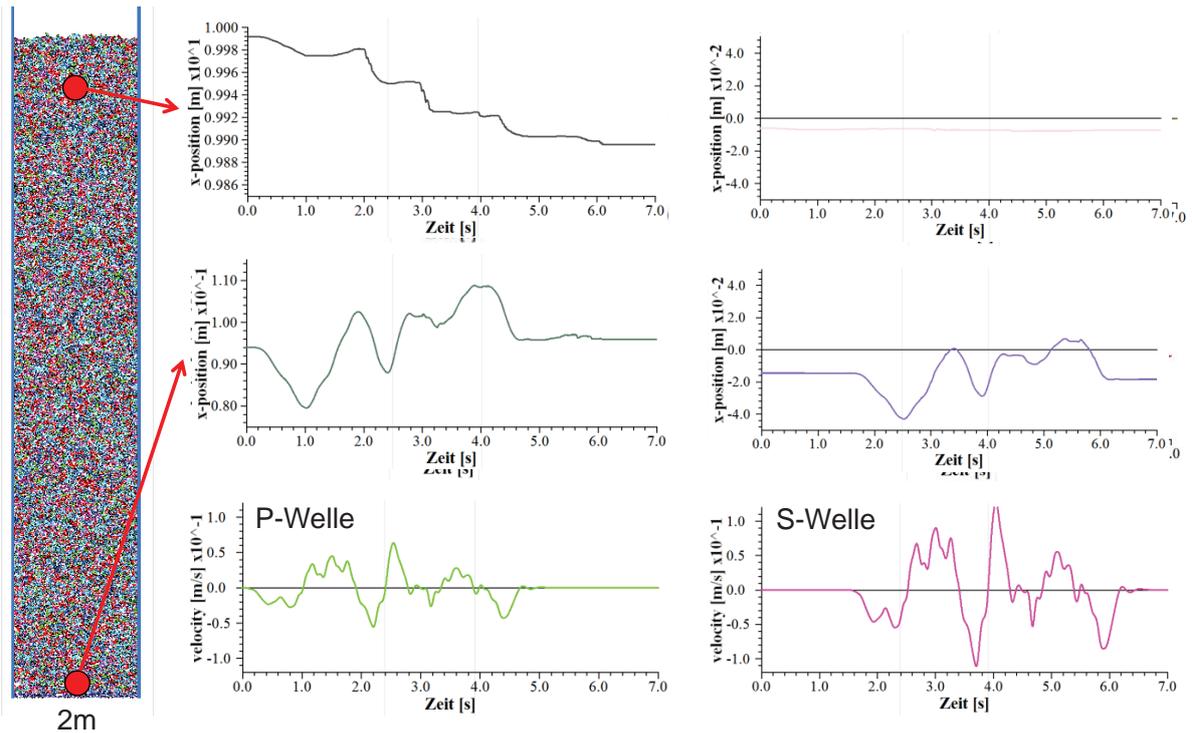
SXX



Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



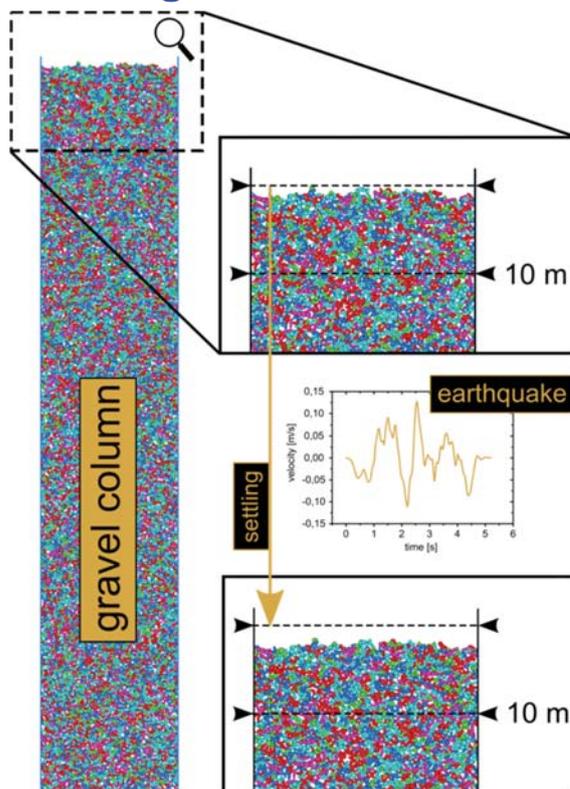
Setzung einer Schottersäule bei Erdbeben



Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017



Setzung einer Schottersäule bei Erdbeben



➔ Setzungen von ca. 10cm auf 10m

- Modellierungsansatz für die Simulation granularer Medien unter Erdbebenbelastung eignet
- wesentlichen physikalischen Prozesse und die Ausbildung eines Siloeffektes wurden realitätsnah abgebildet
- Systemverhalten nur auf Plausibilität hin überprüft und eine belastbare Validierung der Ergebnisse fehlt bisher
- Einfluss diverser Rahmenbedingungen (z.B. dynamische Randbedingungen, Dämpfung, 2D/3D-Effekte, Anregungsfunktion) offen

Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017



Strömungsprozesse im Bentonit

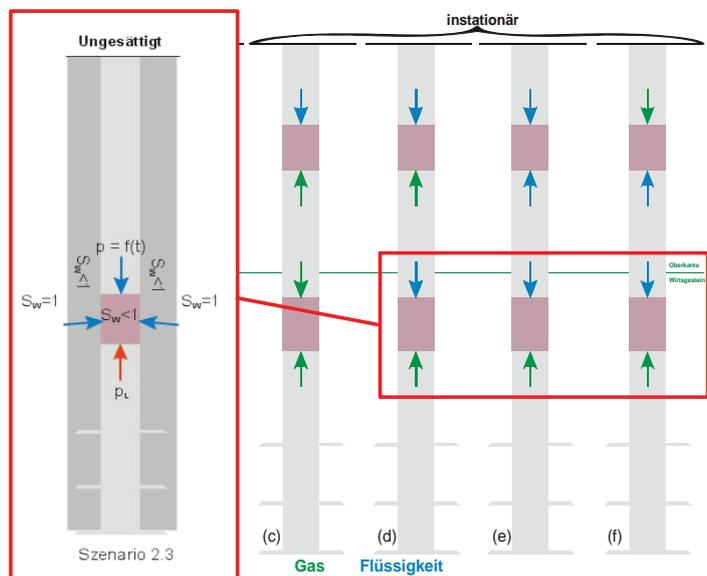
Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017



Bentonit

Zielstellung: Prognose des Zeithorizontes für Aufsättigung Bentonitdichtung im Ton unter Berücksichtigung Zweiphasenströmung und Permeabilitätsreduzierung durch Bentonitquellen

- verschiedene Szenarien einer Fluiddruckbeaufschlagung basierend auf geologisch / bergtechnischer Situation und zunächst ohne Betrachtung zeitliche Dauer/Reihenfolge
- Strömungsprozesse im initial ungesättigten Dichtsystem Bentonitdichtelement und umgebenden Wirtsgestein
- zweidimensionaler Strömungsraum aus initial gesättigtem Tonstein, initial ungesättigter ALZ und initial ungesättigtes Bentonitdichtelement
- Simulation des Quellvorgangs bei einsetzender Aufsättigung des Bentonitdichtelementes
- gegenwärtig weiterführende Berechnungen mit Gasdruckentwicklung von unten



Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017



Zweiphasenströmung

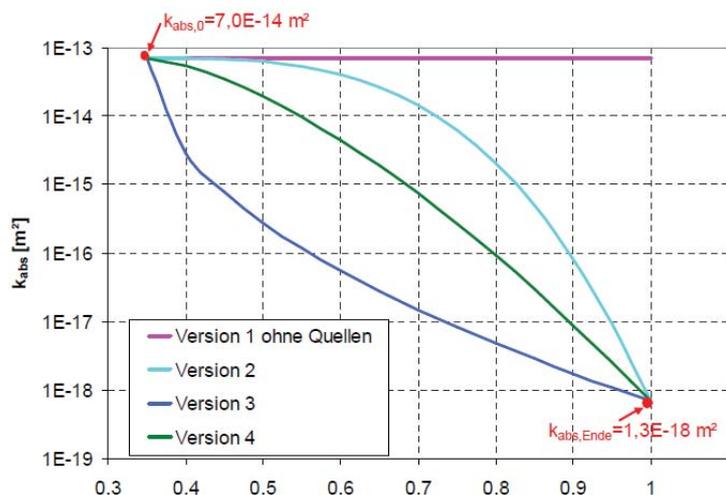
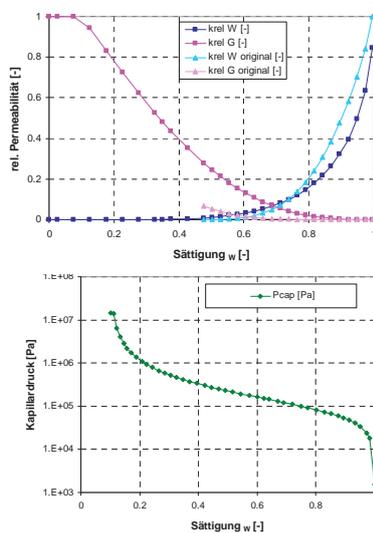
- modelltechnische Abbildung der Zweiphasenströmung im initial trockenem, hoch quellfähigen Bentonit setzt theoretisch folgende Kenntnisse und modelltechnischen Ansätze voraus:
 1. Prozessverständnis und erforderliche Parameter zur Beschreibung der wasser-gehaltsabhängigen Änderung der Porengrößenverteilung des quellenden Bentonits sowie daraus resultierende Änderung der Sättigung, des Kapillardruckes und der Permeabilität
 2. Prozessverständnis und Quantifizierung des sich sättigungsabhängig ergebenden Druckgleichgewichtes aus Quelldruck, Kapillardruck, Fluiddruck und ggf. dem Gebirgsdruck
 3. Prozessverständnis und Parametrisierung der Flüssigkeitsbindung im Bentonit zur Beurteilung des effektiv strömungswirksamen Porenraumes
 4. Auswirkung der genannten Prozesse auf die Sättigungsverteilung und für die Zweiphasenströmung verbleibende effektive Permeabilität
 5. Quantifizierung des für den finalen Sättigungszustand verbleibenden Porendruckes in der Flüssigkeit und der absoluten Flüssigkeitspermeabilität
 6. Prozessverständnis und Quantifizierung der räumlich differenzierten Dichteveränderung entlang des sich aufsättigenden Bentonitkörpers und der daraus resultierenden Permeabilitätsänderung

Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017



Zweiphasenströmung

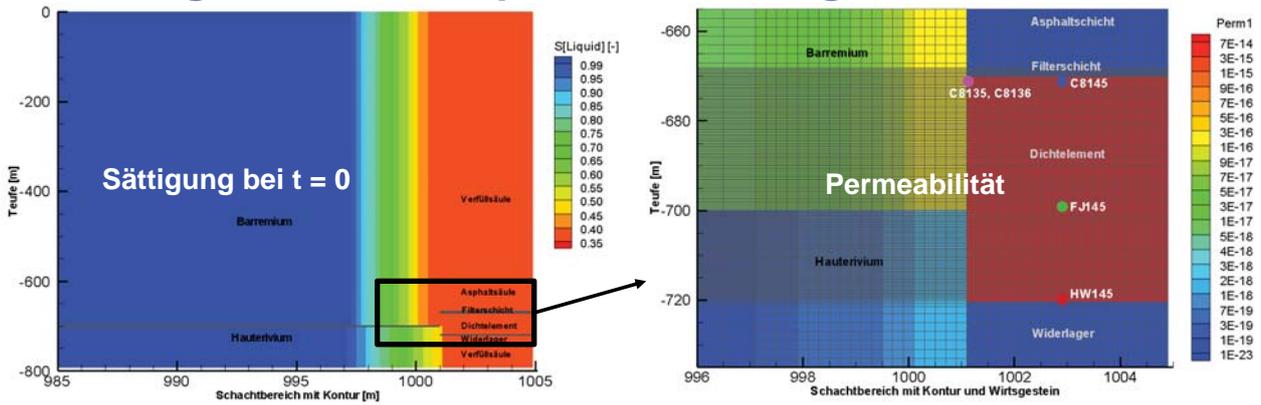
- Schwerpunkt Modellrechnungen: prinzipielle Beurteilung und Prognose der Strömungsprozesse in einem bentonitbasierten Schachtverschlussystem im Tongestein
- Fortschreiten der Flüssigkeits- bzw. Sättigungsfront im quellenden Bentonit mit zeit- und ortsabhängiger Überlagerung der Vorgänge
- Funktionen Kapillardruck, relative Permeabilität aus Literatur ausgewählt; theoretische Funktion $k=f(S)$ für unterschiedliche Szenarien



Herold P. – 04/2017
 FG Verschlussysteme
 Freiberg, 03./04.05.2017



Prognose der Zweiphasenströmung

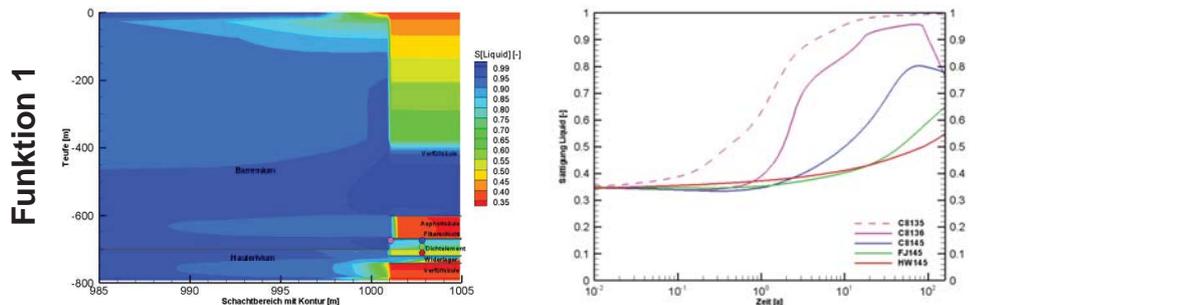


- Verfüllsäule oberhalb des Dichtsysteams ist für die Modellrechnungen nach 160 Jahren bis ca. 400 m Teufe wassergefüllt (ca. 2 MPa hydrostatischer Druck)
- Permeabilitätsunterschiede im Wirtsgestein führen zu maßgeblichen Zustrom über oberen Hälfte des Dichtelementes (und Barremium)
- nach ca. 1 Jahr Anstieg der Sättigung an der Schachtkontur (C8136)
- Sättigungsänderung in der Mitte des Modellausschnittes des Dichtelementes deutlich später
- Modellszenario verdeutlicht, dass neben Zustrombedingungen aus dem Gebirge, auch die Funktion $k=f(S)$ einen Einfluss auf den Aufsättigungsprozess des Dichtelementes nimmt

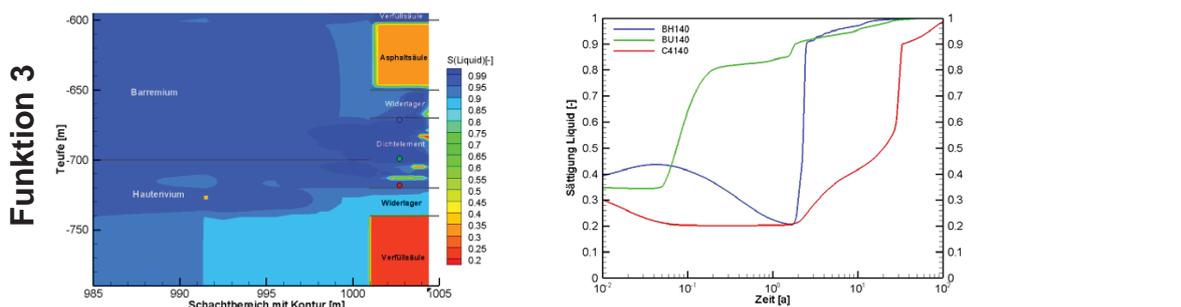
Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Vergleichsrechnungen



- ohne Quellen wird Aufsättigungsdauer von Gebirgseigenschaften bestimmt
- Zeitdauer für Aufsättigung variiert für die unterschiedlichen Ansätze $k=f(S)$ von ca. 20 bis 100 Jahren

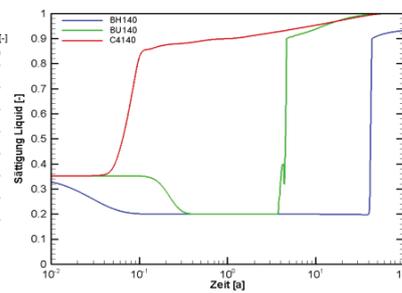
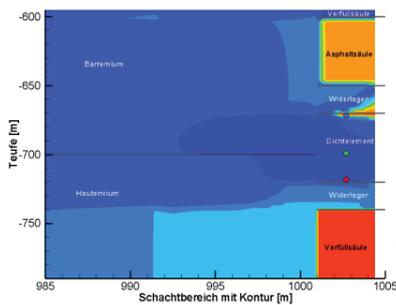


Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Vergleichsrechnungen

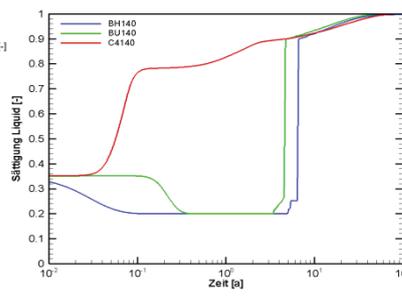
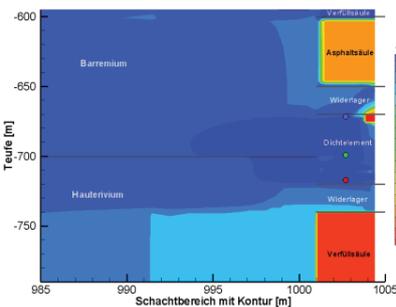
Funktion 2



- Quellfunktionen 2 und 4, mit anfänglich geringeren Reduzierung der Permeabilität bei Sättigungsänderung

Durchströmung der Dichtung und eine maßgebliche Aufsättigung durch eine von unten nach oben fortschreitende Aufsättigungsfront

Funktion 4



- für standortbezogene Modellrechnungen empfiehlt sich in jedem Fall die vergleichende Betrachtung für unterschiedliche Funktionen

Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



Ergebnisse

- Aufsättigung des 50 m langen Dichtelementes variiert in Abhängigkeit der gewählten Funktionen $k=f(S)$ und die Modellannahmen in einer Spanne von ca. 20 bis 100 a
- Sättigungsganglinien der vier Funktionen veranschaulichen zwei unterschiedliche zeitliche Abläufe des Aufsättigungsprozesses in der Dichtung
 - Funktion 3: schnelle Permeabilitätsreduzierung bei vergleichsweise geringen Sättigungsänderungen → Reduzierung des Permeabilitätsniveaus im oberen Bereich des Dichtelementes → von oben fortschreitende Aufsättigung
 - Funktionen 2 und 4: anfänglich geringere Reduzierung der Permeabilität bei Sättigungsänderung → Durchströmung der Dichtung → Aufsättigung durch von unten fortschreitende Aufsättigungsfront
- für die im Modell vorgegebene Permeabilitätsverteilung im Gebirge (Hangendformation Barremium $1E-17$ m², Liegendformation Hauterivium $1E-19$ m²) und Dichtsystem ergibt sich:
 - Zufluss zum Dichtelement maßgeblich an der Oberkante des Dichtelementes aus ALZ des Barremiums - Hangendverschlusskomponente dichter als Gebirge
 - Notwendigkeit der standortbezogenen Berücksichtigung der hydrogeologischen Rahmenbedingungen für Prognose Strömungsprozesse im Dichtsystem

Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017





**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit.**

Herold P. – 04/2017
FG Verschlussysteme
Freiberg, 03./04.05.2017



QS-Programm zur Sicherstellung der Baustoffeigenschaften von Sorelbeton A1 für Strömungsbarrieren

04.05.2017

Reinhard Wendling, Asse GmbH

Qualitätssicherung Sorelbeton A1 für Strömungsbarrieren

1. Sorelbeton A1 für Strömungsbarrieren
2. Anlieferungsmaterial – Untersuchungsprogramm
3. QS für Eigenmaterial
4. Baubegleitende Beprobung und Untersuchung der Baustoffe
5. Baubegleitende Untersuchung der Suspensionseigenschaften
6. Labor – Untersuchungsprogramm
7. Zusammenfassung

1 . Sorelbeton A1 für Strömungbarrieren (SB)

Die Rezeptur A1 wurde auf Grundlage von Erfahrungen aus der Kaliindustrie im Auftrag der Asse von Fa. K-UTEC entwickelt. Ziele:

Hohe Dichtigkeit, hohe Stützwirkung, kein Schwinden, langzeitstabil im Hinblick auf den Erhalt der Funktionalität der SB unter dem Einfluss $MgCl_2$ -dominierter Lösungen

Rezeptur:

Basismaterial (MgO)	10,8-11,8 Ma-%
Zuschlagsstoff (Steinsalz)	62,2-65,2 Ma-%
Anmachflüssigkeit ($MgCl_2$ -Lösung)	24,0-26,0 Ma-%

1 . Sorelbeton A1 für Strömungbarrieren (SB)

Versuchsgestützter Nachweis der Eignung und technischen Machbarkeit durch Pilot-SB A1:

1. Nachweis der Dichtigkeit des Baukörpers, der Kontaktfläche und der umgebenden Auflockerungszone durch Druckbeaufschlagung und Permeabilitätsmessungen
2. Erfassung der Radialspannungsentwicklung durch Drucksensoren
3. Nachweis der Eignung des Bauablaufs, des technischen Equipments und QS-Programms für die anforderungsgerechte Erstellung von SB

1 . Sorelbeton A1 für Strömungsbarrieren (SB)

Baustoffuntersuchungen zum Eignungsnachweis und Ableitung charakteristischer Baustoffparameter für das QS-Programm

- Permeabilitätsmessungen in situ und im Labor: Prüfstandards wurden mit Fa. IBeWa entwickelt
- Festigkeitsuntersuchungen: zur Erfassung der Steifigkeit des Baustoffs bei triaxialer Belastung wurde Ersatzkompaktionsmodul durch IfG entwickelt, Zugfestigkeitsuntersuchungen Baustoff, Kontaktflächen
- Auf Grundlage adiabatischer und in situ Temperaturmessungen wurde durch DBE-Tec ein quasiadiabatisches Prüfverfahren entwickelt.

1 . Sorelbeton A1 für Strömungsbarrieren (SB)

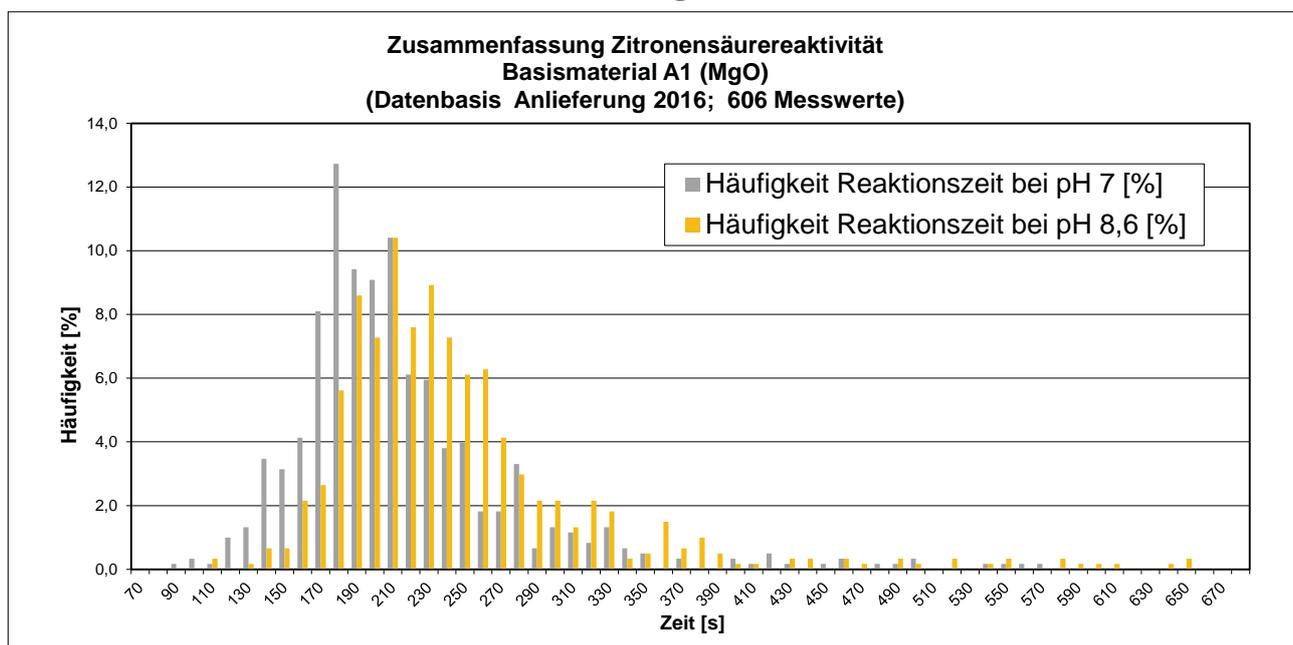
- Zur Untersuchung der Quelleigenschaften wurde ein unter Tage einsetzbarer „Quelldrucktopf“ mit DBE Tec entwickelt und durch Fa. Glötzl gefertigt.
 - Für die Erfassung der Qualität der Zuschlagstoffe und Suspensionseigenschaften wurden mit DBE Tec die entsprechenden Prüfverfahren eingeführt und die speziellen Standortbedingungen angepasst.
- **Konzept zum Bau von Strömungsbarrieren mit Vorgaben für die bauwerksbezogenen QS-Programme**

2. Sicherstellung gleichbleibender Qualität von Anlieferungsmaterialien

Basismaterial mit MgO-Gehalt > 93,0 Ma-%

- Prüfzeugnis des Lieferanten
- Anlieferung im Silofahrzeug mit Mischprobe von der Beladung des LKW
- Eingangskontrolle der mitgelieferten Probe
 - Bestimmung der Zitronensäurereaktivität
 - Freigabe zur Entladung

2. Sicherstellung gleichbleibender Qualität von Anlieferungsmaterialien



2. Sicherstellung gleichbleibender Qualität von Anlieferungsmaterialien

- Entladung der LKW mit automatische Entnahme einer MgO-Mischprobe aus dem Förderstrom in die Siloanlagen
- Laboruntersuchungen:
 - Bestimmung Wassergehalt ($< 0,5 \text{ Ma}\%$)
 - Bestimmung Korngrößenverteilung ($D_{95} < 75 \mu\text{m}$)
 - Bestimmung Korndichte ($\sim 3,5 \text{ g/cm}^3$)
 - Zitronensäurereaktivität (100 - 500 s bei pH 7)
 - Bestimmung chemisch-mineralogische Zusammensetzung

2. Sicherstellung gleichbleibender Qualität von Anlieferungsmaterialien

Zuschlagsstoff Steinsalz aus Grasleben

- Prüfzeugnis des Lieferanten
- Anlieferung per LKW zum Zwischenlager Wendessen
- Stichprobenartige Kontrolle
- Lieferung per LKW zur Schachtanlage Asse II
- Beprobung bei der Förderung nach unter Tage

2. Sicherstellung gleichbleibender Qualität von Anlieferungsmaterialien

- Laboruntersuchungen am Salz:
 - Bestimmung Wassergehalt
 - Bestimmung Korngrößenverteilung
 - Bestimmung Korndichte
 - Bestimmung chemisch-mineralogische Zusammensetzung

2. Sicherstellung gleichbleibender Qualität von Anlieferungsmaterialien

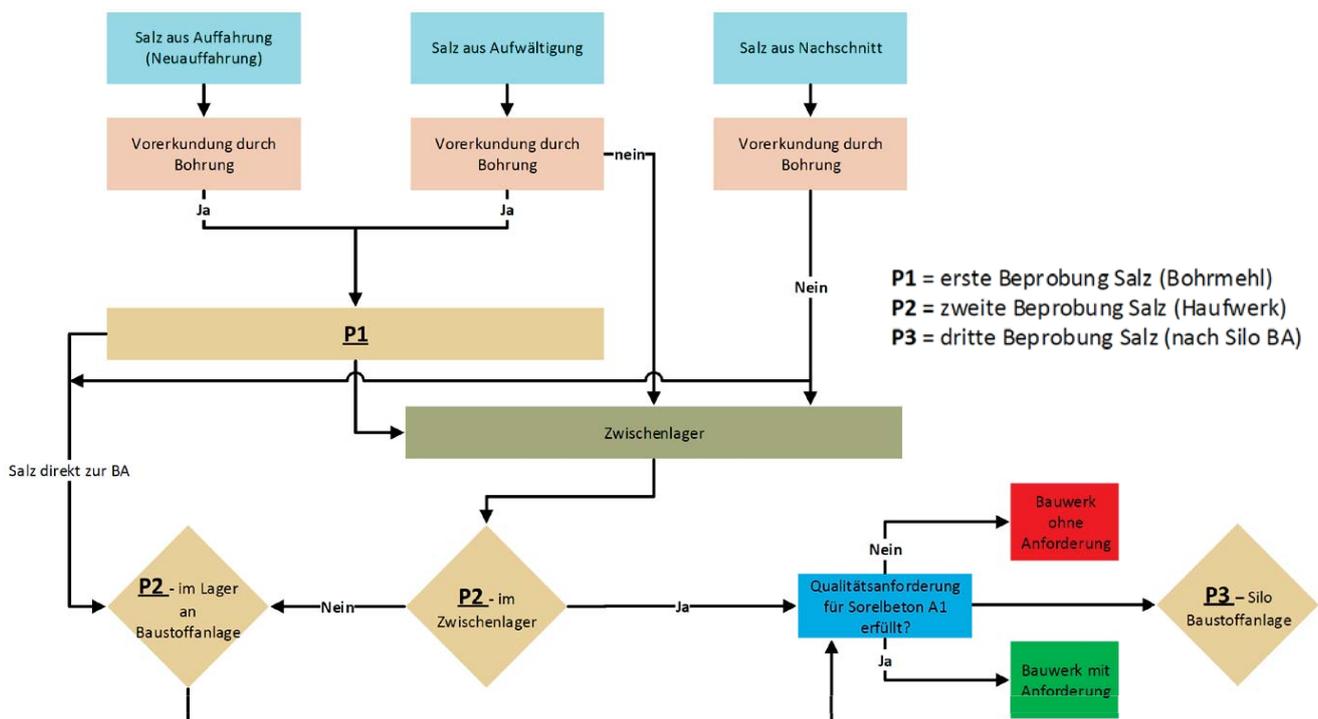
Anmachflüssigkeit (MgCl_2 -Lösung)

- Prüfzeugnis des Lieferanten
- Anlieferung per LKW-Tankfahrzeug
- Beprobung und Bestimmung von Temperatur und Dichte vor Ort
- Bestimmung der chemischen Zusammensetzung im Labor, Freigabe zur Entladung und Förderung in die Speicherbecken unter Tage

3. Qualitätssicherung von Eigensalz

- QS-Programm für die Verwendung von Eigensalz aus:
 - Streckenneuauffahrungen
 - Nachschnitt
 - Aufwältigung alter verfüllter/teilverfüllter Grubenbaue

3. Qualitätssicherung von Eigensalz



3. Qualitätssicherung von Eigensalz

- Vorlaufende Untersuchungen zur Bestimmung der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung von Eigensalz im QS-Labor der Asse
- Bewertung und Einstufung für die mögliche Verwendung

4. Baubegleitende Beprobung der Einzelkomponenten für Sorelbeton A1

- Zur abschließenden Nachweisführung für die Wirksamkeit der Strömungsbarriere werden baubegleitend Proben der Einzelkomponenten genommen
- Beprobung von:
 - Basismaterial (MgO),
 - Zuschlagsstoff (Salz),
 - Vorprodukt (Mischung MgO+Salz)
 - Anmachflüssigkeit (MgCl₂-Lösung)

5. Baubegleitende Untersuchungen Suspensionseigenschaften

- Bestimmung von Suspensionseigenschaften:
 - Temperatur
 - Dichte
 - Fließbrinnenmaß
 - Leitfähigkeit
 - Luftporenanteil
 - Herstellung von Prüfkörpern
 - Temperaturaufzeichnung während des Abbindeprozesses
 - Dokumentation der Ergebnisse und weiterer Informationen (verwendetes Salz u.a.) in einer Datenbank

5. Baubegleitende Untersuchungen Suspensionseigenschaften

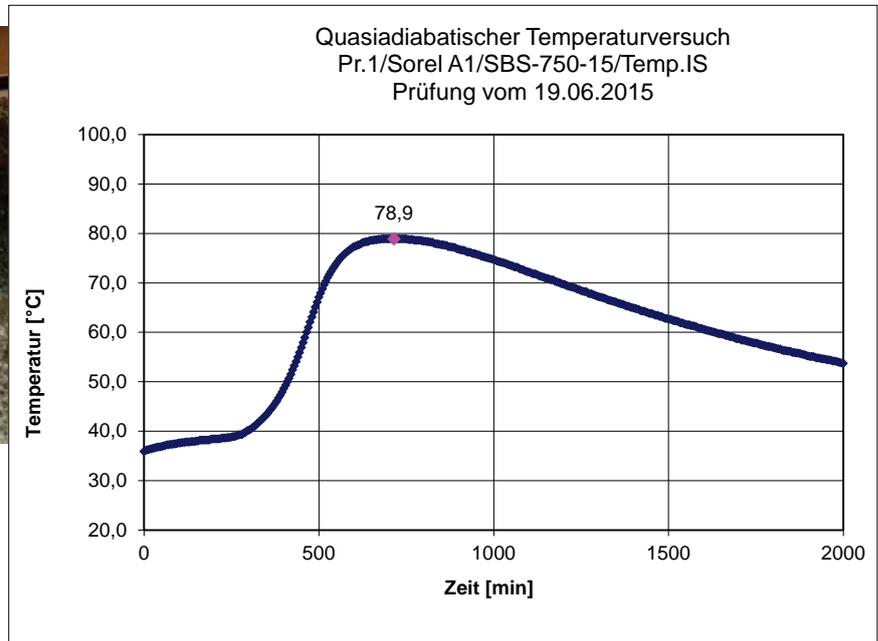
- Fließrinne



- Luftporengehaltsprüfer



5. Baubegleitende Untersuchungen Suspensionseigenschaftendes



6. Labor - Untersuchungsprogramm

- Unter Tage gewonnene Materialproben kommen zum Schichtende ins Qualitätssicherungslabor der Asse
- Laboruntersuchungen an MgO, Salz und Vorprodukt:
 - Bestimmung Wassergehalt (Ofentrocknung)
 - Bestimmung Korngrößenverteilung (Siebung bzw. Laserpartikelmessung)
 - Bestimmung Korndichte (Heliumpyknometer)
 - Zitronensäurereaktivität
 - Bestimmung chemisch-mineralogische Zusammensetzung (ICP-OES und XRD)

6. Labor - Untersuchungsprogramm

- Laboruntersuchungen am Vorprodukt:
 - Bestimmung Mischungsverhältnis MgO : Salz
- Laboruntersuchungen Anmachflüssigkeit:
 - Bestimmung chemische Zusammensetzung (ICP-OES)
 - Lösungsdichte 20°C und 30°C
 - pH-Wert

6. Labor - Untersuchungsprogramm

- Untersuchungen in externen Laboren zur Bestimmung der Festbetoneigenschaften an den baubegleitend hergestellten Sorelbetonprüfkörpern
 - Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit
 - Bestimmung des Ersatzkompaktionsmoduls
 - Bestimmung von Gas- und Lösungspermeabilitäten
 - Bestimmung des Gaseindringdrucks

7. Zusammenfassung

- Auf Grundlage der Erfahrungen aus der Materialentwicklung wurde ein umfangreiches QS-Programm aufgestellt, welches die Einhaltung der Anforderungen und den abschließenden Funktionsnachweis für die Strömungsbarrieren mit Sorelbeton A1 sicherstellt
- Eingangskontrollen der gelieferten Baustoffe
- Baubegleitende Prüfungen der Baustoffe und des Betons
- Laboruntersuchungen an den Baustoffen und am Festbeton
- Abschließender Funktionsnachweis nach Vorliegen aller Ergebnisse

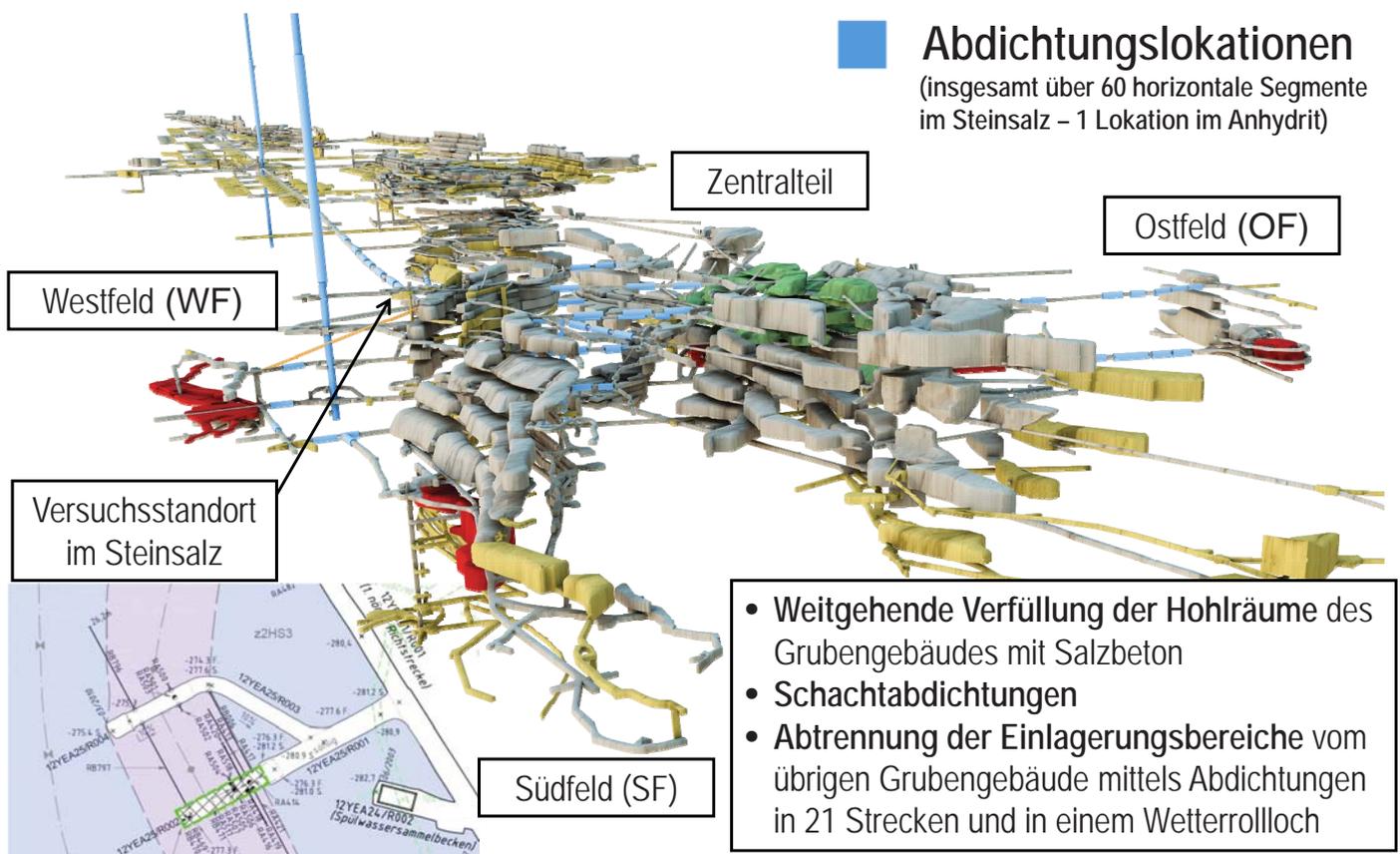
In situ-Versuch für ein Abdichtbauwerk im Steinsalz im ERAM - aktuelle Ergebnisse und Erkenntnisgewinn

R. Mauke, J. Wollrath (BGE)
M. Kreienmeyer, F. Manthee (DBE GmbH)

Fachgespräch "Verschlussysteme – Konzepte, Baustoffe, Simulation,
Demonstration und Anwendung"
Freiberg, 03./04.05.2017

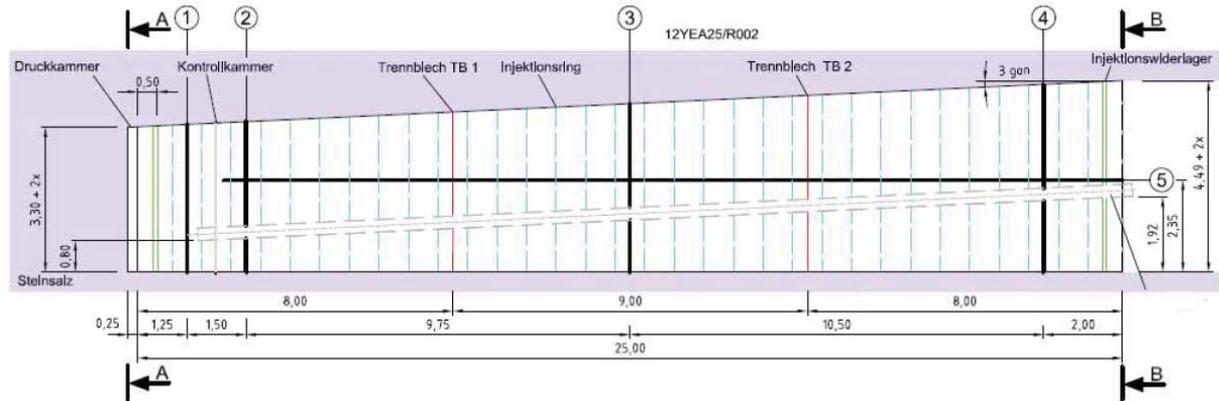
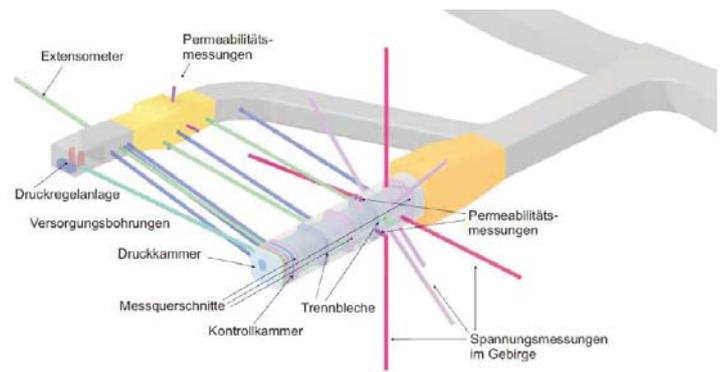


Stilllegungskonzept ERAM



Versuchsbauwerk

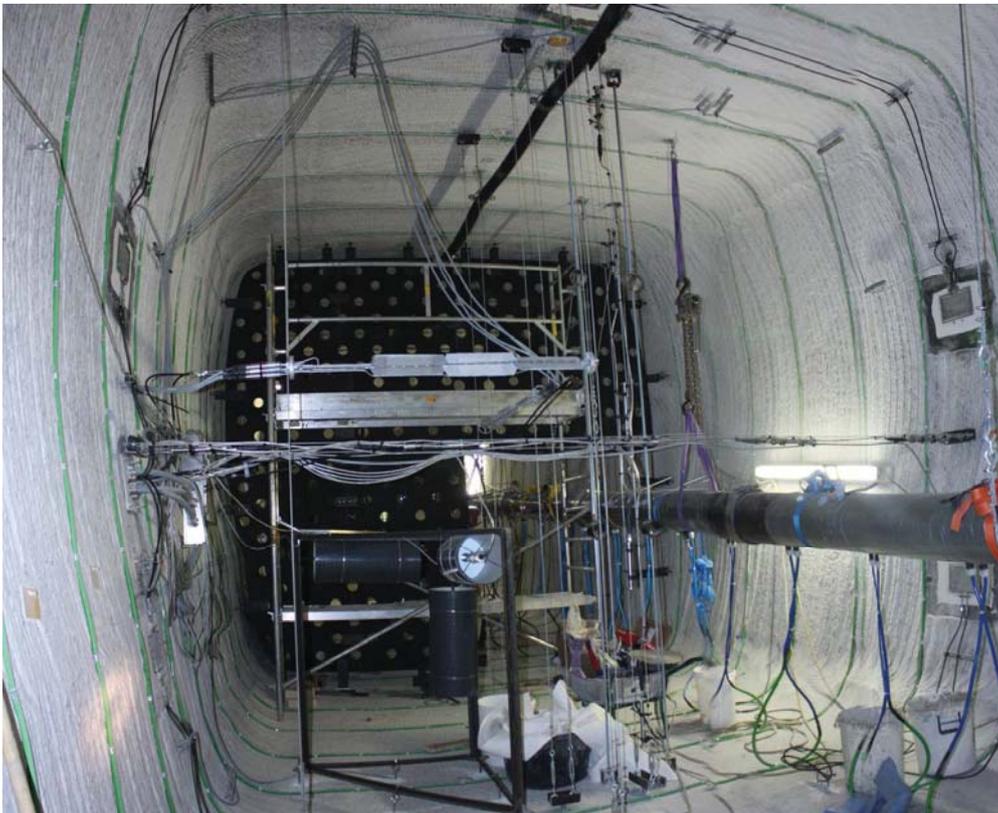
- Neuauffahrung von ca. 130 m Strecke westlich der 1. nördlichen Richtstrecke nach Marie
- Versuchsbauwerk:
 - Länge 25m
 - Querschnitt (luftseitig) 4,60m x 4,95m
 - Querschnitt (Druckkammer) 4,60m x 3,70m
- 5 Messquerschnitte (MQ) – Temperatur, SMS, Druckkissen, Betondehnungen, Extensometer, Schwindboxen, Fluiddruck, etc.



Verantwortung für Generationen **DBE**

BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Versuchsziele (Technische Machbarkeit, Funktionsfähigkeit, Bauwerksprognose)



Technische Machbarkeit

- Nachschnitt der Strecke
- Einhaltung von Anforderungen an Betontechnologie und Betonkennwerte (Temperatur, Schwinden, Festigkeiten, Steifigkeiten, etc.)
- Anbindung Betonkörper an Salzgebirge
- Injektion des Konturspalts
- Ausfräsen Hüllrohr
- Verfüllung Hüllrohrüberbohrung
- Rissbeschränkung

Funktionsfähigkeit

- Integrale Permeabilität

Spannungs-und Verformungsberechnungen

- Prognose Bauwerksverhalten
- Abgleich mit Messdaten

Verantwortung für Generationen **DBE**

BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Versuchsergebnisse - Technische Machbarkeit (Teil 1)

Vorgaben // Anforderungen eingehalten für

- Nachschnitt und Reprofilierung der Strecke
- „Frisch in frisch“ Betonage, Einbringtemperatur <math><30^{\circ}\text{C}</math> (klimatisch günstige Randbedingungen)
- Betonkennwerte (Temperatur, Schwinden, Festigkeiten, Steifigkeiten, etc.)
- Anbindung Baukörper an Salzgebirge: Probekörper mit ausreichender Festigkeit
- Rissbildung an Trennblechen (am vorderen Trennblech belegt)



Detail „Fließverhalten Baustoff“ (Datum: 15.12.2010)

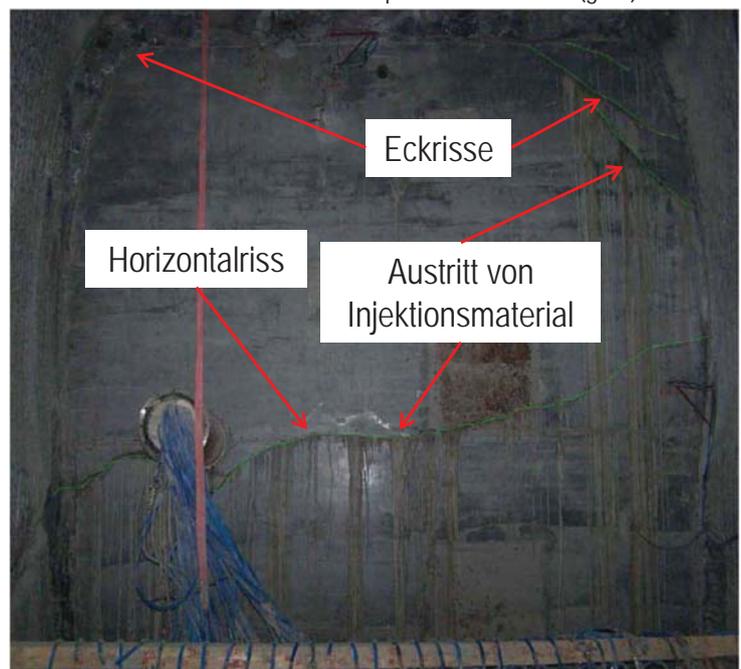


Versuchsergebnisse - Technische Machbarkeit (Teil 2)

Vorgaben // Anforderungen nicht
(vollständig) eingehalten für

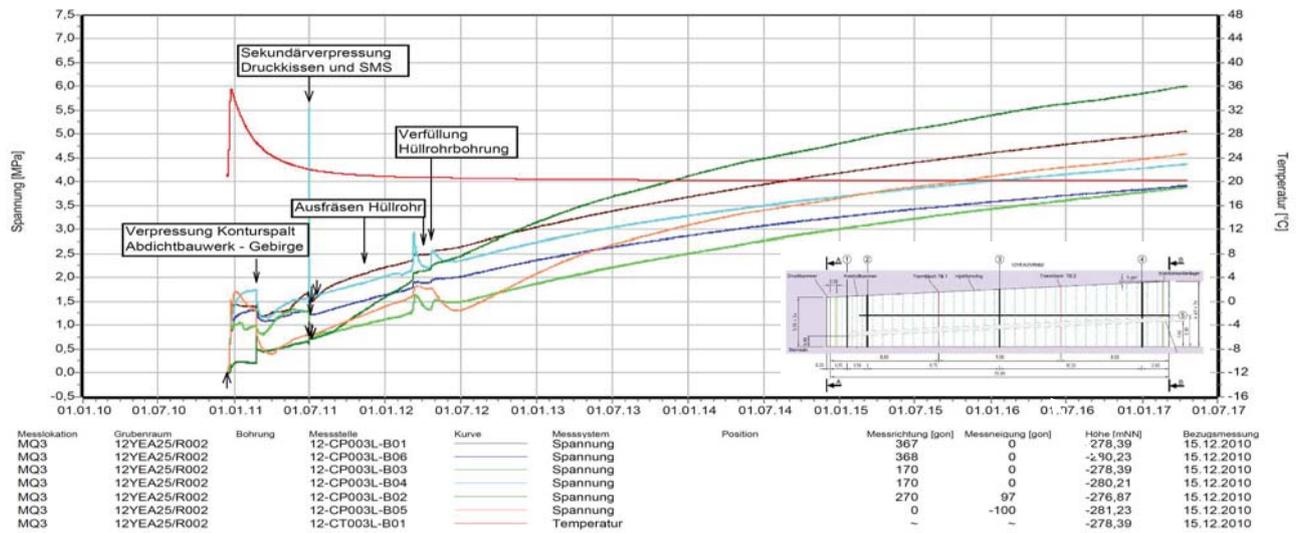
- Rissbeschränkung (sichtbarer Horizontalriss, Eckrisse, Querrisse in Bohrungen)
- Injektion des Konturspalts (Injektionsleitungen teilweise von Salzbeton vollständig umflossen, Nichteinhaltung von Druckvorgaben wegen Materialaustritt an Rissen, Reaktion von Messgebern in der Druckkammer → Verzicht auf vollständige Injektion, teilw. Mikrorisse im Injektionsbaustoff)
- Ausfräsen Hüllrohr (nur ca. zwei Drittel des Hüllrohrs ausgefräst, Rest musste im Bauwerk verbleiben - hohe Temperaturentwicklung beim Ausfräsen)
- Verfüllung der Hüllrohrbohrung (starke Lösungsaufnahme an Fräsoberfläche, teilweise mangelnder kohäsiver Verbund zwischen Salzbeton des Bauwerks und Verfüllmaterial der Hüllrohrüberbohrung (schwindreduzierter Salzbeton))

Risse im Betonkörper im Bild farblich (grün) markiert



Versuchsergebnisse – Druckmesskissen an der Kontur im MQ3

- Insgesamt 22 Druckkissen / 4 Messquerschnitte – teilw. Reaktion auf Injektionsarbeiten, Hüllrohrüberbohrung
- Stetiger Anstieg der gemessenen Druckspannungen an der Kontur (MQ1: 4,5 bis 3,5 MPa, MQ2: 5,0 bis 0,6 MPa, MQ3: 3,9 bis 6,0 MPa, MQ4: 5,9 bis 7,7 MPa) – Daten sind notwendig für die Bewertung des zulässigen Lösungsdruckniveaus für den hydraulischen Haupttest (Funktionsnachweis mit reduziertem Druckniveau)

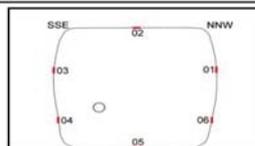


Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
Nordfeld
In situ-Versuch
 -291 mNHN, 12YEA25/R002 (Abdichtbauwerk)



Programm: GEOTECH

Spannungsmessung
 Messquerschnitt 3, Kontur



Auswertung: **12YEA25-CP003L_B**
 Messwerte: alle Messwerte mit U Messwerte ab Bezugsmessung
 Bezugsdatum: individuell

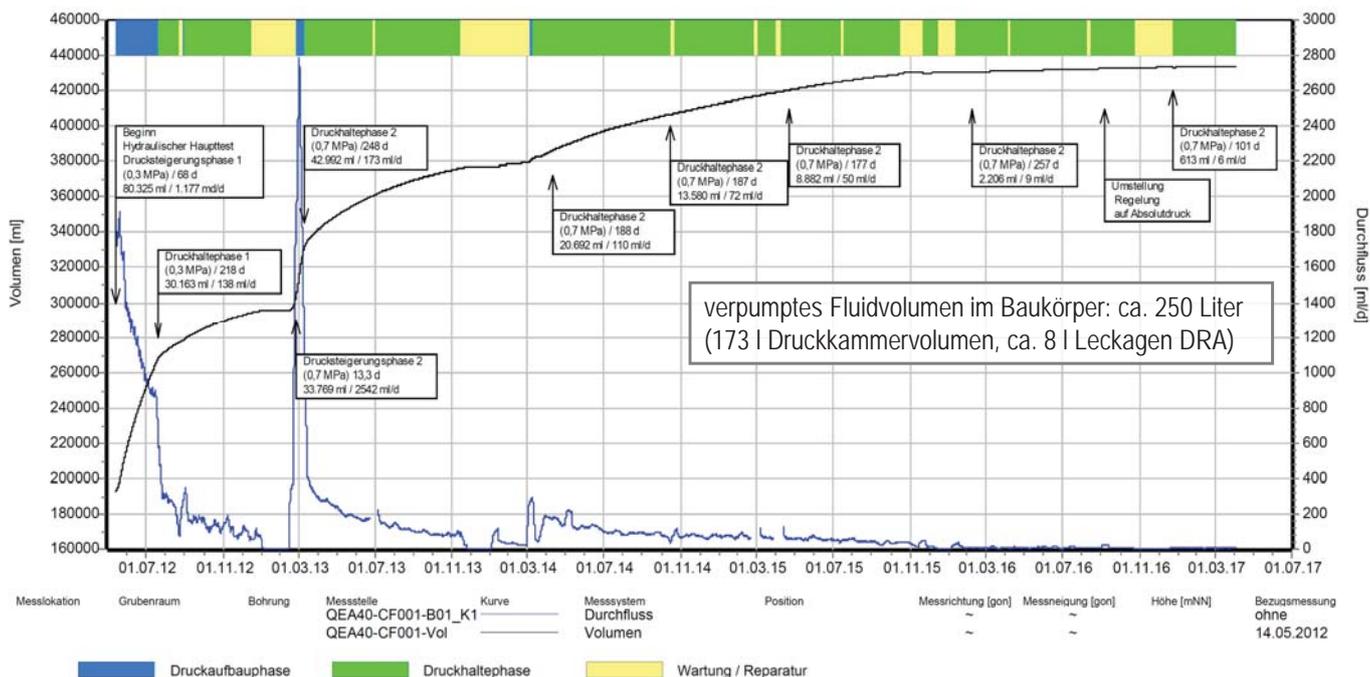
Verantwortung für Generationen



BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Versuchsergebnisse – Funktionsnachweis (Teil 1)

- Vortests (pneumatisch: vor und nach der Injektion der Kontaktfuge, hydraulisch: Farbtracer)
- Haupttest: Versuchbeginn 05/2012 Druckniveau 0,3 MPa; seit 03/2013 Druckniveau 0,7 MPa
- aktuelle Aufnahmemenge: 6,0 ml / Tag (Messzeitraum 06.02.2017 bis 03.04.2017)



Verantwortung für Generationen



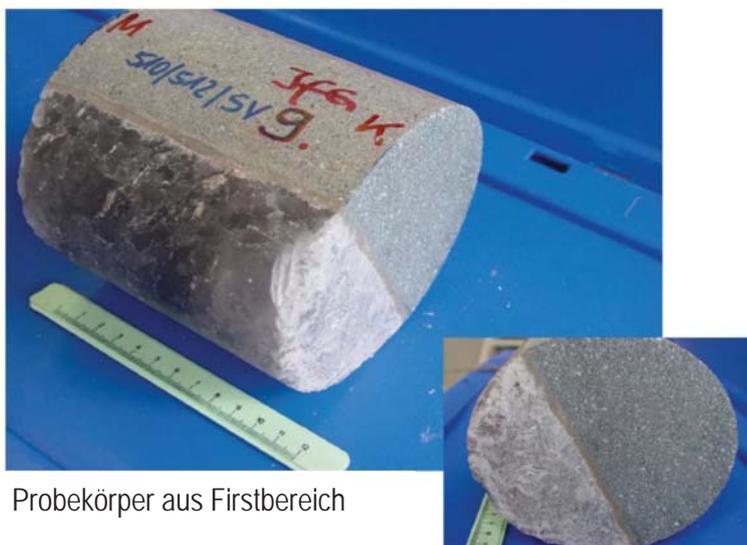
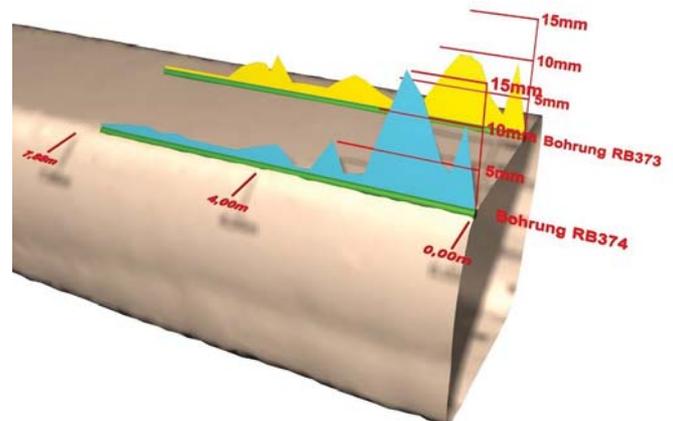
BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Permeabilitätsmessungen in Bohrungen und an Bohrkernen

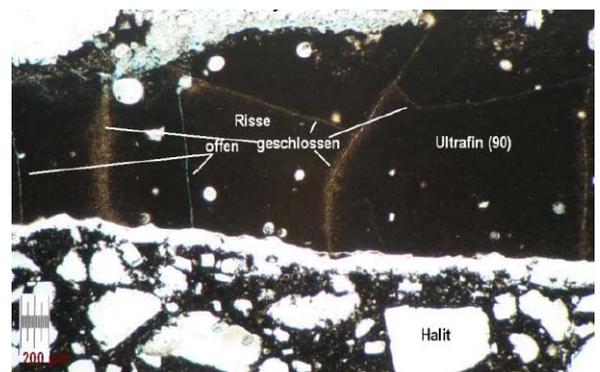
- Im intakten Salzbeton (RA328, RB637)
 - Effektive Gaspermeabilität $<6,5E-16m^2$ (Bohrloch), $<1,5E-18m^2$ (Bohrkern)
 - Effektive Lösungsp permeabilität $<6,0E-21m^2$ (Bohrloch), $<3,0E-21m^2$ (Bohrkern)
- Im geschädigten Salzbeton (RA328, RB637) – lokale Risse (z.B. angebohrte „Einbauteile“)
 - Effektive Gaspermeabilität $>1,0E-14m^2$ bis $<4,0E-21m^2$ (Bohrloch)
- In Kontur (RA510, RA515, RA532, RA537)
 - Effektive Gaspermeabilität $>1,0E-14m^2$ bis $5,0E-18m^2$ (Bohrloch), $1,5E-14m^2$ bis $8,5E-18m^2$ (Bohrkern)
 - Effektive Lösungsp permeabilität $4,7E-16m^2$ bis $1,0E-21m^2$ (Bohrkern)
- Verbund Hüllrohrüberbohrung (RA516)
 - Effektive Gaspermeabilität $>1,0E-14m^2$ (Bohrloch), $\sim 2,0E-15m^2$ (Bohrkern)
 - Effektive Lösungsp permeabilität $2,0E-19m^2$ bis $7,0E-20m^2$ (Bohrkern)
- **Ergebnisse / Konsequenzen**
 - Effektive Lösungsp permeabilität um Größenordnungen geringer als effektive Gaspermeabilität
 - Permeabilität von intaktem Salzbeton des Versuchsbauwerks wie bei Labormaterial
 - Schwachpunkte Risse und ALZ / Kontur bestätigt, Instrumentierung / Einbauten beeinflussen die Messergebnisse
 - Schwachpunkt Verfüllung Hüllrohrüberbohrung identifiziert

Konturspaltbildung und Injektionsergebnis

- Ungleichmäßige Konturspaltbildung / Dicke der Injektionsschicht (s. rechte obere Abbildung)
- Dünnschliffuntersuchungen:
 - Teilweise Mikrorisse im Injektionsbaustoff Ultrafin (90) angetroffen (s. rechte untere Abbildung)



Probekörper aus Firstbereich



Mögliche ergänzende Untersuchungen (bisher noch ohne konkrete Festlegung)

- Flächenhafte Ultraschallmessungen sowie „US“-Messungen in Bohrungen (Testmessungen an einem verfüllten Abbau mit offenen Rissen abgeschlossen, Entwicklung neuer Bohrlochsonden durch BAM Berlin)
- Videoendoskopie aller zugänglichen Bohrungen (insgesamt über 30 Stück), Bohrkernscan
- Stoßen von weiteren Bohrungen im luftseitigen Segment (bis zum ersten Trennblech)
 - „Hydrofrac“-Messungen – Rückschlüsse auf minimale Hauptspannungen im Bauwerk
 - Bewertung der hydraulischen Wirksamkeit und Relevanz von Rissen durch weitere Permeabilitätsmessungen, Rissuferuntersuchungen, Test bildgebender Verfahren (z.B. CT) zur Auswahl von Probekörpern (Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Rissinventar und Permeabilität)
- Korrosionsuntersuchungen zur Verbesserung des Prozessverständnisses (an in situ Proben)
- Untersuchung des mittleren Segmentes (dort weitgehend ungestörter Bereich mit anforderungsgemäßer Injektion und geringer Instrumentierung):
 - Bohrungen von der Luftseite sowie von der Begleitstrecke aus quer zur Streckenachse
 - Ultraschallmessungen zur Detektion bzw. dem Ausschluss von unverfüllten (luffterfüllten) Rissen
- ggf. weitere Anpassung von Materialstoffmodellen einschl. Verifizierung von Stoffmodellparametern
- Versuche zur technischen Verbesserung des Injektionsverfahrens (Injektionstechnik, -system, -material), der Technologie der Hüllrohrüberbohrung sowie der Verfüllung der Hüllrohrbohrung
- „Lessons learned“-Versuchsplanung (Bewertung der Funktionsfähigkeit der Instrumentierung, des Einflusses der Instrumentierung und der Aussagesicherheit des Versuches) für weitere(n) in situ-Versuch(e)
(unterstrichenen Themen werden im Anschluss beispielhaft erläutert)

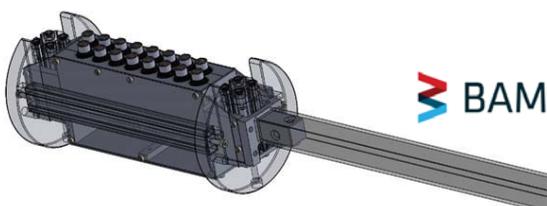
Ultraschallmessungen zur Risserkundung (Test im Abbau 2n)



Einsatz der BAM-Bohrlochsonden für Reflexions- und Transmissionsmessungen zwischen 2 Bohrungen (für Bohrl Lochdurchmesser: 133 mm, bisherige Messlänge: 30 m)

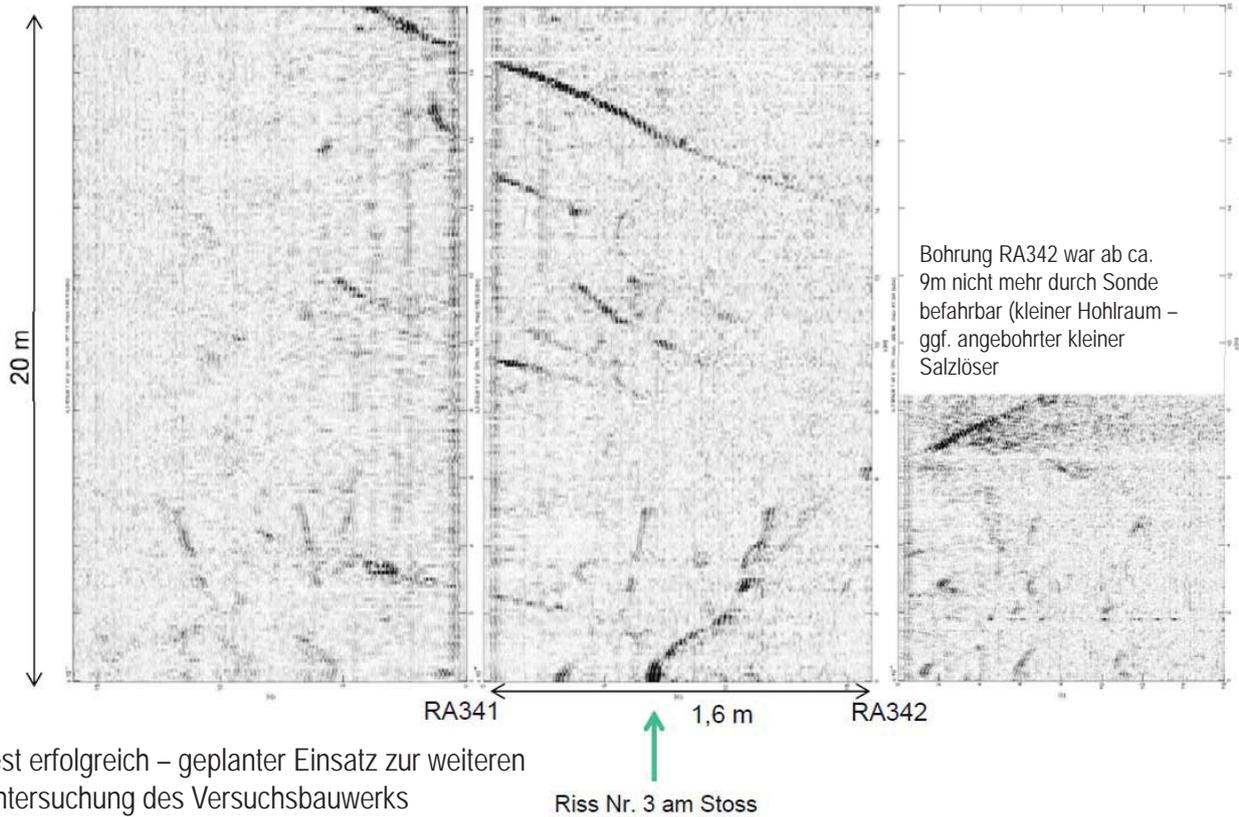


LAUS-Messsystem der BAM (Large Aperture Ultrasonic System) (Eindringtiefe > 5 m bis ca. 10 m)



Ziel: zerstörungsfreier Nachweis der Integrität eines Verschlussbauwerks einschl. der Anbindung an das Gebirge

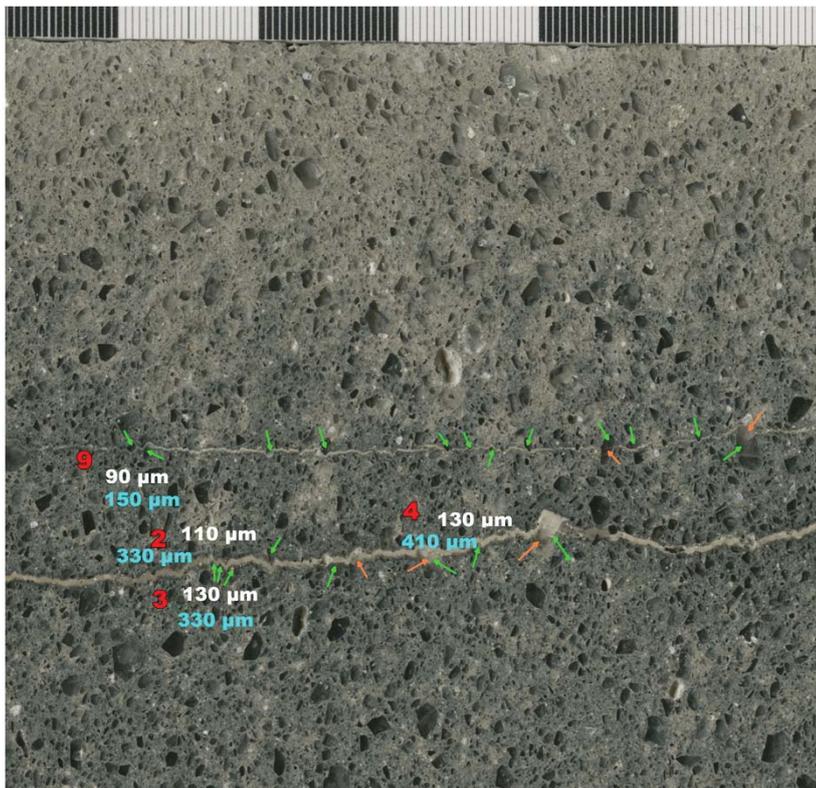
Ultraschallmessungen zur Risserkundung (Sonogramm - Abbau 2n)



Verantwortung für Generationen **DBE**

BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Rissuferuntersuchungen (Beispiel)



- Bohrung RA327
- Ziel: Systemverständnis hinsichtlich Rissbildung

Scan eines halbierten Bohrkerns

Scanausschnitt mit markierten Bereichen in denen eine Verschiebung erkennbar ist

- rot:** Nr. der Lokation für Messung,
- weiß:** Verschiebung in der Horizontalen;
- blau:** Rissweite,
- :** Riss verläuft um Zuschlagkorn herum,
- :** Riss durchtrennt Zuschlagkorn

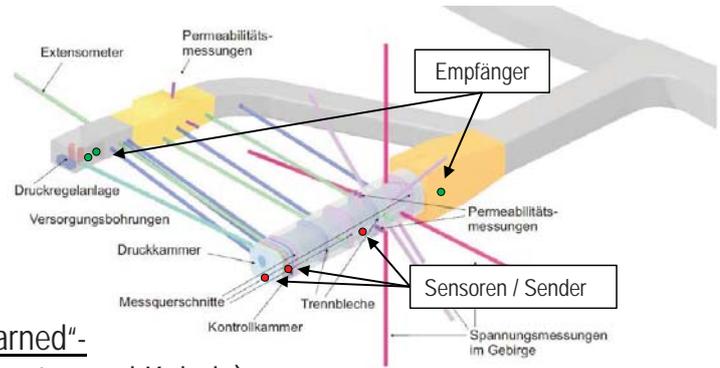
luftseitige Bewegungsrichtung des oberen Kernbereichs erkennbar

Verantwortung für Generationen **DBE**

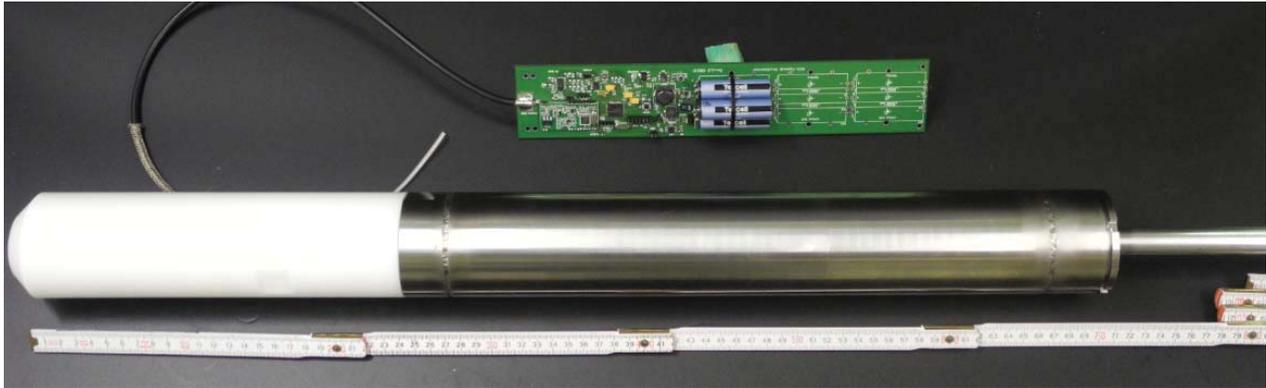
BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Kabellose Sensoren

- Ziel: Test eines Mess- und Übertragungssystems in Zusammenarbeit mit IBeWa Freiberg
- Einbau vor der Betonage
- Messbeginn: 10/2010 (Messungen dauern an)



Ggf. anwendbar für zukünftige „Lessons learned“-
Versuchsplanungen (Reduzierung von Einbauten und Kabeln)

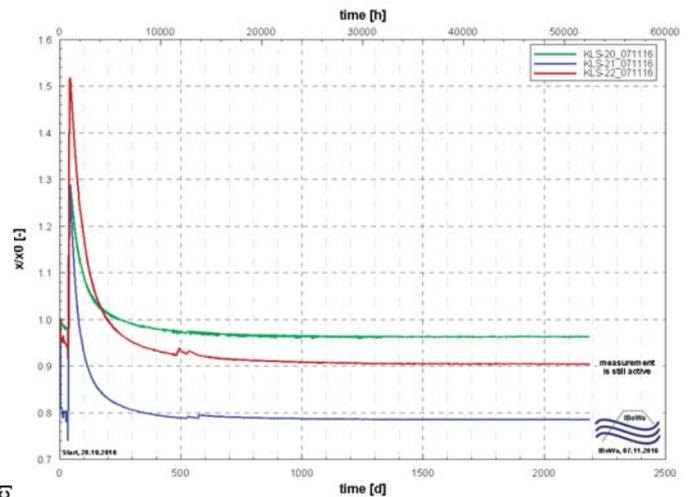
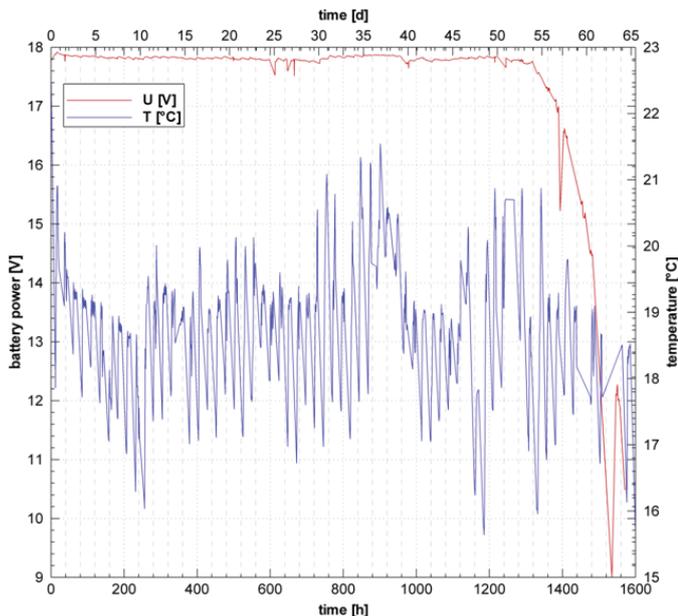


Einbau der kabellosen Sensoren



Ergebnisse zu Messungen mit kabellosen Sensoren

- Messwerterfassung, Übertragung der Daten funktioniert



- Kapazitätstest:

- Start im April 2012
- ca. 15 Mill. Messungen (1Hz)
- ca. 1.5 Mill. Datenübertragungen
- geschätzte Lebensdauer bis zu 18a

Modellanpassungen / Untersuchungen zur Rissbeschränkung

- Anpassung an Standortdaten für Steinsalzgebirge - Stoffmodell BGRa mit Kriechklassenindex 9
- Weiterentwicklung des (thermisch-mechanischen) Stoffmodells für Salzbeton:
 - Thermischer Quellterm (Wärmeentwicklung durch Hydratation) und Wärmeleitung
 - Hydrationsgradabhängige Entwicklung mechanischer Parameter
 - Anpassung an Messdaten aus dem Versuchsbauwerk („best-fit“-Datensätze)
- Ergebnisse der Berechnungen:
 - Gute Anpassung des Gebirgsverhaltens
 - Interaktion von Bauwerk-Steinsalzgebirge von hoher Bedeutung
 - Gute Wiedergabe der Temperaturentwicklung
 - Modellanpassung an Versuchsdaten für frühe Zeitpunkte (Bauphase) schwieriger, für spätere Zeitpunkt bessere Übereinstimmung erzielbar
 - Bisher keine eindeutige Erklärung für die Entstehung des sichtbaren Horizontalrisses
 - Aussagen zur Lage der Fluidfront, der Porendruck- und Sättigungsverteilung aufgrund der Inhomogenitäten der hydraulischen Eigenschaften nicht sinnvoll möglich (könnte nur ein Rückbau – Druckkammerlösung ist farbgetracert)
- **Konsequenz** → Verbesserungsbedarf identifiziert

Offene Punkte für die Nachweisführung / Konsequenzen

- Nachweis der Rissbeschränkung während der Bauzustände konnte nicht gezeigt werden (weder gegenständlich noch rechnerisch):
 - Ggf. bevorzugte Wege für das Eindringen von korrosiver Magnesium-haltiger Lösung in das Bauwerk („fingering“-Effekte)
- Nachweis der Langzeitbeständigkeit von Salzbeton derzeit nicht ausreichend:
 - Korrosion von Salzbeton (beruhend auf Rezeptur M2-4, d.h. für Untersuchung bewusst durchlässigeres Salzbeton-Material) unter Einwirkung von Mg-haltigen Lösung bekannt („lösender“ Angriff)
 - Hoher Einfluss von Permeabilitätskontrasten (Risse, Auflockerungszone) in bisheriger Korrosionsberechnung

Konsequenz:



Anpassung der Baustoffe / Bauwerkskonzepte - soweit möglich - mit Berücksichtigung eines "realitätsnahen" Lösungsschemismus (bisher Grenzfälle IP21- und NaCl-Lösung – lokationsspezifische Untersuchungen dauern an)

Mögliches Vorgehen für Streckenabdichtungen im Steinsalz

- Salzbetonkonzeption:
 - Anpassung Bauwerksentwurf (z.B. Erhöhung der Trennblechanzahl, lagenweise Betonage, ...)
 - gegenständliche Überprüfung des Korrosionsverhaltens (Korrosionsversuche an intaktem und „gestörten“ Material - z.B. mit „unvermeidlichen“ Mikrorissen - aus dem Versuchsbauwerk)
 - Maßnahmen zur Reduktion der Rissgefährdung (z.B. Reduzierung der Einbautemperatur)
 - Rezepturänderung (z.B. Austausch der Steinkohlenflugasche, andere Zementsorten)
 - Verbesserung der Materialstoffmodelle
- Zusätzliche Untersuchung alternativer Bauwerkskonzepte:
 - **MgO-Ortbeton** (vergleichbar mit „Asse“-Strömungsbarrieren bzw. FuE-Vorhaben „ELSA 2“)
 - **MgO-Spritzbeton** (vergleichbar mit dem Großversuch GV2 aus den FuE-Vorhaben „CARLA“ bzw. „MgO-SEAL“) ggf. in Kombination mit Asphaltdichtelementen
- Abgleich mit aktueller Szenarientwicklung:
 - Anforderungen an die Abdichtbauwerke (ggf. auch für unterschiedliche Lokationen)
 - erforderlicher „Zeitpunkt“ der Funktionsfähigkeit