

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



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 "Verschlussysteme – 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. Verschlussystemen (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 Salzschnelzen) 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 Verschlussysteme 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	31
<i>Strömungstechnischer Funktionsnachweis: Konzept zum gegenständlichen Dichtigkeitsnachweis für Verschlussbauwerke – Ergebnisse aus Phase I und Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten</i>	
U. Düsterloh, TU Clausthal.....	67
<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	85
<i>Eutektische Salzschnmelzen als Verfüll- und Verschlussmaterial</i>	
<u>H. Mischo</u> , <u>S. Becker</u> , TU Bergakademie Freiberg	119
<i>Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Ergebnisse der Projektphase I und Ausblick</i>	
D. Freyer, TU Bergakademie Freiberg	154
<i>Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff</i>	
K. Jantschik, <u>O. Czaikowski</u> , GRS, Braunschweig.....	187
<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	211
<i>MgO-SEAL - Verhalten von MgO-Spritzbeton bei Angriff von MgCl₂-Lösung</i>	
R. Schuhmann, KIT-CMM, Karlsruhe.....	232
<i>Das SANDWICH-Verschlussystem mit Äquipotenzialsegmenten</i>	
<u>U. Glaubach</u> , IBeWa, Freiberg; W. Kudla, TU Bergakademie Freiberg	257
<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	282
<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	313
<i>ELSA-II - Modellierungen zu Bitumen- und Bentonitdichtsystemen im Tongestein</i>	

R. Wendling, Asse-GmbH, Remlingen	340
<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	363
<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
Projektträger Karlsruhe im Auftrag des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
veranstaltet.

Information

Projektträger 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

Projektträger für das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Stand: 26.04.2017

www.ptka.kit.edu/wte



Fachgespräch

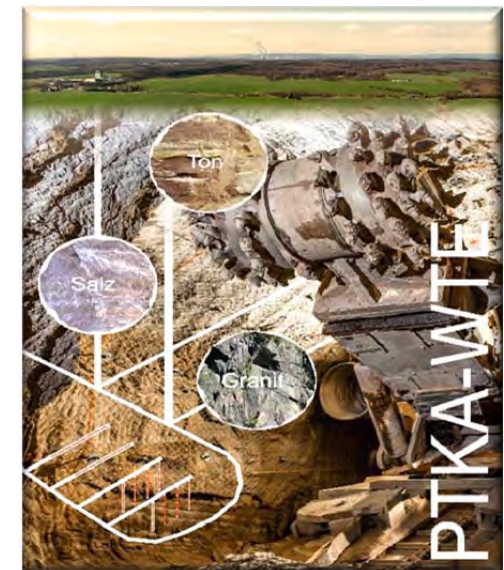
Verschlusssysteme

Konzepte, Baustoffe, Simulation,
Demonstration und Anwendung

Freiberg

03.05. - 04.05.2017

Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)



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

Gefügestabilsierter 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 salinarer 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, Körnerstr. 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



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Verantwortung
für Generationen
Responsibility
for Generations

DBETEC
DBE TECHNOLOGY GmbH

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

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:

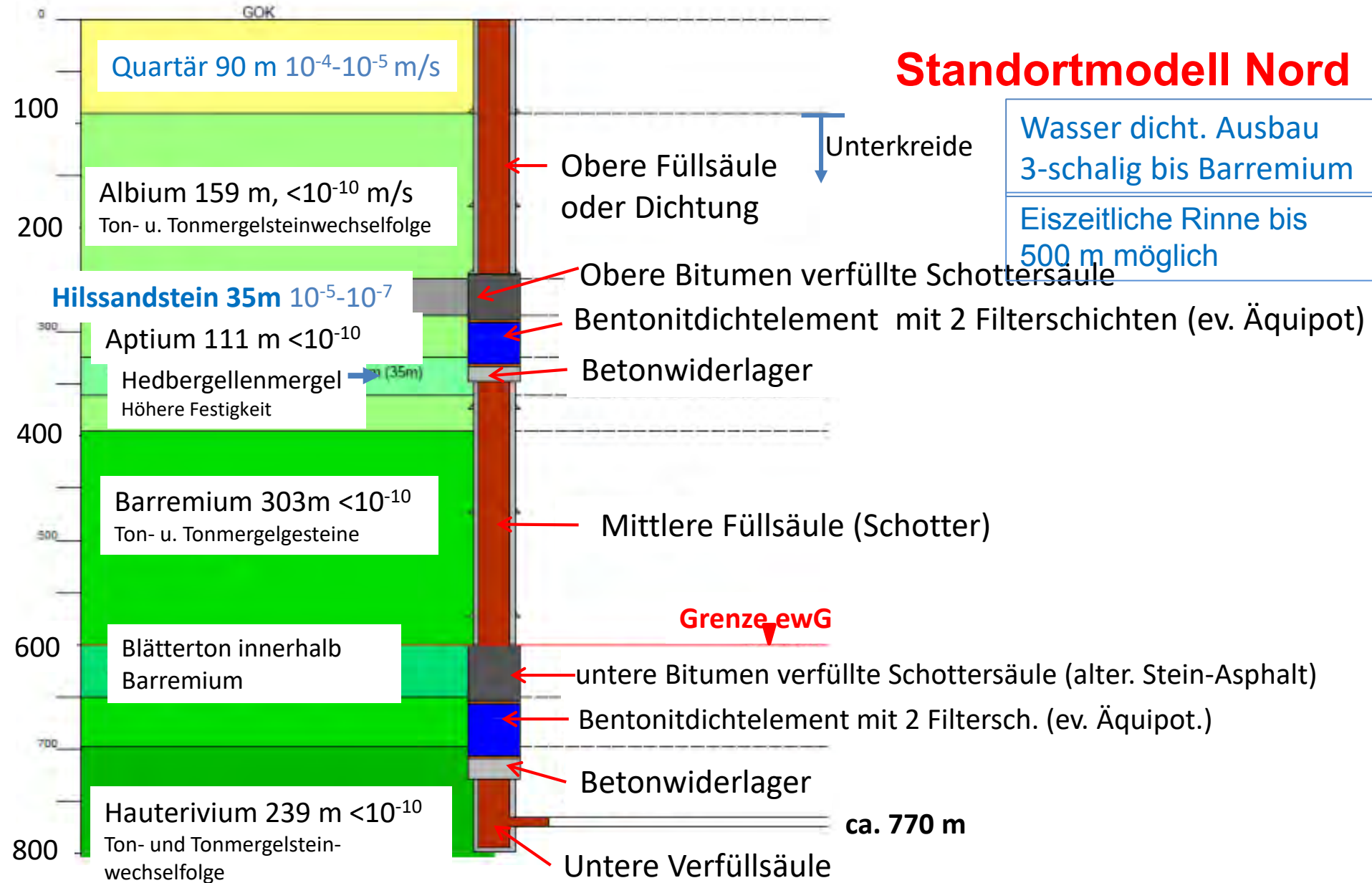
1. Redundanter und diversitärer Aufbau
2. Modularer Aufbau zur Anpassung an verschiedene geologische Formationen
3. Aquifere in verschiedenen Horizonten durch zusätzliche Dichtungen trennen (Deckgebirgsdichtungen)

1. Geologische Verhältnisse übernommen aus dem Projekt
ANSICHT

2. Daraus zwei Schachtverschlusskonzepte entwickelt für
 - a) „Standortmodell Nord“ (Unterkreidetone)
 - b) „Standortmodell Süd“ (Opalinuston)

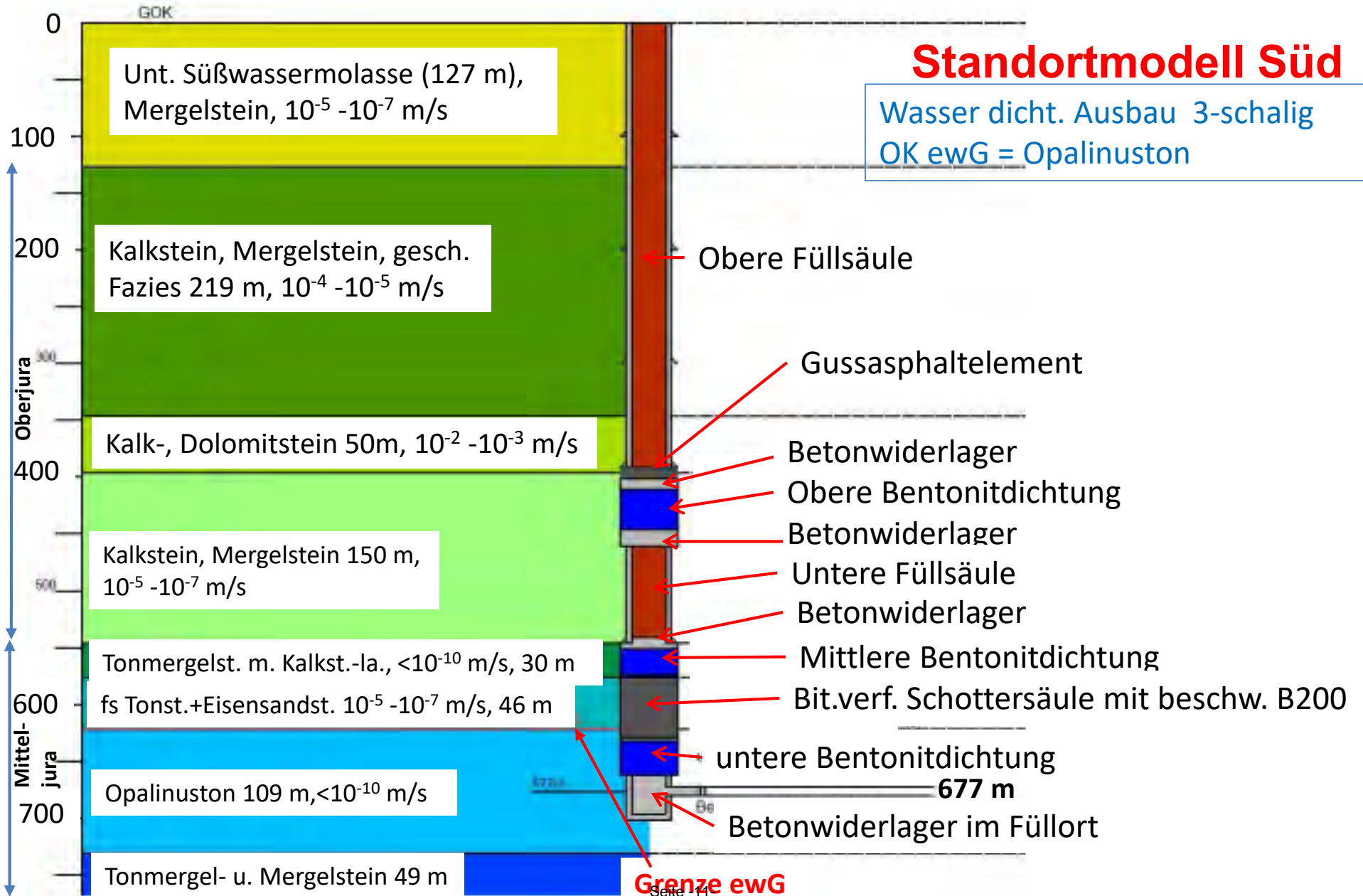
Schachtverschlusskonzept im Tonstein

Standortmodell Nord



Schachtverschlusskonzept Standortmodell Nord

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

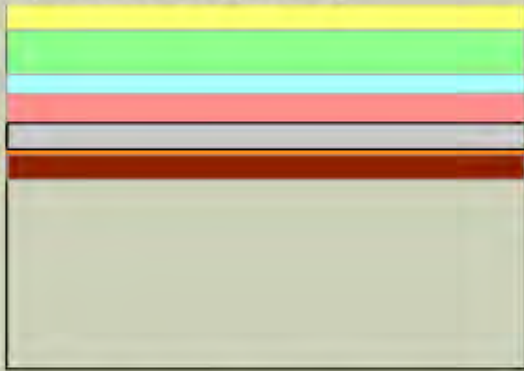
Vorbemessung:

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

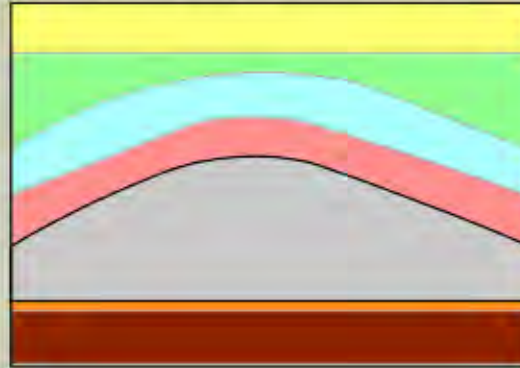
Schachtverschlusskonzepte im Steinsalz

Lagerungsformen - flach

a) flache Lagerung

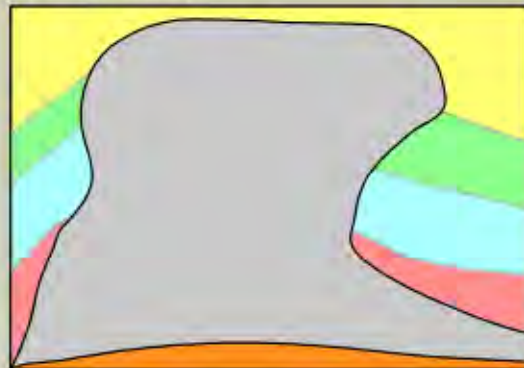


b) Sattel bzw. Salzkissen

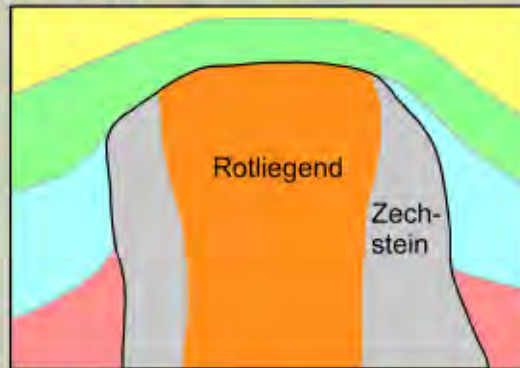


Lagerungsformen - steil

c) Salzdiapir



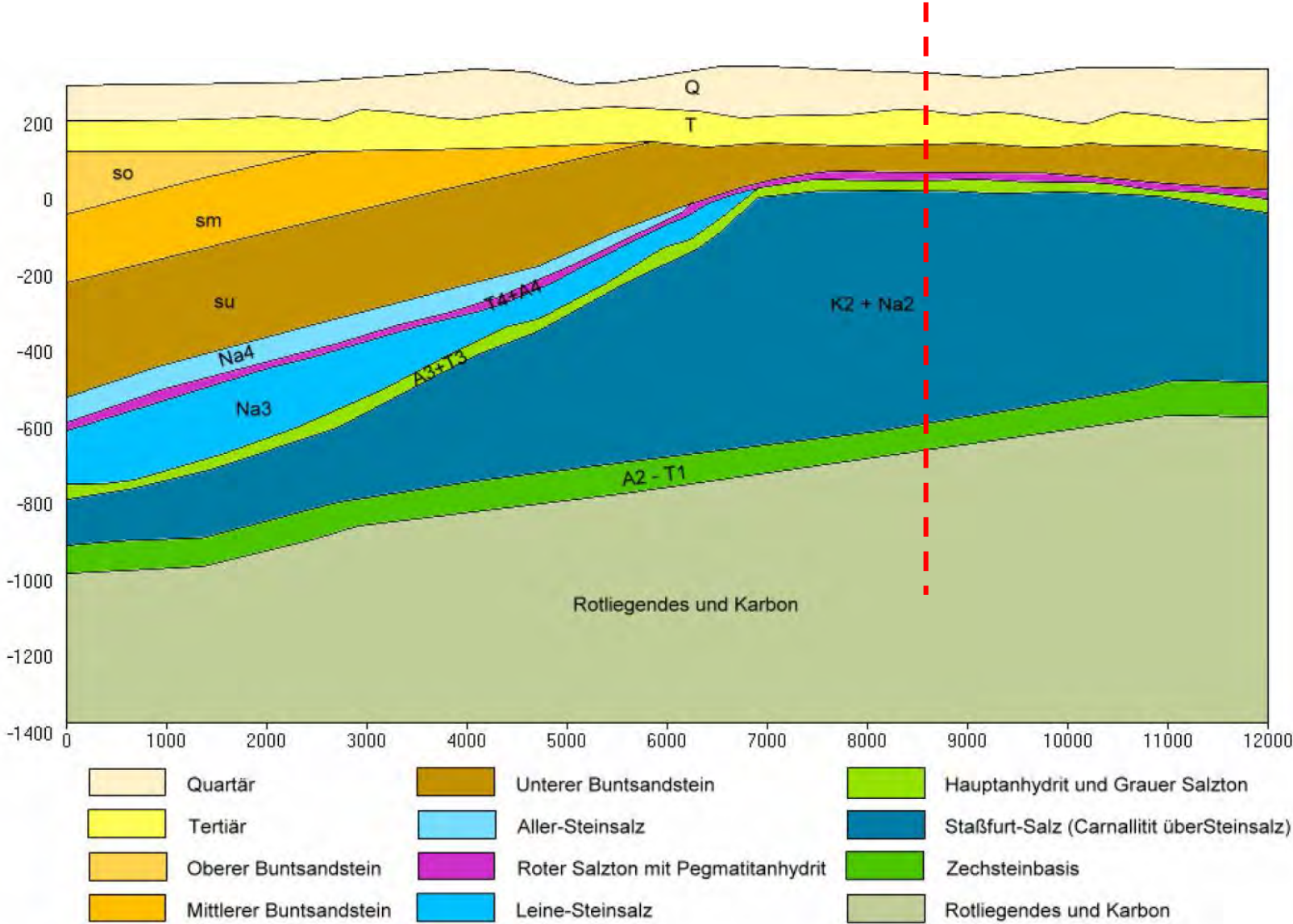
d) Doppelsalinar



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

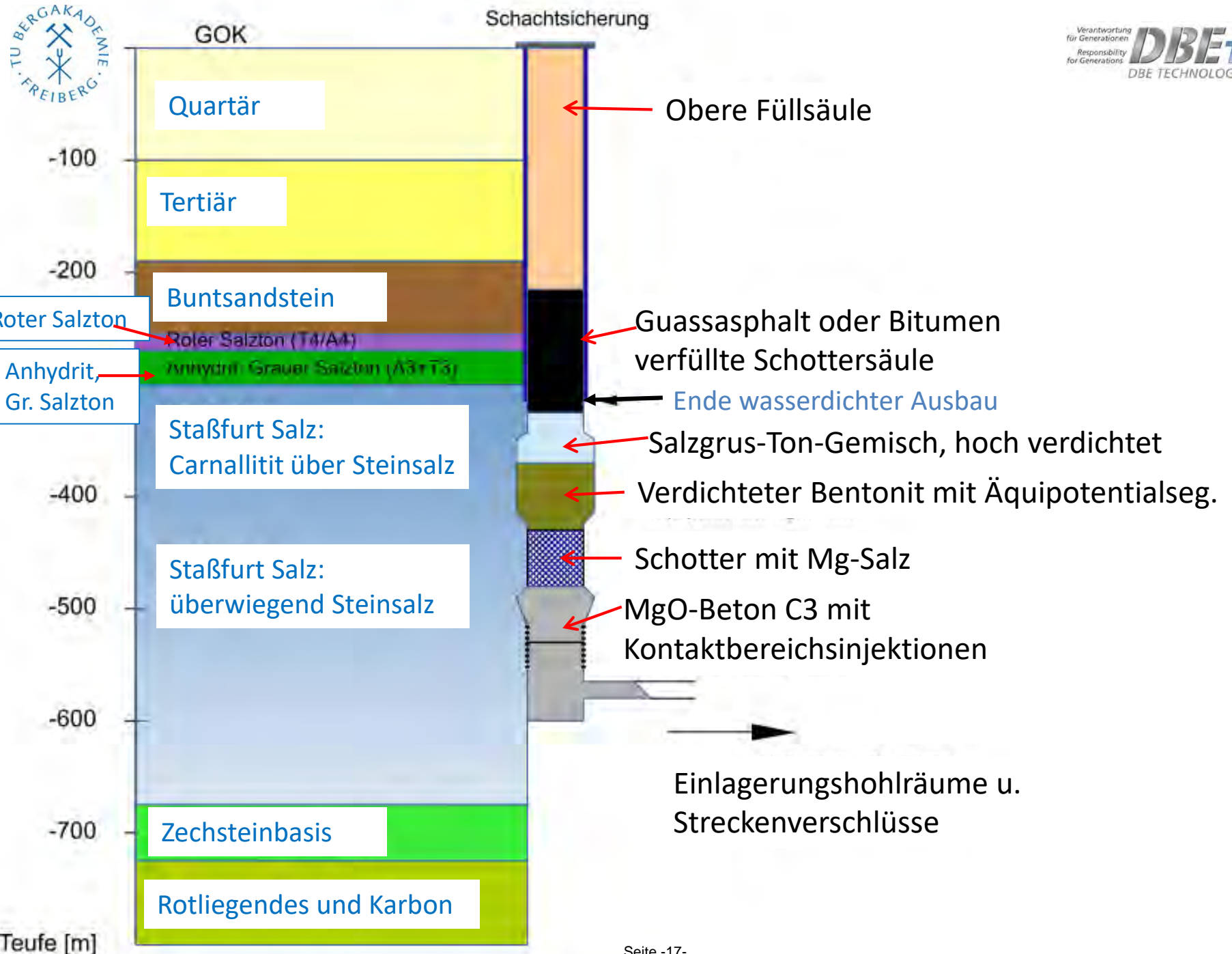
2. Schachtverschlusskonzept in Steinsalz in steiler Lagerung; siehe VSG (gilt auch für hohe Salzkissen, Salzstück und Salzmauern)

nach Minkley et.al. 2010



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

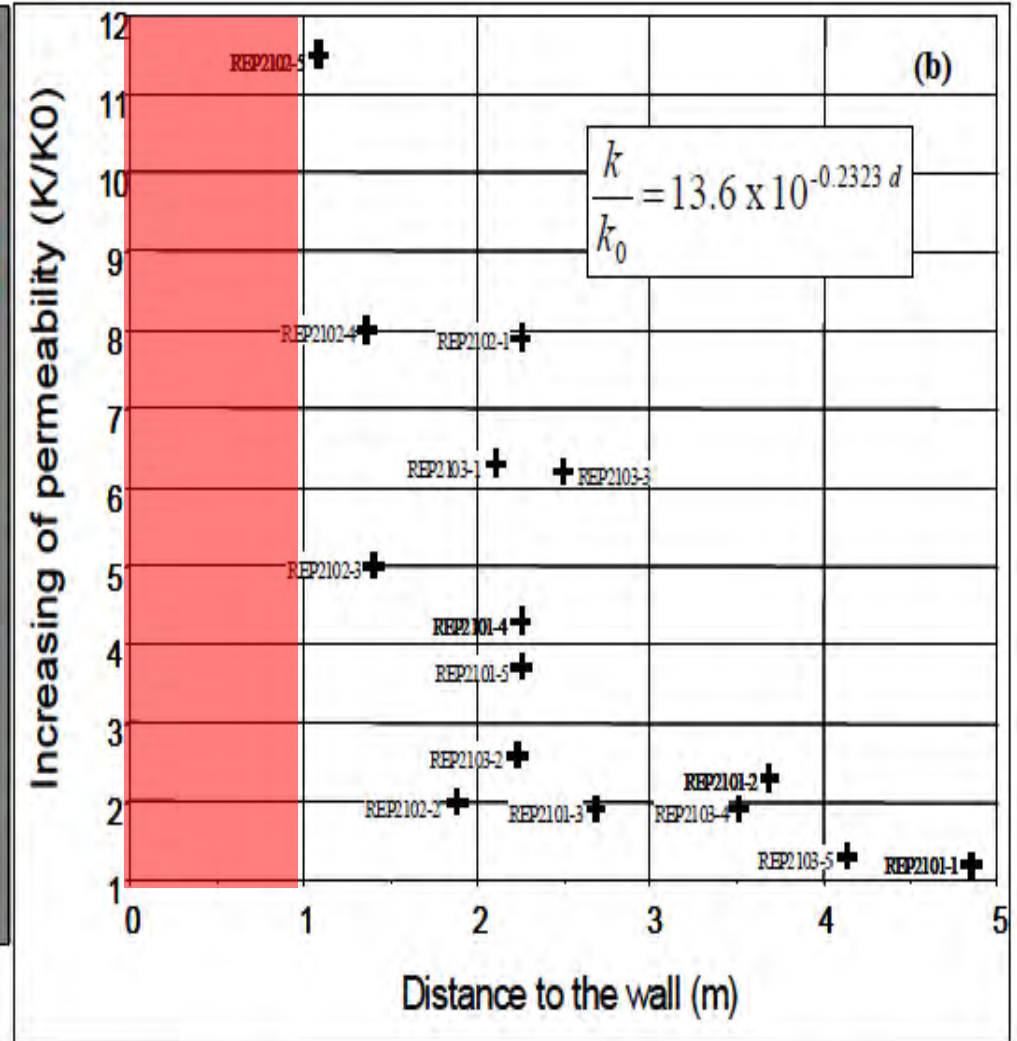
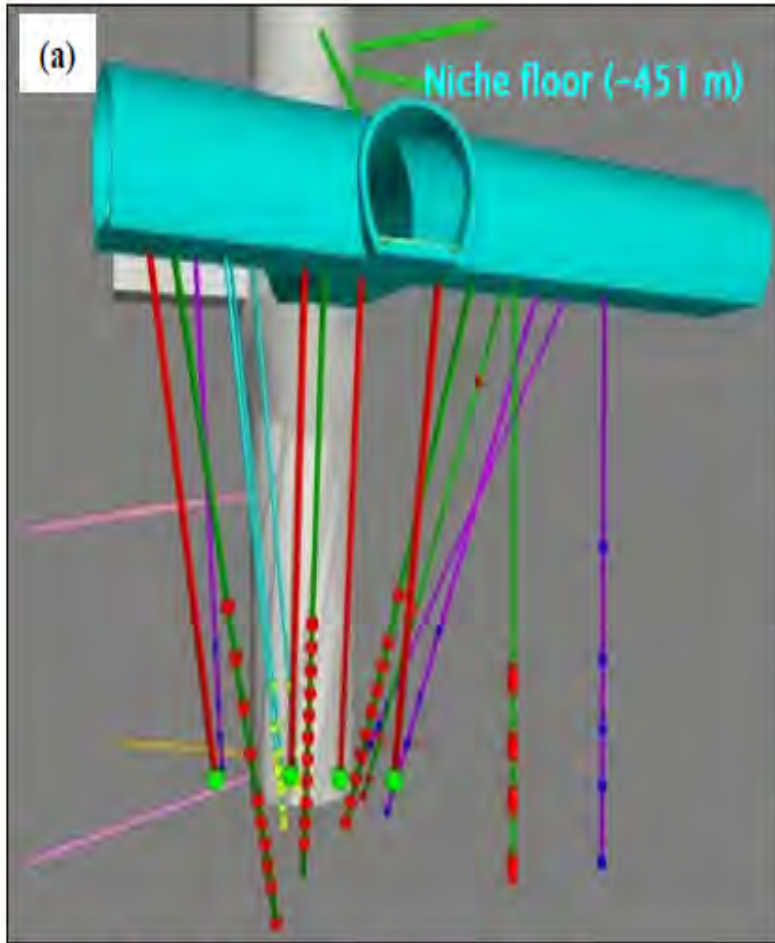
nach Minkley et.al. 2010



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)

ALZ eines Schachtes im Tonstein



Souley 2007

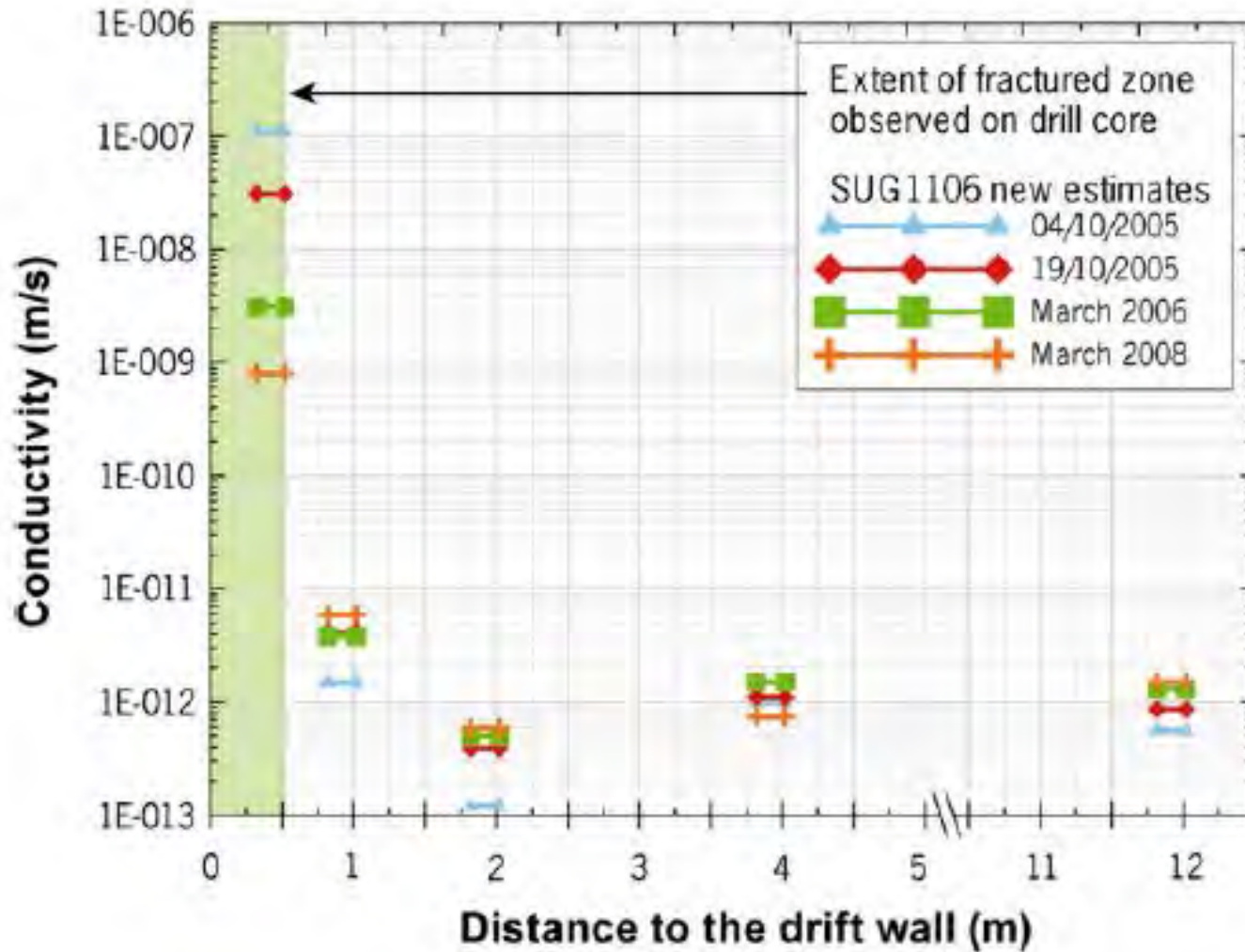
ungestört $4 \cdot 10^{-21}$ bis $7 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$

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**

ALZ eines Schachtes im Tonstein



- 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

ALZ eines Schachtes im Tonstein

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

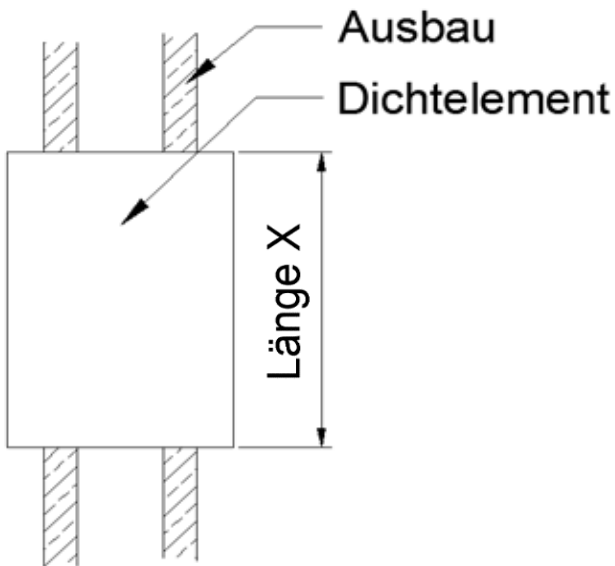
Ziel: Herleitung der optimalen Nachschnitttiefe

AP 1.4.1:

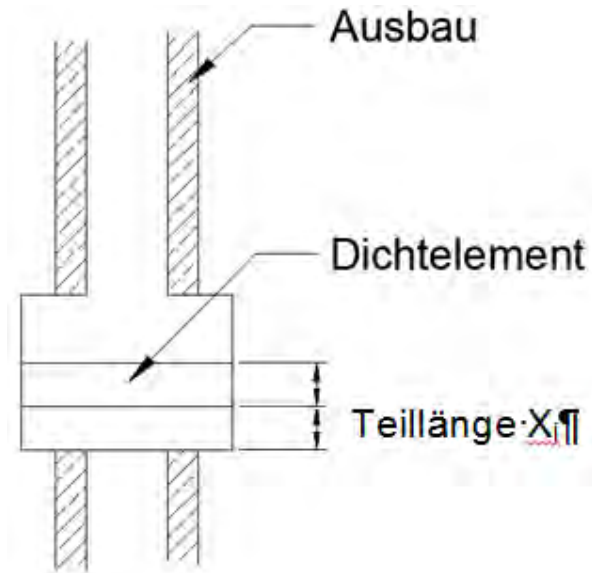
Voraussetzungen für die Technologie des Beraubens des Schachtausbaus mit nachfolgendem auflockerungsminimierendem Nachschnitt der Gebirgskontur im Tongestein.

Variantenbetrachtung

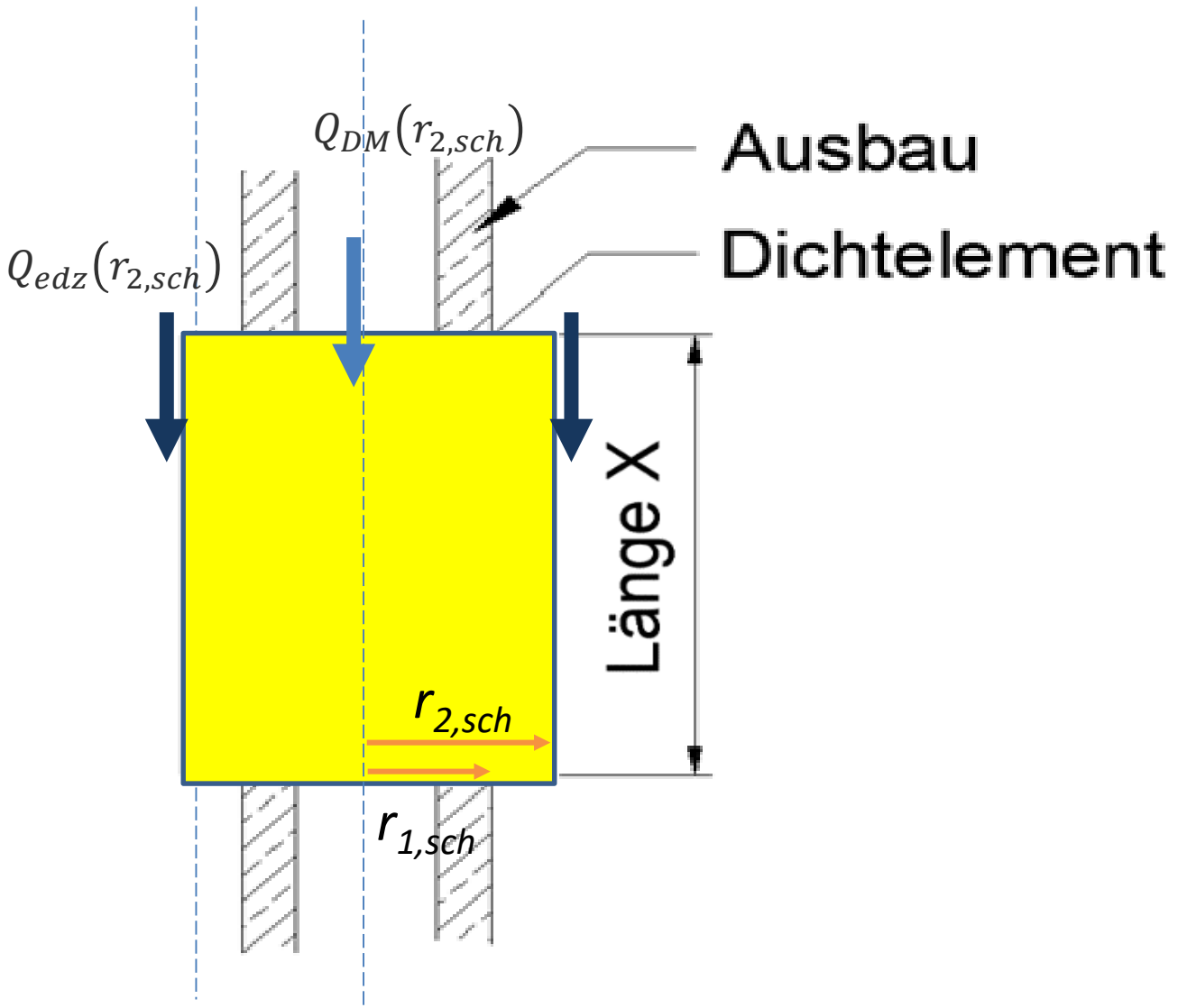
Variante 1: in einem Schritt

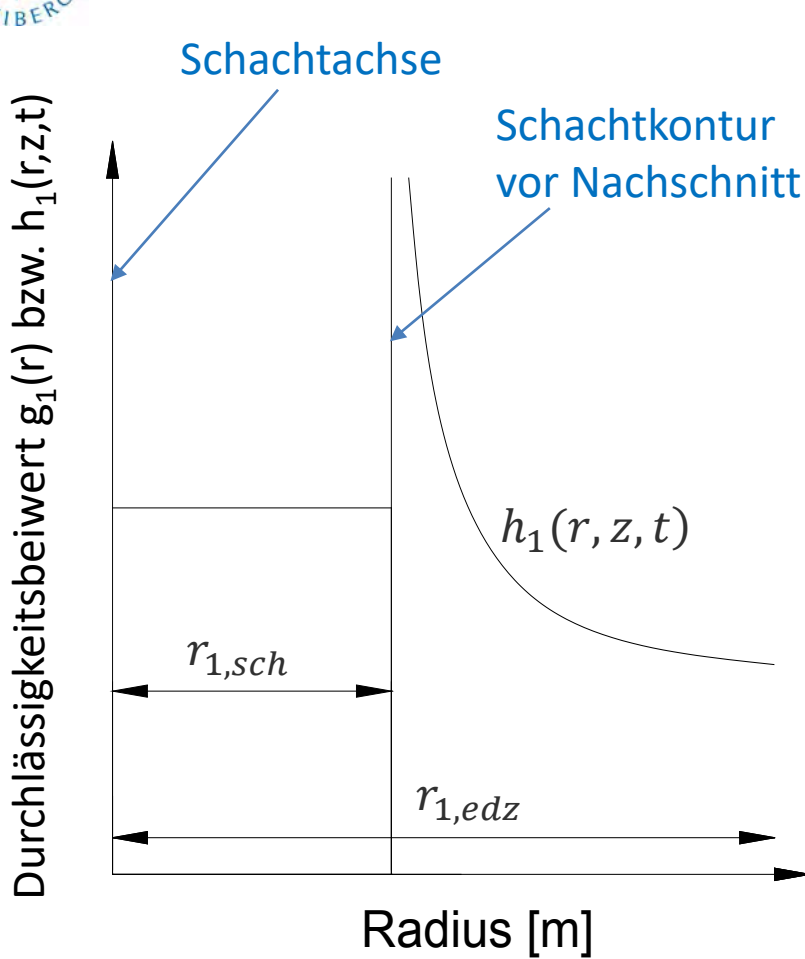


Variante 2: Etappenweise

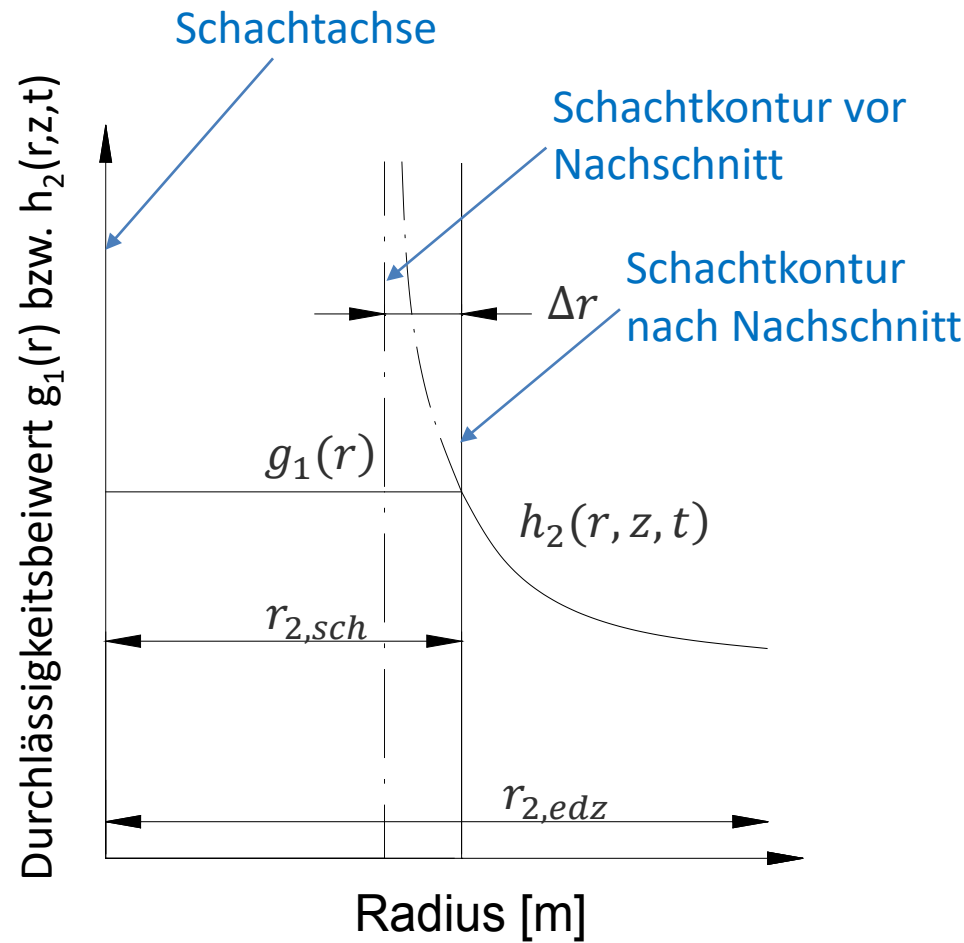


Nachschnitt der Gebirgskontur im Tonstein





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

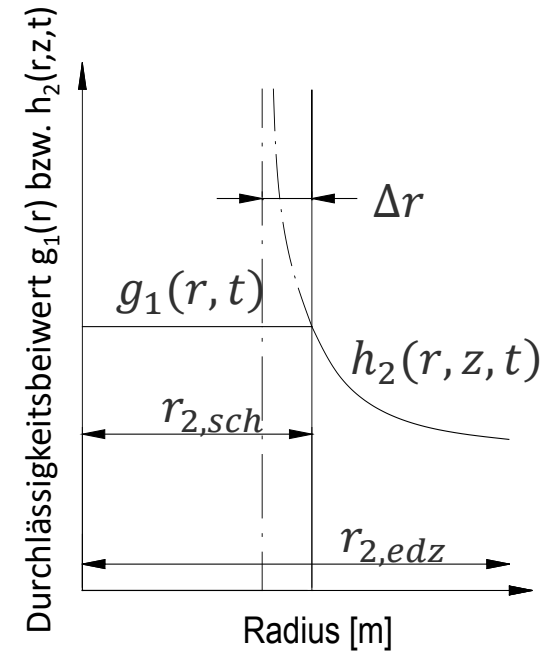
Optimierungsansatz für den Konturnachschnitt mit dem Ziel, den Volumenstrom zu minimieren

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

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

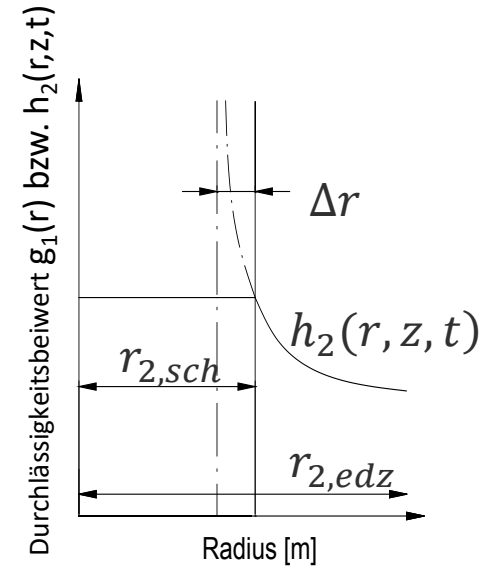
$$Q(r_{2,sch}, t) = A_{2,sch} g_1(r, t) i + \int_0^{A_{edz}} h(r, r_{2,sch}, t) i dA$$

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



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.

$$\frac{Q(r_{2,sch}, t)}{d r_{2,sch}} = 2 r_{2,sch} \pi g_1(r, t) i + \frac{\left(2\pi \int_{r_{2,sch}}^{r_{edz}} h(r, r_{2,sch}, t) i r dr \right)}{d r_{2,sch}} \stackrel{!}{=} 0$$

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).

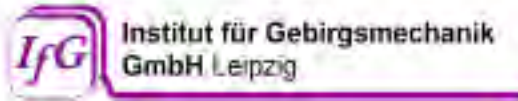
Forschungsvorhaben ELSA

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

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-UTEC Salt Technologies



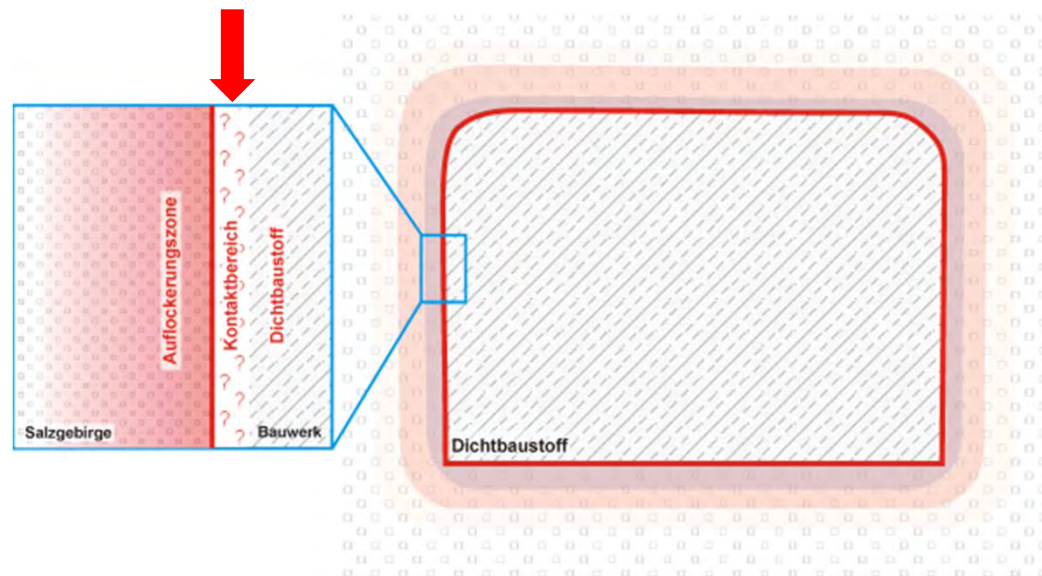
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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**





Nachweiskonzept & Installation

Testung

Soll-Permeabilität (k_{soll}) erfüllt
(dicht) ✓

$k_{soll} < k_{ist}$ (Vergütung erforderlich)

Charakterisierung des Kontaktbereiches
(Permeabilität in Abhängigkeit der Makroporosität)

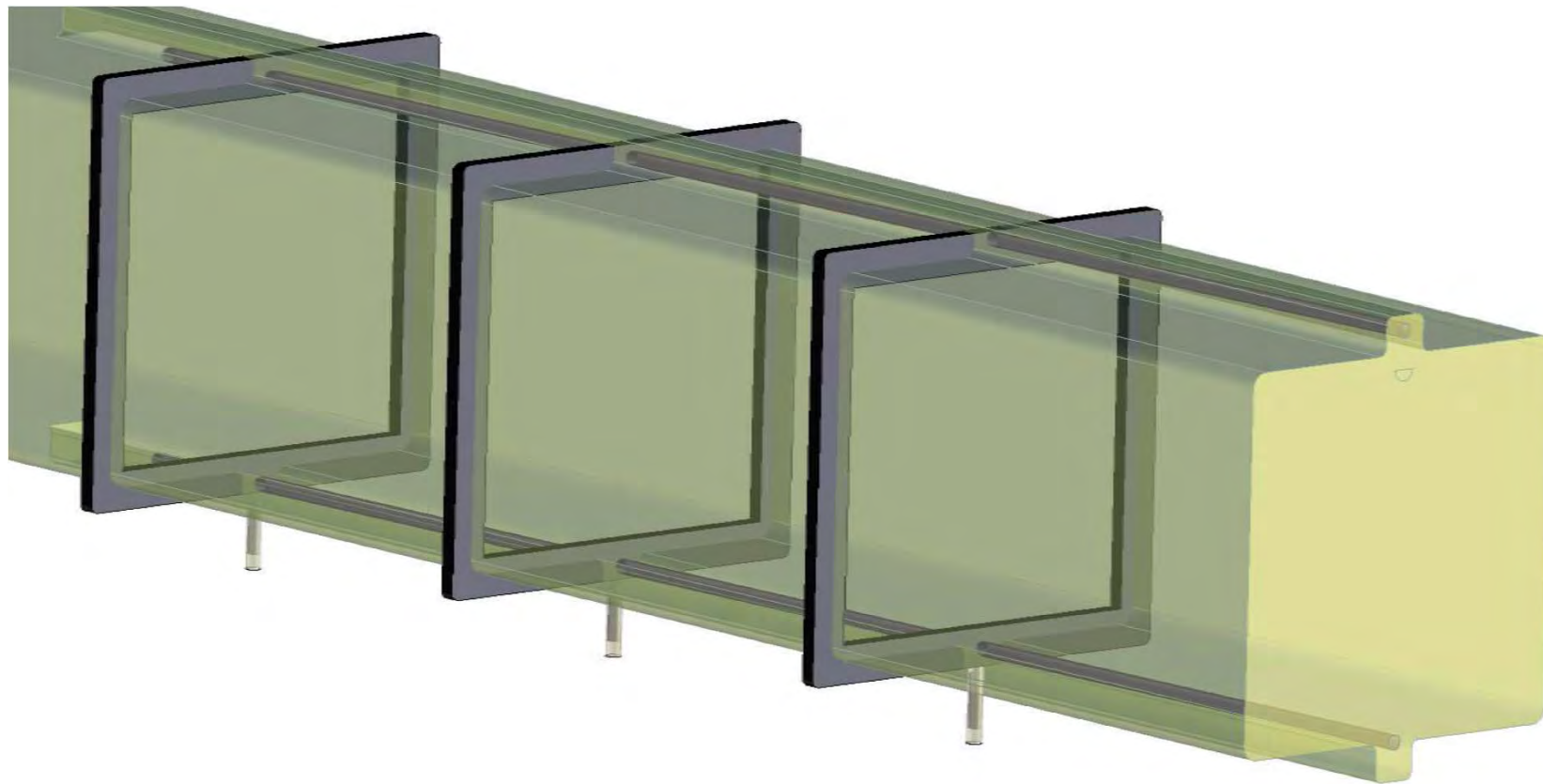
Auswahl von Injektionsmedium / -konzept

Injektion/Vergütung

STROEFUN Phase I und Ausblick



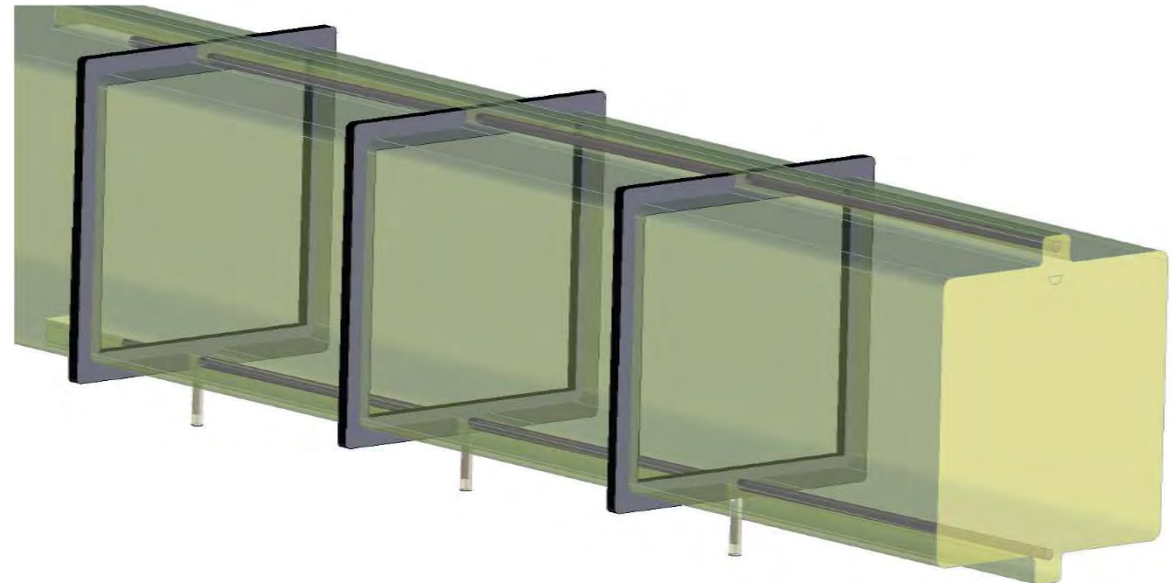
Konzept Strömungstechnischer Funktionsnachweis



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



Konzept Strömungstechnischer Funktionsnachweis

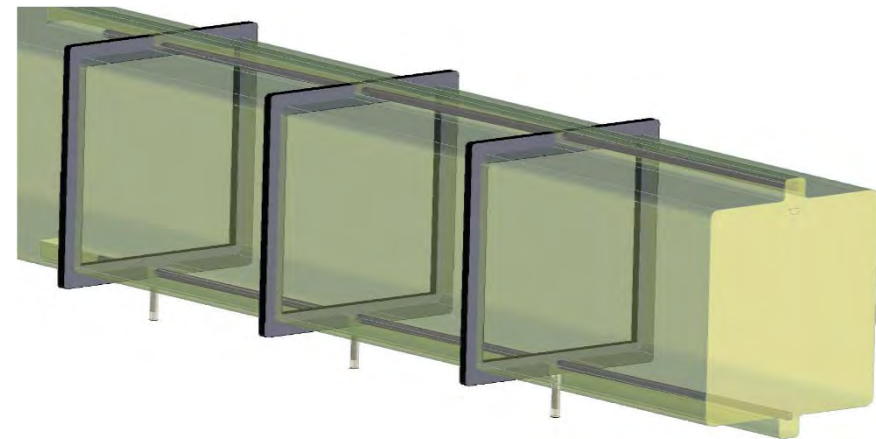
Rahmenkammern

■ 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

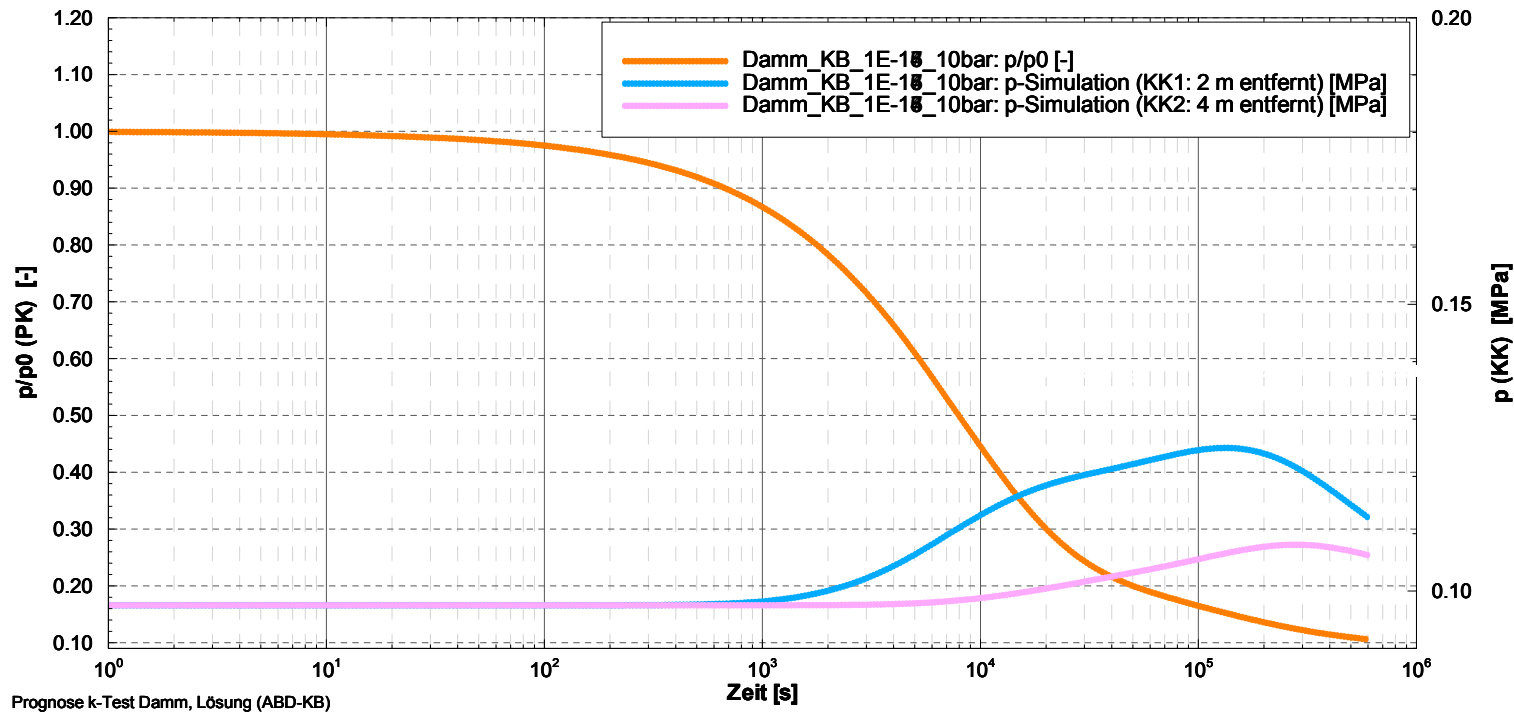
■ Nachteile

- Mehrfachpacker erforderlich für Minimierung Bohrungsanzahl
- möglicherweise Schwierigkeiten mit Spülen



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

Nachweiskonzept & Installation

Testung

Soll-Permeabilität (k_{soll}) erfüllt
(dicht) ✓

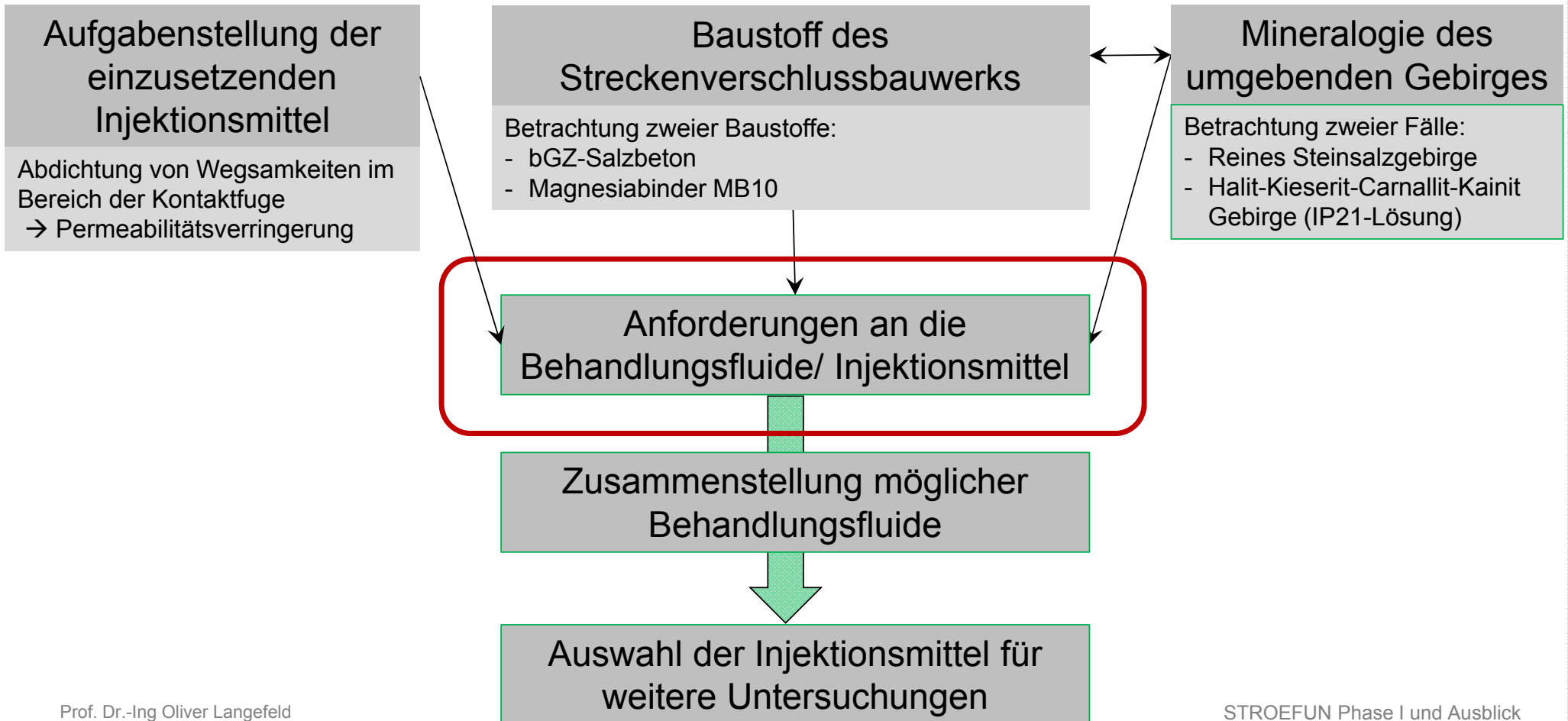
$k_{soll} < k_{ist}$ (Vergütung erforderlich)

Charakterisierung des Kontaktbereiches
(Permeabilität in Abhängigkeit der Makroporosität)

Auswahl von Injektionsmedium / -konzept

Injektion/Vergütung

Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel





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

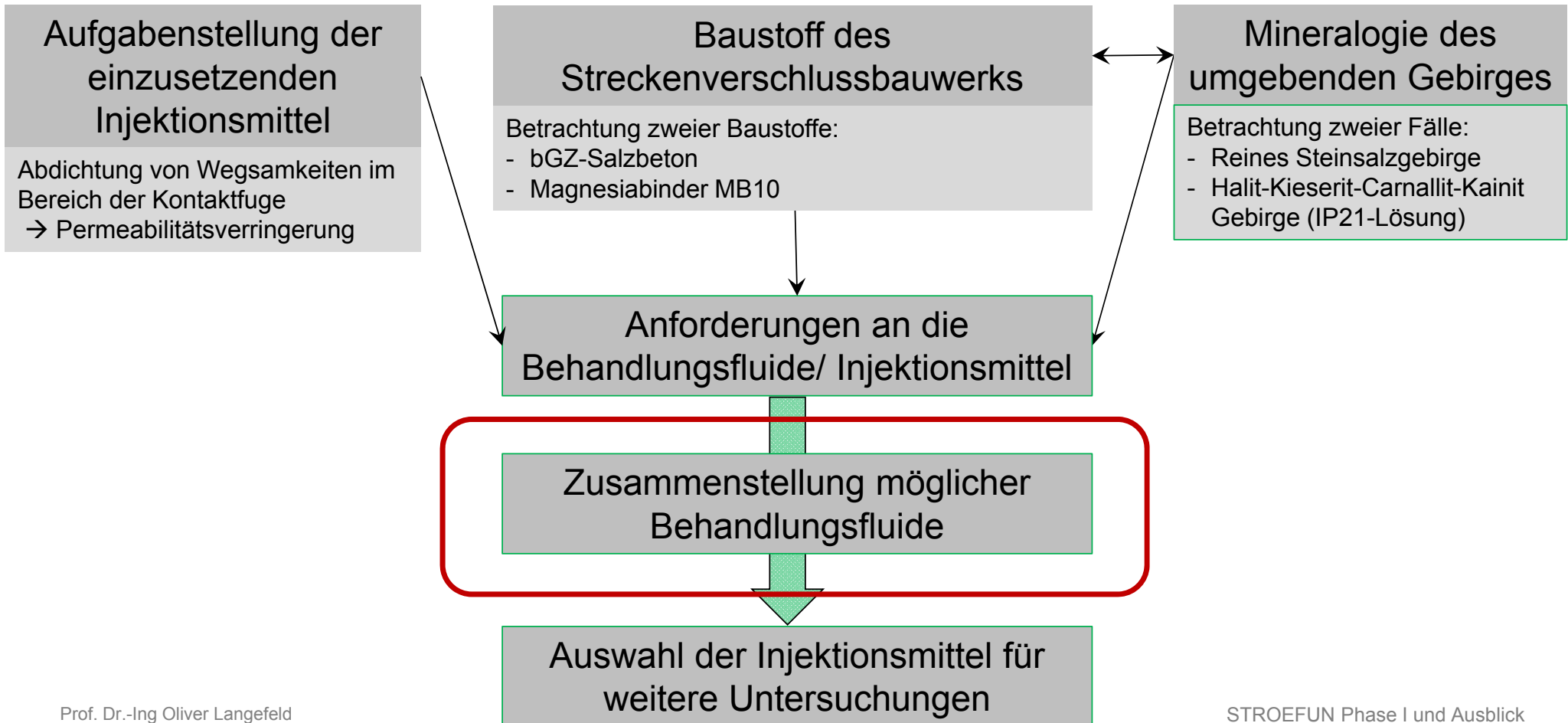
Beständigkeit gegenüber salinaren Lösungen

- Zwei verschiedene Lösungszusammensetzungen:
- NaCl-gesättigt
 - Lösungen mit >50 g/l $MgCl_2$

Partikelgröße unter $30 \mu m$

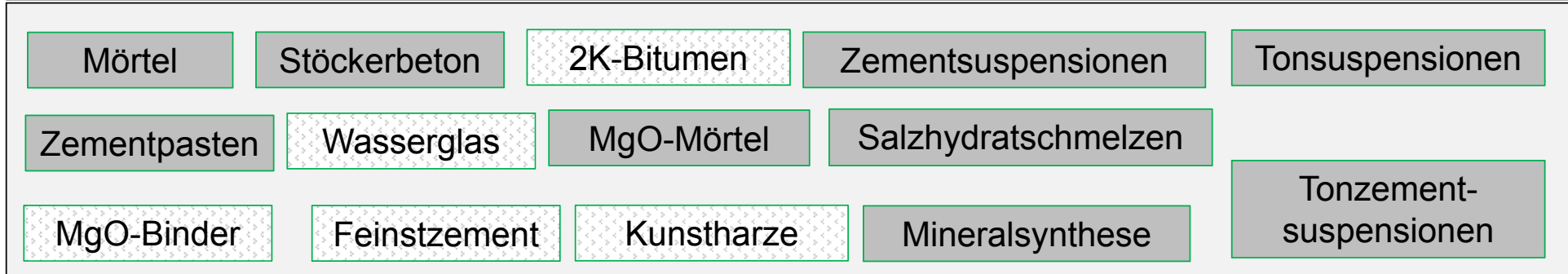
Damit wird ein Eindringen in Wegsamkeiten mit Öffnungsweiten unter $150 \mu m$ ermöglicht

Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel



Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel

Zusammenstellung möglicher Behandlungsfluide Injektionsmittel



partikelgestützt

Feinstzement Ultrafin 12

Feinstmagnesiabinder IM 4+

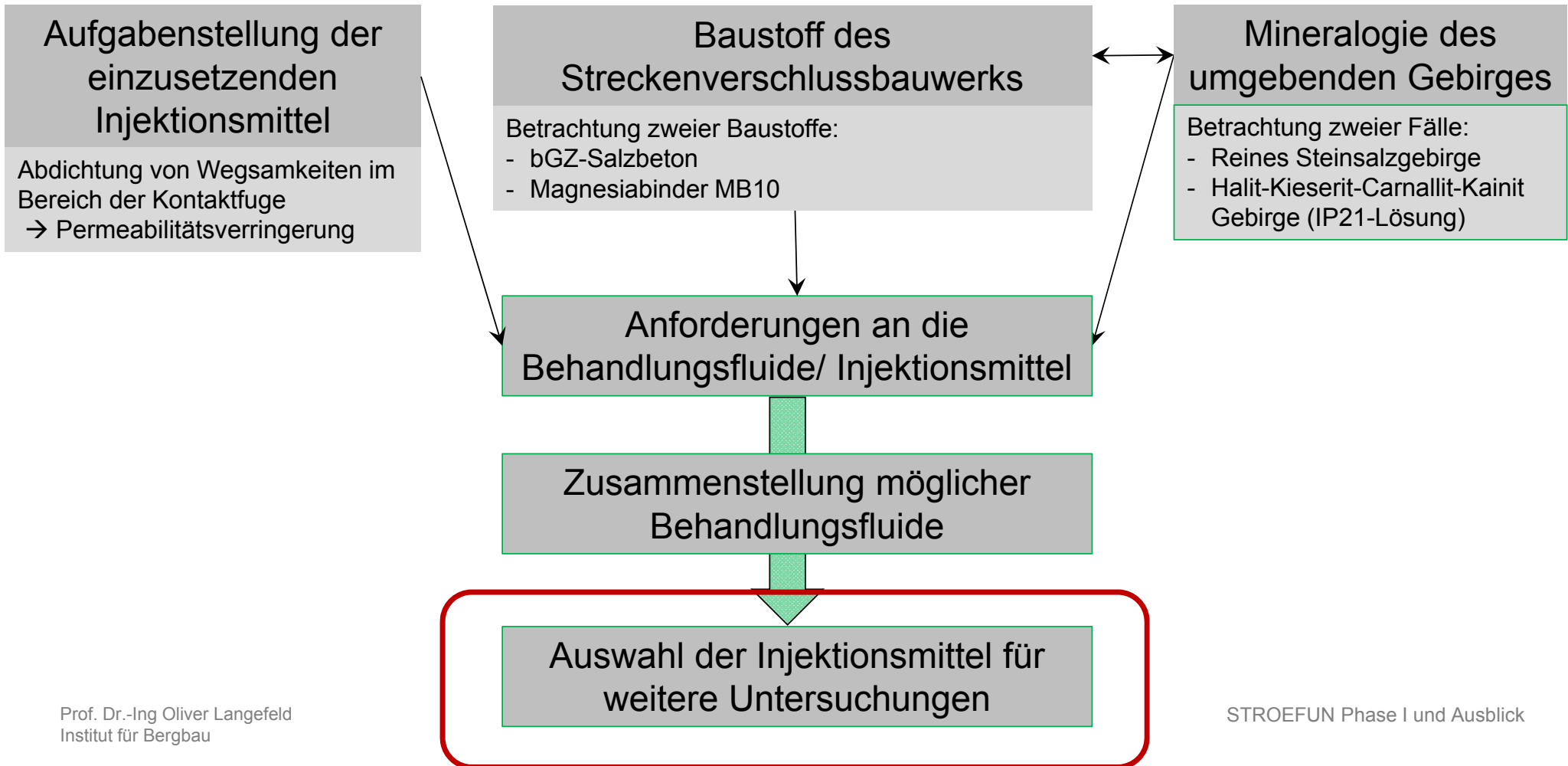
Bitumen 2K-Bitumen

partikelfrei

2-Komponenten Epoxidharz
Denepox 40

Natronwasserglas
Grädigkeit 37/40

Auswahl und Erprobung unterschiedlicher Injektionsmittel



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

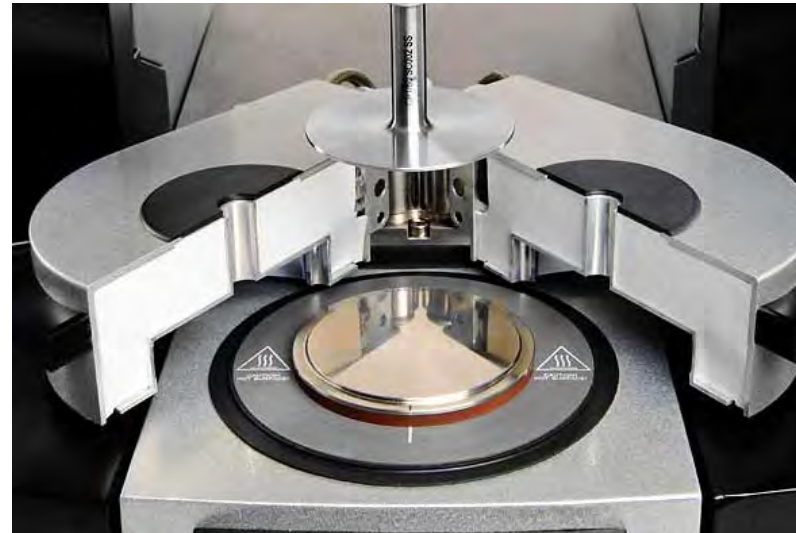
Untersuchungen laborative Charakterisierung

Zwei verschiedene Rheometer kamen zum Einsatz



Rotationsviskosimeter

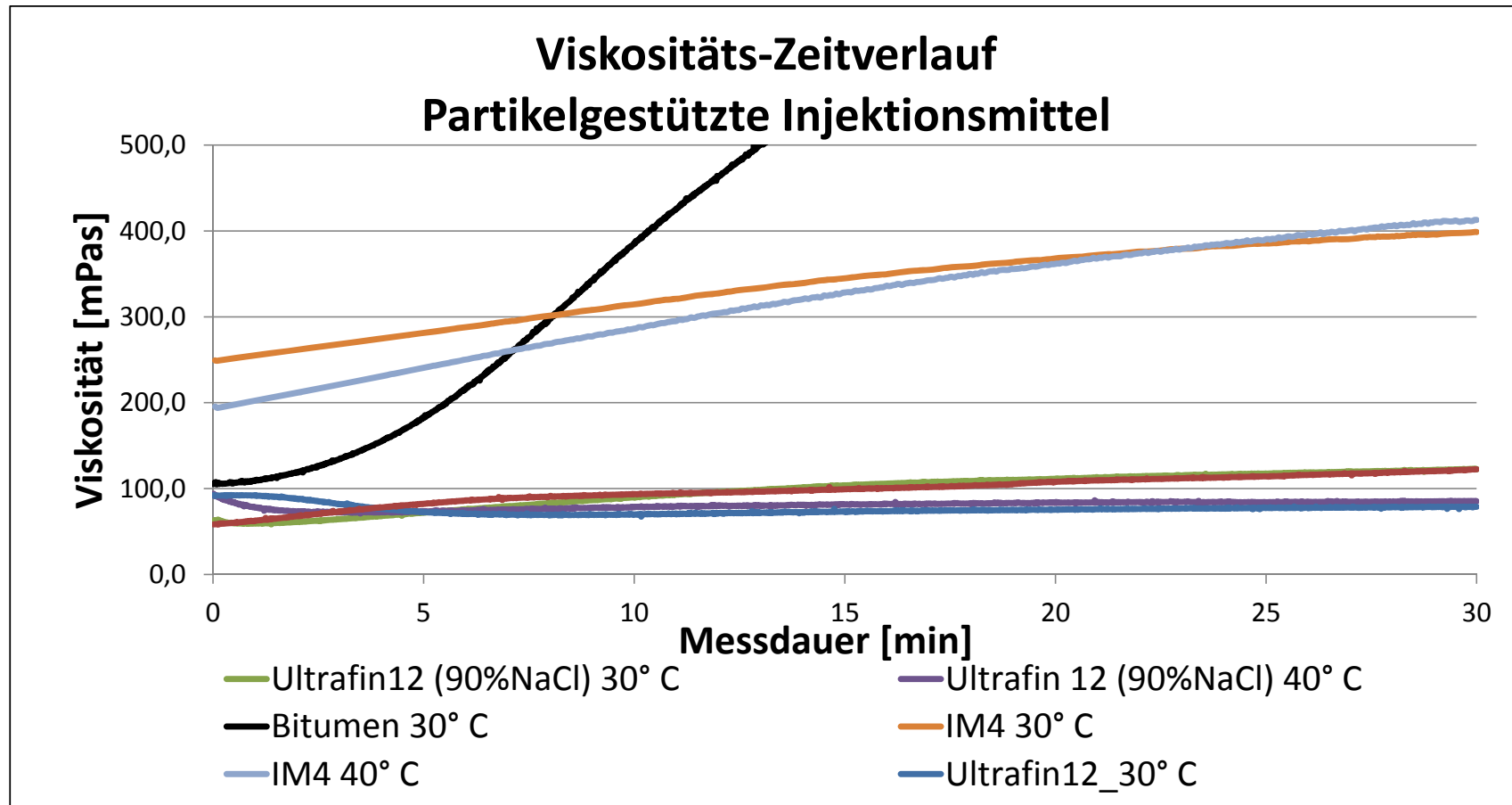
- Ultrafin 12
- Wasserglas
- 2K-Bitumen



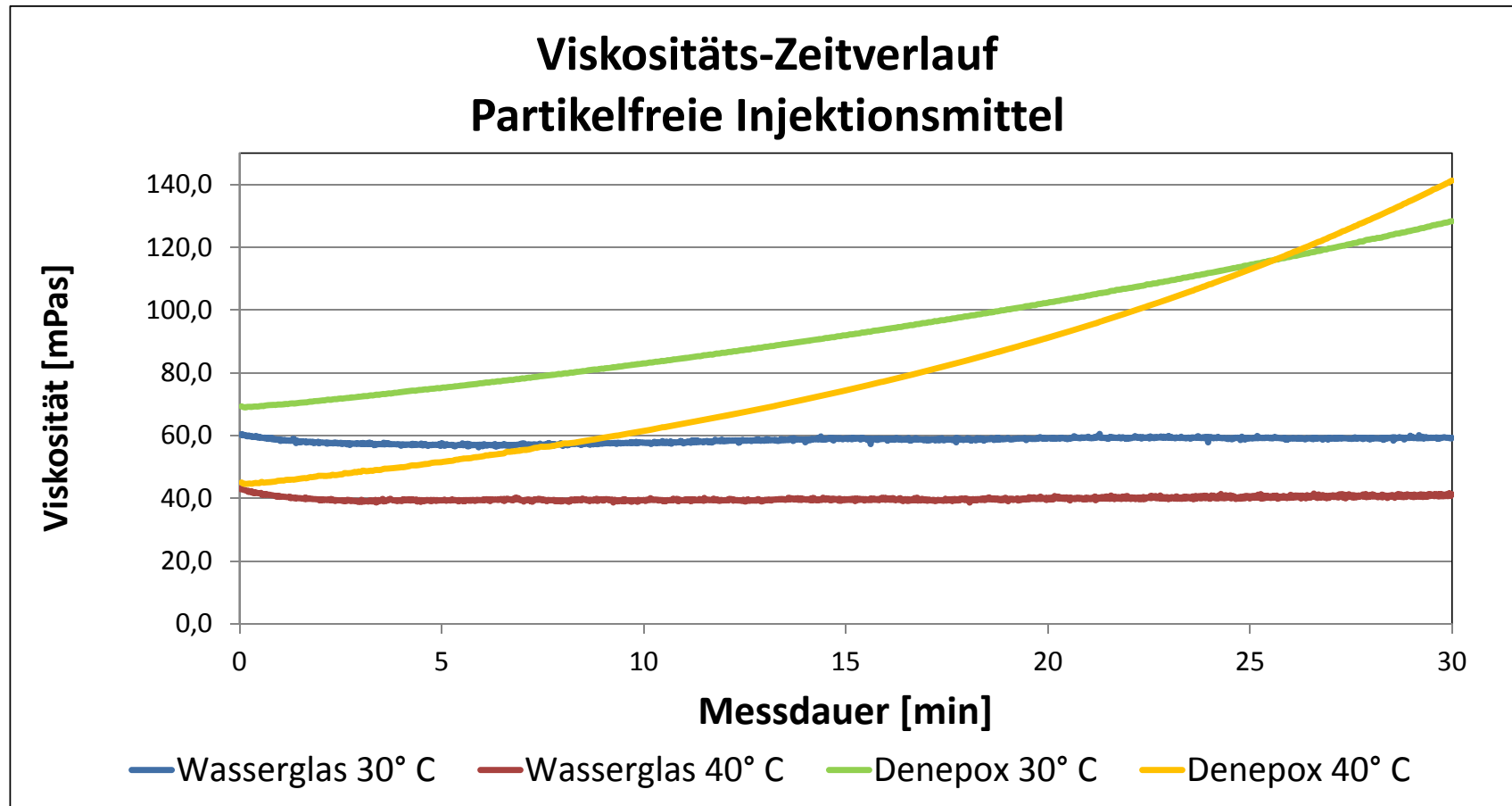
Scherrheometer Platte-Platte Verfahren

- Denepox 40
- IM4+

Untersuchungen laborative Charakterisierung



Untersuchungen laborative Charakterisierung





Untersuchungen laborative Charakterisierung

Marschzeiten – Konsistenzprüfungsverfahren

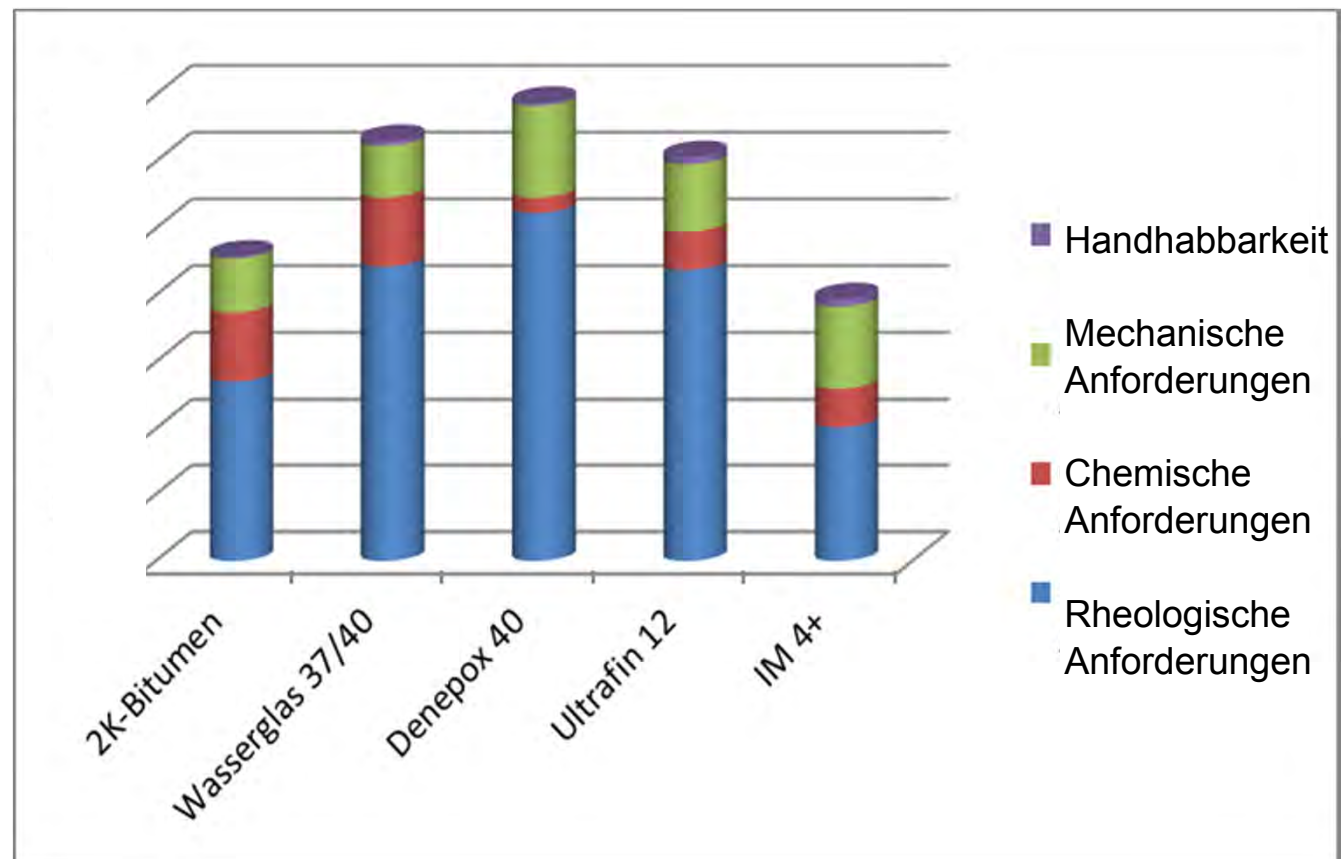
- Abnahme der Auslaufzeit beim IM4+ und Wasserglas bei höherer Temperatur
- Insgesamt niedrigste Auslaufzeit wurde mit dem Ultrafin 12 bei 30° C gemessen

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	-



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

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

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	<ul style="list-style-type: none"> - IM4+, 2K-Bitumen, Wasserglas, Denepox



Nachweiskonzept & Installation

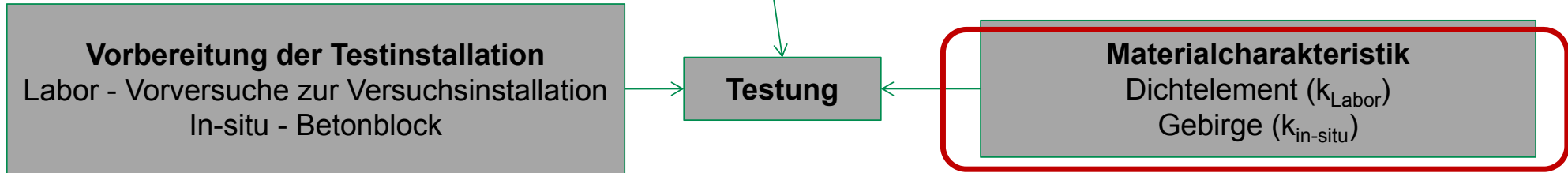
Vorbereitung der Testinstallation
Labor - Vorversuche zur Versuchsin-
stallation
In-situ - Betonblock

Testung

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

Permeabilität

Gaspermeabilität	}	in-situ Bedingungen (p,T)
Lösungspemeabilität		

Porosität und Porengrößenverteilung

μ CT
 Hg-Porosimetrie
 ggf. alternative Konzepte für Porengrößen
 > 100 μ m \rightarrow z.B. Sättigungsversuche

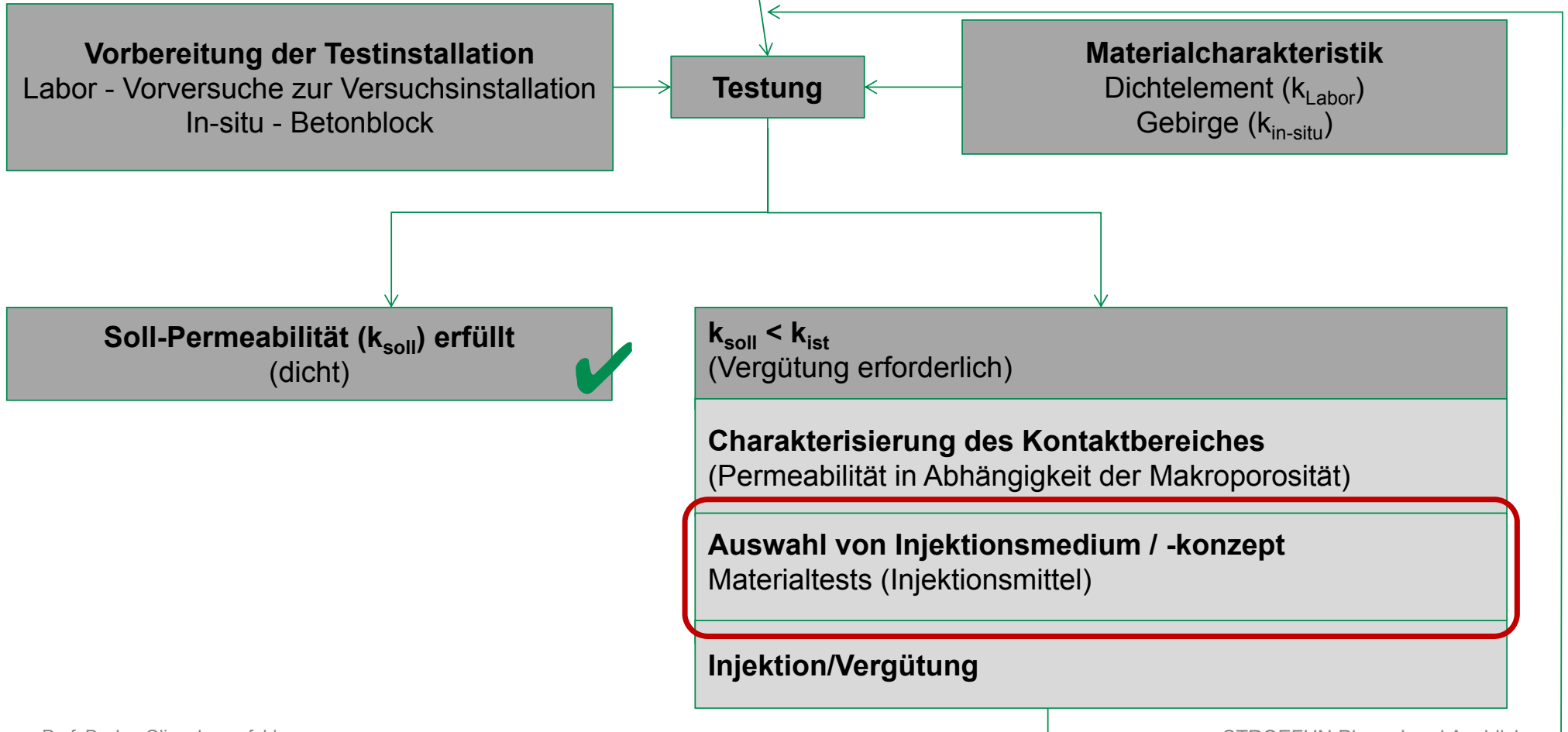
Zusammenhang

Strömungsrelevante Porengrößen
in Abhängigkeit der Permeabilität





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

Vorbereitung der Testinstallation
Labor - Vorversuche zur Versuchsinstallation
In-situ - Betonblock

Testung

Materialcharakteristik
Dichtelement (k_{Labor})
Gebirge ($k_{\text{in-situ}}$)

Soll-Permeabilität (k_{soll}) erfüllt
(dicht) ✓

$k_{\text{soll}} < k_{\text{ist}}$
(Vergütung erforderlich)

Charakterisierung des Kontaktbereiches
(Permeabilität in Abhängigkeit der Makroporosität)

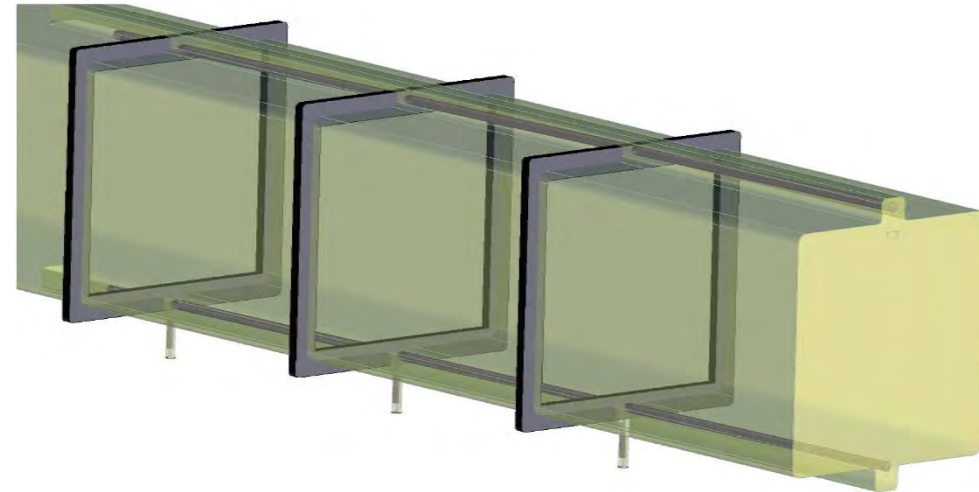
Auswahl von Injektionsmedium & -regime
Materialtests (Injektionsmittel)

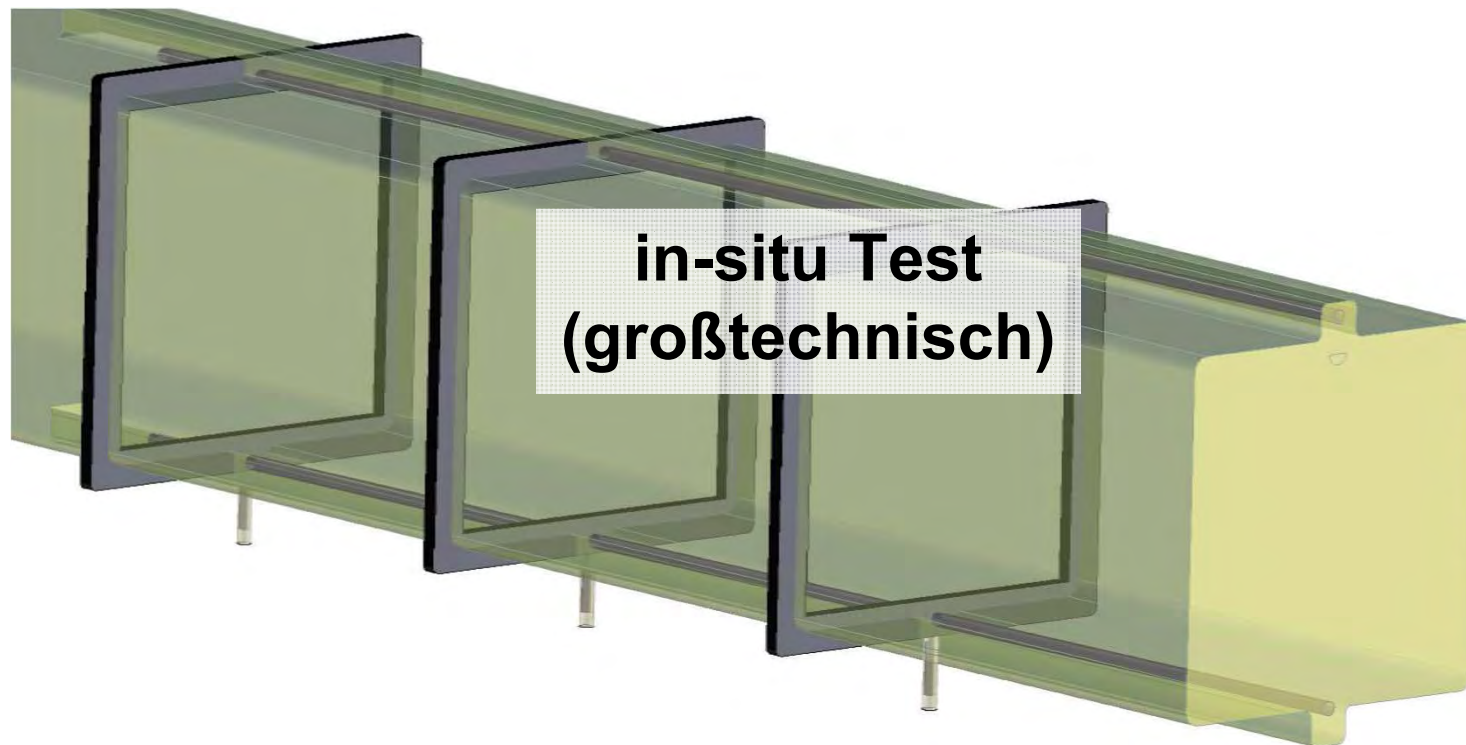
Injektion/Vergütung



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?

Bewertung der untersuchten Injektionsmittel





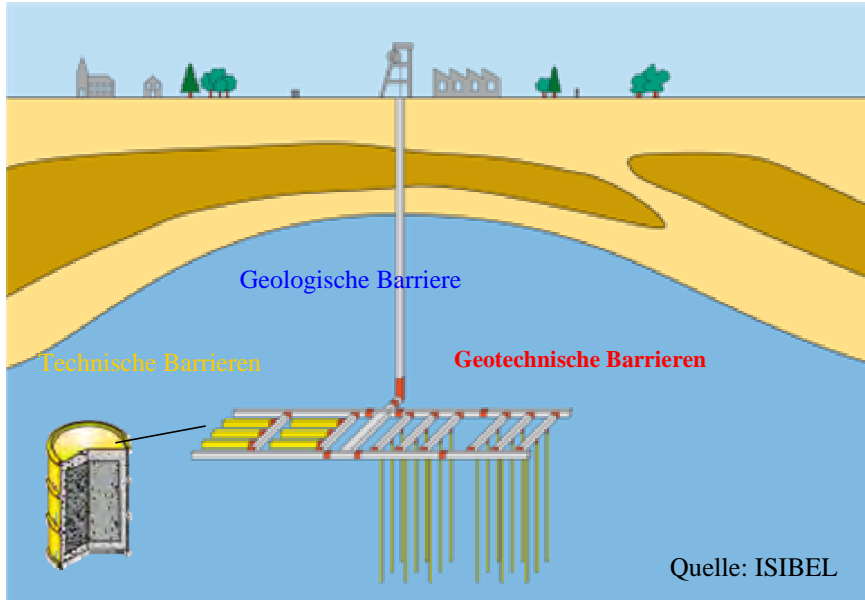
Konzeption, Untersuchung und Modellierung eines Abdichtungselementes aus Salzschnittblöcken zum Nachweis der Barrierenintegrität

Fachgespräch Verschlusssysteme - 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

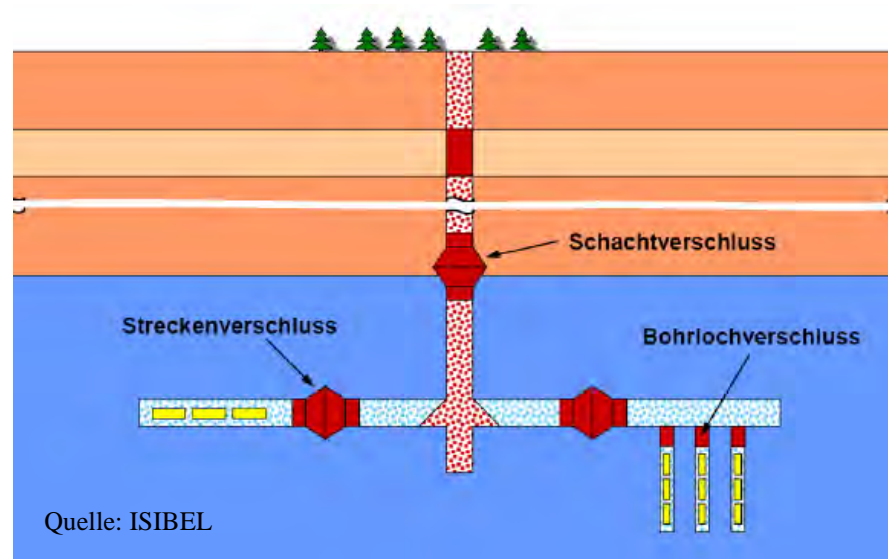
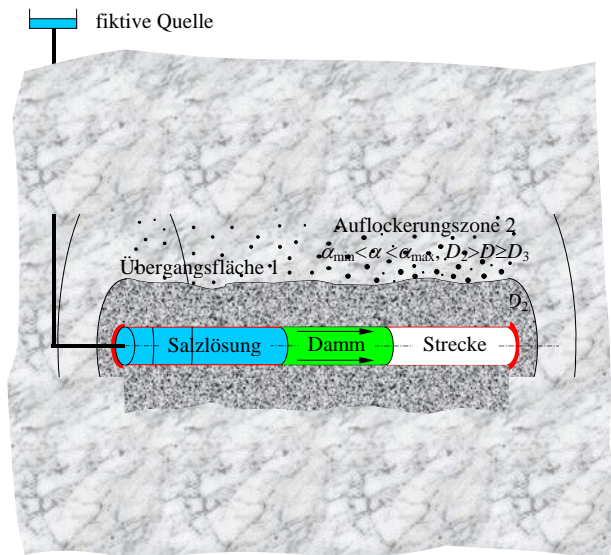
Salzgestein ist geeignet, radioaktive Abfälle langfristig aus der Biosphäre zu entfernen.

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

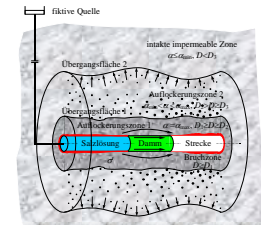
Geotechnische Barriere = viergliedriges System aus:

- Bautechnische Konstruktion
- Kontaktzone
- Auflockerungszone
- Unverritztes Gebirge

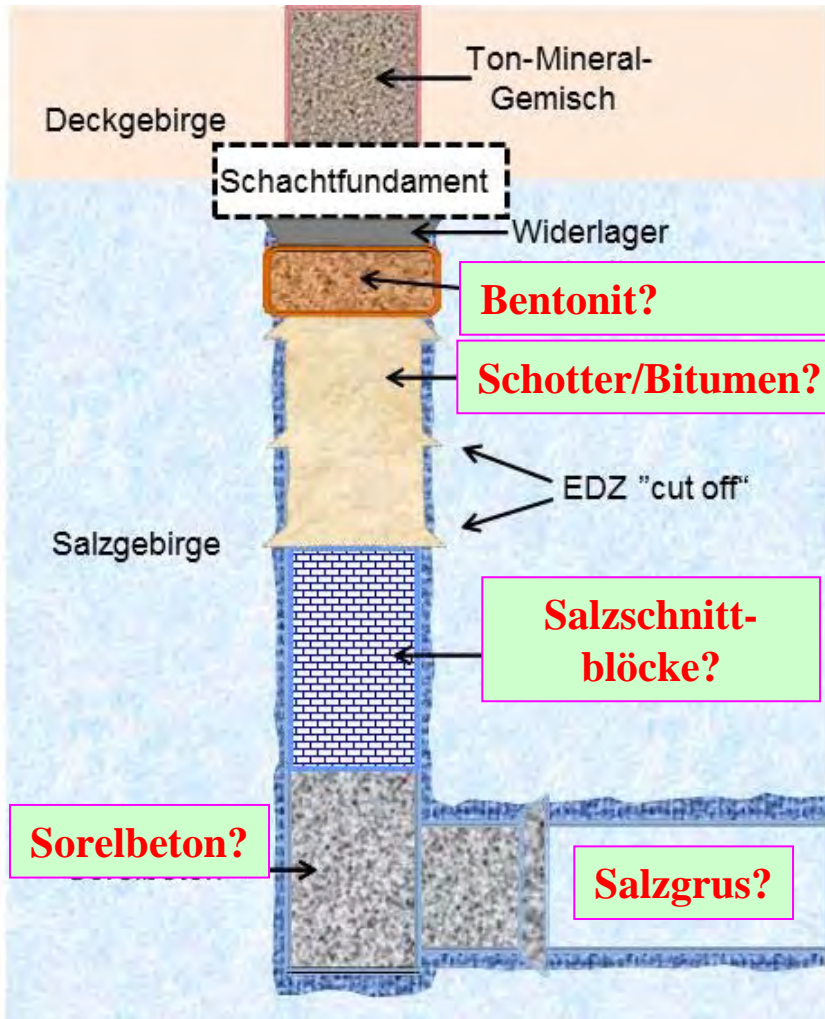


Grundsätzliche Anforderungen an geotechnische Barrieren

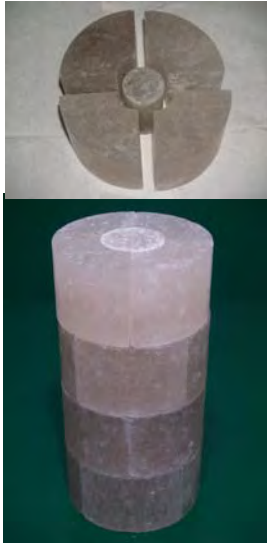
- (1) Laborativer Beleg der THMC-Materialeigenschaften von Bauwerk und Gebirge
- (2) Standort in einem möglichst homogenen und tektonisch unbeeinflussten Gebirgsbereich
- (3) Standortbezogene Nachweisführung (→ Verbundtragsystem)
- (4) Frühzeitige Konvergenzmessungen zur Einschätzung der rheologischen 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



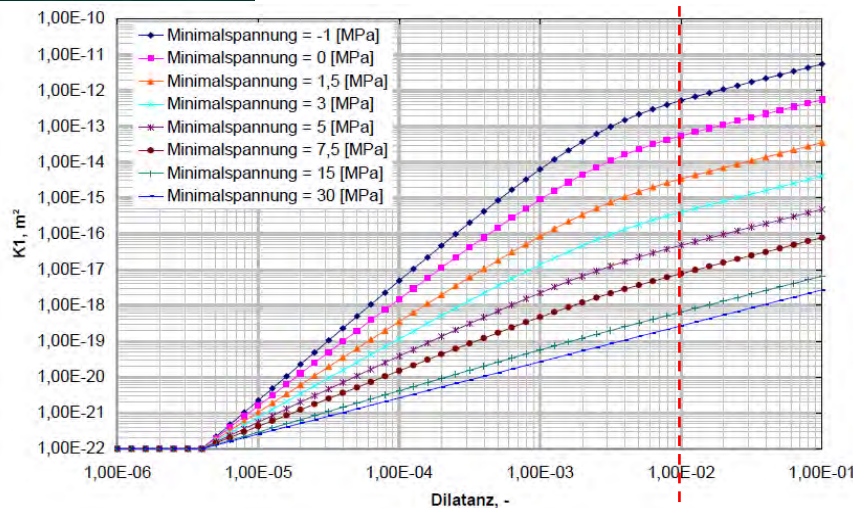
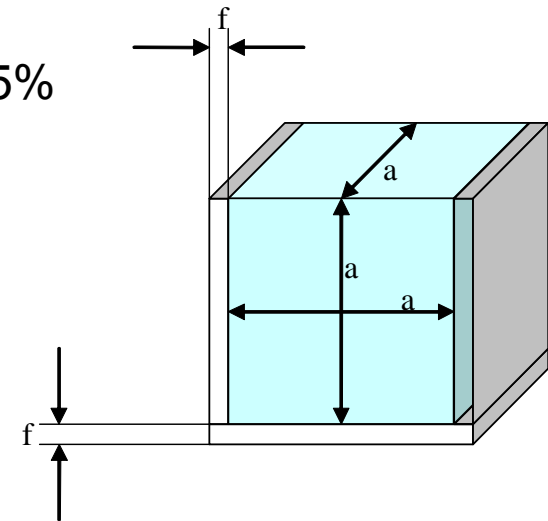
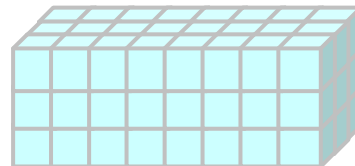
Redundante und Diversitäre Auslegung



Konzeption eines Abdichtungselementes aus Salzschnittblöcken



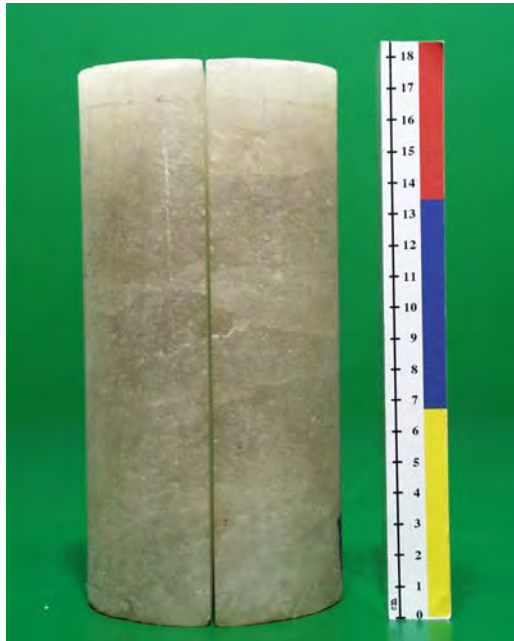
Anfangsporosität $\Phi \approx 1\% - 5\%$



Anfangsporosität $\Phi \approx 40\%$



Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



Schnittfläche
ohne Mineralisation

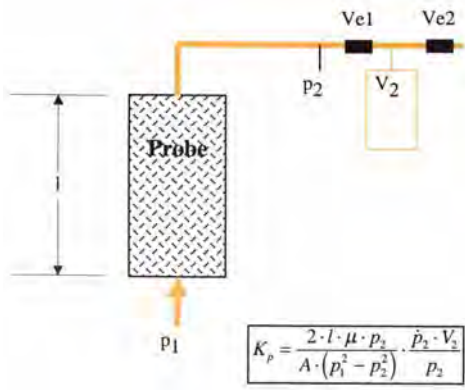


Schnittfläche
2mm Mineralisation

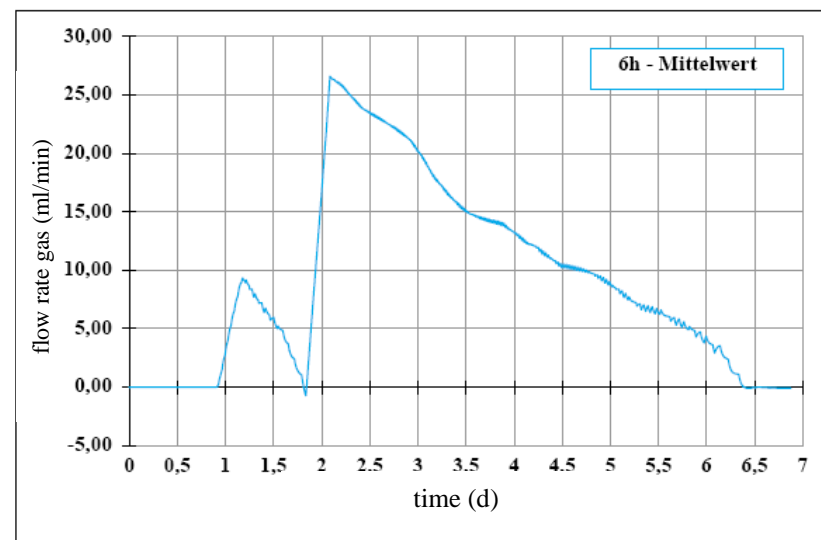
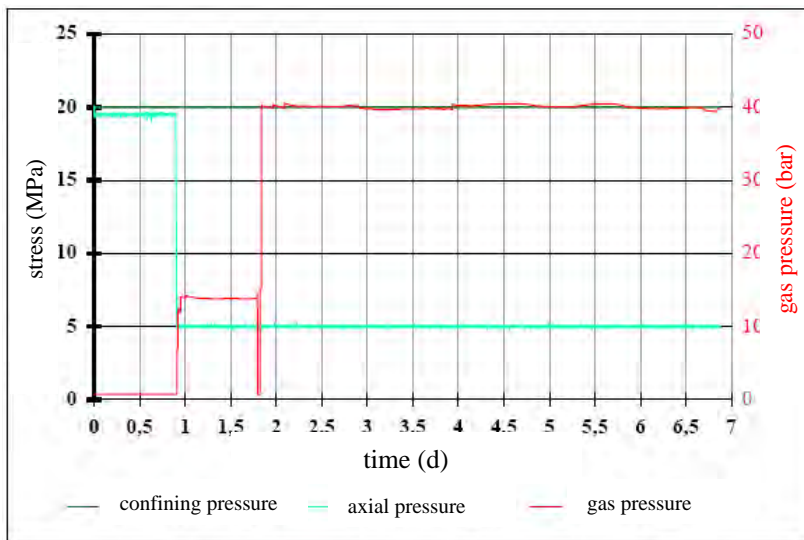


Schnittfläche
5mm Mineralisation

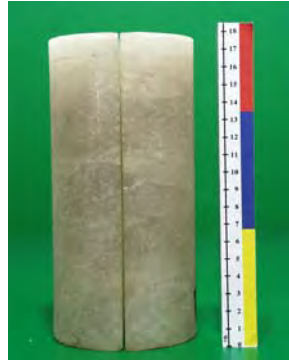
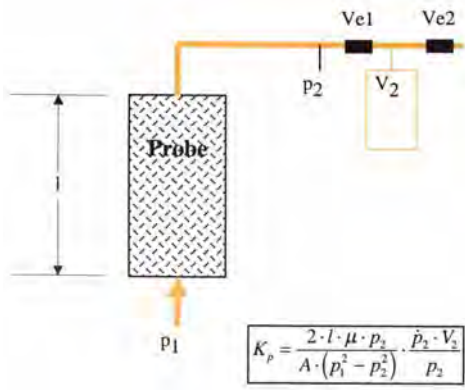
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



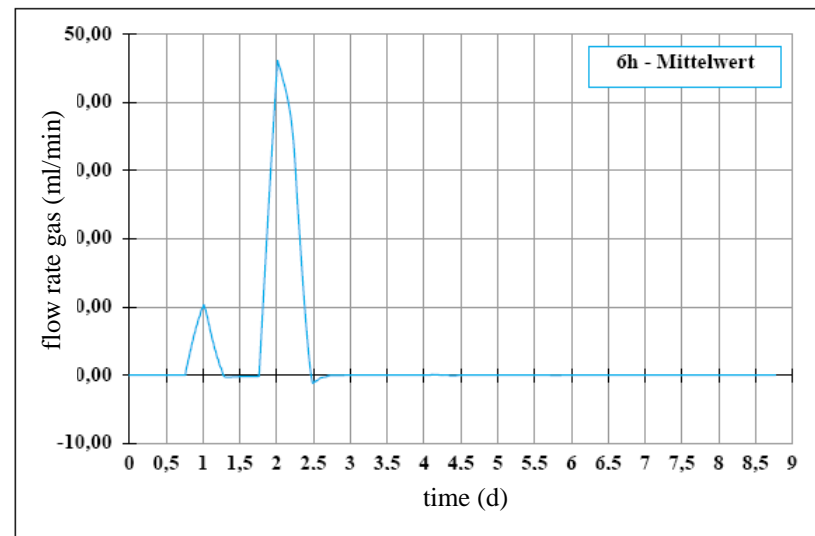
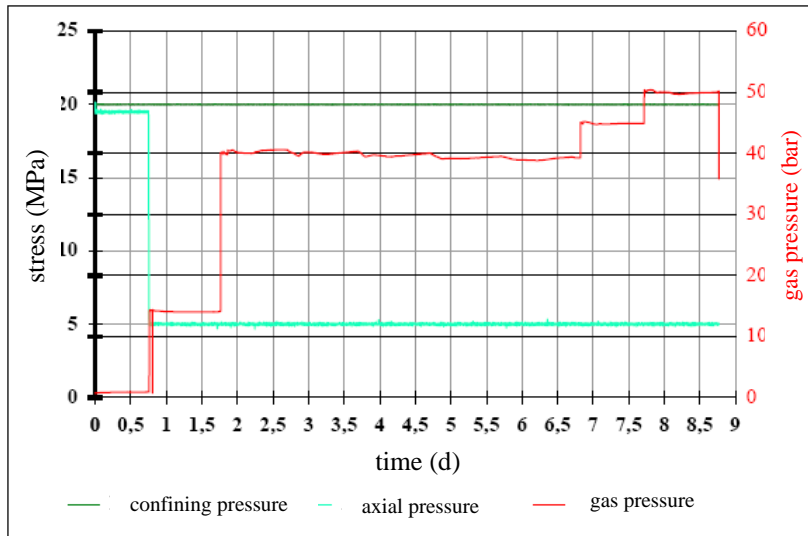
nicht mineralisierte Fuge
Trockengas



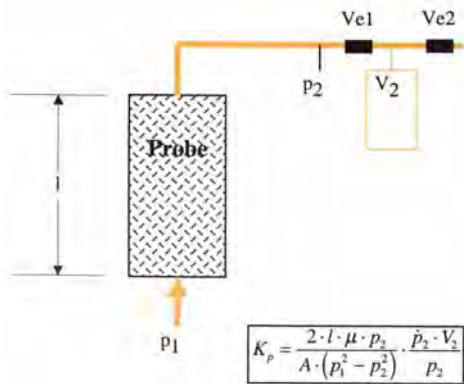
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



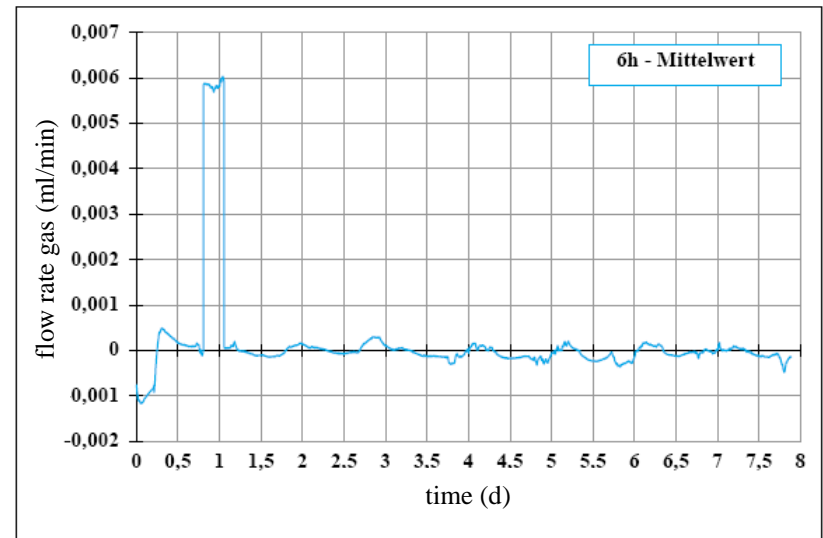
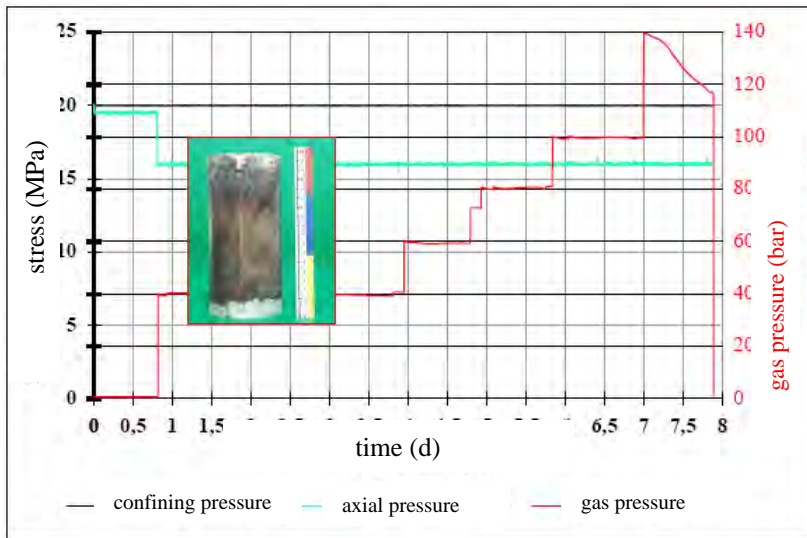
nicht mineralisierte Fuge
Feuchtgas



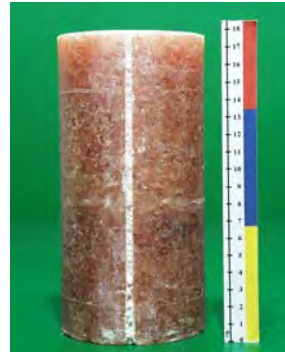
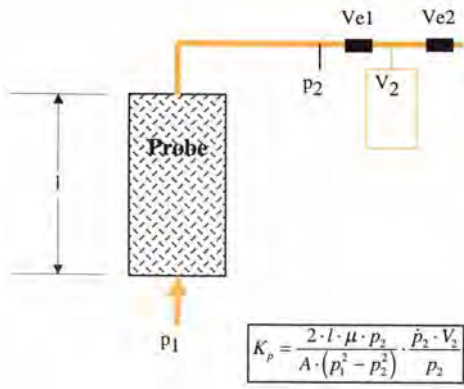
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



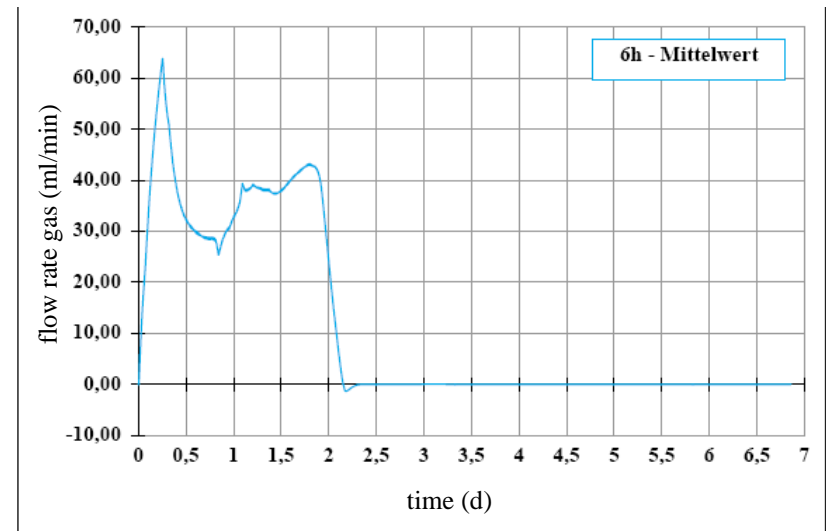
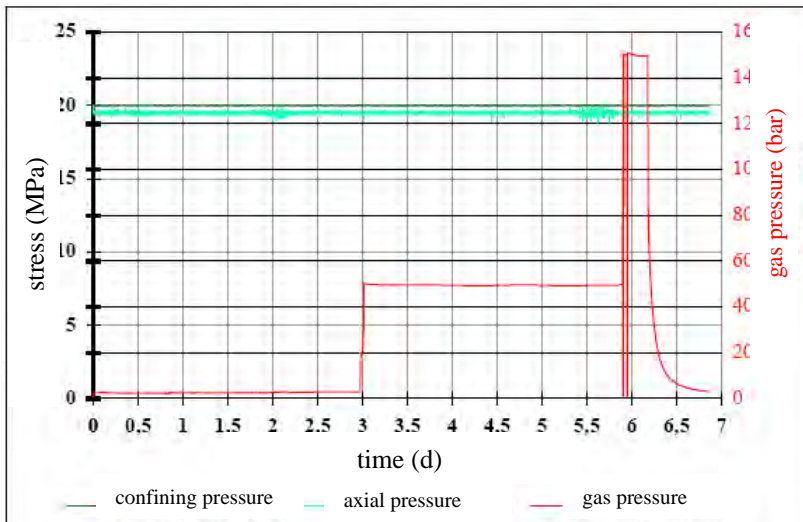
mineralisierte Fuge 2mm
Feuchtgas



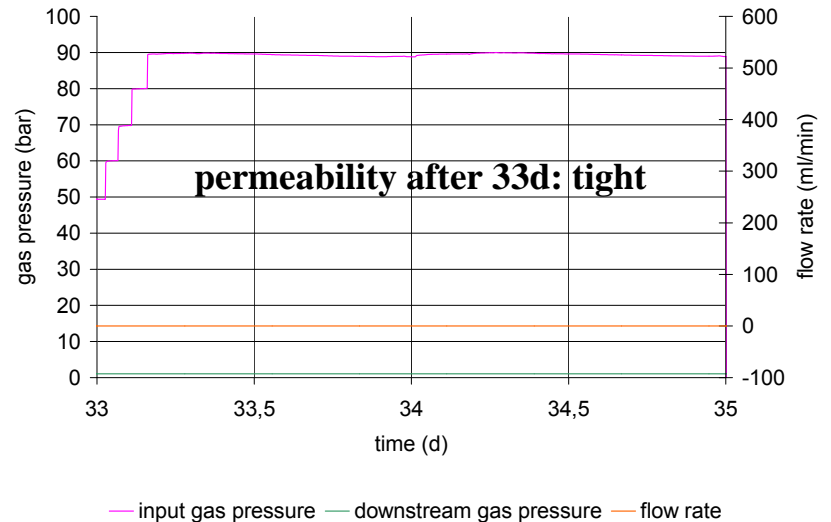
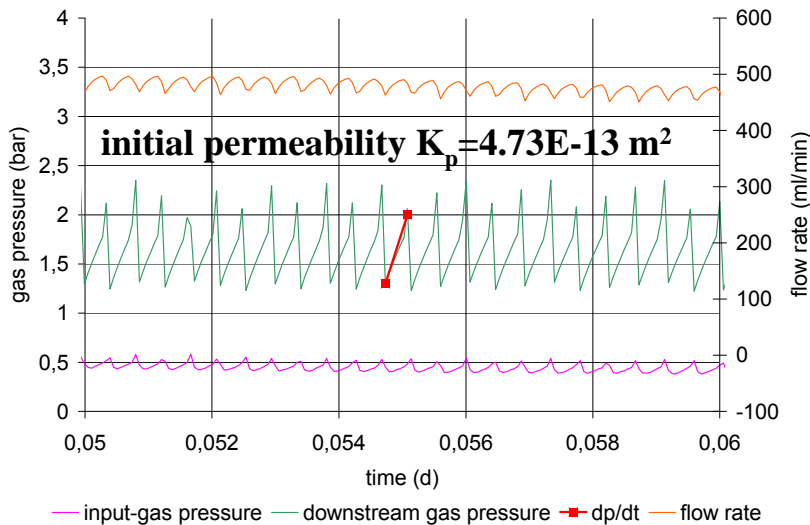
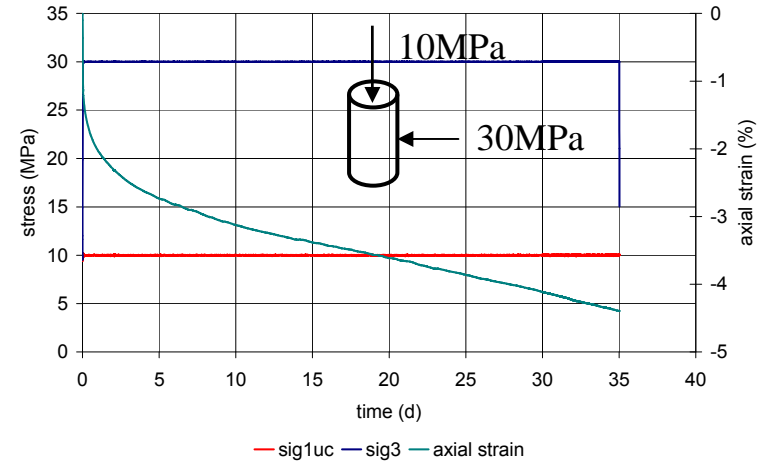
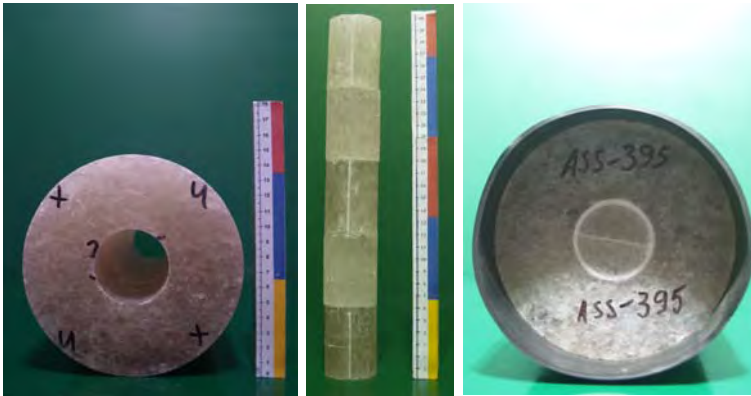
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



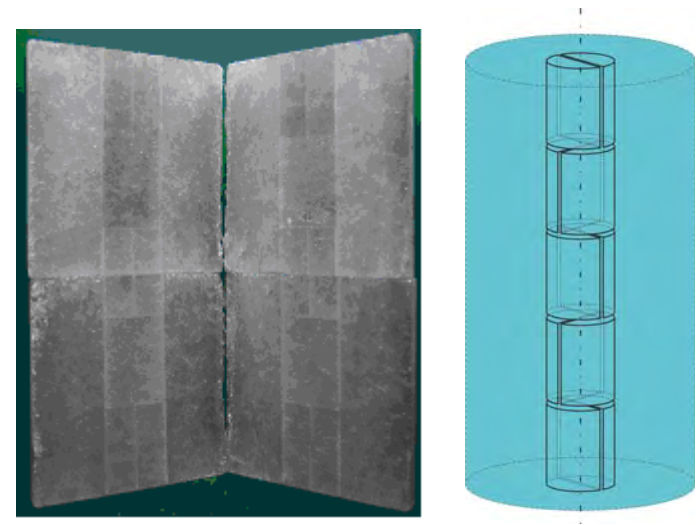
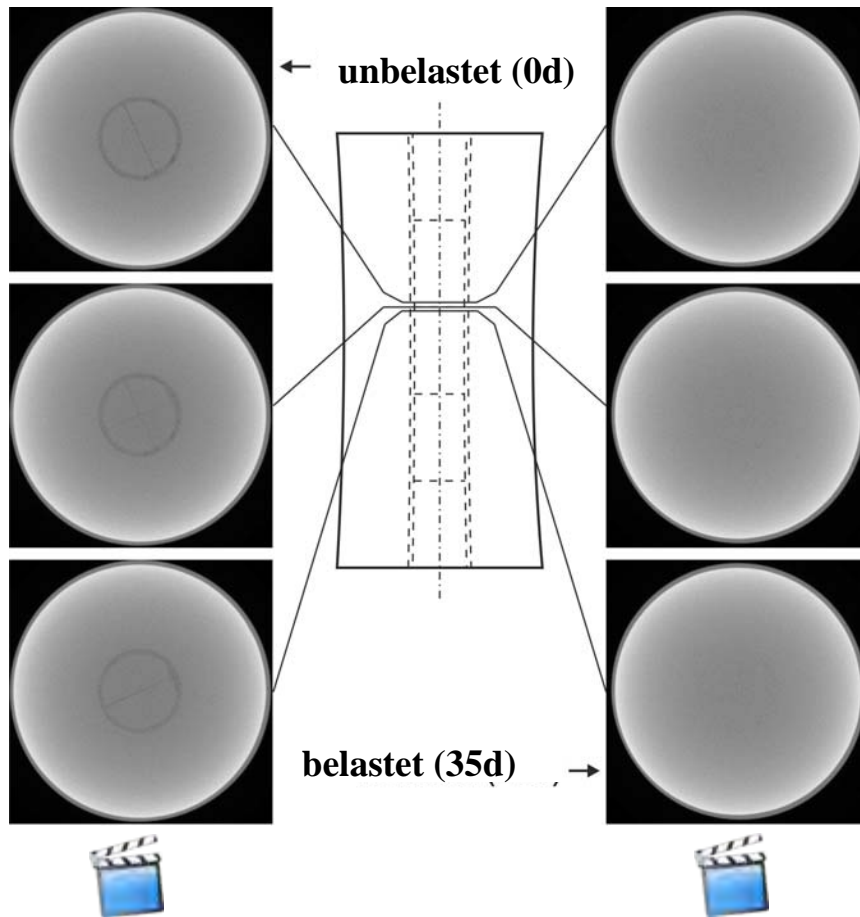
mineralisierte Fuge 5mm
Feuchtgas



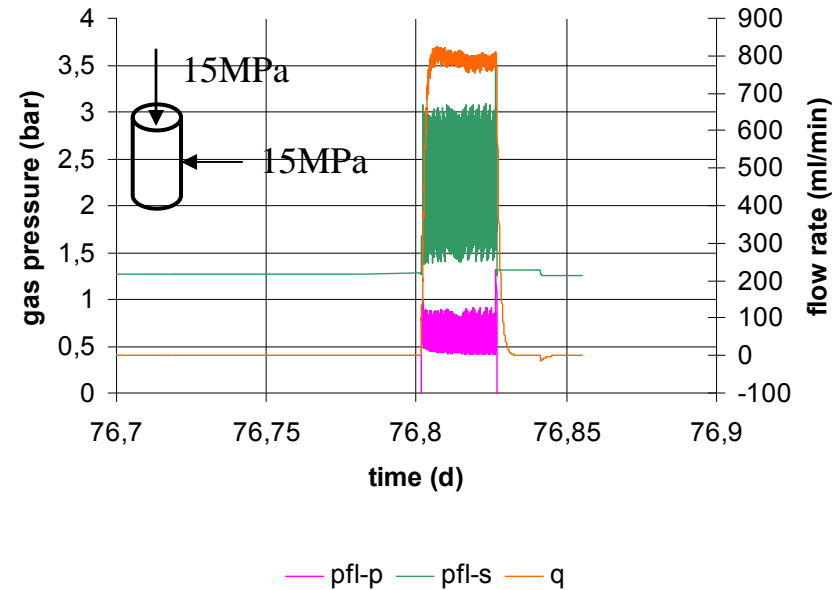
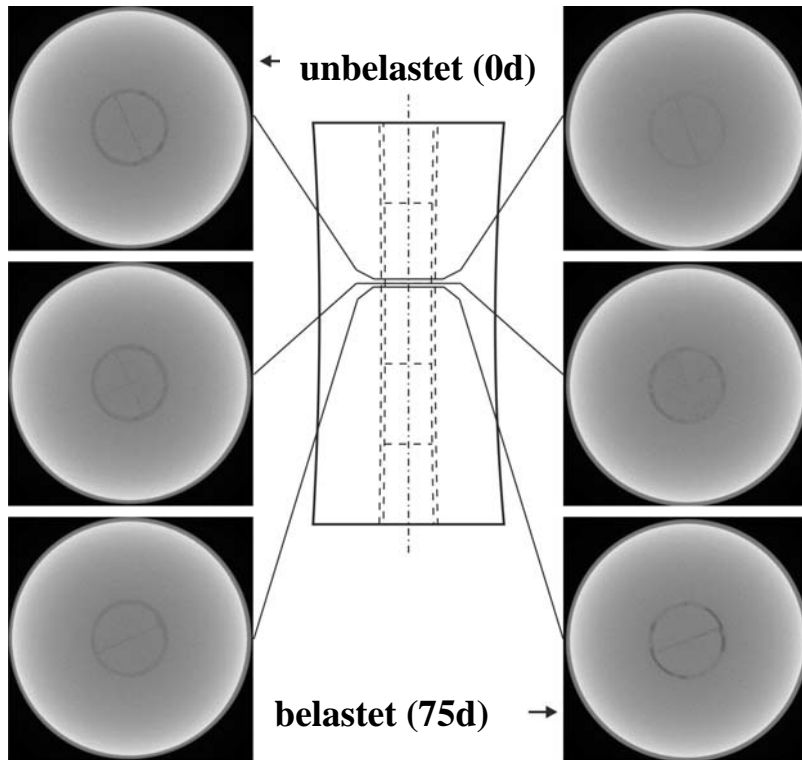
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken

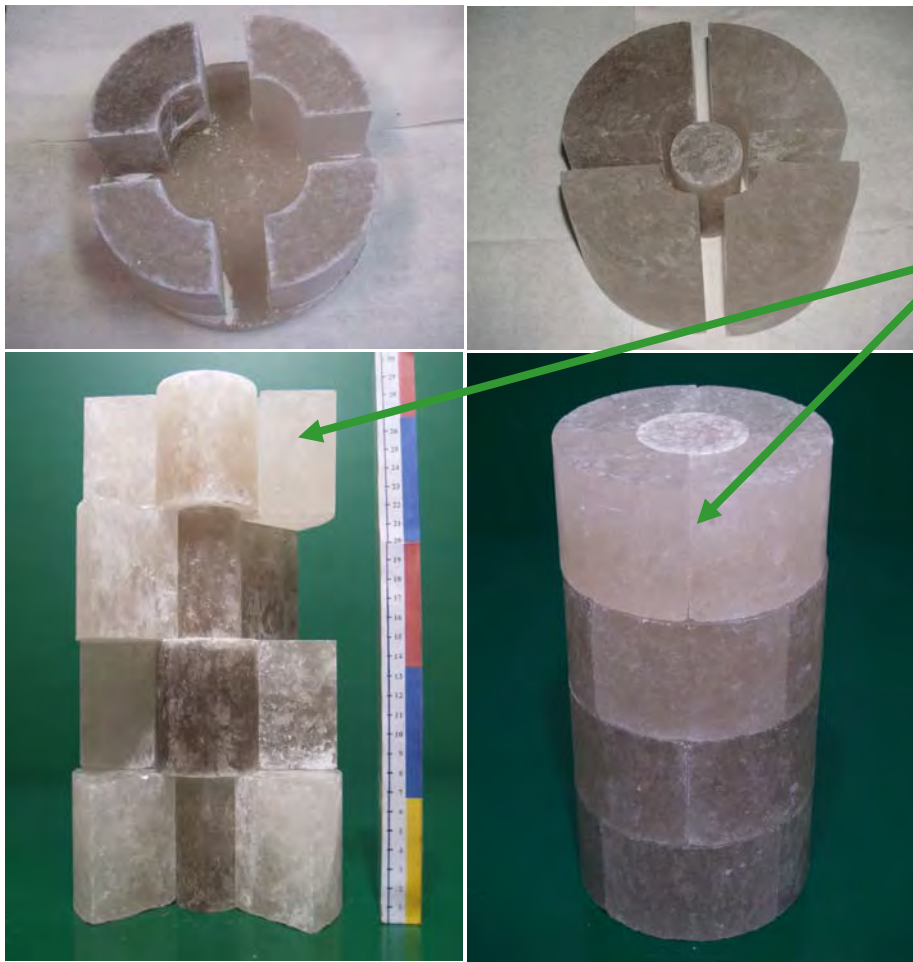


Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



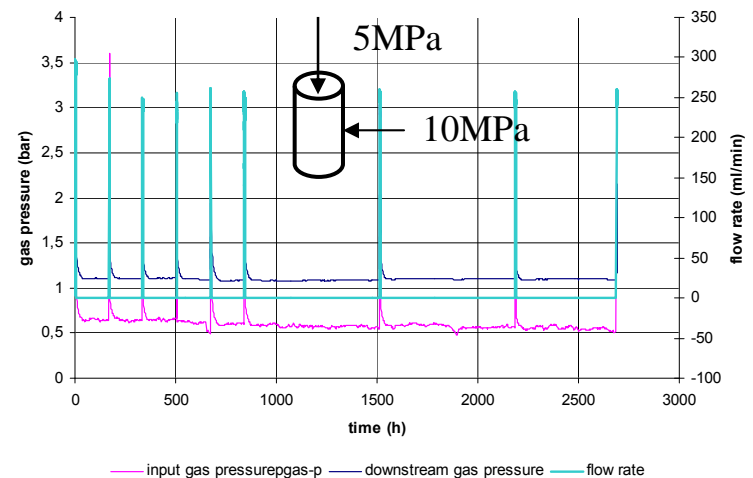
Keine signifikante Reduktion der Permeabilität bei isotroper Belastung / keine abschließende Kompaktion der Fugenfüllung

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 = 75cm h = 150cm

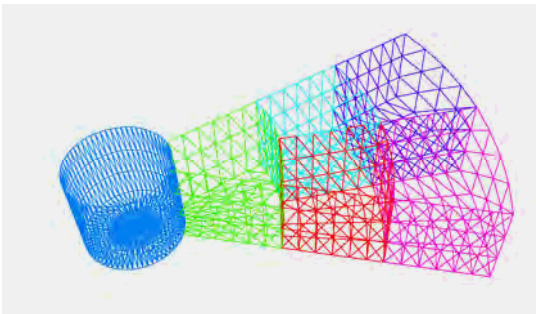
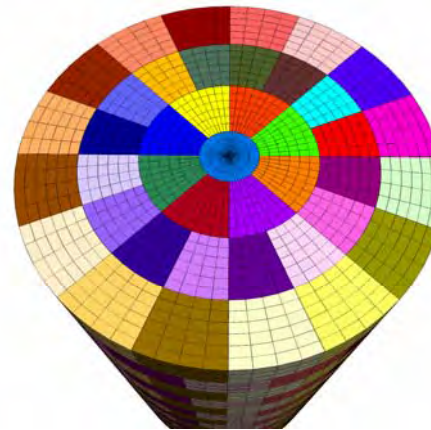
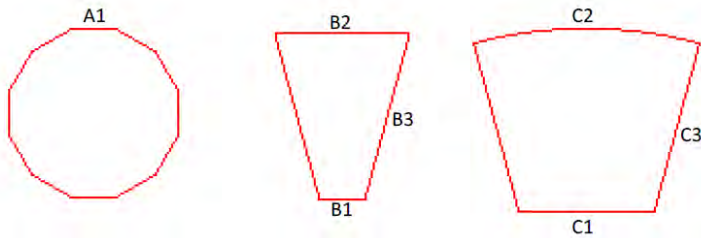
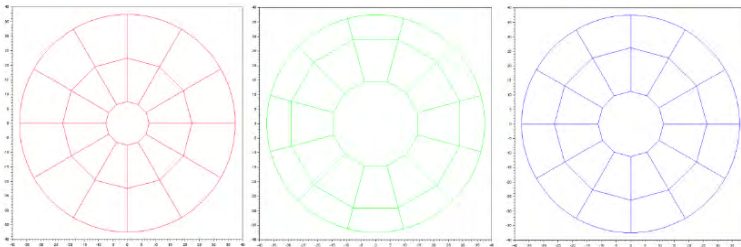
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Porosität und Permeabilität von Abdichtungselementen aus Salzschnittblöcken



17t Steinsalz



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)

Eutektische Salzschnmelzen als Verfüll- und Verschlussmaterial

W. Minkley
IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

W. Bollingerfehr
DBE Technology GmbH, Peine

Fachgespräch Verschlusssysteme, 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

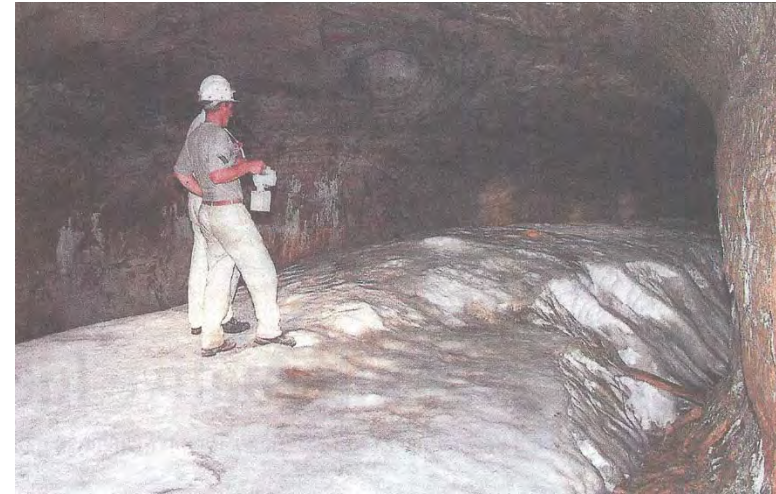


Sicherheitsanforderungen

- **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 Verschlusssysteme von entscheidender Bedeutung.**



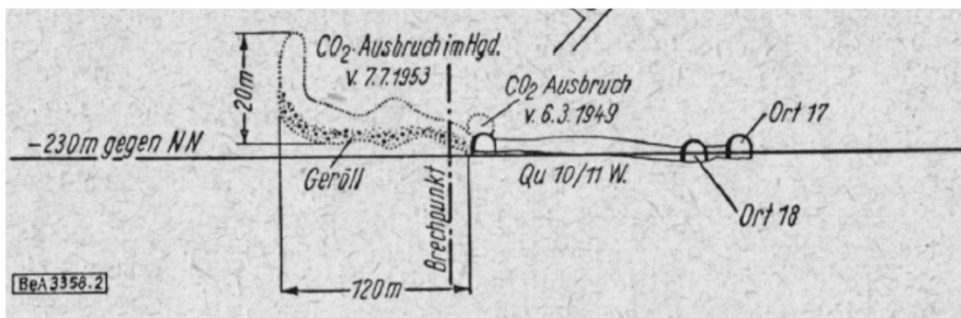
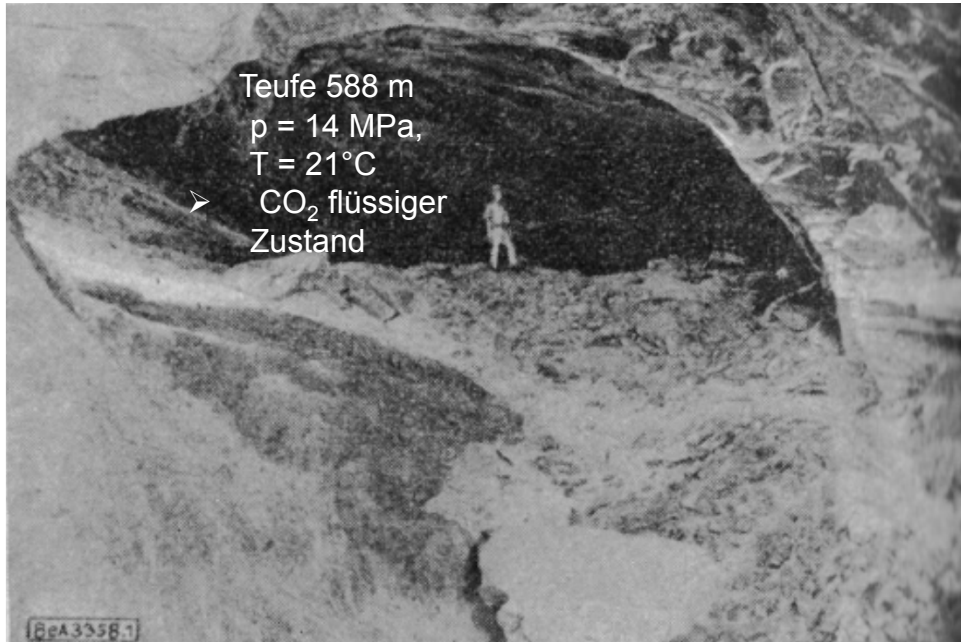
Natural demonstration of complete containment in salt rocks



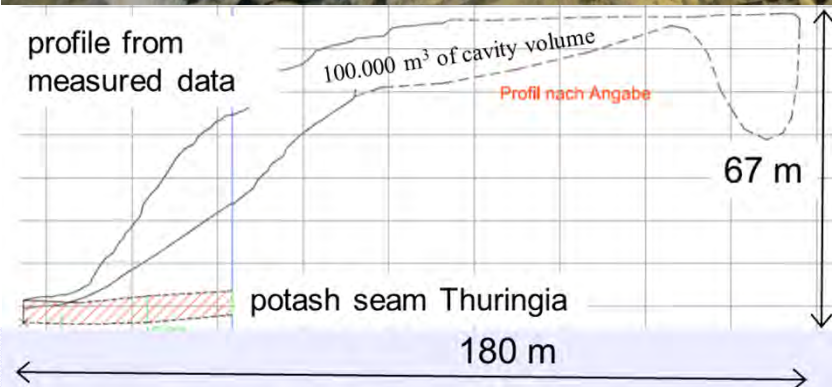
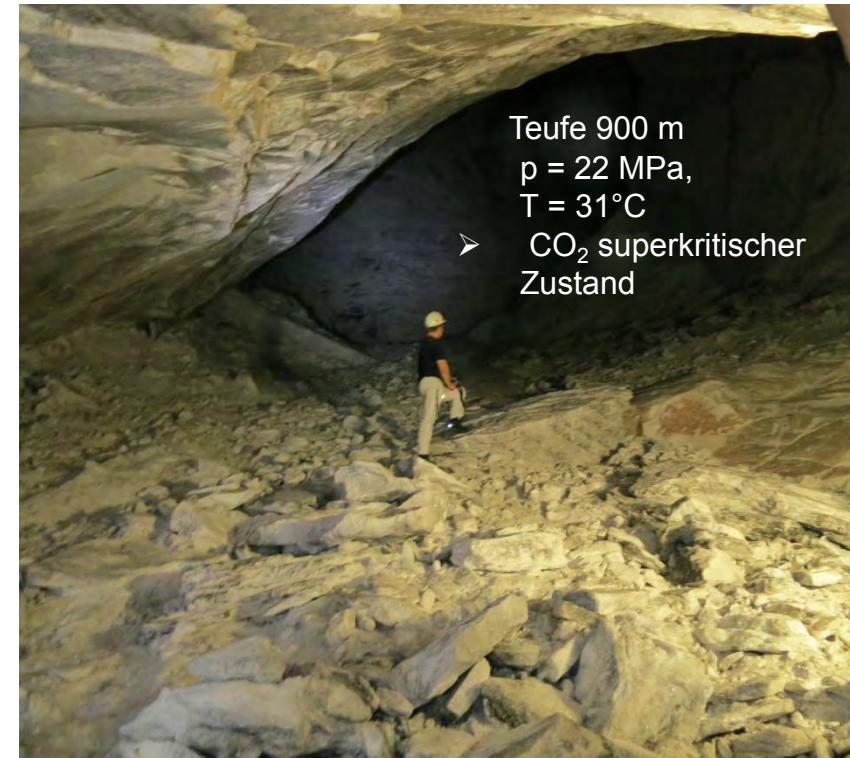
**2003 - salt mine “Unterbreizbach”
CO₂-glacier after an underground
blow- out (CO₂ becomes solid
below -70°C)**

Dichter Einschluss von CO₂ im superkritischen und flüssigen Aggregatzustand im Salzgestein

CO₂ Ausbruch 07.07.1953, Menzengraben



CO₂ Ausbruch 01.10.2013, Unterbreizbach



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

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

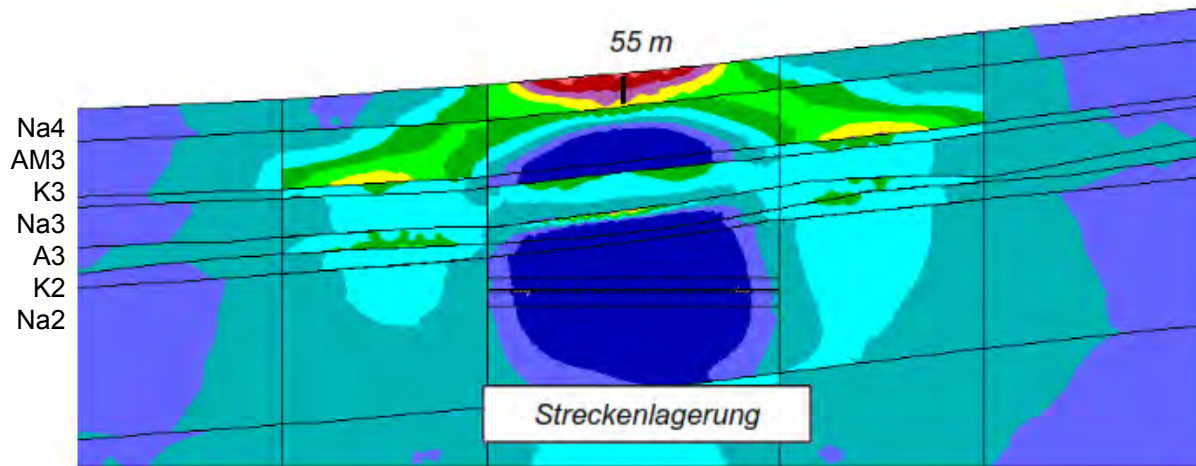
Transportmechanismus in Salinarbarriere

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

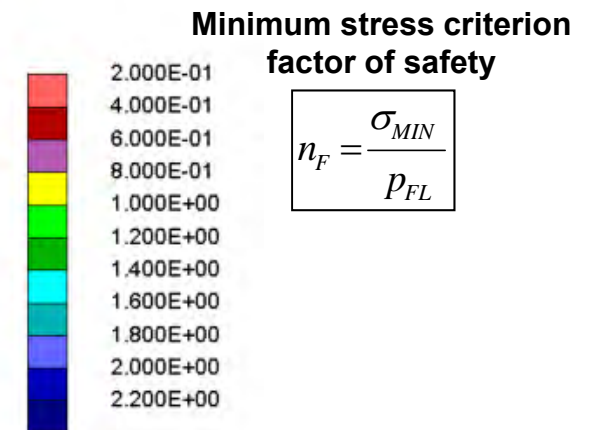
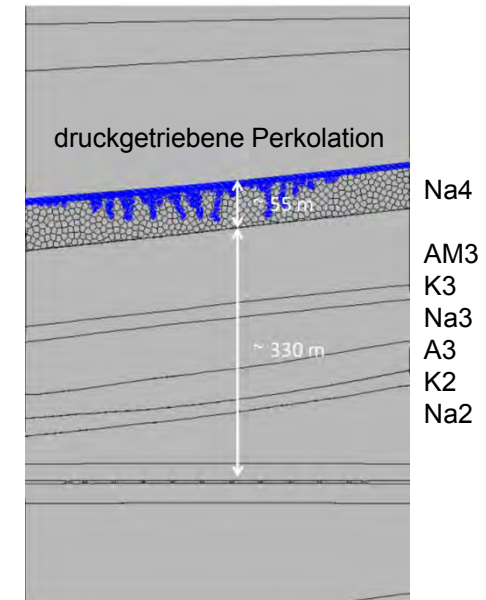
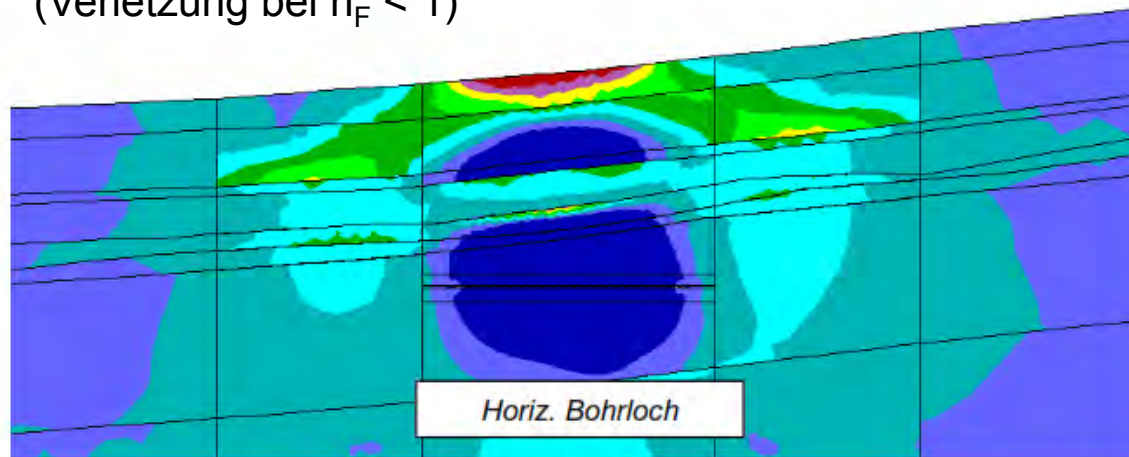
Hierin liegt ein Unterschied zu anderen potentiellen Wirtsgesteinen wie z.B. Tonstein, wo Diffusion im flüssigkeitsgefüllten Porenraum mit um mehrere Größenordnung höherer Geschwindigkeit abläuft oder bei Kristallingesteinen, wo zusätzlich Advektion als Transportprozess in der Barriere stattfinden kann.



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

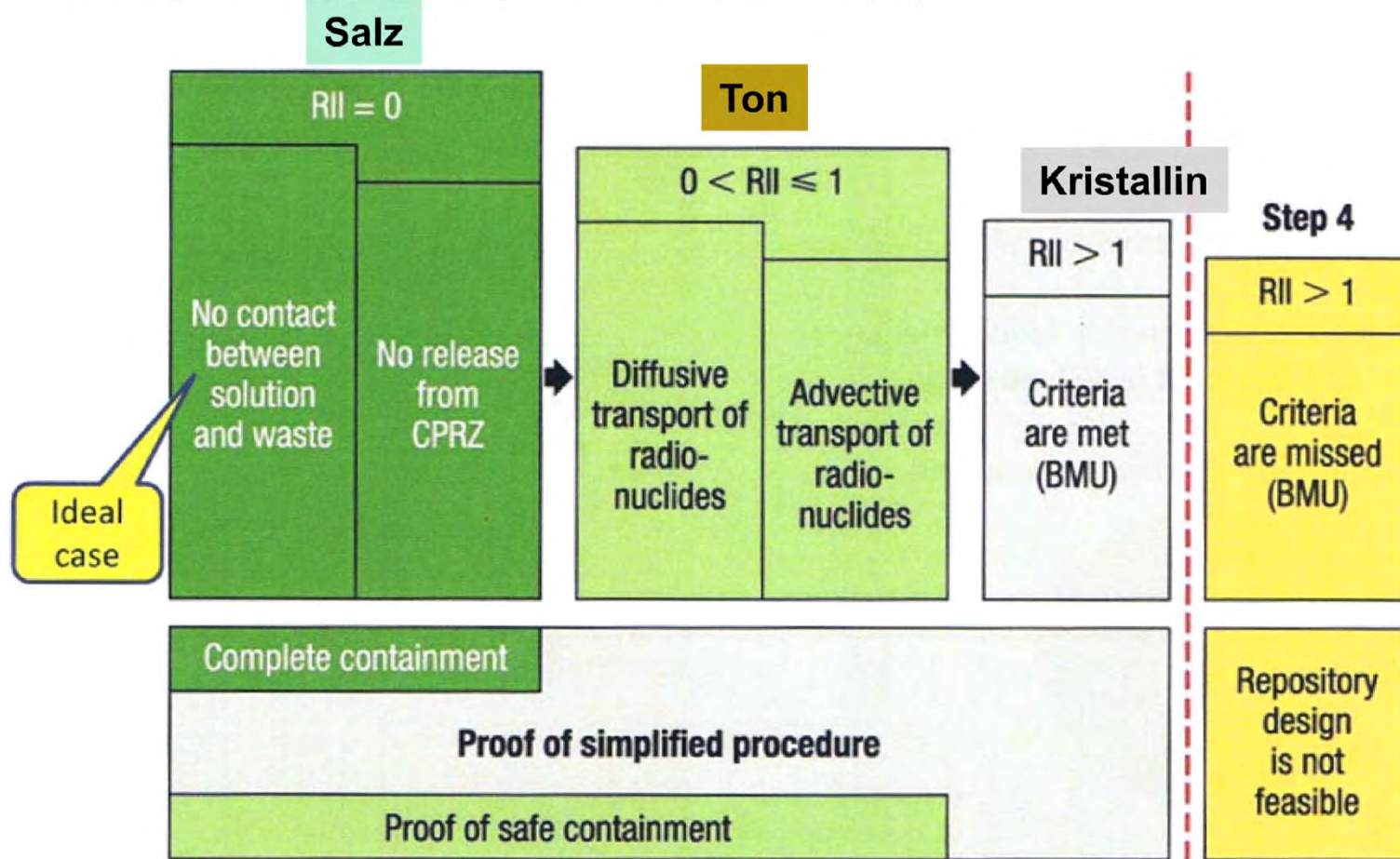


Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

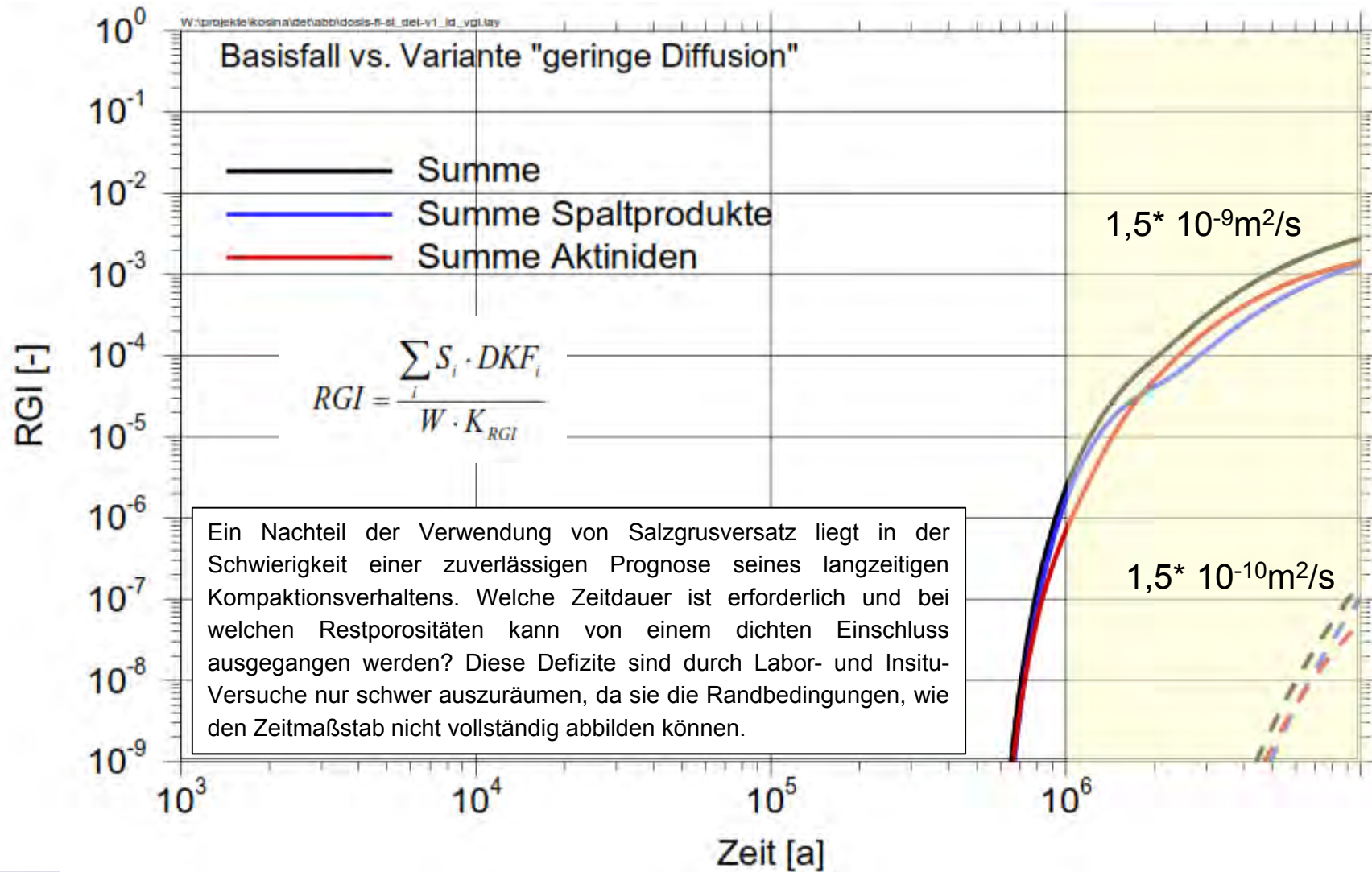
Bewertung des Einschlusses der Radionuklide im ewG

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



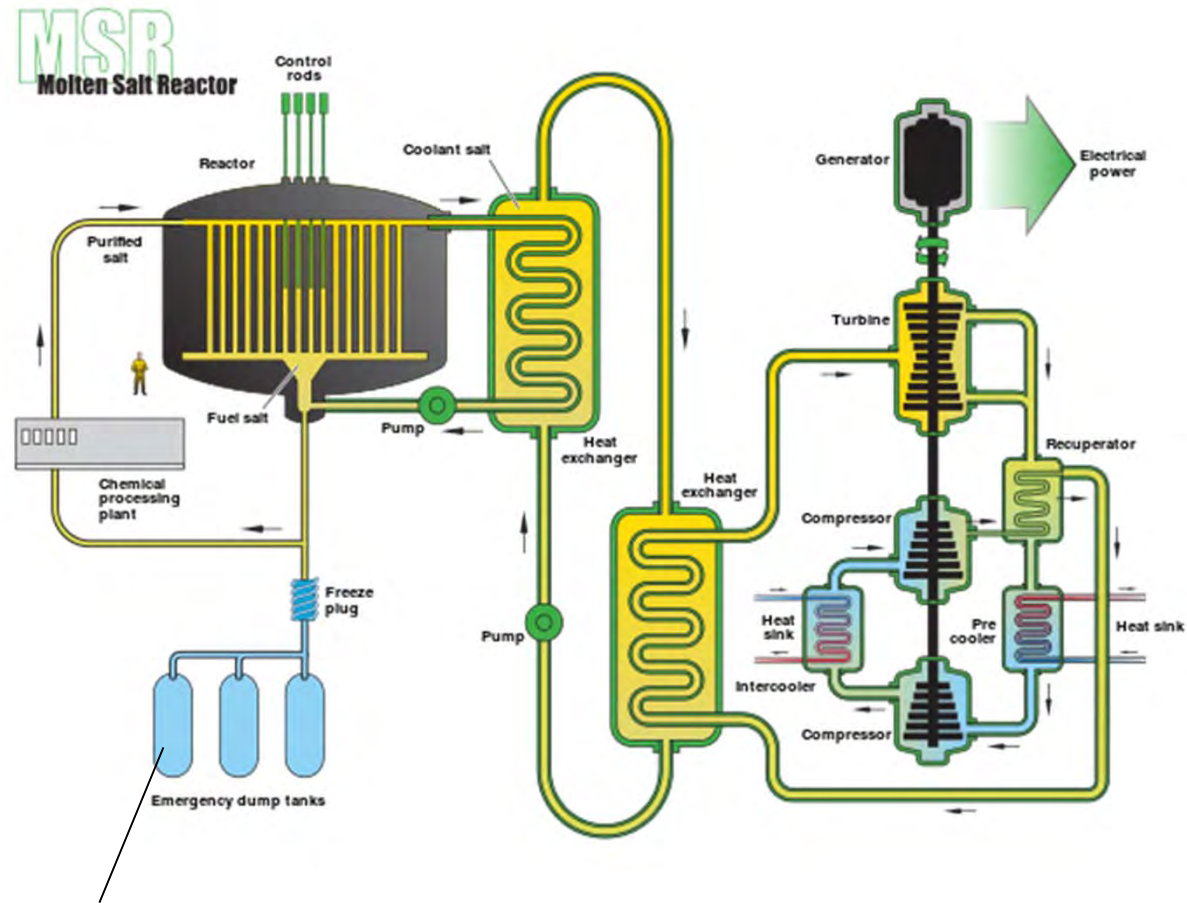
Prüfung Radiologischer Geringfügigkeitsindex $0 < RGI < 1$

Diffusion über flüssige Phase im Salzgrus



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

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



passives Sicherheitssystem



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% NaNO_3 • 40% KNO_3

~ Schmelzpunkt: 223 °C

~ Kalter Tank: 292 °C

~ Heißer Tank: 386 °C



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

Accomplishments / Progress / Results, Con't.

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

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	–	–

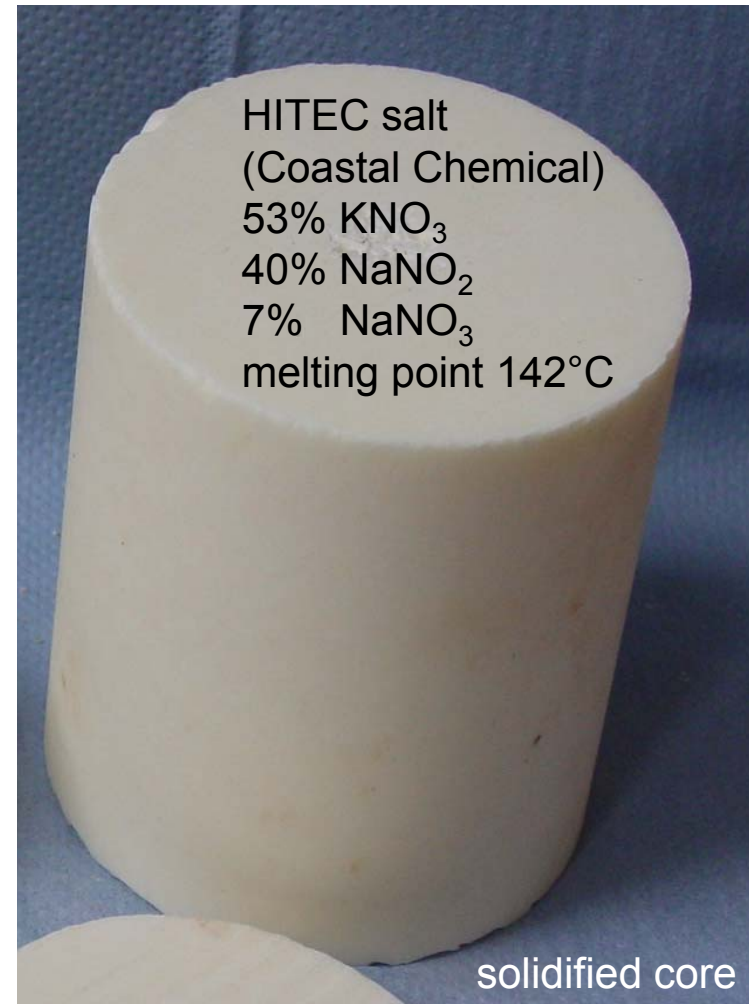
(Linsinger & Radtke, 2013)
K+S Forschungsinstitut



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



Melting of eutectic salt mixture



eutectic molten salt



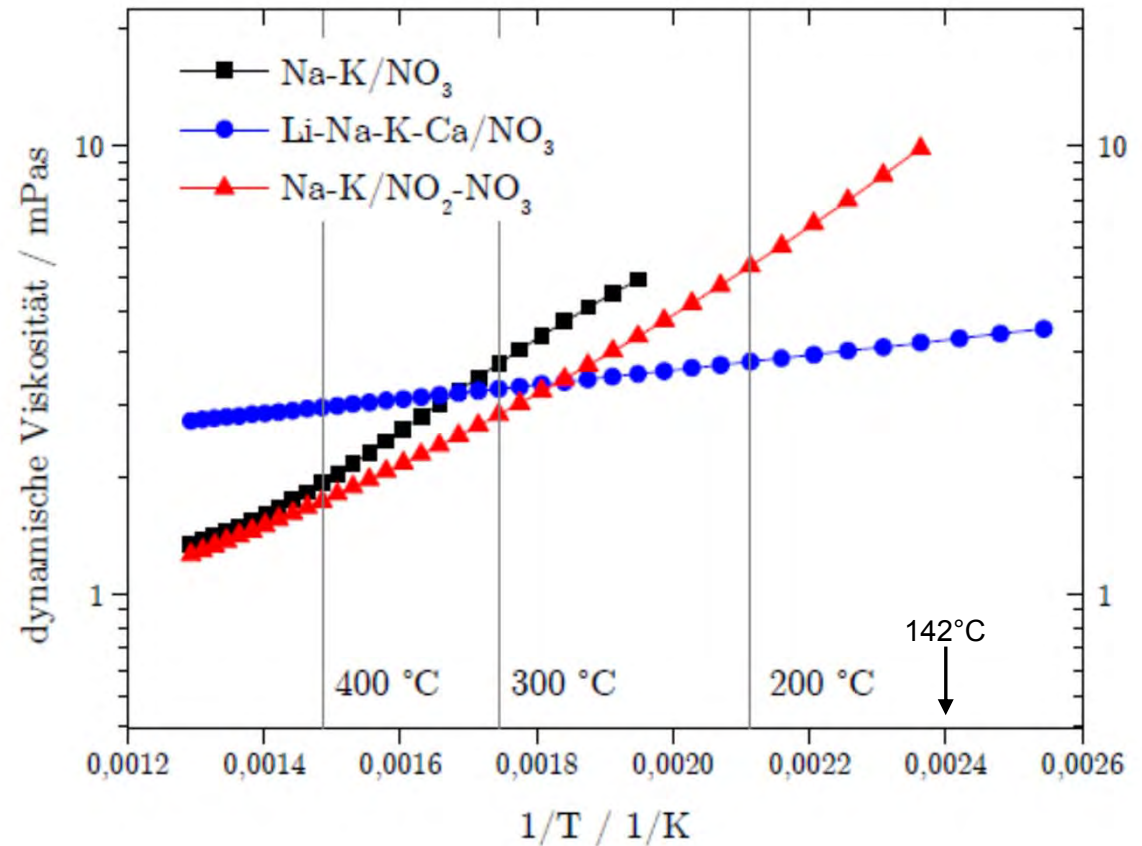
Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

Viscosity of eutectic molten salts

viscosity at 20°C in mPa* s:

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



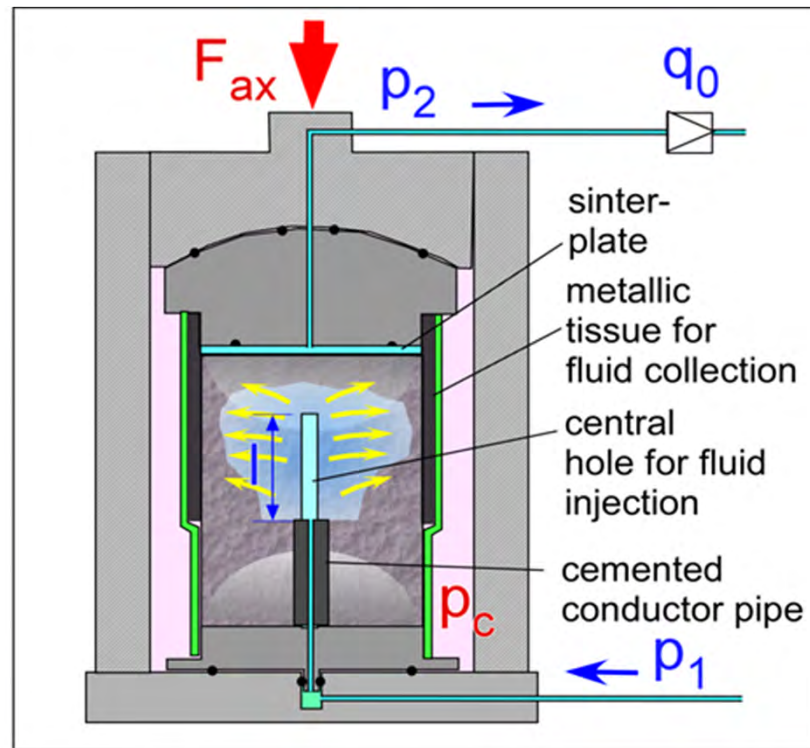
(P. Heilmann, 2013)



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

Integrity test on solidified molten salt

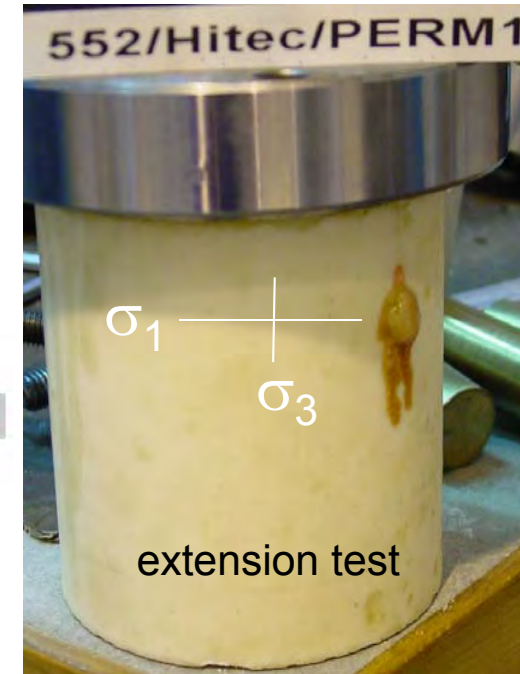
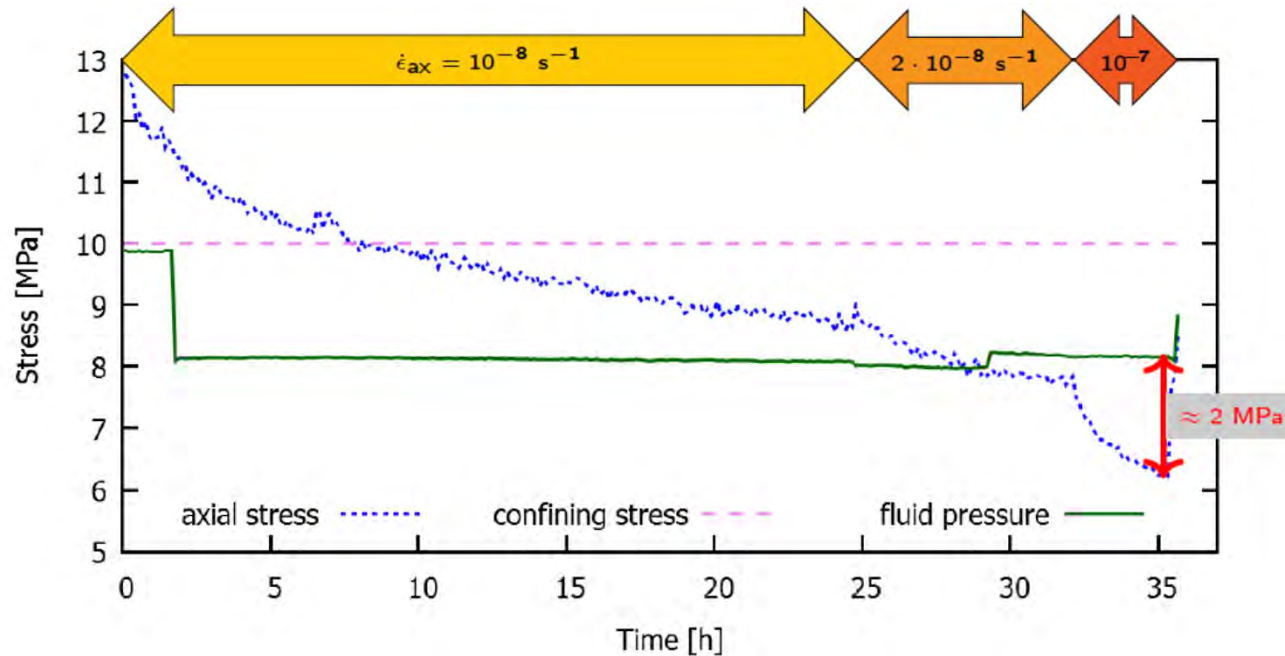


HITEC sample



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

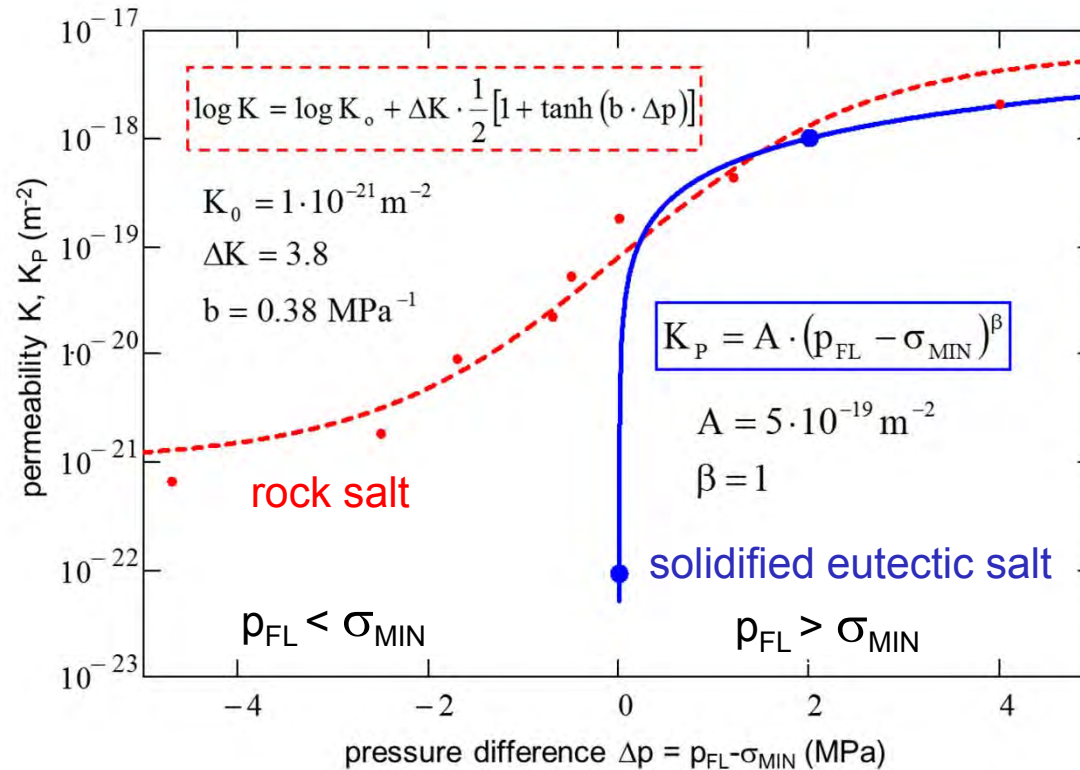
Integrity of solidified molten salt



- 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.

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.

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) verfüllter Hohlräume wesentlich schneller ab



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.“

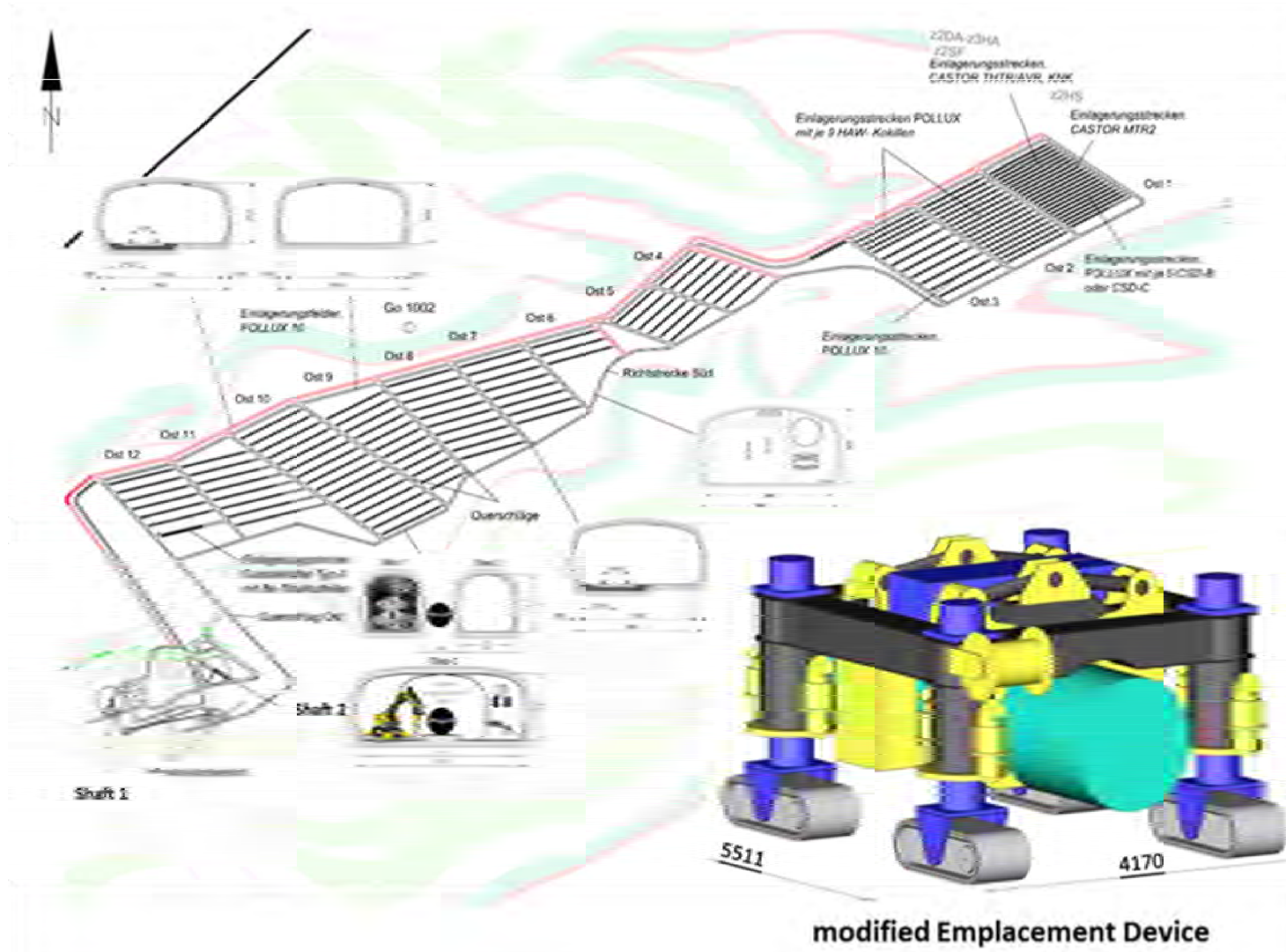
Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016)

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.



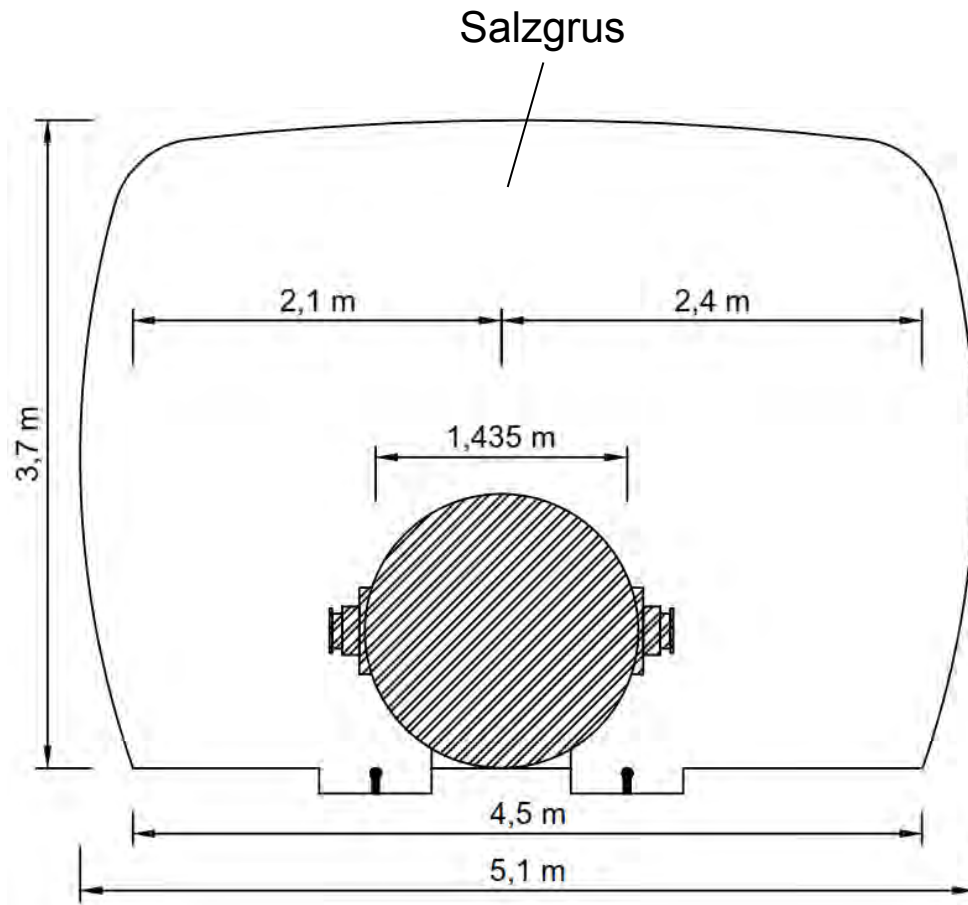
Re-Mining Strategy for Drift Disposal of POLLUX Casks (ISIBEL, 2017)



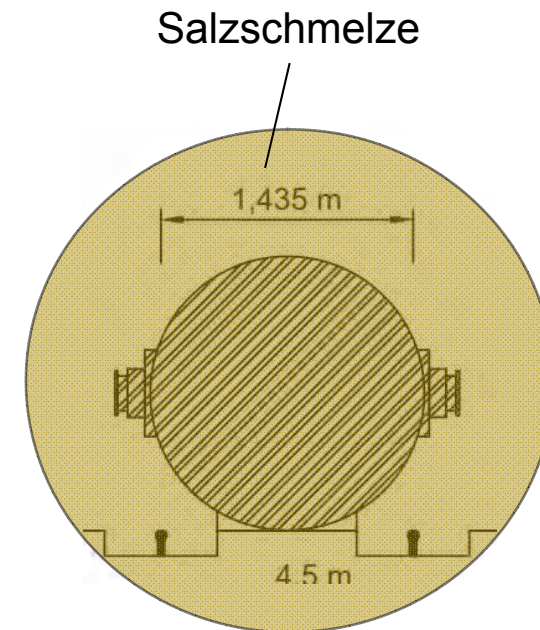
Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

Streckenlagerung mit Versatz Salzgrus und eutektischer Salzschnelze



Einfache weniger aufwendige Rückholung durch herausziehen der Abfallbehälter aus eutektischer Salzschnelze



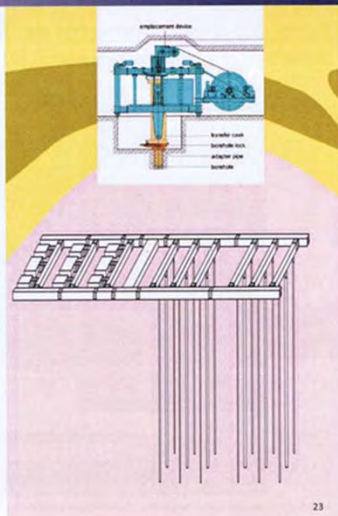
Deep vertical Borehole disposal of Spent Fuel Canisters

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

Disposal in Bore Holes (VSG)

Conceptual design for 300 m depth !

- Technical feasibility of disposal
- Licensing requirements
- Deduction of technical requirements (e. g. accuracy of bore hole drilling)
- Testing and practical demonstration

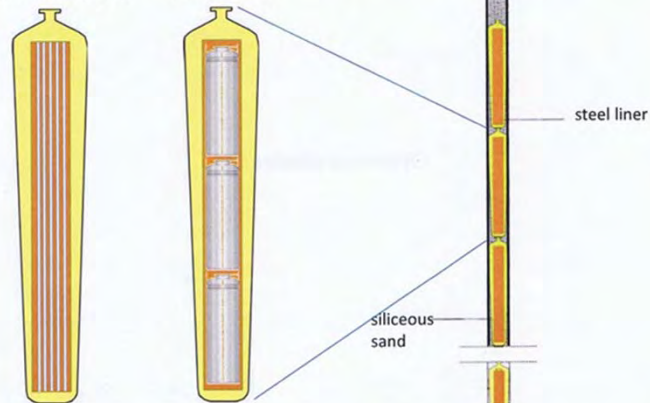


Workshop „Final Disposal in Deep Bore Holes ...“, June 5th & 6th, 2015, Berlin

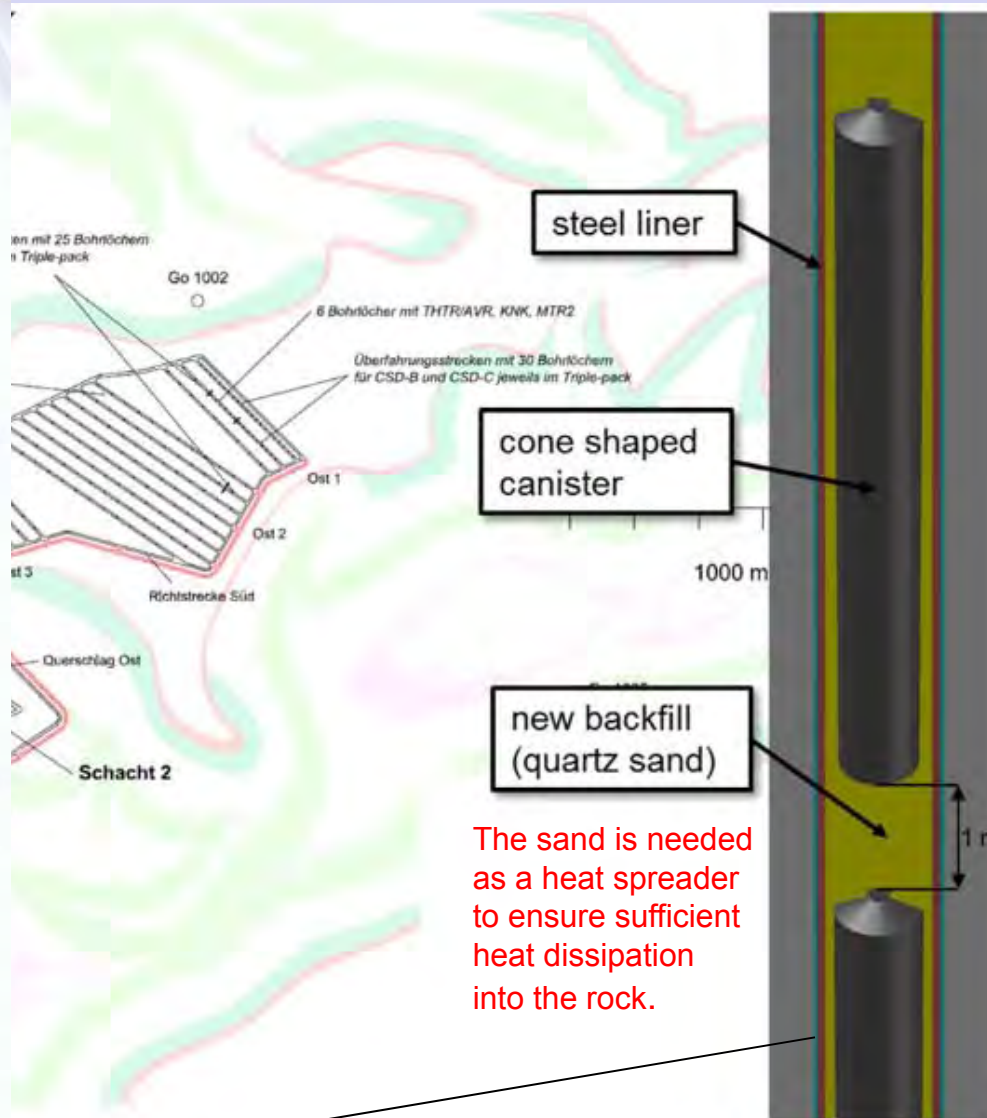
Conical containers for bore hole disposal (VSG)

Fuel elements (rods)

Vitrified waste



Workshop „Final Disposal in Deep Bore Holes ...“, June 5th & 6th, 2015, Berlin



The liner has been designed to absorb the expected geomechanical pressure of the surrounding rock masses.

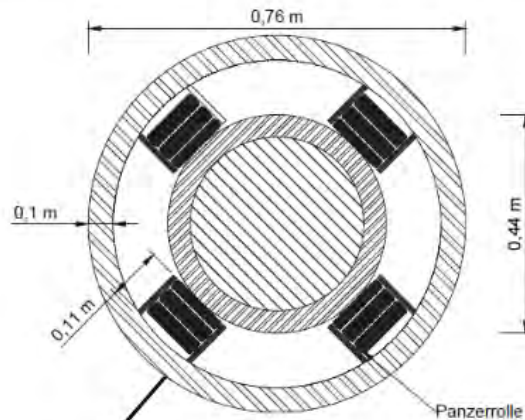
Auswirkungen der Forderung nach Rückholbarkeit (VSG, 2010)

- 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. Wittertemperaturen 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

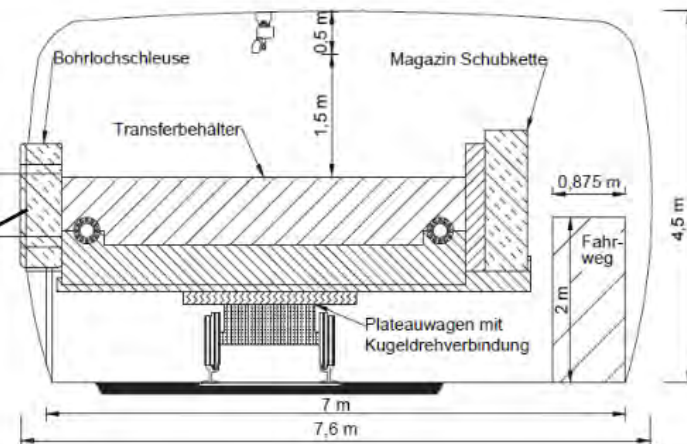


0,1 m Stahl liner

Massiver
Bohrloch-
verschluss

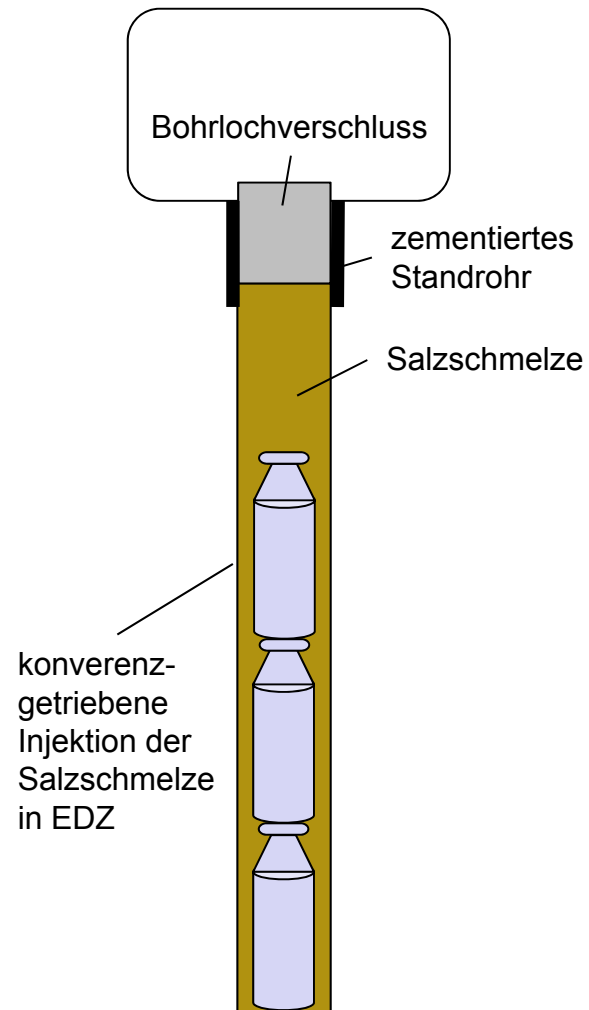
Ferner können wegen des Ringspalts zwischen Verrohrung und Behälter, im Falle eines Lösungszutritts größere Lösungsmengen in Kontakt mit allen Behältern eines Bohrlochs treten, diese korrodieren und letztlich erhebliche Teile des Inventars mobilisieren. Durch die Korrosion der Verrohrung ist darüber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

Schnitt H-H, Querschlag;
Maßstab 1:60

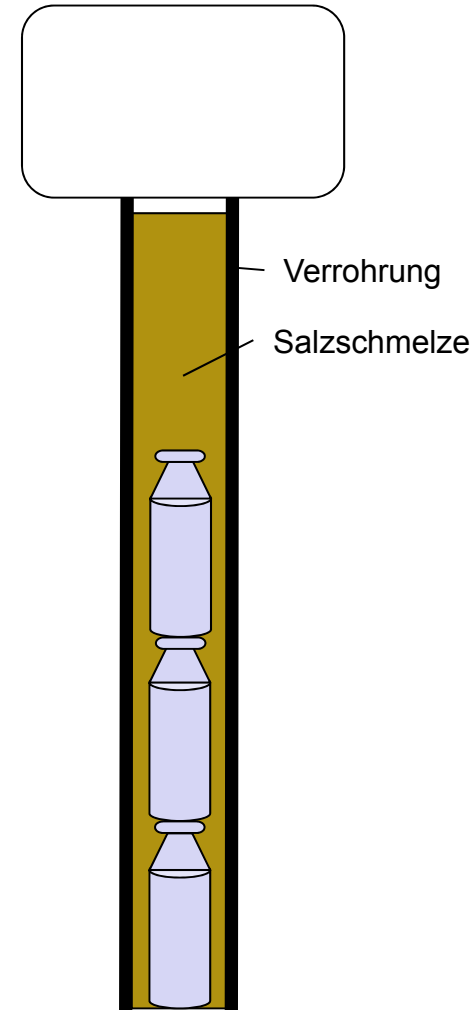


vollständiger Einschluss und Rückholungsmöglichkeit bei Verwendung eutektischer Salzschnmelzen als Verfüllmaterial

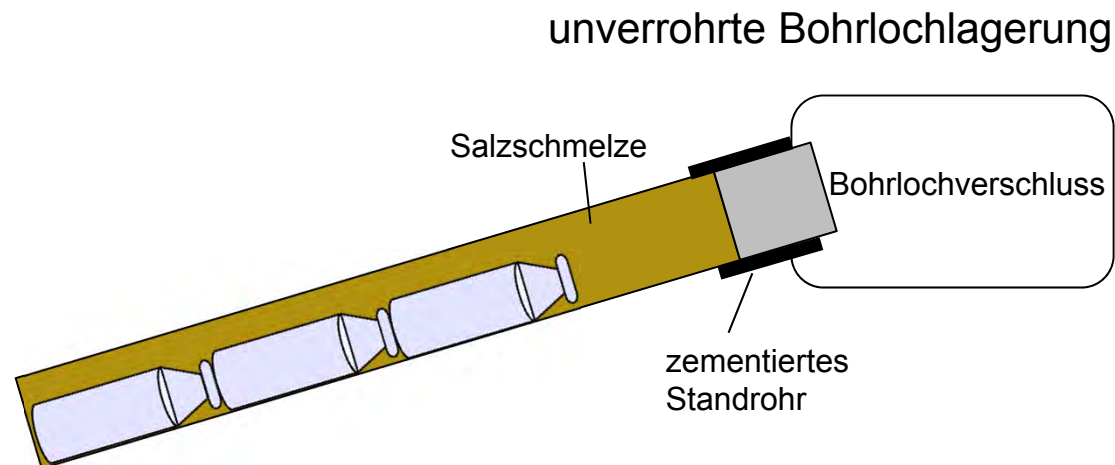
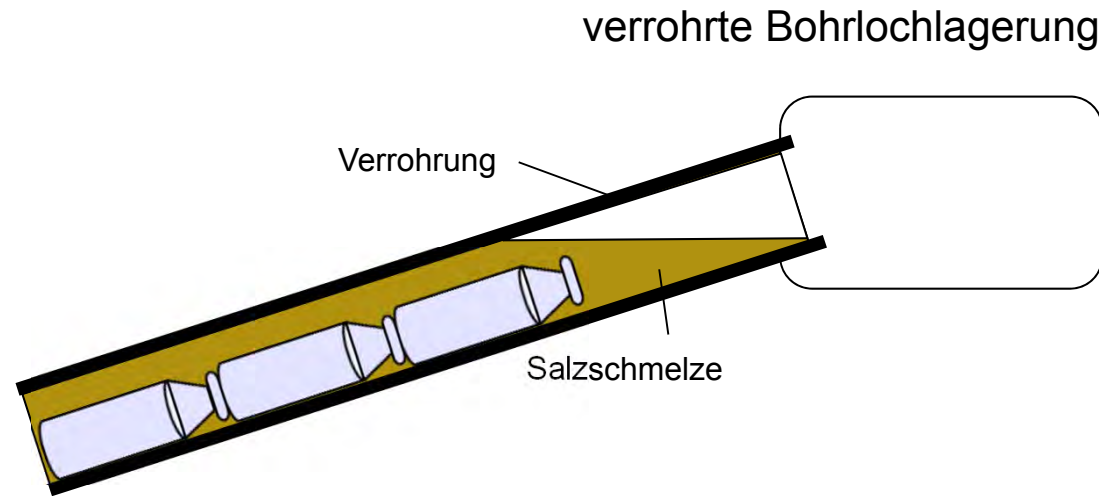
unverrohrte Bohrlochlagerung



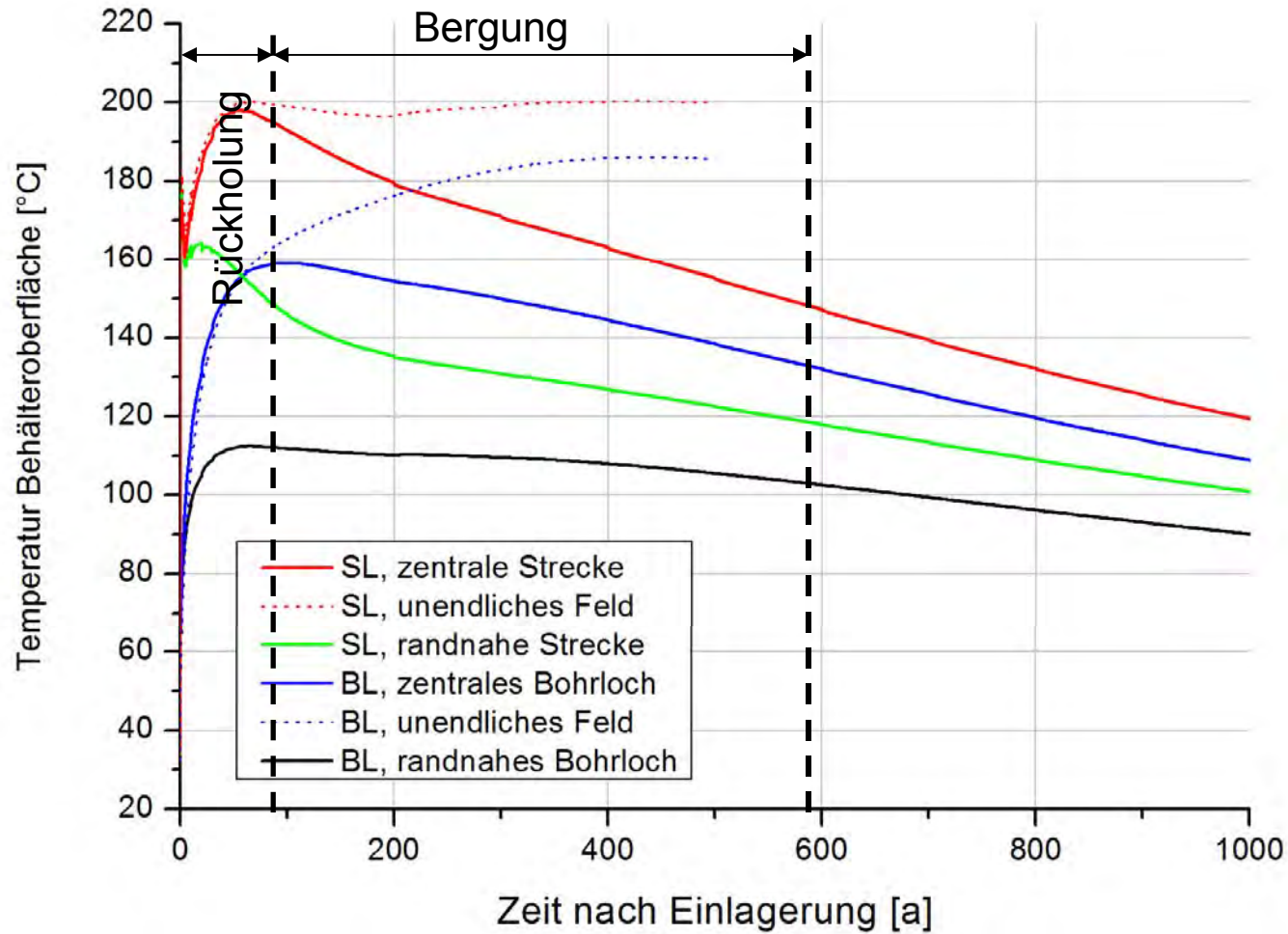
verrohrte Bohrlochlagerung



vollständiger Einschluss und Rückholungsmöglichkeit bei Verwendung eutektischer Salzschnmelzen als Verfüllmaterial



Temperature development of road and borehole storage (KOSINA)



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



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





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



Gliederung

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

1 Motivation zur Entwicklung eines gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

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.)

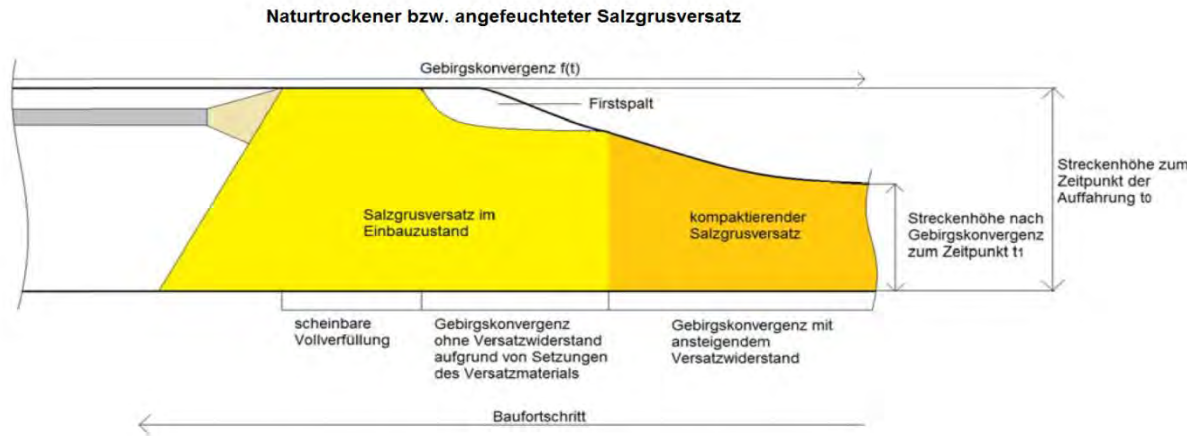
Weitere Versatzmaterialien basierend auf den oben genannten Versatzmaterialien:

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

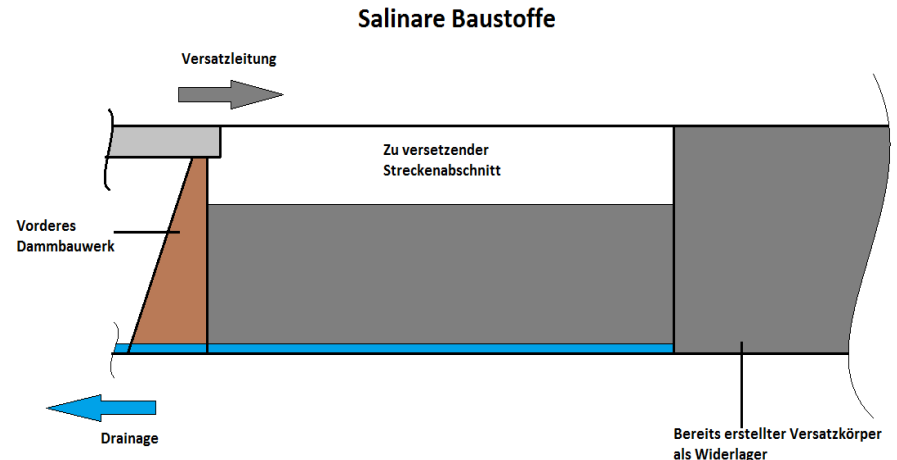
Der gefügestabilisierte Salzgrusversatz bildet ein Bindeglied zwischen den zwei Versatzstoffarten und vereinigt die Vorteile, um die jeweiligen Nachteile abzumindern!

1 Motivation zur Entwicklung eines gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

Verfügbare Versatzmaterialien für ein HAW-Endlager im Salinar



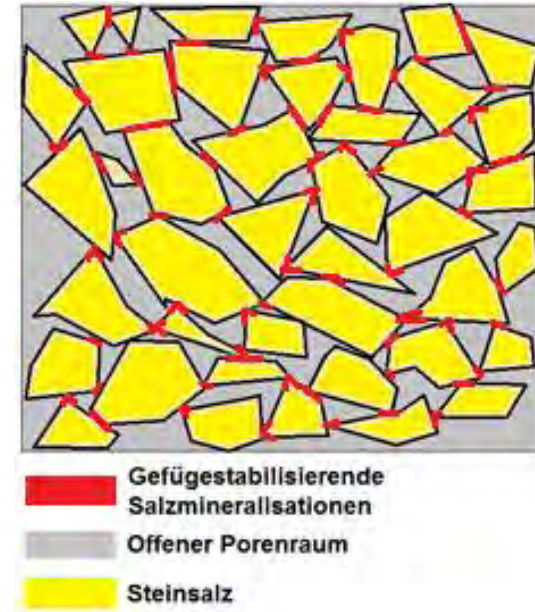
Quelle: Mischo, H.; Untersuchung an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge. Dissertation an der TU Clausthal. Aachen: Shaker Verlag, 2002. - bearbeitet



2 Rezepturenentwicklung

Grundlagen der Gefügestabilisierung

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



Angelehnt an Lingen, P.; Theelen, J.; Versickerungssystem, Patentanmeldung EP-1252393 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)

Die Salzgrusausgangskomponenten

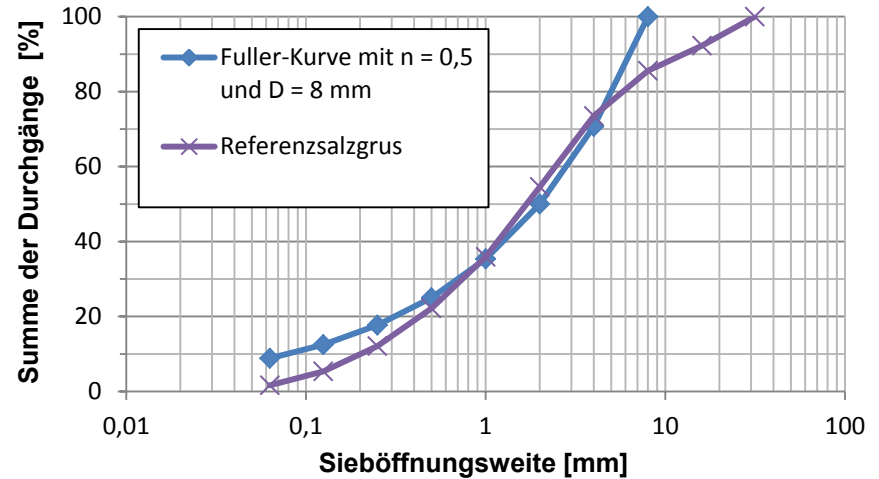
Bedingungen an Salzgruskörnungen:

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



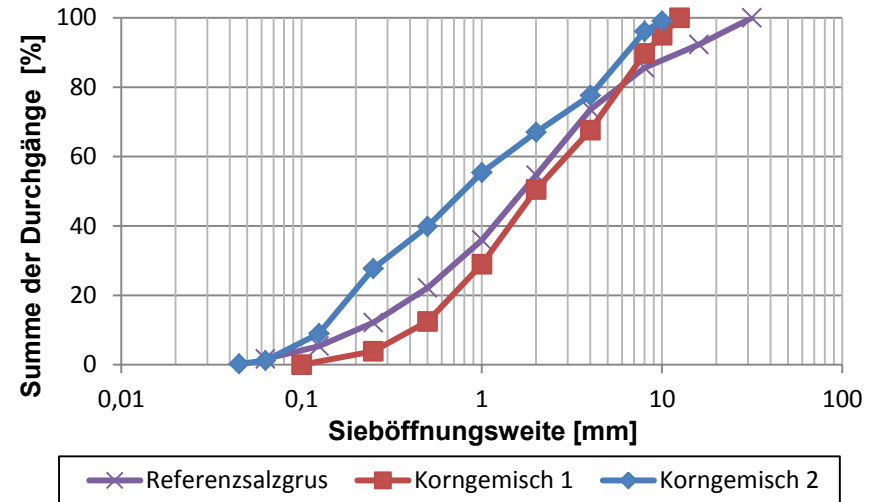
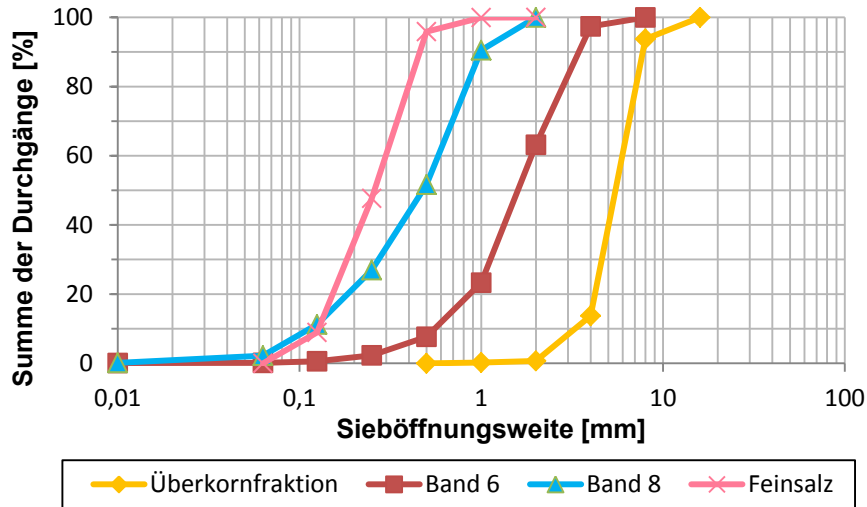
Materialauswahl:

- Untersuchung verschiedener Salzgruskorngemische
- 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

Erstellung optimierter Salzgruskornmischungen



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

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	α - $CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$ oder β - $CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$ 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 %)

2 Rezepturentwicklung

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-%

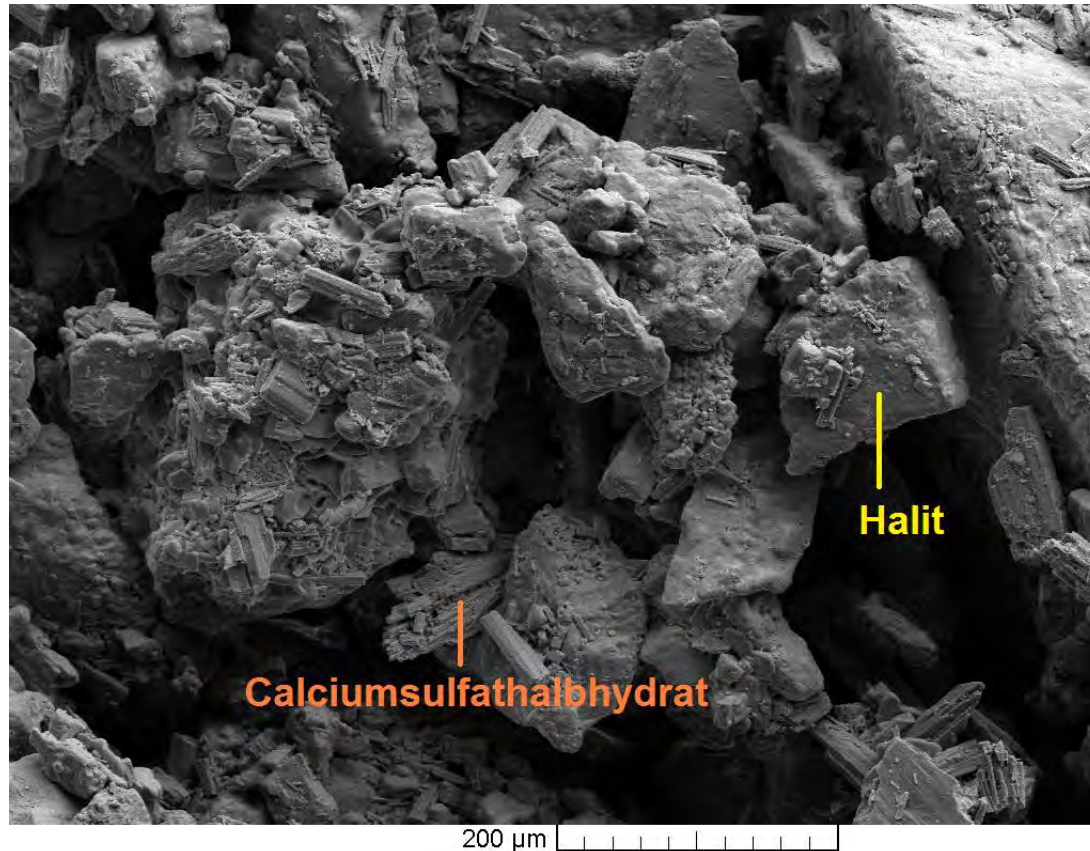
3 Ergebnisse der labortechnischen Prüfung

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

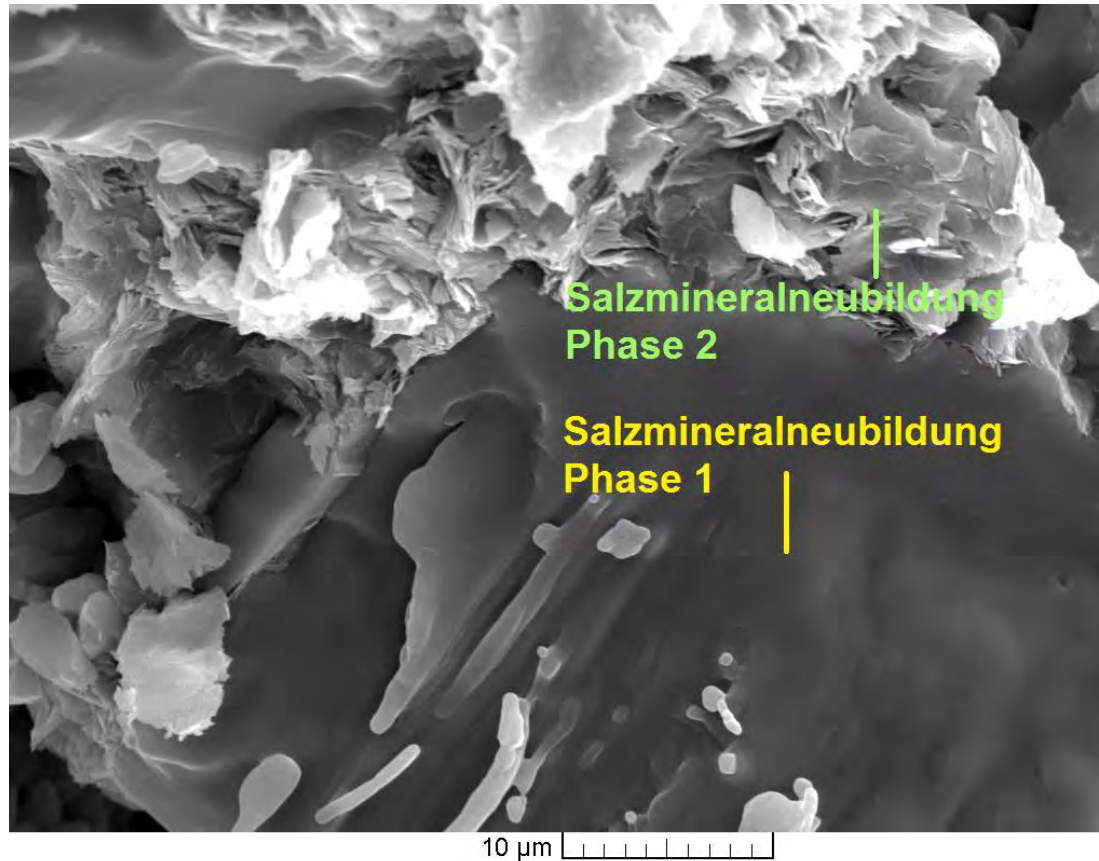
Eigenschaft	Untersuchungsverfahren
Phasenbestand	Pulver-Röntgendiffraktometrie (P-XRD)
Gefügeentwicklung	Rasterelektronenmikroskopie (REM)
Porosität	Gas-Porosimeter
Permeabilität	Triaxiale Druckzelle ($k < 10^{-14} \text{ m}^2$) oder Staudruckmessung bei durchfluss geregelter Probendurchströmung ($k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

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



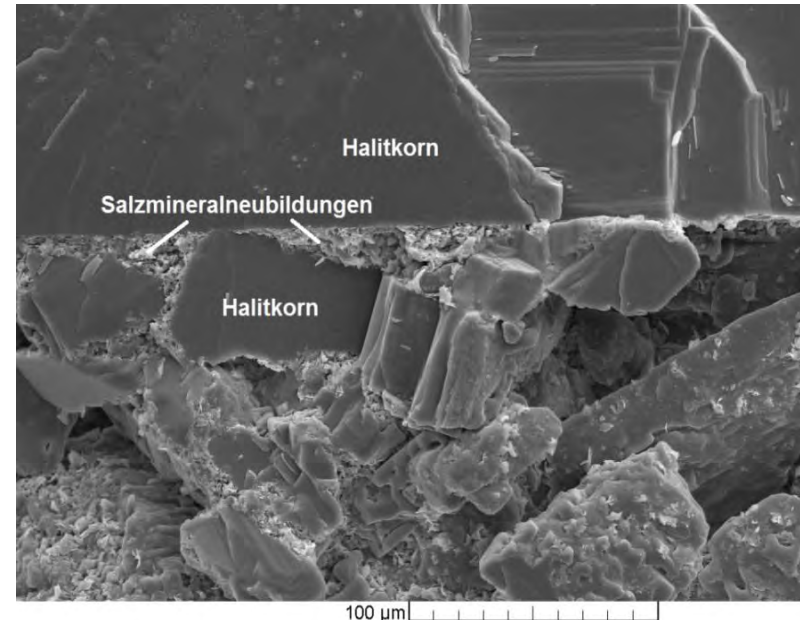
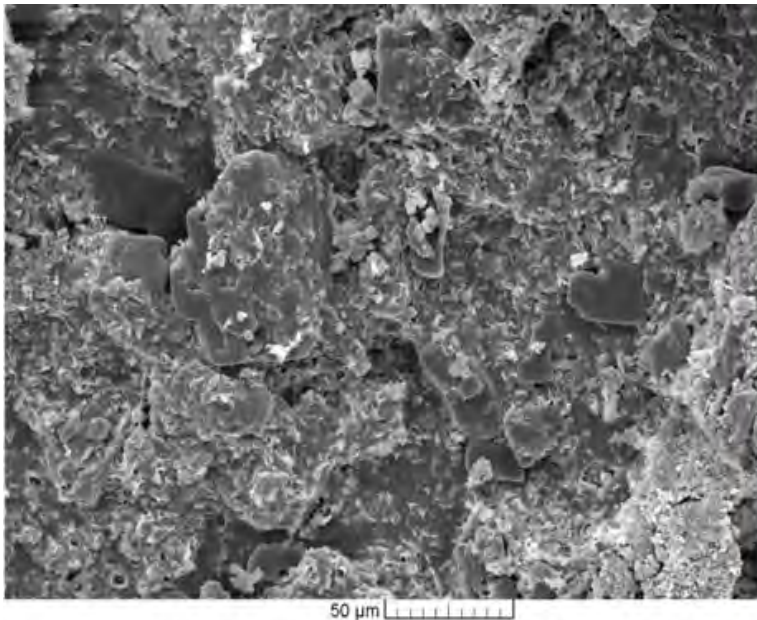
- Salzbinderkomponenten auf den Salzgrusoberflächen verteilt
- Keine Lösungs- bzw. Salzneubildungsprozesse erkennbar

Gefügeanalyse zum Zeitpunkt $t = 81$ d



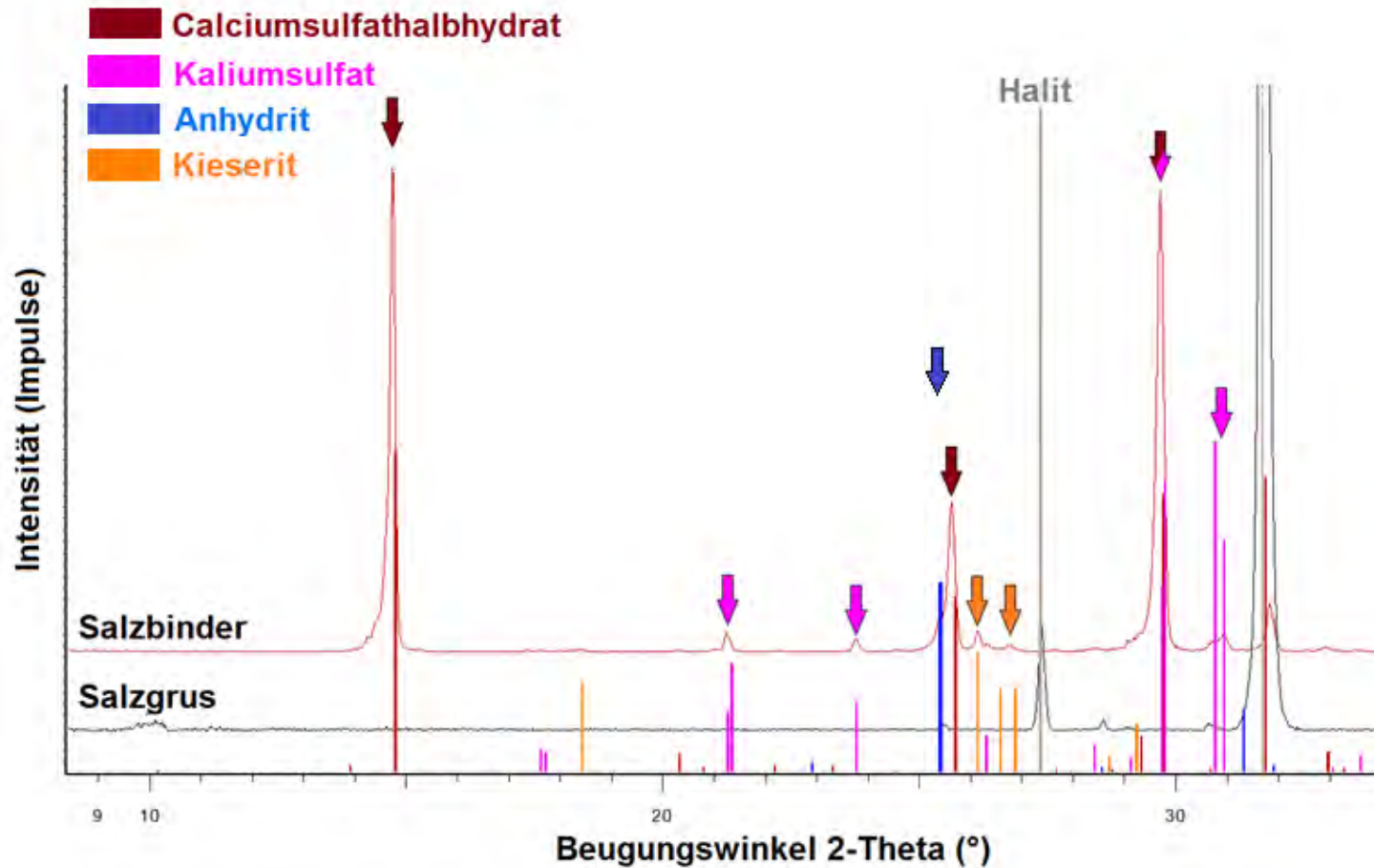
- Salzmineralneubildungen an den Steinsalzoberflächen nachweisbar
- Neugebildete Salzminerale grenzen aneinander

Gefügeanalyse zum Zeitpunkt $t = 29$ Monate

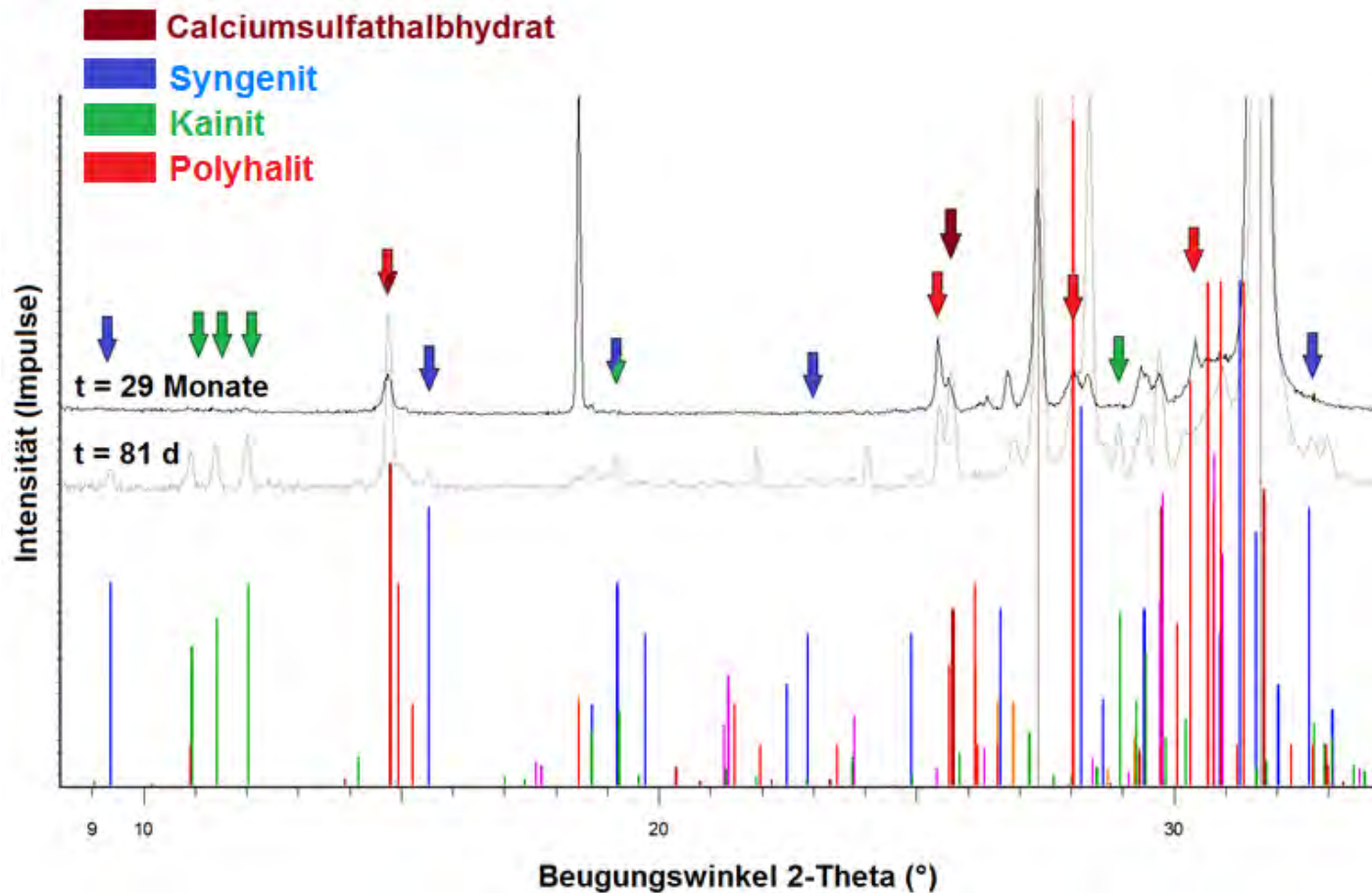


- Ausbildung neuer Salzmineralphasen an den Steinsalzoberflächen im gesamten Korngerüst
- Keine vollständige Porenraumfüllung durch die Salzmineralneubildungen
- Nachweis von Salzmineralbrücken an den Kornkontaktstellen der Steinsalzgruskörnung

Phasenbestand zum Zeitpunkt $t = 0$ d

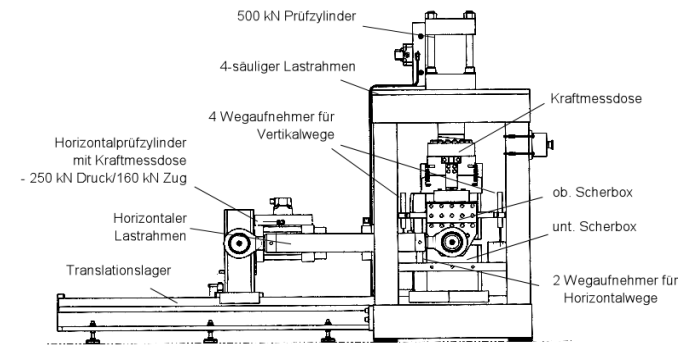
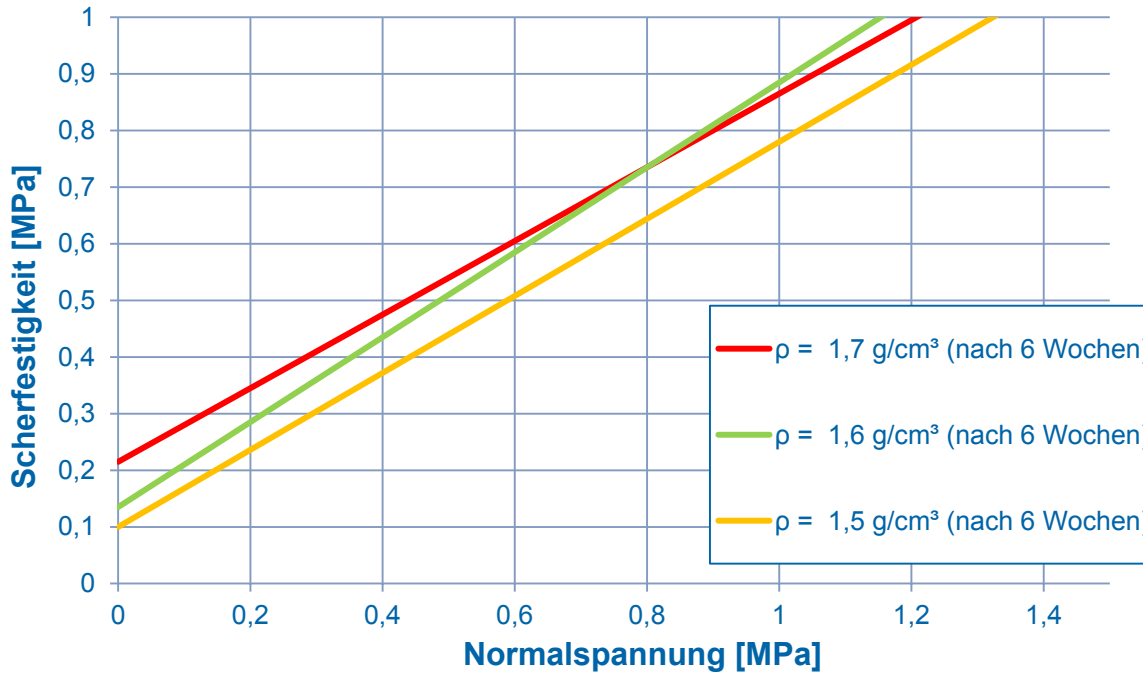


Phasenbestand zum Zeitpunkt $t = 81$ d und $t = 29$ Monate



Scherfestigkeitsuntersuchungen

Einflussfaktor: Einbaudichte

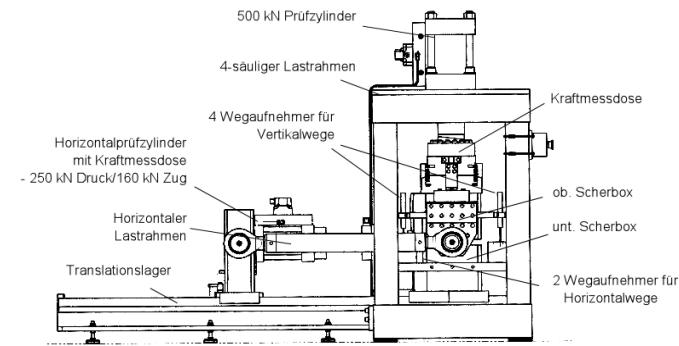
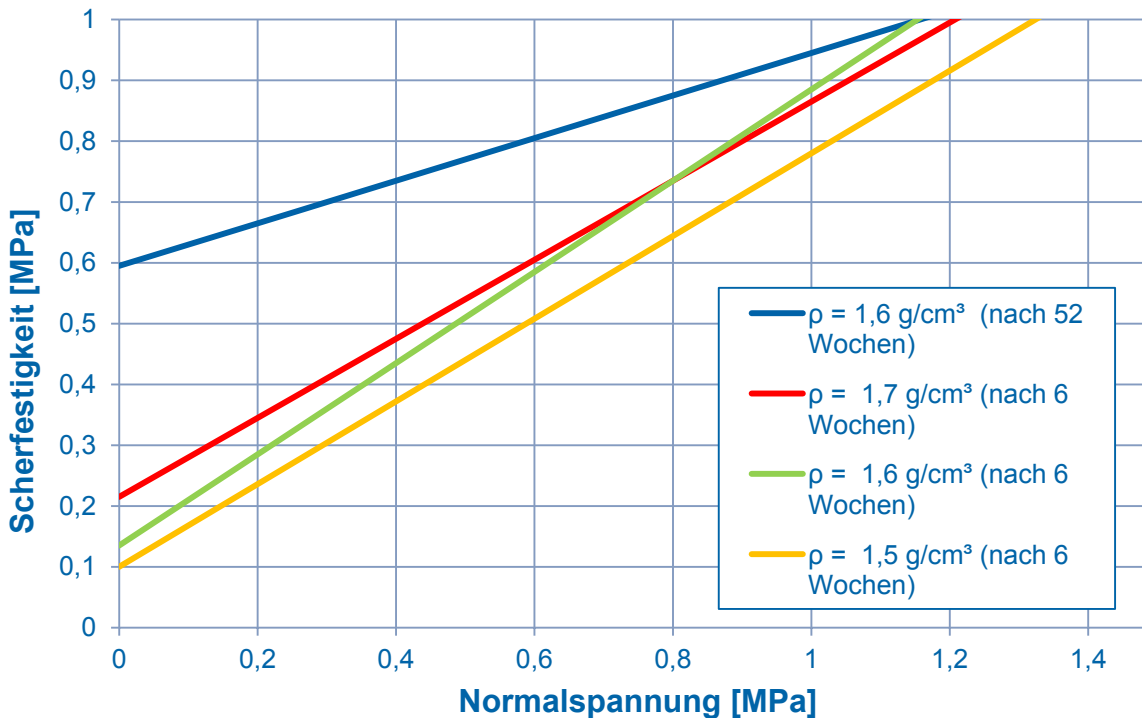


- Scherfestigkeit abhängig von Einbaudichte
- Zunahme der Einbaudichte bewirkt eine Zunahme der Scherfestigkeit
- Parallelität der Schergeraden durch statistische Einflüsse verschoben

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

Scherfestigkeitsuntersuchungen

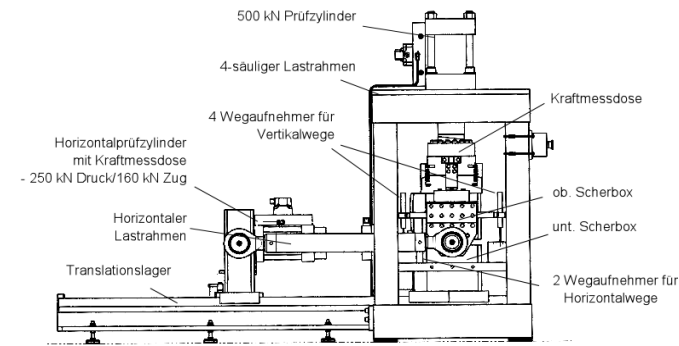
Einflussfaktoren: Probenalter



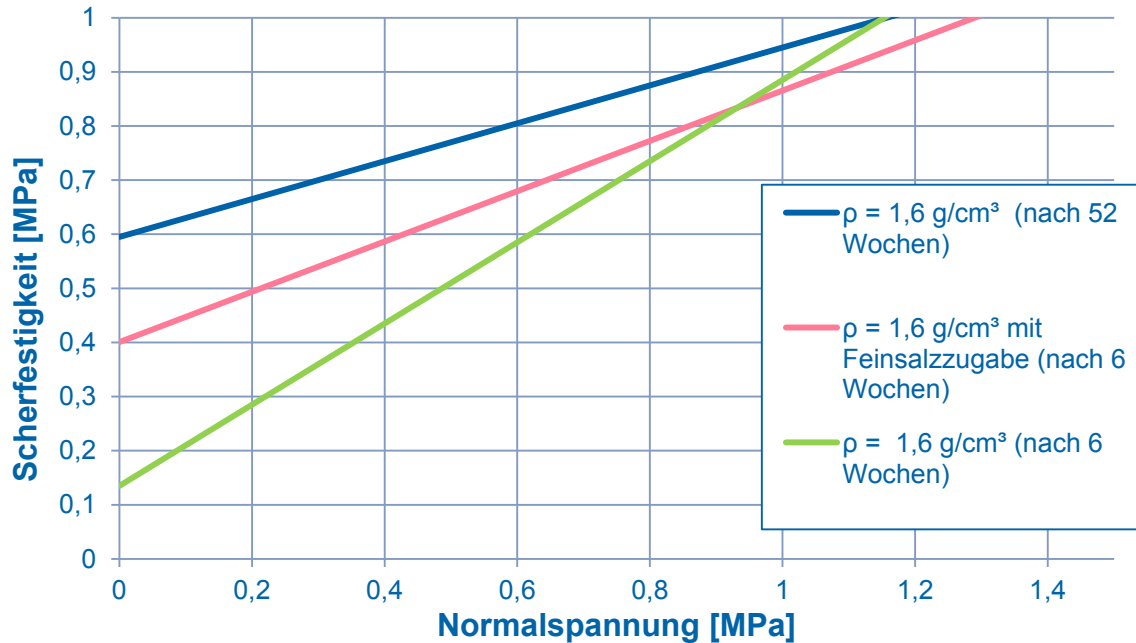
- Zunahme der Probenfestigkeit mit steigendem Probenalter
- Probenfestigkeit nimmt mit zunehmender Salzmineralneubildung sowie Umbildungsprozessen zu

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

Scherfestigkeitsuntersuchungen



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

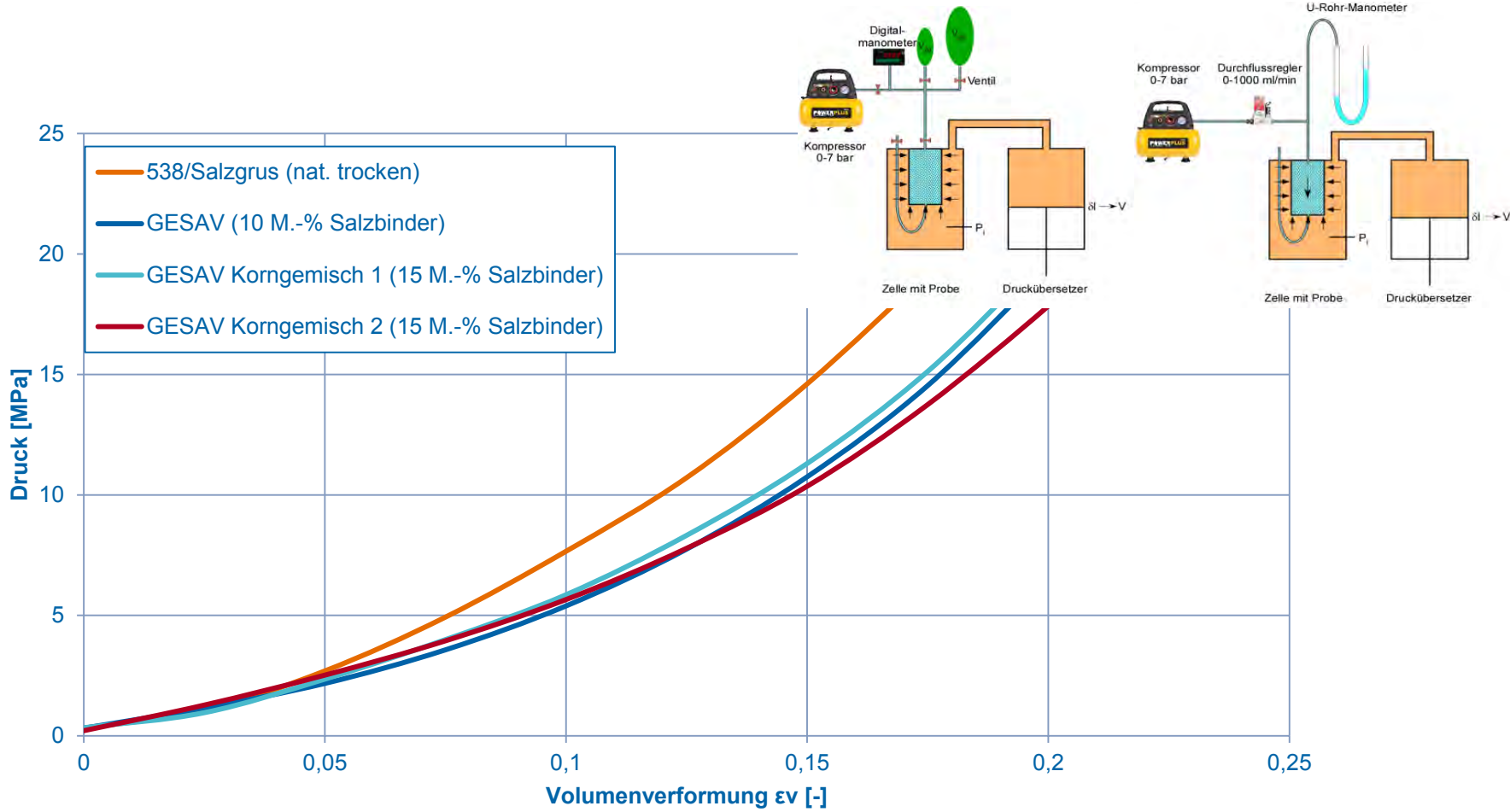


- Erhöhung der spez. Oberfläche bewirkt eine Erhöhung der Festigkeit
- Festigkeit abhängig von der Anzahl an Kornkontaktstellen

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

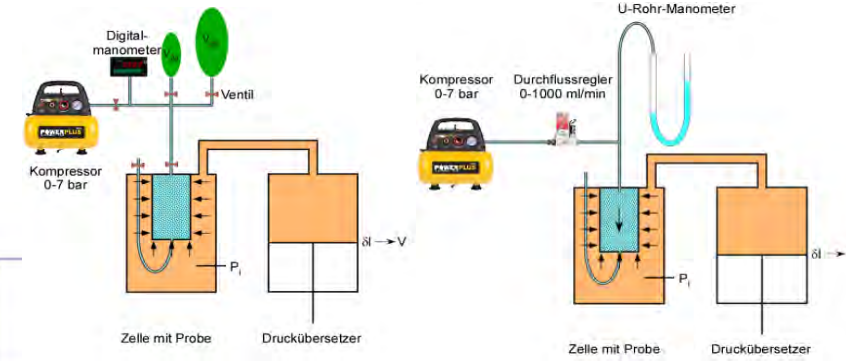
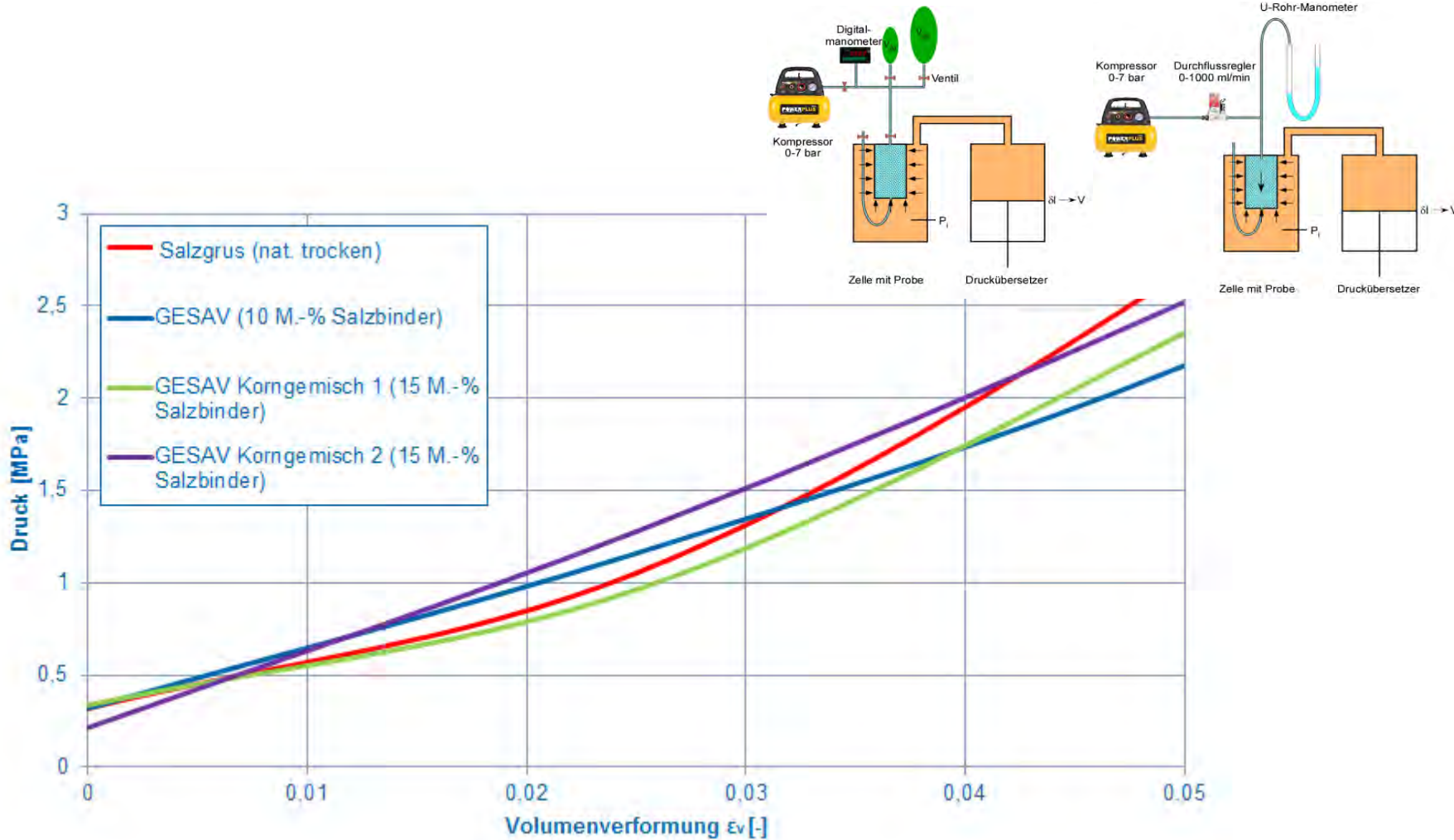
Ergebnisse des isostatischen Kompaktionsversuchs

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

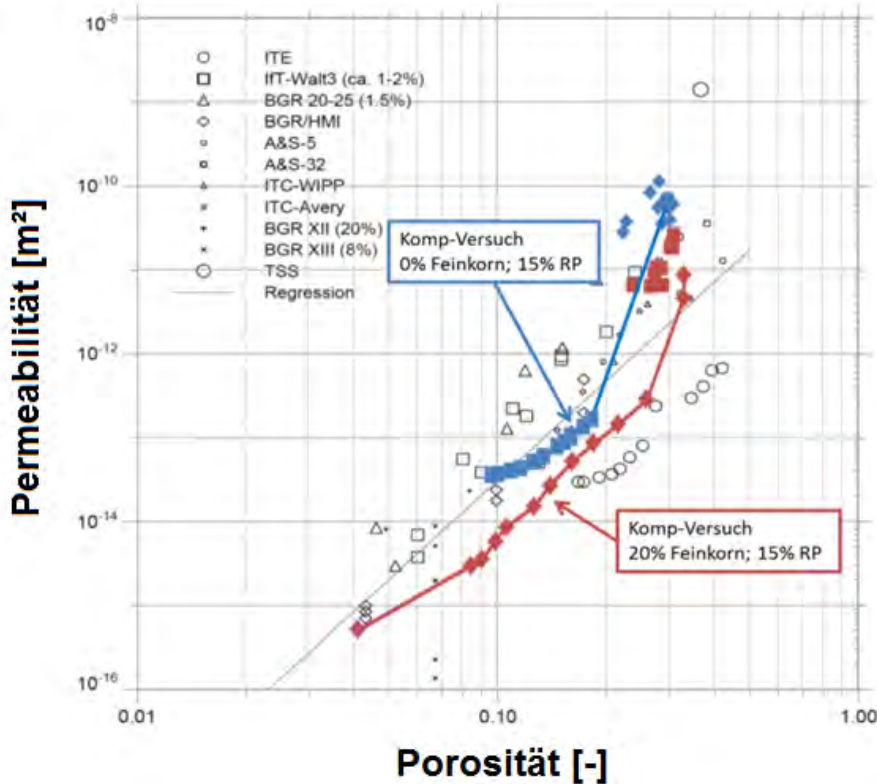


Ergebnisse des isostatischen Kompaktionsversuchs

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



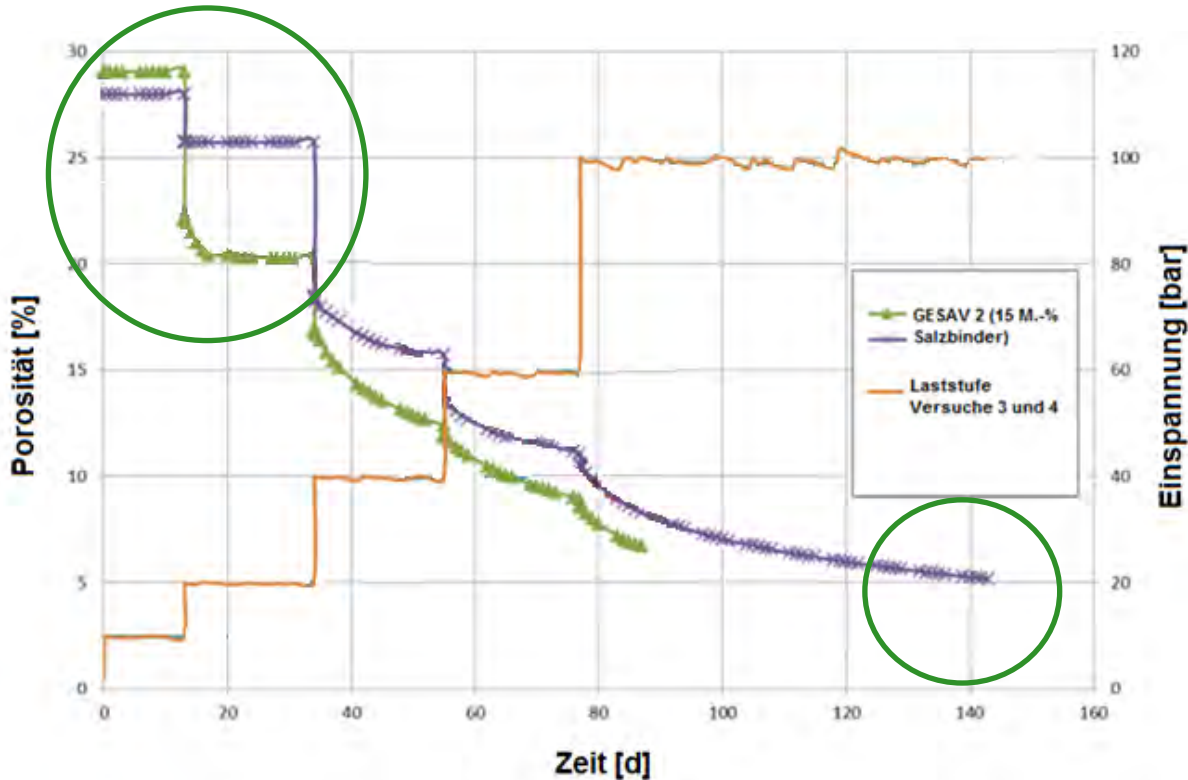
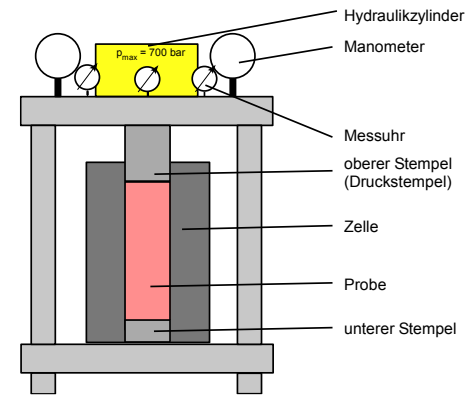
Porositäts-Permeabilitätsbeziehung während der Kompaktion



- 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

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

Ergebnisse des Langzeitkriechversuchs



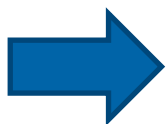
- Proben mit 15 Masse-% Salzbinder zeigen ein optimiertes Kriechverhalten
- Zu Beginn Ausbildung von statischen Plateaus bis zum Überschreiten von 1 MPa bzw. 2 MPa
- Stetige Porositätsabnahme bis in geringe Porositätsbereiche

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

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
Green	Günstige endlagerrelevante Materialeigenschaft		
Yellow	Mittlere endlagerrelevante Materialeigenschaft		
Grey	Ungünstige endlagerrelevante Materialeigenschaft		



Einfluss der Versatztechnologie ist zu beachten!

5 Ausblick

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)



6 Zusammenfassung

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 Salzbinder entwickelt und labortechnisch geprüft.
- Die Salzbinderkomponenten 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.

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.

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

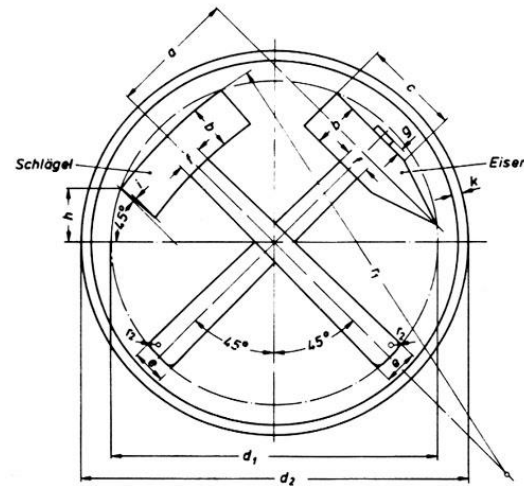


PTKA

Projektträger Karlsruhe

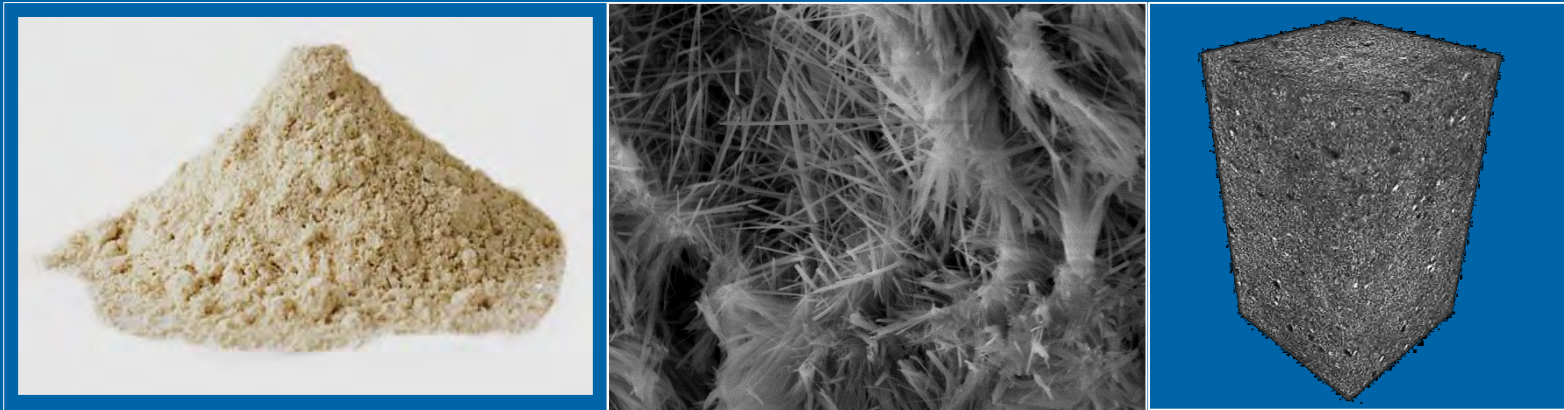
Karlsruher Institut für Technologie

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Glück Auf!

Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff



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

COMPTES RENDUS

HEBDOMADAIRES

1867

DES SÉANCES

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

PUBLIÉS,

CONFORMÉMENT A UNE DÉCISION DE L'ACADÉMIE

En date du 23

PAR M.

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,

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55

1867

Die künstlichen Fußböden-, Wände- 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 steinartige 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 in Form von Fußbödenbelägen oder in beiden Fällen einen vorzüglichen Fußbodenbelag bilden.

Wien und Leipzig.

A. Hartleben's Verlag.

1922.

Anwendungen

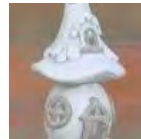
seit der Entdeckung 1867, als

- 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, Holzspalter, MgC12 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 verrotet 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

Hyroskopische 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	qm x K/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

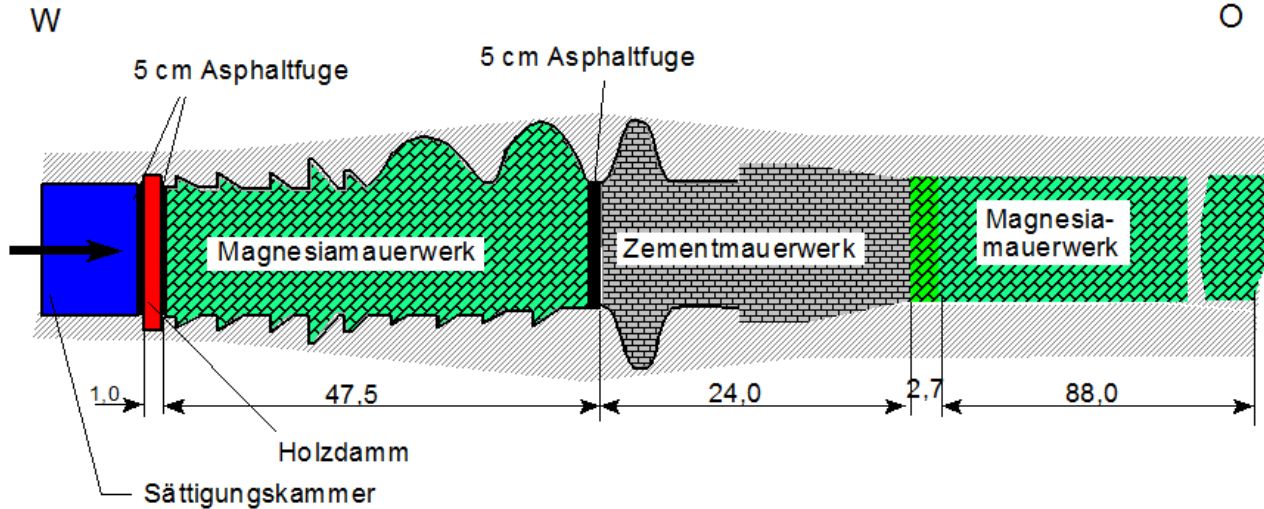
Geräuschdämmung

>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

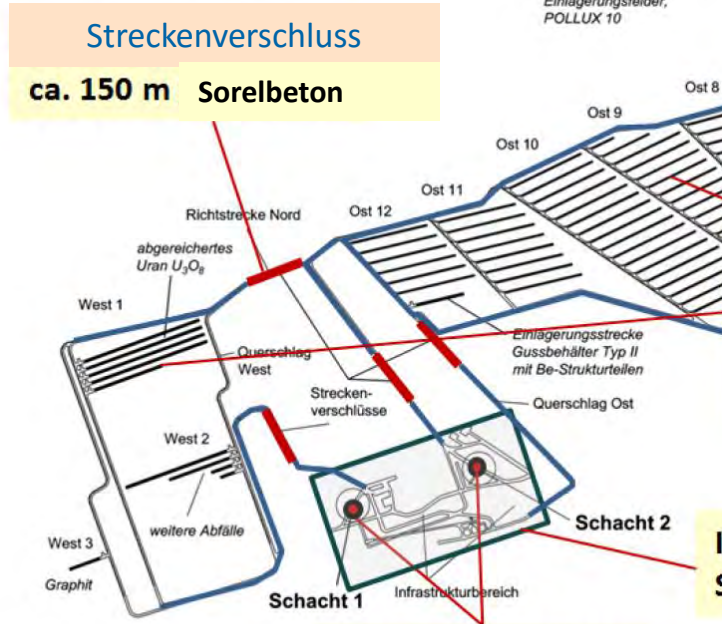
Der erste Dam im Kalibergbau wurde um die Jahrhundertwende im ehemaligen Kaliwerk Leopoldshall in 300 m Tiefe in einer Steinsalzstrecke gegenüber 3.3 MPa Laugendruck errichtet. Der 161.5 m lange, sorgfältig mit dem Gebirge verzahnte Dam ist in Zement- und Magnesiamauerwerk ausgeführt.

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



MgO-Damm
im Carnallit, Bischoferode,
Lösungszutrittsseite

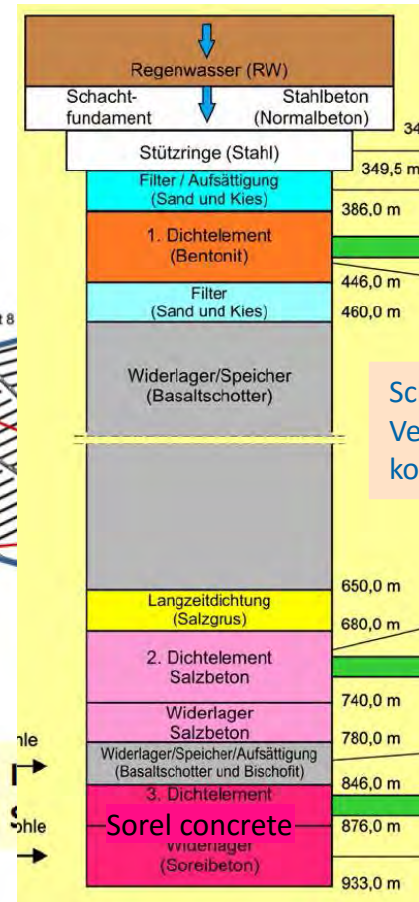
Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)



GRS-290

Einlagerungsfelder für radioaktive Abfall vernachlässigbarer Wärmeentwicklung West 1, West 2 und West 3

Schachtverschluss



**Schacht-
Verschluss-
komponenten**

GRS-287



UB 6 (Lu2)
Ca-MgCl₂-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 Zerfallerscheinungen 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 ↑

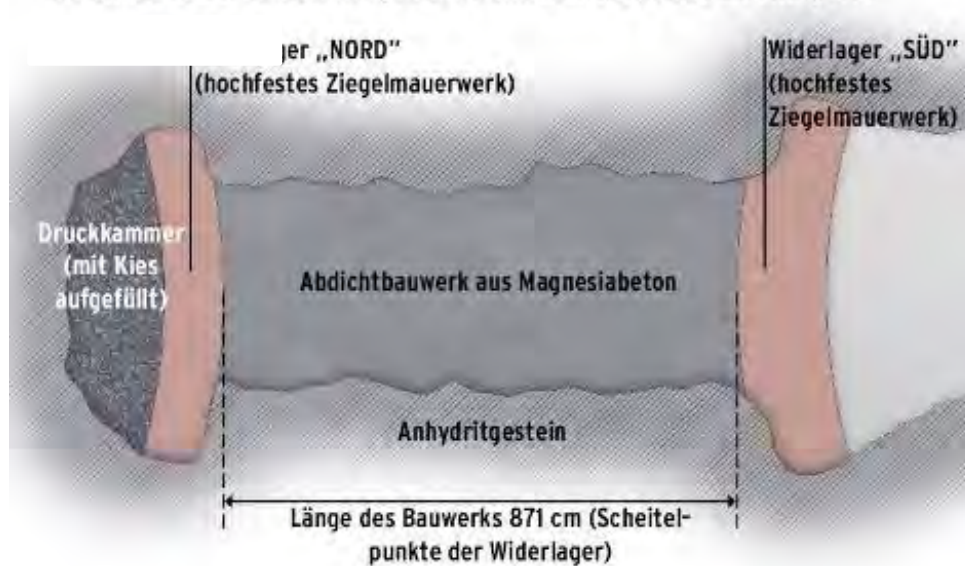
CaCl₂-MgCl₂-TTLösung 1/09

Lagerdauer in Lsg. 31 Tage



2010

Schematische Darstellung des Technikumversuchs im Anhydrit



Schematische Darstellung des Technikumversuchs im Anhydrit

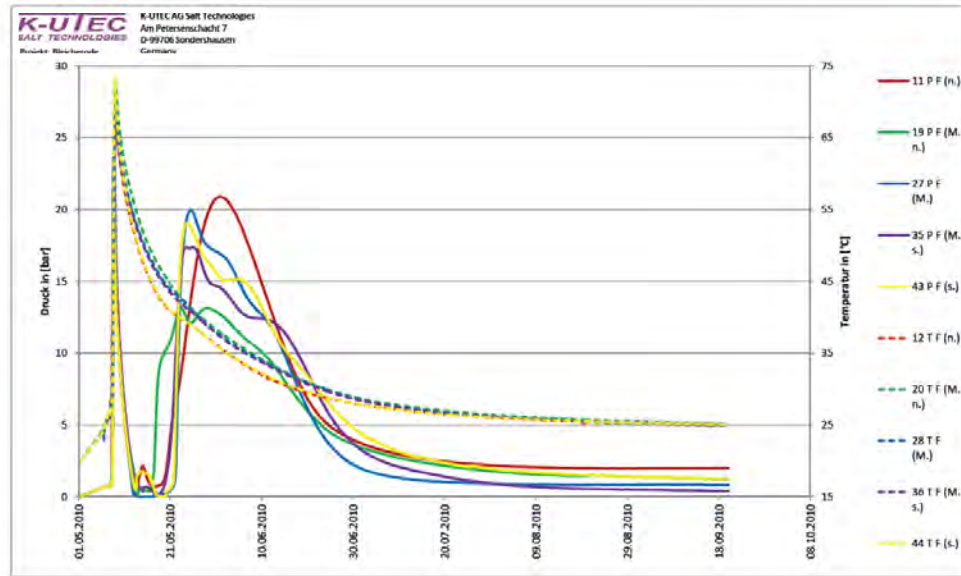
Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz

... 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 Fiste

... 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

COMPTES RENDUS

HEBDOMADAIRES

1867

DES SÉANCES

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

PUBLIÉS,

CONFORMÉMENT A UNE DÉCISION DE L'ACADÉMIE

En date du 23

PAR M.

CHIMIE APPLIQUÉE. — Sur un nouveau ciment magnésien. Note de **M. SOREL**,
présentée par M. Dumas.
(Benvoi 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

1958

TONINDUSTRIE-ZEITUNG UND KERAMISCHE RUNDSCHAU

ZENTRALBLATT FÜR DAS GESAMTGEBIET DER STEINE UND ERDEN

1958, 82, S. 290-291

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

Von

Bruno Kaßner, Berlin

Seitdem S o r e l (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.**



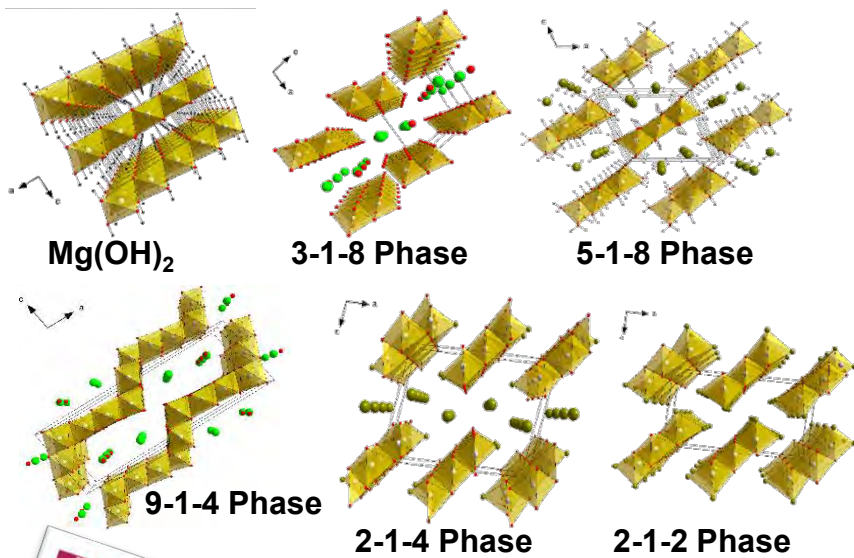
Systematische Grundlagenuntersuchungen zu existierenden Phasen und deren Bildungsbedingungen (Bindemittelphasen)

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

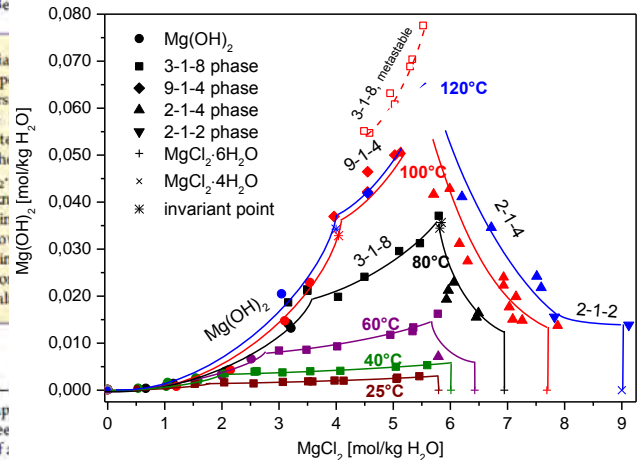
Solubility Equilibria in the System $\text{Mg}(\text{OH})_2$ – MgCl_2 – H_2O from 298 to 393 K

Melanie Pannach, Sebastian Bette, and Daniela Freyer*

Institut für Anorganische Chemie, TU Be



ABSTRACT: The solubility equilibria MgCl_2 – H_2O were determined at temp equilibration periods of up to 3.5 years stable magnesium chloride hydroxide ternary system within the investigated phase $[3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$, the $4\text{H}_2\text{O}$, the 2-1-4 phase $[2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$. The also $8\text{H}_2\text{O}$ was found to be metastable in water. The demand of material in sal



ZAAC

ARTICLE

DOI: 10.1002/zaac.201100497

$2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Two High Temperature Phases of the Magnesia Cement System

Robert E. Dinnebier,^[a] Melanie Oestreich,^[b] Sebastian Bette,^[b] and Daniela Freyer^[*]

Keywords: Magnesia cement; Magnesium oxide chloride cement; System MgO – MgCl_2 – H_2O ; X-ray powder diffraction; 2-1-2 phase

Abstract: In the course of investigations relating to magnesia cement the basic magnesian salt hydrates $2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (2-1-2 phase) and $2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (2-1-4 phase) were found as stable phases in the system MgO – MgCl_2 – H_2O at a temperature of $T = 130^\circ\text{C}$ and were characterized by thermal analysis, Raman spectroscopy and X-ray powder diffraction. The crystal structures of the 2-1-2 and 2-1-4

Inorganic Chemistry Article

9770 *Inorg. Chem.* 2010, 49, 9770–9776
DOI: 10.1021/IC1004566

$9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, a High Temperature Phase of the Magnesia Binder System

Robert E. Dinnebier,^[*] Daniela Freyer,^[*] Sebastian Bette,^[*] and Melanie Oestreich^[†]

* Max-Planck-Institute for Solid State Research, Heisenbergstrasse 1, D-70569 Stuttgart, Germany, and †TU Bergakademie Freiberg, Institute of Inorganic Chemistry, Leipziger Strasse 29, D-04895 Freiberg, Germany

Received March 11, 2009

The metastable phase $9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (9-1-4 phase) was found at the extended metastable isotherm of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in the system MgO – MgCl_2 – H_2O at 120°C and occurs as intermediate binder phase during setting of magnesia cement due to temperature development of the setting reaction. The crystal structure of the 9-1-4 phase was solved from high resolution laboratory X-ray powder diffraction data in space group C2/m ($Z=2$) ($a = 22.262(3)\text{ \AA}$, $b = 3.1659(4)\text{ \AA}$, $c = 8.1316(2)\text{ \AA}$, $\beta = 92.88(2)^\circ$) and $Z=1$. Structural and thermochemical relations of the phases in the system MgO – MgCl_2 – H_2O can be derived, with which the development of the cement or concrete quantities becomes explainable.

media and salt solutions, especially in magnesium chloride-containing brines. The potential application of magnesia cement or concrete in barrier constructions, as part of plug and sealing

Received: November 4, 2016
Accepted: March 9, 2017
Published: March 23, 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, ...)
 - ▶ ▶ Abbindecharakteristik verschiedener Magnesia-Baustoff-Rezepturen bezüglich Phasenbestandsentwicklung unter dem Gesichtspunkt der Temperaturentwicklung und Korrelation zur Entwicklung mechanischer Parameter

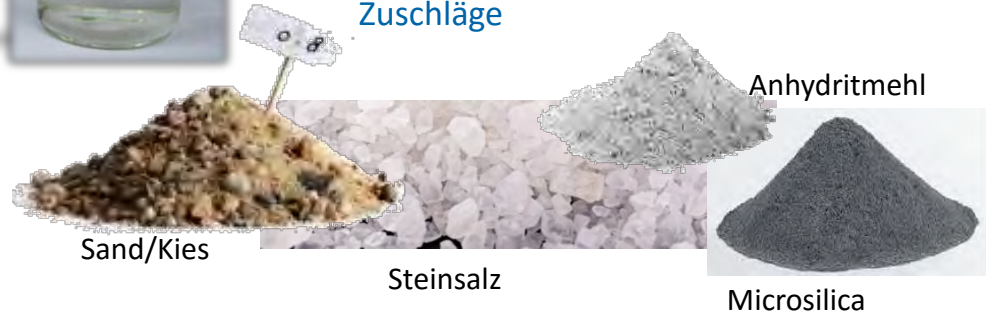
Magnesiabaustoff mit verschiedenen Rezepturen ...



Bindemittelphase(n):

basische Mg-Chlorid-Hydrate
 $x \text{Mg(OH)}_2 \cdot y \text{MgCl}_2 \cdot z \text{H}_2\text{O}$: x-y-z Phase

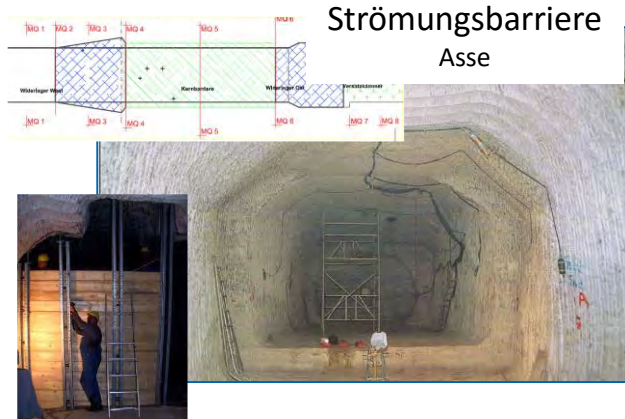
Zuschläge



Stand von Wissenschaft und Technik zum Magnesiabaustoff

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

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



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

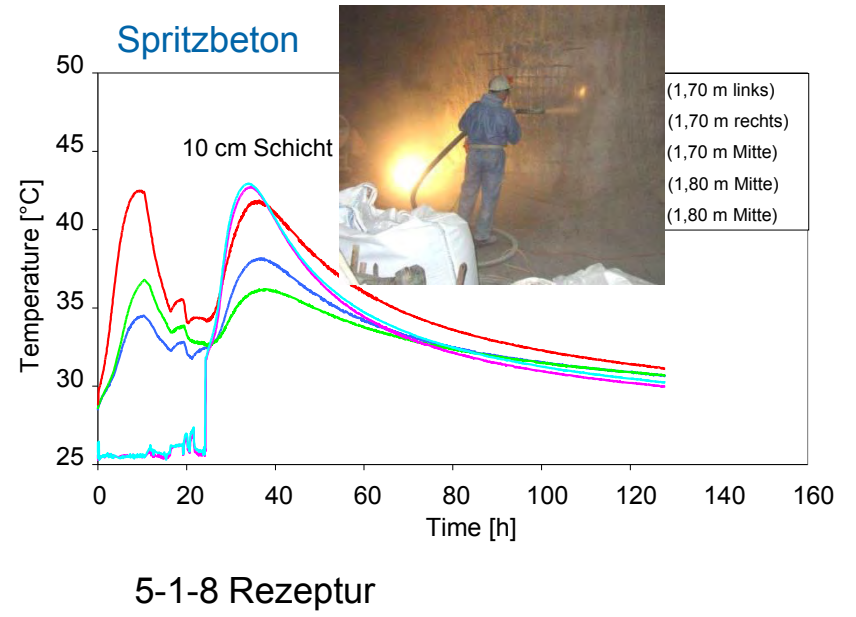
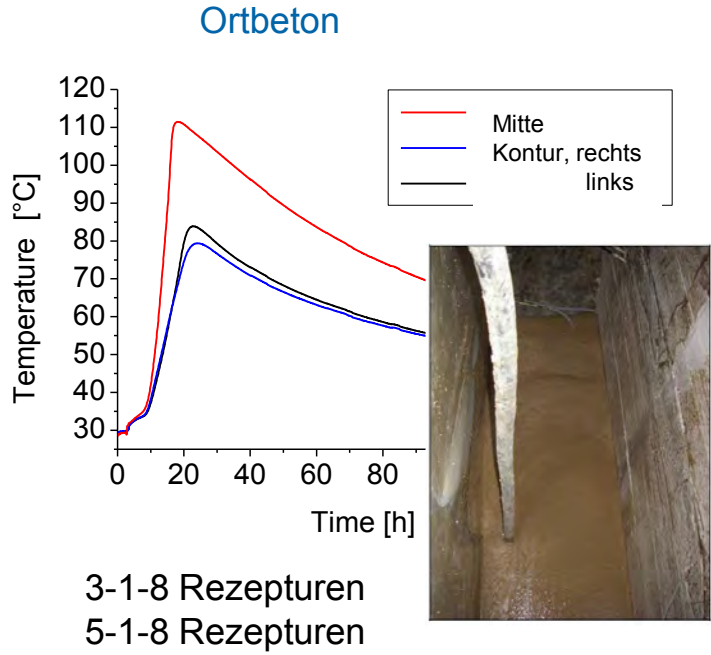
Schachtverschluss (Projekt ELSA) in-situ, Sondershausen



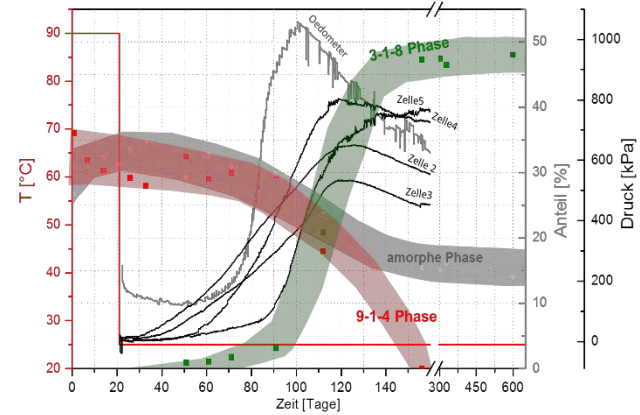
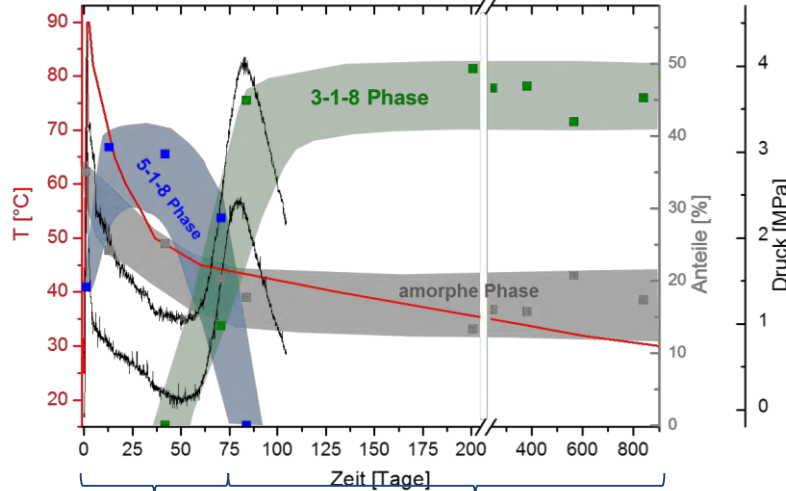
Streckenverschluss (Projekt CARLA)



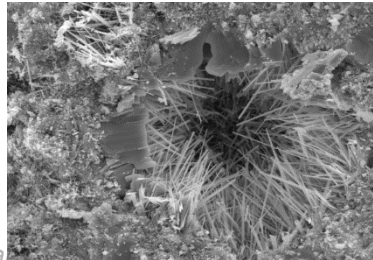
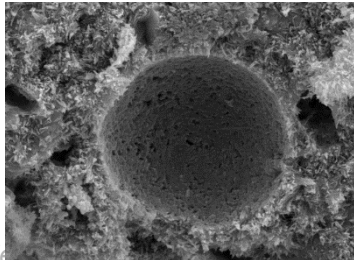
Verarbeitung - Temperaturentwicklung



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

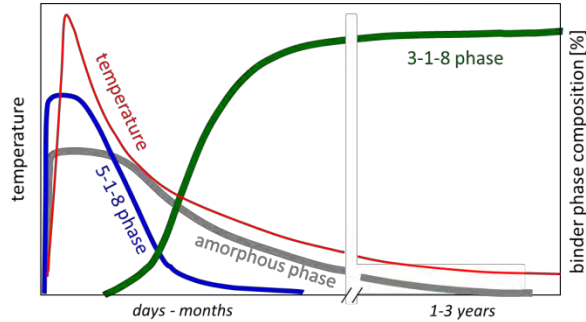


- 2-Phasen-Abbindereaktion mit zwischenzeitlicher Druckentwicklung (Krist.-dr.) im eingespannten Zustand
- Art und Weise der Gefügebildung bedingt die resultierenden geomechanischen Eigenschaften

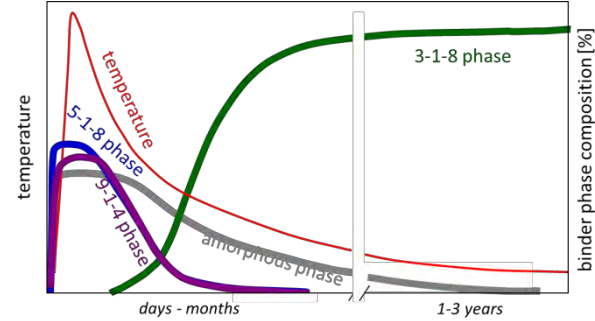


Temperaturabhängige Bindemittelphasenentwicklung

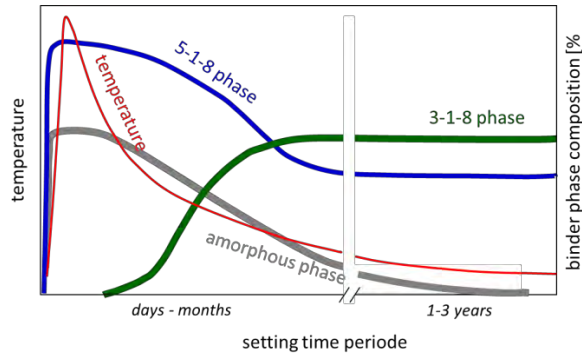
3-1-8 Rezeptur, $T_{max} < 90^\circ\text{C}$



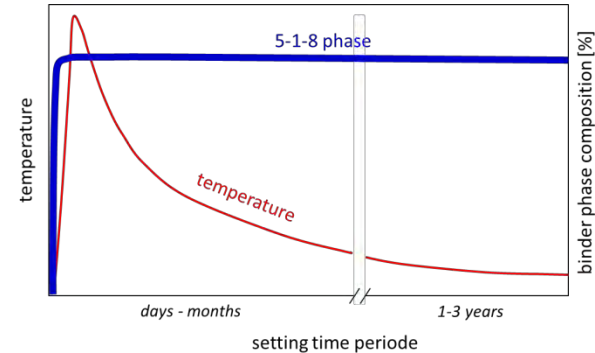
3-1-8 Rezeptur, $T_{max} > 90^\circ\text{C}$



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

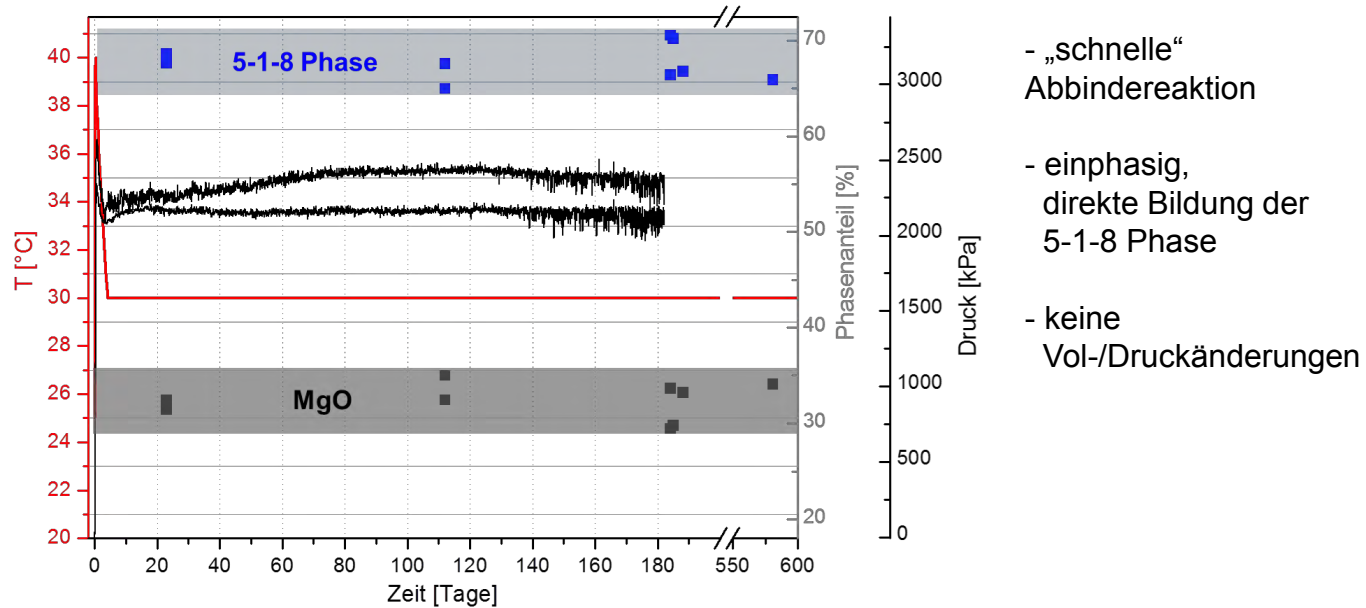


5-1-8 Rezeptur, $T_{max} < 90^\circ\text{C}$



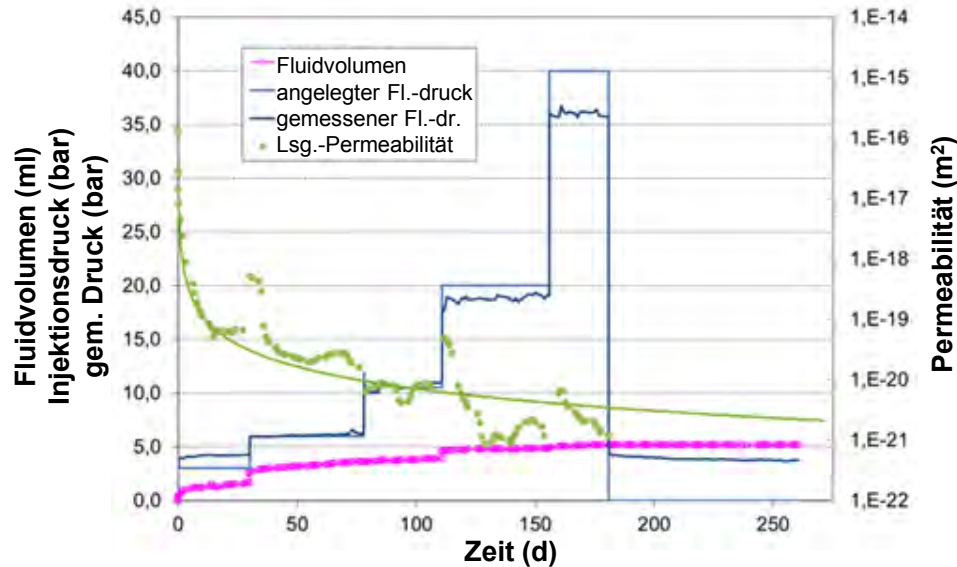
„5-1-8 Rezeptur“ Bindemittelphasenbildung beim Abbinden

Temperaturprofil Spritzbetonverarbeitung



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

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



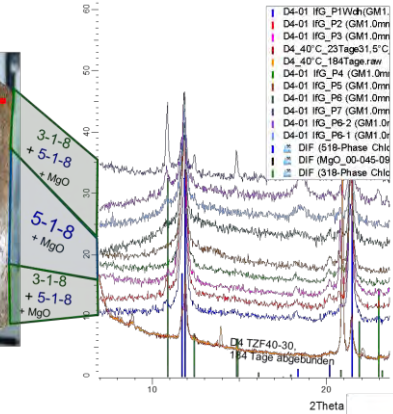
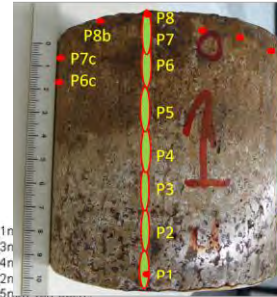
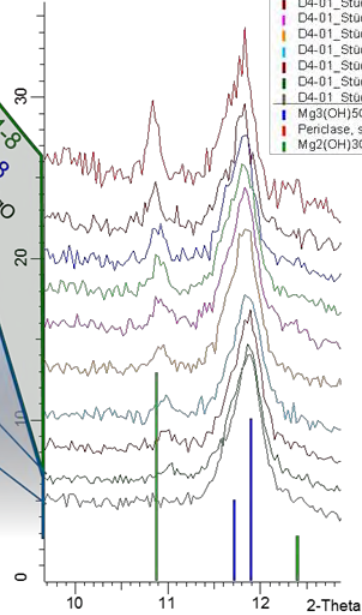
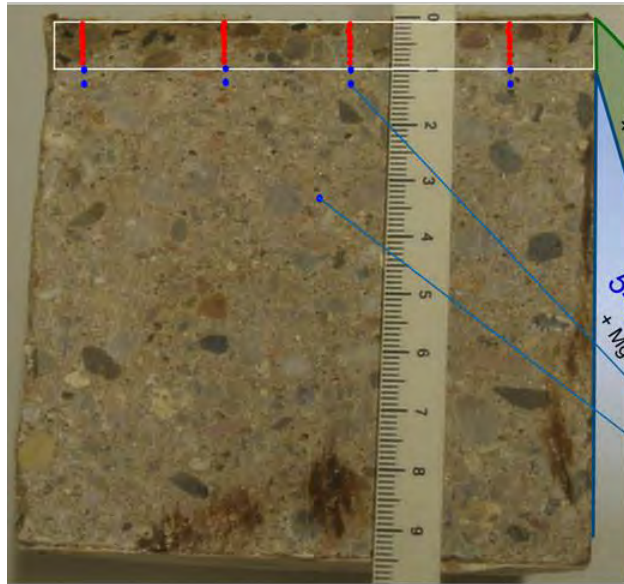
Versuchsanordnung für sekundären Lösungszutritt



Probezelle
 mit DMS
 $\varnothing = 100 \text{ mm}$
 Proben-h = 100 mm

5-1-8 Beton-Rezeptur

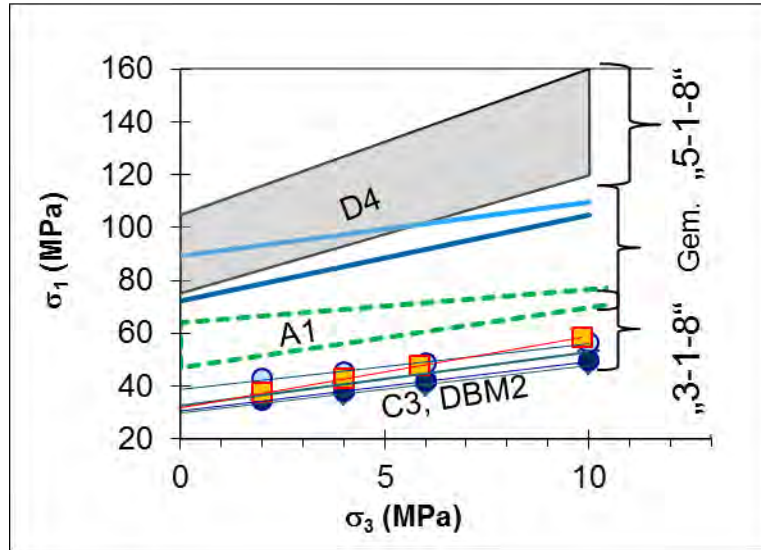
ortsaufgelöste Phasenanalyse



Mechanische Parameter



Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Untersuchung · Prüfung · Beratung · Begutachtung



MOHR-COULOMB-Diagramm

(Daten aus Mehrstufen-
Druckversuchen)

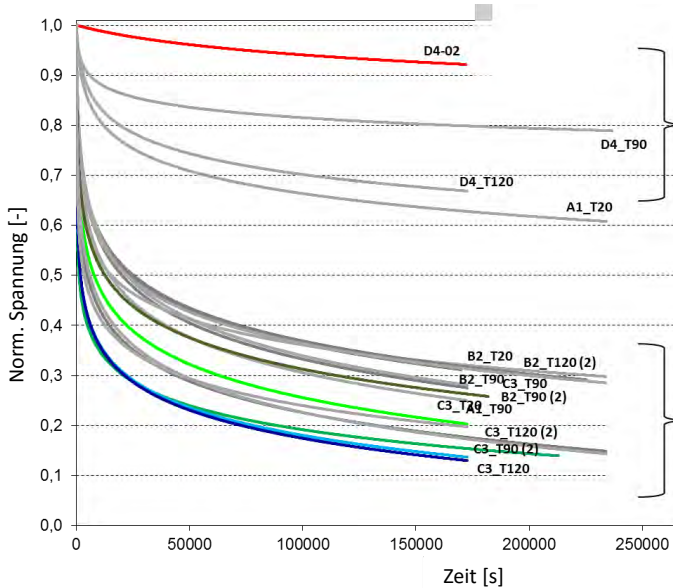
Axiale Spannung (s_1) vs.
Hauptspannung (Manteldruck) (s_3)

→ einaxiale Druckfestigkeit ($\sigma_3 = 0$)

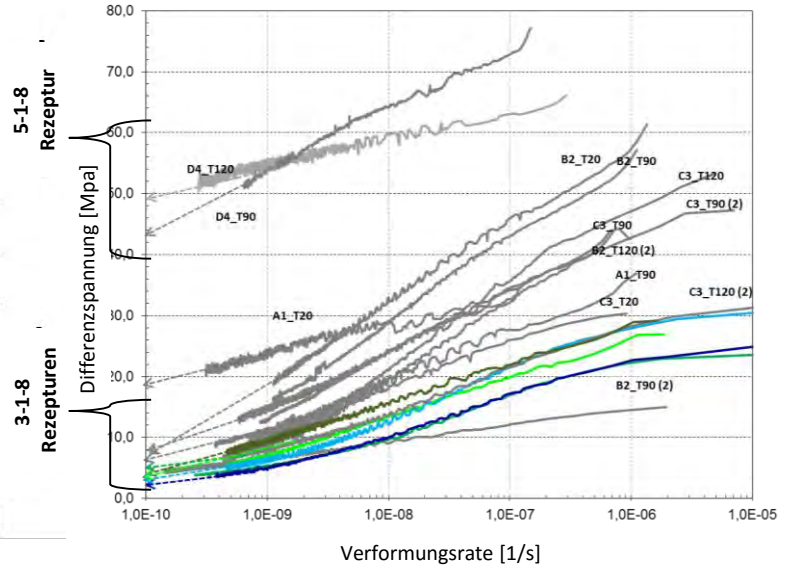
3-1-8 Rezepturen: 30 - 50 MPa

5-1-8 Rezepturen: > 80 MPa

Relaxations- und Kriechverhalten (Langzeitverhalten)

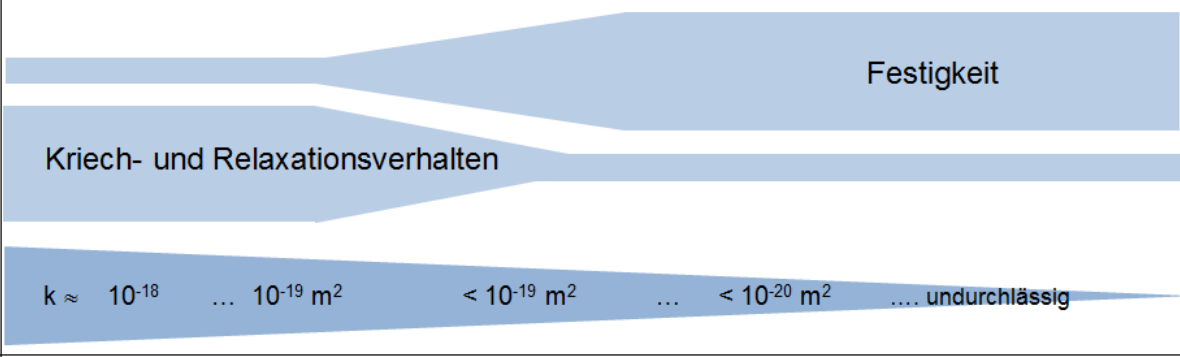


Triaxialer Verformungsversuch (def. Verf.-rate)
bis 80% der erreichten Festigkeit



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

Rezeptur-Eigenschafts-„Bild“ des Magnesiabaustoffs

<u>Rezepturtyp</u>	„3-1-8“			„5-1-8“	
<u>Zuordnung bekannter Rezepturen</u>	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				
<u>Zuschläge</u>	<p>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.</p> <p>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 (SiO₂), Anhydrit, Magnesit).</p>				



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

DE GRUYTER

Herbert Pöllmann (Ed.)

CEMENTITIOUS MATERIALS

COMPOSITION, PROPERTIES, APPLICATION

... planmäßige Erscheinung: Mai 2017

DE
GRUYTER

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

Artioli, Gilberto., Secco, M.

Role of hydroalcalite-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**



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

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



ein eher "weiches" Material

Magnesiabaustoff mit

Geochemische Eigenschaften
Langzeitbeständigkeit

3-1-8 Bindemittelphase



thermodynamisch
stabil (bis 80°C)

5-1-8 Bindemittelphase



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)

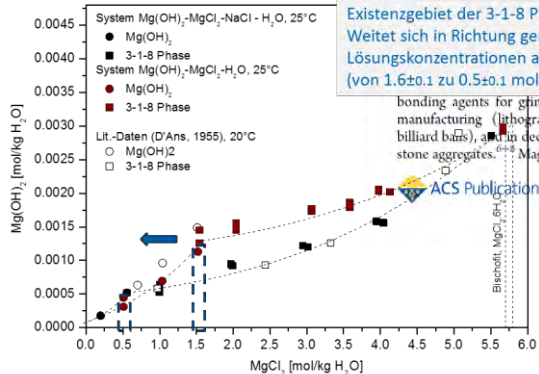
Modellierung von Lösegleichgewichten der Sorelphasen (25-60°C) in Gegenwart von Salzlösungen aktuell möglich!

Ionen-Wechselwirkungsmodell nach Pitzer (Aktivitätskoeffizientenmodell)

$$\frac{G^{ex}}{W_w \cdot RT} = \underbrace{f(I_m)}_{1. \text{ Term}} + \underbrace{\sum_i \sum_j \lambda_{ij} m_i m_j}_{2. \text{ Term}} + \underbrace{\sum_l \sum_j \sum_k \mu_{ljk} m_l m_j m_k}_{3. \text{ Term}}(I_m)$$

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

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



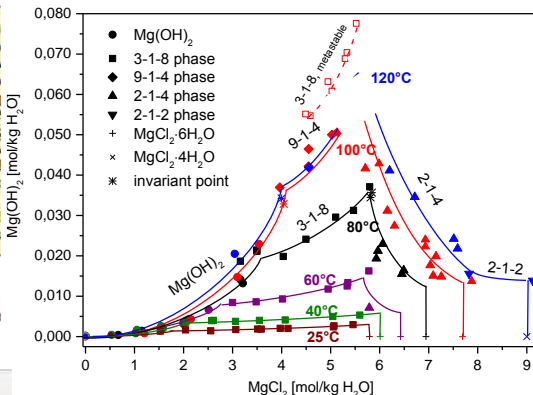
Existenzgebiet der 3-1-8 Phase
Weitet sich in Richtung geringerer MgCl₂
Lösungskonzentrationen aus
(von 1.6±0.1 zu 0.5±0.1 mol Mg²⁺/kg H₂O)!

is also used as bonding agents for grinding wheel production, artificial stone manufacturing (lithographic stone), as artificial ivory (e.g., billiard balls), and in decorative interior plasters with embedded stone aggregates. Magnesia cement is not resistant to water or

1. INTRODUCTION

The ternary system Mg(OH)₂-MgCl₂-H₂O

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. Long-term stability of magnesia building bearing media, a challenging demand on salt barrier construction material in salt



containing brines. The potential application of magnesia 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.6b00928
J. Chem. Eng. Data 2017, 62, 1384–1396

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

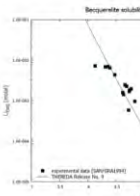
→ Baustoffrezepturen können gezielt für konkrete Anwendungen und Anforderungen an der Baustoff eingesetzt werden, detaillierten Fragestellungen kann gezielt nachgegangen werden!

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

... Implementierung in THEREDA kann erfolgen!



The screenshot shows the THEREDA website interface. On the left is a navigation menu with items like 'Startseite', 'Projekt', 'Datenabfrage', 'Daten-Darstellung', 'Dokumente', 'Forum', 'Links', 'DBControl', 'Referenzen Upload', 'Images Upload', 'Neuerschein', 'Meine Daten', 'Aktuell sind 13 Güte und 2 Mitglieder online', 'Hallo Freya', and 'Abmelden'. The main content area includes a 'WILLKOMMEN BEI THEREDA' section with a description of the database, a 'NEWS: ZEHNTE UND ELFTE DATENREIHE' section with dates and chemical formulas, and a 'PROJEKTFÖRDERUNG' section with logos of funding organizations like the Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, and Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.



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
Schachtverschlussysteme für die
Schachtanlage Asse II (ESA)

Aktuelle Untersuchungen der Dichtfunktion zementbasierter Baustoffe bei Durchströmung mit salinärer Lösung

Kyra Jantschik, Oliver Czaikowski

03. Mai 2017

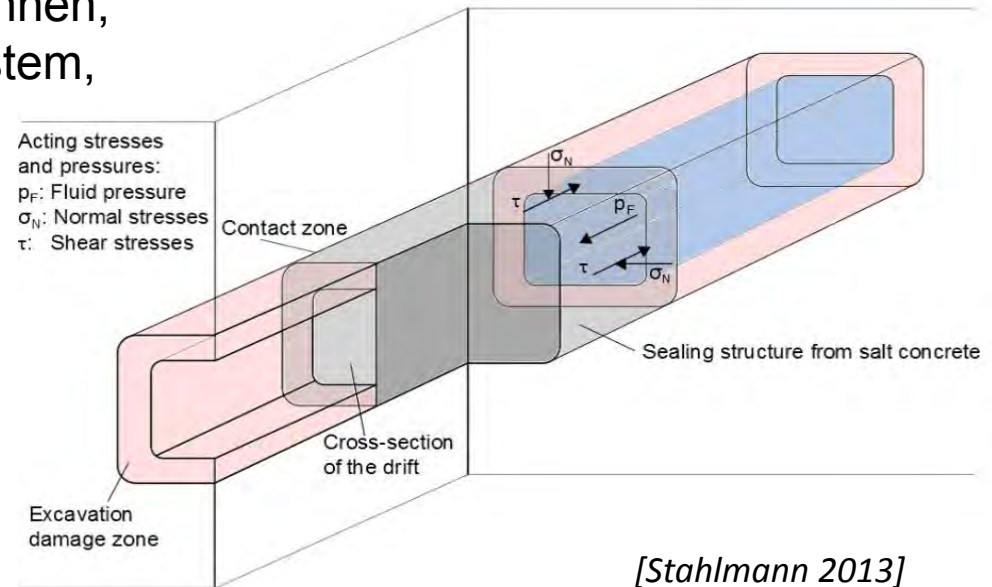
Fachgespräch Verschlusssysteme 2017

Inhalt

- Motivation / Ziele
- Verfügbares Probenmaterial
- Laborexperimente
 - Geochemische Experimente
 - CHM-gekoppelte Experimente
- Zusammenfassung und Ausblick
- Danksagung

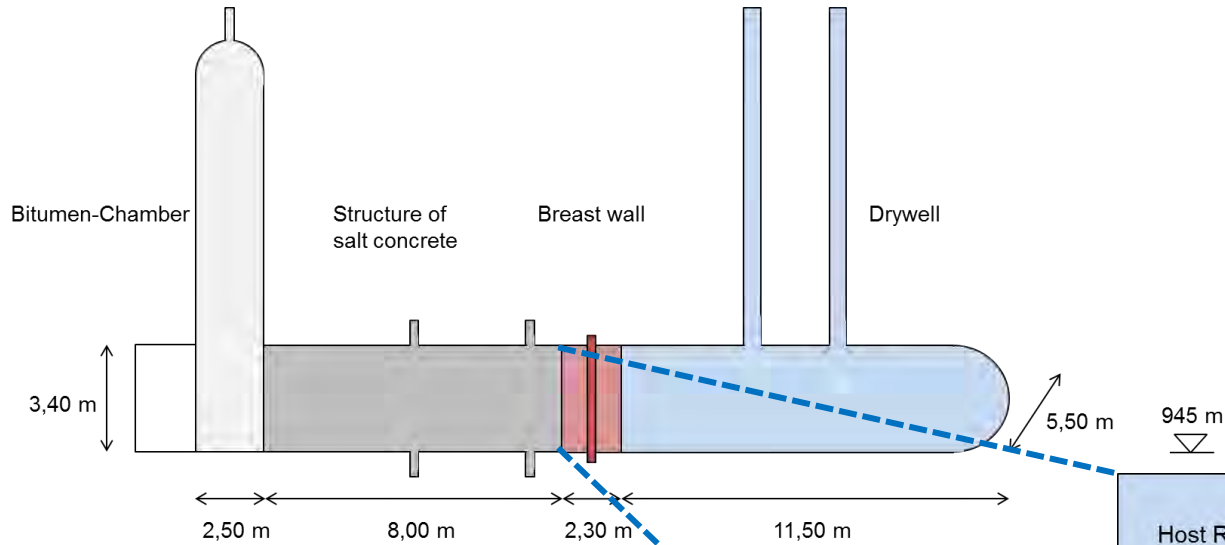
Motivation / Ziele

- Um die Dichtfunktion eines Abdichtelements beurteilen zu können, muss das gesamte Verschlussystem, bestehend aus
 - Verschlussmaterial
 - Kontaktzone und
 - Auflockerungszone berücksichtigt werden.



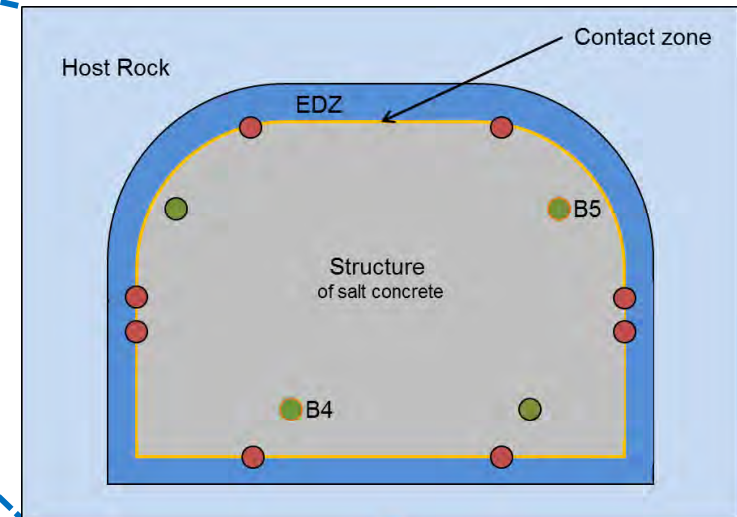
- Im Rahmen der Vorhaben LAVA-2 und LASA-EDZ wurden
 - geochemische Versuche, zur Untersuchung der Korrosionsverhaltens von Salzbeton und
 - CHM-gekoppelte Untersuchungen zur Untersuchung der Dichtfunktion eines Abdichtelements bei Durchströmung mit salinaren Lösungen durchgeführt.

Verfügbares Probenmaterial für Laboruntersuchungen I



Verschlussbauwerk

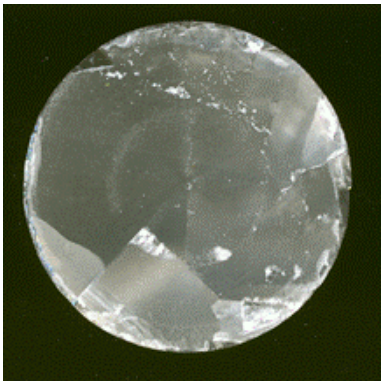
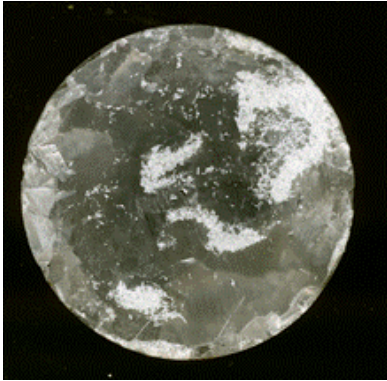
- Errichtet auf der 945 m Sohle
- Fertigstellung: 1992
- Probenahme: 2003
- Material: Salzbeton
- Länge: 8,0 m, Tiefe: 5,5 m, Höhe: 3,4 m



- Borehole in the structure
- Borehole in the contact zone
- GRS specimens

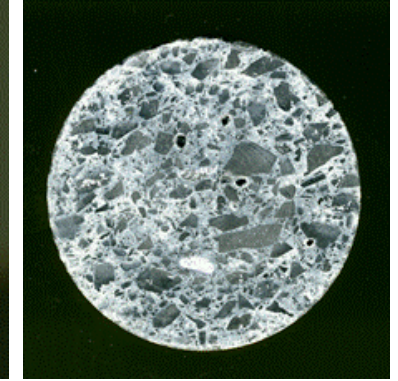
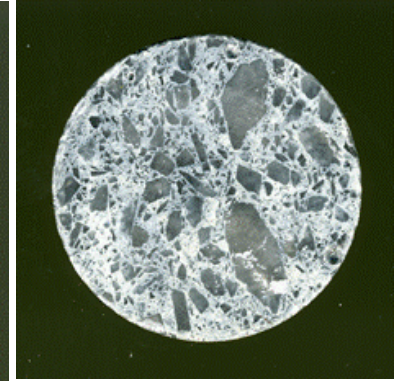
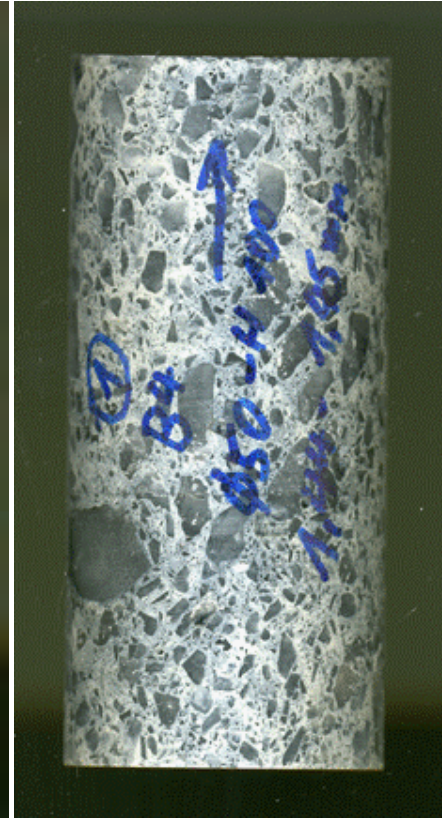
Verfügbares Probenmaterial für Laboruntersuchungen II

Steinsalz



Entnommen aus der Auflockerungszone
(EDZ)

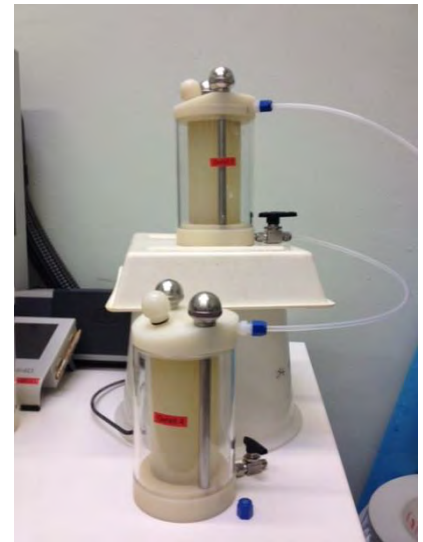
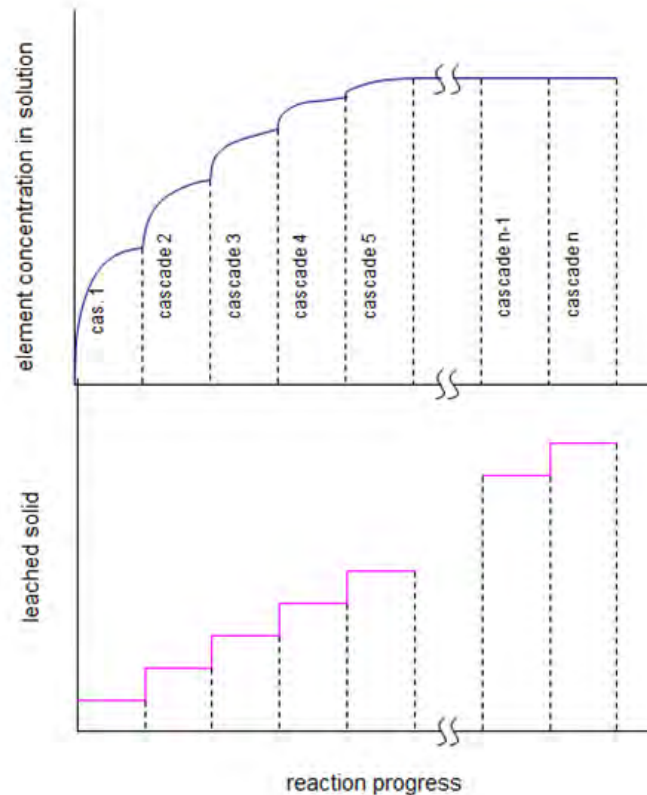
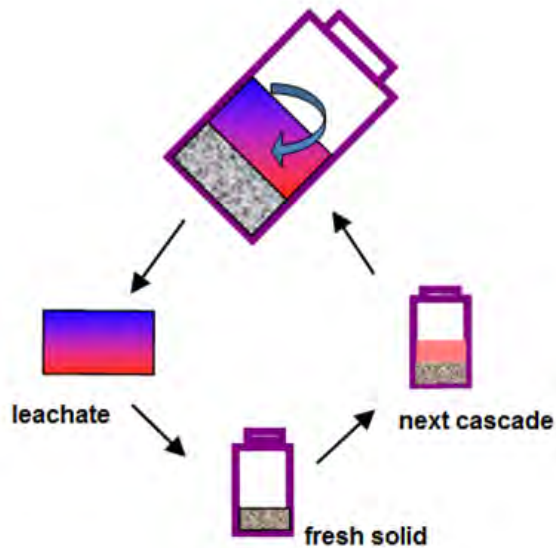
Salzbeton



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

Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment

Funktionsprinzip

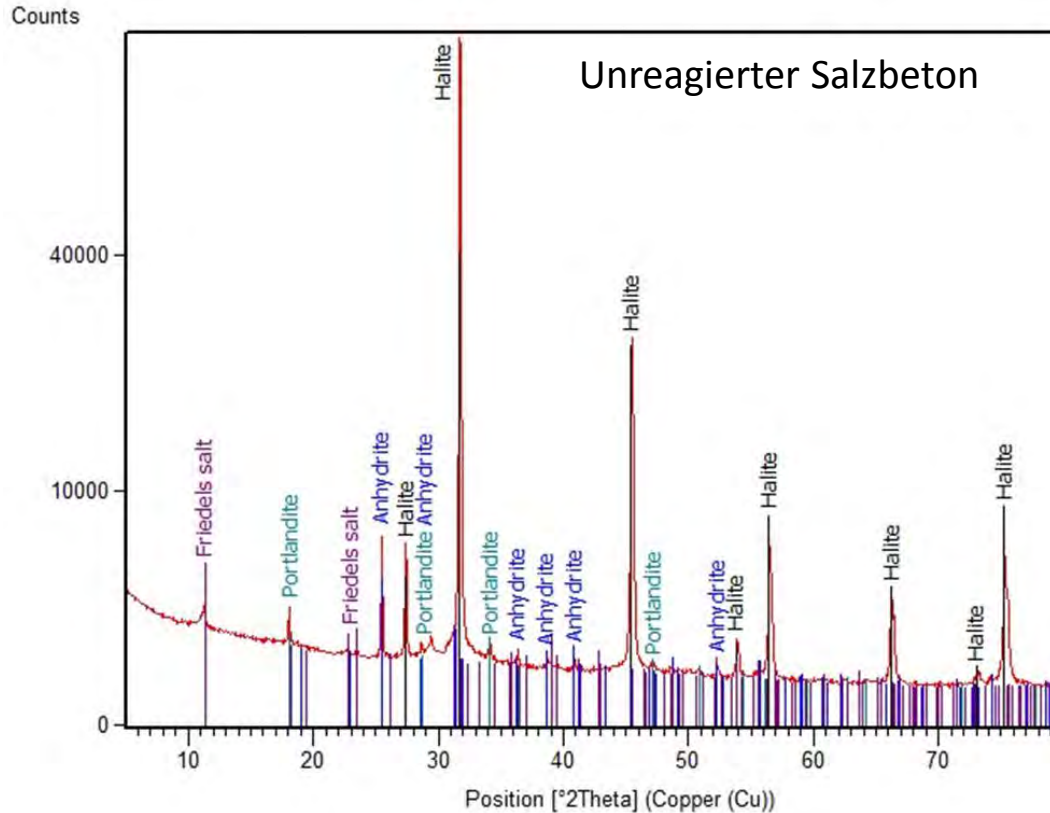


- Feststoff und saline Lösung werden in definierten Verhältnis gemischt und über festgelegten Zeitraum reagieren gelassen
- Am Ende der Kaskade werden Feststoff und Lösung separiert
- Zu der abfiltrierten, bereits reagierten Lösung wird neuer Feststoff hinzugegeben und das Gemisch erneut reagieren gelassen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

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

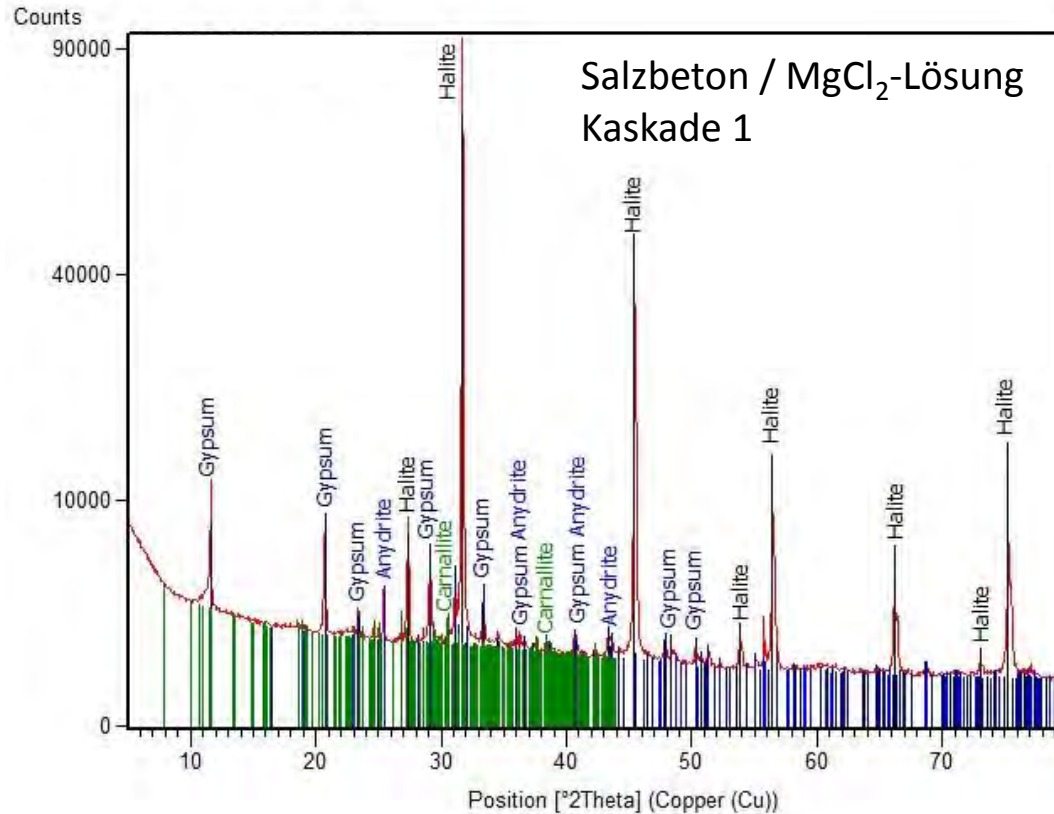
Als neue Phasen bilden sich

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

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

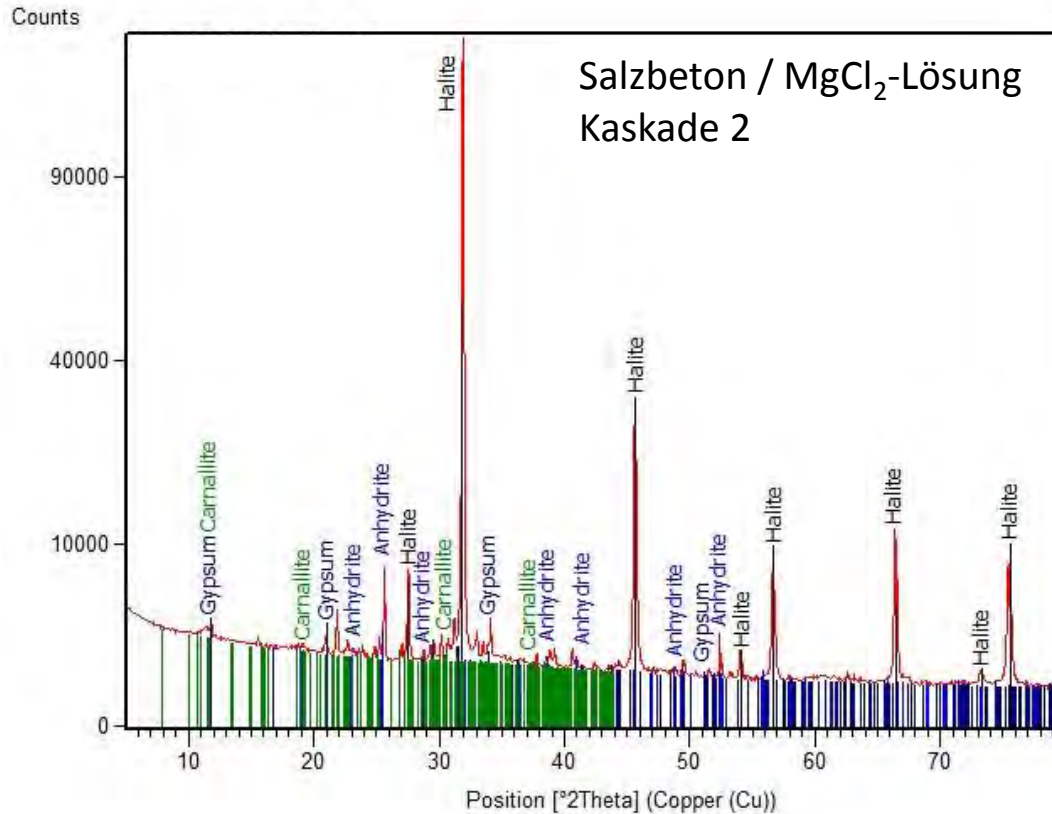
Als neue Phasen bilden sich

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

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

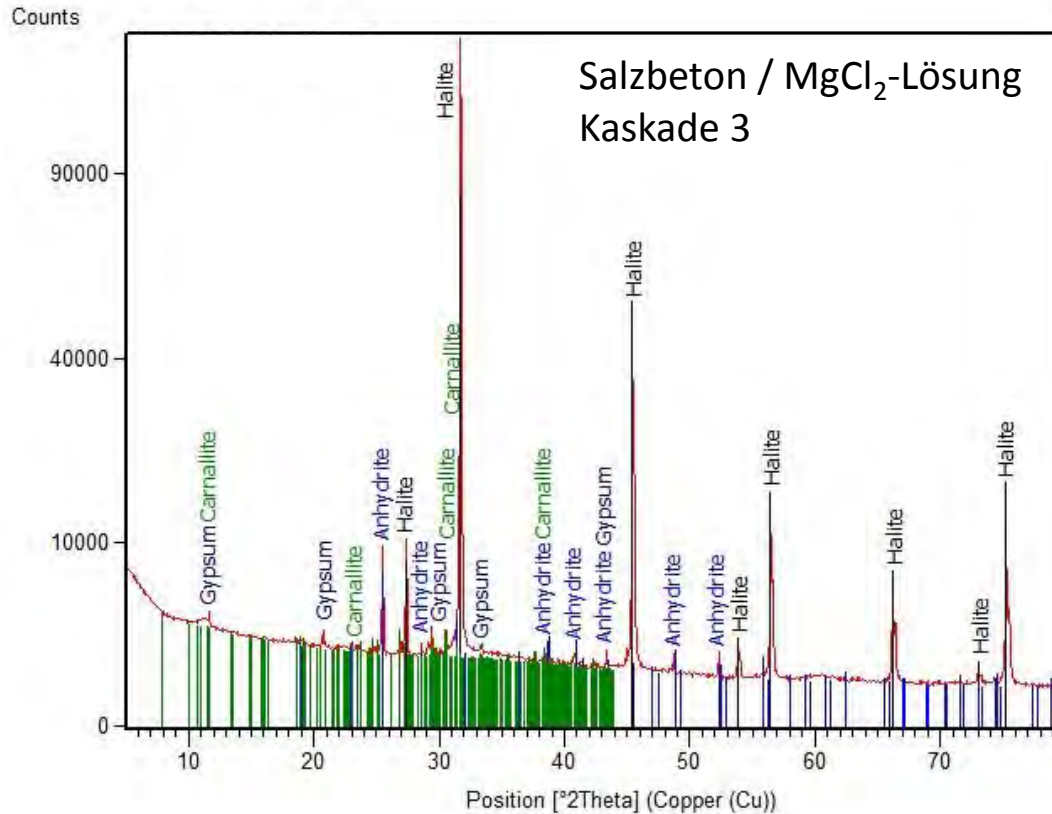
Als neue Phasen bilden sich

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

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

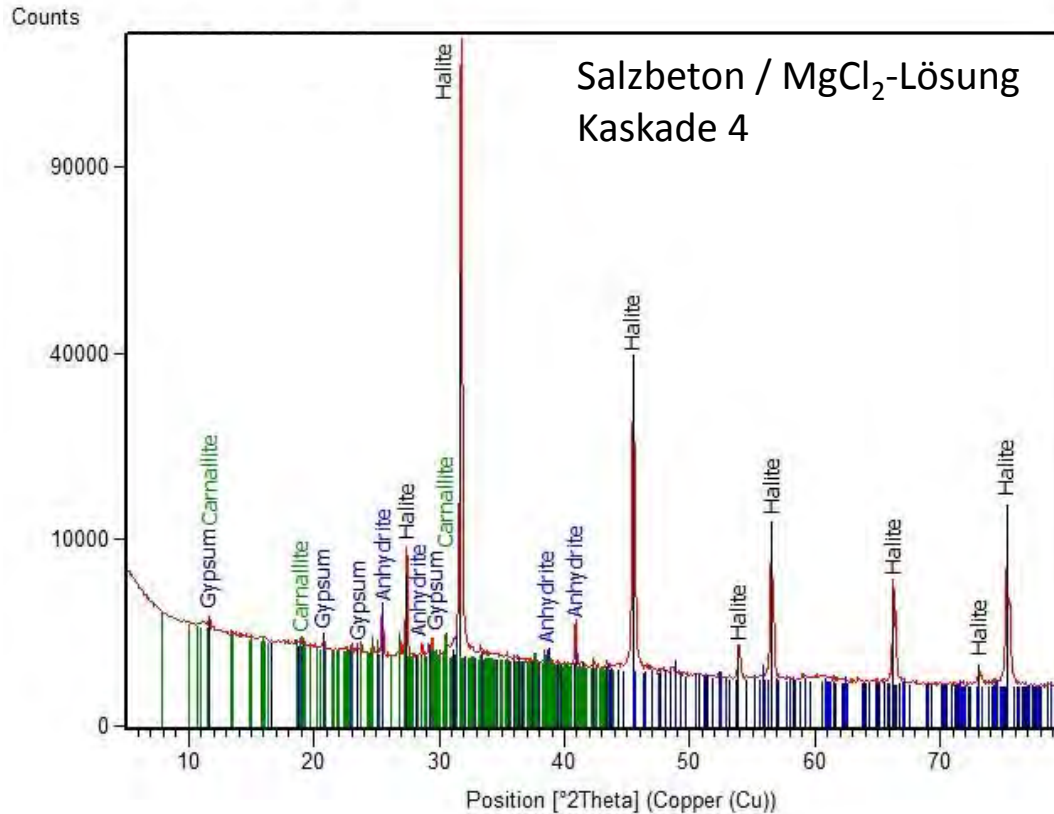
Als neue Phasen bilden sich

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

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

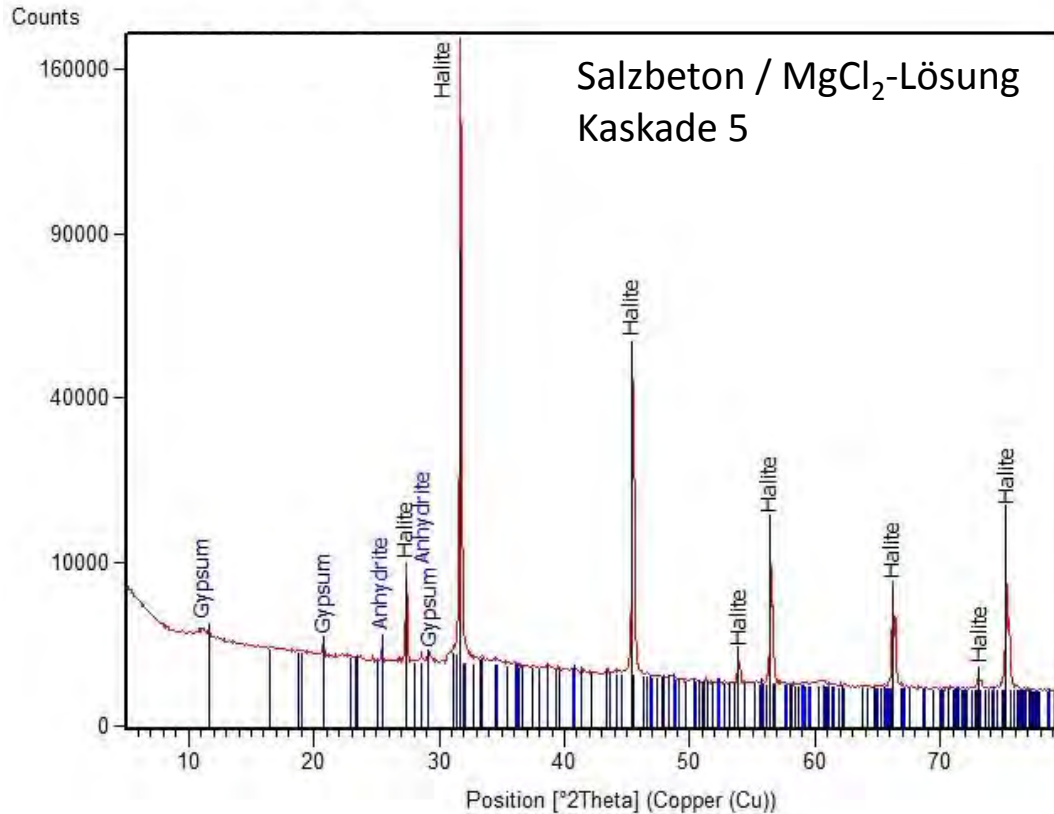
Als neue Phasen bilden sich

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

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

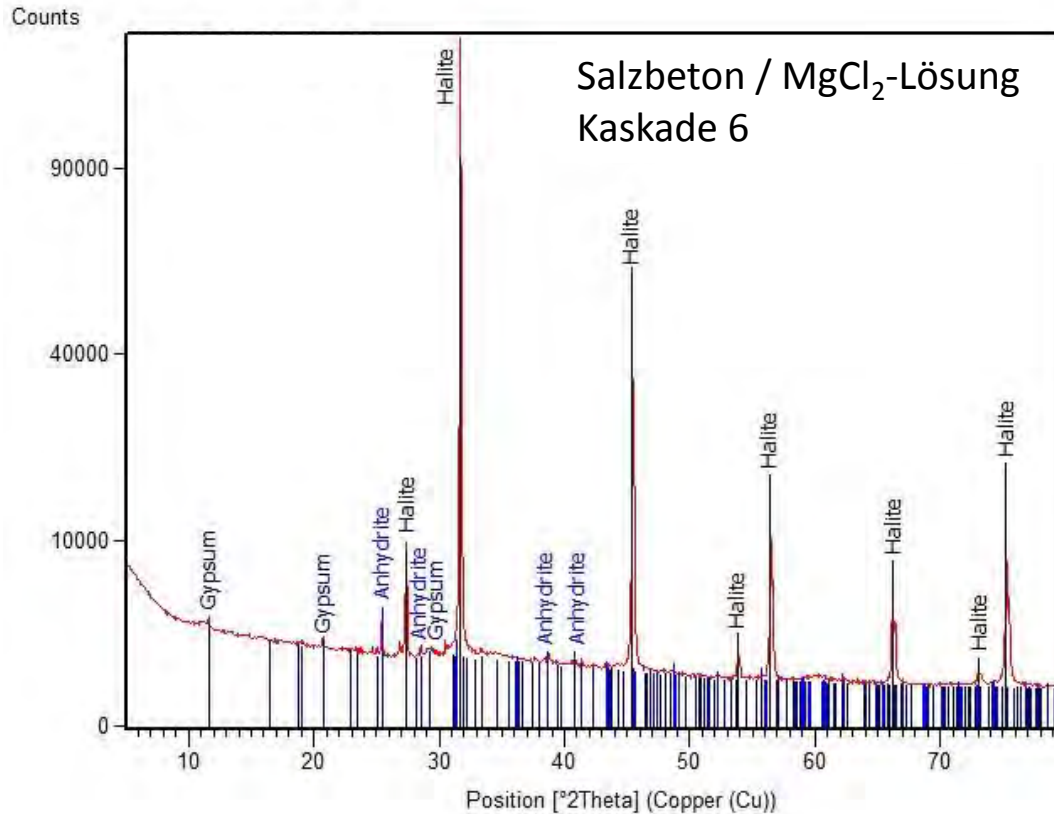
Als neue Phasen bilden sich

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

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

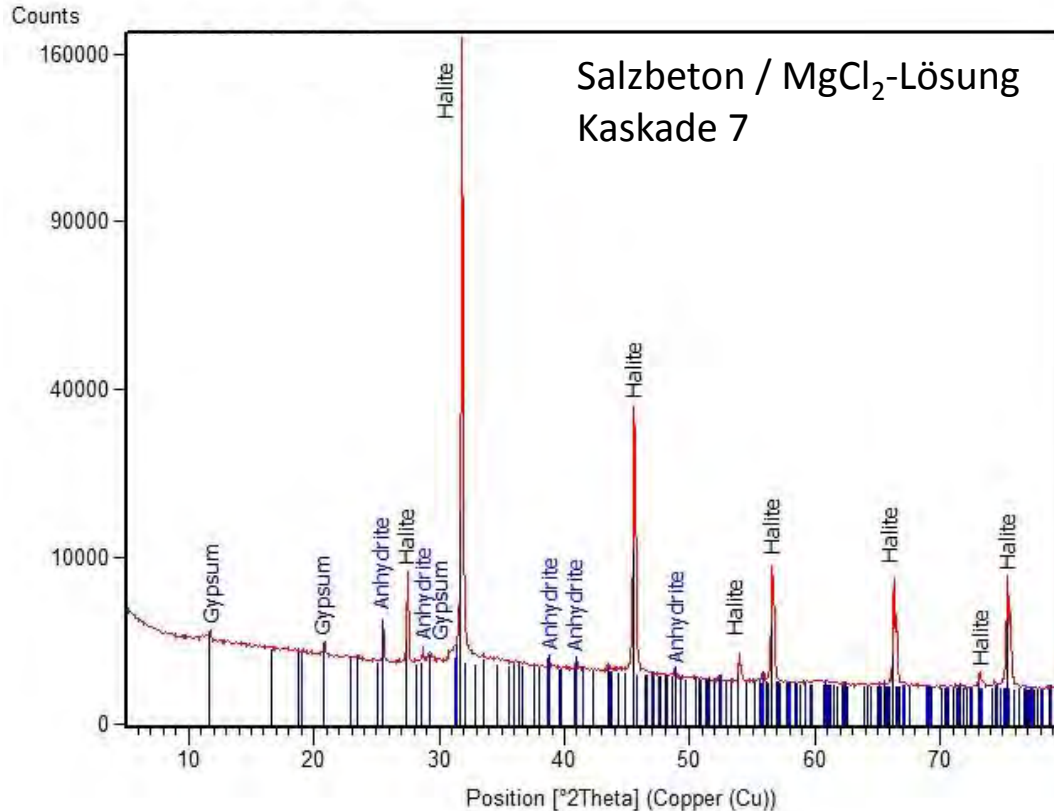
Als neue Phasen bilden sich

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

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

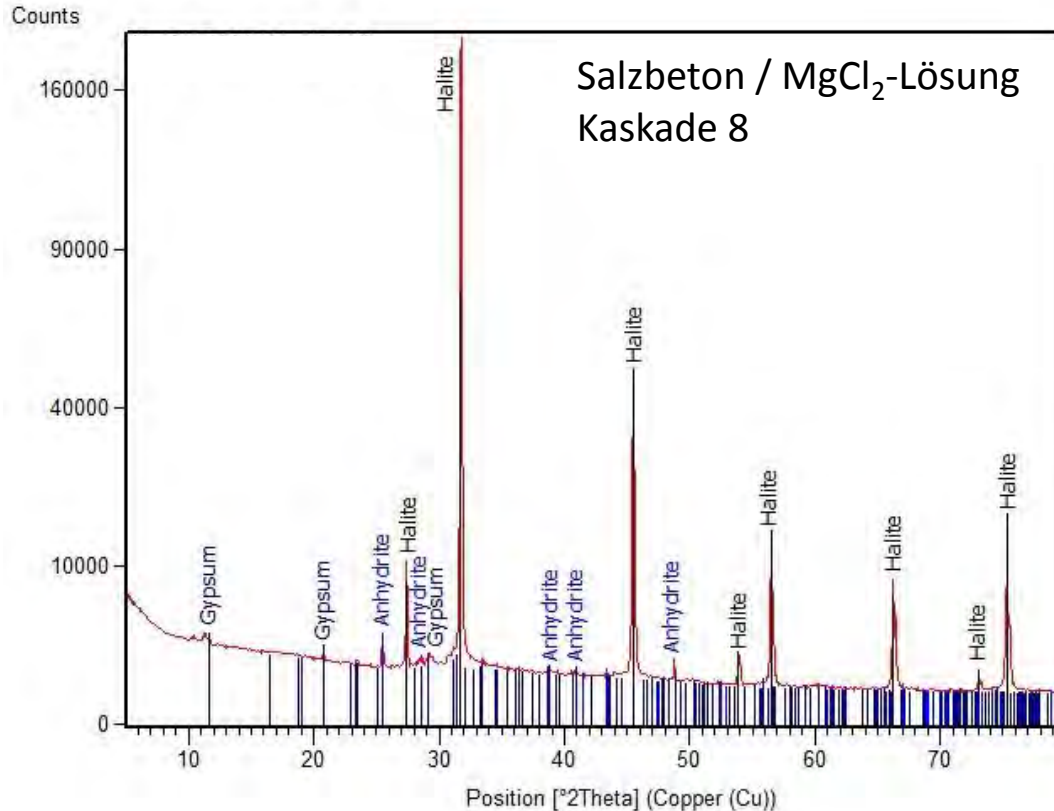
Als neue Phasen bilden sich

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

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

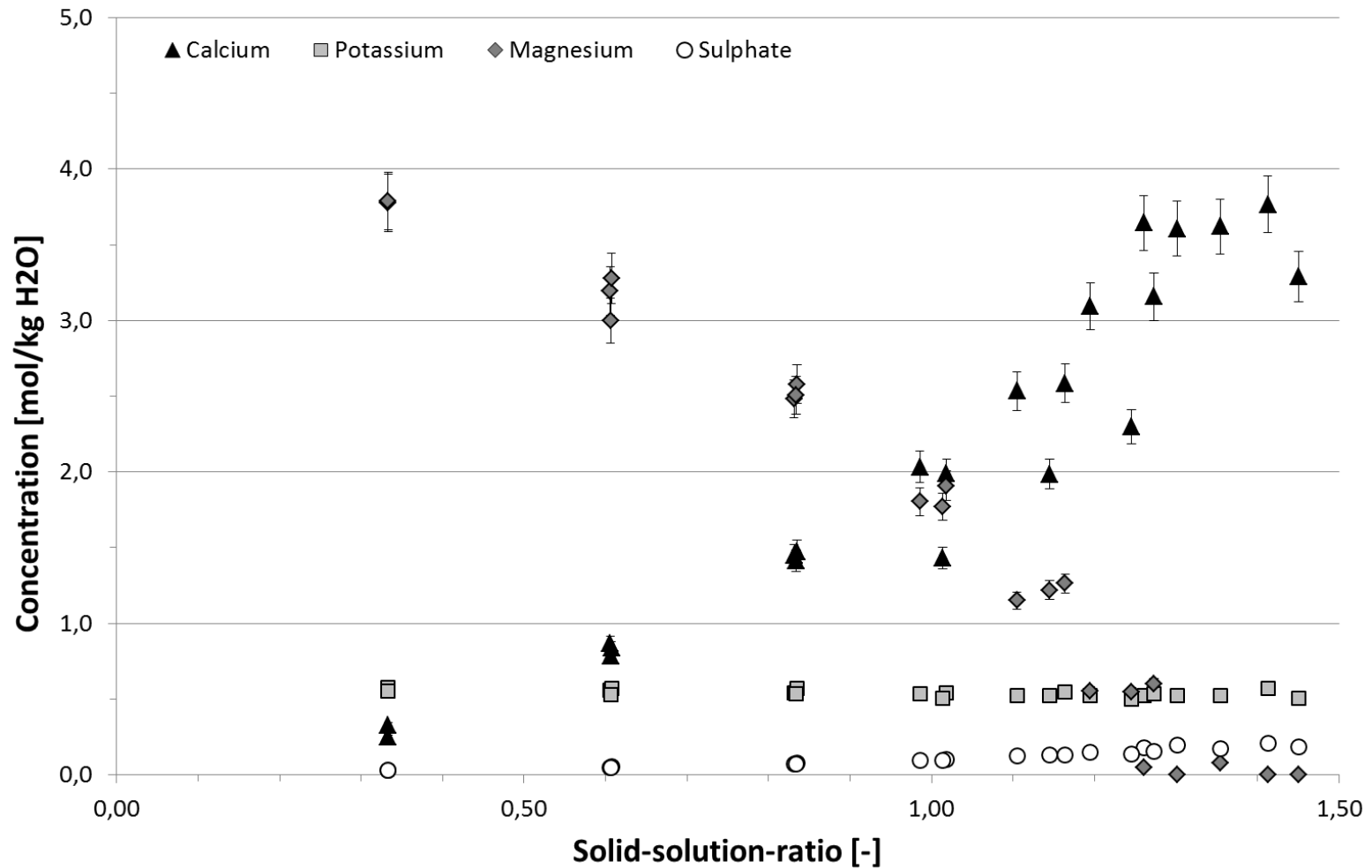
- Friedelsches Salz und
- Portlandit auf

Als neue Phasen bilden sich

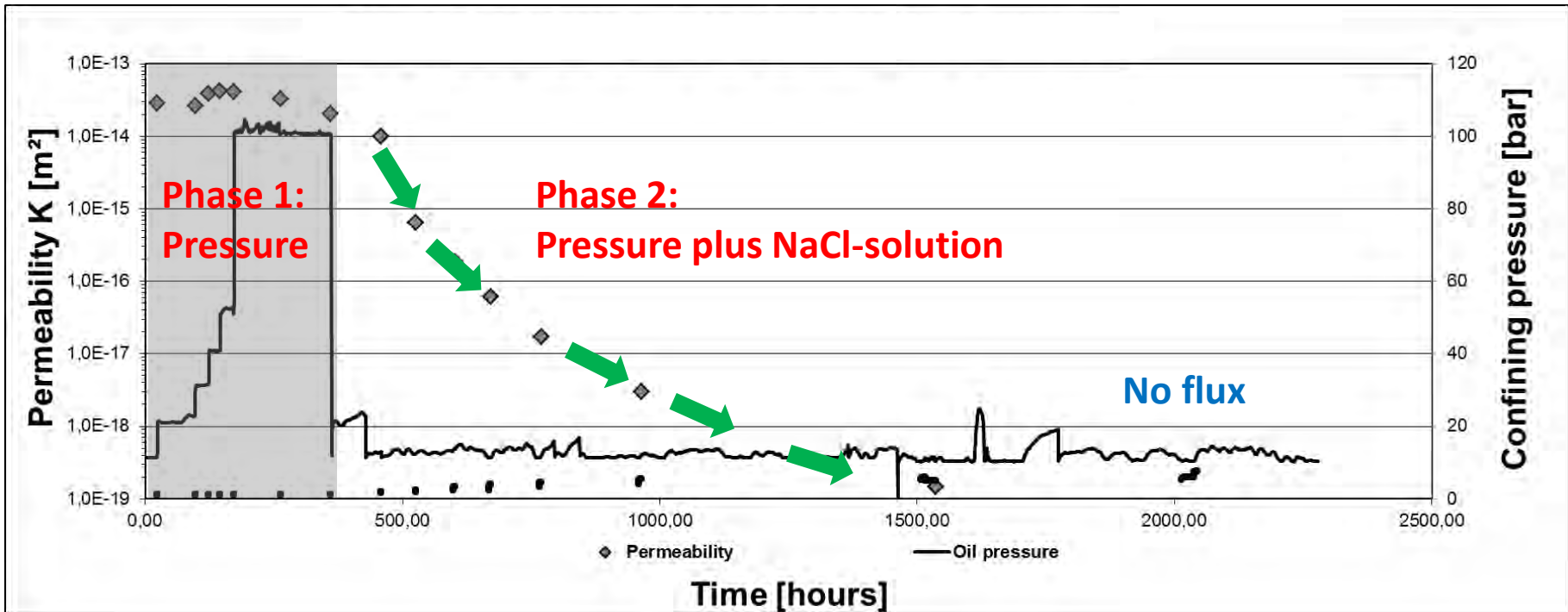
- Carnallit (Kaskade 1-4)
- Gips (Kaskade 1-8)

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

Lösungsanalyse:

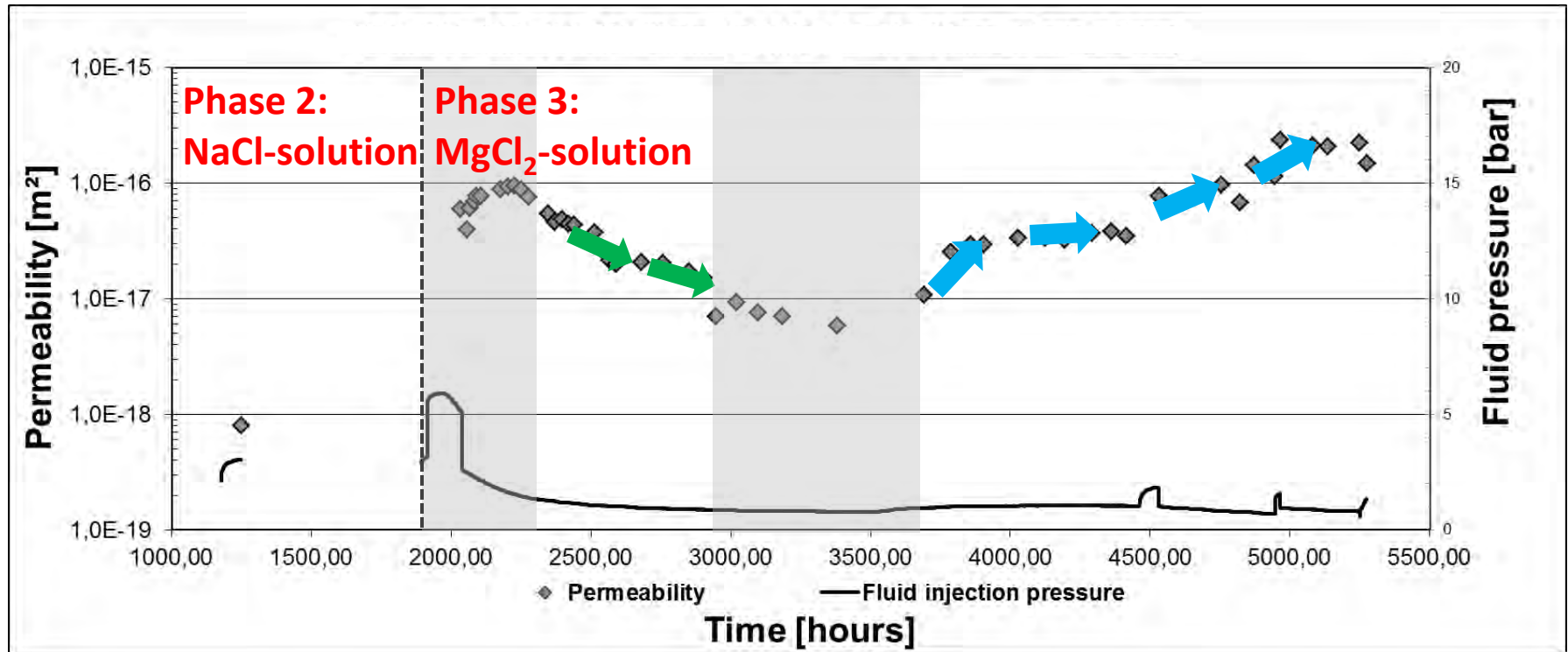


Hydraulisch-chemisch-mechanisch gekoppelte Experimente I



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

Zusammenfassung

Geochemische Experimente

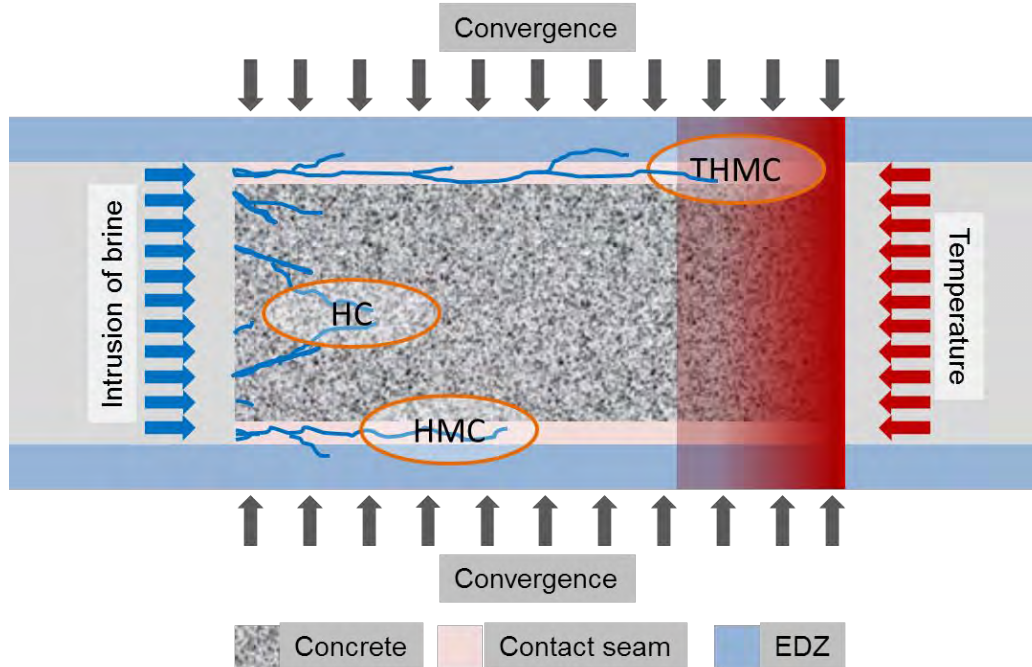
- $MgCl_2$ -Lösung korrodiert den Salzbeton
 - CSH-Phasen werden aufgelöst
 - Formation von MSH-Phasen

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

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



- Vorhabensskizze THyMeCZ

Danksagung

Vielen Dank

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



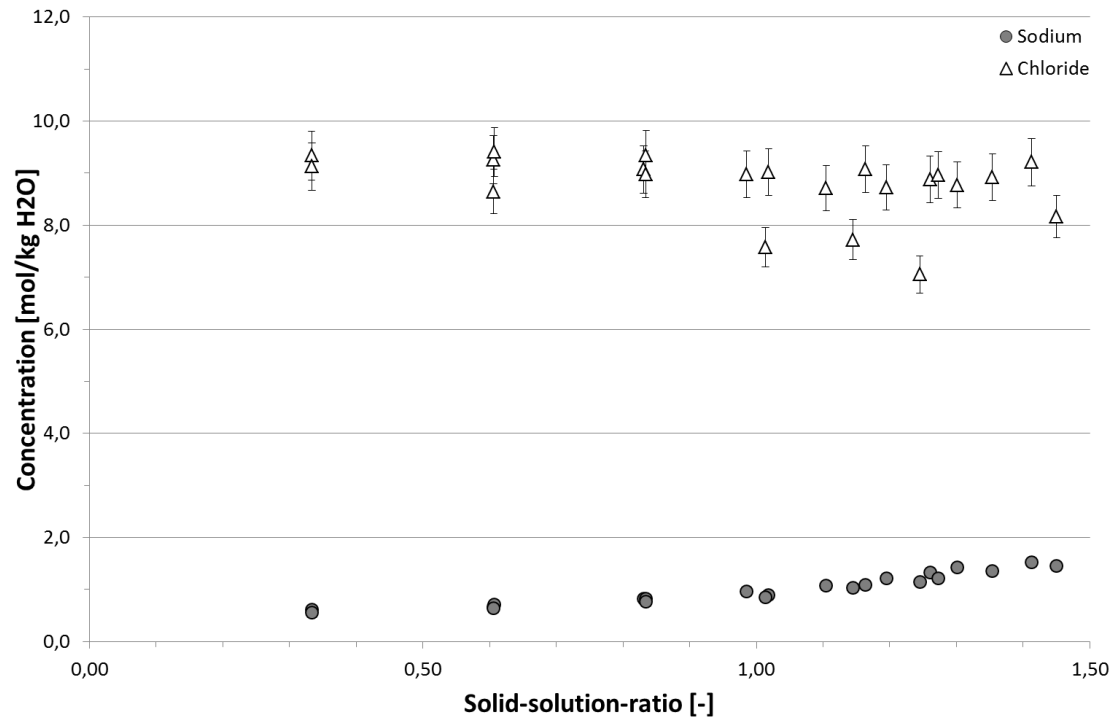
PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Anhang

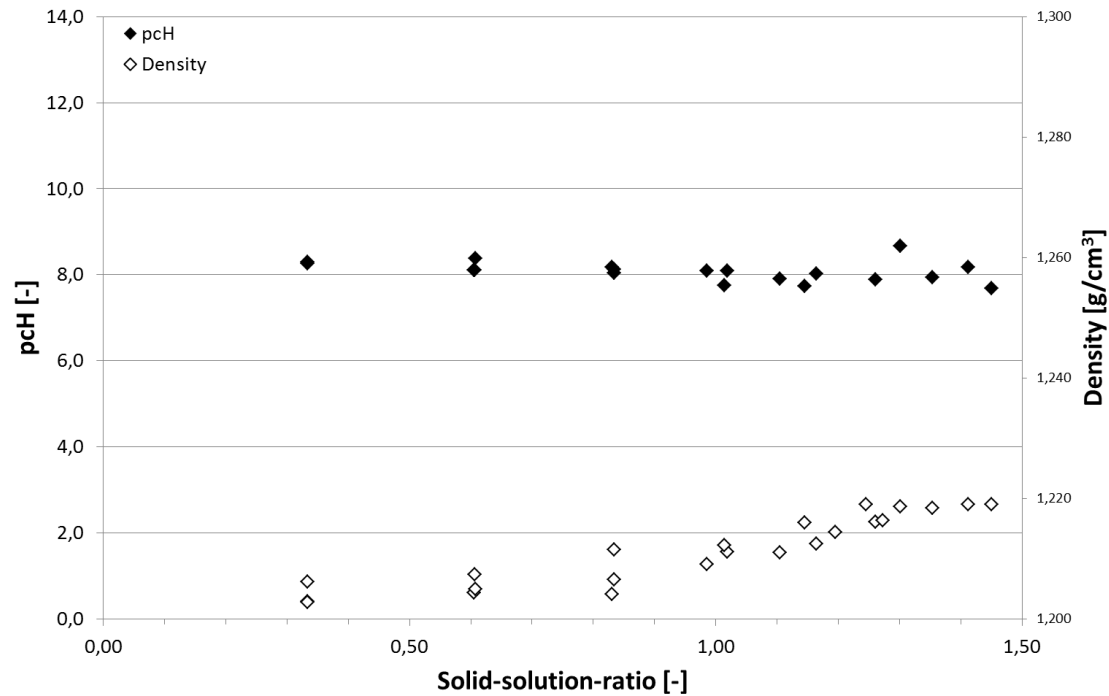
Geochemische Untersuchungen – GRS Kaskadenexperiment Reaktion Salzbeton – $MgCl_2$ -Lösung

Lösungsanalyse Chlorid und Natrium:



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

Dichte und pcH-Wert:





TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

Research • Testing • Consulting • Expertise

MgO-SEAL – Verhalten von MgO-Spritzbeton bei Angriff von $MgCl_2$ -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

Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV

Teil 2: Erprobung von Funktionselementen

Abschlussbericht

Projektleitung: Prof. Dr. P. Knoll (1.11.2004 bis 31.12.2007)
Dipl.-Ing. M. FINDER und Prof. Dr. W. Kudla (1.1.2008 bis 30.6.2010)

Direkte FuE-Partner:

- TU Bergakademie Freiberg:
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Institut für Anorganische Chemie
- Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig
- Kali-Umweltechnik GmbH, Sondershausen
- Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik, Wilsnack & Partner, Freiberg

Partner für forschungsbezogene bergbauliche Arbeiten:

- TS Bau GmbH, Jena

BMBF – Förderkennzeichen: 02C1204

Laufzeit: 01.11.2004 bis 30.06.2010

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02C1204 gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei dem Autoren.

Teutschenthal – 31. Dezember 2010

Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs

Relationship between geochemical and geomechanical properties of magnesia building material

FKZ 02E10880

Geleitet durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund einer Beschlussvorlage des Deutschen Bundestages

Projektlaufzeit: 01.12.2010 – 30.09.2014

**Abschlussbericht
Final Report**

Daniela Freyer
Matthias Gruner
Till Popp

Juli 2015

Endlagerforschung

Fachgespräch

"Verschlusssysteme – In-situ-Bauwerke aus Magnesiabaustoff und dessen chemisch-mechanische Eigenschaften im Hinblick auf HAW-Endlager"

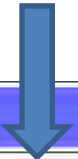
Freiberg, 28.-29.04.2015

- Materialienband -

Projekträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)

- 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

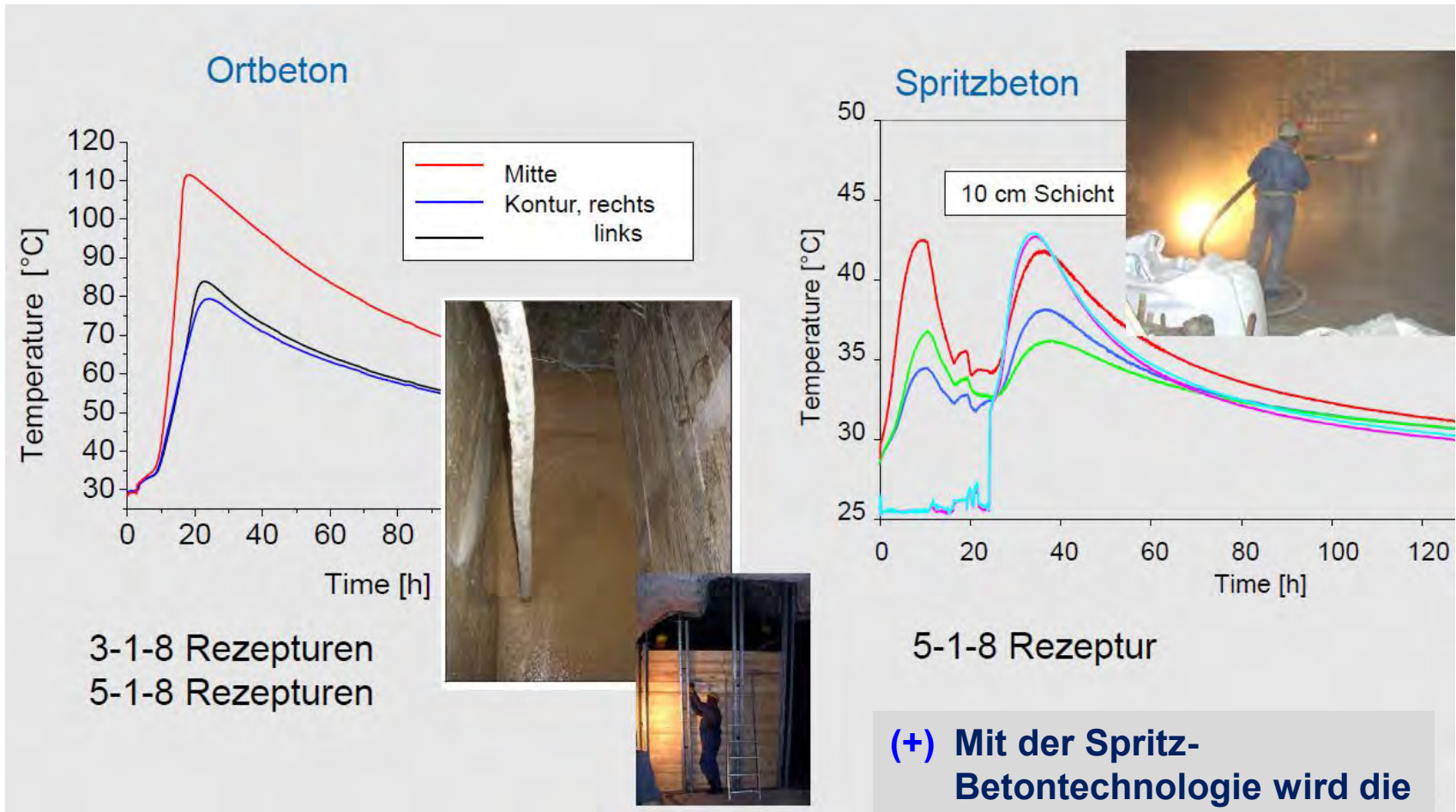
MgO-Beton: Rezepturtypen



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	Festigkeit			
	Kriechverhalten, Relaxieren			
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

Temperaturverlauf im MgO-Baustoff - Vergleich Ortbeton - Spritzbeton

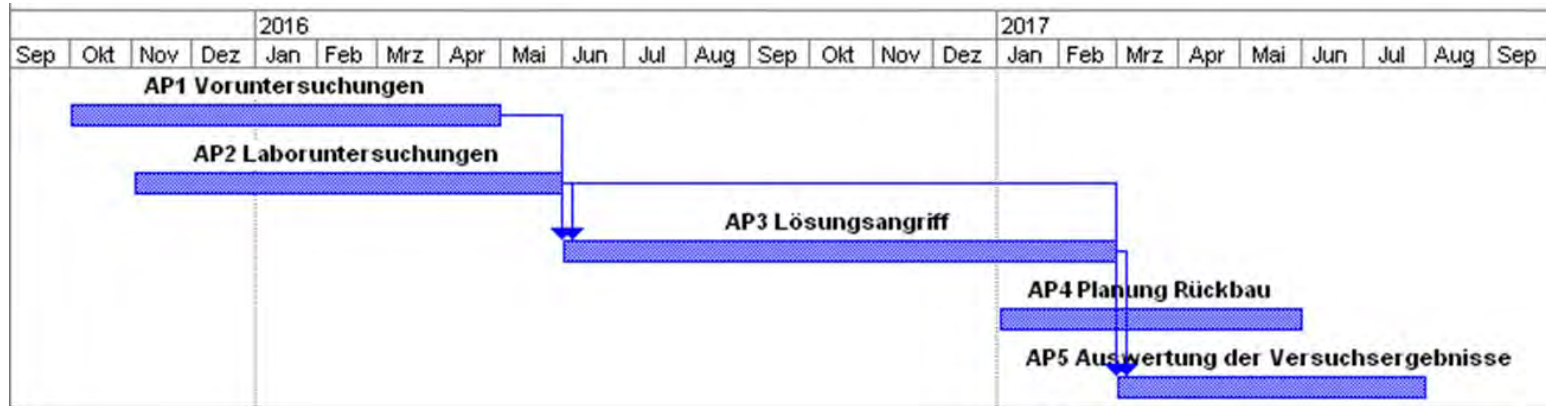


(+) Mit der Spritz-Betontechnologie wird die Temperaturproblematik deutlich reduziert!

Ziele des Vorhabens MgO-SEAL

- Zustand des MgO-Spitzbeton-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

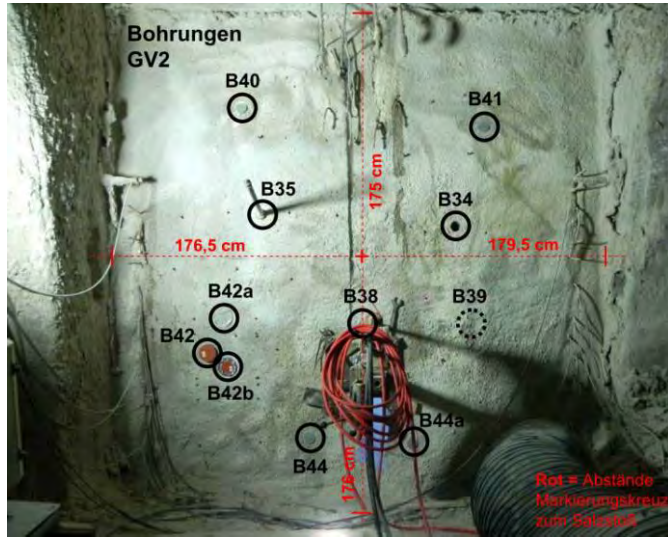


Projektpartner:

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

Anpassung Arbeitsprogramm

- Einwirkung von Lösung auf den Baustoff



MgCl₂-CaCl₂-Lösung (Tachyhydrit-stabil):

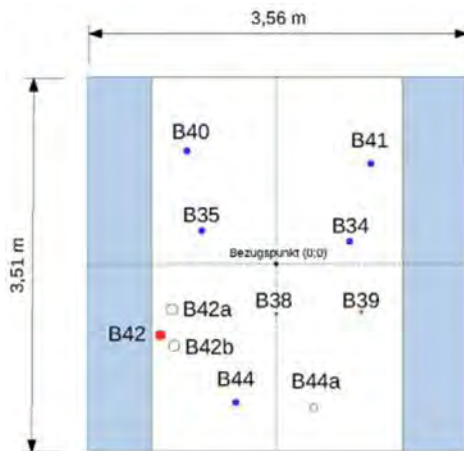
- B34 (Fortsetzung - IBeWa)
- B44 (zuerst Gaspermeabilität - IBeWa)
- Druckkammer (integrale effektive Permeabilität $k_{\text{Gas}} = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$)

Endlager-relevante Lösung (NaCl + Mg²⁺)

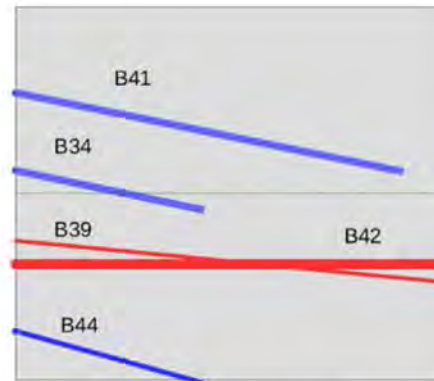
- B35 (zuerst Gaspermeabilität - IBeWa)
- B40 (zuerst Gaspermeabilität - IBeWa)
- B38 (zuerst Gaspermeabilität - IfG)

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) |

In situ Untersuchungen des MgO-Spritzbetons

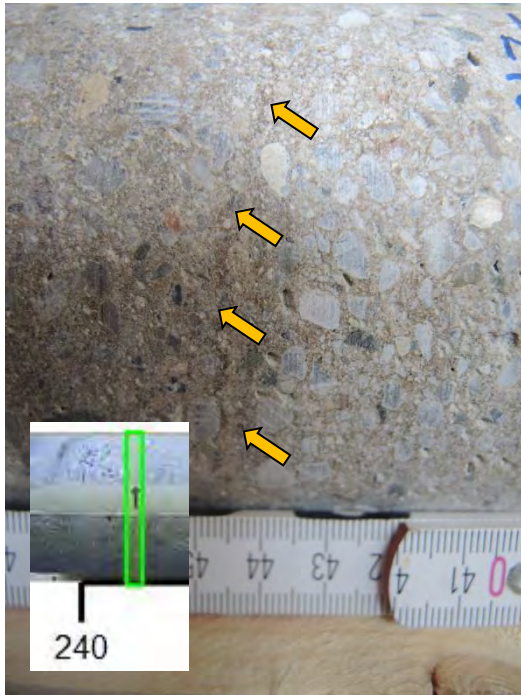


In situ Permeabilitätsmessungen (IBeWa, IfG) direkt im MgO-Spritzbeton

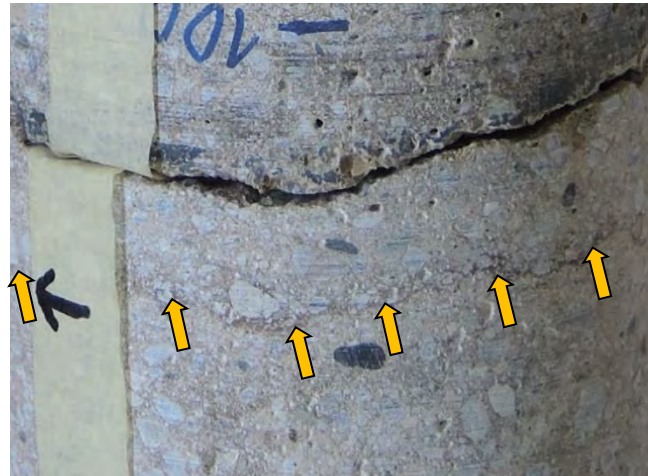


Pumpanlage zur Druckbeaufschlagung des GV2

Detailaufnahmen an Bohrkernen (D = 100 mm)



Betonierabschnittsgrenze
2,43 m



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

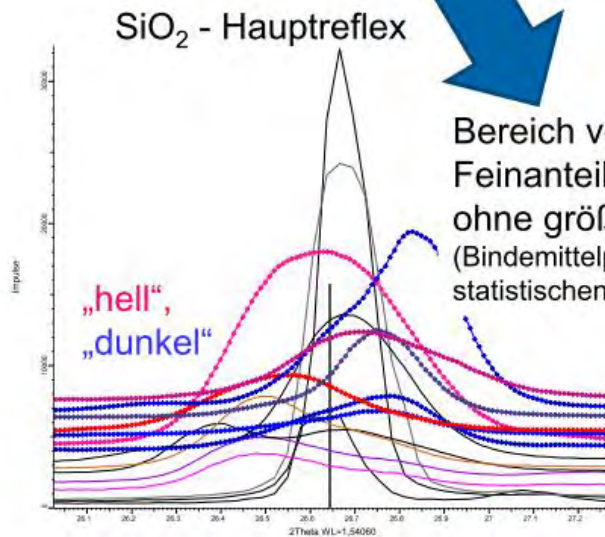


Poren an Betonierabschnittsgrenze
0,33 m

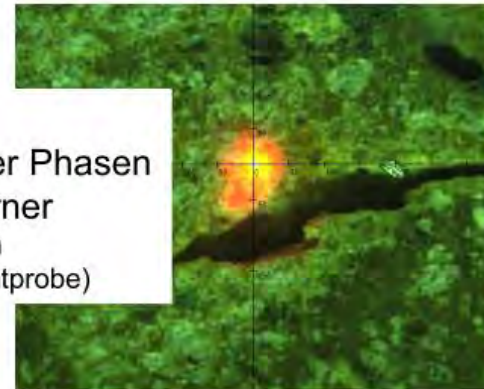
Abrißfläche an Betonierabschnittsgrenze
0,46 m



Untersuchungen an Bohrkernen - Phasenanalyse an Schwächezonen



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



Zugfestigkeit an BAG's

11 Betonierabschnitte



B42C
9 Kernstücke



HZV1



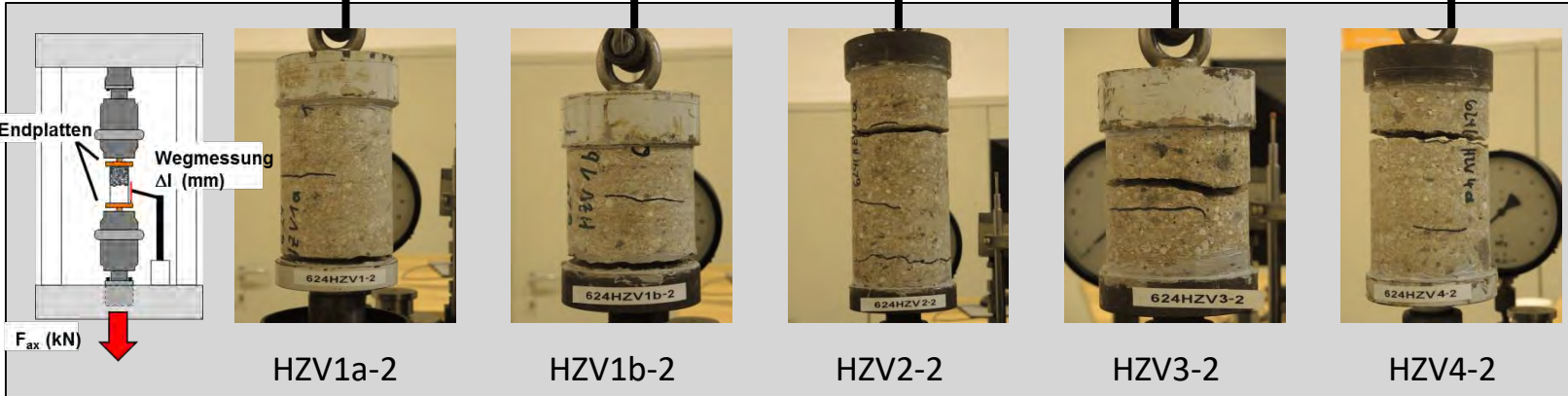
HZV2



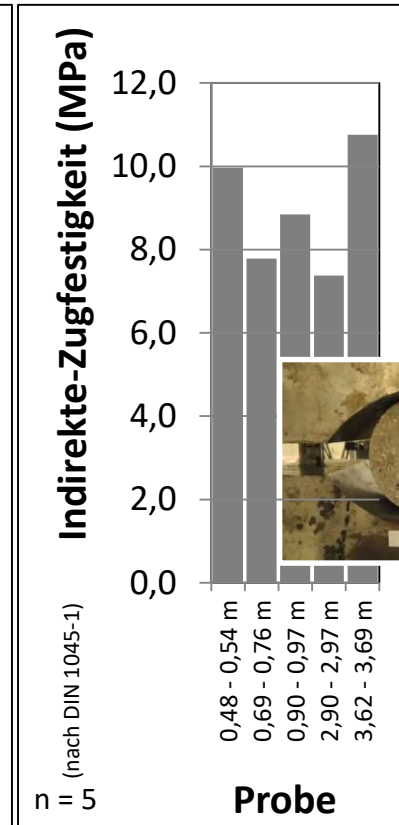
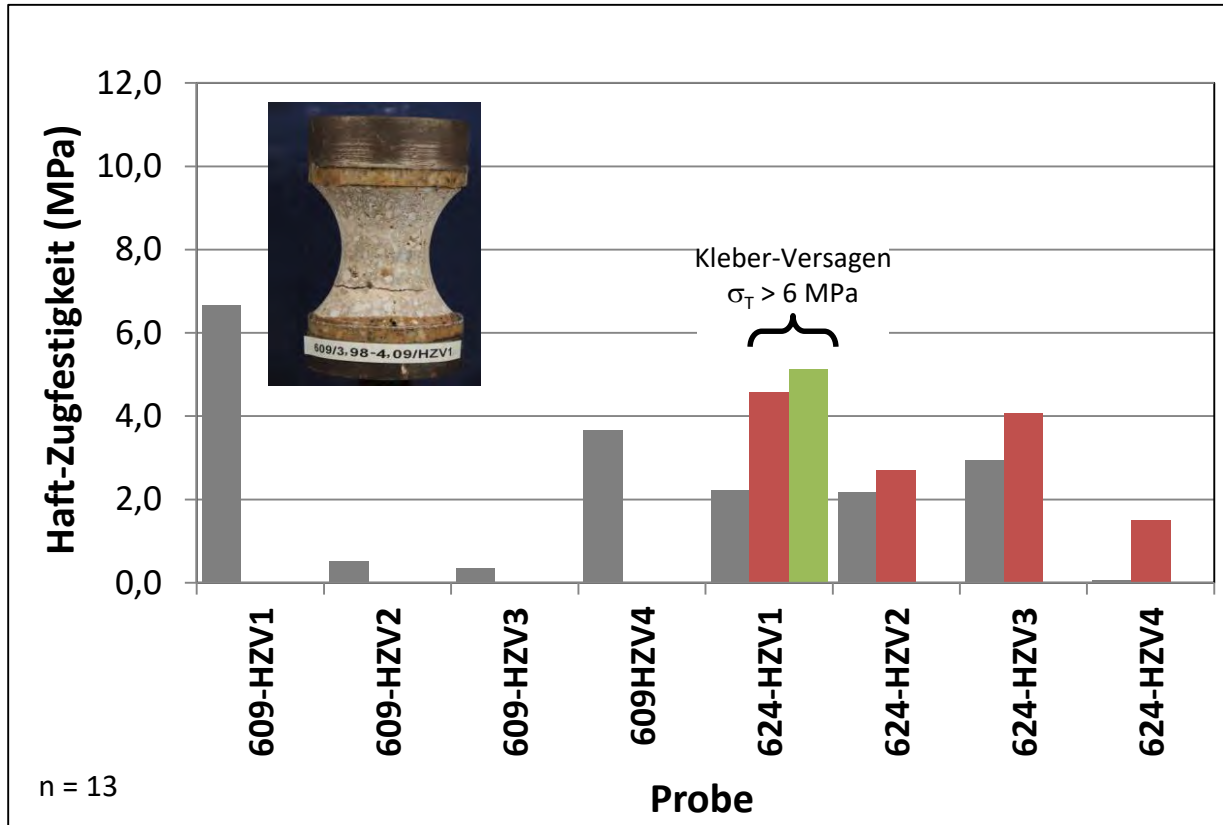
HZV3



HZV4



Zugfestigkeit an BAG's

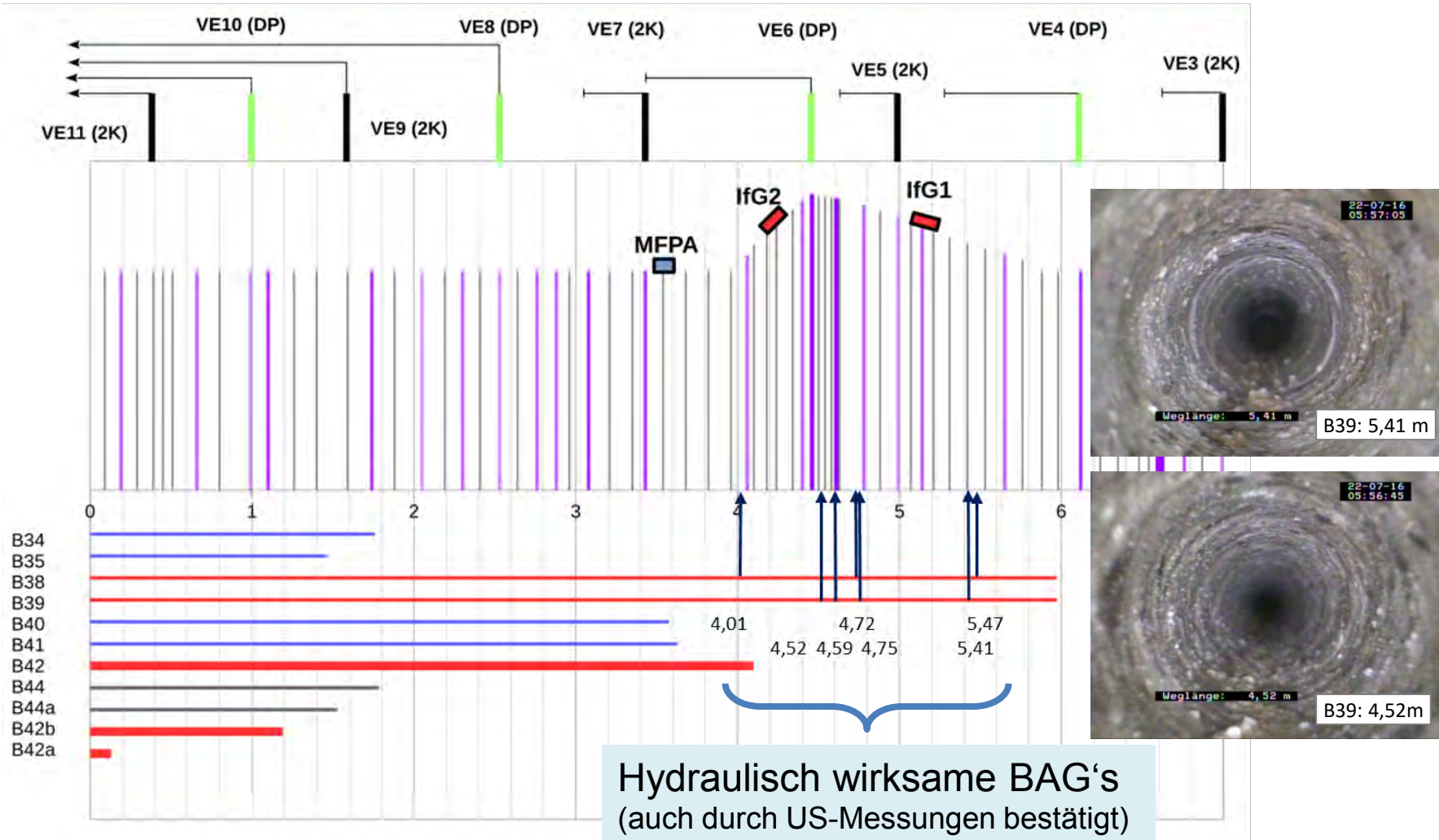


- SB-Matrixfestigkeiten sind hoch: $\sigma_{TMA} = 9,0 \pm 1,5 \text{ MPa}$
- BAG's weisen geringere Festigkeiten auf: $\sigma_{TBA} = 2,8 \pm 2,0 \text{ MPa}$

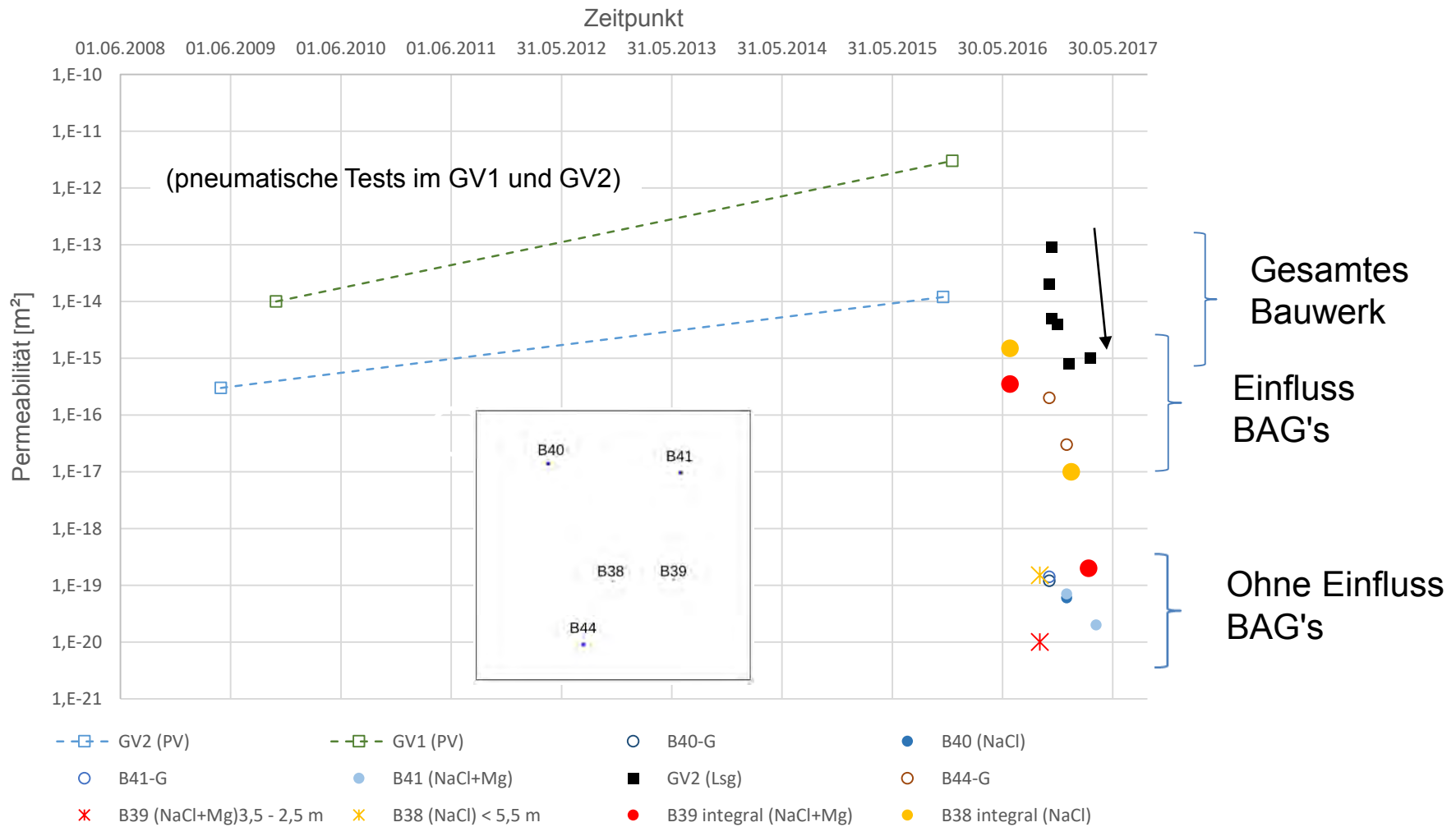
Lage der Schwachstellen (BAG's)

Verpressdrücke:

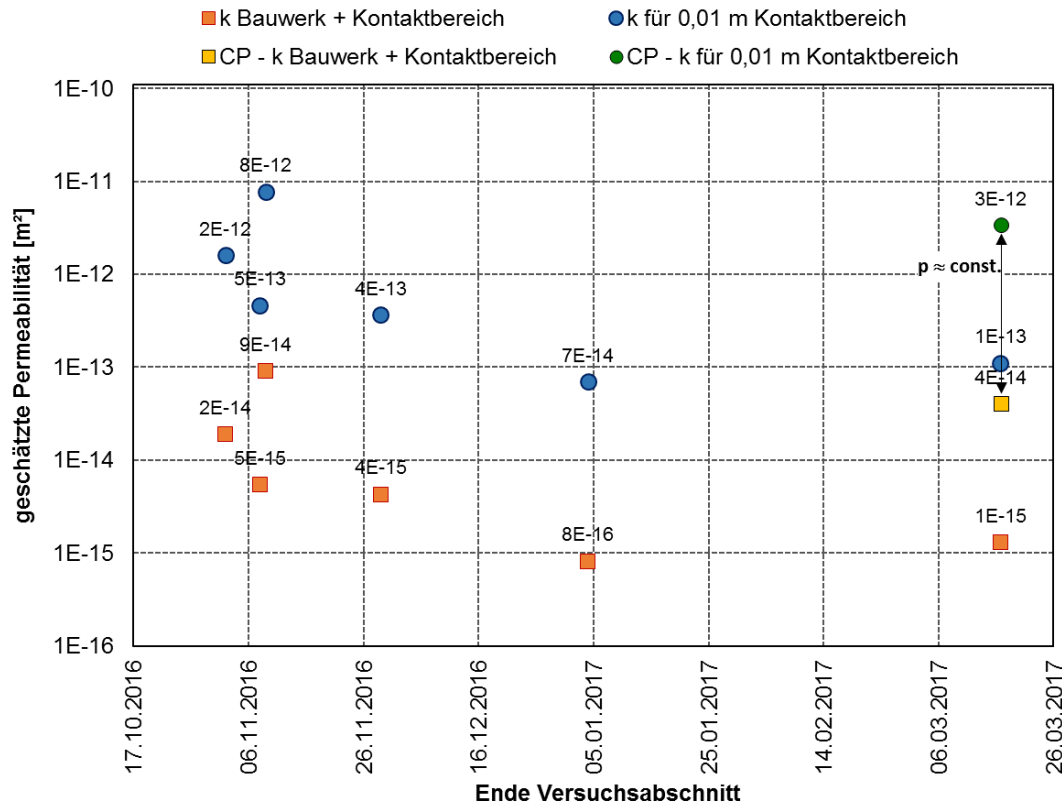
70 bar 20 bar 70 bar 20 bar 65 bar 100 bar 65 bar 30 bar 65 bar



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



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



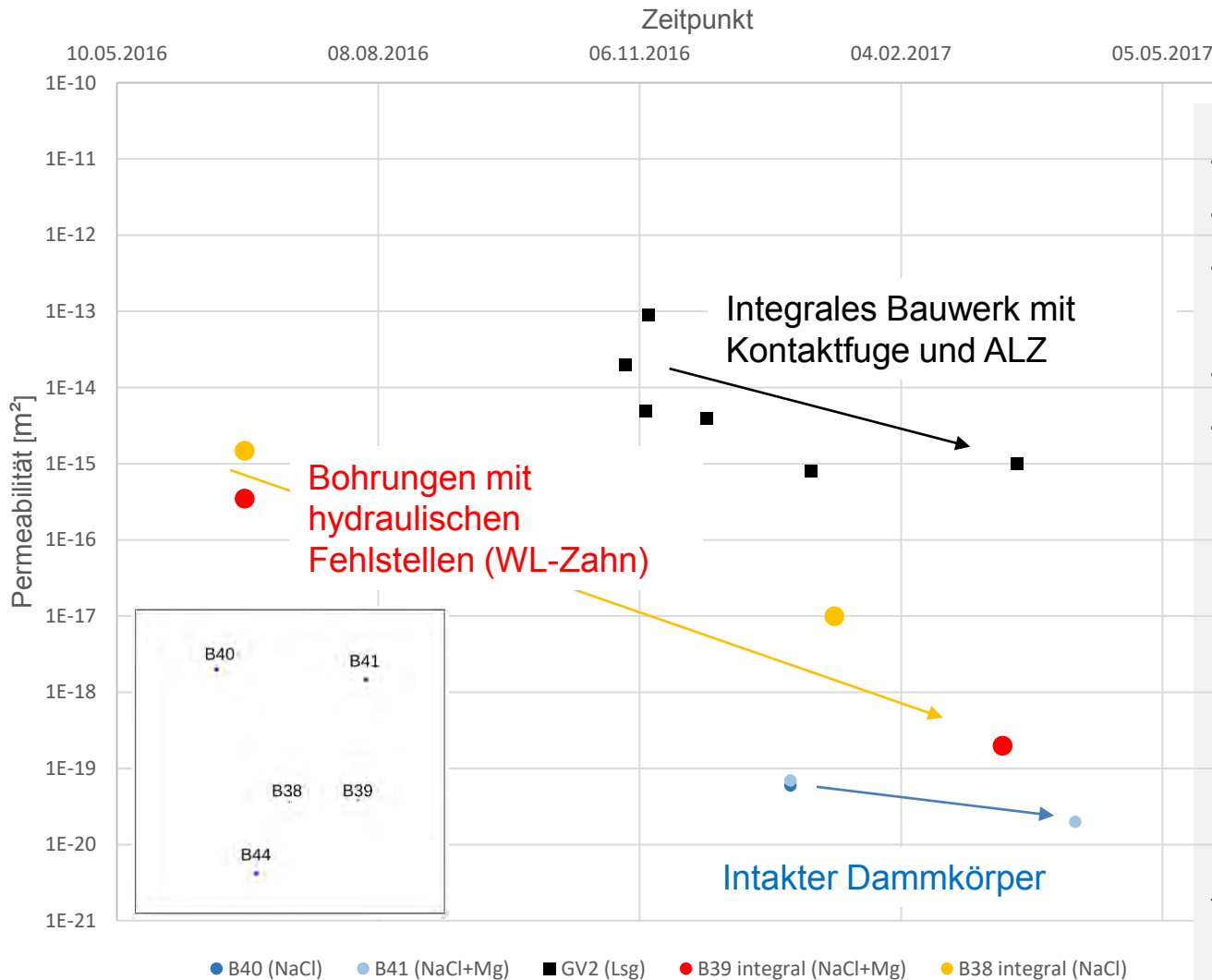
Niveau der Permeabilität aus CP:

Kontaktbereich	8E-12 m ²
Bauwerk	4E-14 m ²

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

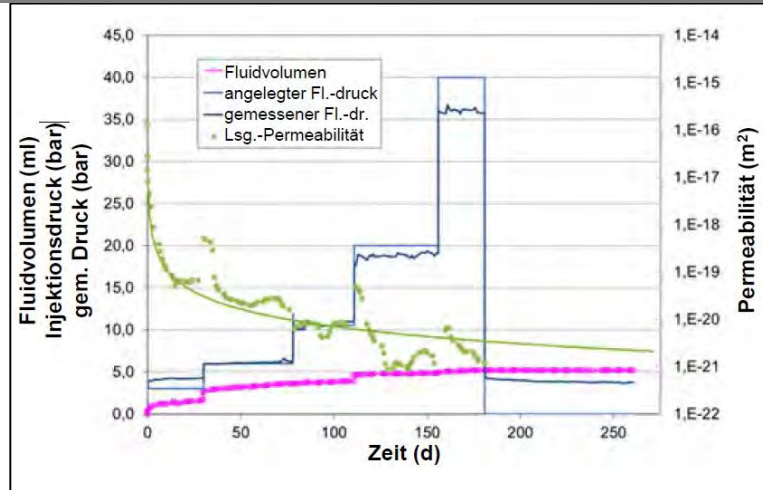
In situ Nachweis der Selbstabdichtung

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

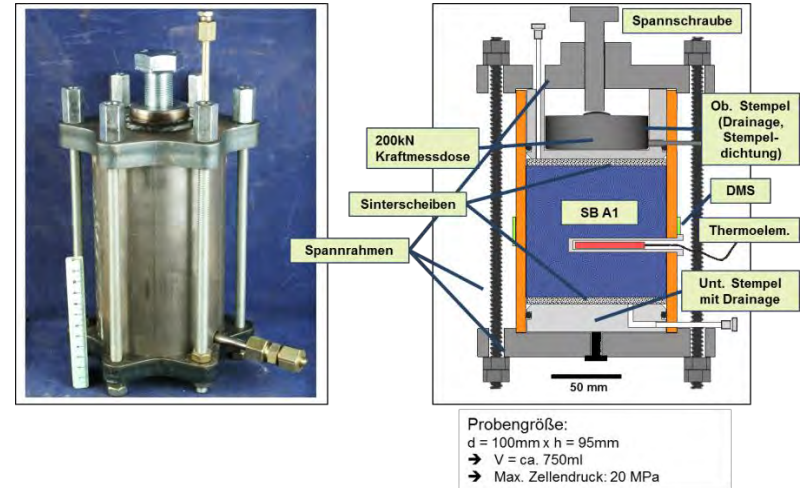
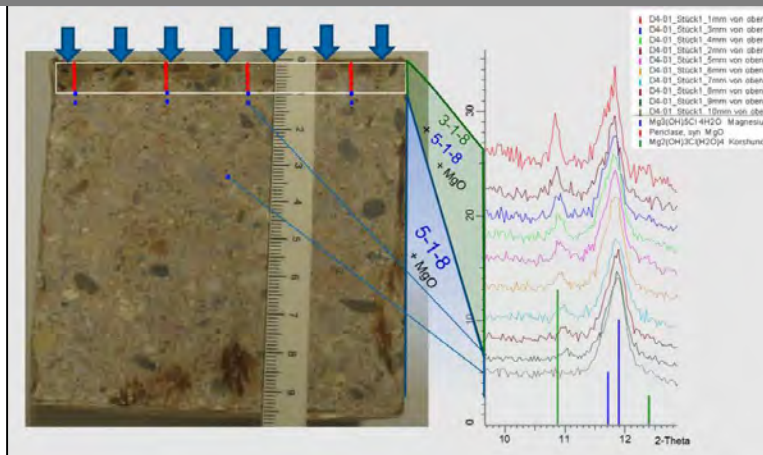
Anderes Nachweiskonzept als für Salzbeton ?

Integritätsnachweis bei Lösungszutritt

Aufsättigung von D4 MgO Beton mit Lösungsdruck



Ortsaufgelöste Phasenanalyse nach Aufsättigung



- ☺ 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

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

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

Verbesserung der Baustofftechnologie

- Zugabe Feinsalzfraktion ($< 0,3$ 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

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

(1) Partieller 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 (Haftfestigkeit, 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



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



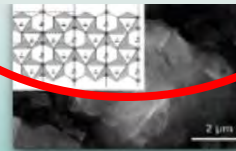
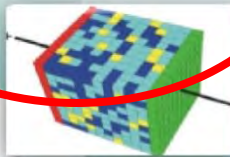
Struktur und Kompetenz

**Hoch Frequenz
Elektrotechnik**

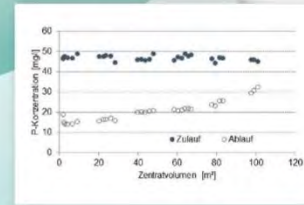
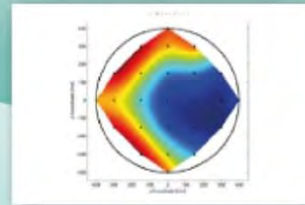
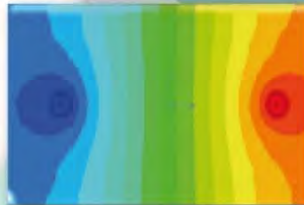
**Angewandte
Mineralogie/
Clay Science**

**Umwelt-
Technologie**

Material
Nano



Prozesse
Mikro

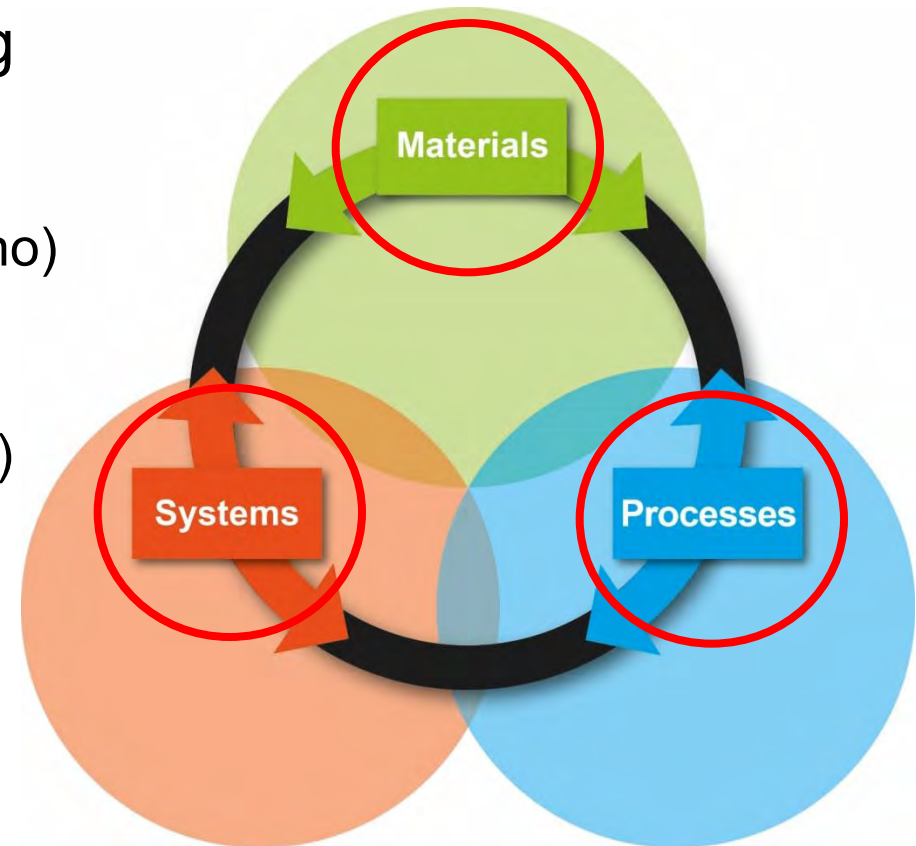


Systeme
Makro



Grundlagen unserer Forschung

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





Idee zum SANDWICH-Verschluss-Systems

Anwendungen

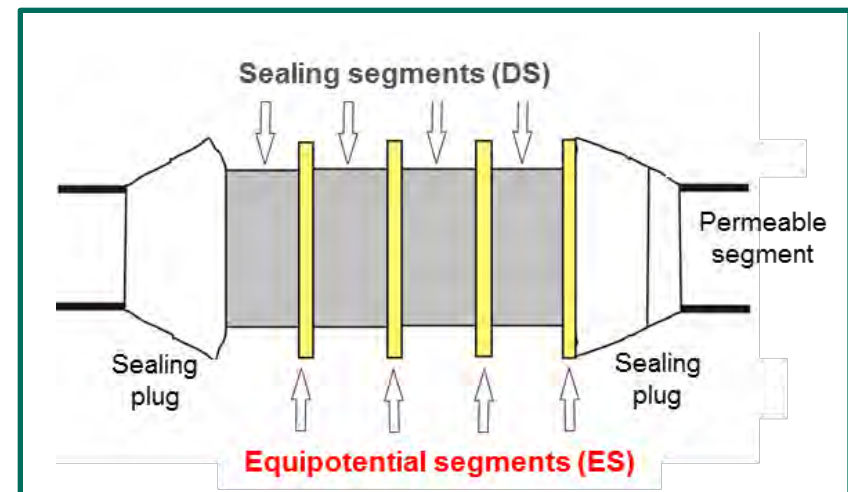
- Hydraulische Trennung untertägiger Grubenabschnitte
- Schacht- und Streckenverschluss von Grubenbauwerken und (End)-Lagerstätten von gefährlichen und radioaktiven Abfällen

Anforderungen

- Hydraulische Barriere
- Aufnahme mechanischer Kräfte
- Rückhalt gefährlicher Substanzen

Stand der Technik

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

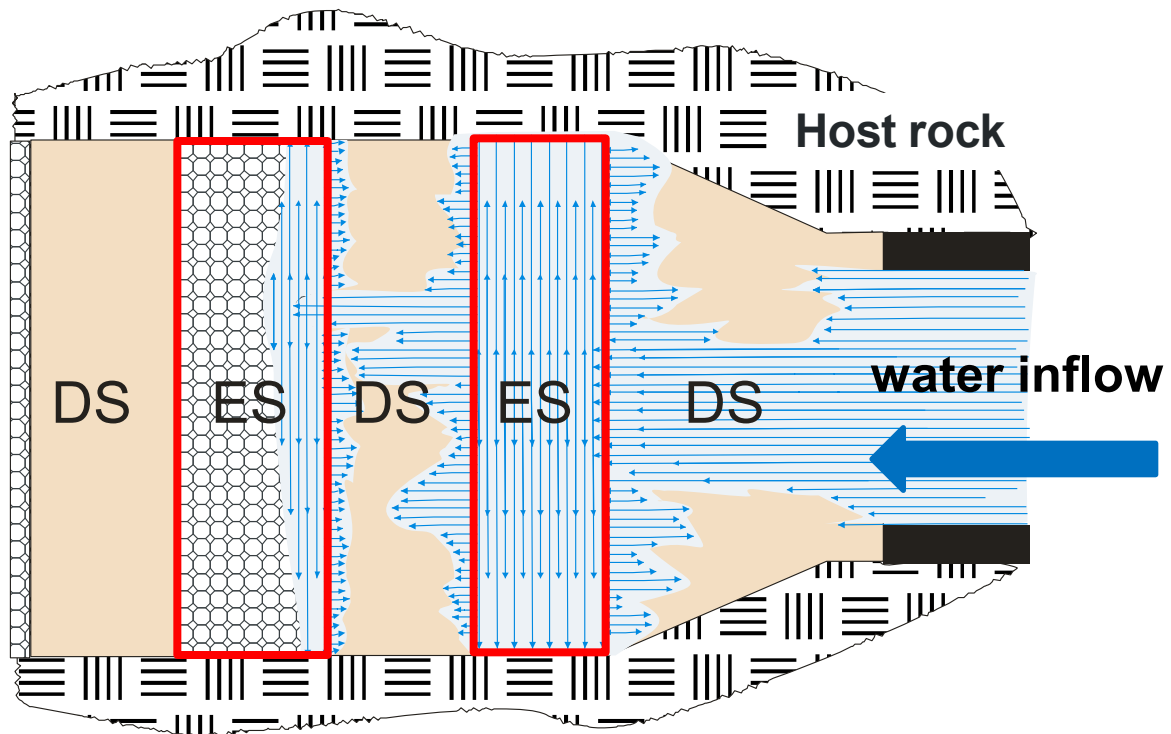




SANDWICH-Verschluss-System

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



SANDWICH-Verschluss-System

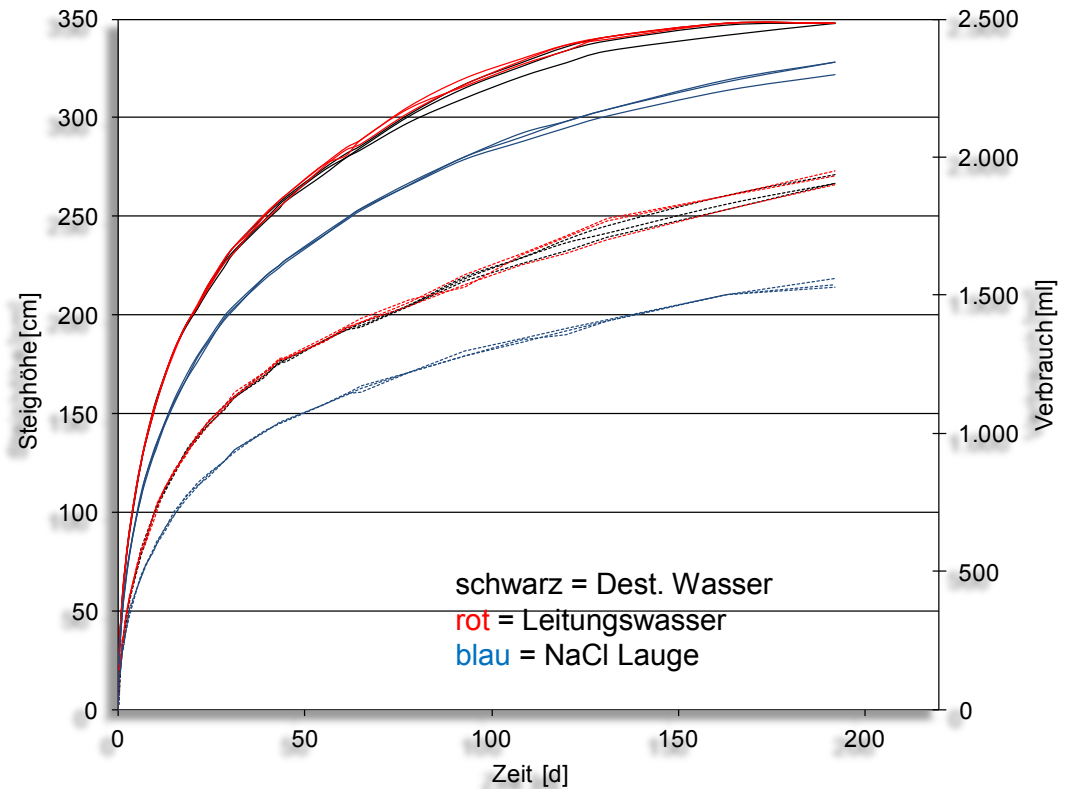
Das Äquipotenzial-Segment(ES)





SANDWICH-Verschluss-System

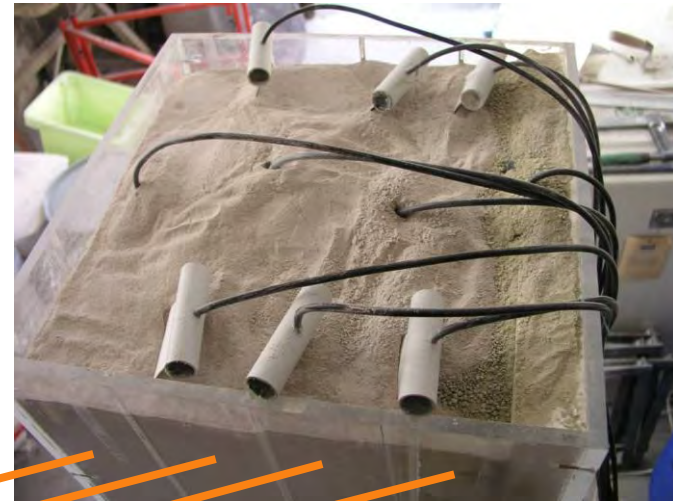
Das Äquipotenzial-Segment (ES)



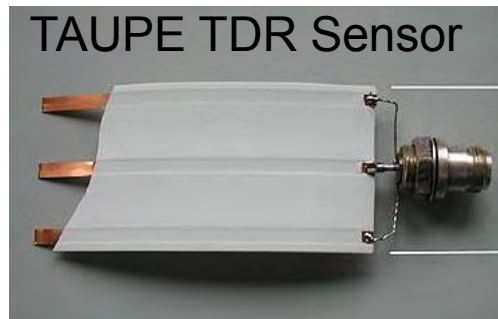
Ergebnis: 3 Komponenten ohne Arginotec



SANDWICH-Verschluss-System



ES1 ES2 ES3 DS (Bentonit)





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

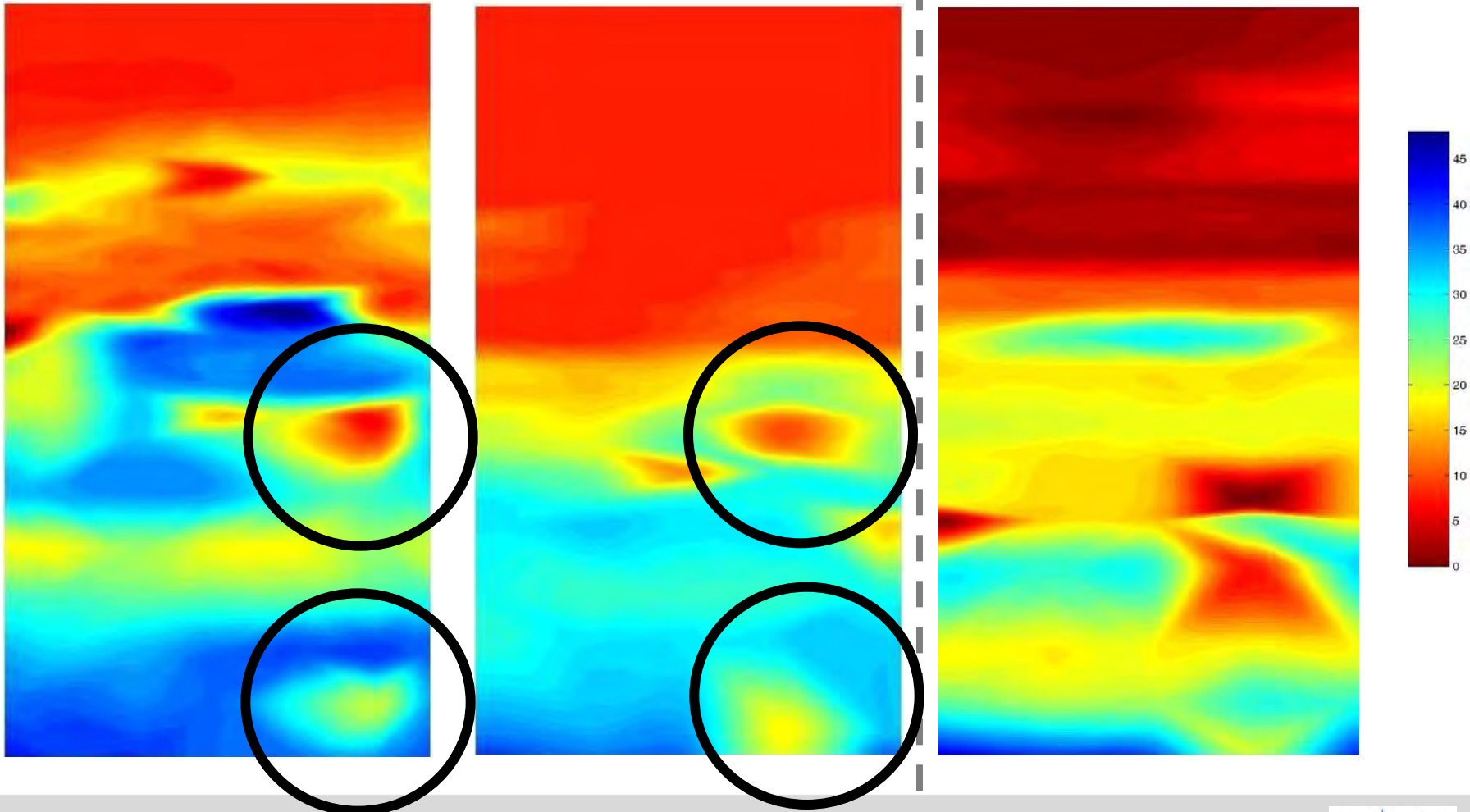


Funktionsnachweis im halbtechnischen Maßstab

HTV-1

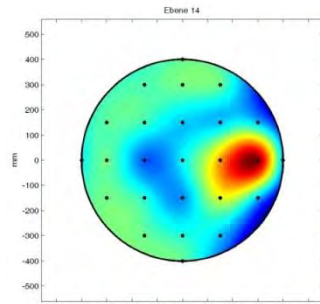
HTV-2

HTV-3

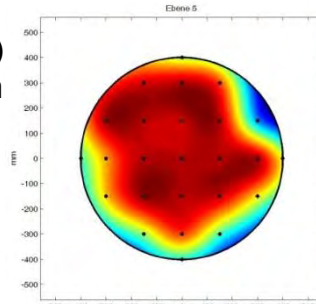




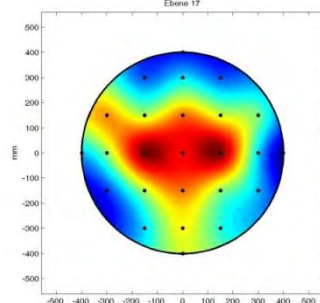
Funktionsnachweis im halbtechnischen Maßstab



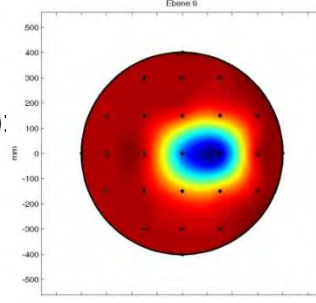
P14 (DS2)
Calcigel m
N45 Linse



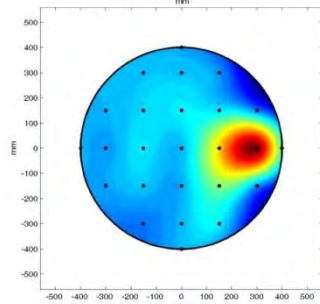
P5 (ES2b):
M33



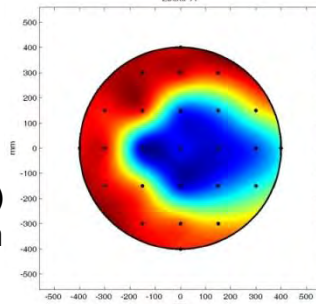
P17 (ES1):
N45



P9 (ES2a):
N45 mit
Calcigel
DS2



P19 (DS1)
Calcigel m
N45 Linse



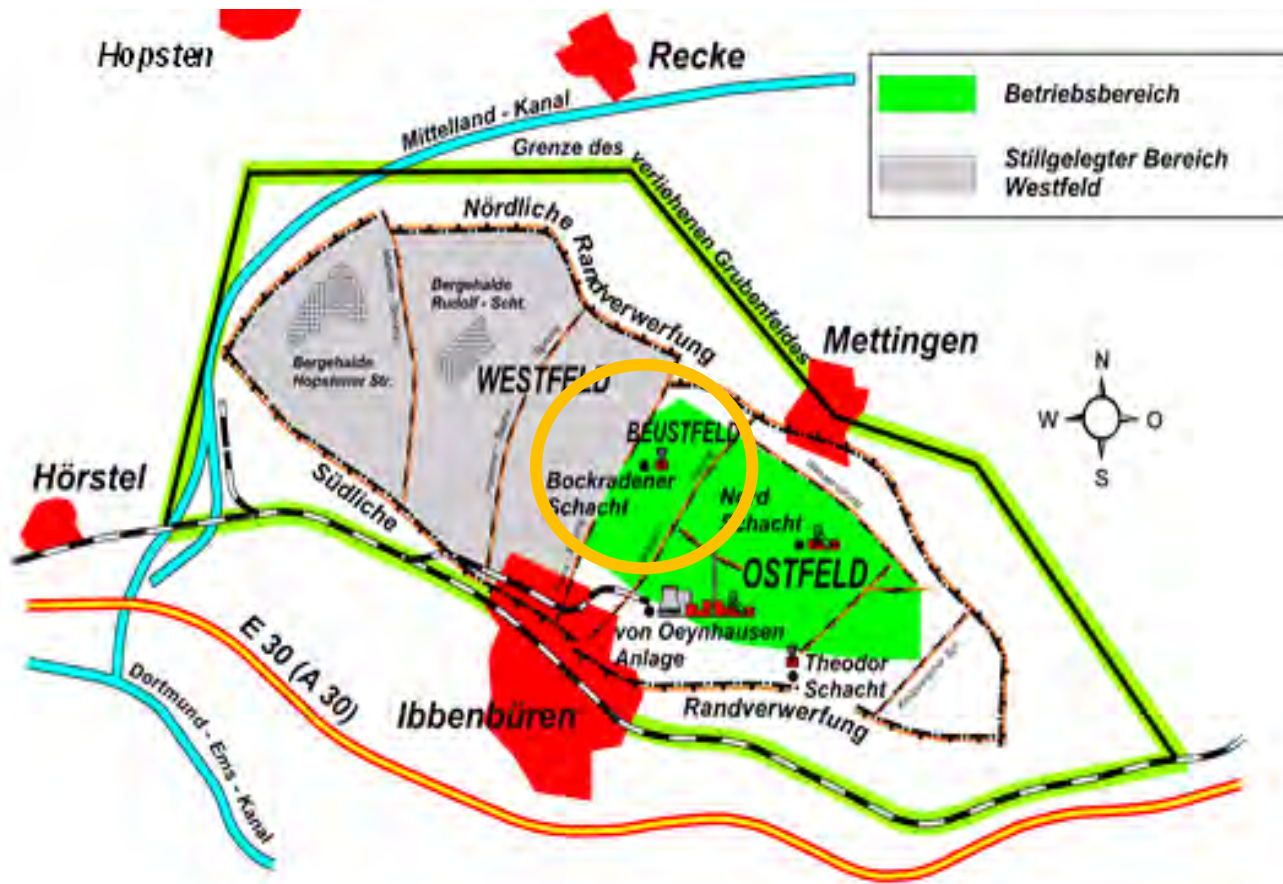
P11 (DS2):
Calcigel

Anfangswasser-Gehalt:	
Bentonit	10%
ES Material	<1%
Endwasser-Gehalt:	
DS1	44%
ES1	22%-14%
DS2	30%
ES2a	3%
ES2b (M33)	11%
DS3	10%

Salzverteilung analog



Grubenfeld in Ibbenbüren

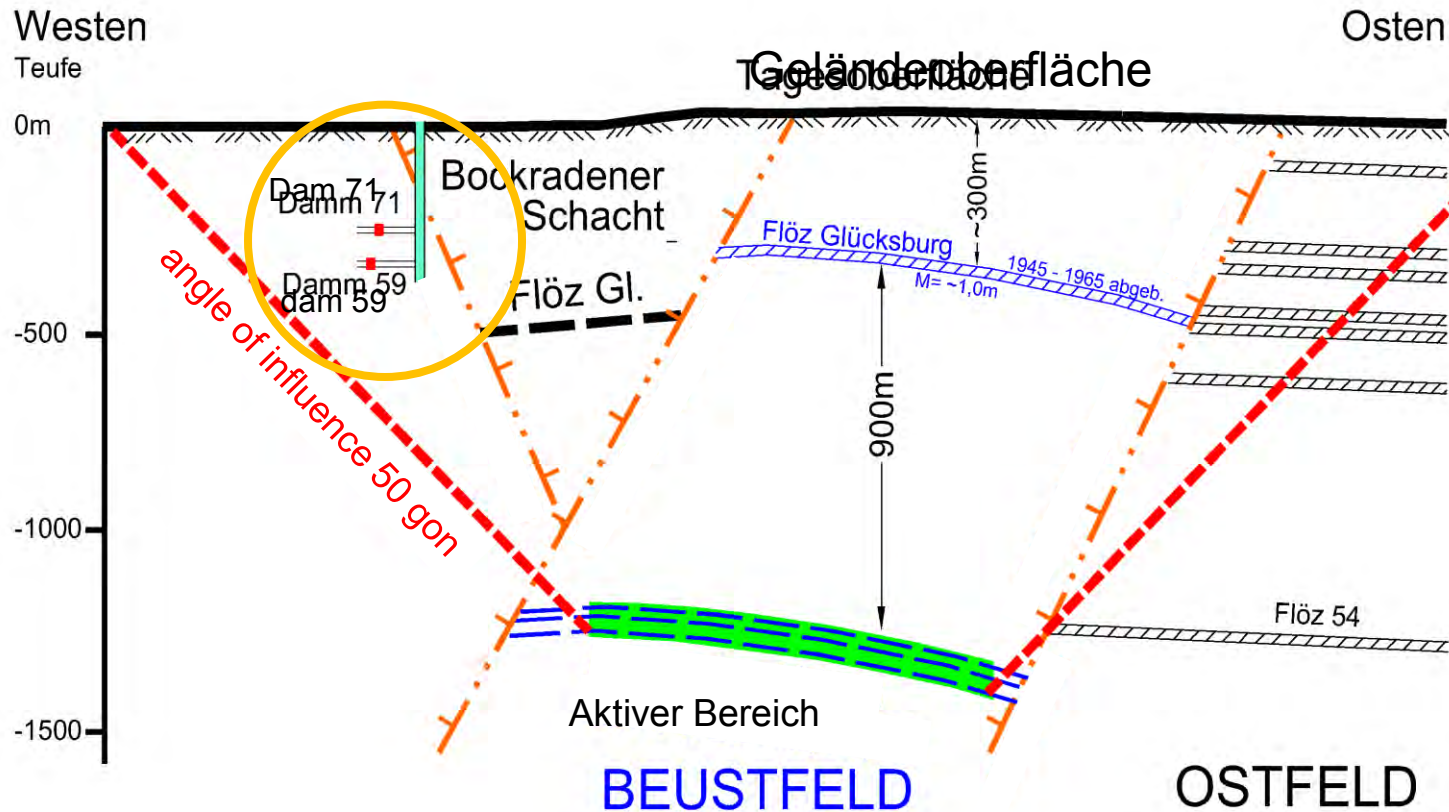


Referenz: F. Wolters
Clostermann



Grubenfeld in Ibbenbüren

Querschnitt

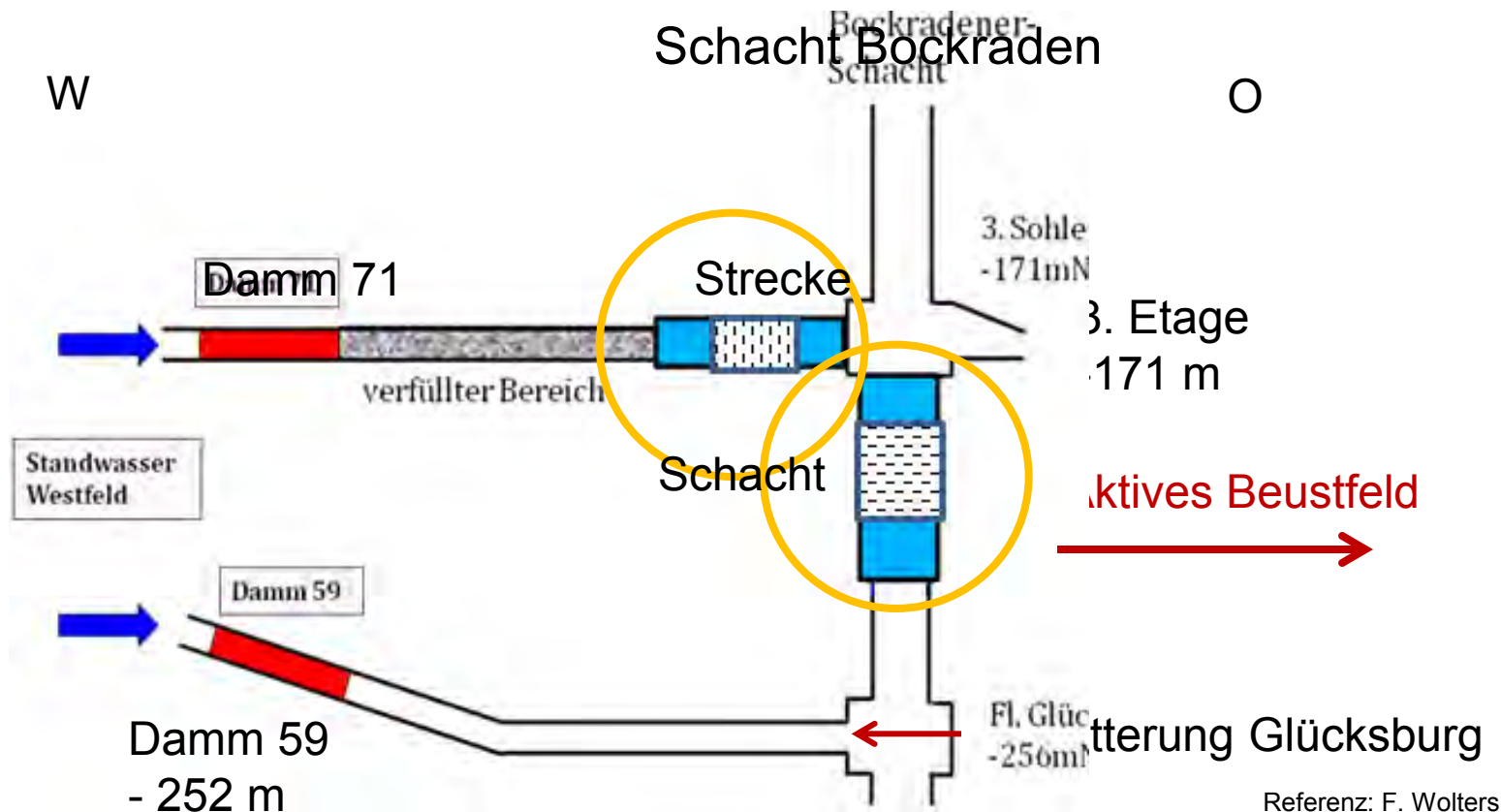


Referenz: F. Wolters
Clostermann



Grubenfeld in Ibbenbüren

Bereiche der Verschlüsse



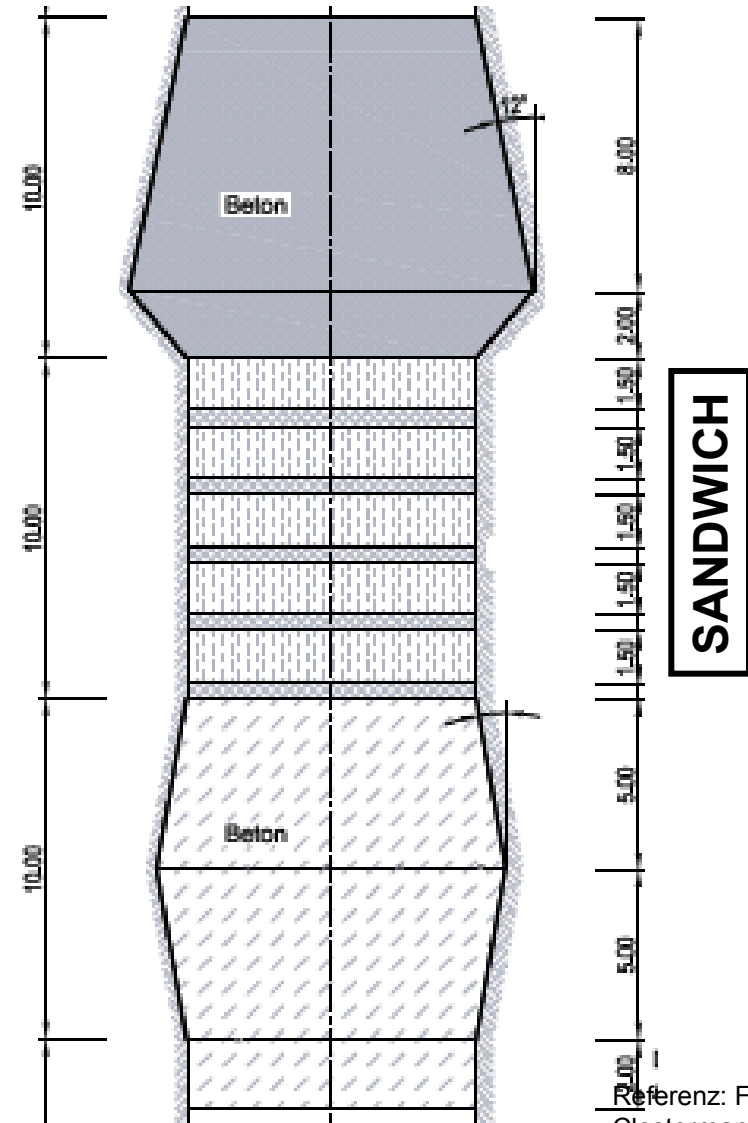
Referenz: F. Wolters
Clostermann



Grubenfeld in Ibbenbüren

Schachtverschluss

Bentonit-Dichte: 1.72 g/cm^3



Referenz: F. Wolters
Clostermann



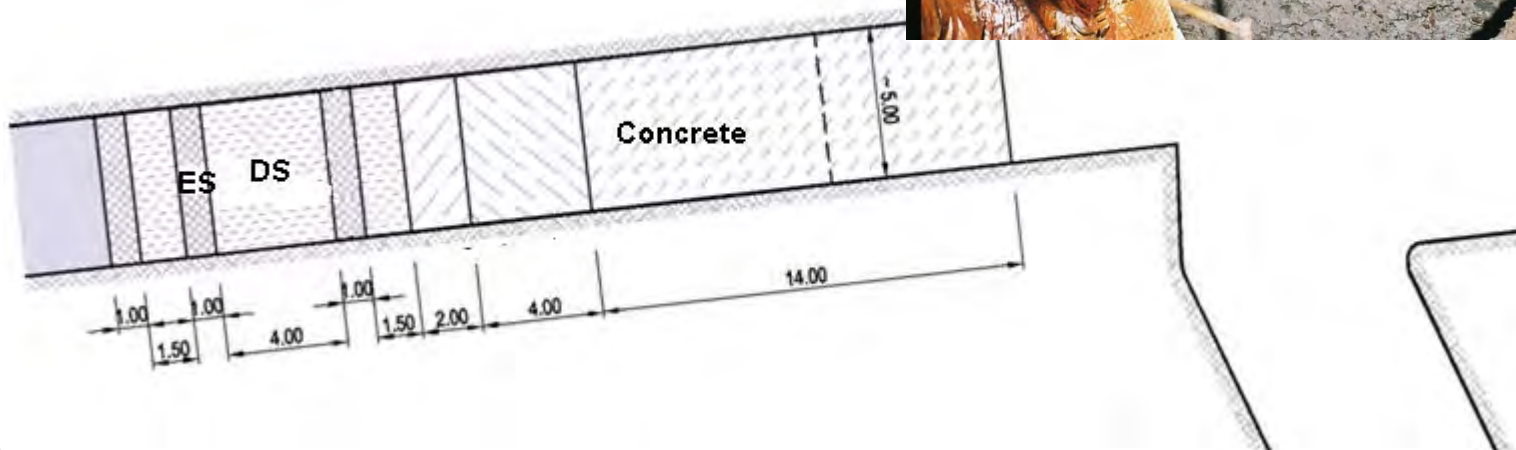
Grubenfeld in Ibbenbüren

Streckenverschluss

Dichte:

Äquipotenzialsegment 1.70 g/cm^3

Dichtsegment (Bentonit) 1.74 g/cm^3



Referenz: F. Wolters
Clostermann



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



Zusammenfassung und Ausblick



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

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

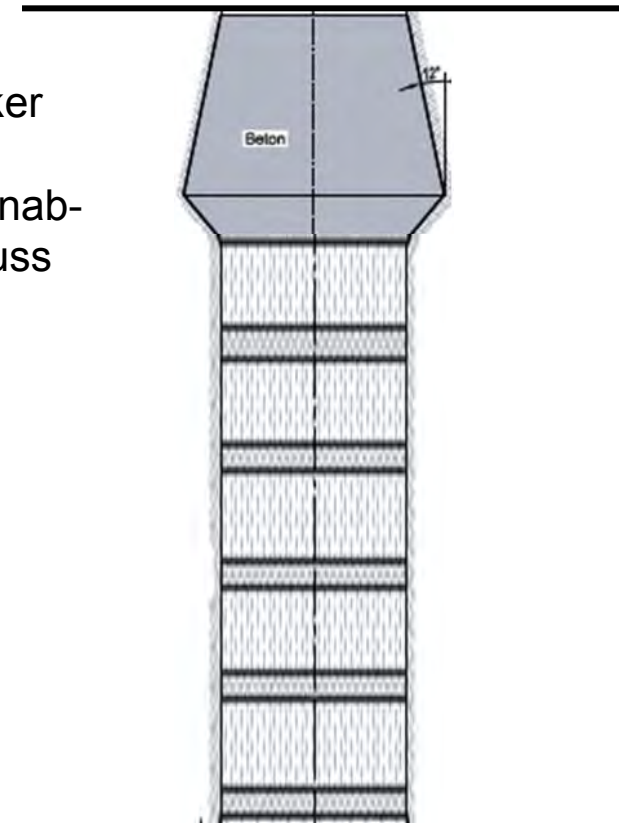
Kooperationen: TU-BAF, Stephan Schmidt Gruppe (SSG), IfG-Leipzig, IBeWa und
ENSI (SW-B Mont Terri)



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
Betonab-
schluss





Danksagung

Herzlichen Dank ...

- TU-BAF, Prof. Kudla, M. Gruner, W. Gaßner, M. Hoffmann
- G. Kemper, E. Stefanescu, A. Steudel, D. Bugezi-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



... und für Ihre Aufmerksamkeit

Kompetenzzentrum für Materialfeuchte CMM



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

ELSA II - Asphalt und Bitumen als Baustoffe für Verschlussysteme

Gliederung

Bitumen als Abdichtmaterial

- Grundlagen
- Materialeigenschaften
- Abdichtprinzip
- Historie

Anwendungskonzepte

Untersuchungen

- Entwicklung eines Steinasphalts
- Bohrlochversuche

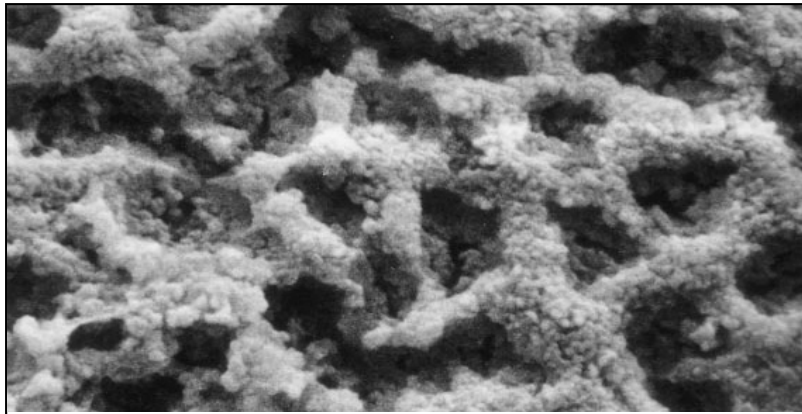
Zusammenfassung / Ausblick

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




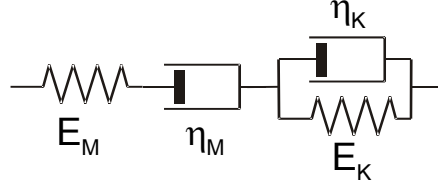
4 μm

kolloidale Netzwerkstruktur der Asphaltene in einem Bitumen



Naturasphaltsee auf Trinidad

Rheologie des Bitumens:

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



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

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

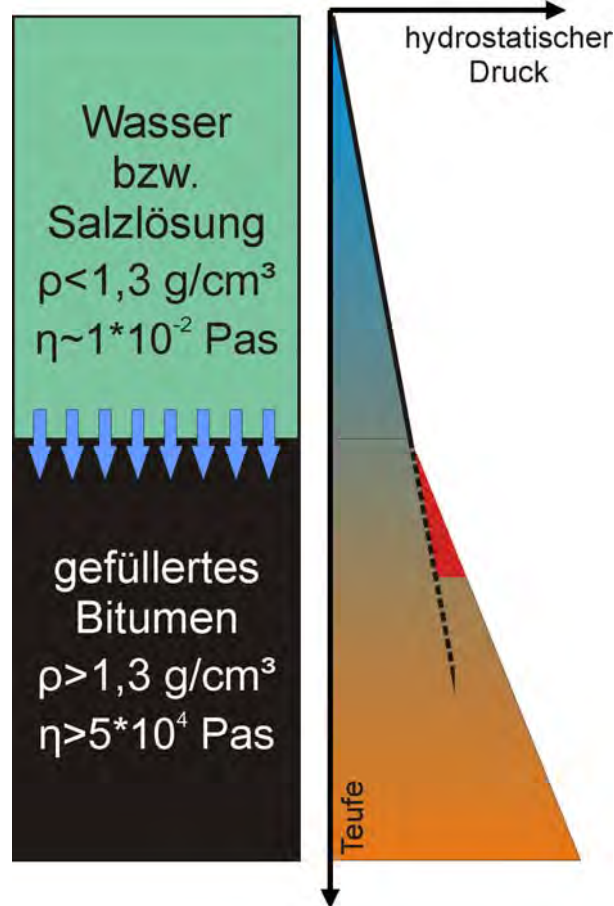
Optimale Abdichtbitumen müssen als einfache (zähe) Flüssigkeit vorliegen.

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.

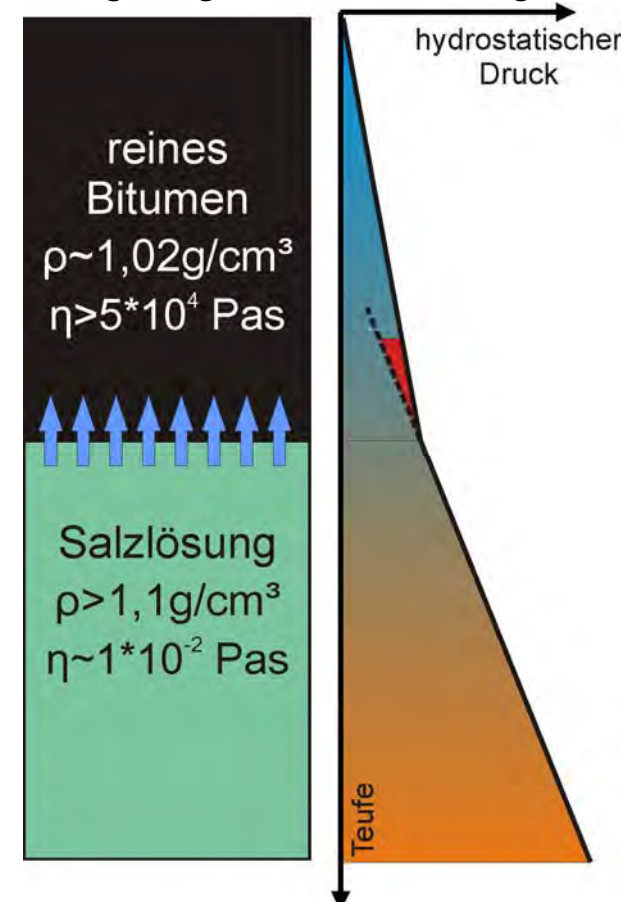
Bitumen als Abdichtmaterial

Lösungsangriff aus dem Hangenden



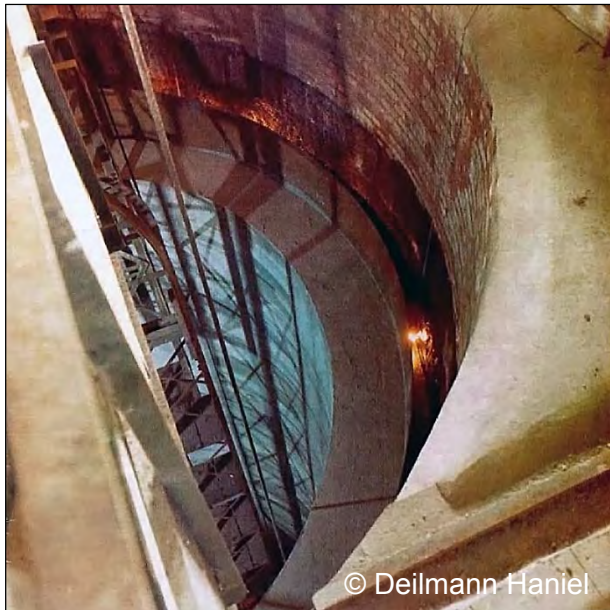
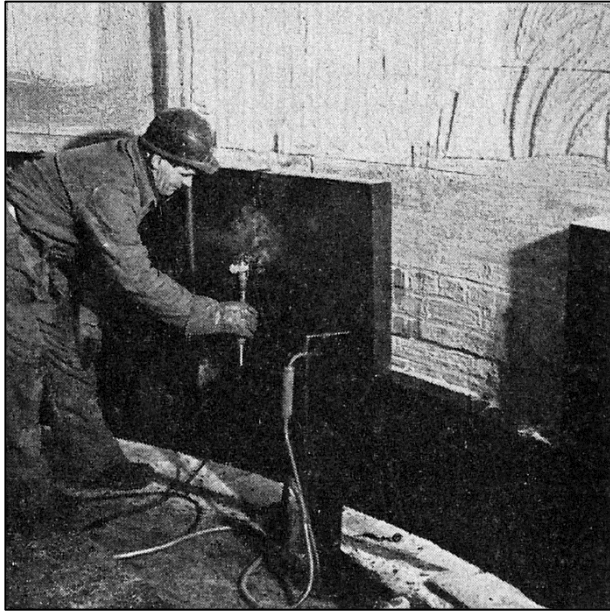
Hydrostatische Abdichtung

Lösungsangriff aus dem Liegenden



Hydraulische Abdichtung

Anwendung in Schächten:

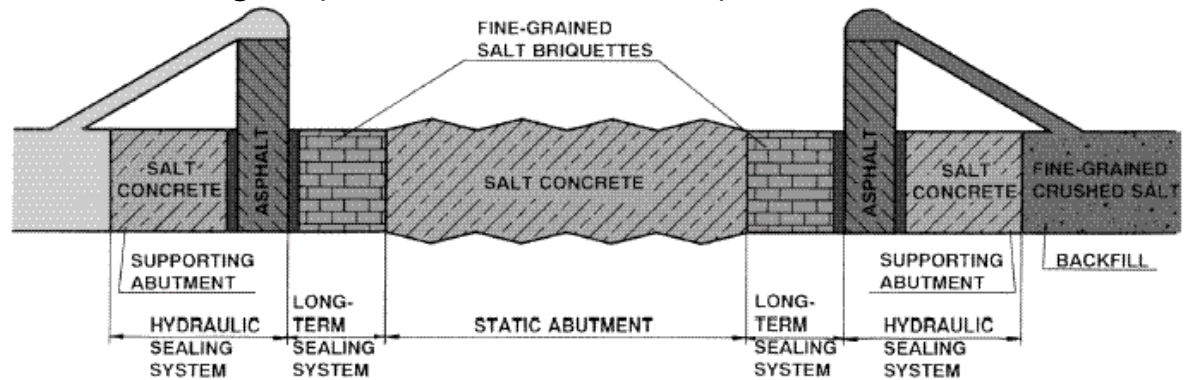


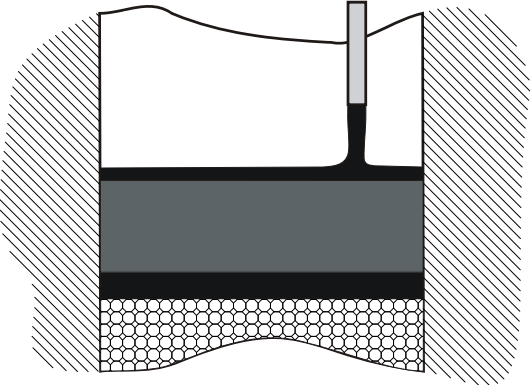
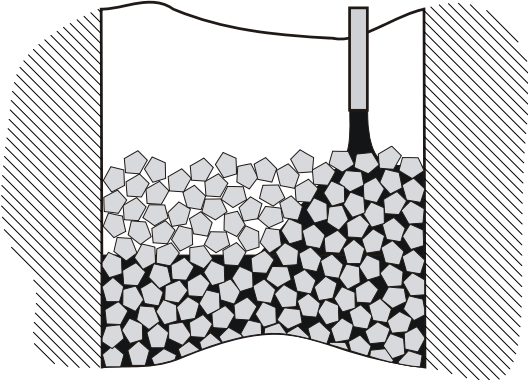
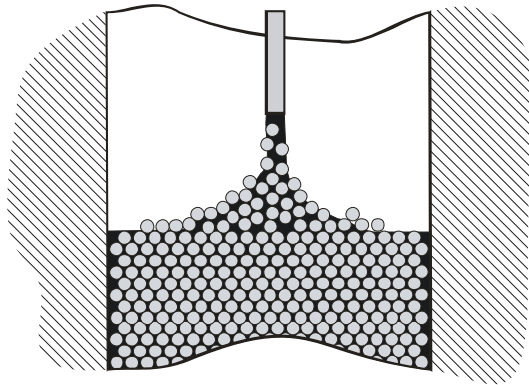
Gefüllte Bitumen (weiche Bitumensorten) sind seit Jahrzehnten als aktives Dichtmittel im Schachtbau im wasserführenden nicht standfesten Gebirge eingesetzt worden (häufig bei Gefrierschächten). Anfänglich wurde der Asphalt als unterkühlte Blöcke „vormontiert“.

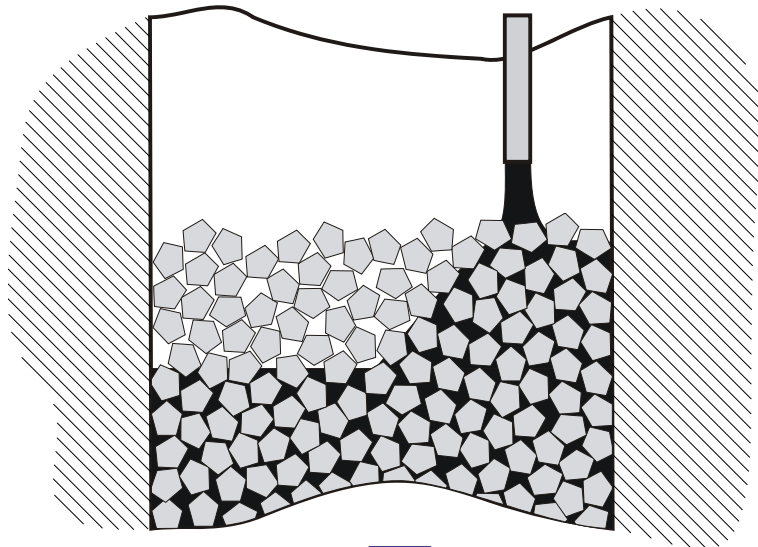
Später wurde das Material heiß vergossen, wobei auch der Verguss unter bis zu 400 m Stützsuspension (bei Schachtbohrverfahren) praktiziert wurde.

Prinzip einer dichtenden Asphaltfuge zwischen innerem und äußerem Ausbau.

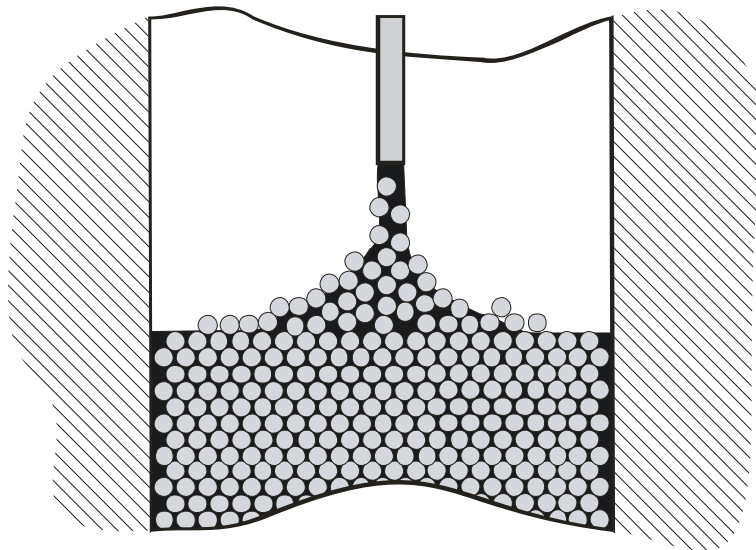
Das Abdichtprinzip und der Flüssigkeitscharakter des Bitumens zwang zu Sonderkonzepten in horizontalen Abdichtungen (bisher nicht realisiert).



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



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?)



Auswahl eines geeigneten Stützkorns



Bemessung des optimalen Bindemittelgehalts

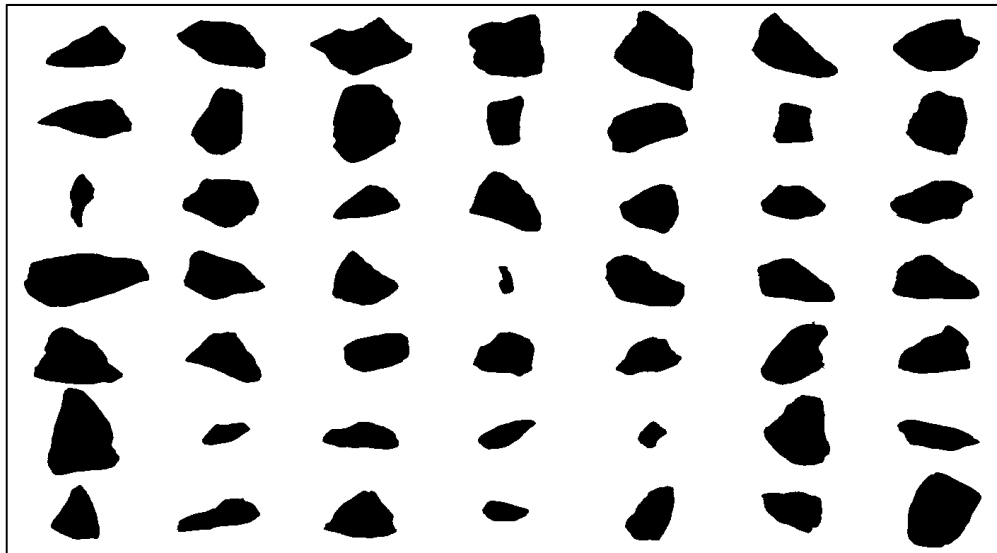


Praktikable Umsetzbarkeit

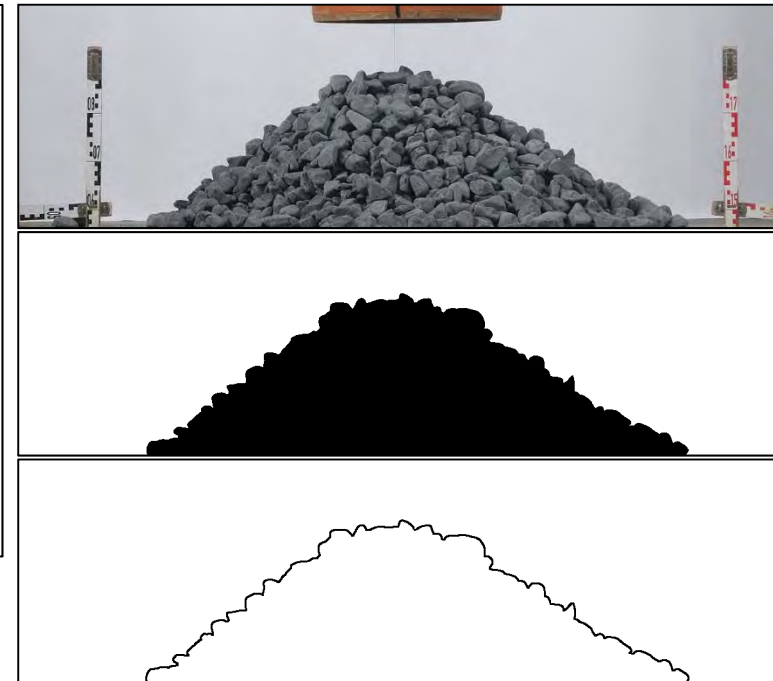
Untersuchungsschwerpunkte im Vergleich zum Stand von W. & T. :

- 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



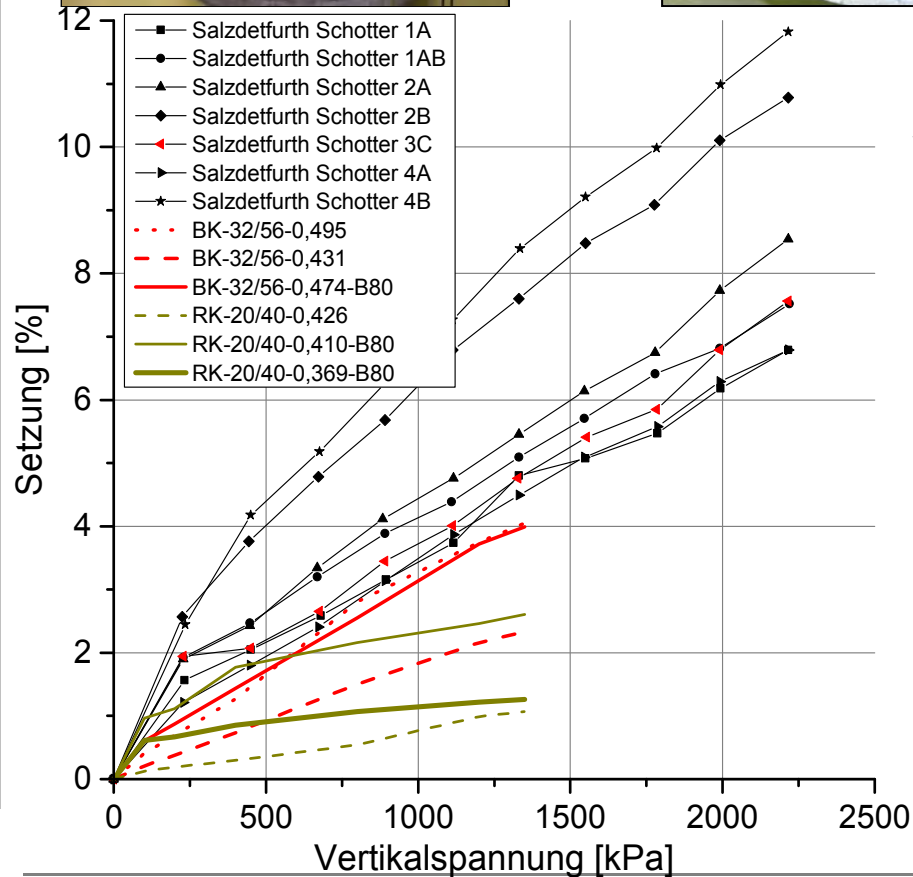
Typische Kornformen eines Schotters 32/63 (CPA-Analyse)



Ergebnisse:

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

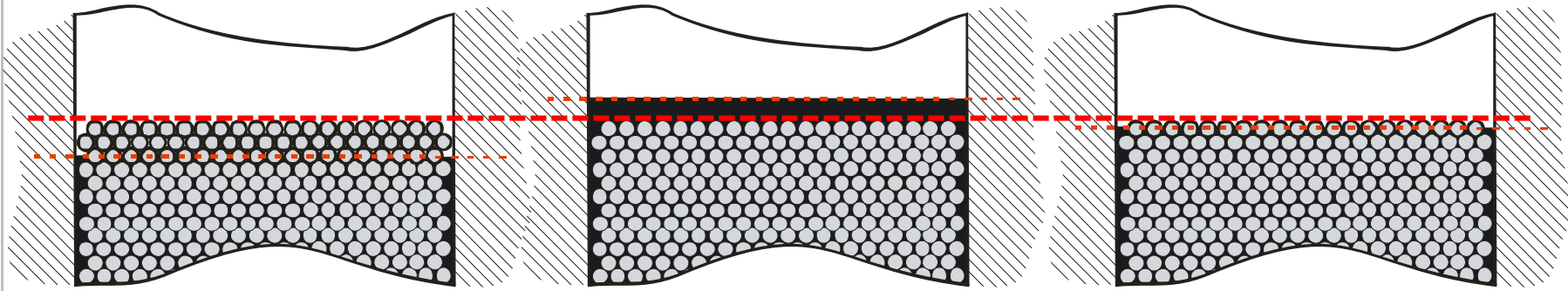
Schotter	mittl. Porenanteil der Schüttung	mittl. Schüttwinkel
BK-20/32	0,453	41,6
BK-32/56	0,444	42,0
BK-32/63	0,420	43,3
RK-20/40	0,372	39,4



Versuchsergebnisse im Vergleich zu Brechkornsotter:

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

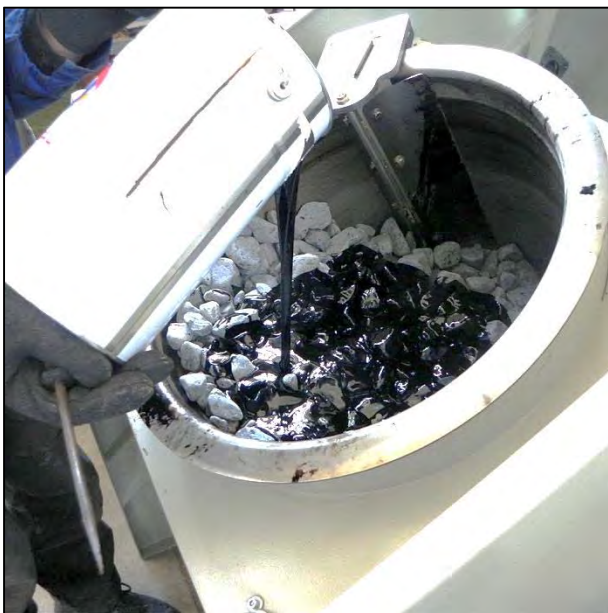
Optimierung des Einbauverfahrens:



zu niedriger Bitumenspiegel bei zu niedrigem Bitumenanteil im Mischgut

zu hoher Bitumenspiegel bei zu hohem Bitumenanteil im Mischgut

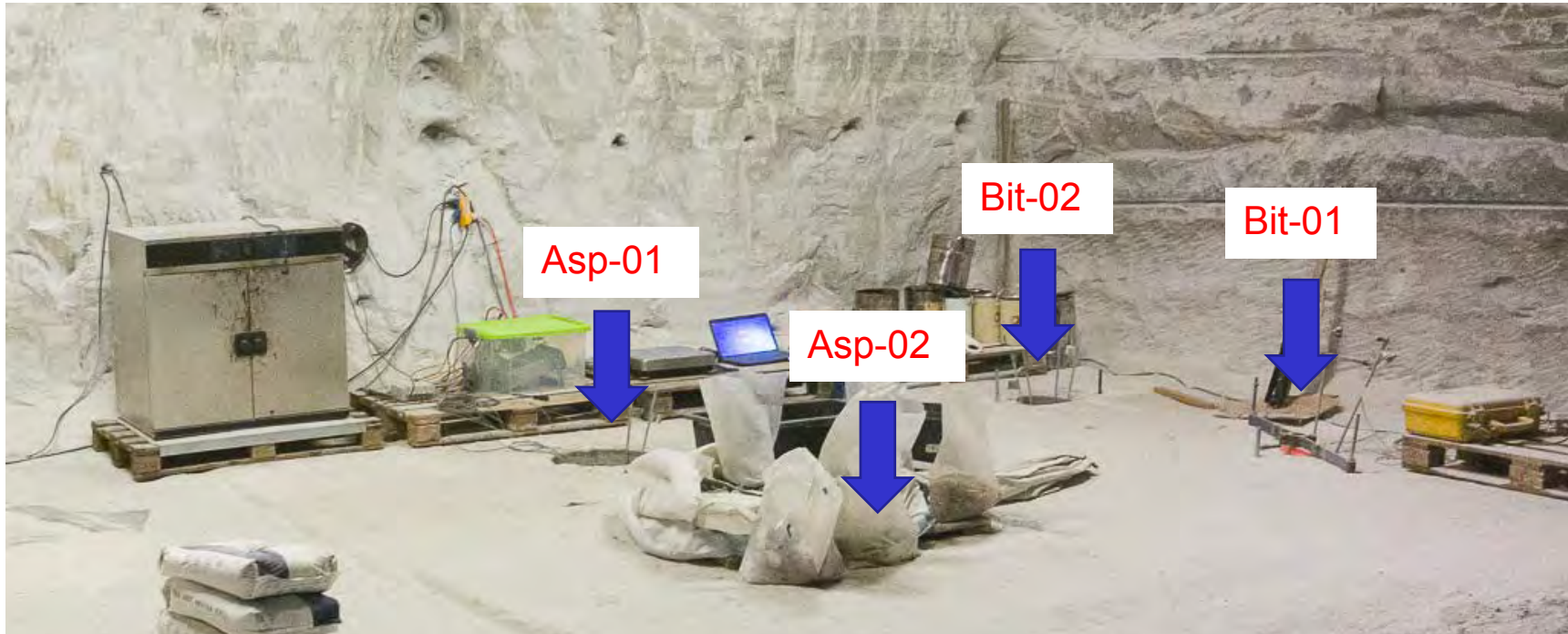
optimaler Bitumenspiegel bei optimalem Bitumenanteil im Mischgut



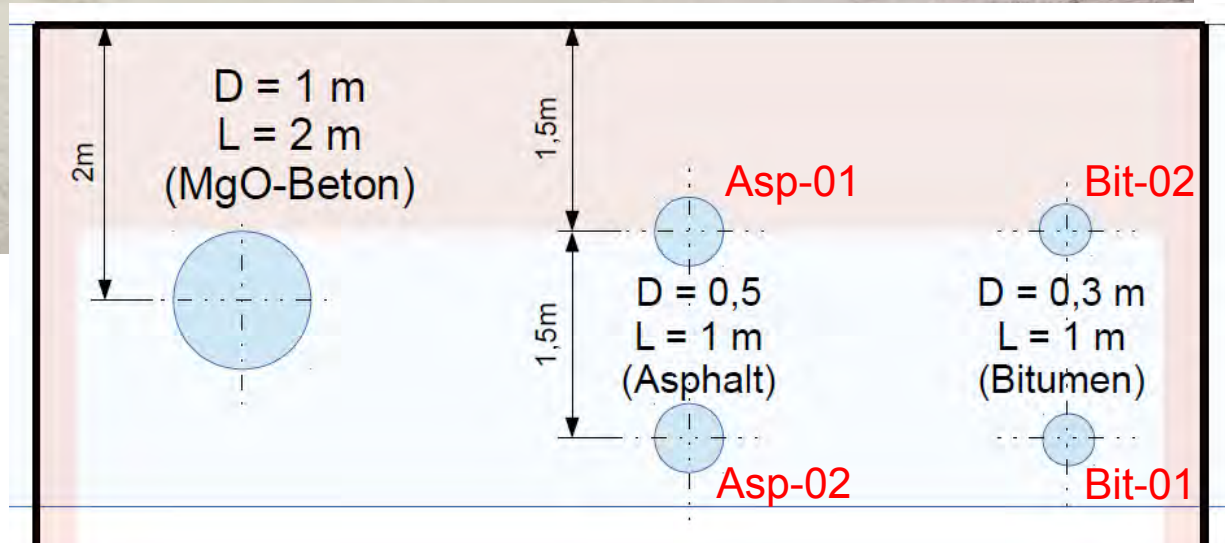
Ergebnisse:

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

Versuchsstandort in der Grube Sondershausen:

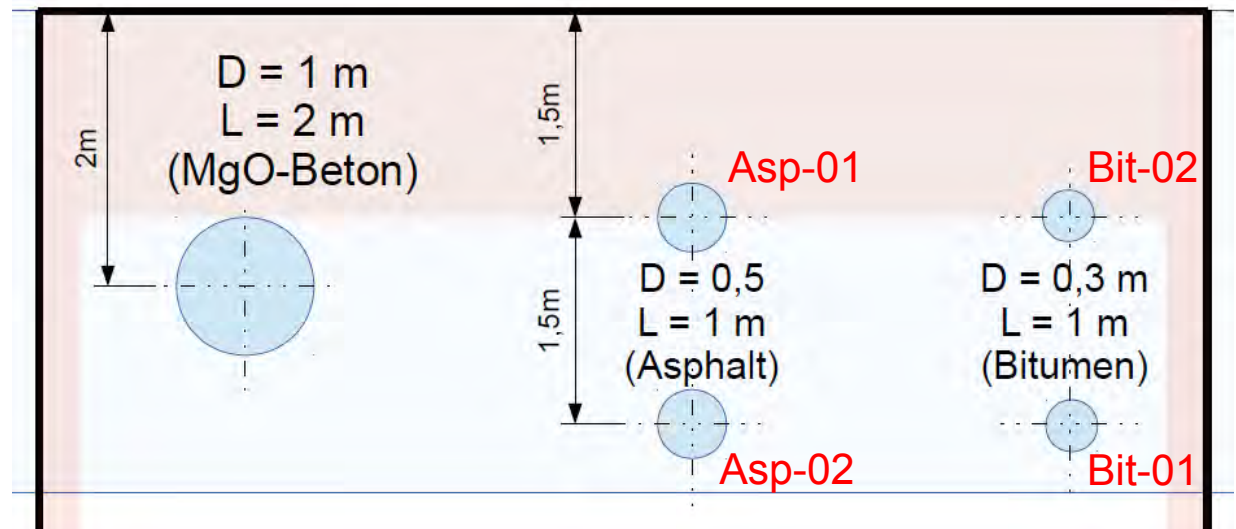


Versuchsnische schonend
2014 aufgeföhren, Na₂ γ
Sohle gefrät,
In situ Gaspermeabilität des
Gebirges 10⁻²² bis 10⁻²¹ m²

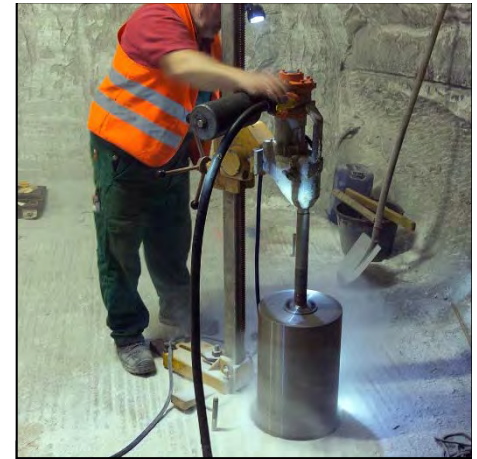
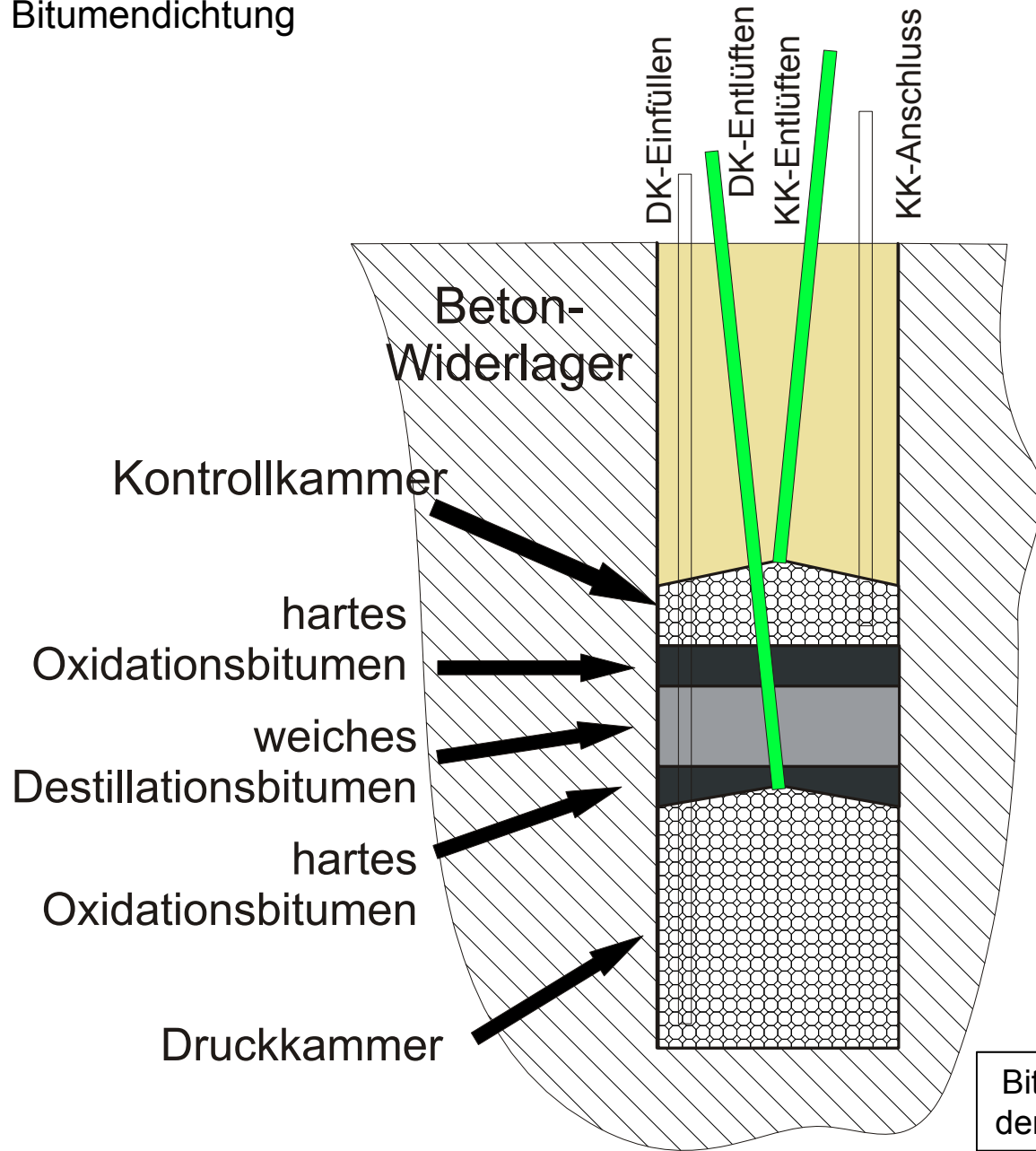


Versuchsstandort in der Grube Sondershausen:

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 Lösungspemeabilität, Rückbau	abgeschlossen
Asp-01	Bitumen verfüllter Schotter	Ø = 50 cm L = 30 cm	Temperatur, integrale Gas- und <u>Lösungspemeabilität, Rückbau</u>	läuft
Asp-02	Steinasphalt	Ø = 50 cm L = 40 cm	Temperatur, integrale Gas- und <u>Lösungspemeabilität, Rückbau</u>	läuft

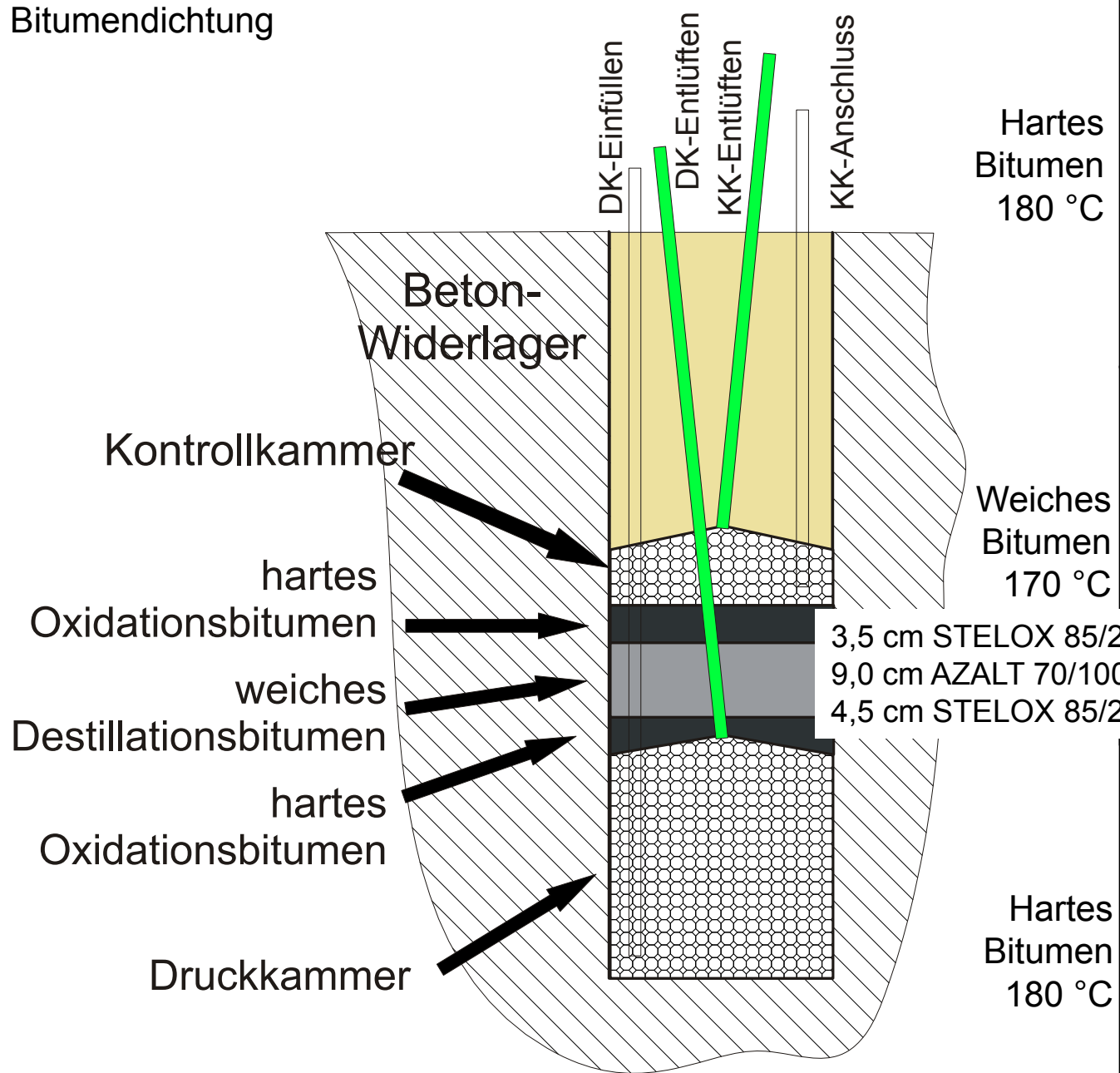


Bitumendichtung

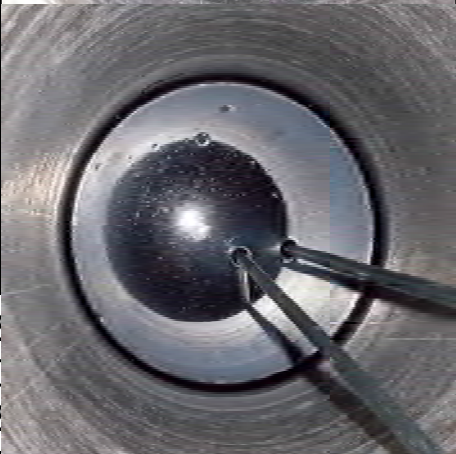


Bitumenvoranstrich auf der Kontur der Dichtung

Bitumendichtung



Hartes Bitumen
180 °C

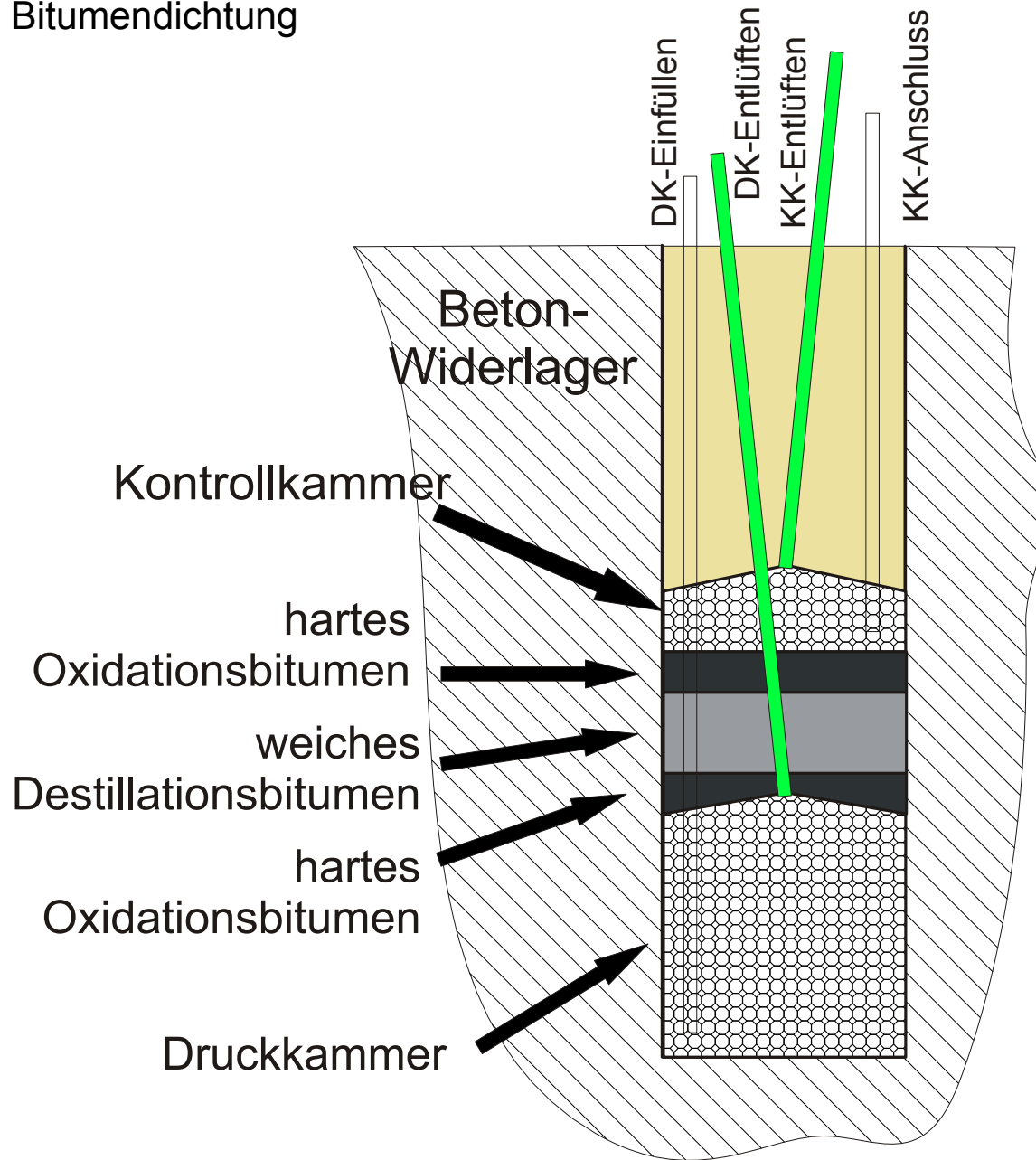


Weiches Bitumen
170 °C



Hartes Bitumen
180 °C

Bitumendichtung



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

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 Lösungspermeabilität $< 1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$

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.

Ergebnisse Rückbau (Überbohren mit \varnothing 50 cm)

Angrenzendes Salzgestein im Konturbereich des Bit-02 deutlich feuchter (0,02 % \rightarrow 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)

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 Sperrbitumen nicht gedruckenes Gas drückte Gasblasen in das Oxidationsbitumen in Abhängigkeit des in die Kontrollkammer abgedrückten Gasvolumens (~100 cm³)

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

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.

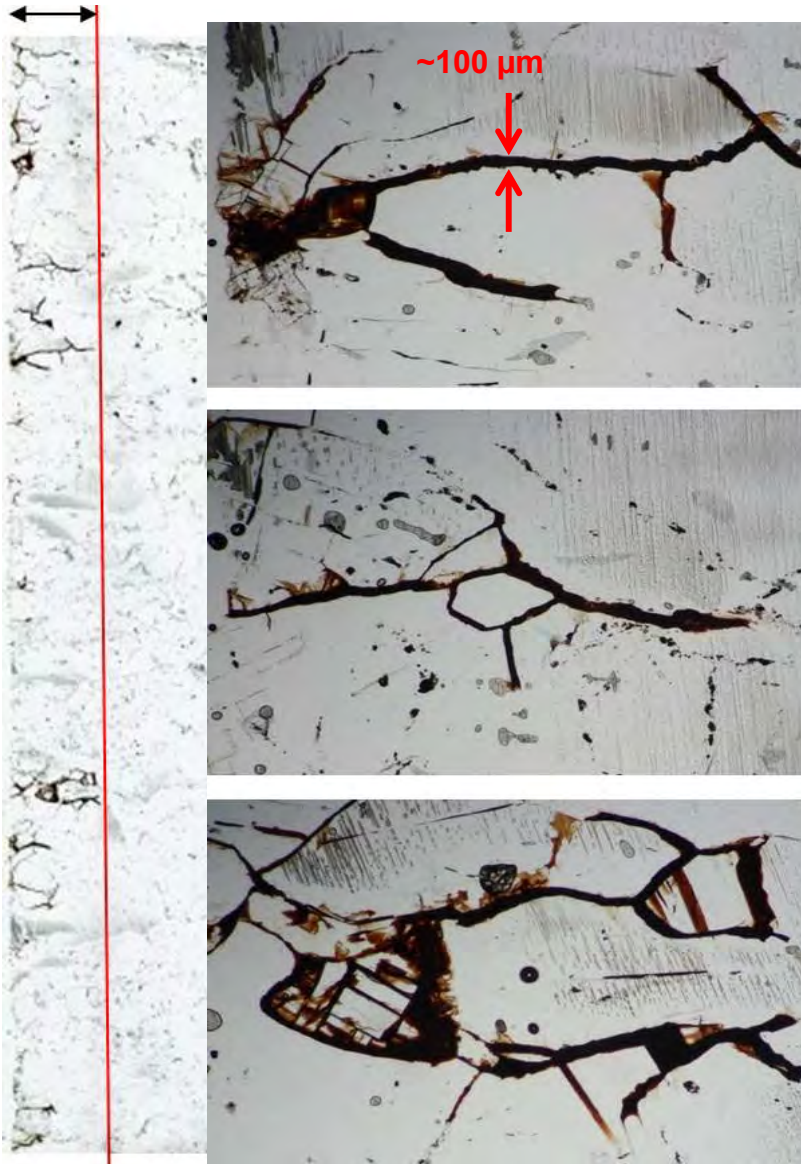
Untersuchungen - Bohrlochversuche

Ergebnisse Rückbau (Dünnschliffe DBEtec)

~ 5 mm

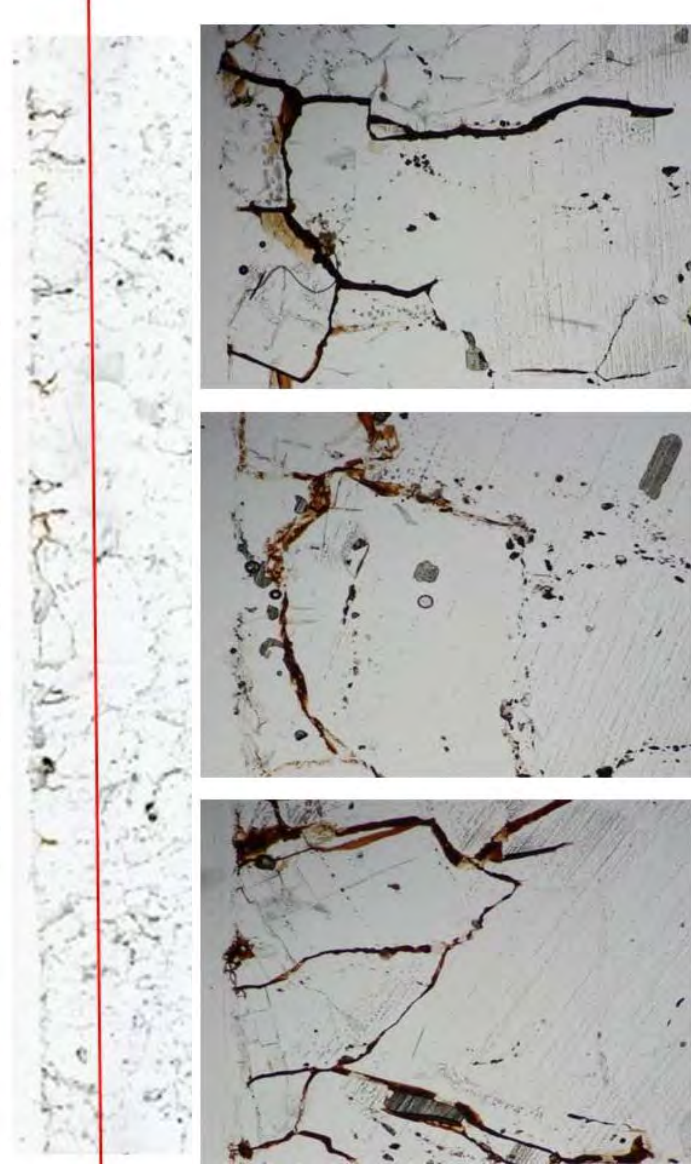
Bit-01

Steinsalz-Konutur
im Bereich des Destillationsbitumerns



Bit-02

Steinsalz-Konutur
im Bereich des Destillationsbitumerns

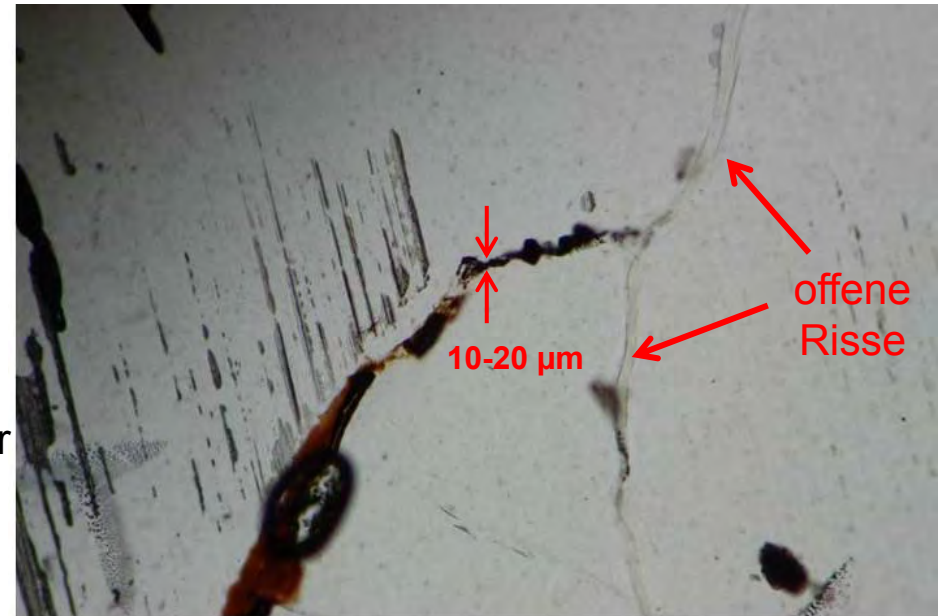


Ergebnisse Rückbau (Dünnschliffe DBEtec)

- 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-ner 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 Bitumenvor-
anstrich 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



- 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 Steinaspalt* 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-communitiy* ist Bitumen ein unterrepräsentierter Baustoff, obwohl er in nahezu allen gegenwärtigen Endlager-Verschlußkonzepten in Deutschland enthalten ist.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

GLÜCK AUF!



Dank an den Projektträger
PTKA-WTE und das BMWi.

Untertägiger Großversuch für vertikale Abdichtelemente aus Schotter und heiß eingebautem Bitumen

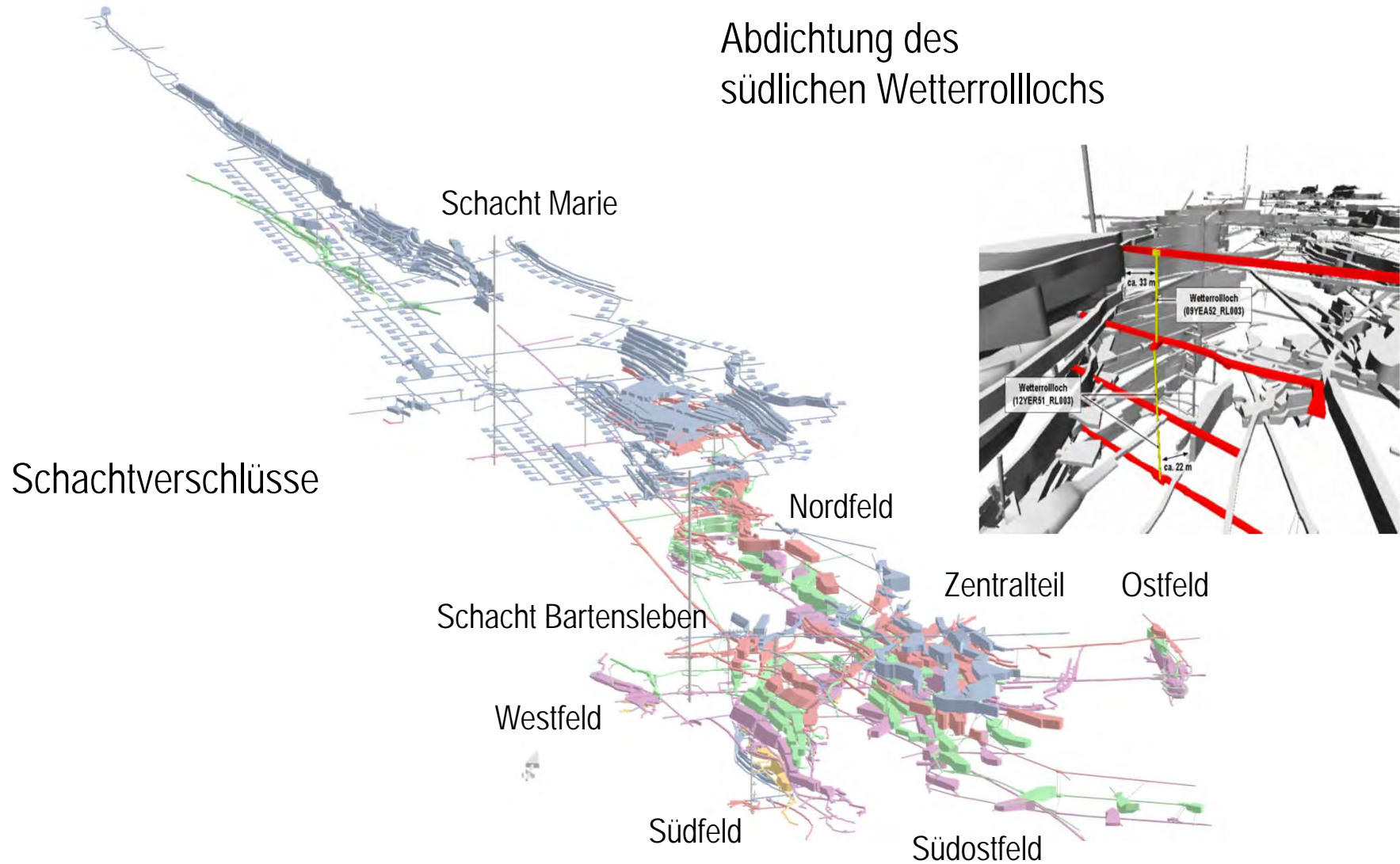
B. Stielow, J. Wollrath,
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Salzgitter;
M. Kreienmeyer, T. Schröpfer, J. Bauer,
Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine

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

www.dbe.de

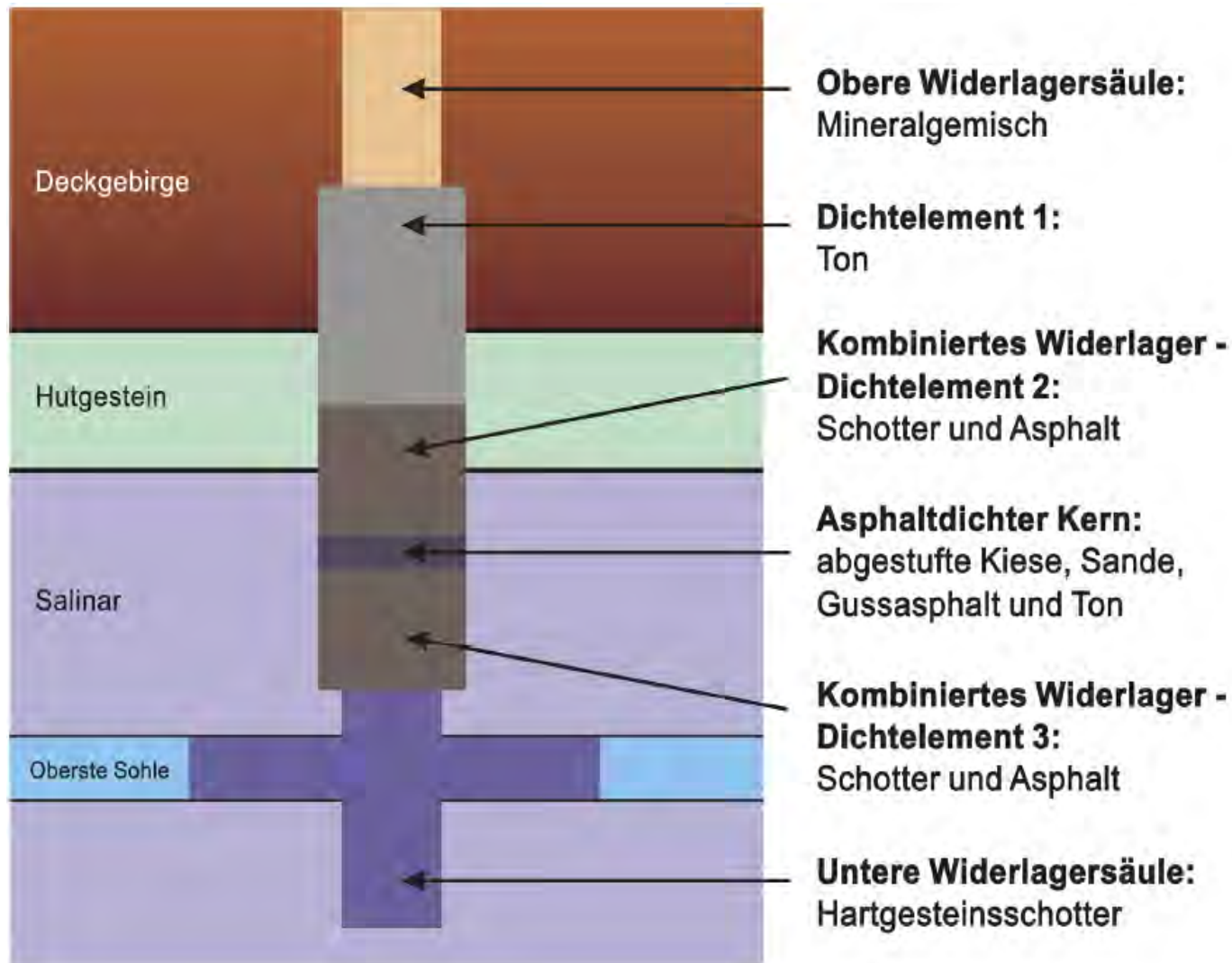
Stilllegungskonzept - Vertikale Abdichtungen

Abdichtung des
südlichen Wetterrolllochs



www.dbe.de

Verschlusskonzept für die Schächte



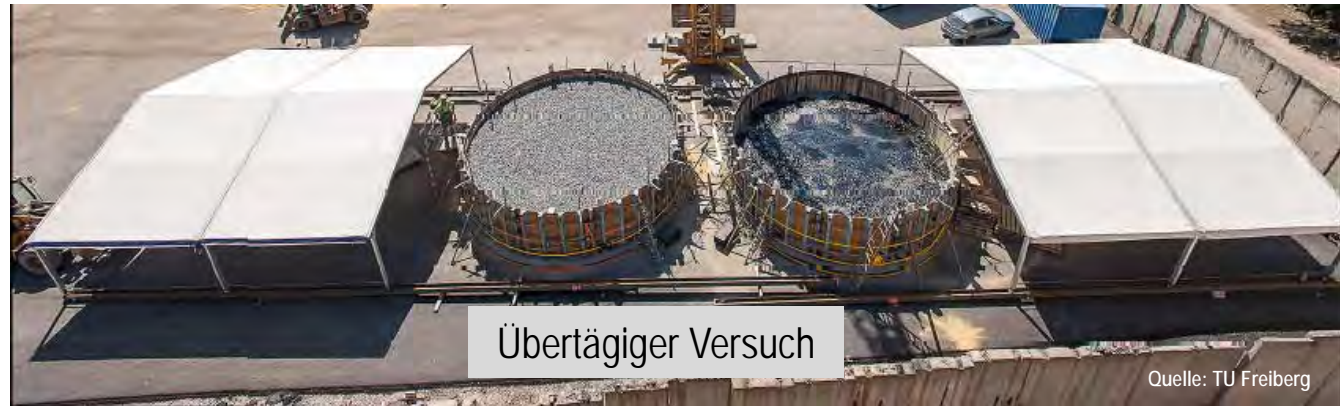
www.dbe.de

Gestuftes Versuchskonzept



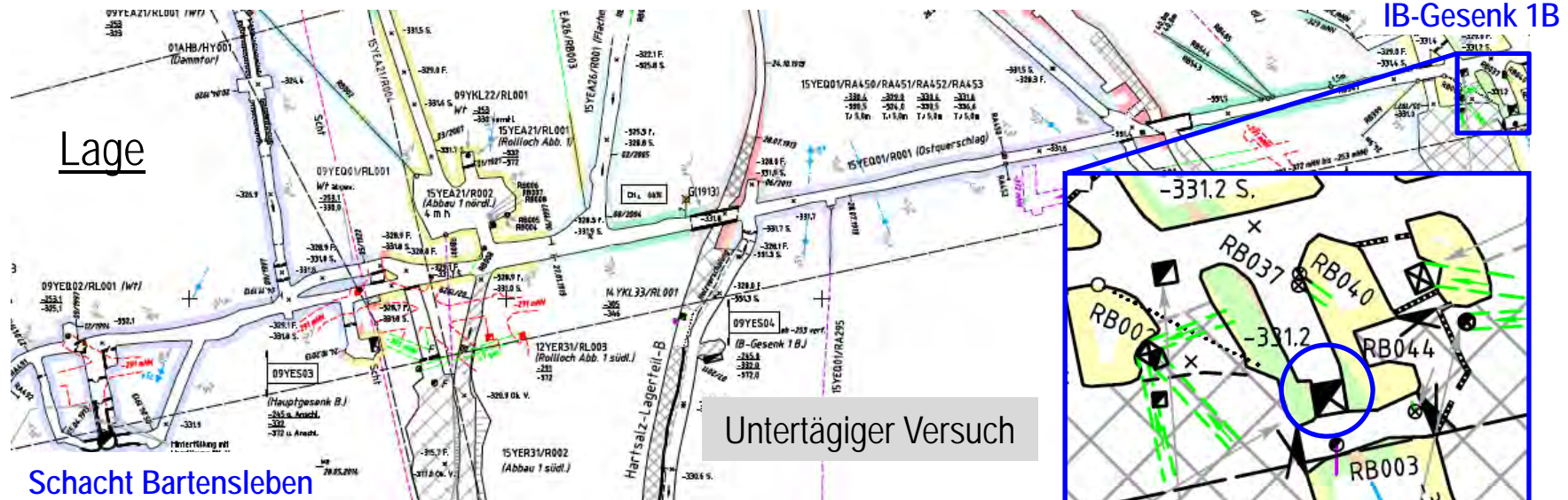
Laborversuche

Quelle: TU Freiberg



Übertägiger Versuch

Quelle: TU Freiberg



Lage

Schacht Bartensleben

Untertägiger Versuch

IB-Gesenk 1B

www.dbe.de

Versuchsziele

Nachweis der Handhabbarkeit

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

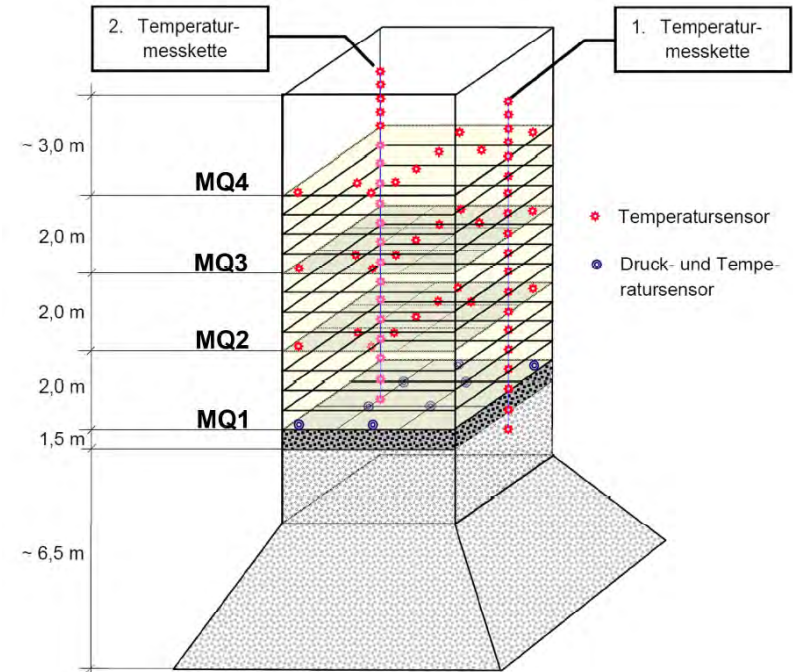
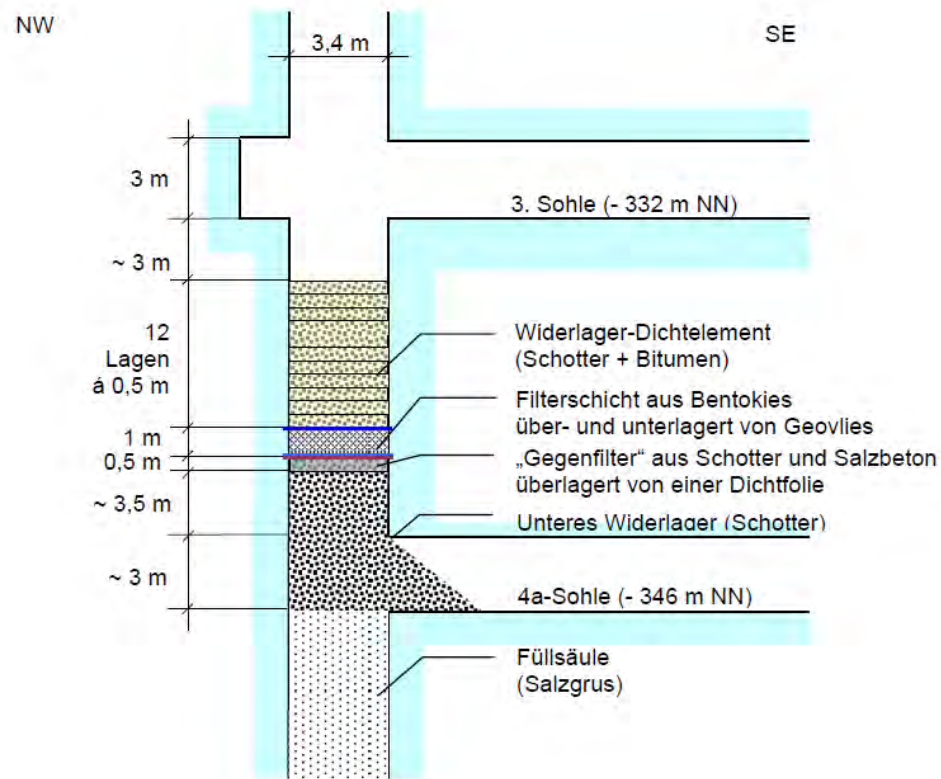
sowie

- 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.

Bauwerksentwurf und Instrumentierung



Versuchsvorbereitung

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



www.dbe.de

Versuchsvorbereitung

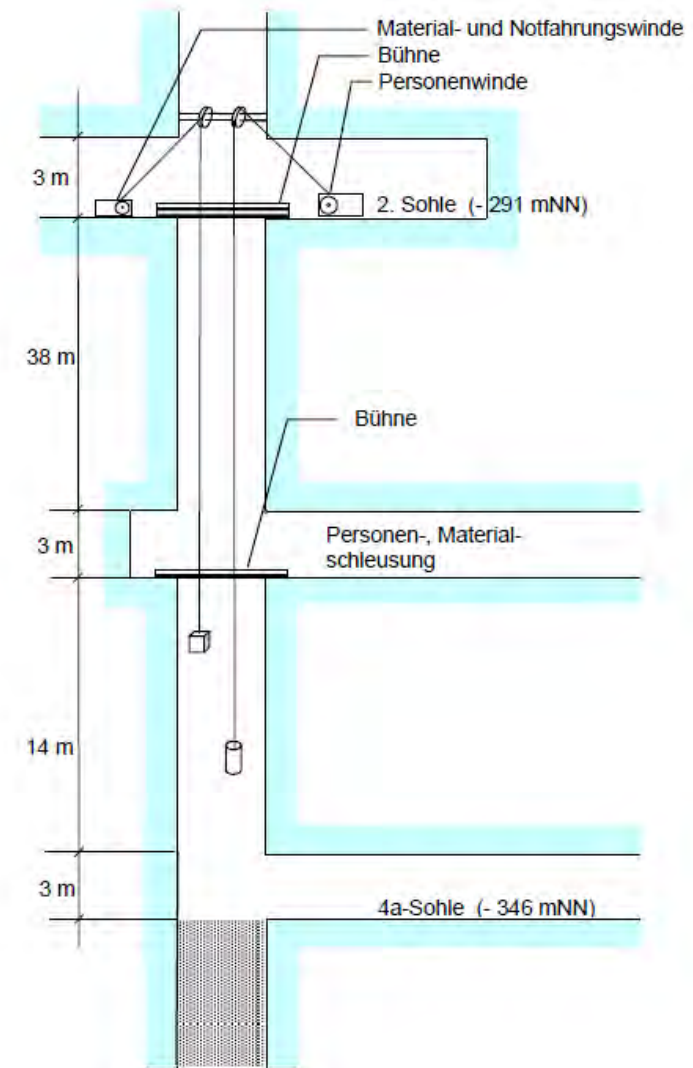
Herstellung gefüllertes Bitumen



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



Arbeits- und Gesundheitsschutz

- Absturz von Personen und Gegenständen
 - Stets Abdecken oder Sichern offener Grubenbaue
 - Tragen von Höhensicherungsgerät in Gefährdungsbereichen
 - Personenfahrgang 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 durchschlägigen 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

Bauablauf

Einbau vertikaler Temperaturmessketten



Quelle: TU Freiberg

www.dbe.de

Bauablauf

Probeverdichtung des Schotters



www.dbe.de

Bauablauf

Bau des Widerlagers



www.dbe.de

Bauablauf

Einbau Gegenfilter und Filterschicht, inkl. Prüfung



www.dbe.de

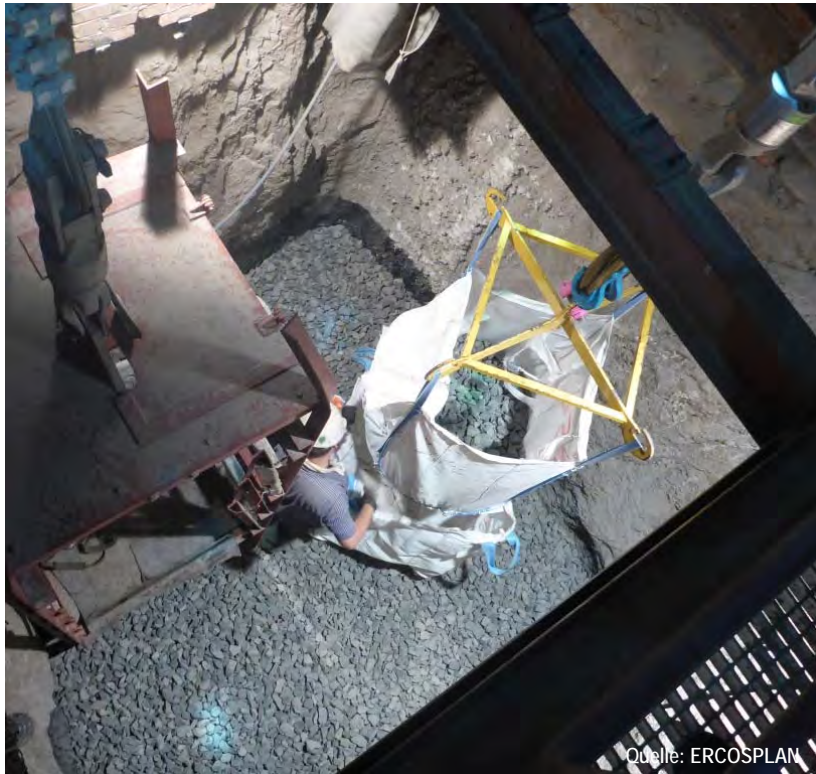
Bauablauf

Voranstrich Halobit



Bauablauf

Einbau und Verdichtung des Schotters



www.dbe.de

Bauablauf

Anliefern, Erhitzen und Umfüllen des Bitumens



www.dbf.de

Bauablauf

Transport des Vergusskochers nach u. T.



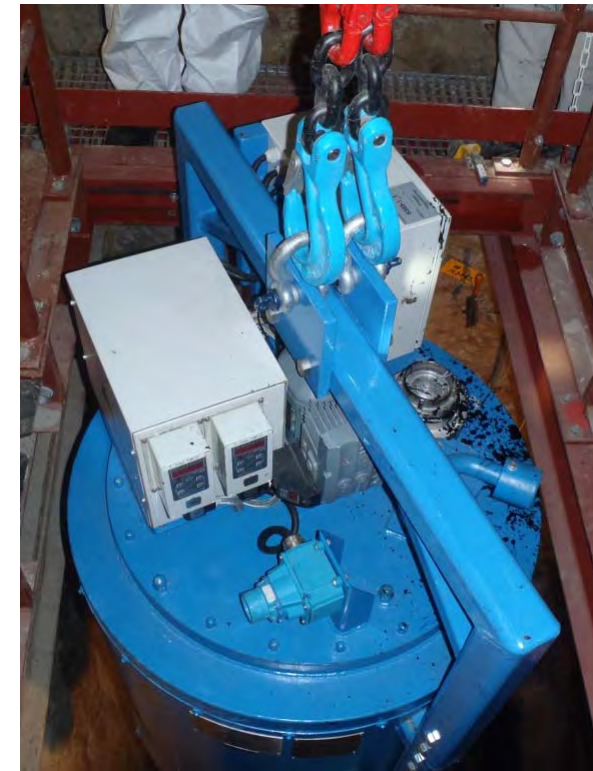
Quelle: ERCOSPLAN



www.dbe.de

Bauablauf

Herablassen des Vergusskochers in das IB-Gesenk



www.dbe.de

Bauablauf

Einfahren des Personals in das IB-Gesenk



www.dbe.de

Bauablauf

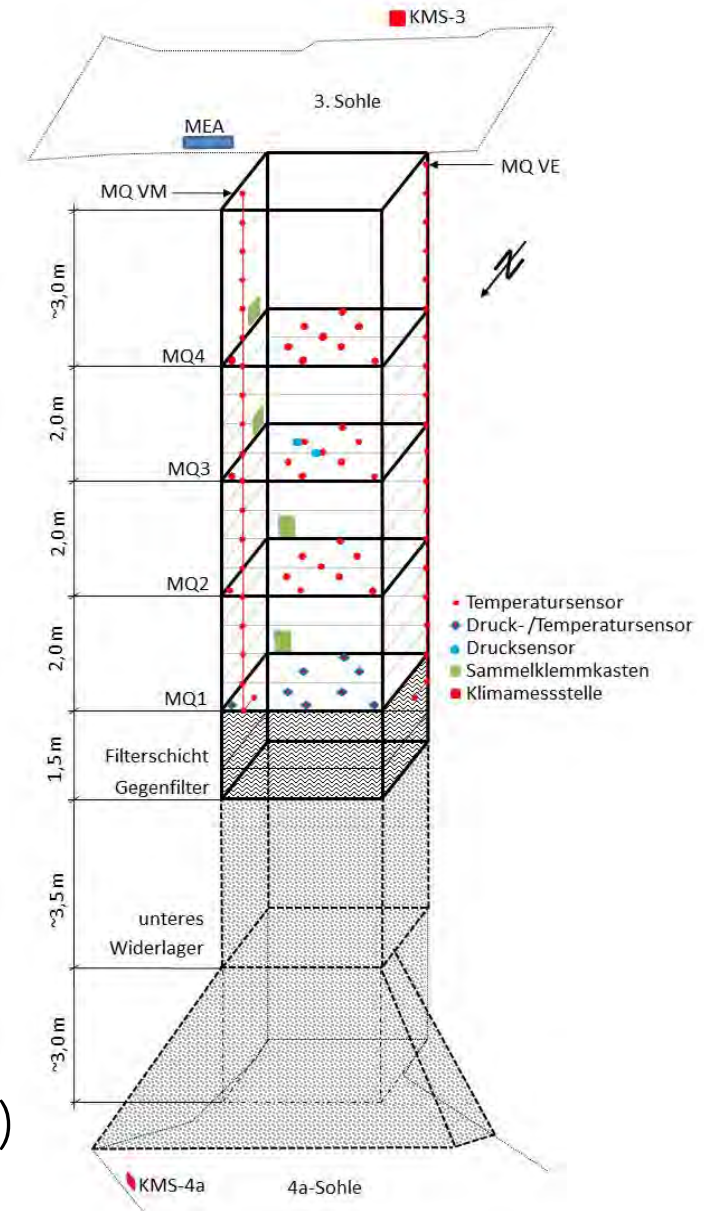
Vergießen mit Bitumen



www.dbe.de

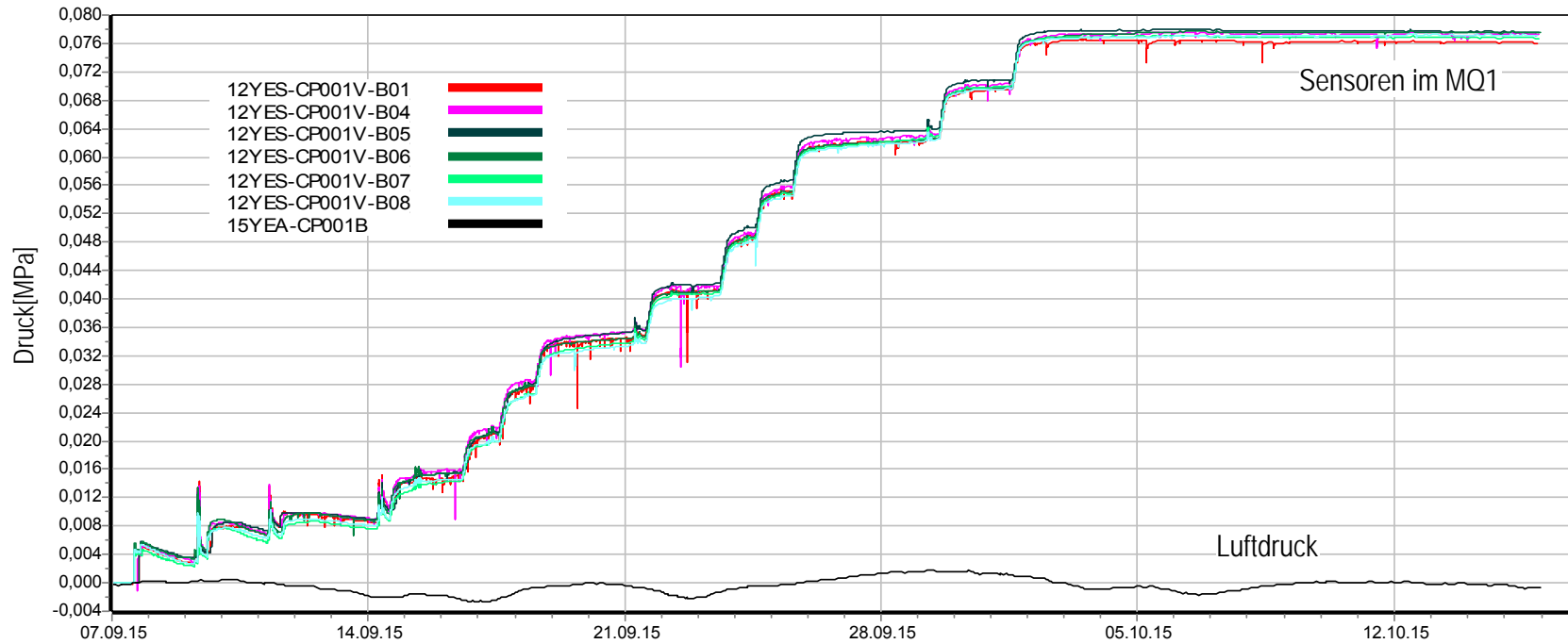
Geotechnische Messungen

- 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)



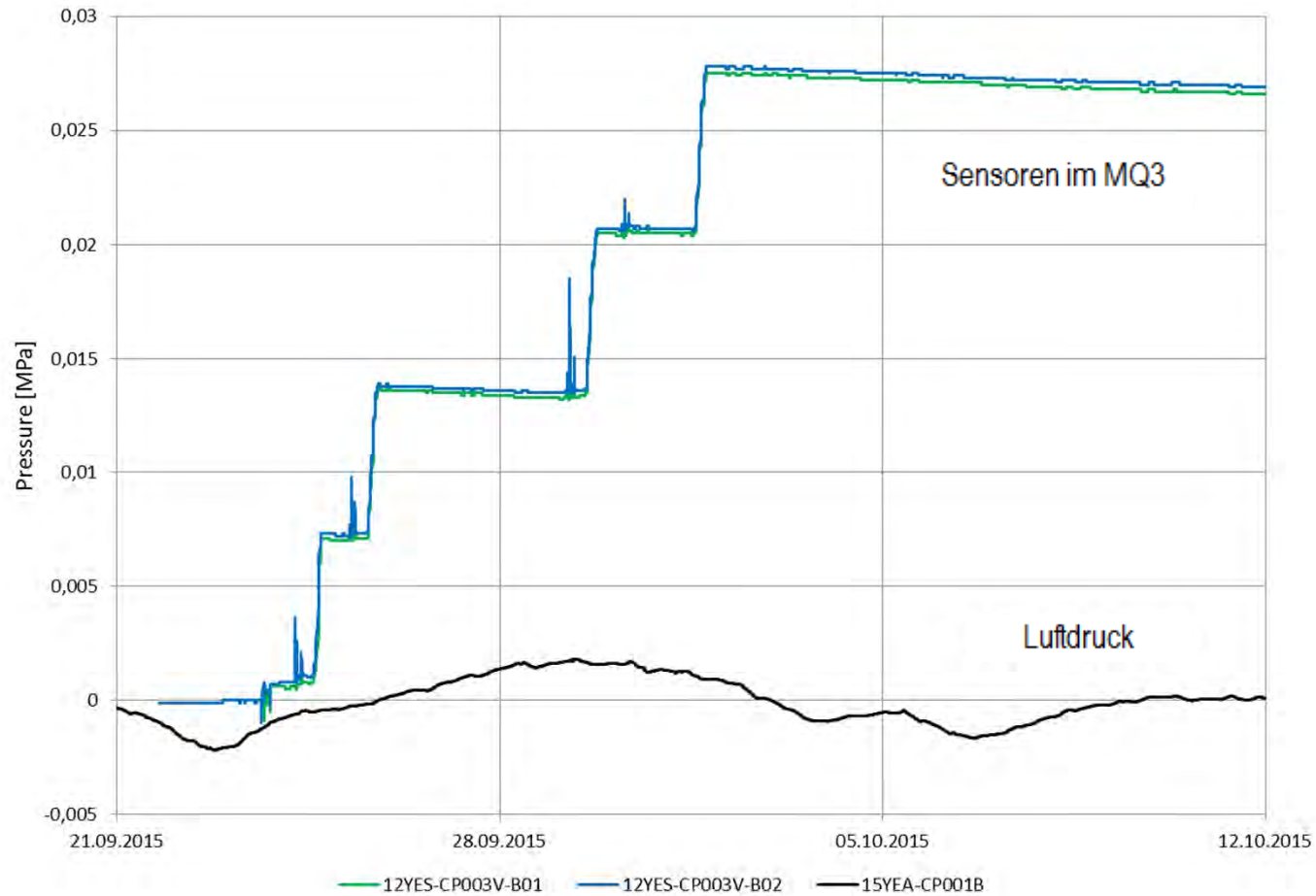
Ergebnisse

Messergebnisse Porendruckmessungen im MQ1 (0,0 m)



Ergebnisse

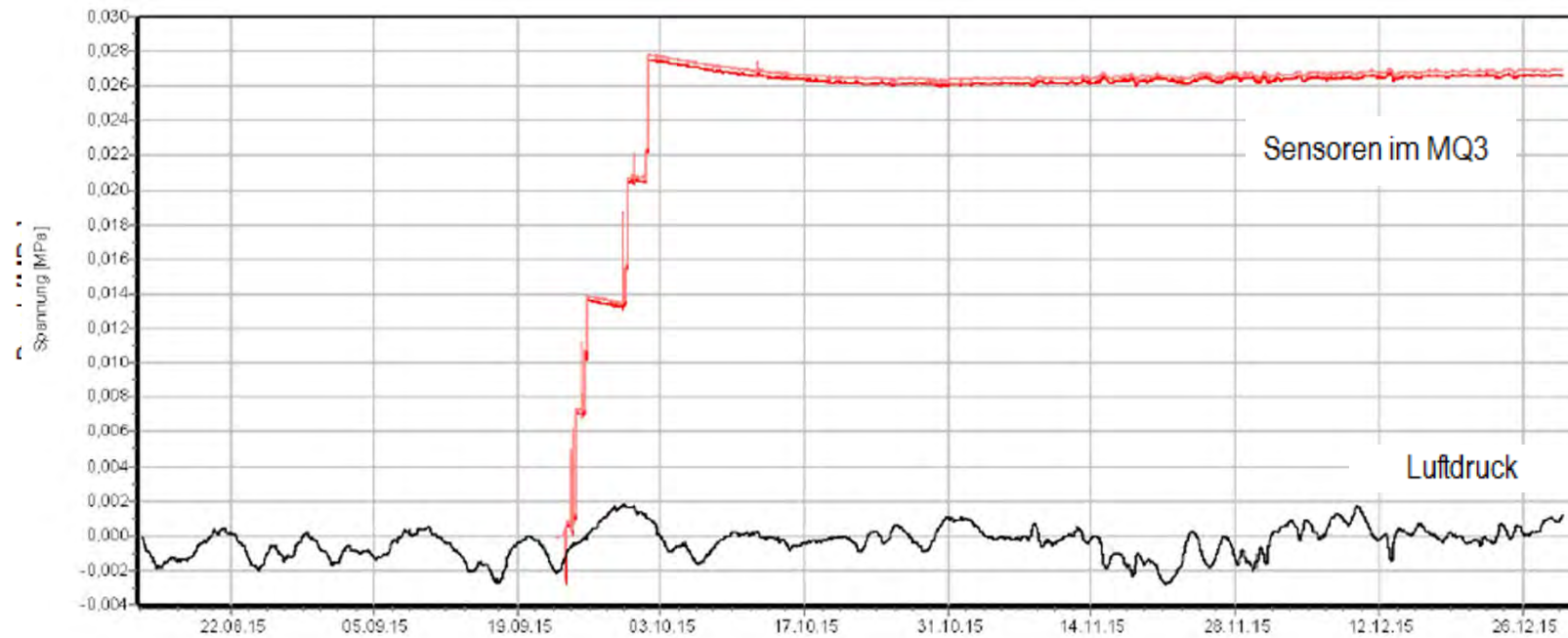
Messergebnisse Porendruckmessungen im MQ3 (4,0 m)



www.dbe.de

Ergebnisse

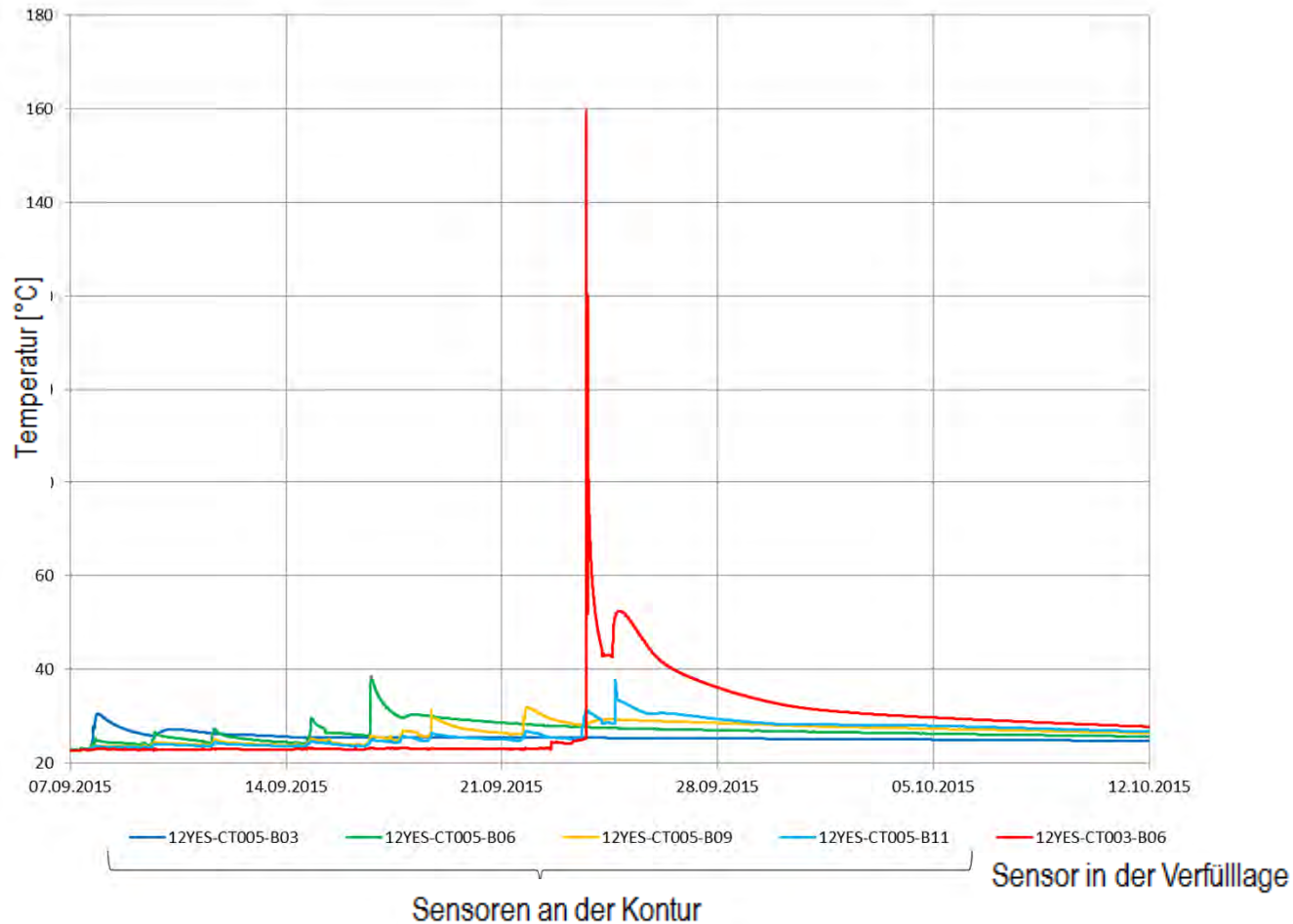
Messergebnisse Porendruckmessungen im MQ3 (4,0 m) bis 12/2015



www.dbe.de

Ergebnisse

Messergebnisse Temperaturmessungen im MQ3 (4,0 m)



www.dbe.de

Restporosität

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

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

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)	

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 % \pm 1%
 - aus Druckmessungen: ca. 1,7 % \pm 0,3%

=> Versuch erfolgreich durchgeführt!

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:

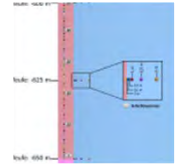
Freiberg

Projektbetreuung:



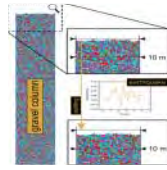
03./04.05.2017





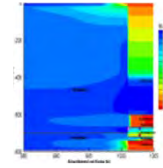
Einbau von Bitumen

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



Schottersäulen

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



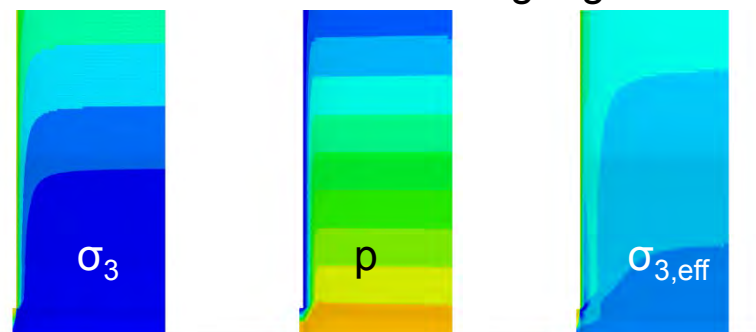
Strömungsprozesse im Bentonit

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

Einbau von Bitumen

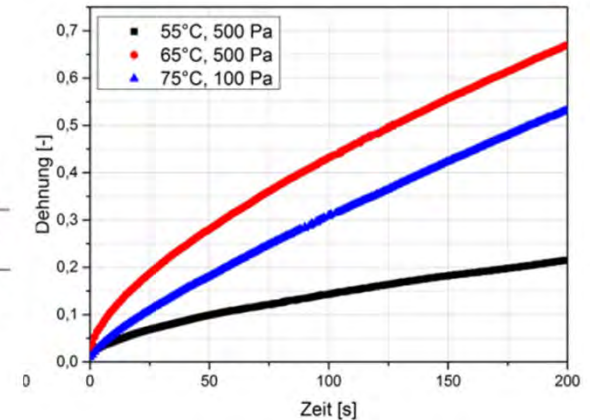
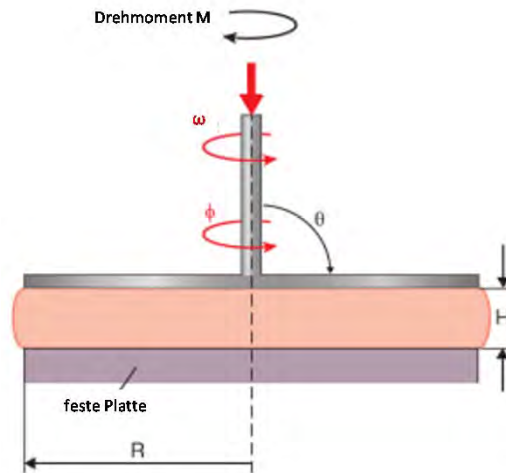
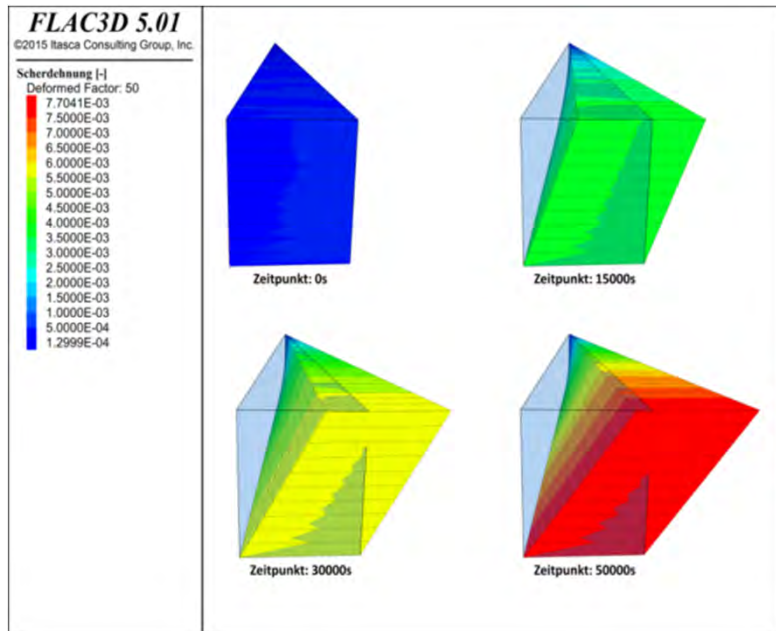
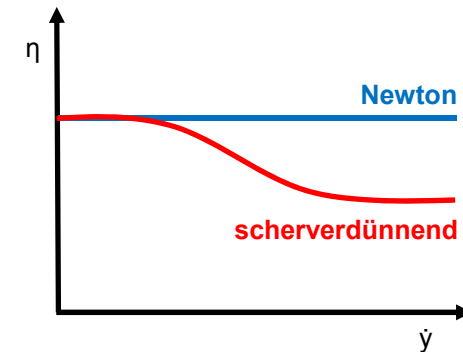
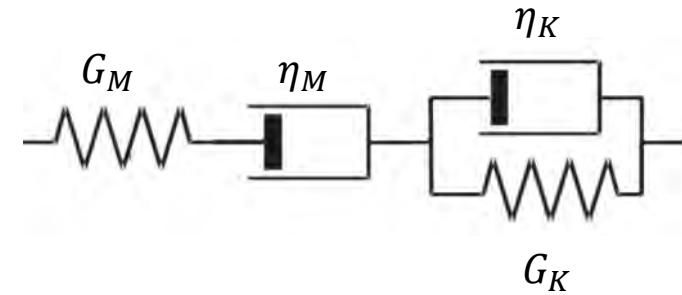
Hintergrund

- 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



Materialverhalten Bitumen

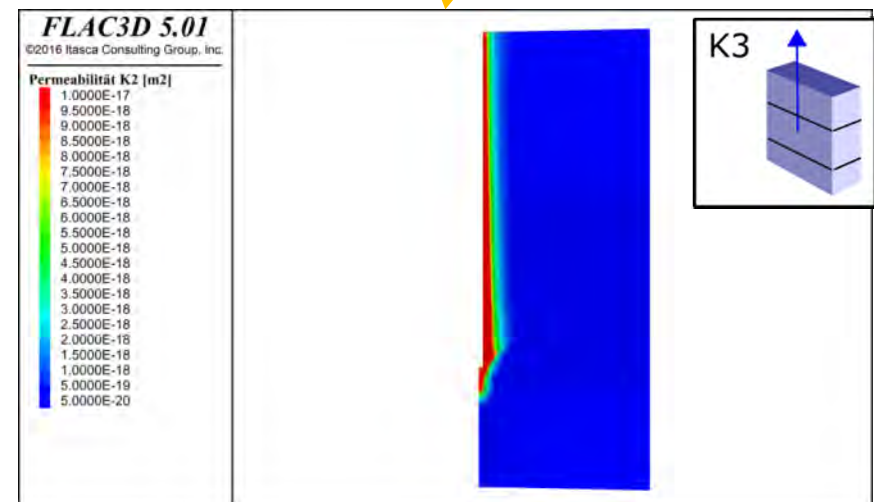
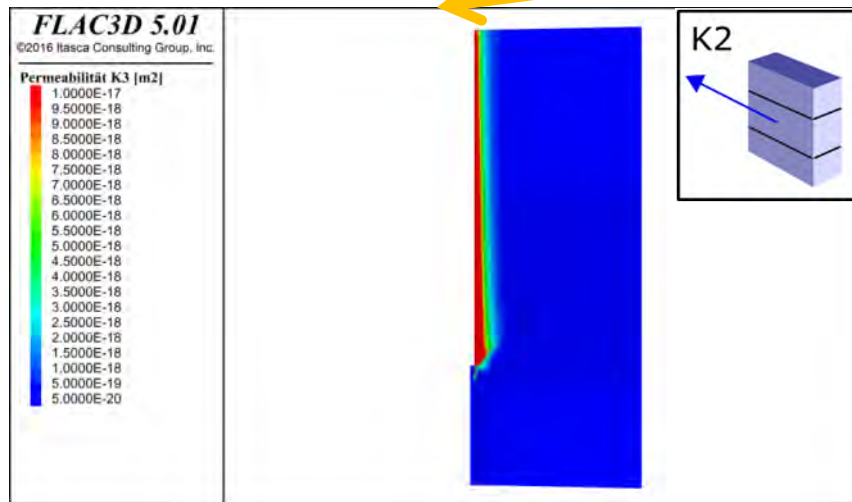
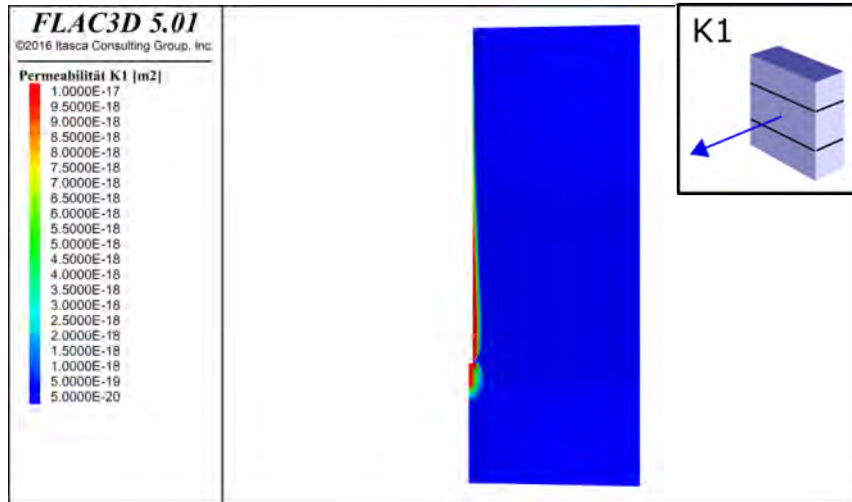
- Kriechverhalten von Bitumen wird durch Burgers-Modell abgebildet
- Erweiterung um Strukturviskosität (Cross-WLF)
- Temperaturabhängigkeit über WLF-Funktion
- Einfluss des Kelvinanteils sinkt mit Temperaturanstieg
- Flüssigkeitscharakter (Viskosität des Maxwellkörpers) tritt in den Vordergrund



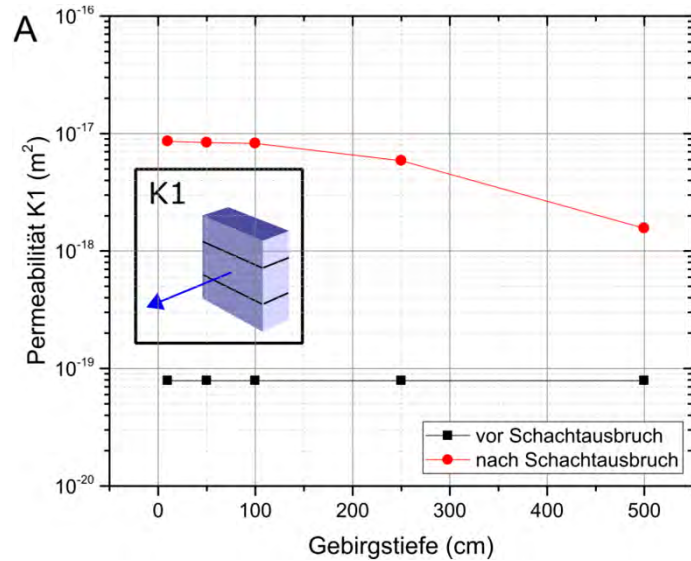
Permeabilitätswerte nach Schachtausbruch

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

Parallel zur Schachtwandung ergeben sich höhere Permeabilitätswerte



Permeabilitätswerte vor vs. nach Schachtausbruch



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



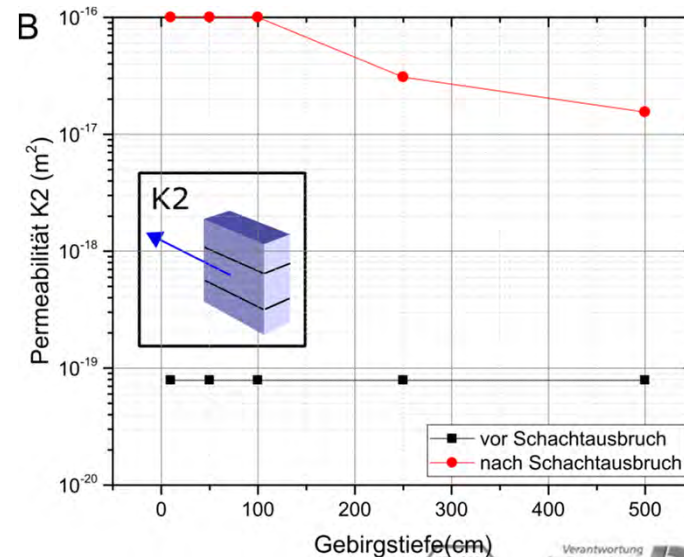
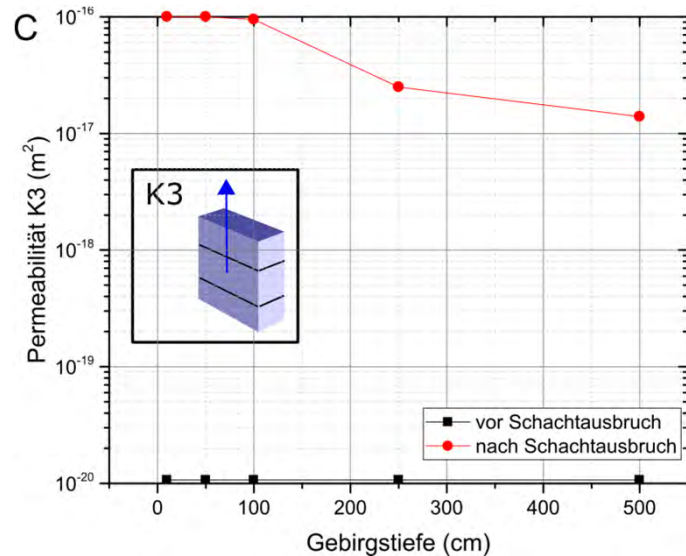
K2 steigt von $7,9E-20m^2$ auf $1,0E-16m^2 - 1,6E-17m^2$



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

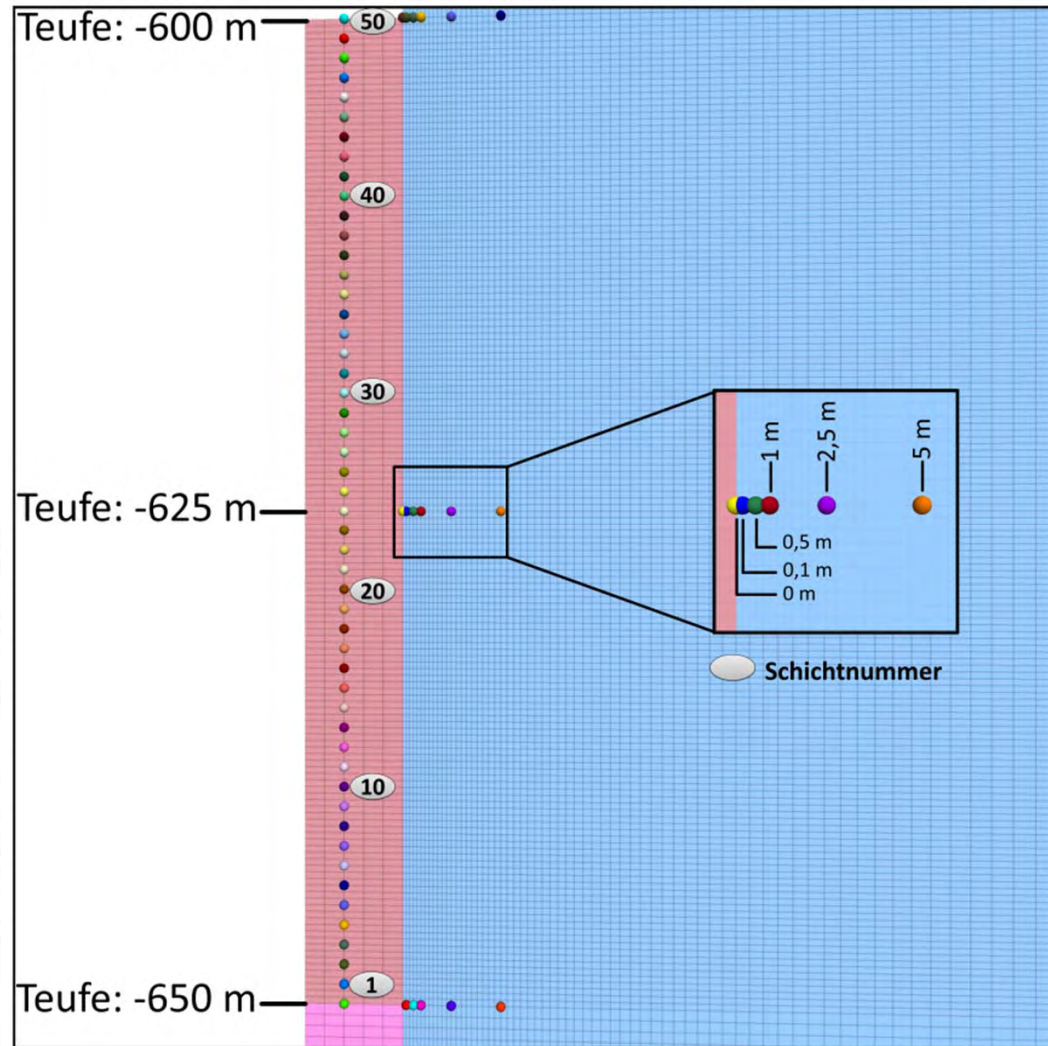
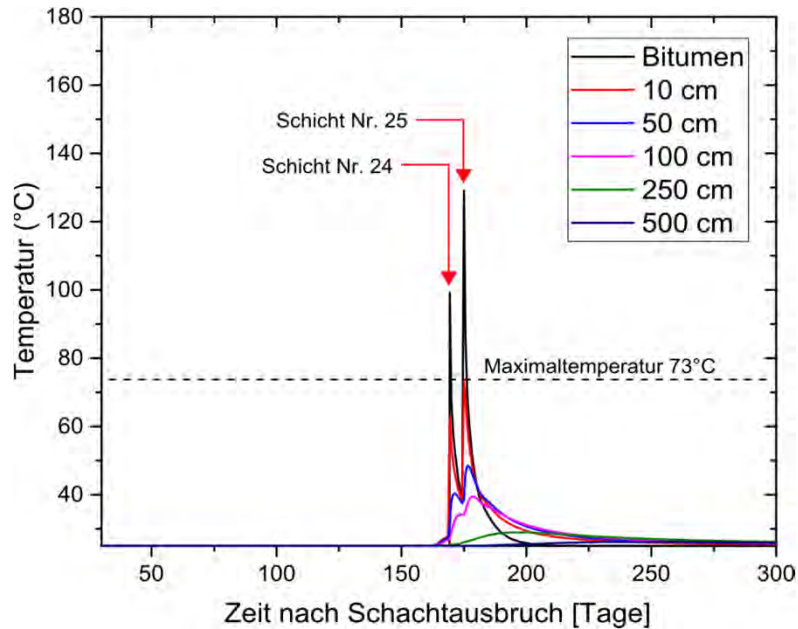


Parallel zur Schachtwandung ist die Permeabilität um eine Größenordnung höher



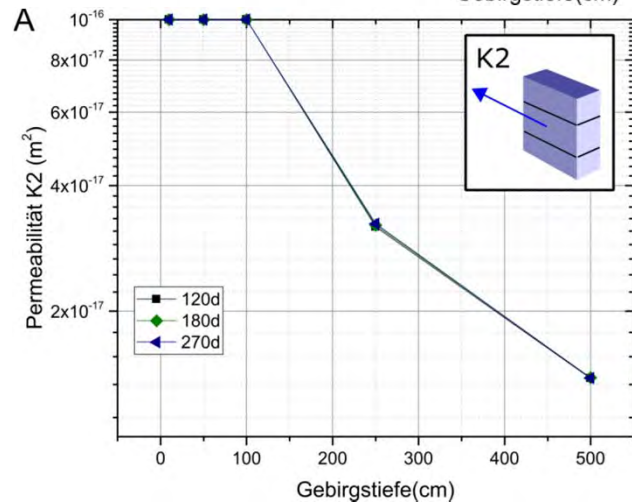
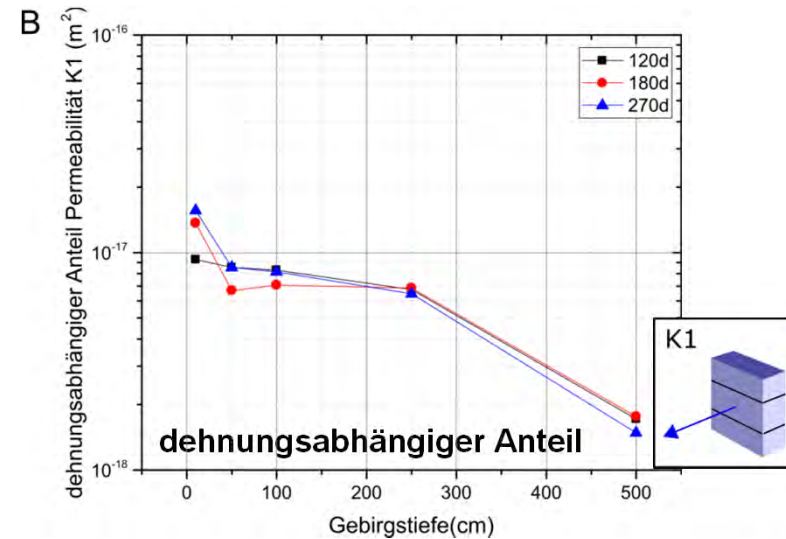
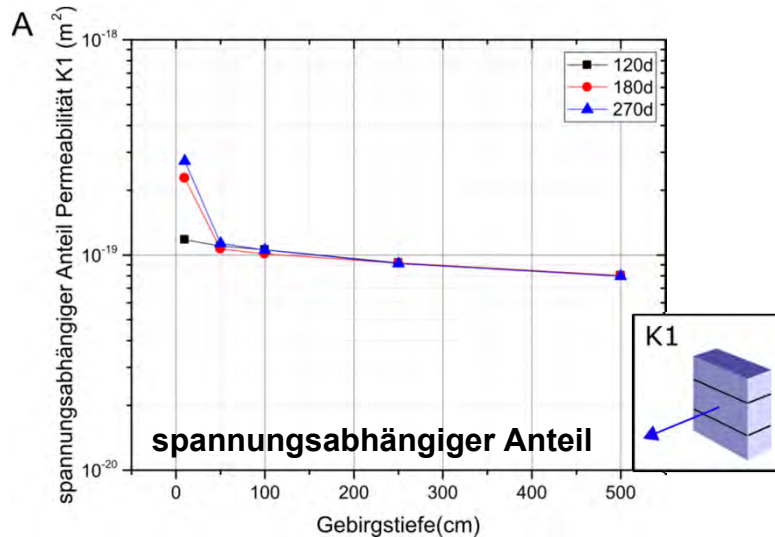
schichtweiser Einbau Bitumensäule

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

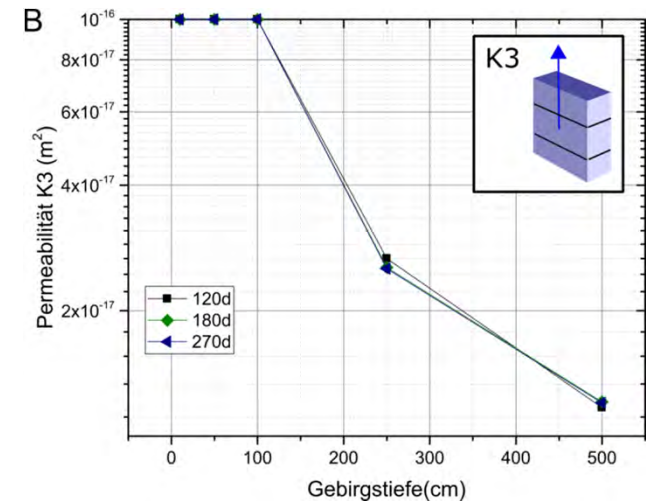


schichtweiser Einbau Bitumensäule

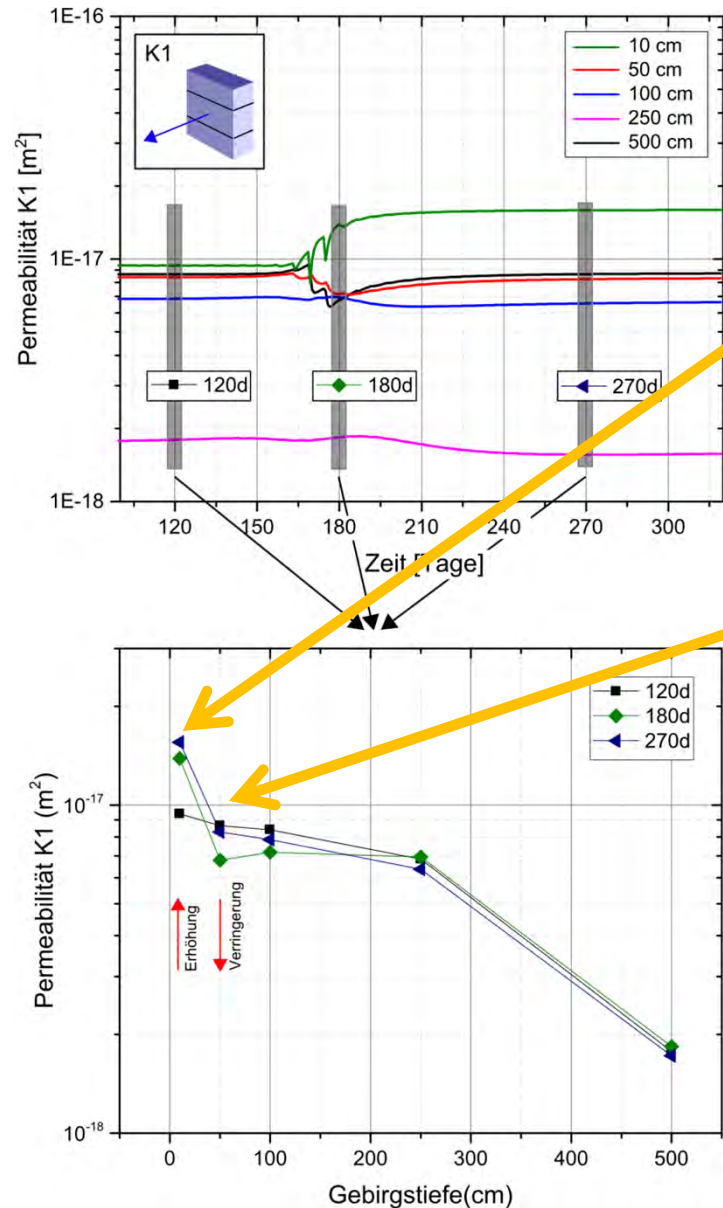
- senkrecht zur Schachtwandung: der durch die Thermik induzierte plastische Dehnungsanteil ist maßgeblich für die Permeabilität



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



schichtweiser Einbau Bitumensäule



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

Schottersäulen

repräsentative Partikelproben

➔ partikelbasierter Rechencode PFC

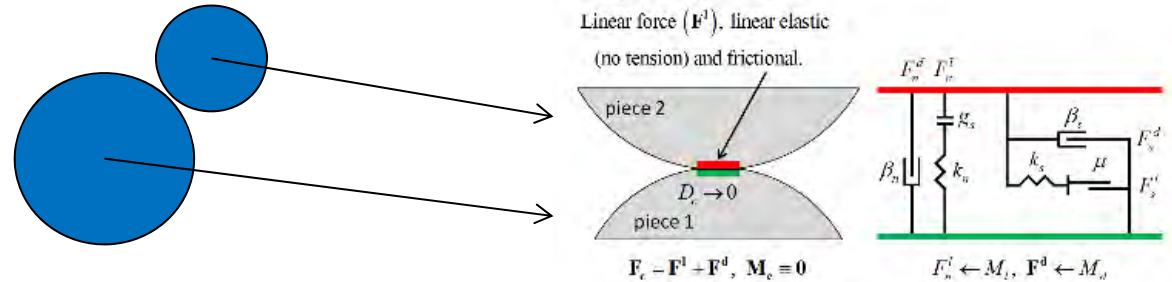
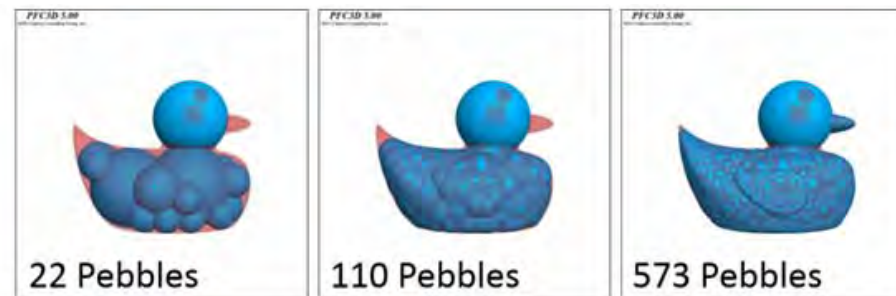
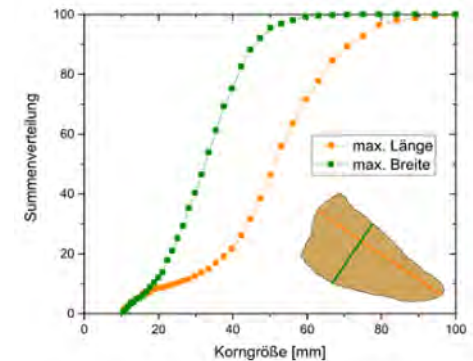


Figure 1: Behavior and rheological components of the linear model.

➔ Clump-Logik erlaubt realistische Abbildung beliebig geformter Partikel



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



repräsentative Partikelproben

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

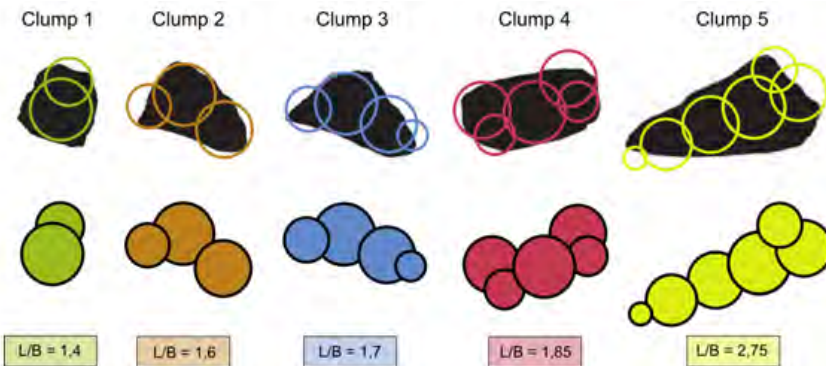
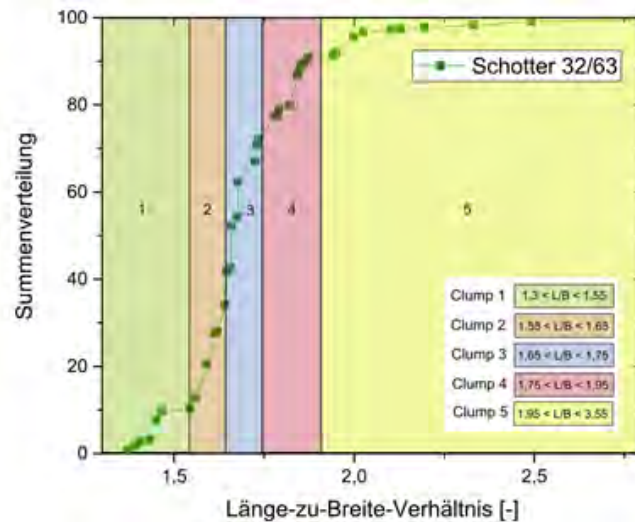


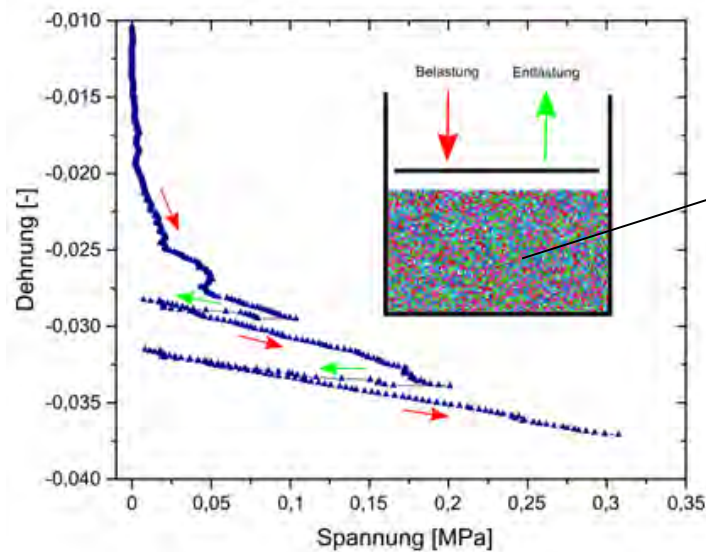
Abb. 5: Darstellung der generierten Partikelformen.

- ➔ 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
 $2 \times 10^8 \text{ Pa}$

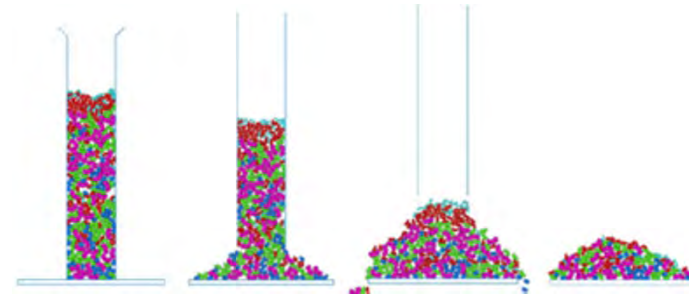
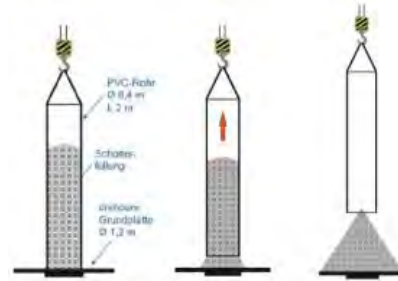
- ➔ Aus der Hystereseurve zwischen Ent- und Wiederbelastung konnte ein Steifemodul von $\sim 0,5 \text{ GPa}$ abgeschätzt werden

Kennwertermittlung

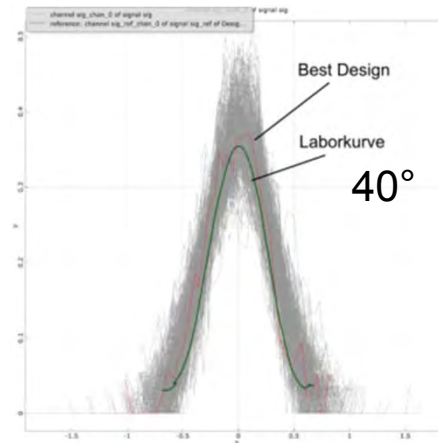
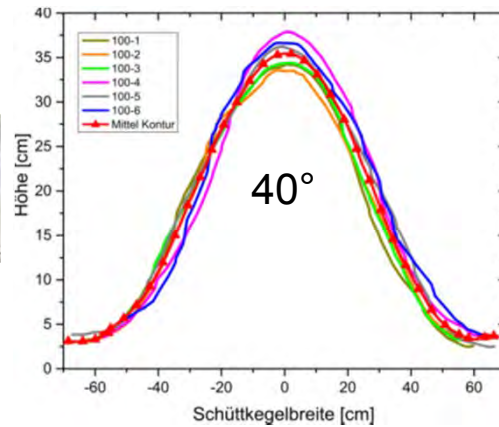
Reibungskoeffizient (μ)



➔ Bestimmung des Reibungskoeffizienten durch die Nachrechnung eines Schüttversuchs im Labor



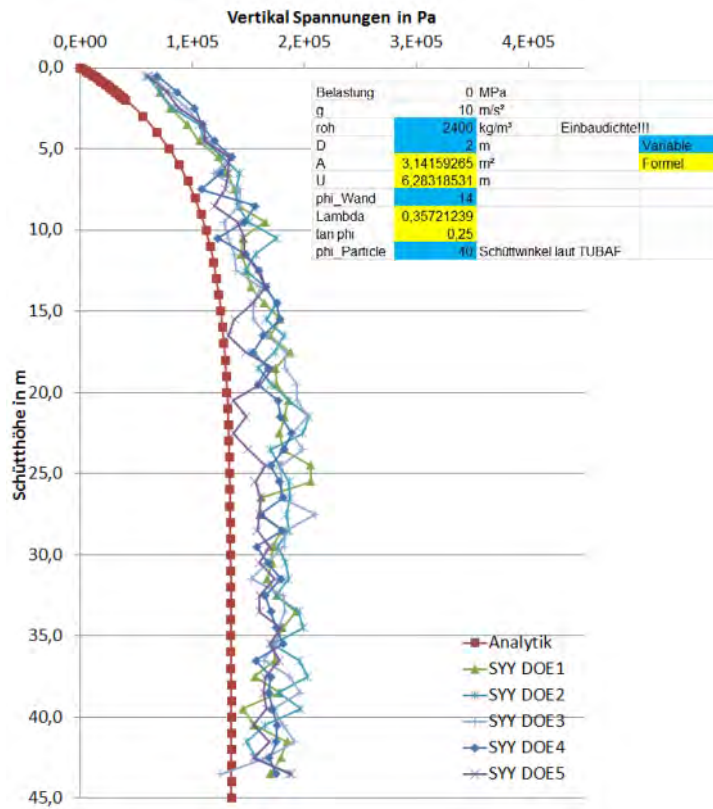
➔ Ausmessung des Schüttkegels und Abgleich des Verlaufs mit Simulationsergebnissen



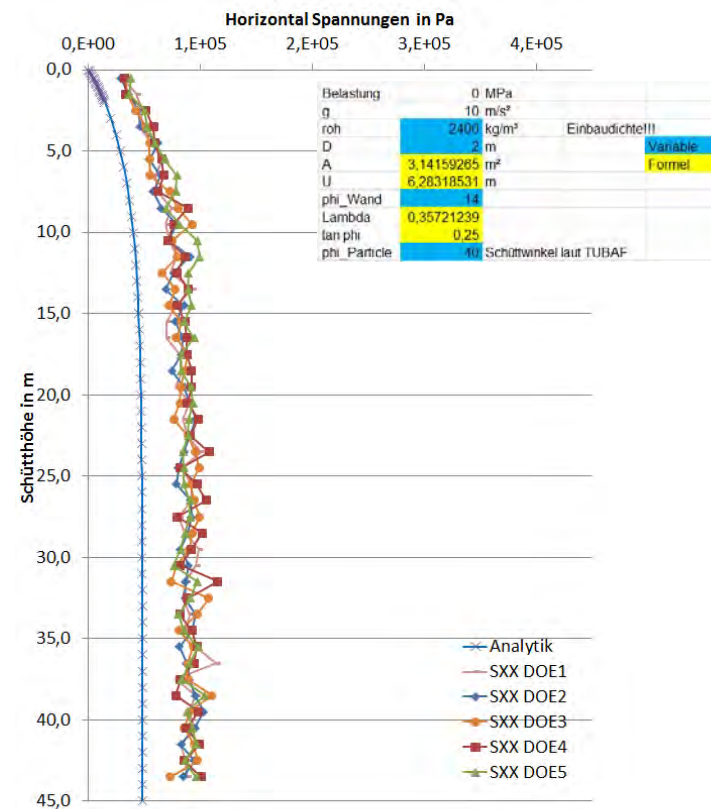
Setzung einer Schottersäule

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

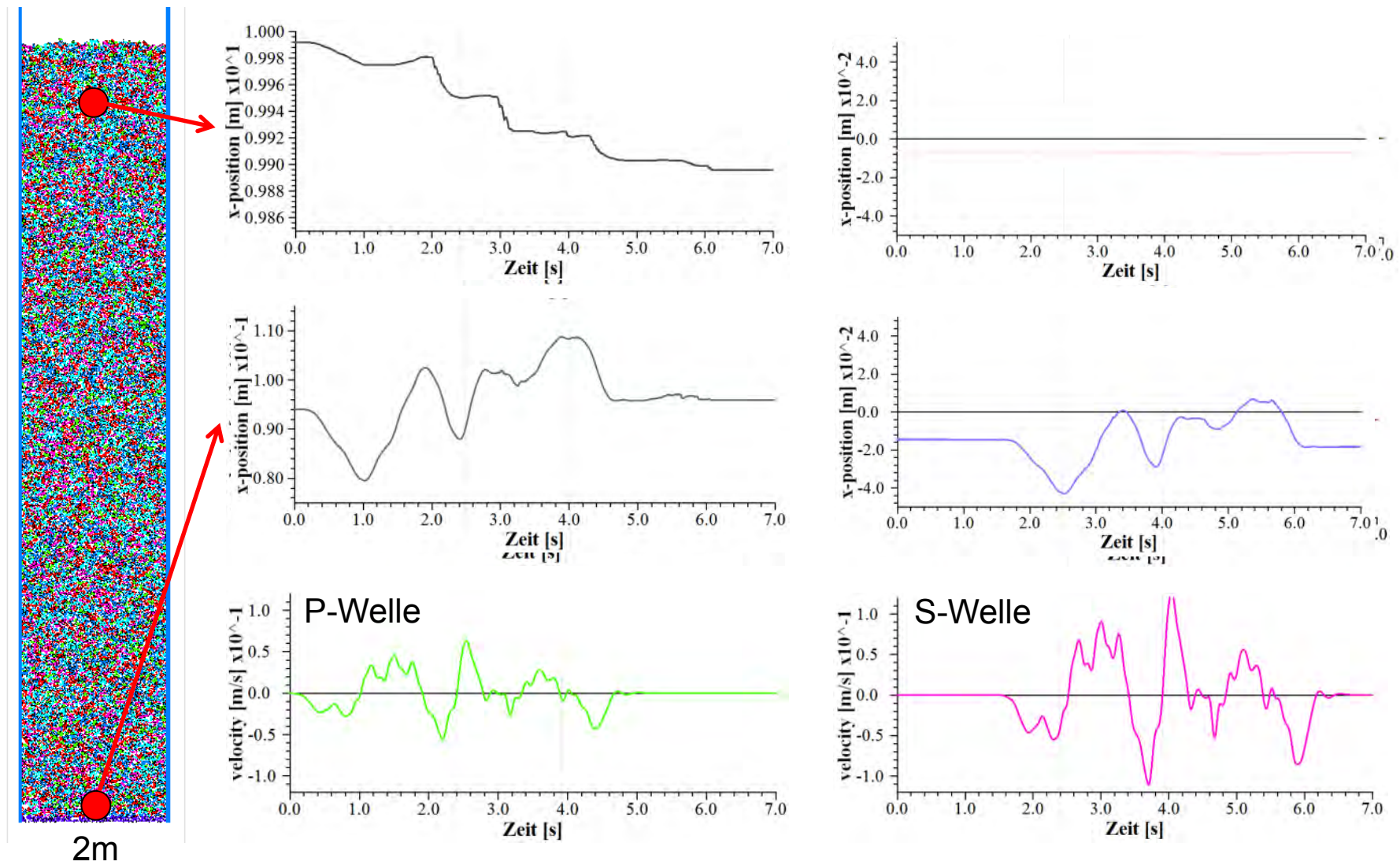
SYX



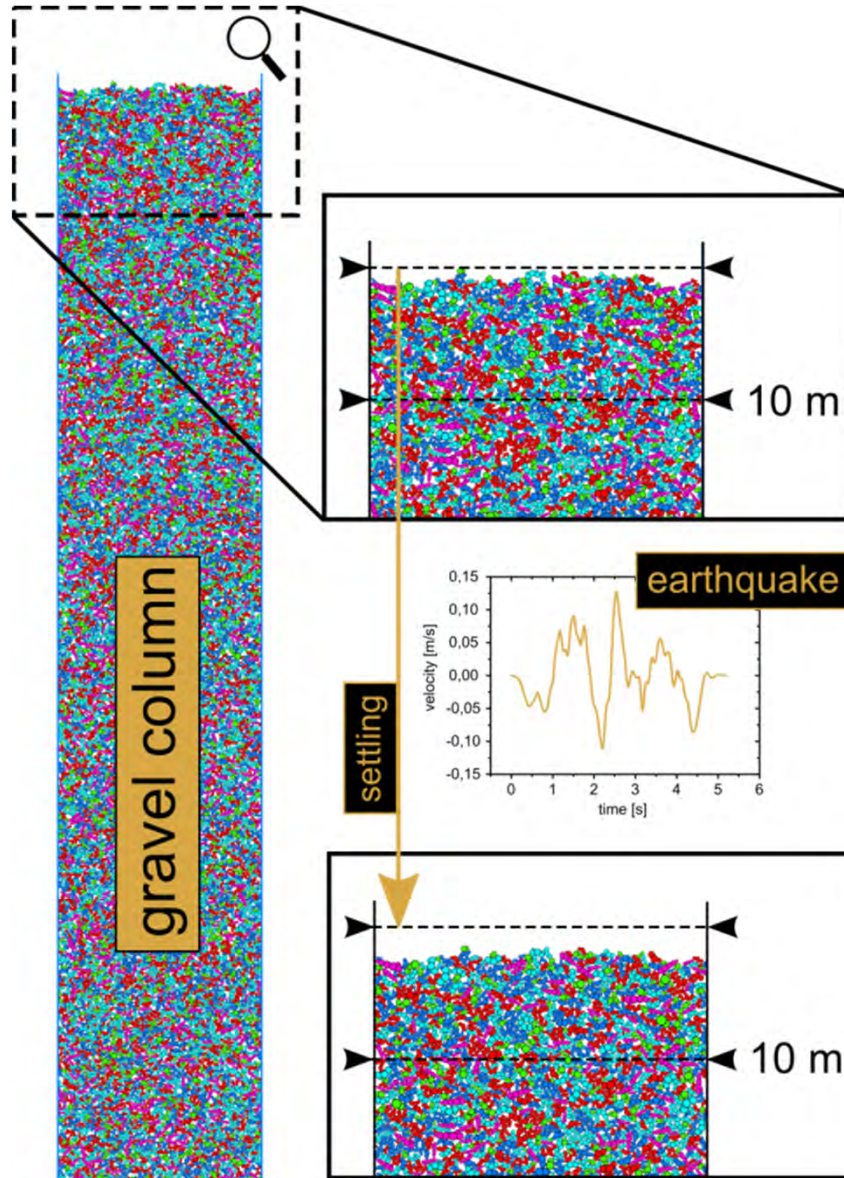
SXX



Setzung einer Schottersäule bei Erdbeben



Setzung einer Schottersäule bei Erdbeben



➔ Setzungen von ca. 10cm auf 10m

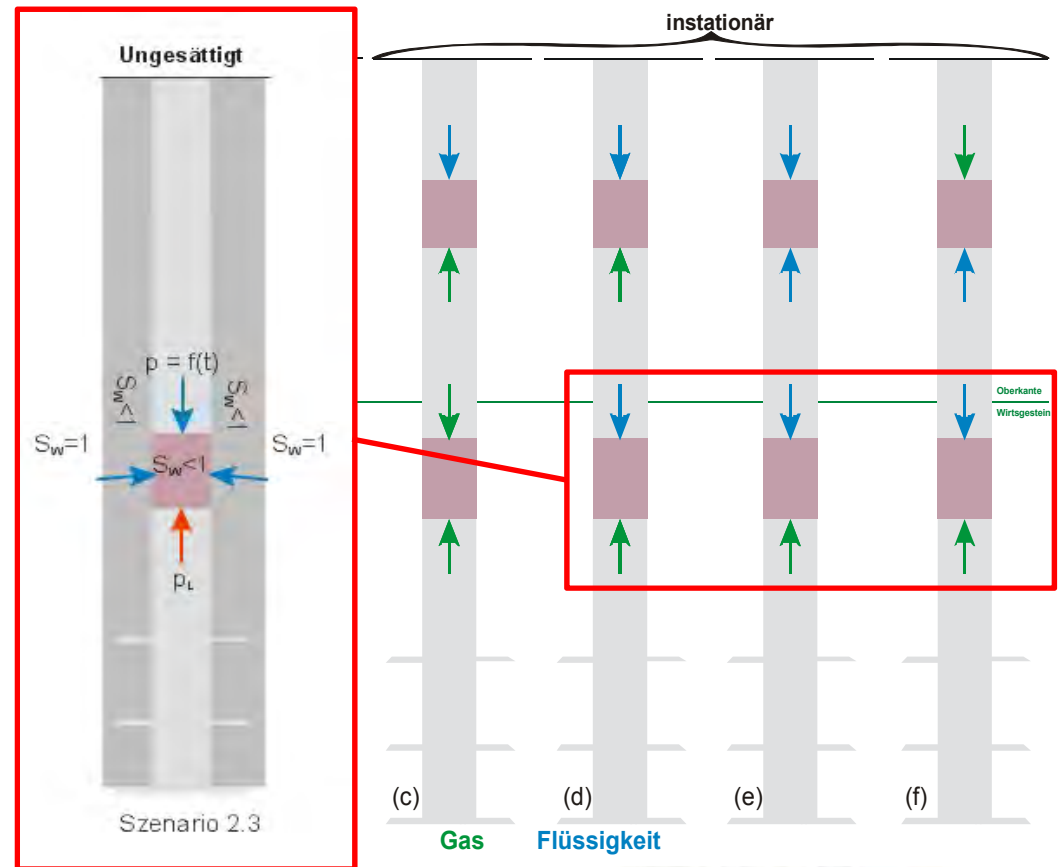
- Modellierungsansatz für die Simulation granularer Medien unter Erdbebenbelastung eignet
- wesentlichen physikalischen Prozesse und die Ausbildung eines Siloeffektes wurden realitätsnah abgebildet
- Systemverhalten nur auf Plausibilität hin überprüft und eine belastbare Validierung der Ergebnisse fehlt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

Strömungsprozesse im Bentonit

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

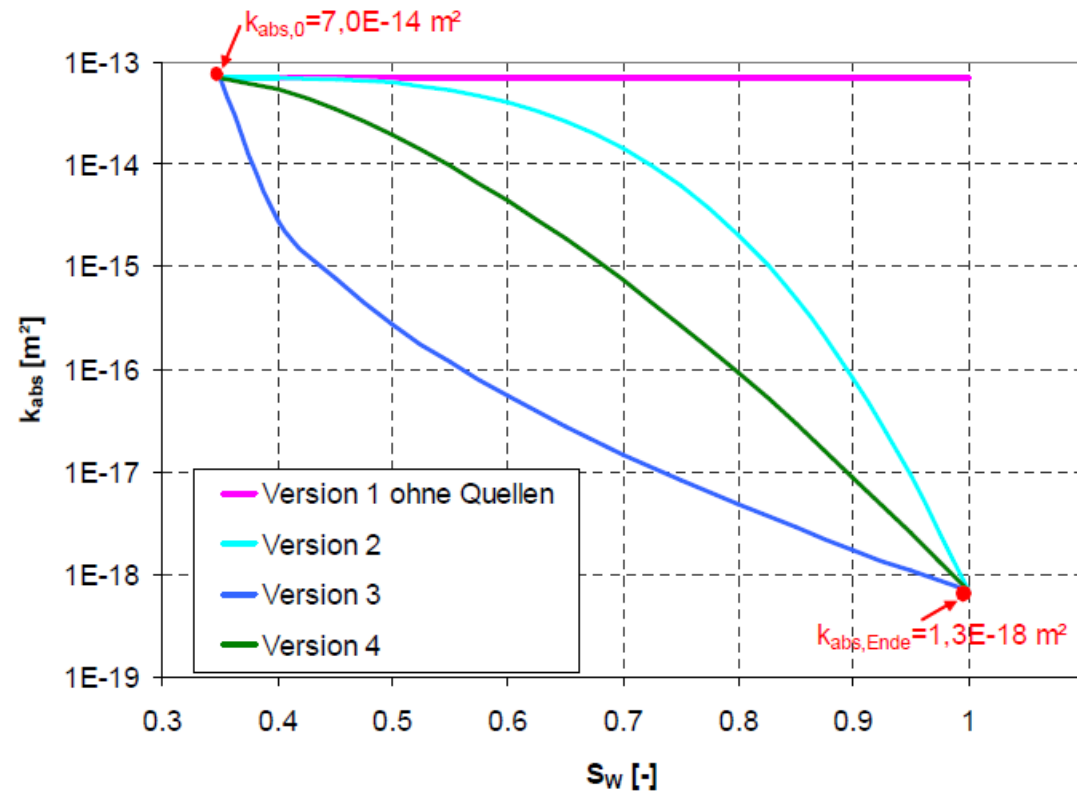
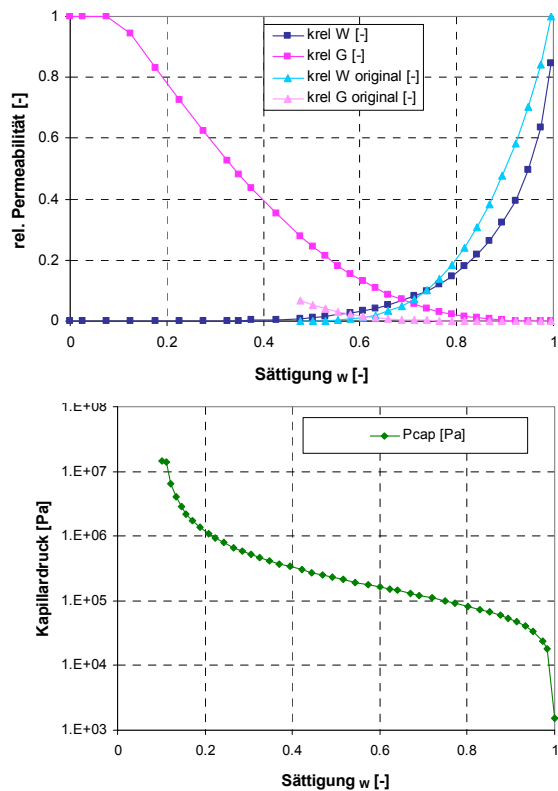


Zweiphasenströmung

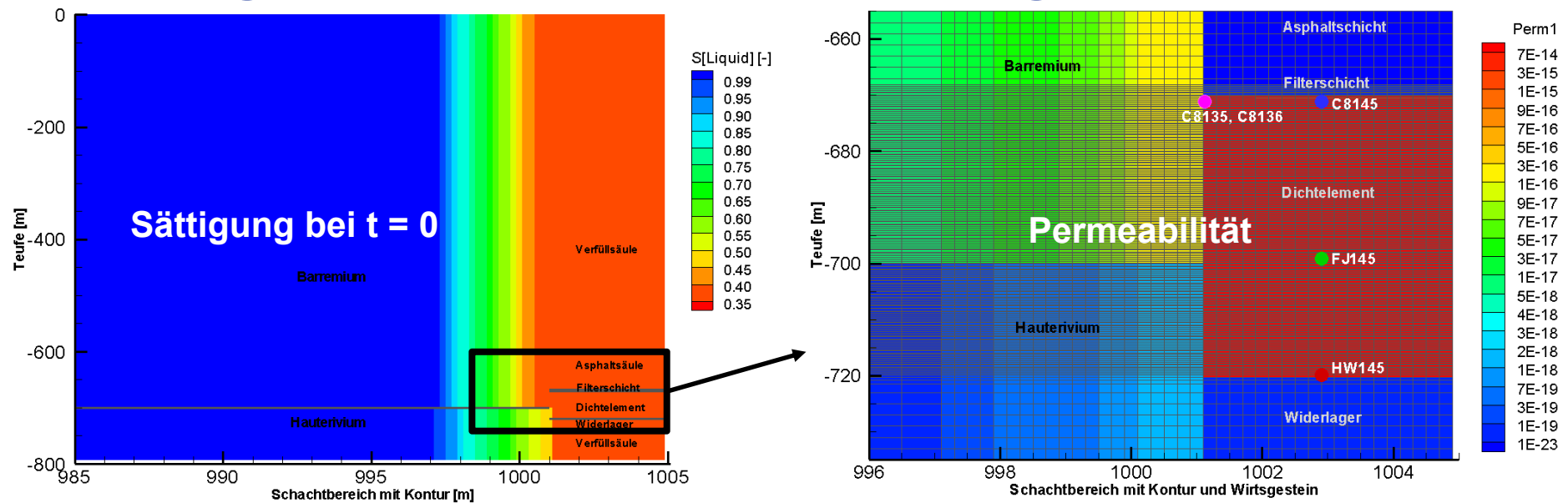
- modelltechnische Abbildung der Zweiphasenströmung im initial trockenen, hoch quellfähigen Bentonit setzt theoretisch folgende Kenntnisse und modelltechnischen Ansätze voraus:
 1. Prozessverständnis und erforderliche Parameter zur Beschreibung der wasser-gehaltsabhängigen Änderung der Porengrößenverteilung 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

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



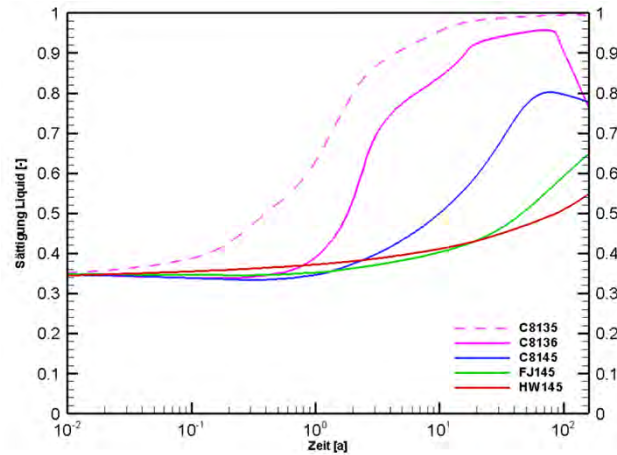
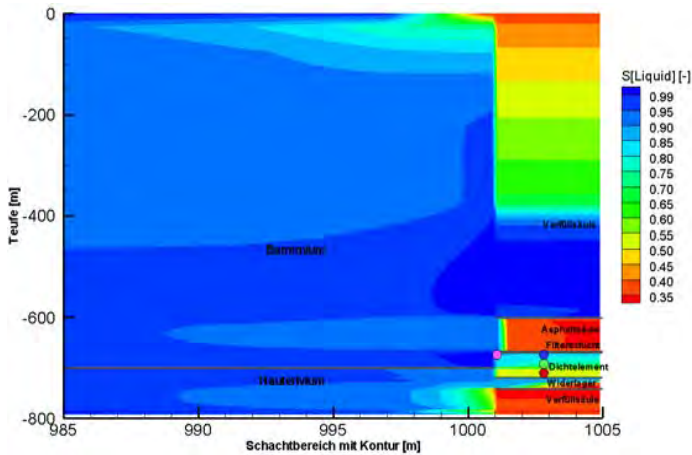
Prognose der Zweiphasenströmung



- Verfüllsäule oberhalb des Dichtsystems 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

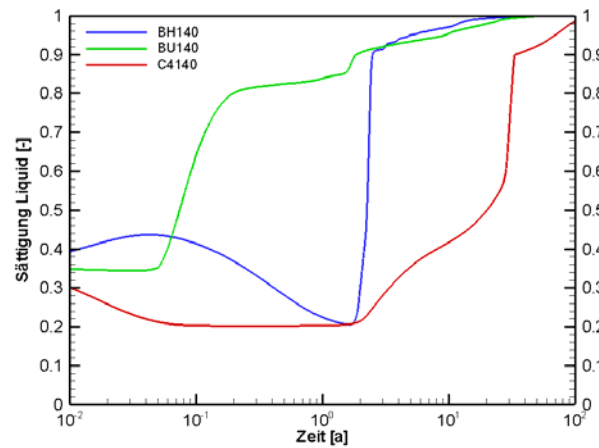
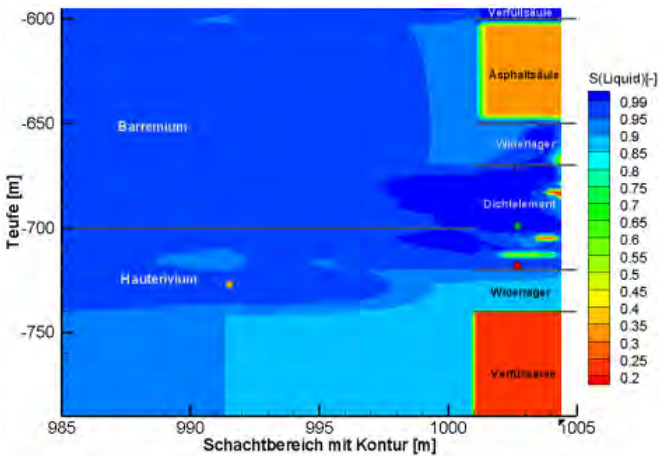
Vergleichsrechnungen

Funktion 1



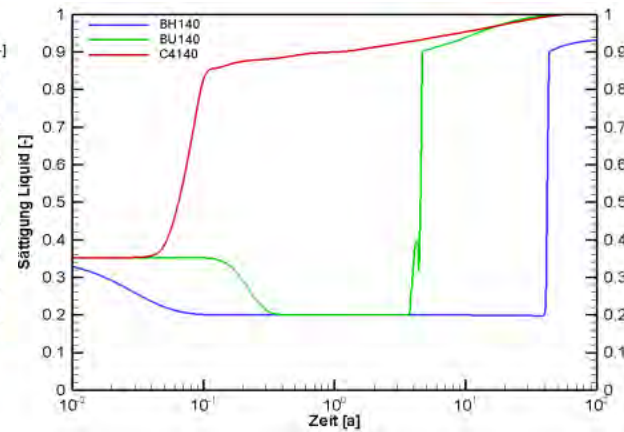
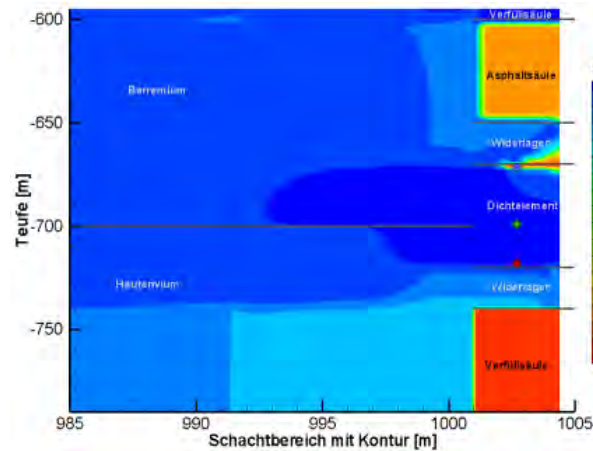
- ohne Quellen wird Aufsättigungsdauer von Gebirgeigenschaften bestimmt
- Zeitdauer für Aufsättigung variiert für die unterschiedlichen Ansätze $k=f(S)$ von ca. 20 bis 100 Jahren

Funktion 3

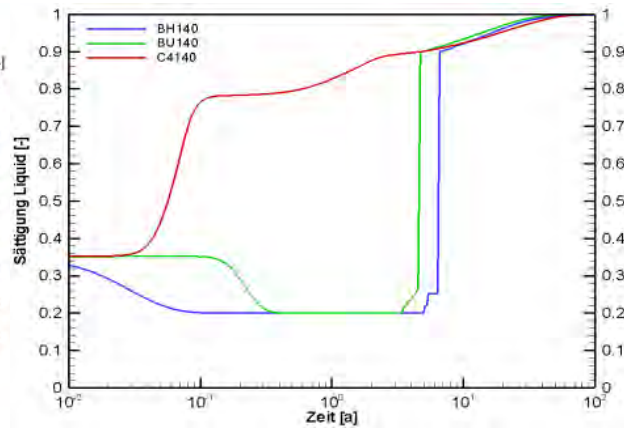
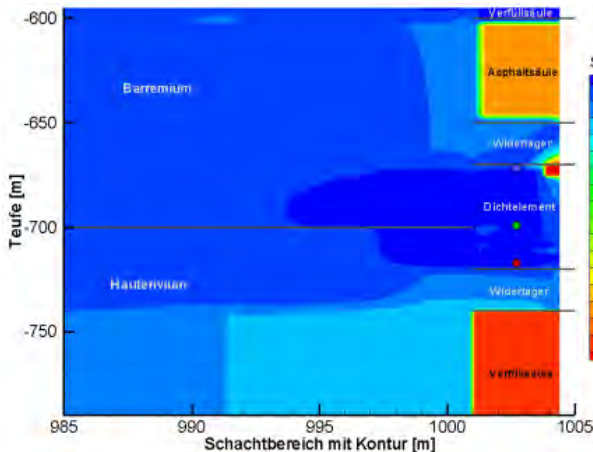


Vergleichsrechnungen

Funktion 2



Funktion 4



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

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 $1E-17 \text{ m}^2$, Liegendformation Hauterivium $1E-19 \text{ m}^2$) 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



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit.**

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 Strömungbarrieren (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 Strömungbarrieren (SB)

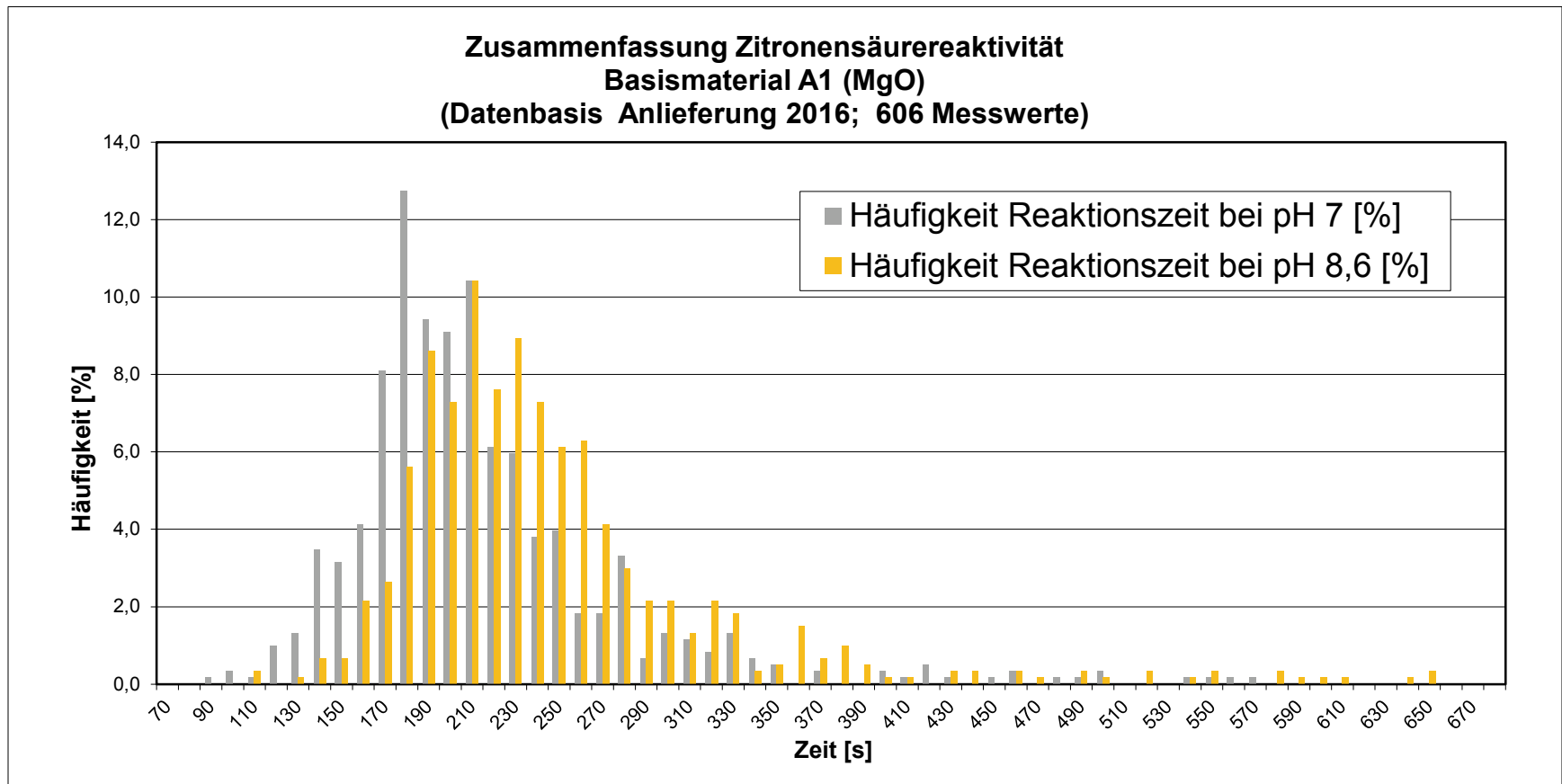
- Zur Untersuchung der Quelleigenschaften wurde ein unter Tage einsetzbarer „Quelldrucktopf“ mit DBE Tec entwickelt und durch Fa. Glötzl gefertigt.
 - Für die Erfassung der Qualität der Zuschlagstoffe und Suspensionseigenschaften wurden mit DBE Tec die entsprechenden Prüfverfahren eingeführt und die 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

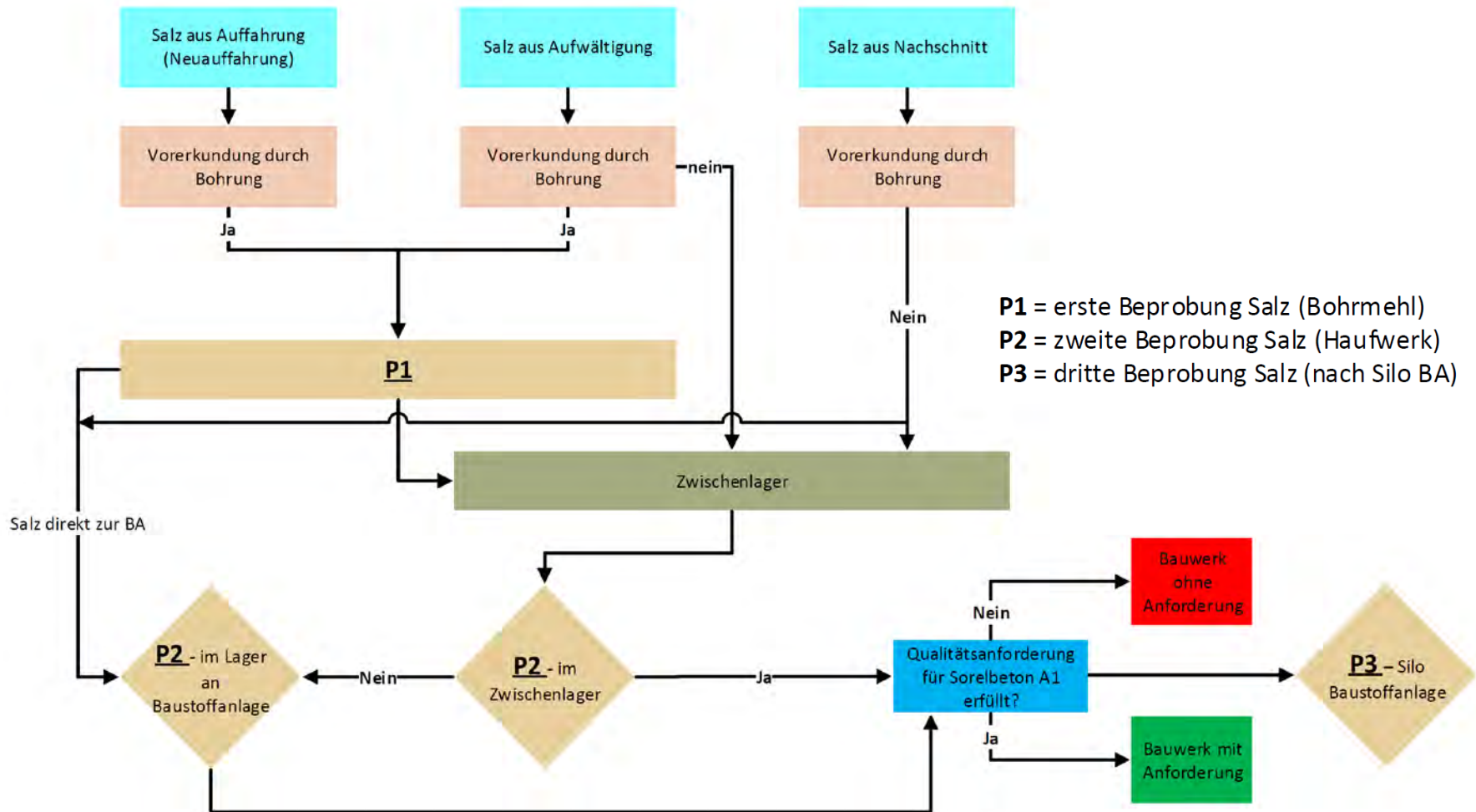
Anmachflüssigkeit (MgCl_2 -Lösung)

- 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

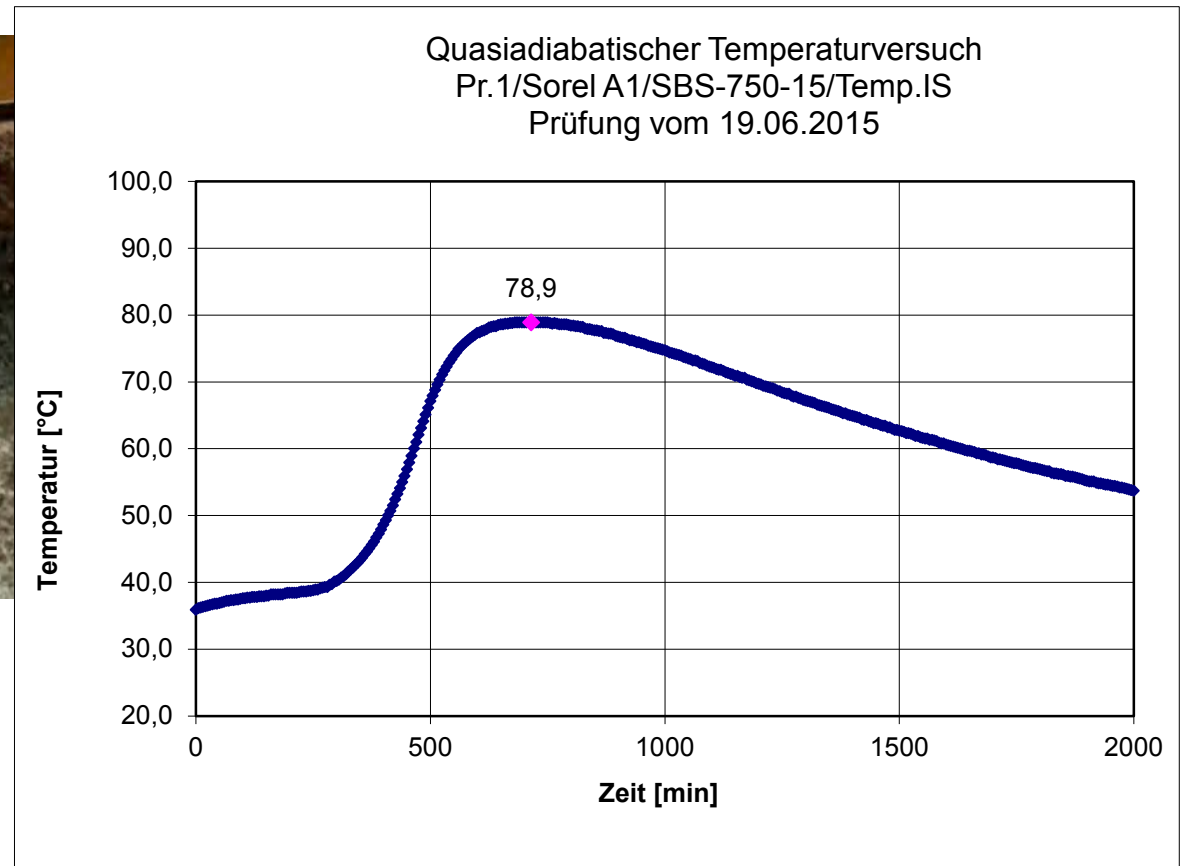
- Fließrinne



- 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

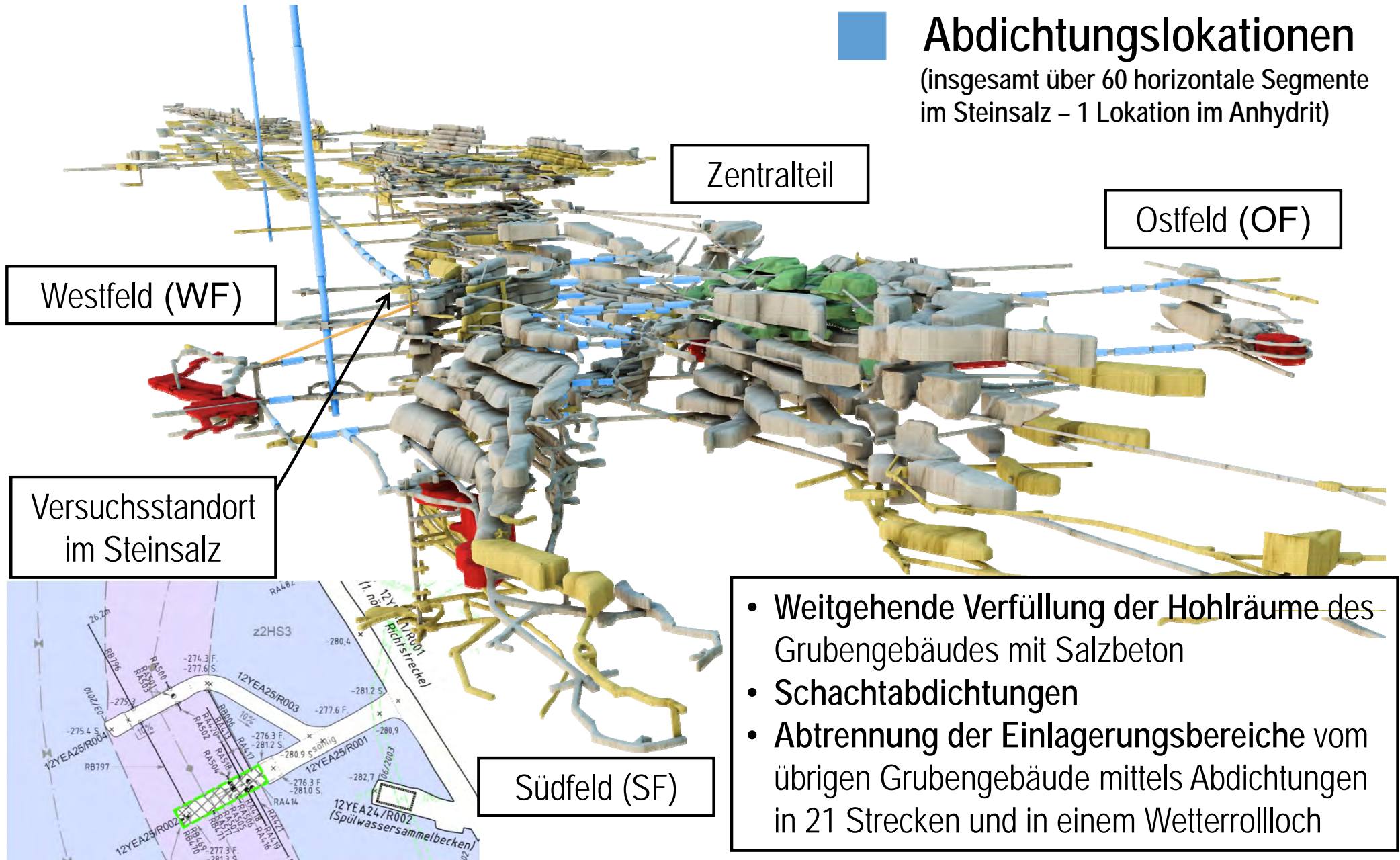
In situ-Versuch für ein Abdichtbauwerk im Steinsalz im ERAM - aktuelle Ergebnisse und Erkenntnisgewinn

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

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

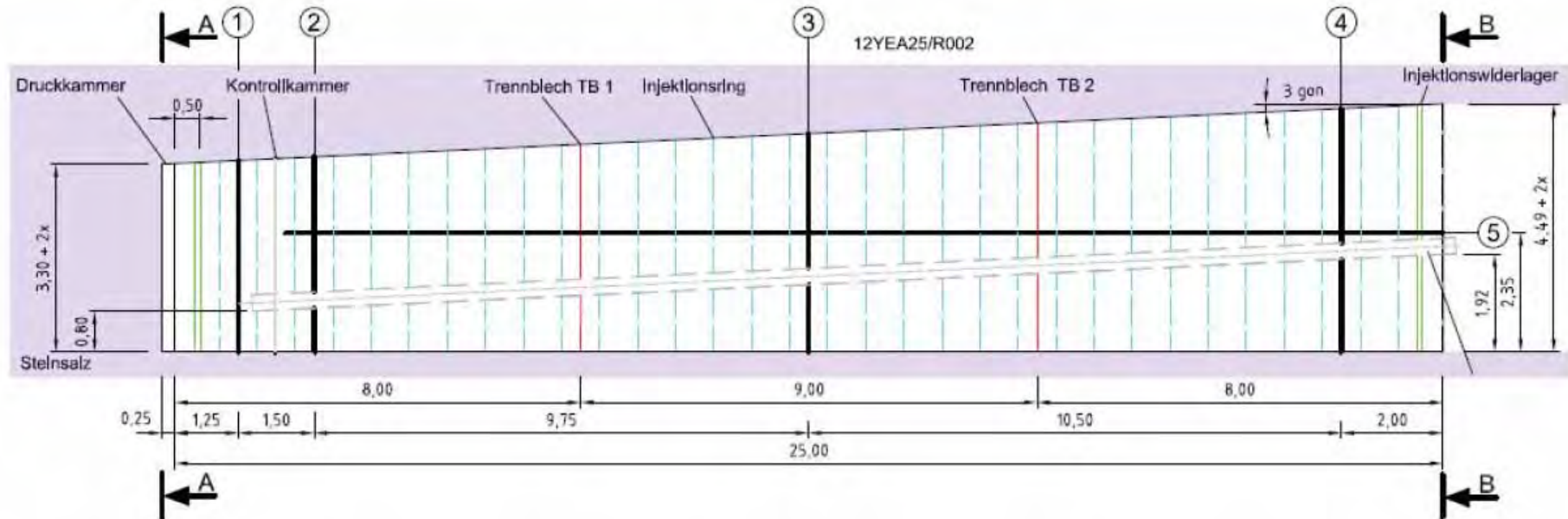
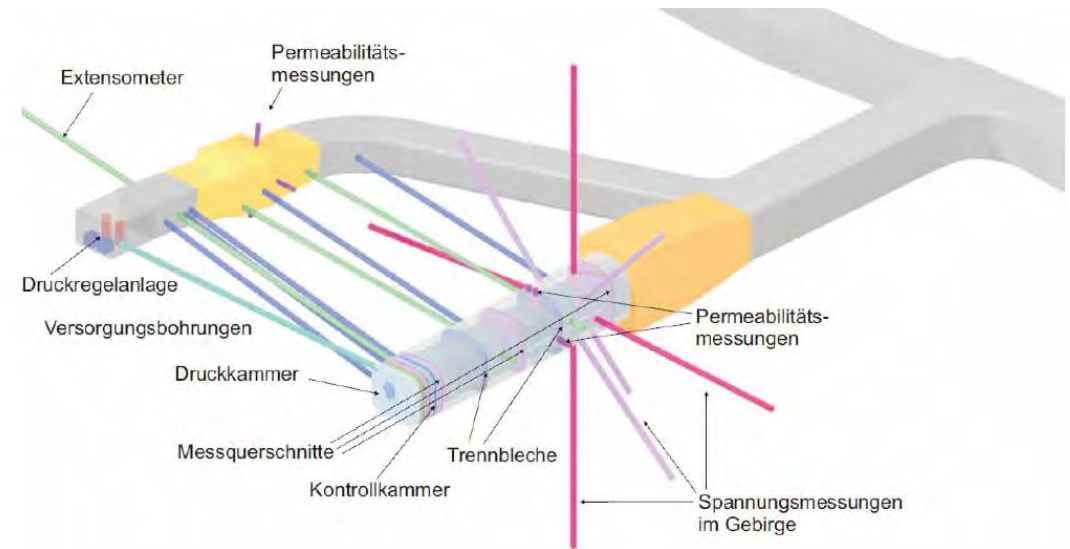
Stilllegungskonzept ERAM

Abdichtungslokationen
(insgesamt über 60 horizontale Segmente
im Steinsalz – 1 Lokation im Anhydrit)

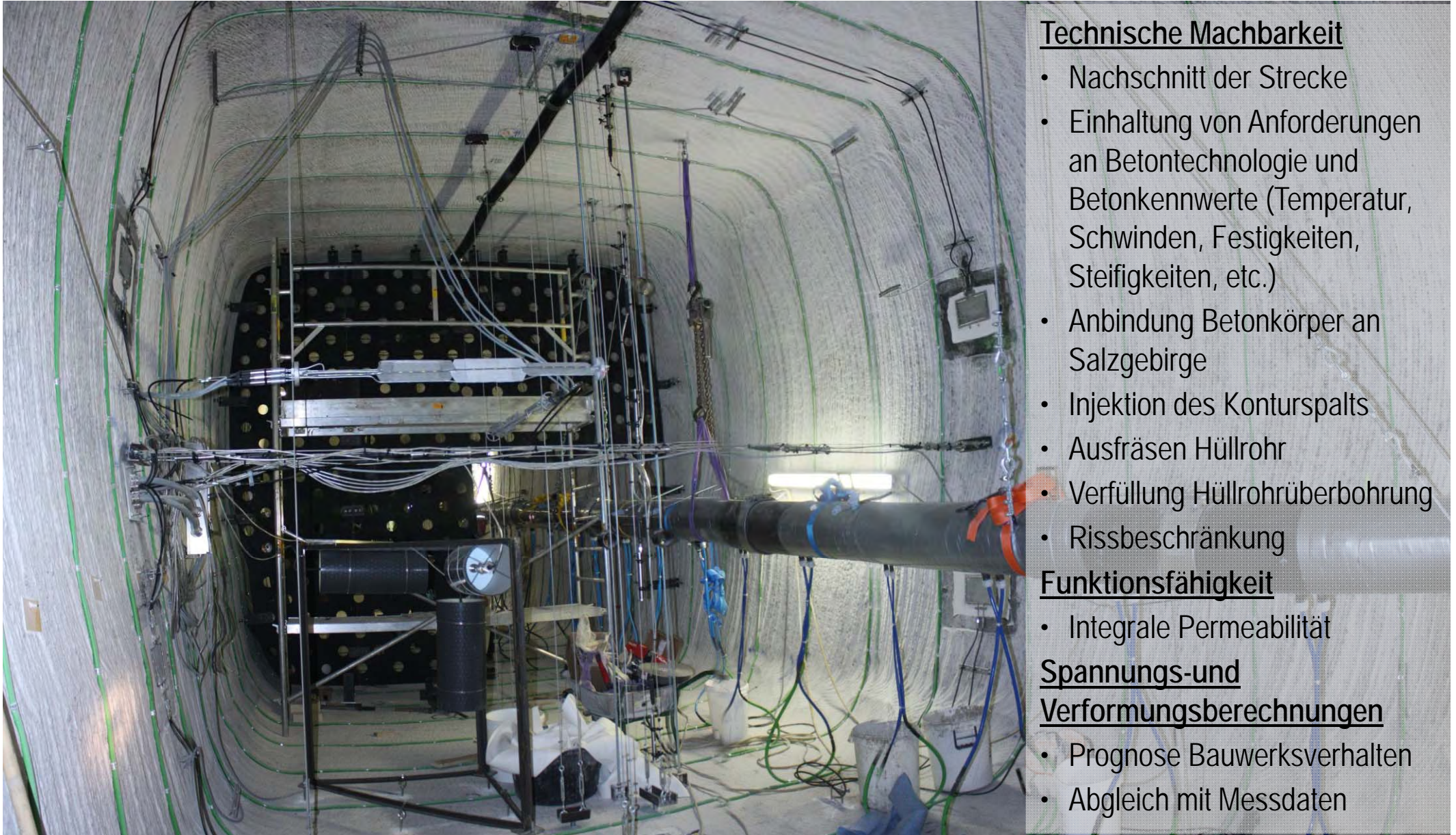


Versuchsbauwerk

- 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.



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

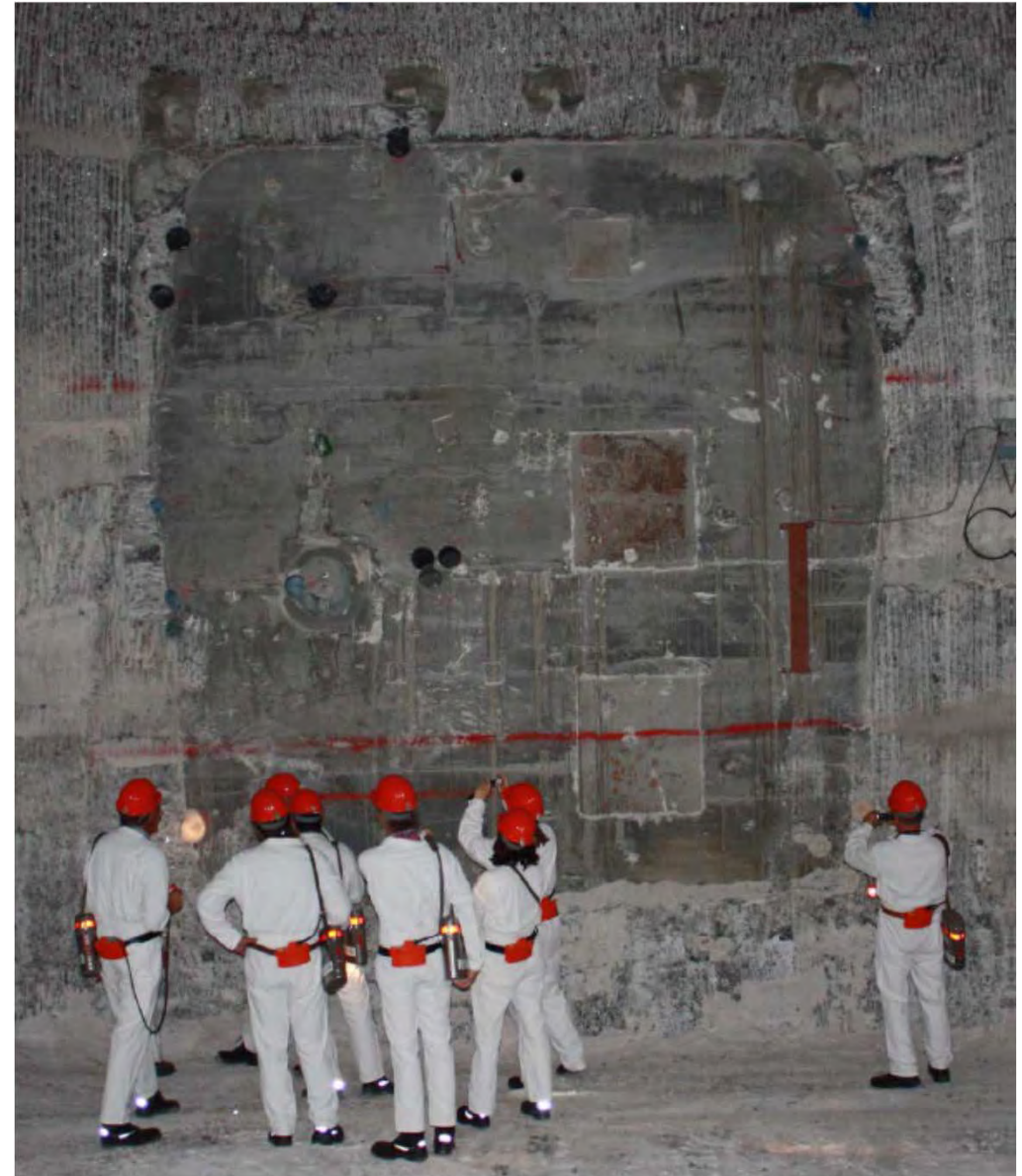
V Versuchsergebnisse - Technische Machbarkeit (Teil 1)

Vorgaben // Anforderungen eingehalten für

- Nachschnitt und Reprofilierung der Strecke
- „Frisch in frisch“ Betonage, Einbringtemperatur $<30^{\circ}\text{C}$ (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)

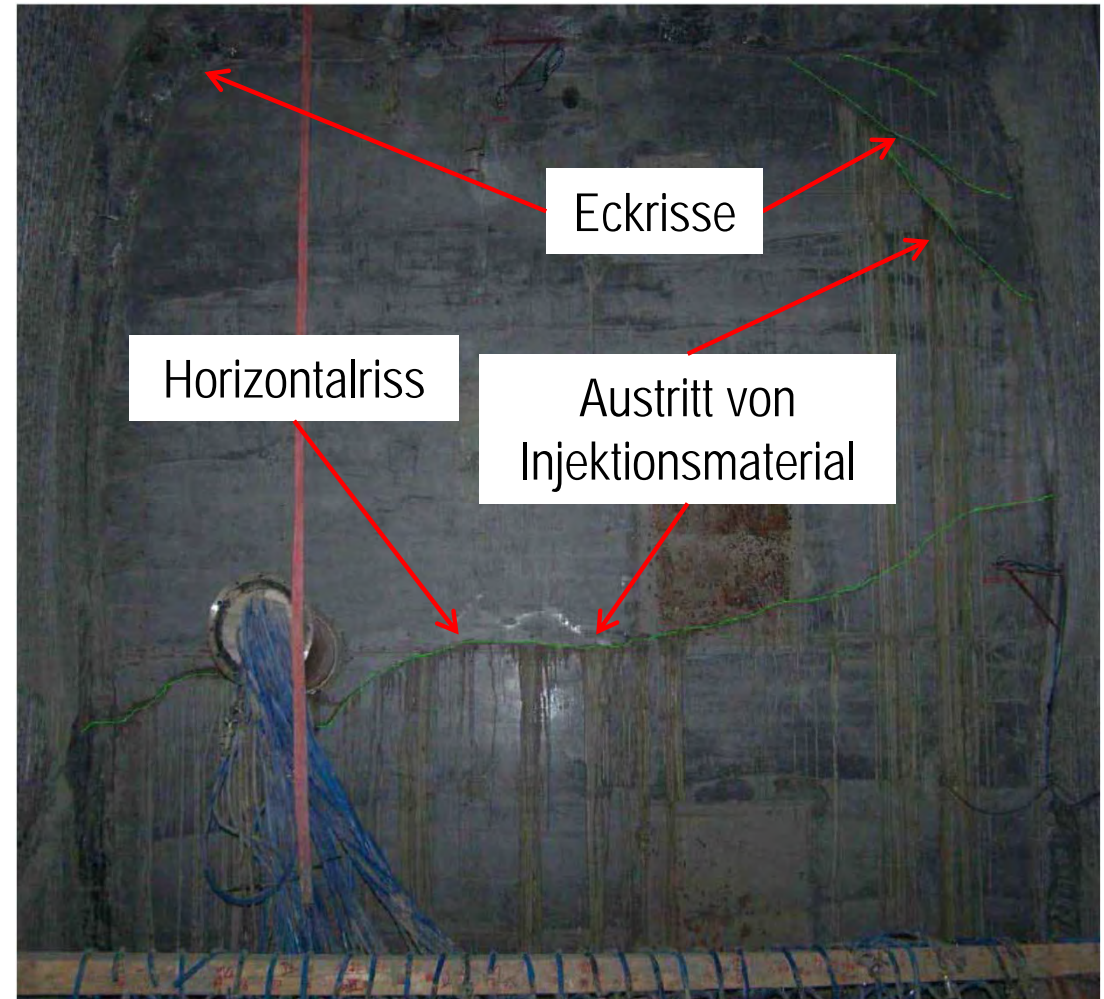


V Versuchsergebnisse - Technische Machbarkeit (Teil 2)

Vorgaben // Anforderungen nicht
(vollständig) eingehalten für

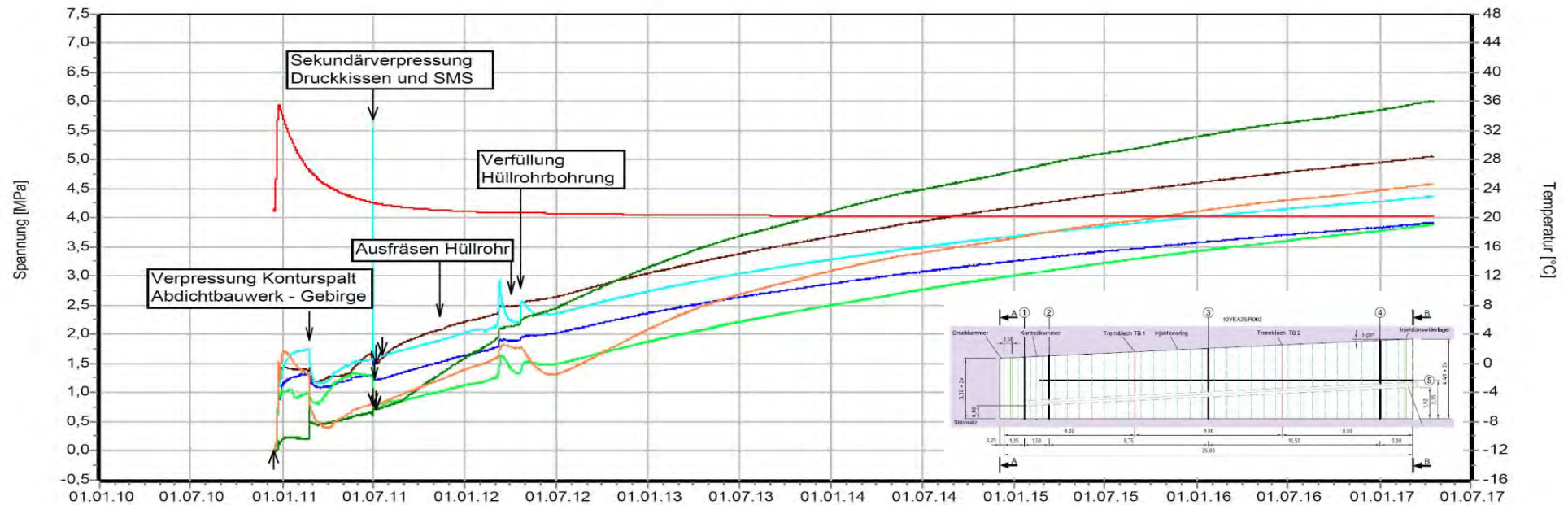
- Rissbeschränkung (sichtbarer Horizontalriss, Eckrisse, Querrisse in Bohrungen)
- Injektion des Konturspalts (Injektionsleitungen teilweise von Salzbeton vollständig umflossen, Nichteinhaltung von Druckvorgaben wegen Materialaustritt an Rissen, Reaktion von Messgebern in der Druckkammer → Verzicht auf 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 Fräsfläche, 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)

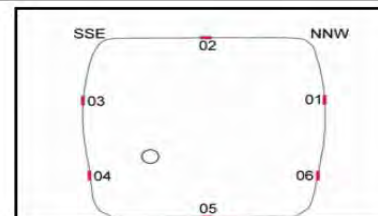


Messlokation	Grubenraum	Bohrung	Messstelle	Kurve	Messsystem	Position	Messrichtung [gon]	Messneigung [gon]	Höhe [mNN]	Bezugsmessung
MQ3	12YEA25/R002		12-CP003L-B01		Spannung		367	0	-278,39	15.12.2010
MQ3	12YEA25/R002		12-CP003L-B06		Spannung		368	0	-280,23	15.12.2010
MQ3	12YEA25/R002		12-CP003L-B03		Spannung		170	0	-278,39	15.12.2010
MQ3	12YEA25/R002		12-CP003L-B04		Spannung		170	0	-280,21	15.12.2010
MQ3	12YEA25/R002		12-CP003L-B02		Spannung		270	97	-276,87	15.12.2010
MQ3	12YEA25/R002		12-CP003L-B05		Spannung		0	-100	-281,23	15.12.2010
MQ3	12YEA25/R002		12-CT003L-B01		Temperatur		~	~	-278,39	15.12.2010

Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben



Nordfeld
In situ-Versuch
 -291 mNN, 12YEA25/R002 (Abdichtbauwerk)
Spannungsmessung
 Messquerschnitt 3, Kontur



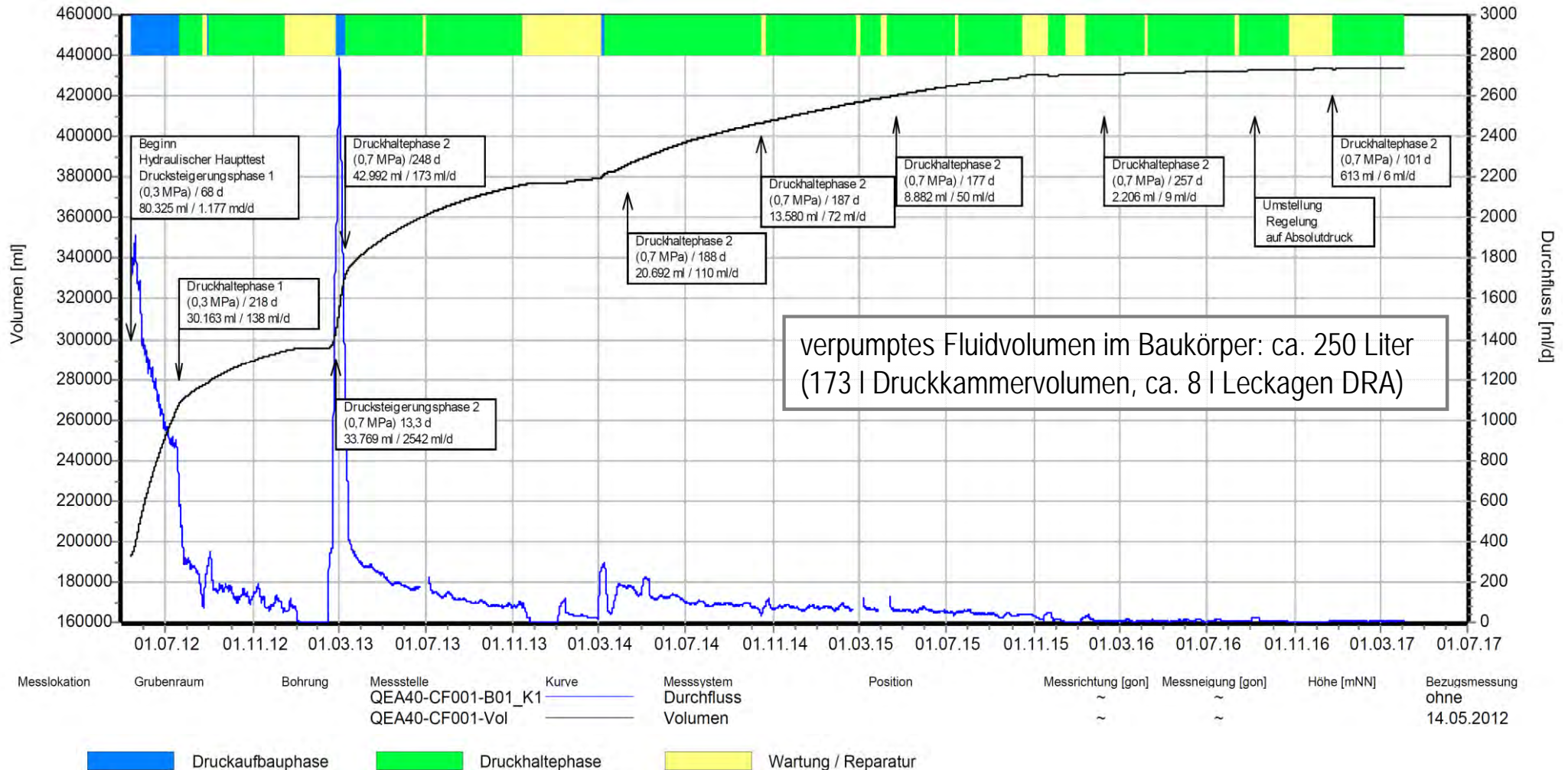
Auswertung: **12YEA25-CP003L_B**
 Messwerte: alle Messwerte
 mit U Messwerte
 ab Bezugsmessung
 Bezugsdatum: individuell

Programm: GEOTECH
 Version: 2.1, Stand: 14.12.2008



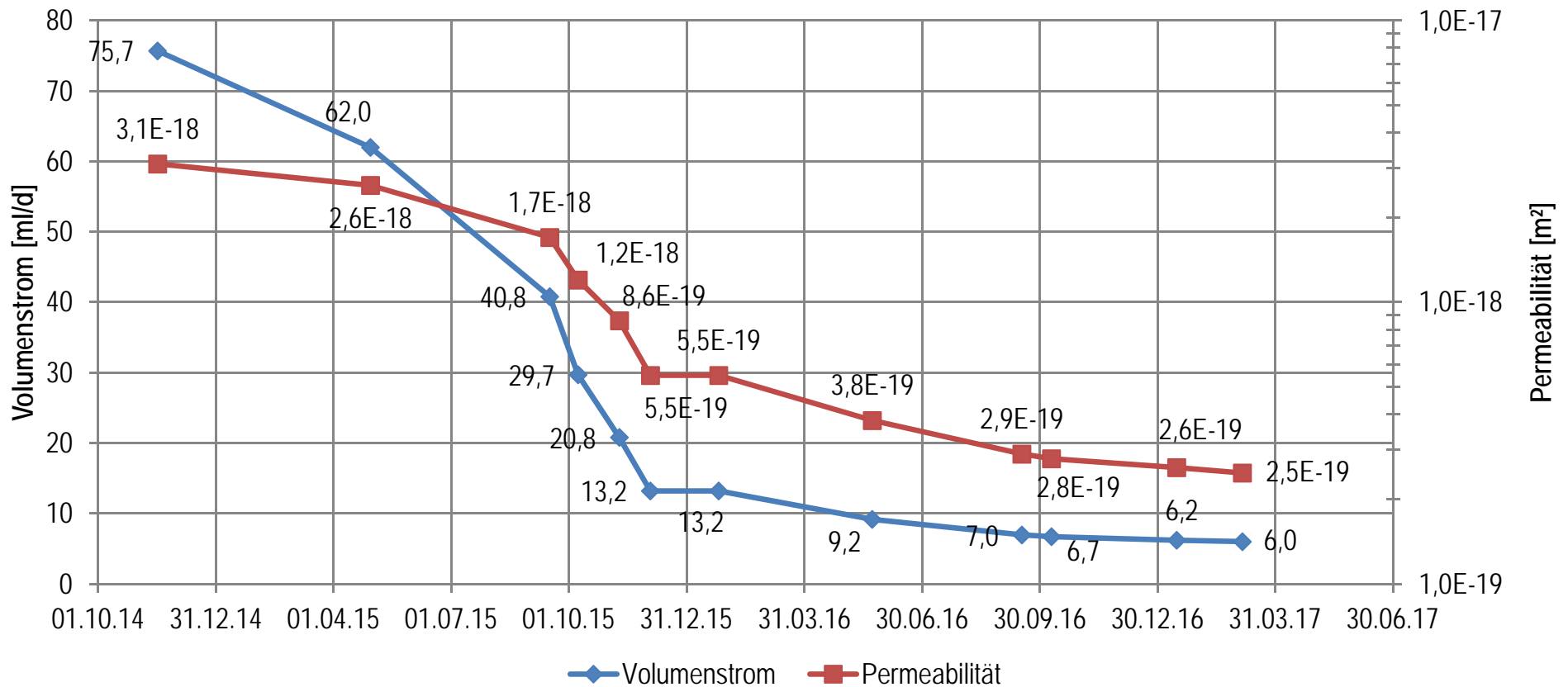
Versuchsergebnisse – Funktionsnachweis (Teil 1)

- 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)



Versuchsergebnisse – Funktionsnachweis (Teil 2)

- Seit November 2015 integrale Permeabilität kleiner als $1,0E-18 \text{ m}^2$
- aktueller Wert der integralen Permeabilität $2,5E-19 \text{ m}^2$ (Messzeitraum 06.02.2017– 03.04.2017)
- Mögliche Ursachen für die Reduktion der integralen Permeabilität:
 - Aufsättigung der druckkammernahen Bereiche (dort wurde Injektion nicht vollständig umgesetzt)
 - Verschließen von Fließwegen infolge des Aufkriechens des Gebirges

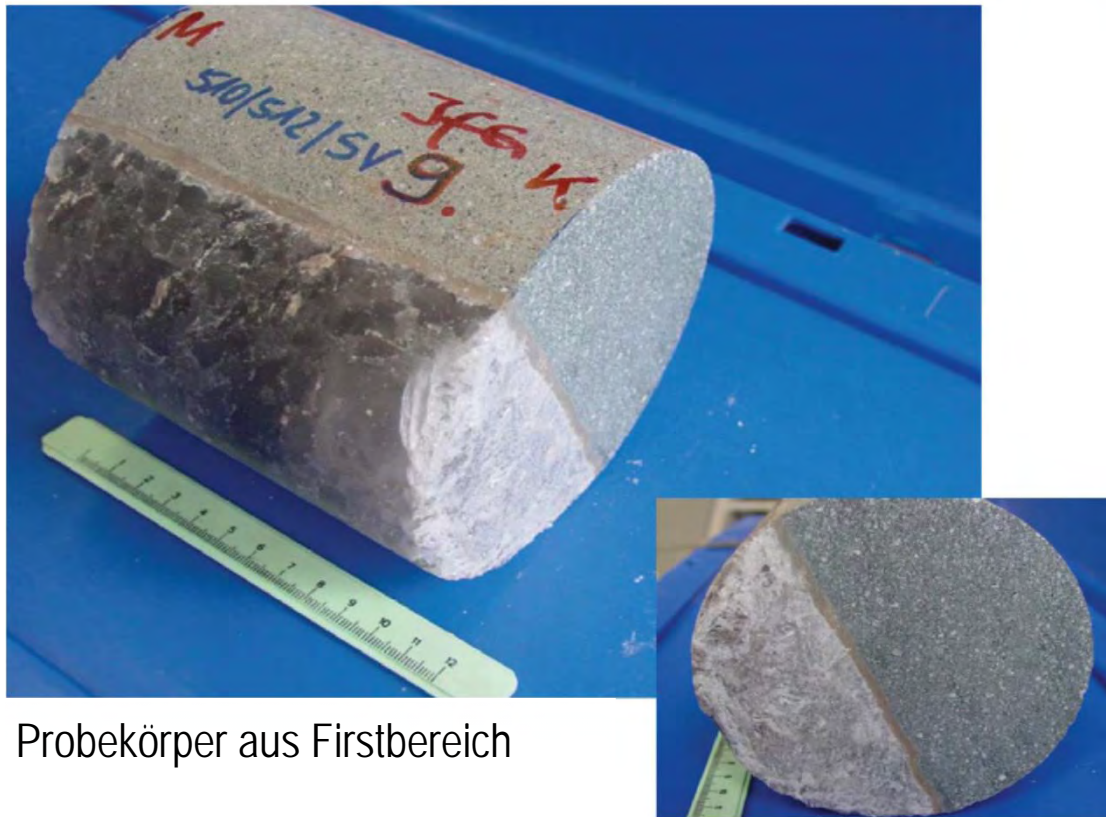
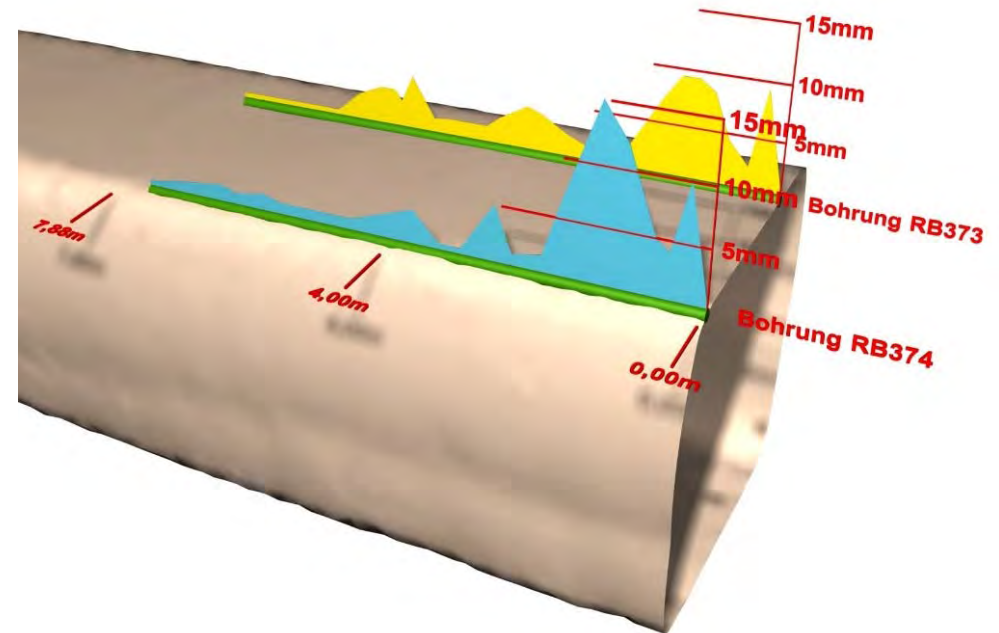


Permeabilitätsmessungen in Bohrungen und an Bohrkernen

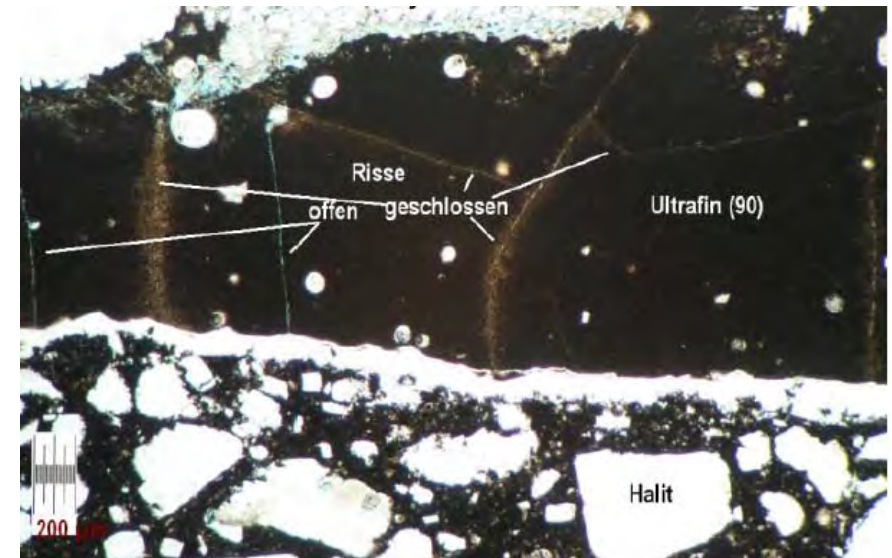
- Im intakten Salzbeton (RA328, RB637)
 - Effektive Gaspermeabilität $<6,5E-16m^2$ (Bohrloch), $<1,5E-18m^2$ (Bohrkern)
 - Effektive Lösungspemeabilität $<6,0E-21m^2$ (Bohrloch), $<3,0E-21m^2$ (Bohrkern)
- Im geschädigten Salzbeton (RA328, RB637) – lokale Risse (z.B. angebohrte „Einbauteile“)
 - Effektive 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 Lösungspemeabilität $4,7E-16m^2$ bis $1,0E-21m^2$ (Bohrkern)
- Verbund Hüllrohrüberbohrung (RA516)
 - Effektive Gaspermeabilität $>1,0E-14m^2$ (Bohrloch), $\sim 2,0E-15m^2$ (Bohrkern)
 - Effektive Lösungspemeabilität $2,0E-19m^2$ bis $7,0E-20m^2$ (Bohrkern)
- **Ergebnisse / Konsequenzen**
 - Effektive Lösungspemeabilität 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 (lufterfüllten) 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)

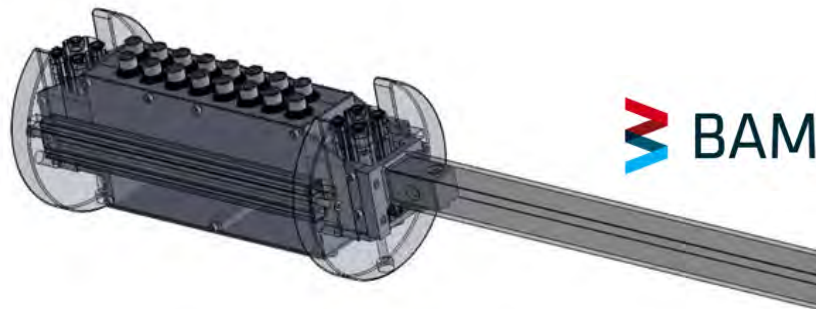
(unterstrichenen Themen werden im Anschluss beispielhaft erläutert)

Ultraschallmessungen zur Risserkundung (Test im Abbau 2n)



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

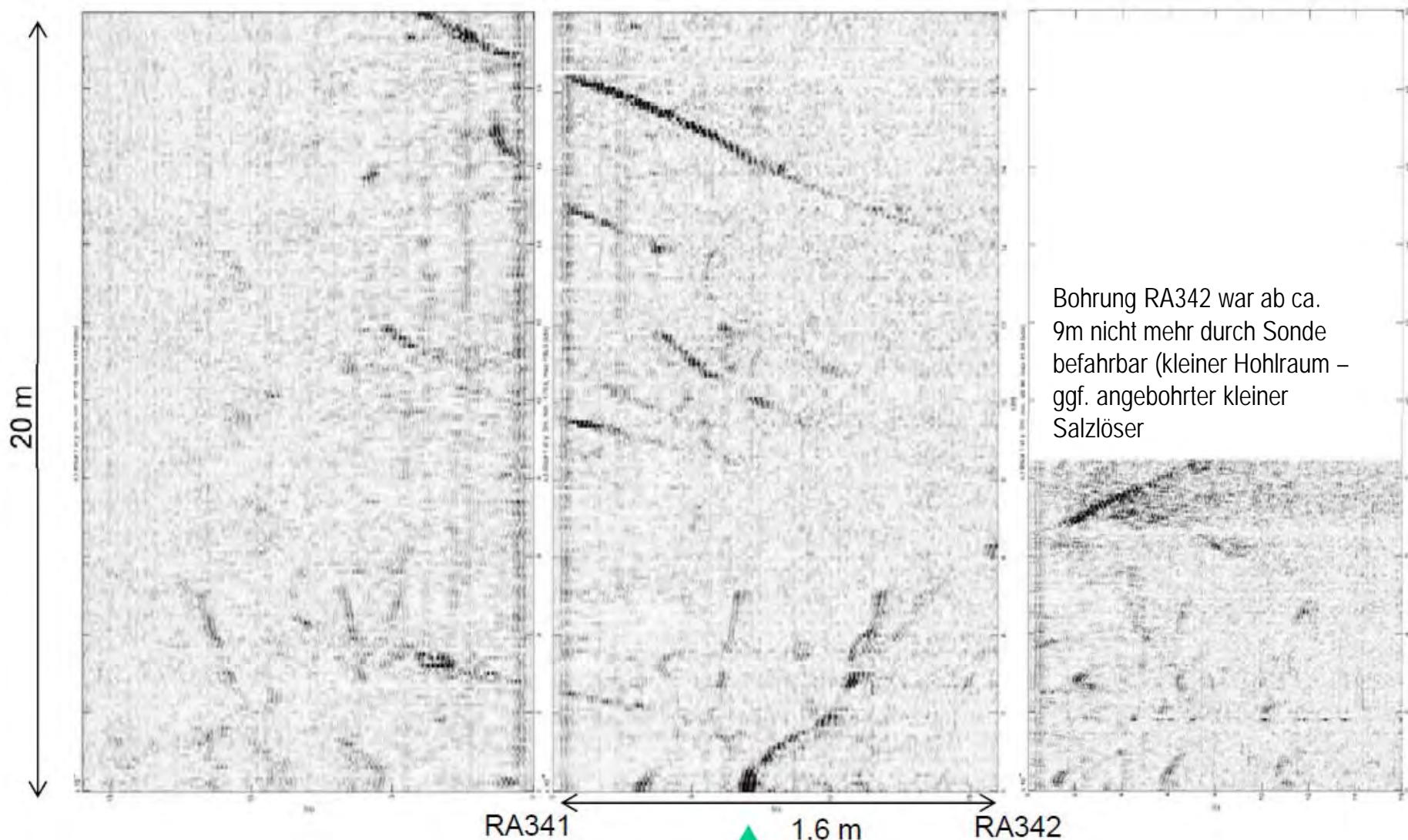
LAUS-Messsystem der BAM (Large Aperture Ultrasonic System) (Eindringtiefe > 5 m bis ca. 10 m)



 BAM

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

Ultraschallmessungen zur Risserkundung (Sonogramm - Abbau 2n)

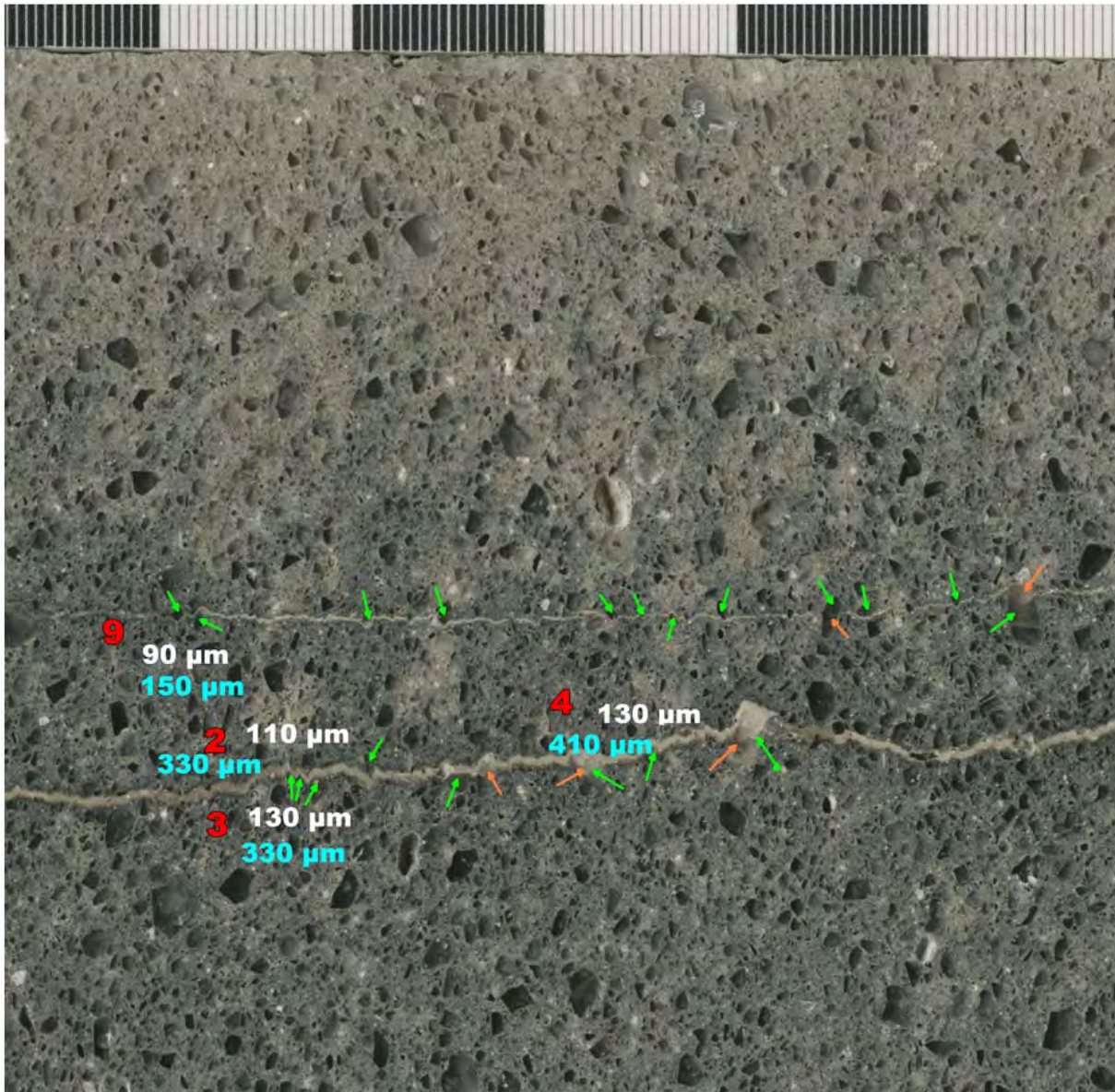


Bohrung RA342 war ab ca. 9m nicht mehr durch Sonde befahrbar (kleiner Hohlraum – ggf. angebohrter kleiner Salzlöser)

Test erfolgreich – geplanter Einsatz zur weiteren Untersuchung des Versuchsbauwerks

Riss Nr. 3 am Stoss

Rissuferuntersuchungen (Beispiel)



- Bohrung RA327
- Ziel: Systemverständnis hinsichtlich Rissbildung

Scan eines halbierten Bohrkerns

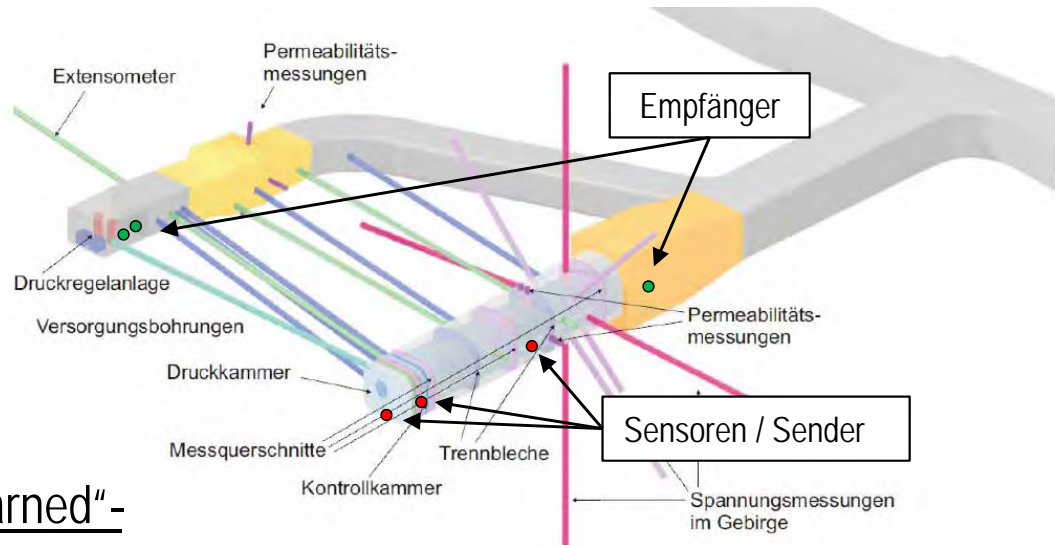
Scanausschnitt mit markierten Bereichen in denen eine Verschiebung erkennbar ist

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

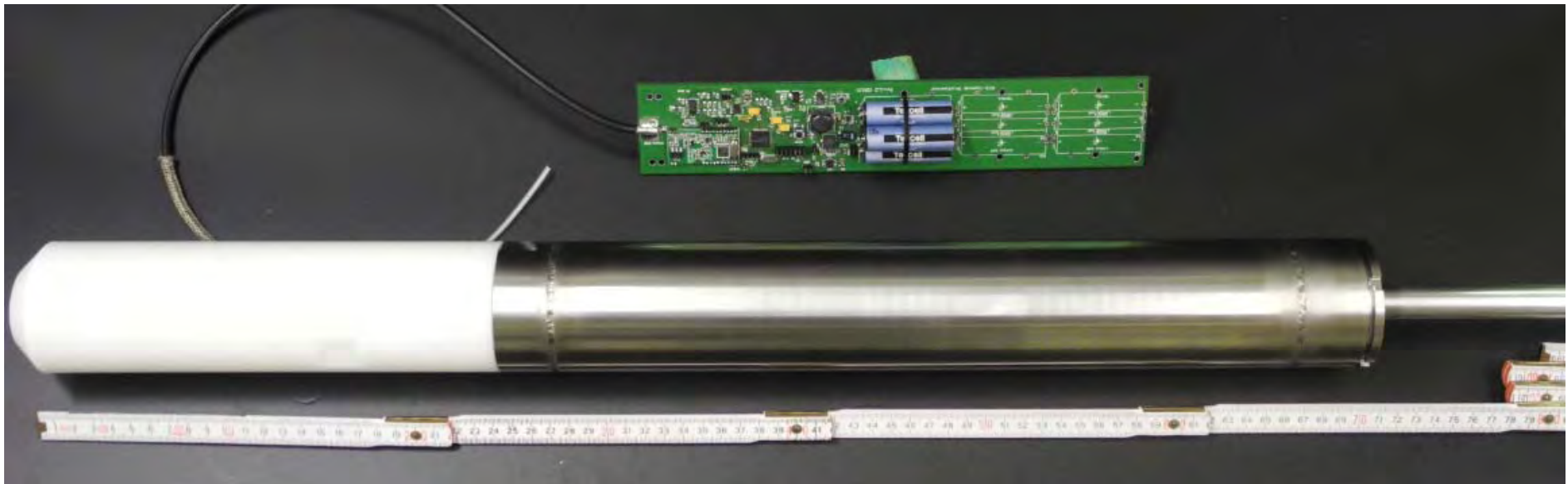
luftseitige Bewegungsrichtung des oberen Kernbereichs erkennbar

Kabellose Sensoren

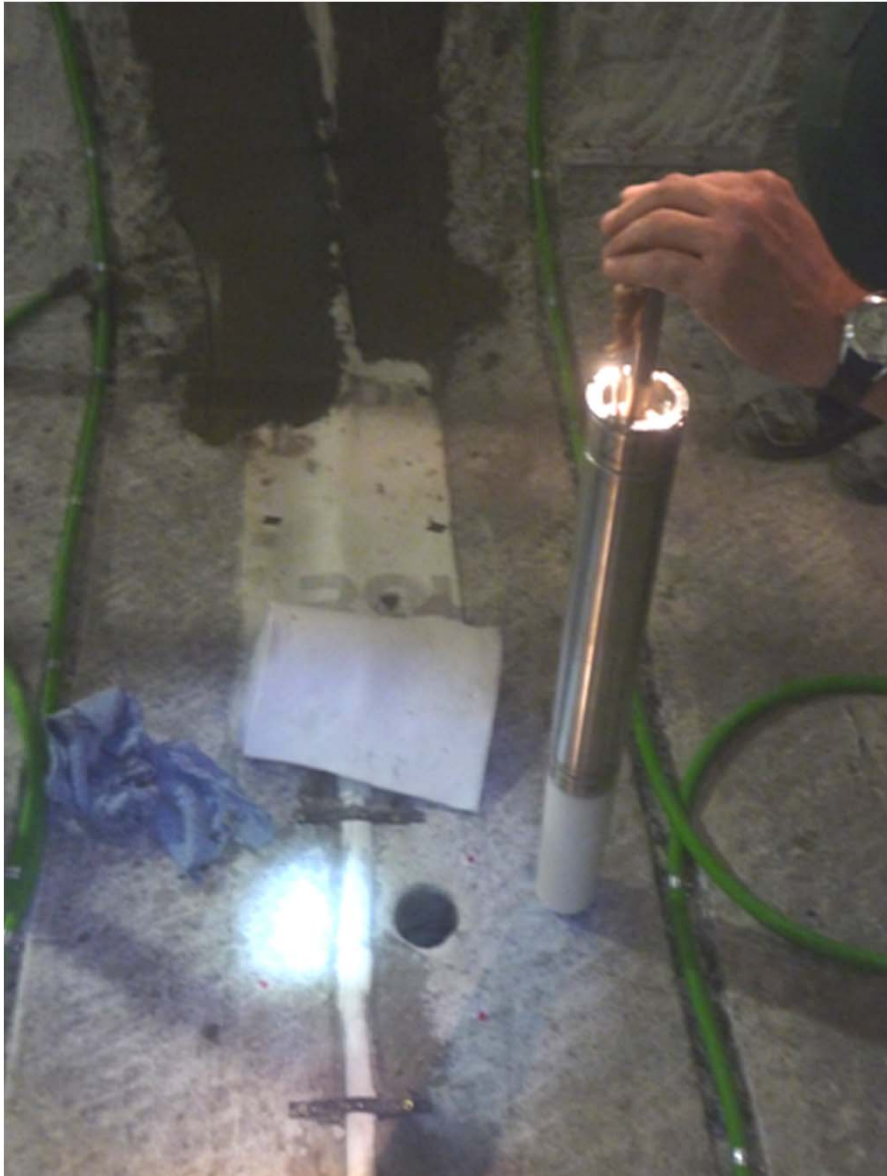
- Ziel: Test eines Mess- und Übertragungssystems in Zusammenarbeit mit IBeWa Freiberg
- Einbau vor der Betonage
- Messbeginn: 10/2010 (Messungen dauern an)



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

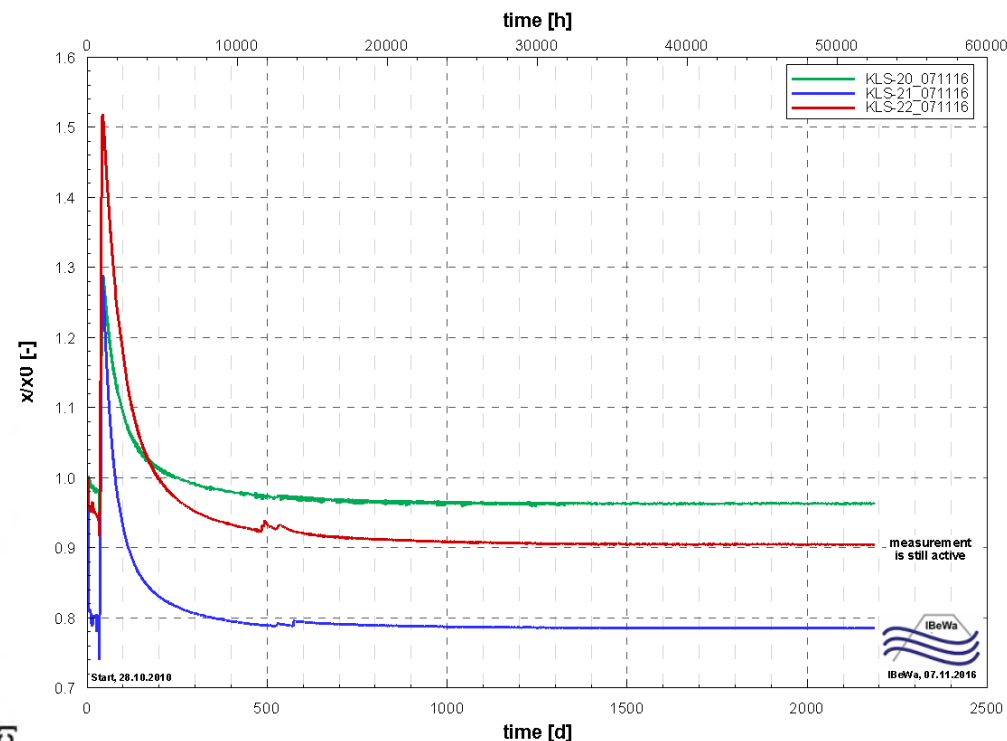
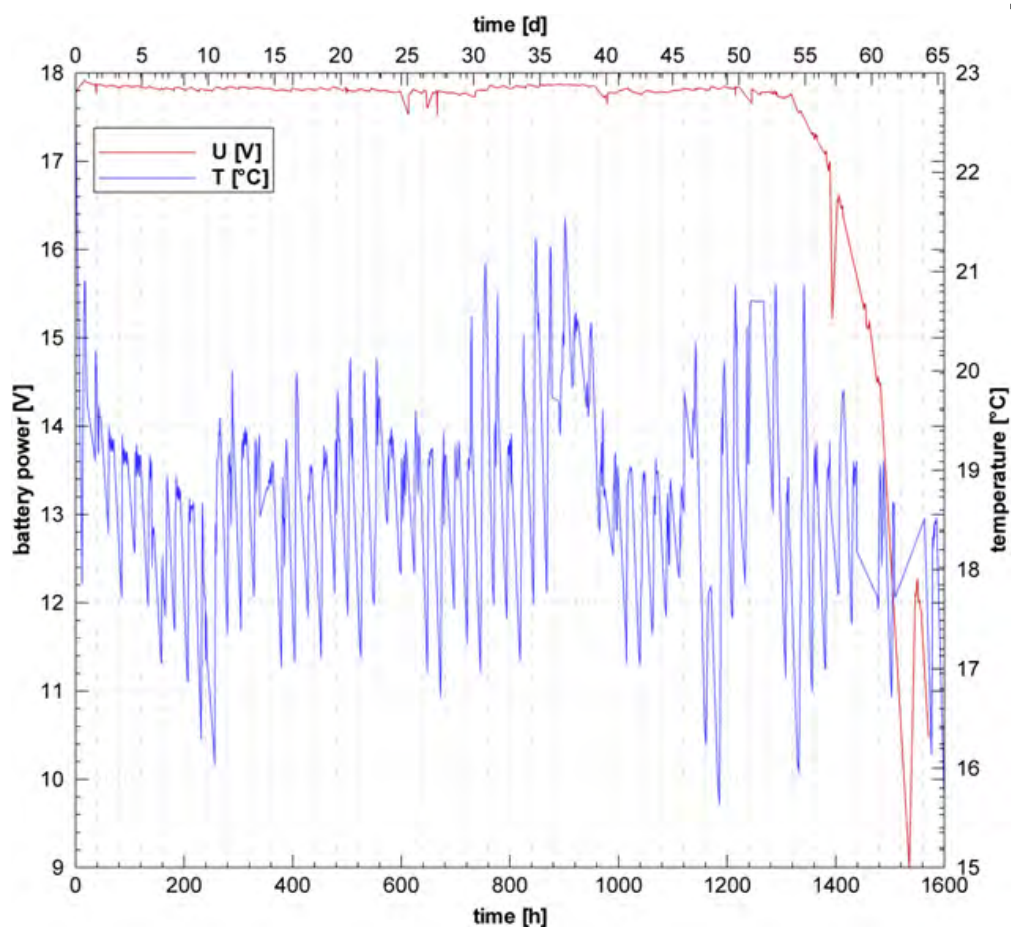


Einbau der kabellosen Sensoren



Ergebnisse zu Messungen mit kabellosen Sensoren

- Messwernerfassung, 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 Asphalt-dichtelementen
- Abgleich mit aktueller Szenarienentwicklung:
 - Anforderungen an die Abdichtbauwerke (ggf. auch für unterschiedliche Lokationen)
 - erforderlicher „Zeitpunkt“ der Funktionsfähigkeit