

Verschlusssysteme in Endlagern für wärme- entwickelnde Abfälle in Salzformationen

Workshop der GRS in
Zusammenarbeit mit dem
Projektträger Karlsruhe
PTKA-WTE

Braunschweig,
24. – 25. August 2010

Verschlussysteme in Endlagern für wärme- entwickelnde Abfälle in Salzformationen

Workshop der GRS in
Zusammenarbeit mit dem
Projektträger Karlsruhe
PTKA-WTE

Braunschweig,
24. – 25. August 2010

Zusammengestellt von:

Tilman Rothfuchs

Januar 2011

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde-
liegenden Arbeiten wurden mit
Mitteln des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Technologie
BMW unter dem Förderkenn-
zeichen 02 E 10548 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt
alleine bei den Autoren.

Deskriptoren:

Barriere, Einschluss, Endlager, Endlagersicherheit, geotechnische Barriere, radioaktive Abfälle, Salzformation, Verschlussysteme

Vorwort

Im August 2010 veranstalteten der Fachbereich Endlagersicherheitsforschung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) und der Projektträger Karlsruhe – Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) einen **Workshop zu Verschlussystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen**.

Veranlassung für die Workshop war ein bilaterales Fachgespräch im April 2010, auf welchem weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen diskutiert wurden.

Es schien angebracht, die Rolle geotechnischer Barrieren im Verschlussystem eines Endlagers vor dem Hintergrund der in den letzten Jahren geänderten Nachweisführung für den sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich neu zu bewerten, den für die Nachweisführung erforderlichen Kenntnisstand zu überprüfen und den ggf. erforderlichen Bedarf an weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu identifizieren.

An der Veranstaltung haben insgesamt 35 Teilnehmer von 18 Fachinstitutionen teilgenommen (vgl. Anhang A) und die in Kapitel 1 dargelegten Ergebnisse in ausführlichen Diskussionen erarbeitet. Aufgrund des breiten Spektrums der auf dem Workshop versammelten Fachkompetenzen wird davon ausgegangen, dass die Workshop-Ergebnisse den aktuellen Wissenstand repräsentativ widerspiegeln.

Im vorliegenden Dokument werden die Workshop-Ergebnisse zusammengefasst und die Vortragsfolien zusammen mit jeweils einleitenden Abstracts sowohl den Workshop-Teilnehmern als auch weiteren interessierten Institutionen zur Beachtung bei der Durchführung weiterführender FuE-Arbeiten zur Verfügung gestellt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Zusammenfassung der Workshop-Ergebnisse.....	3
2.1	Geotechnische Verschlussbauwerke (Schachtverschluss, Strecken- verschluss).....	6
2.2	Ingenieurtechnischer Nachweis für geotechnische Verschluss- bauwerke	7
2.3	Arteigene Verschlussmaterialien	7
2.4	Nichtarteigene Verschlussmaterialien.....	8
2.5	Auflockerungszone.....	9
2.6	Kontaktfuge.....	9
3	Abstracts und Folien.....	11
3.1	Einführung.....	11
3.2	Konzepte der Langzeitsicherheitsanalyse zur Beurteilung der Wirksamkeit von Abschlussbauwerken.....	17
3.3	Schachtverschlusskonzepte	31
3.4	Streckenverschlusskonzepte	39
3.5	Ingenieurtechnischer Nachweis für geotechnische Verschluss- bauwerke	49
3.6	Arteigene Verschlussmaterialien	59
3.7	Nichtarteigene Materialien.....	77
3.8	Auflockerungszone.....	89
3.9	Kontaktfuge.....	97
A	Anhang: Liste der Workshop-Teilnehmer.....	107
B	Anhang: Foto der Workshop-Teilnehmer	108

1 **Einleitung**

Im Vorfeld des Workshops waren die an der Endlagerforschung in Deutschland beteiligten Institutionen eingeladen worden, eine Einleitung zu den Einzelthemen des Workshops durch einen kurzen Impulsvortrag vorzubereiten und die jeweils nachfolgenden Diskussionen durch eine vorab erarbeitete Liste offener Fragen zu stimulieren.

Während des Workshops wurden diese Listen, dem Verlauf der Diskussionen folgend, editiert bzw. aktualisiert, so dass am Ende der Veranstaltung bereits eine vorläufig abgestimmte Liste notwendiger weiterführender Arbeiten vorlag und das Ziel der Veranstaltung weitgehend erreicht war.

Die nachfolgenden Themen wurden auf dem Workshop behandelt:

Thema	Vortragender
Schachtverschlusskonzepte	Prof. Kudla (TU BA Freiberg)
Streckenverschlusskonzepte	Herr Laske (BfS)
Ingenieurtechnischer Nachweis für geotechnische Verschlussbauwerke	Frau Dr. Müller-Hoeppe (DBE)
Konzepte der Langzeitsicherheitsanalyse zur Beurteilung der Wirksamkeit von Abschlussbauwerken	Dr. Mönig (GRS)
Arteigene Verschlussmaterialien	Dr. Stührenberg (BGR)
Nichtarteigene Materialien	Dr. Herbert (GRS)
Auflockerungszone	Herr Wieczorek (GRS)
Kontaktfuge	Herr Mauke (BfS)

2 Zusammenfassung der Workshop-Ergebnisse

Das aus verschiedenen Komponenten bestehende geotechnische Verschlussystem hat die Aufgabe, die bei der Errichtung des Endlagerbergwerks unvermeidbare punktuelle Verletzung der Integrität der geologischen Barriere zu kompensieren und somit zum dauerhaft sicheren Einschluss der Abfälle beizutragen.

Ein wesentliches Ergebnis des Workshops war die Feststellung, dass bei der Entwicklung von Verschluss- bzw. Abdichtkonzepten für alle zu verschließende Hohlräume im Endlager die spezifischen Anforderungen an die einzelnen Komponenten zu ermitteln und den nachfolgenden FuE-Arbeiten zu Grund zu legen sind. Die Anforderungen ergeben sich im wesentlichen aus sicherheitsanalytischen Modellrechnungen für verschiedene zu betrachtende Entwicklungen des Endlagersystems.

Unabhängig von individuellen Untersuchungsergebnissen sind in der Nachverschlussphase folgende Anforderungen an das Verschlussystem im Hinblick auf die Dichtwirkung gegenüber Fluiden (Lösungen und Gase) von genereller Bedeutung:

- sofortige Wirksamkeit gegenüber einem Lösungszutritt
- langfristige bzw. dauerhafte Wirksamkeit in der Nachverschlussphase für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers

Für die Nachweisführung sind hinreichende Kenntnisse über folgende Punkte von Bedeutung:

- Der erforderliche hydraulische Widerstand der Verschlussbauwerke, bestehend aus Dichtmaterial, Kontaktfuge, Auflockerungszone und intaktem Gebirge.

In diesem Zusammenhang sind die Langzeitstabilität von Baustoffen gegenüber den anstehenden Lösungen bzw. die zeitliche Entwicklung einer möglicherweise stattfindenden Veränderung der Baustoffe (Alterung) mit Einfluss auf die hydraulischen Parameter zu untersuchen.

Eine aktive anhaltende Kontaktdruckausbildung beim Einsatz quellfähiger Abdichtbaustoffe in der Kontaktfuge (Schacht, Strecke, Bohrloch) wird als wichtige Frage im Rahmen der Nachweisführung zu behandeln sein.

Bezüglich der Auflockerungszone stellen sich nach wie vor Fragen in Bezug auf den Zusammenhang zwischen dem mechanischen Verhalten (Dilatanz und Rekompaktion) und der Permeabilität (Stichwort: Permeabilitäts-Dilatanz-Beziehung), die der dringenden Klärung bedürfen, insbesondere mit Blick auf die Rückbildung der Auflockerungszone.

- Der Zeitverlauf der Kompaktion von Salzgrus als arteigenes Versatz- bzw. Verschlussmaterial sowohl im trockenen als auch im feuchten Zustand sowie der unter Endlagerbedingungen dabei erreichbare Endzustand.

Dabei sind die Prozessabläufe zu untersuchen und die Formulierung bzw. Weiterentwicklung von Stoffgesetzen mit Validierung anhand von nachgerechneten Labor- oder Technikumsversuchen zu betreiben. Auch die Untersuchungen zur Langzeitstabilität von selbstverheilendem Versatz (SVV) als zusätzliches, bei einem Lösungszutritt sofort wirksames Abdichtmaterial, ist weiter zu verfolgen.

- Die jeweils erforderlichen Funktionszeiträume, die im Rahmen von Auslegungsrechnungen zu ermitteln sind.
- Der Übergang von einer systematisch-deterministischen zu einer zuverlässigkeitsorientierten, semiprobabilistischen Auslegung und Nachweisführung.

Die Weiterentwicklung und Anwendung von probabilistischen Nachweisverfahren als Teil des Integritätsnachweises von geotechnischen Verschlussbauwerken ist zu betreiben.

Die Workshop-Teilnehmer waren sich darin einig, dass vor der Realisierung von Verschlusssystemen in einem Endlager auch deren technische Demonstration im 1:1-Maßstab unerlässlich ist. Diese Anforderung ergibt sich auch aus den im September 2010 vom BMU veröffentlichten neuen Sicherheitsanforderungen, nach denen folgende Nachweise zu berücksichtigen sind:

- Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems
Herstellung, Errichtung und Funktion muss grundsätzlich erprobt sein (oder anderweitig nachweisbar sein)
- Prüfung der Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren

- Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse (Vertrauensbildung, Modellqualifizierung)
- Umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien
- Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten

Mitarbeiter des GRS-Bereichs Endlagersicherheitsforschung haben im Nachgang zum Workshop die Aufgabe übernommen, eine abschließende Konsolidierung der während des Workshops editierten/aktualisierten Listen offener Fragen vorzunehmen.

Hinsichtlich der prioritären Einstufung der Themen in den überarbeiteten Listen wurde dabei das folgende Farbschema verwendet:

- **rote** Schriftfarbe – Thematik ist unbedingt prioritär zu behandeln
- **blaue** Schriftfarbe – Thematik ist erst nachrangig zu behandeln.

Um einen Bezug zu Forschungsvorhaben, die die aufgeführten Fragestellungen bereits in Ansätzen behandeln, herzustellen, wurden diese an entsprechender Stelle aufgeführt.

Die konsolidierten Listen sind in den Kapiteln 2.1 – 2.6 aufgeführt.

2.1 Geotechnische Verschlussbauwerke (Schachtverschluss, Streckenverschluss)

- Quantifizierung von generellen/standortbezogenen Anforderungen und Einwirkungen
 - sofortige Wirksamkeit (nach Fertigstellung) hinsichtlich der zu erwartenden Belastungen
 - Wirksamkeit in der frühen Nachbetriebsphase (Kurzzeit) (< 100a)
 - Wirksamkeit in der späten Nachbetriebsphase (Langzeit) (>100a, wirksam erst nach Auflaufen des Gebirges und hinreichender Rückbildung der ALZ)
(Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend EUROCODE 2002)
- Entwicklung eines Verschlusskonzeptes für ein HAW-Endlager mit zugehörigem Sicherheitsnachweis (Sicherheitsnachweis unter Verwendung von FEPs; Festlegung von Anforderungen; Bemessungszeiträume;)
 - Prüfung der Einsetzbarkeit/Übertragbarkeit von bisher untersuchten Komponenten für UTD/UTV's auf ein HAW-Endlager
 - Gasdurchlässigkeit
 - (Inhomogener) Wärmeeintrag (bisher nicht berücksichtigt)
 - konstruktive Beherrschung des Einflusses von Imperfektionen
- Technische Realisierbarkeit
 - Entwicklung von Kriterien und Festlegung von Messgrößen im Großexperiment für die Bewertung der Langzeitentwicklung der Verschlusseigenschaften
 - Perspektivisch: Großtechnische Tests der HAW-Verschlussbauwerke als Ganzes (!) im Maßstab 1:1 (langfristig), (Beobachtungszeit min. 10 Jahre; technisch notwendig; dient zur Erfahrungssammlung, und zum Akzeptanzgewinn in der Öffentlichkeit) (mittelfristig wichtig, da standortspezifisch)
 - Entwicklung und großtechnische Tests zur Verdichtung von arteigenen Materialien (Salzgrus) (Auswertung/Bewertung der Erfahrungen WIPP) Einbringtechniken von Asphaltdichtungselementen (Bitumen- und Asphaltsäulen) von Schachtverschlüssen

- Messtechnische Überwachung von Verschlussbauwerken (z. B. bei Schachtverschlüssen für UTD/UTV im Salz über 10 Jahre zur Gewinnung von Rückschlüssen auf einen HAW-Schachtverschluss) relevantes Bauwerk von K+S vorhanden(?)
- Entwicklung und Tests **zusätzlicher** Funktionselemente (sofort wirksam, Lebensdauer 100 – 200 a), Voraussetzung Schachtverschlusskonzept vorhanden

2.2 Ingenieurtechnischer Nachweis für geotechnische Verschlussbauwerke

- Güte/ Zuverlässigkeit der (Funktions-)Kriterien zur Beschreibung der Grenzzustände, Übernahme der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte
 - Ausfallwahrscheinlichkeit $\Leftrightarrow$ Lebensdauer
 - Restbarrierewirkung bei Ausfall
- (Weiter-) Entwicklung von probabilistischen Nachweisverfahren als ein Teil des Integritätsnachweises
- Vollständigkeit der Funktionsnachweise nach heutigem Kenntnisstand
- Zulässigkeit der Übertragung der Bohrschachtergebnisse auf größere Schachtdurchmesser (Skalierbarkeit)

2.3 Arteigene Verschlussmaterialien

Salzgrus-Kompaktion:

- Einfluss und Wirkung von Feuchte auf das Langzeitverhalten und im Restporositätsbereich (Projekt REPOPERM)
- Weiterentwicklung/Validierung von Stoffgesetzen
- Einfluss von Zusatzstoffen (Ca-Bentonit) (konzeptabhängig)

Salzgrus-Permeabilität:

- Korrelation Porosität-Permeabilität für kleine Porositäten (Projekt REPOPERM)
- Einfluss der Feuchte auf die hydraulischen Eigenschaften von kompaktiertem Salzgrus (kapillarer Sperrdruck, 2-Phasenfluss). Welchen Einfluss haben Umlöse-/Verheilungsvorgänge?
- Übergang zum hydraulisch dichten („kompakten“) Steinsalz

Salzbriketts:

- Beschreibung der physikalischen Prozesse für die Kompaktion der restlichen Porosität, insbes. bzgl. der Feuchteeffekte
- Mechanisch/hydraulische Abhängigkeit an den Grenzen der Briketts untereinander und zum Gebirge
- Erstellung eines allgemein akzeptierten Stoffgesetzes zur Salzgruskompaktion, das Extrapolationen erlaubt
- Fragen analog dem Restporositätsbereich von „langsam“ verdichtetem Salzgrus (Liegen ähnliche strukturelle Verhältnisse vor ($0,16 < d < 0,5$ mm)? Porosität/Permeabilität im Restporositätsbereich? Übergang zum kompakten Steinsalz

Selbstverheilender Versatz:

- Nachweis der Langzeitstabilität
- Langzeitbeobachtung von SVV-Bauwerken im Steinsalz unter Lösungsdruck > 50 bar

2.4 Nichtarteigene Verschlussmaterialien

- Verbesserung des Verständnisses der Einflussfaktoren auf die Phasenbildung bei der Bauwerkserstellung
- Entwicklung von Permeabilität-Porositäts-Beziehungen für die verwendeten Baustoffe
- Korrosionsverhalten der verwendeten Materialien (Salzbetone, Magnesiabinder) im Bauwerk

- Einfluss auf Permeabilität-Porositäts-Beziehung
- Ausbildung von Strömungskanälen
- Entwicklung von standardisierten Prüfmethoden

Langzeitverhalten von Bentoniten:

- Einfluss der Kinetik der Phasenumwandlung auf die Permeabilitätsentwicklung
- Und/oder Entwicklung von Low-pH-Zementen für den kombinierten Einsatz Bentonit/Salzbeton

Bitumen/Asphalt:

- Langzeitverhalten im Kontakt mit Salzlösungen (unterschiedliche Benetzbarkeit der Salzoberfläche mit beiden Flüssigkeiten)
- Biologische Degradation
- Verbesserung der Haftung von Bitumen auf der Salzoberfläche

2.5 Auflockerungszone

- Verbesserung des Prozessverständnisses zur Rekompaktion/Verheilung mit Modellvalidierung
- Permeabilität – Dilatanzbeziehung
 - Schädigungsentwicklung
 - Verheilung (Feuchteinfluss, Einfluss von Porenfluiddruck (Gas, Lauge))

2.6 Kontaktfuge

- Konkretisierung möglicher Versuchskonzepte zur Ermittlung der Kontakteigenschaften (mechanische/hydraulische/chemische Eigenschaften)
- Anforderungen auf der Basis von Belastungsszenarien
- Untersuchungen zu technischen Möglichkeiten im Umgang mit Kontaktfugen

3 Abstracts und Folien

3.1 Einführung

T. Rothfuchs

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH



Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen

- Einführung -

Tilman Rothfuchs
GRS-Fachbereich Endlagersicherheitsforschung
24. August 2010



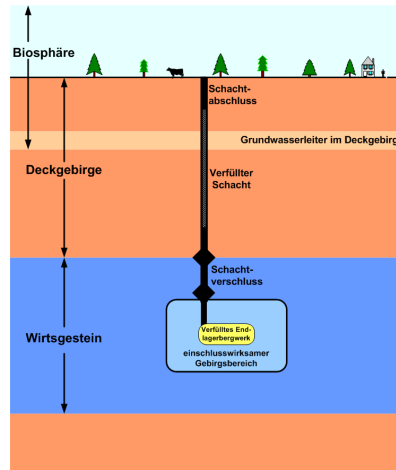
Motivation und Ziele des Workshops

- **Motivation**
 - Schnellstmögliche Bereitstellung des benötigten Know-How für die erforderliche Nachweisführung im Rahmen des Sicherheitsnachweises (Safety Case)
 - Koordination/Abstimmung verschiedener Projektanträge
 - Optimierung der Verwendung von Personal- und Sachmitteln
- **Ziel**
 - Diskussion des Standes von W&T
 - Identifikation noch notwendiger FuE-Arbeiten

Workshop Verschlusssysteme, Braunschweig, 24. und 25. August 2010

2

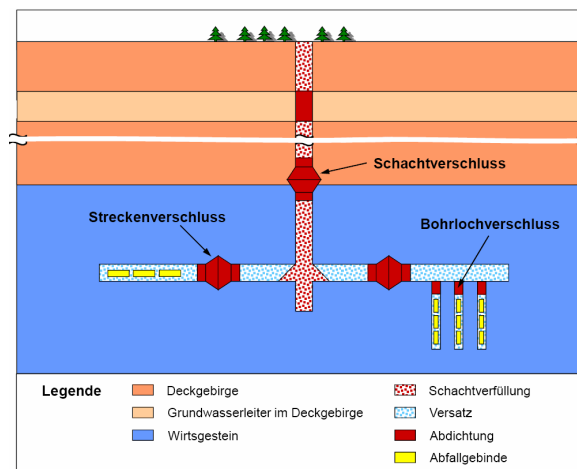
Verfülltes und verschlossenes Endlagerbergwerk in der Nachbetriebsphase eines Endlagers (GRS-247)



Workshop Verschlussysteme, Braunschweig, 24. und 25. August 2010

3

Verfülltes und verschlossenes Endlager zu Beginn der Nachbetriebsphase (GRS-247)



Workshop Verschlussysteme, Braunschweig, 24. und 25. August 2010

4

Komponenten der Verschlussysteme für Bohrlöcher, Strecken und Schächte

- Verschlussmaterialien
- Kontaktfuge
- Auflockerungszone
- Gebirge/Wirtsgestein

Relevante Prozesse

- Wärmefreisetzung der hochradioaktiven Abfälle
- Resultierende Spannungen, Verformungen
 - ALZ-Bildung bzw. Rückbildung, Versatzkompaktion (Porosität, Permeabilität)
- Wirkung von Fluiden (Lösungen und Gasen)
 - Druckentwicklung
 - Migration
 - Einfluss auf das mechanische und hydraulische Verhalten
- Wechselwirkung der Systemkomponenten untereinander
 - chemisch
 - mechanisch

Offene Fragen in Bezug auf den sicheren Einschluss

- Versatzkompaktion (REPOPERM)
- Nachweis der hinreichenden EDZ-Rückbildung
- Langzeitbeständigkeit von Verschlussmaterialien
- Überprüfung und Optimierung des Verschlusskonzepts am Endlagerstandort
 - Schachtverschlüsse,
 - Streckenverschluss bzw. Streckenversatz (Salzgrus, SVV),
 - Bohrlochverschlüsse

Sicherheitsnachweise gem. Sicherheitsanforderungen des BMU (Stand Juli 2009)

- Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems
 - Herstellung, Errichtung und Funktion muss grundsätzlich erprobt sein (oder anderweitig nachweisbar sein)
- Prüfung der Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren
- Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse (Vertrauensbildung, Modellqualifizierung)
- Umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien
- Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten

Programm des Workshops

24. August 2010

14:00 **Thema 1: Schachtverschlusskonzepte**,
Vortrag Prof. Kudla (TU BA Freiberg),

15:00 **Thema 2: Streckenverschlusskonzepte**,
Vortrag Hr. Laske (BfS)

16:00 **Thema 3: Ingenieurtechnischer Nachweis** für geotechnische Verschlussbauwerke
Vortrag Dr. Müller-Hoeppel (DBE TEC)

16:45 **Thema 4: Konzepte der Langzeitsicherheitsanalyse zur Beurteilung der Wirksamkeit von Abschlussbauwerken**, Vortrag Dr. Mönig (GRS),

Programm des Workshops

25. August 2010

08:30 **Thema 5: Arteigene Verschlussmaterialien** (Salzgrus, Salzbriketts, SVV)
Vortrag Dr. Stührenberg (BGR)

09:30 **Thema 6: Nichtarteigene Materialien** (Bentonit, Salzbeton, Bitumen, Sorelbeton),
Vortrag Dr. Herbert (GRS)

11:00 **Thema 7: Auflockerungszone**,
Vortrag Hr. Wieczorek (GRS)

12:00 **Thema 8: Kontaktfuge**,
Vortrag Hr. Mauke (BfS)

3.2 Konzepte der Langzeitsicherheitsanalyse zur Beurteilung der Wirksamkeit von Abschlussbauwerken

Jörg Mönig
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

3.2.1 Einleitung

Seit vielen Jahren werden in Deutschland Konzepte zur Entsorgung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle in tiefgelegenen Salzgesteinen in steiler Lagerung entwickelt und die damit verknüpften sicherheitsrelevanten Fragestellungen untersucht. Primäres Ziel der Entsorgung derartiger Abfälle in tiefen geologischen Formationen ist die Isolation der Abfälle von der Biosphäre und der dauerhaft sichere Einschluss der Abfälle in einem eng begrenzten Bereich des Endlagers, der als einschlusswirksamer Gebirgsbereich bezeichnet wird. Nach dem in Deutschland verfolgten Entsorgungskonzept wird langfristig der Einschluss der Abfälle in diesem Bereich durch die geologische Barriere gewährleistet.

Allerdings muss bei der Errichtung des Bergwerks die geologische Barriere punktuell durchörtert werden, wodurch potenzielle Wegsamkeiten für eine mögliche Ausbreitung der Radionuklide bis in die Biosphäre entstehen. Um diese unvermeidliche Verletzung der Integrität der geologischen Barriere auszugleichen, werden verschiedene geotechnische Verschlussbauwerke wie Schacht- und Streckenverschlüsse errichtet sowie verbleibende Hohlräume mit kompaktierbarem Salzgrus versetzt. Diese Maßnahmen sollen in Verbindung mit der geologischen Barriere den dauerhaft sicheren Einschluss der Abfälle sicherstellen, indem sie zum einen den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen entlang der anthropogen geschaffenen Hohlräume verhindern bzw. behindern und zum anderen den Austrag der eingelagerten Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich so stark behindern, dass er sicherheitstechnisch unbedenklich ist. Durch die Hohlraumverfüllung wird das Ausmaß des Salzkriechens begrenzt und damit werden auch die in das umliegende Salzgestein induzierten Gebirgsspannungen minimiert. Der Salzgrusversatz leistet damit einen Beitrag zum Erhalt der Integrität der geologischen Barriere.

Während die geotechnischen Verschlussbauwerke sofort eine spezifizierte Dichtwirkung aufweisen, weist der Salzgrus anfänglich eine große Porosität und damit auch eine hohe Durchlässigkeit auf. Aufgrund der vom Salzkriechen verursachten Hohlraumkonvergenz wird der Salzgrus zunehmend kompaktiert und sein hydraulischer Widerstand erhöht sich mit der

Zeit. Gleichzeitig nimmt die Stützwirkung des Salzgrusversatzes zu, wodurch die weitere Hohlraumkonvergenz verlangsamt wird. Aus der zeitlichen Entwicklung der Salzgruskompaktion und dem Zeitpunkt, ab dem der Salzgrus eine nennenswerte Dichtwirkung ausübt, leiten sich Anforderungen an die spezifizierte Durchlässigkeit und die Beständigkeit der geotechnischen Verschlussbauwerke ab.

3.2.2 Mögliche Entwicklungen des Endlagersystems

Obwohl bisher keine umfassende und systematische Szenarienentwicklung für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle in einem Salzstock in Deutschland durchgeführt worden ist, lassen sich auf Basis der bisherigen Erkenntnisse eine Reihe von möglichen Entwicklungen des Endlagersystems ableiten, die in einem zukünftigen Langzeitsicherheitsnachweis zu berücksichtigen wären.

Für alle geotechnischen Verschlussbauwerke ist prinzipiell nur eine endliche Dichtheit im technischen Sinne nachweisbar, d.h. für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern ist stets eine geringe Durchlässigkeit der Verschlussbauwerke zu unterstellen. Daher ist davon auszugehen, dass es im Laufe der Zeit zu einem Zutritt von Lösungen durch die Schachtverschlüsse in den Infrastrukturbereich des Endlagers kommt. Die Menge an zutretender Lösung hängt zum einen von der nachweisbaren Durchlässigkeit der Schachtverschlussbauwerke sowie von der zeitlichen Entwicklung der Salzgruskompaktion ab.

Die Lösungsmengen, die im Infrastrukturbereich auftreten können, erhöhen sich möglicherweise durch einen Zutritt von Lösungen aus spröderen Salzgesteinsschichten im Übergangsbereich der Leine- und Staßfurt-Salzgesteinsserie noch.

Streckenverschlüsse werden in der Regel aus Betonbaustoffen auf Salzbasis erstellt. Diese Materialien sind gegenüber bestimmten Salzlösungen nicht langzeitbeständig und können korrodieren, wodurch sich die Durchlässigkeit des Baukörpers mit der Zeit deutlich erhöhen kann. Schließlich ist beim Langzeitsicherheitsnachweis auch von einer frühzeitig hohen Durchlässigkeit einzelner geotechnischer Verschlussbauwerke auszugehen.

Lösungen aus dem Infrastrukturbereich können durch die Streckenverschlussbauwerke in den Einlagerungsbereich gelangen. Die Menge an advektiv zutretender Lösung hängt von den hydraulischen Widerständen der Streckenverschlussbauwerke und der mit Salzgrus

versetzten Strecken sowie den Antriebskräften für die Strömung wie Druckdifferenz über das Verschlussbauwerk ab.

3.2.3 Abbildung der Ereignisabläufe in Langzeitsicherheitsanalysen

Um Aussagen zur Langzeitsicherheit des Endlagersystems treffen zu können, werden die zu betrachtenden Entwicklungen des Endlagersystems durch entsprechende Modellrechnungen untersucht. Dabei ist eine Vielzahl von zum Teil gekoppelten Prozessen zu berücksichtigen und die Modellrechnungen sind für ein System mit großer räumlicher Ausdehnung und für lange Zeiträume bis zu einer Million Jahre durchzuführen. Daher werden die ablaufenden Prozesse zum Teil in vereinfachter Form modelliert, um die Rechenzeiten für die Modellrechnungen in einem vertretbaren Maß zu halten. In einem Sicherheitsnachweis besteht eine Herausforderung darin zu zeigen, dass die Prozesse angemessen abgebildet werden. Noch bestehende Ungewissheiten im Prozessverständnis werden häufig durch Vereinfachungen oder konservative Annahmen berücksichtigt, wobei deren Konservativität nicht immer einfach zu belegen ist.

Es ist in der Regel wünschenswert, Konservativitäten in den Modellrechnungen durch Verbesserung des Prozessverständnisses verringern zu können. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund, dass sich der Fokus der Nachweisführung in den letzten Jahren geändert hat. Nunmehr steht der Nachweis des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Mittelpunkt und nicht mehr die radiologische Unbedenklichkeit von Radionuklidfreisetzungen in die Biosphäre. Damit steigen die Anforderungen an das Verständnis der im Nahfeld der Abfälle ablaufenden Prozesse und deren realitätsnahe Abbildung in den langzeitsicherheitsanalytischen Modellrechnungen.

3.2.3.1 Integritätsnachweis für geotechnische Verschlussbauwerke

Zum Nachweis der Integrität eines geotechnischen Verschlussbauwerks ist zu zeigen, dass der hydraulische Widerstand des Verschlusses den spezifizierten Anforderungen entspricht, und dass die Integrität des Baukörpers gegeben ist /KRE 08/. Der Integritätsnachweis für den Baukörper besteht aus dem Nachweis der Rissbeschränkung, dem Nachweis der chemischen Langzeitbeständigkeit und dem Nachweis der mechanischen Stabilität des Baukörpers. Diese Nachweise sind für alle zu betrachtenden Lastfälle zu erbringen.

Bei einem geotechnischen Verschlussbauwerk können drei Bereiche unterschieden werden, die unterschiedliche Durchlässigkeiten aufweisen. Neben dem Baukörper selbst ist die Auflockerungszone im Salzgestein um das Bauwerk herum sowie die Kontaktzone zwischen Baukörper und Auflockerungszone zu berücksichtigen. Die Dichtwirkung eines Verschlussbauwerkes setzt sich aus dem hydraulischen Widerstand der drei Bereiche zusammen. Für langzeitsicherheitsanalytische Rechnungen werden die drei Bereiche zusammengefasst und es wird eine integrale Permeabilität für das Verschlussbauwerk in den Modellrechnungen berücksichtigt.

3.2.3.2 Korrosion von Streckenverschlussbauwerke

Verschlussbauwerke auf Betonbasis sind gegenüber bestimmten Salzlösungen geochemisch nicht stabil und können korrodieren. Während Magnesiasbetone gegen NaCl-haltige Lösungen nicht stabil sind, werden Salzbetone durch $MgCl_2$ -haltige Lösungen korrodiert. Auf Mikroebene laufen komplexe Prozesse ab. Dabei reagieren die Na- bzw. Mg-Ionen der Porenraumlösung mit dem Festkörper, wodurch die Porenraumlösung ihre Korrosionsfähigkeit einbüßt. Durch Diffusionsprozesse werden die Umsetzungsprodukte von der Reaktionsfront abgeführt und weitere Reaktanden zugeführt.

Der Korrosionsprozess wird in Langzeitsicherheitsanalysen in vereinfachter Form abgebildet wie z. B. bei den Untersuchungen zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle in Morsleben (ERAM). Danach weist die Abdichtung eine geradlinige Geometrie und besitzt eine zeitlich konstante Auflockerungszone, deren Permeabilität größer als die Permeabilität des intakten Baukörpers ist. Korrosive Lösung strömt daher in der Auflockerungszone am Baukörper entlang, durch Diffusionsprozesse gelangen Reaktanden in die Porenlösung und führen zur Umsetzung des Baukörpers. Die Korrosion schreitet eindimensional voran und an der Korrosionsfront wird von einer schlagartigen Erhöhung der Porosität (ϕ) und der Permeabilität des Baukörpers (k) sowie einer Veränderung der Viskosität (μ) der Porenlösung ausgegangen. Die Vorgänge sind schematisch in Abb.1 dargestellt.

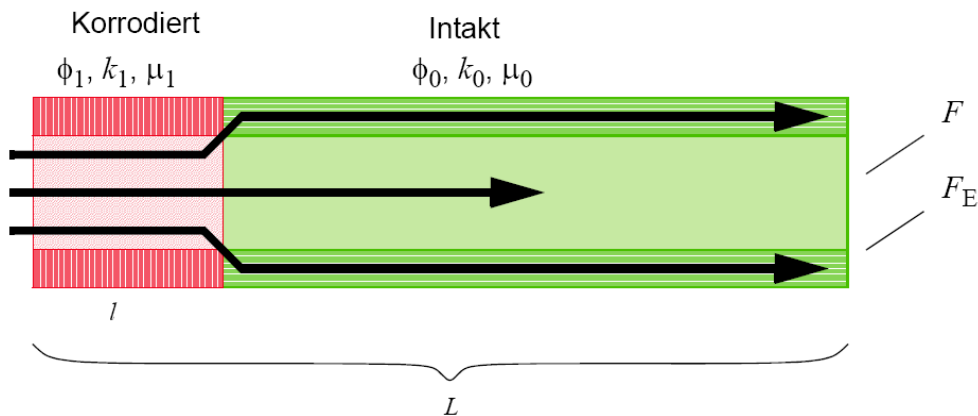


Abb. 1 Langzeitsicherheitsanalytisches Modell zur Korrosion von Streckenverschlussbauwerken

3.2.3.3 Salzgruskompektion

Die Kompaktion von Salzgrus führt zu einer Verringerung der Porosität als auch der Permeabilität des Salzgruses mit der Zeit. In einem Endlager ist die Kompaktion von Salzgrus ein langsam ablaufender Prozess, da der bei zunehmender Kompaktion sich aufbauende Stützdruck des Versatzes die Hohlraumkonvergenz und damit die weitere Kompaktion behindert.

Die zur modellhaften Beschreibung des Prozesses benötigten Parameter werden aus Laborexperimenten abgeleitet. Diese werden in der Regel als Zeitrafferexperimente durchgeführt, wobei zwangsläufig einzelne Versuchsbedingungen nicht den Bedingungen in einem Endlager entsprechen, z. B. weil höhere Kompaktionsdrücke als im Endlager oder größere, konstante Verschiebungsraten verwendet werden.

Kürzlich wurden die Ergebnisse der verfügbaren Laboruntersuchungen zur Salzgruskompektion zusammenfassend bewertet und dargestellt /KRO 08/. Dabei ging es insbesondere um die Fragen, unter welchen Einflussgrößen und Randbedingungen die Versuche durchgeführt wurden, welche Ungewissheiten in den Ergebnissen bestehen und vor allem welche Labordaten im Hinblick auf die Ableitung von Parameterwerten für Modellrechnungen für Endlager von radioaktiven Abfällen belastbar sind. Abb. 2 zeigt die Bandbreite der relevanten Ergebnisse für trockenen Versatz (rote Striche) und für feuchten Versatz (blaue Striche). Es besteht eine phänomänologische Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität, die im doppellogarithmischen Maßstab linear ist und für Porositätswerte oberhalb 10 % durch viele Messwerte als sehr gut abgesichert anzusehen ist (nicht im Bild

dargestellt). Diese Beziehung beschreibt die Verhältnisse für trockenen Versatz auch im Bereich zwischen 2 % und 10 % recht gut. Für feuchten Versatz liegen in diesem Porositätsbereich allerdings kaum Werte vor.

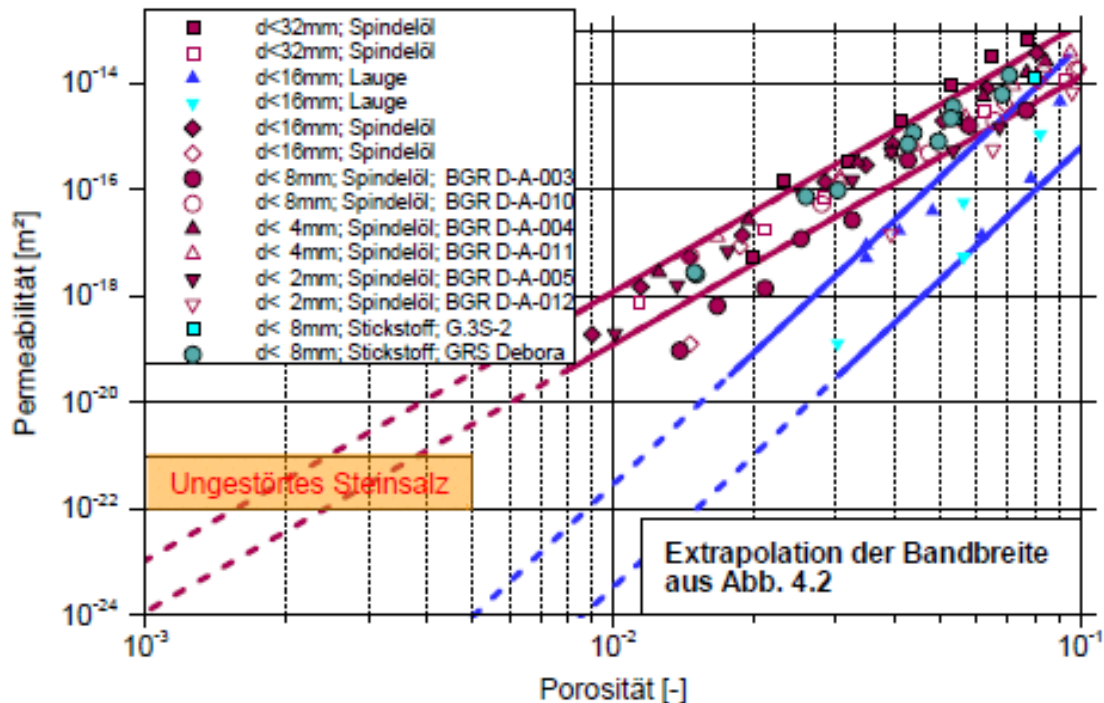


Abb. 2 Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität von kompaktiertem Salzgrus (aus /KRO 08/)

In langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen wird die Porosität des Salzgrusversatzes aus der Hohlraumkonvergenz errechnet und daraus mit Hilfe der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung die Permeabilität des Salzgruses ermittelt. Dabei wird die Gültigkeit des linearen Zusammenhangs im doppellogarithmischen Maßstab auch für sehr kleine Porositätswerte unterhalb von wenigen Prozent unterstellt, wodurch implizit davon ausgegangen wird, dass die Porosität unabhängig von ihrer absoluten Größe immer verbunden ist. Im Hinblick auf die Berechnung von Radionuklidtransportprozessen handelt es sich um eine konservative Annahme, da bei sehr kleinen Porositäten nicht auszuschließen ist, dass in zunehmendem Maß einzelne, nicht verbundene Porositätsbereiche im Salzgrus auftreten.

Eine weitere konservative Annahme bei den Modellrechnungen besteht darin, dass die Salzgruskompaktion nur so lange voranschreitet, bis eine endliche Grenzporosität erreicht wird. Der Versatz weist dann in den Modellrechnungen die aus der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung abgeleitete Permeabilität auf.

3.2.4 Offene Fragen

Die offenen Fragen, die im Hinblick auf geotechnische Verschlussysteme für ein Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle in einer Salzformation aus sicherheitsanalytischer Sicht besonders relevant sind, ergeben sich aus den im voranstehenden Kapitel angesprochenen Modellannahmen und -vereinfachungen bzw. den noch bestehenden Ungewissheiten in den Prozessabläufen.

Bezüglich der geotechnischen Verschlussbauwerke sind folgende Aspekte zu klären:

- Wie groß ist die Ausfallwahrscheinlichkeit eines geotechnischen Verschlussbauwerkes und wie kann aus einer gegebenen Ausfallwahrscheinlichkeit eine Lebensdauer abgeleitet werden?
- Wie groß ist die Barrierewirkung nach dem Ausfall eines Verschlussbauwerkes?
- Bilden die Modellansätze und –vereinfachungen die Prozessabläufe angemessen ab? Dies betrifft insbesondere
 - den Fluidtransport im Verschlussbauwerk und dabei auch das Verhalten der Auflockerungszone sowie die Auswirkungen der Kontaktzone,
 - die Korrosion der Verschlussbauwerke sowie
 - die Art der Fluidströmung in der Barriere, insbesondere die Frage, ob es zur Ausbildung von Strömungskanälen kommt.

Im Hinblick auf die Salzgruskompaktion sind folgende Fragen relevant:

- Sind die Stoffgesetze für das Salzkriechen und die Hohlraumkonvergenz ausreichend validiert? Dies betrifft
 - den Wert des Exponenten im Gesetz für das Salzkriechen,
 - den Wert der Referenzporosität, ab der der Versatz eine Stützwirkung ausübt und die Hohlraumkonvergenz behindert,
 - den Wert der Grenzporosität und
 - die Kompaktion von feuchtem Salzgrus bzw. Versatz mit lösungserfülltem Porenraum

- Ist die Extrapolation der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung für Porositäten kleiner 10 % zulässig?
- In wie weit sind die Daten auf feuchten Salzgrus bzw. Versatz mit lösungserfüllten Porenraum zu übertragen?
- Wie groß bei der Endporosität, d.h. bei der Porosität, bei der keine weitere Kompaktion des Salzgruses mehr erfolgt? Wie groß ist dann die hydraulische Durchlässigkeit?
- Gibt es eine endliche Porosität, ab der der Versatz hydraulisch undurchlässig ist?
- Kommt es zu Sackungen im Versatz und in Folge dessen zu einer ungleichmäßigen Porositätsverteilung?

Die hier dargestellte Liste der offenen Fragen bezieht sich nur auf die aktuellen Implementierungen der Prozesse in den langzeitsicherheitsanalytischen Modellen. In den übrigen Themengebieten des Workshops werden diese Fragestellungen zum Teil in vertiefter Form behandelt sowie weitere Aspekte angesprochen. Vor dem Hintergrund dieser Diskussionen sind auch die konzeptuellen Modelle in den Sicherheitsanalysen zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

3.2.5 Literatur

- /KRE 08/ Kreienmeyer, M.; Lerch, Ch.; Polster, M. und Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. – TEC-15-2008-AP, DBE Technology GmbH, Peine, 2008.
- /KRO 08/ Kröhn, K.-P.; Lerch, C.; Miehe, R. und Stührenberg, D.: Projekt REPOPERM – Zwischenbericht: Hydraulische und mechanische Eigenschaften von stark kompaktiertem Salzgrus. – GRS-A-3459, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH.



Konzepte der Langzeitsicherheitsanalyse zur Beurteilung der Wirksamkeit von Abschlussbauwerken

Jörg Mönig, GRS

Workshop zu Verschlussystemen
Braunschweig, 24.-25.08.2010



Aufgaben der geotechnischen Barrieren im Sicherheitskonzept

Geotechnische Barrieren bei einem HAW-Endlager im Salzgestein

- Schachtverschluss
 - Verhinderung bzw. Minimierung eines Lösungszutritts in das Endlager durch den Schacht
- Streckenverschluss
 - Verhinderung bzw. Minimierung eines Lösungszutritts in die Einlagerungsbereiche
- Salzgrusversatz
 - Minimierung der Konvergenz und damit der ins Gebirge induzierten Spannungen
 - Behinderung eines Lösungszutritts zu den Abfällen (später Verhinderung)
 - Behinderung des advektiven Transportes kontaminierter Lösungen aus dem ewG

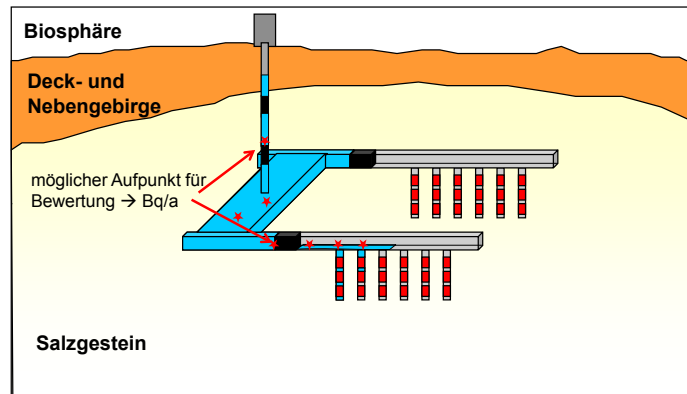
Anforderungen hängen von der vorgesehenen Funktion der Bauwerke ab

- Asse
- ERAM

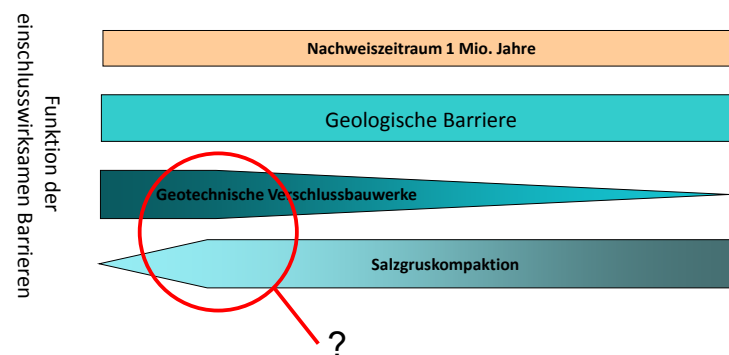
Mönig - Workshop zu Verschlussystemen, Braunschweig, 24.-25.08.2010

2

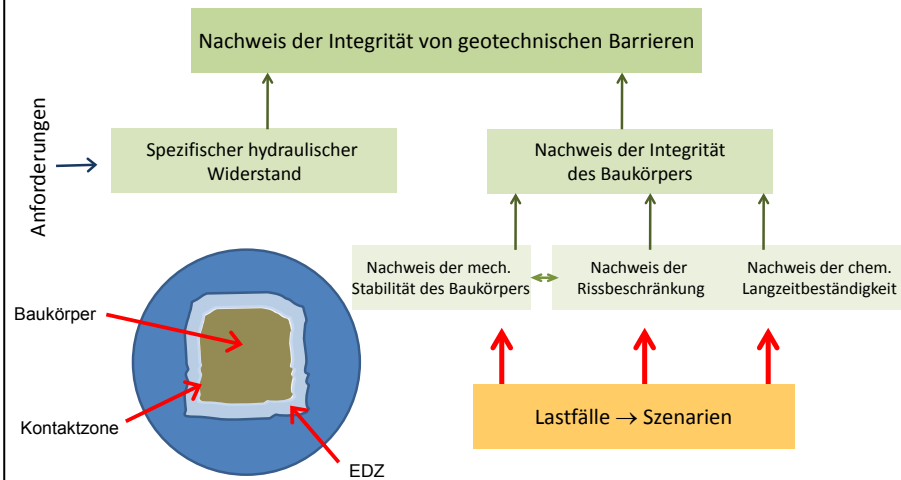
Mögliche Entwicklung des Endlagersystems



Zeitlich variable, funktionale Anforderungen



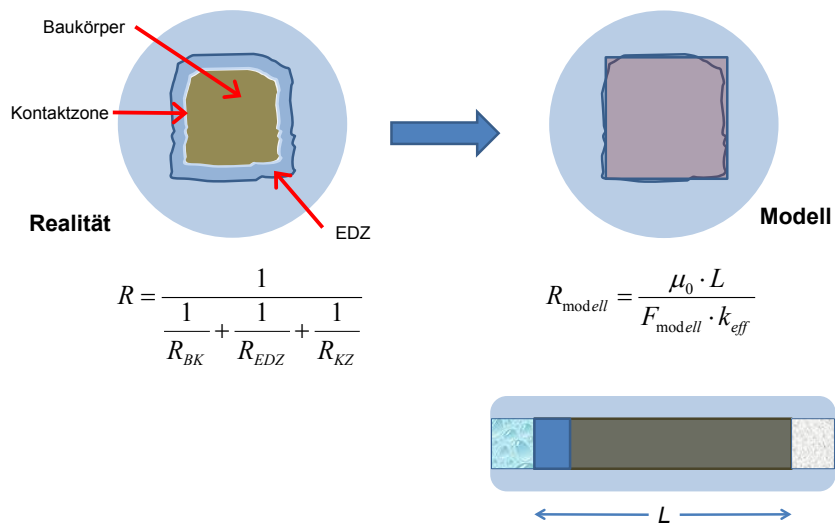
Integritätsnachweis geotechnische Verschlussbauwerke



Mönig - Workshop zu Verschlussystemen, Braunschweig, 24.-25.08.2010

5

Vereinfachungen im Langzeitsicherheitsnachweis



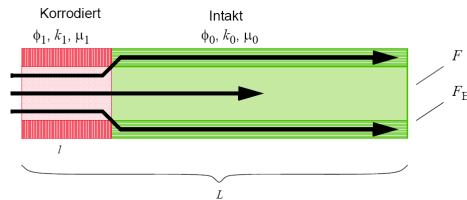
Mönig - Workshop zu Verschlussystemen, Braunschweig, 24.-25.08.2010

6

Korrosion von Abdichtungen – Beispiel ERAM

Vereinfachte Annahmen:

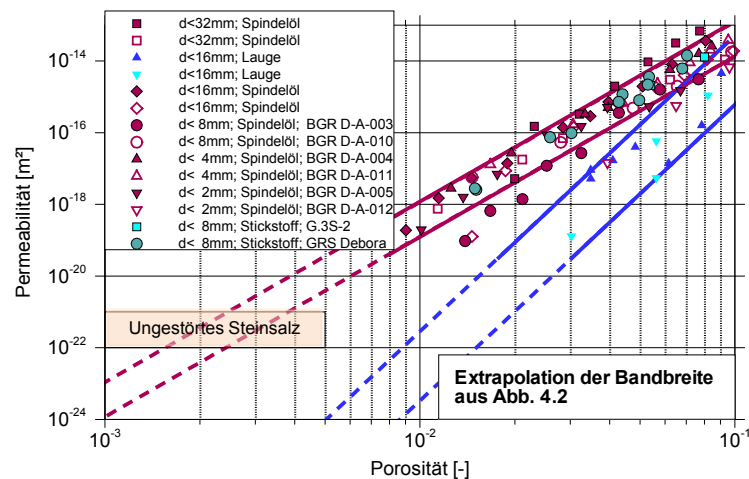
- gradlinige Geometrie
- Abdichtung mit zeitlich konstanter EDZ
- $k_{EDZ} > k_{Baukörper}$
- $k_{Baukörper} \ll k_{korrodiert}$
- Korrosion schreitet eindimensional voran
- Reaktionszone ist schmal



Schlagartige Änderung an Korrosionsfront

- Porosität ϕ
- Permeabilität k
- Viskosität μ

Salzgruskompaktion



Quelle: GRS-A-3459

Offene Fragen (1) Wiedervorlage am 25.08.2010

Geotechnische Verschlussbauwerke

- Ausfallwahrscheinlichkeit $\Leftrightarrow$ Lebensdauer
- Restbarrierewirkung bei Ausfall
- Gültigkeit der Modellansätze und -vereinfachungen
 - zur Berechnung des Fluidtransportes
 - Verhalten der EDZ
 - Auswirkungen der Kontaktzone
 - zur Korrosion der Bauwerke
 - Art der Strömung in der Barriere
 - Ausbildung von Strömungskanälen

Offene Fragen (2)

Salzgruskompaktion

- Validierung der Stoffgesetze für das Salzkriechen und die Hohlraumkonvergenz
 - Exponent im Gesetz für das Salzkriechen
 - Wert der Referenzporosität (d.h. Stützwirkung des Versatzes)
 - Wert der Grenzporosität
 - Kompaktion bei feuchtem Salzgrus bzw. bei lösungserfülltem Porenraum
- Porositäts-Permeabilitätsbeziehung
 - Zulässigkeit der Extrapolation bei $\phi < 10\%$
 - Übertragbarkeit auf feuchtem Salzgrus bzw. bei lösungserfülltem Porenraum
 - Endporosität
 - hydraulischer Widerstand bei Endporosität
 - Porosität bei hydraulischer Undurchlässigkeit
- Kommt es zu Sackungen im Versatz (ungleichmäßige Porositätsverteilung)

3.3 Schachtverschlusskonzepte

Wolfram Kudla
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Professur für Erdbau und Spezialtiefbau

Handout zum Workshop am 24./25.08.2010 in Braunschweig

Schachtverschlusskonzepte – Zukünftiger Forschungsbedarf bei Schachtverschlüssen für ein HAW-Endlager

- 3.3.1 Prüfung der Einsetzbarkeit/Übertragbarkeit von bisher untersuchten Komponenten aller bisherigen Schachtverschlusskonzepte für UTD/UTV's auf ein HAW-Endlager
- 3.3.2 Entwicklung eines Verschlusskonzeptes für ein HAW-Endlager mit zugehörigem Sicherheitsnachweis (Sicherheitsnachweis unter Verwendung FEPs; Festlegung von Anforderungen; Bemessungszeiträume;)
 - Anforderungen aufstellen
 - Gasdurchlässigkeit
 - Wärmeeintrag
- 3.3.3 (Weiter-)Entwicklung und großtechnische Tests zur Verdichtung von arteigenen Materialien (Salzgrus) in Schächten (Auswertung/Bewertung der Erfahrungen WIPP),
- 3.3.4 Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus bei Restporositäten kleiner 10 % (REPOPERM, in Abh. vom Konvergenzverhalten)
- 3.3.5 Entwicklung und Tests zusätzlicher Funktionselemente (sofort wirksam, Lebensdauer 100-200a)
- 3.3.6 Weiterentwicklung von MgO-Beton (Priorität 2)

- 3.3.7 Einbringtechniken von Asphalt dichtungselementen (Bitumen- und Asphaltsäulen)
- 3.3.8 Entwicklung von Permeabilität-Porositäts-Beziehungen für die **anstehenden relevanten Gebirgsschichten (Steinsalz, ...)** und für die verwendeten Baustoffe (sofern diese auf Schub bis über die Dilatanzgrenze beansprucht werden; einschließlich „Wiederverheilung“ bei Kompaktion) **Priorität 1**
- 3.3.9 (Weiter-)Entwicklung von probabilistischen Nachweisverfahren als ein Teil des Integritätsnachweises für einen Schachtverschluss
- 3.3.10 Messtechnische Überwachung von Schachtverschlüssen (z.B. bei Schachtverschlüssen für UTD/UTV im Salz über 10 Jahre zur Gewinnung von Rückschlüssen auf einen HAW-Schachtverschluss) **relevantes Bauwerk von K+S vorhanden(?)**

Perspektivisch:

- 3.3.11 Großtechnischer Test eines HAW-Schachtverschlusses als Ganzes (!) im Maßstab 1:1 (langfristig), (Beobachtungszeit min. 10 Jahre; technisch notwendig; dient zur Erfahrungssammlung, und zum Akzeptanzgewinn in der Öffentlichkeit) **Priorität 1 (mittelfristig, da standortspezifisch)**

Punkte 3.3.3, 3.3.4, 3.3.6-3.3.9 gelten auch für Streckenverschlusskonzepte



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager
für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen

**Schachtverschlusskonzepte –
Zukünftiger Forschungsbedarf**

Wolfram Kudla
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
TU Bergakademie Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau an der TU Bergakademie Freiberg
Gustav-Zeuner-Str. 1A | 09596 Freiberg
Tel. 0 3731/39-2893 | Fax 0 3731/39-3581 | www.bergbau.tu-freiberg.de

Endlagerungsziel:

Langfristig sichere Einschluss der Abfälle

Wichtigste geotechnische Barriere(n):

2 Schachtverschlüsse (und Streckenverschlüsse und
Bohrlochverschlüsse und Salzgrusversatz)

Für den sicherheitlichen Nachweis eines
Schachtverschlusses sind erforderlich:

- Festlegung eines maximal zulässigen
Volumenstromes
(letztlich abgeleitet aus Radionuklidtransportberechnungen)

Auslegung der Konstruktion und der Materialien für einen Schachtverschluss:

- 1. langzeitstabil** (hinsichtlich Festigkeit, Erosionsbeständigkeit, Gefügestabilität, Chemische Langzeitstabilität,)
- 2. weitestgehend impermeabel** (hoher hydraulischer Widerstand resultierend aus Schachtverschluss, Kontaktzone und Auflockerungszone gegenüber Flüssigkeiten und Gasen(?))
- 3. Mehrbarrierensystem**
- 4. Redundante Konstruktion**
- 5. Diversitär hinsichtlich eingesetzter Materialien**
- 6. standsichere Konstruktion**
- 7. Berücksichtigung von Belastungsszenarien aus FEPs**
- 8. Hydro-thermo-mechanische Modellrechnungen**

3

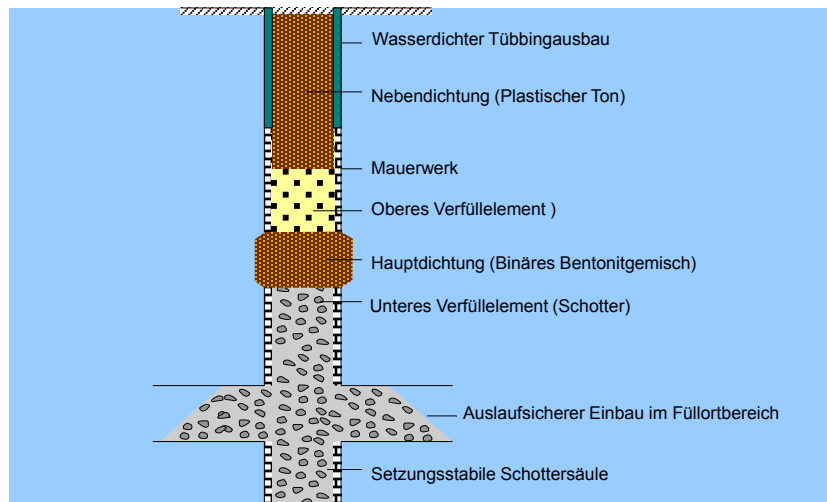
Wissensstand – bisherige Forschung

Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik zu flüssigkeitsdichten Schachtverschlüssen für UTD und UTV oder für die trockene Verwahrung von Grubenhöhlräumen:

- Vorprojekt Schachtverschlüsse: GSF-Bericht 32/95
- FuE-Vorhaben "Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht SA II" (FKZ 02C0516)

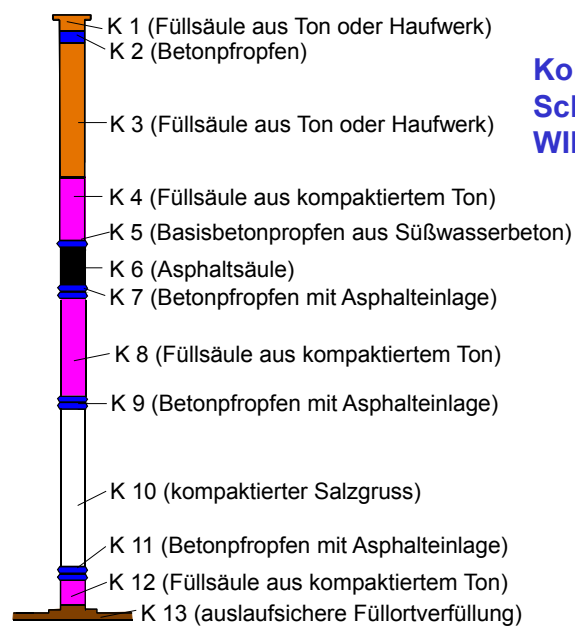
4

Prinzipieller Aufbau Schachtverschluss im Salinar – Typ Salzdettfurth



5

Konzept Schachtverschluss WIPP – Site



6

Zukünftiger Forschungsbedarf bei Schachtverschlüssen für ein HAW-Endlager (1)

1. Prüfung der Übertragbarkeit aller bisherigen Schachtverschlusskonzepte für UTD/UTV's auf ein HAW-Endlager
2. Entwicklung eines Verschlusskonzeptes für ein HAW-Endlager mit zugehörigem Sicherheitsnachweis
(Sicherheitsnachweis unter Verwendung von FEPs; Festlegung von Anforderungen; Bemessungszeiträume;; Konzeptentwicklung prinzipiell auch für Tonstein und Granit)
3. (Weiter-)Entwicklung und großtechnische Tests zur Verdichtung von Salzgrus in Schächten
4. Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus bei Restporositäten kleiner 10 %

9

Zukünftiger Forschungsbedarf bei Schachtverschlüssen für ein HAW-Endlager (2)

5. Entwicklung und Test zusätzlicher Funktionselemente
(sofort wirksam)
6. Weiterentwicklung von MgO-Beton
7. Einbringtechniken von Asphaltdichtungselementen
(Bitumen- und Asphaltsäulen)
8. Entwicklung von Permeabilität/Porositäts-Schädigungs-Beziehungen für die anstehenden relevanten Gebirgsschichten und für die verwendeten Baustoffe
(sofern diese auf Schub bis über die Dilatanzgrenze beansprucht werden; einschließlich „Wiederverheilung“ bei Kompaktion)
9. (Weiter-)Entwicklung von probabilistischen Nachweisverfahren als ein Teil des Integritätsnachweises für einen Schachtverschluss

10

Zukünftiger Forschungsbedarf bei Schachtverschlüssen für ein HAW-Endlager (3)

10. Messtechnische Überwachung von Schachtverschlüssen
(z.B. bei Schachtverschlüssen für UTD/UTV im Salz über 10 Jahre zur
Gewinnung von Rückschlüssen auf einen HAW-Endlager-Schachtverschluss)

Perspektivisch:

11. Großtechnischer Test eines HAW-Schachtverschlusses als
Ganzes (!) im 1:1 Maßstab (langfristig), (Beobachtungszeit
min. 10 Jahre; technisch notwendig; dient zur Erfahrungssammlung, und zum
Akzeptanzgewinn in der Öffentlichkeit)

Angeregte Diskussion!

3.4 Streckenverschlusskonzepte

Dirk Laske
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

3.4.1 Abstract

In einem Endlagerbergwerk ist das Auffahren von Strecken zum Erreichen und Einrichten der Einlagerungsbereiche unvermeidlich. Diese Strecken müssen bei der Stilllegung des Endlagers wieder qualifiziert verschlossen bzw. abgedichtet werden, um den langfristig sicheren Einschluss der Abfälle zu gewährleisten.

Die Anforderungen an den hydraulischen Widerstand und die Lebensdauer der Streckenverschlüsse müssen hierbei projektspezifisch festgelegt werden:

- sofortige bzw. kurzfristige Wirksamkeit während der Betriebsphase,
- temporäre Wirksamkeit, um zu gewährleisten, dass anfangs noch nicht voll funktionstüchtige Bauwerke während der Nachbetriebsphase ihre volle Funktionstüchtigkeit noch erlangen können (Ausnutzung der Kriecheigenschaften des Salzgebirges),
- langfristige bzw. dauerhafte Wirksamkeit in der Nachbetriebsphase für die ungestörte Entwicklung des Endlagers).

Aus weiteren Szenarien, welche z. B. eine Freisetzung von Radionukliden unterstellen, ergeben sich ggf. weitere Anforderungen (z. B. Gastransport).

Das Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen sieht bisher vor, dass neben den Schächten auch die Zugänge zu den Einlagerungsbereichen mit Streckenverschlüssen verschlossen werden. Diese geotechnischen Barrieren sollen so projektiert werden, dass (zumindest bei den wahrscheinlichen Entwicklungen) keine Lösungszutritte zu den Abfällen auftreten. Die Bereiche zwischen den Einlagerungsorten und den Strecken- bzw. Schachtverschlüssen sollen mit Salzgrus versetzt werden. Dieser kompaktiert durch die Konvergenz des umgebenden Steinsalzes derart, dass unter

Abnahme der Porosität und Permeabilität langfristig vergleichbare Eigenschaften wie Steinsalz erreicht werden.

Im Gegensatz zu den Endlagern Morsleben (ERAM) und Asse – dort stehen standortbedingt teilweise nur geringe Abdichtungslängen (ca. 25 m) in Strecken zur Verfügung – können in einem neu zu errichtenden Endlager deutlich längere Abdichtungsgebiete ausgewiesen werden.

Diese Abdichtungsgebiete erlauben die Nutzung folgender Konstruktionsprinzipien:

- Trennung von Widerlager- und Dichtfunktion
- Redundanz und Diversität (arteigene und fremde Baustoffe)

Mitte der 80iger Jahre begannen in Deutschland konzeptionelle Arbeiten für ein Dammbauwerk für ein Endlagerbergwerk im Salinar (Vorbereitung eines in situ-Versuchs im Bergwerk Asse).

Der geplante Versuchsdamm wurde auch aufgrund seines komplizierten Aufbaus nur teilweise verwirklicht. Am so genannten Asse-Vordamm aus Salzbeton wurden nachträglich die hydraulischen Eigenschaften der Kontaktzone im Rahmen der Planungsarbeiten für das Stilllegungskonzept des ERAM untersucht (s. Themenkomplex 8 - Kontaktfuge).

Weitere relevante Projekte für Dammbauwerke im Salinargebirge sind die für die Stilllegungsprojekte Asse und ERAM entwickelten Konzepte für horizontale geotechnische Barrieren. Weiter zu nennen sind Dammbauprojekte aus dem konventionellen Salzbergbau bzw. UTD (z. B. Verschlussbauwerk Hope, Damm Immenrode, Streckenversuchverschlussbauwerk Sondershausen).

Im ERAM wurden aufgrund der schon erwähnten geometrischen Randbedingungen Streckenabdichtungen im Steinsalz konzipiert, welche die Widerlager- und Dichtfunktionen in einem Konstruktionselement (Abdichtkörper aus Salzbeton einschl. Injektion der Kontaktfuge) vereinigen. Die erforderlichen Nachweise eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes, der Lagesicherheit, der Rissbeschränkung und der Langzeitstabilität bzw. Dauerhaftigkeit wurden exemplarisch für einen Referenzstandort geführt. Derzeit wird ein in-situ-Versuch im Maßstab 1:1 im ERAM durchgeführt.

Weiterführende Arbeiten müssen standort- und projektspezifisch ausgerichtet werden. Die bestehenden Konzepte für Streckenabdichtungen sollten hierzu entsprechend überarbeitet werden. Erkenntnisse zu den erforderlichen Nachweiszeiträumen (Spezifizierung im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen) sowie zur Langzeitstabilität der Baustoffe sind vorrangig zu erarbeiten.

Das Projekt ERAM zeigt, dass Großversuche zur Demonstration der technischen Machbarkeit und Funktionsweise (integrale Dichtheit) von Streckenverschlusssystemen notwendig sind.

Workshop zu Verschlusssystemen
in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle
in Salzformationen

Streckenverschlusskonzepte

Dirk Laske, Peter L. Wellmann
BfS – Asse Stilllegung

24. und 25. August, GRS-Braunschweig

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk
(Stand: 20.04.1983)

- ⇒ Endlager muss sicher gegen die Biosphäre abgeschlossen werden
- ⇒ Radionuklide aus nicht vollständig ausschließbaren Transportvorgängen dürfen nicht zu Individualdosen oberhalb der Werte der StriSchV führen

Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (letzter BMU-Entwurf vom 13.07.2010)

- ⇒ Dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstiger schädlicher Wirkungen dieser Abfälle
- ⇒ Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

1. Betriebsphase

- Abgrenzung von Einlagerungsbereichen und -feldern
- Sicherer Verschluss von Einlagerungsbereichen gegenüber dem restlichen Grubengebäude
- Schutz bei anormalen Betriebszuständen oder Auslegungstörfällen

2. Nachbetriebsphase

- Wiederherstellung der geologischen Barriere
- Dauerhafte Gewährleistung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



- 3 -



Bundesamt für Strahlenschutz

Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

1. Schutzziele

- Sicherheitskriterien
- Sicherheitsanforderungen (Entwurf)

2. Szenarienanalyse

- ISIBEL (Instrumentarium für eine **s**icherheitliche **B**ewertung von **E**ndlagern für HAW)
⇒ FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz

3. Langzeitsicherheitsanalyse

- Verschlusskonzept
- Szenarienanalyse
- Konsequenzanalyse
- Vergleich Ergebnisse vs. Schutzziele

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



- 4 -



Bundesamt für Strahlenschutz

Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

Einwirkungen auf Funktion / Bauwerk

1. Geologie / Wirtsgestein

- Auflockerungszone
- Kontaktfuge

2. Geomechanik

- Konvergenzrate
- Gebirgsdruck

3. Geochemie

- Lösungszusammensetzung

4. Abfall

- Wärmeentwicklung
- (Gasbildung)

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Bundesamt für Strahlenschutz

- 5 -

Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

⇒ Ableitung von
Gefährdungsbildern
(Bsp. Schachtverschluss)

⇒ Identifizierung von Begleit- und
Leitgefahren

**Gefährdungsbilder stellen
wesentliche Grundlagen bei der
Auslegung / Bemessung des
Verschlusses dar**

		Gefährdungsbilder			
		Auspressen von wässrigen Lösungen	Zutritt von wässrigen Lösungen	Setzungen und/oder Aus- laufen der Verfüllstoffe	Hebungen und/oder Aus- pressen der Verfüllstoffe
Begleitgefahren	aus der Nutzung des Bauwerkes				
	Lösungsdruck von unten	Leitgefahr	Null (konservativ)	Null (konservativ)	Leitgefahr
	Lösungsdruck von oben	Null (konservativ)	Leitgefahr	x	Null (konservativ)
	Korrosion der Verfüllstoffe	x	x	x	x
	Gebirgsdruck	x	x	x	x
	Bemessungslast für Erdbeben	akzeptierbares Restrisiko			
	Lösungsprozesse im Gebirge	x	x	x	x
	Einsenkungswert des Schachtverschlusses	-	x	Leitgefahr	x
	Temperaturänderungen	Bedeutend im Hinblick auf Belastungen			
	Quelldruck/Schwinden	Bedeutend im Hinblick auf Belastungen			
nicht zu quanti- fizieren	Entmischung	durch abgesanderte Stoffeigenschaften zu berücksichtigen und durch geeignetes Qualitätsmanagement zu begrenzen			
	Unzulänglichkeiten in der Bauanführung	durch „abgesanderte“ Baueigenschaften (Bauteilwiderstand) zu berücksichtigen und durch geeignetes Qualitätsmanagement zu begrenzen			
	Klimatische Verände- rungen	zu übernehmendes Risiko			
	Tektonische Einflüsse	zu übernehmendes Risiko			
	Human Intrusion	zu übernehmendes Risiko			

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Bundesamt für Strahlenschutz

- 6 -

Streckenverschlusskonzepte

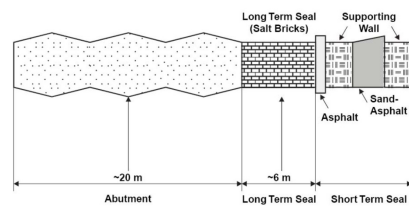
für ein HAW-Endlager im Salinar

1. Konstruktive Gestaltung

- Einzelbauwerke und/oder Vollversatz
- Trennung von Widerlager- und Dichtfunktion
- Redundant
- Diversitär
- Baustoffe
 - Arteigen
 - Fremd

2. Funktion / Wirkung

- Lagestabil / standsicher
- Dichtend / rissfrei
- Langzeitstabil
- Kurzfristig wirksam



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



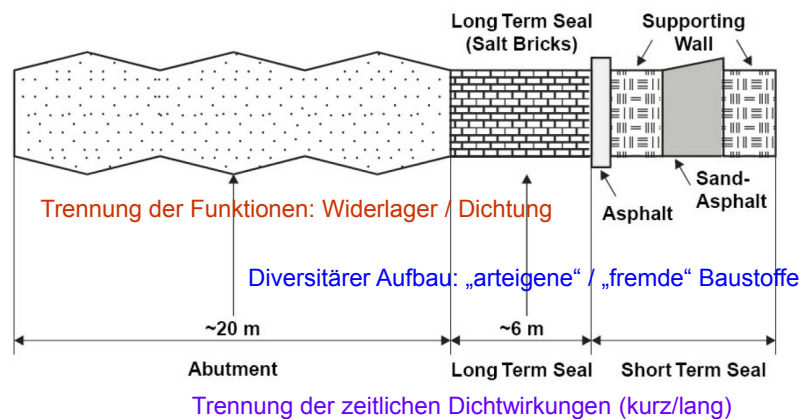
- 7 -



Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

Kurzzeitdichtung als „Multikomponentensystem“



aus: Rotfuchs, et al. (2004): CROP – GRS, Köln

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

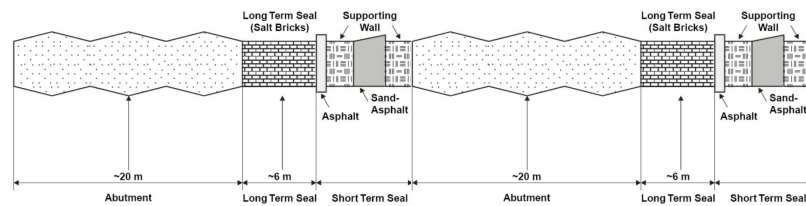


- 8 -



Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar



... und als „redundante“ Ausführung
(entsprechender Platz bei einem neuen HAW-Endlager vorausgesetzt)

nach: Rottfuchs et al (2004): CROP – GRS, Köln

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

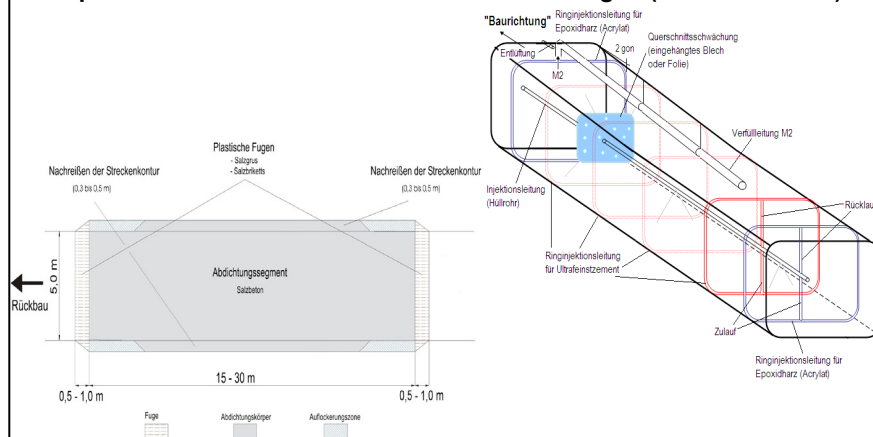


- 9 -

Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

Bsp.: Streckenverschluss mit hohen Anforderungen (ERA Morsleben)



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

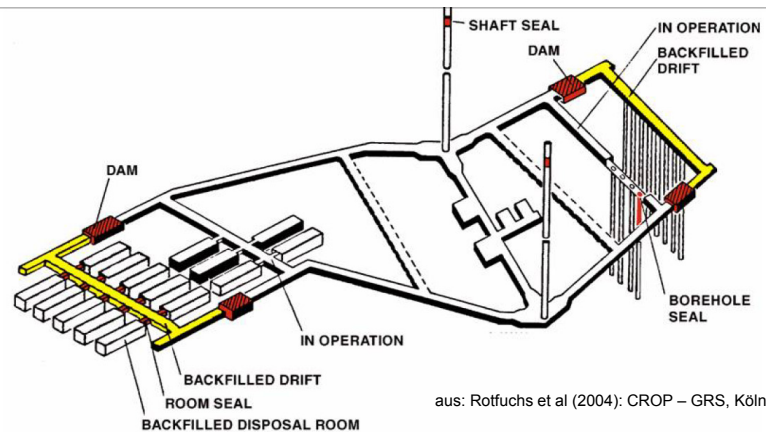


- 10 -

Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

Bsp.: Verschlusskonzept für ein HAW-Endlager



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



- 11 -



Streckenverschlusskonzepte

für ein HAW-Endlager im Salinar

OPL / Notwendige weiterführende Arbeiten:

1. Ingenieurtechnische Nachweise

- Integritätsnachweis für geotechnische Verschlussbauwerke kann geführt werden (ISIBEL-Abschlussbericht 2008)
- Arbeiten zur Quantifizierung von generellen/standortbezogenen Anforderungen und Einwirkungen erforderlich (und damit für eine belastbare Nachweisführung)

2. Wirksamkeit des Streckenverschlusses

- sofort wirksam (nach Fertigstellung) hinsichtlich der zu erwartenden Belastungen
- Frühe Nachbetriebsphase (Kurzzeit) (<100a)
- Späte Nachbetriebsphase (Langzeit) (>100a, wirksam erst nach Auflaufen des Gebirges und hinreichender Rückbildung der ALZ) (Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend EUROCODE 2002)

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



- 12 -



für ein HAW-Endlager im Salinar

1. Ingenieurtechnische Nachweise

3. Material vs. Wirtsgestein

- #### 4. Auflockerungszone und Kontaktfugen

- | Verantwortung für Mensch und Umwelt |



3.5 Ingenieurtechnischer Nachweis für geotechnische Verschlussbauwerke

Nina Müller-Hoeppe
DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

3.5.1 Abstract

Unter geotechnischen Verschlussbauwerken werden im Folgenden Schacht- und Streckenverschlüsse verstanden. Dabei werden speziell Schacht- und Streckenverschlüsse im Salzbergbau betrachtet.

Streckenverschlüsse, auch als Dämme bezeichnet, hatten ursprünglich die Funktion, betriebene Grubenfelder vor eindringenden Wässern und Lösungen zu schützen. Im Salzbergbau werden Dämme entweder als Notfallmaßnahmen gegen akut eindringende Wässer und Lösungen errichtet oder als Vorsorgemaßnahme gegen potenziell eindringende Wässer und Lösungen. Aus letztgenannten Grund ist für eine größere Zahl bereits errichteter Dämme unklar, ob sie einer Belastung ausgesetzt waren bzw. sind.

Schachtverschlüsse hatten ursprünglich die Funktion die Schachtröhre zum Schutz der Tagesoberfläche setzungsstabil zu verschließen. Anforderungen an die Dichtheit, die über den Schutz von genutzten Grundwasserhorizonten vor Versalzung hinausgingen, bestanden i. d. R. nicht, da für Salzbergwerke Versatzpflicht bestand.

Während die Auslegung von Streckenverschlüssen lange Zeit auf Grundlage empirischer Erfahrungen und daraus abgeleiteten Konstruktionsregeln erfolgte, wurde für Schachtverschlüsse in Bezug auf die Funktionsfähigkeit Setzungsstabilität bereits früh eine rechnerische Auslegung vorgenommen. Sie beruhte auf Gleichgewichtsbetrachtungen im Rahmen der Silotheorie, für die eine analytische Lösung verfügbar war und die in Übereinstimmung mit systematischen Beobachtungen stand. Ein rechnerischer Nachweis der Setzungsstabilität wurde also früh umgesetzt wie ältere Veröffentlichungen und Richtlinien des Bergbaus zeigen.

In jüngerer Zeit ergibt sich zunehmend bei der Stilllegung von Salzbergwerken die Anforderung einer trockenen Verwahrung. Weiterhin haben sich die Anforderungen an Schacht- und Streckenverschlüsse auf Grund der Nachnutzung von Bergwerken, z. B. als

Untertagedeponien erhöht bzw. es sind zusätzliche Anforderungen hinzugekommen. Parallel dazu entwickelte sich in neuerer Zeit die Auffassung, dass solche Verschlüsse geotechnische Bauwerke sind, auf die das Regelwerk des Bauwesens zumindest sinngemäß anzuwenden ist.

Das bautechnische Regelwerk seinerseits hat in den letzten 20 Jahren insbesondere in Bezug auf die rechnerische Auslegung/Nachweisführung einen signifikanten Umbruch erfahren, der sich als Übergang von einer systematisch-deterministischen zur zuverlässigkeitsorientierten, semiprobabilistischen Auslegung/Nachweisführung schlagwortartig charakterisieren lässt. Diese Art der Auslegung/Nachweisführung wurde im Rahmen des Regelwerks der Eurocodes europaweit vereinheitlicht. In diesem Kontext wurde der Begriff der Zuverlässigkeit (besser: Zuverlässigkeitsniveau, früher als Sicherheitsniveau bezeichnet) eingeführt, wobei Zuverlässigkeit gesamtheitlich verstanden wird. Für die Auslegung beinhaltet das die bereits genannte semiprobabilistische Nachweisführung, die in der Praxis als Methode der Teilsicherheitsbeiwerte unter Verwendung von Grenzzustandsbeziehungen umgesetzt wird. Dazu ist anzumerken, dass die Teilsicherheitsbeiwerte bisher nur teilweise theoretisch abgeleitet sind, in den meisten Fällen wurden sie mittels Kalibrierung gewonnen. Zusätzlich sind zur Erzielung der geforderten Zuverlässigkeit folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Grundlage der Auslegung sind Versuchs- bzw. Messdaten, kein expert judgement.
- Es erfolgt ein Qualitätsmanagement mittels organisatorischer und technischer Qualitätssicherungsmaßnahmen.
- Es wird geschultes Personal eingesetzt.

Am Beispiel des FuE-Vorhabens Schachtverschluss Salzdetfurth, bei dem die konstruktiven Elemente eines Schachtverschlusses unter Verwendung eines systematisch-deterministischen Ansatzes für langfristig trockene Verwahrung ausgelegt wurden und den begleitenden in situ Versuchen konnte gezeigt werden, dass der seinerzeit ausgelegte Schachtverschluss für die meisten Aspekte die Anforderungen einer zuverlässigkeitsorientierten, semiprobabilistischen Auslegung bzgl. des Zuverlässigkeitsniveaus bereits abdeckt. Auch Qualitätssicherungsmaßnahmen wurden bei Bau umgesetzt.

Setzt man in Bezug auf Verschlüsse die Anforderung trockene Verwahrung mit der Anforderung sicherer Einschluss gleich, sind in Bezug auf Schachtverschlüsse für ein HAW-Endlager nur wenige Gesichtspunkte zu ergänzen bzw. zu vertiefen. Bei diesen handelt es sich um Ermittlung der Güte/Zuverlässigkeit der (Funktions)kriterien zur Beschreibung der

Grenzzustände sowie die Übernahme der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte für weitergehende über klassische bautechnische Anwendungsfälle hinausgehende Fragestellungen. Dies betrifft insbesondere Vertiefung des Wissenstandes zu der Beziehung Lebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit sowie die Quantifizierung der Restfunktionsfähigkeit nach Überschreitung des auslegungsbestimmenden Grenzzustandes.

Die Weiterentwicklung und Anwendung von probabilistischen Nachweisverfahren als Teil des Integritätsnachweises von geotechnischen Verschlussbauwerken ist zu betreiben.

Zu Überprüfen ist weiterhin die Vollständigkeit der Funktionsnachweise nach heutigem Kenntnisstand. Außerdem ist die Zulässigkeit der Übertragung der Bohrschachtergebnisse auf sehr große Schachtdurchmesser in Bezug auf mögliche Grenzen der Skalierbarkeit zu bewerten.

Ingenieurtechnischer Nachweis für geotechnische Verschlussbauwerke

Nina Müller-Hoeppel
DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager
für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen

Braunschweig 24. und 25. August 2010

Müller-Hoeppel / 24.08.2010
Workshop Verschlusssysteme 2010, Braunschweig

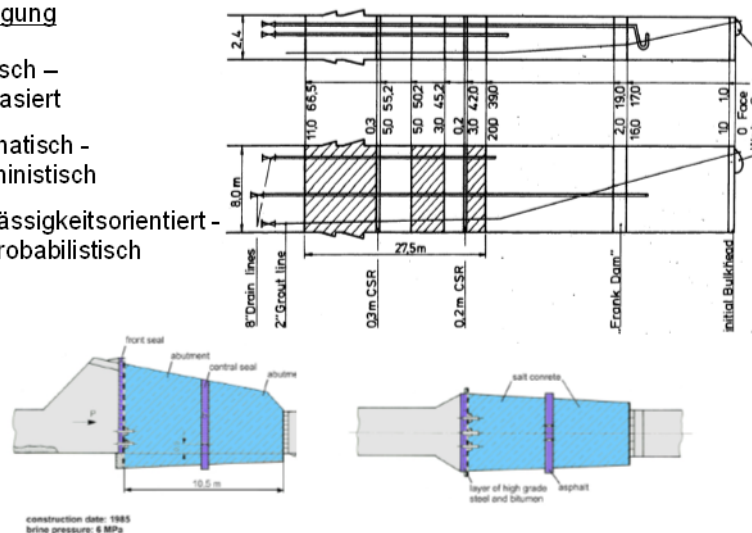
1

DBETEC
DBE TECHNOLOGY GmbH

Auslegung von Verschlussbauwerken - Vorgehensweisen

Auslegung

1. empirisch – regelbasiert
2. systematisch – deterministisch
3. zuverlässigkeitsorientiert – semiprobabilistisch



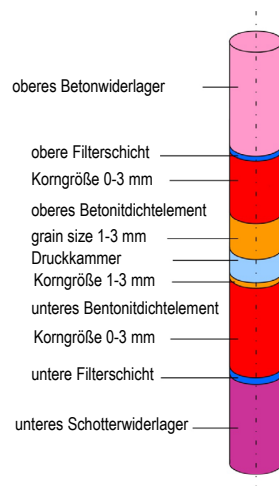
Müller-Hoeppel / 24.08.2010
Workshop Verschlusssysteme 2010, Braunschweig

2

DBETEC
DBE TECHNOLOGY GmbH

Bohrschacht Salzdetfurth – in situ Test

Versuchsaufbau (schematische Darstellung)

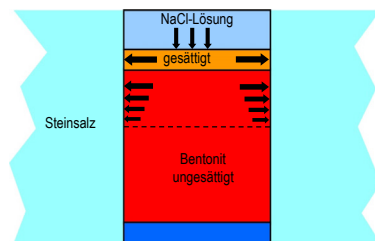


Funktionsanforderungen aus trockener Verwahrung:

$$k_f \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

$$p_{q0} \geq 1 \text{ MPa (NaCl-Lösung)}$$

Langzeitstabilität



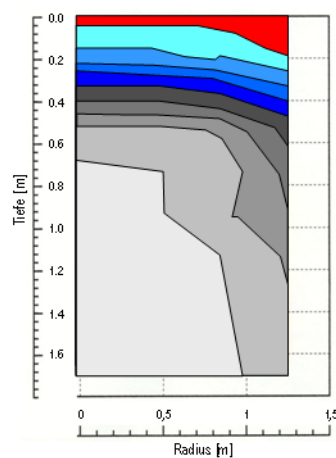
Müller-Hoeppe / 24.06.2010
Workshop Verschlussysteme 2010, Braunschweig

5

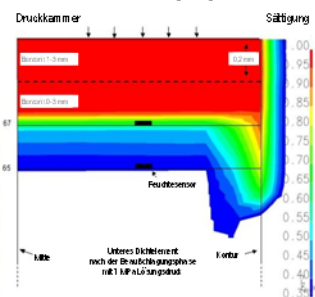
DBEtec
DBE TECHNOLOGY GmbH

Bohrschacht Salzdetfurth – Sättigung Bentonitdichtelement

Untersuchungsergebnisse nach Aufwältigung



Kalibrierte Berechnungsergebnisse



$$\text{Ergebnisse: } k_f = 4,4 \cdot 10^{-11} \text{ m/s} < 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

$$p_{q0} \sim 1-1,2 \text{ MPa} \geq 1 \text{ MPa}$$

Langzeitstabilität: natürliches Analogon Salton

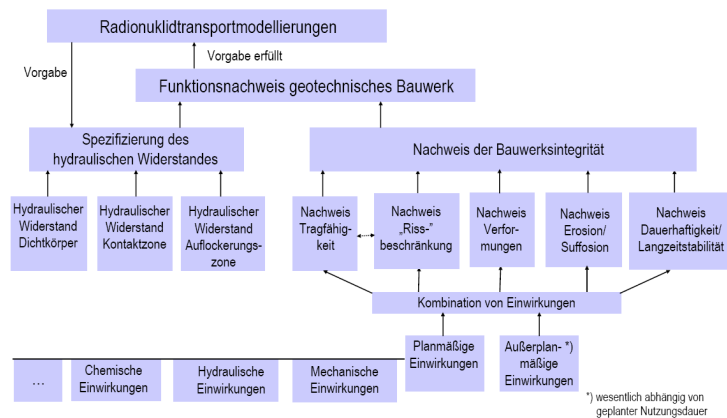
Müller-Hoeppe / 24.06.2010
Workshop Verschlussysteme 2010, Braunschweig

6

DBEtec
DBE TECHNOLOGY GmbH

Schachtverschluss - Funktionsnachweis

→ Anforderung: trockene Verwahrung $\equiv$ sicherer Einschluss



Müller-Hoeppe / 24.06.2010
Workshop Verschlusssysteme 2010, Braunschweig

7

DBEtec
DBE TECHNOLOGY GmbH

Schachtverschluss Salzdefurth Schacht I und Bohrschacht

- Unteres Widerlager: Schotter (Hartgestein) → Verformungssicherheit
- Filter- und Übergangsschichten → Erosion/Suffosion
- Dichtelement aus binärem Bentonitgemisch → Hydraulischer Widerstand
- Filter und Übergangsschichten → Erosion/Suffosion
- Oberes Widerlager: Schotter/Beton → Verformungssicherheit
- Materialauswahl → Langzeitstabilität



Zuverlässig
realisierbare
Einbautrockendichte
Bentonit:

1,60 – 1,75 t/m³

Überwachung durch QS

Quelle: K+S

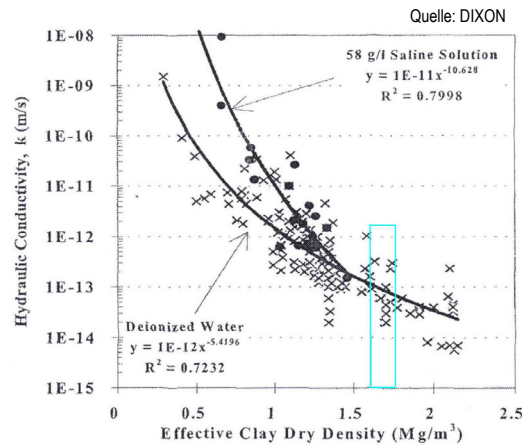
Einsatz von qualifiziertem Personal

Müller-Hoeppe / 24.06.2010
Workshop Verschlusssysteme 2010, Braunschweig

8

DBEtec
DBE TECHNOLOGY GmbH

Dichtelement aus Bentonit



Versuchswerte im Intervall $1,60 \text{ g/cm}^3 < \rho_{tr} < 1,75 \text{ g/cm}^3$

Versuchswerte k_f (abgelesen) [m/s]	Versuchswerte $\ln k_f$ (normiert)
$3 \cdot 10^{-13}$	-28,83
$3 \cdot 10^{-13}$	-28,83
$2 \cdot 10^{-13}$	-29,24
$1 \cdot 10^{-13}$	-29,93
$9 \cdot 10^{-14}$	-30,04
$6 \cdot 10^{-14}$	-30,44
$5 \cdot 10^{-14}$	-30,63
$4 \cdot 10^{-14}$	-30,85
$4 \cdot 10^{-14}$	-30,85
$3 \cdot 10^{-14}$	-31,14
$2 \cdot 10^{-14}$	31,54
Mittelwert, hier $m_k = 7,6 \cdot 10^{-14}$	-30,21
Standardabweichung, s_k	0,9226
Variationskoeffizient, v_k	0,0305

Charakteristische bzw. Bemessungswerte der Durchlässigkeiten für das Dichtelement

X_k als 5% Fraktile	$k_f = 3,7 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$
X_k als 95% Konfidenzintervall	$k_f = 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$
X_d als direkter Bemessungswert ($p_f < 0,1\%$)	$k_f = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$

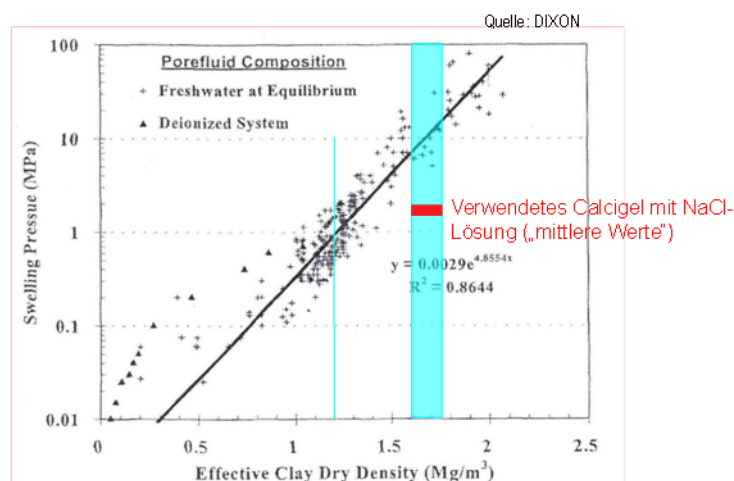
$< 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s} = \text{erf. } k_f$

Müller-Hoeppe / 24.06.2010
 Workshop Verschlussysteme 2010, Braunschweig

9

DBEtec
 DBE TECHNOLOGY GmbH

Kontaktzone Dichtelement aus Bentonit/Gebirgskontur



→ Zusammensetzung des Bentonits ist sensitiv

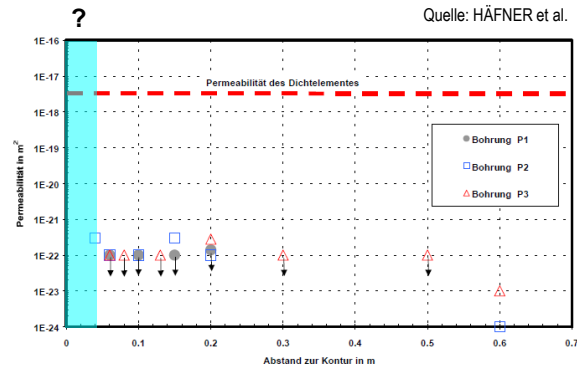
→ Spezifikation (Eignungsprüfung) und QS sind notwendig

Müller-Hoeppe / 24.06.2010
 Workshop Verschlussysteme 2010, Braunschweig

10

DBEtec
 DBE TECHNOLOGY GmbH

Bohrschacht Salzdetfurth - Auflockerungszone



Expertenschätzung: $k > 10^{-16} m^2$ unwahrscheinlich (als Erwartung formuliert)

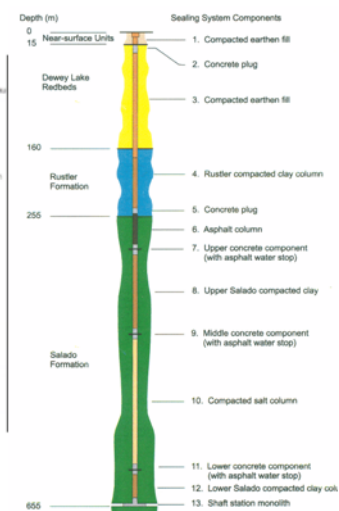
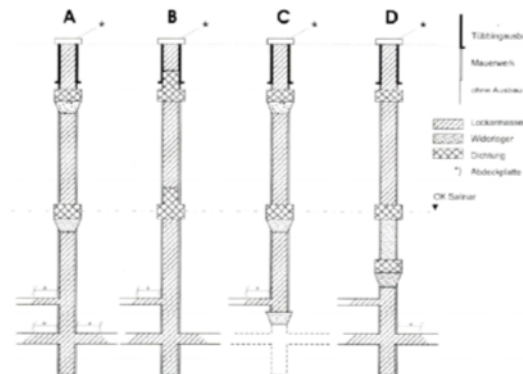
Grundlage: Guter Kenntnisstand zu ALZ's

Daten aus der WIPP

Durchlichtaufnahmen zum Schädigungszustand der Kernstücke

Diversität Schachtverschlusssystem

Quelle: Bodenstein et al.



➤ Oberes Dichtelement: Ton bzw. Bentonit in Verbindung mit Asphalt

➤ Unteres Dichtelement: abhängig von Standort bzw. Lokation

— Diskussionspunkte – Verschluss HAW Endlager —

- identifizierte Kenntnislücke ALZ/Kontaktzone → Untersuchungen mit (Baustoff-)Oberflächenpackern → **Priorität 1, hydraulisch, mechanisch, chemisch bei Fremdmaterialien**
Ursachen und Effektivität von Kanalisierung und Umläufigkeit (Korrosionsproduktverteilung im System)
- Robustheit/Einfluss von Imperfektionen (lokal erhöhte Kompressibilität) → konstruktive Beherrschung, z. B. durch Äquipotenzialsegmente , **Priorität 2**
- Güte/Zuverlässigkeit der (Funktions-)Kriterien zur Beschreibung der Grenzzustände, **Übernahme der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte, P3**
- Vollständigkeit der Funktionsnachweise nach heutigem Kenntnisstand, **P4**
- Zulässigkeit der Übertragung der Bohrschachtergebnisse auf größere Schachtdurchmesser (Skalierbarkeit) →
- **(noch) nicht benannt/systematisch untersucht: Durchbruch/Frac im oberen Dichtelement → bisherige Erklärung "Kabel" nicht plausibel →**
- **Chemische Prozesse im Kontaktbereich (Bentonitumwandlung/Illitisierung) → Versuchskonzept/Prozessverständnis, Bewertung des räumlichen und zeitlichen Einflusses (vermutet wird ein geringer Einfluss)**

Müller-Hoeppe / 24.08.2010
Workshop Verschlussysteme 2010, Braunschweig

13

DBEtec
DBE TECHNOLOGY GmbH

DBE TECHNOLOGY GmbH



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**

Müller-Hoeppe / 24.08.2010
Workshop Verschlussysteme 2010, Braunschweig

14

DBEtec
DBE TECHNOLOGY GmbH

3.6 Arteigene Verschlussmaterialien

Dieter Stührenberg
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

3.6.1 Salzgrus

Salzgrus ist im z. Z. gültigen Einlagerungskonzept für ein Endlager in Gorleben als Verfüllmaterial vorgesehen. Es wird bevorzugt wegen seiner Kompatibilität mit dem Wirtsgestein, seiner (anfänglichen) Gasdurchlässigkeit und der Verfügbarkeit (Auffahrgut, Haufwerk).

Voraussetzung für die geforderte Barrierewirkung ist die vollständige Kompaktierbarkeit des lockeren Versatzaufwerks mit einhergehender Minimierung der Permeabilität. Das Ergebnis folgt aus der (stetigen) Konvergenz des locker verfüllten Hohlraums. Wesentliche Einflussgrößen bei der Kompaktion sind die Salzart (1), Korngröße und Kornverteilung (2), die Kompaktionsgeschwindigkeit (3), Temperatur (4), Feuchtegehalt (5) und eventuelle Zusatzstoffe zur Ertüchtigung, z. B. Ca-Bentonit (6). Diese Einflussgrößen bestimmen den Versatzwiderstand gegen die Konvergenz.

Das Kompaktionsverhalten von Salzgrus kann mit den Ergebnissen aus zahlreichen weggeregelten Oedometerversuchen der BGR grundsätzlich beschrieben werden (Belastung analog der Hohlraumkonvergenz, Versuchsergebnis = „Versatzwiderstand“). Insbesondere wegen Einflussgröße (3) muss bei Laborversuchen bis zur vollständiger Kompaktion i. d. R. mindestens eine Einflussgröße die In-situ-Verhältnisse überschreiten, was bei Extrapolationen auf In-situ-Verhältnisse beachtet werden muss. Für eine genauere quantitative Bestimmung der Kompaktion mit klar definierten Spannungskomponenten für die Stoffgesetzformulierung sind ergänzend triaxiale Kompaktionsversuche erforderlich. Wegen der natürlichen Variabilität des Ausgangsmaterials kann die Porosität bis auf etwa 1 % genau bestimmt werden.

Untersuchungsstand bei der Analyse der Einflussgrößen zur Kompaktion

(1) In Gorleben soll ausschließlich Haufwerk aus dem Hauptsalz (z2) verwendet werden. Mit einem Materialvergleich der Lokationen Asse und Gorleben (z2, Älteres Steinsalz bzw.

Hauptsatz) wurde nachgewiesen, dass die Ergebnisse übertragbar sind und die Unterschiede im mechanischen Verhalten im Bereich der üblichen Streubreiten liegen.

(2) Mit einer ausgewogenen Sieblinie, wie sie sich aus dem mit einer Teilschnittmaschine gewonnenen Haufwerk ergibt, kann ein relativ optimales Kompaktionsverhalten erreicht werden, unabhängig davon, ob das Größtkorn aus technischen Gründen begrenzt werden muss (z. B. 8 mm bei der Bohrlochlagerung).

(3) Der Versatzwiderstand des Salzgruses steigt mit zunehmender Dichte (abnehmender Porenzahl) und mit anwachsender Kompaktionsgeschwindigkeit. Die Ergebnisse aus Zeitrafferversuchen sind nicht ohne Weiteres auf In-situ-Bedingungen übertragbar. Die BGR-Oedo-meterversuche liefern aber aufgrund der gewählten Vorgehensweise mit verschiedenen Kompaktionsgeschwindigkeiten über 4 Größenordnungen in einem Versuch belastbare Daten für die Extrapolation auf in-situ-relevante Konvergenzraten.

(4) Der Versatzwiderstand verringert sich deutlich bei steigenden Temperaturen. Die Abhängigkeit kann aufgrund der vorhandenen Ergebnisse angegeben werden.

(5) Der Feuchtegehalt des Salzgruses beeinflusst das Kompaktionsverhalten erheblich (Druckumlösung etc.). Insbesondere bei geringen Kompaktionsgeschwindigkeiten wird der Versatzwiderstand durch bereits geringen (zusätzlichen) Feuchtegehalt, z. B. 0,5 Gew.%, bis in den Restporositätsbereich deutlich verringert. Hierzu sind noch weitere, systematische Untersuchungen erforderlich (s. u.).

(6) Die Permeabilität von unvollständig kompaktiertem Salzgrus kann durch den Zusatz von Ca-Bentonit verringert werden (s. u.). Unter niedrigen Temperaturen ($T < \approx 70^\circ \text{C}$) verringert sich auch der Versatzwiderstand (Optimum 10 - 15 % Zusatz). Als Ursache wird der im raumtrockenen Zustand im Bentonit enthaltene Feuchtegehalt von ca. 12 % angesehen, der analog zu Einflussgröße (5) wie ein Schmiermittel wirkt.

Permeabilität

Bei Permeabilitätsversuchen mit gesättigter Salzlösung an stufenweise einaxial verdichteten Salzgrusproben liegen die nach Darcy ermittelten Durchlässigkeiten bei einer Porosität von 10 % im Bereich 10^{-15} m^2 , bei 3 - 4 % Porosität im Bereich 10^{-18} m^2 . Mit den Durchströmungsmedien Gas und Spindelöl ergeben sich höhere Werte da die Kompaktion durch diese Medien unbeeinflusst bleibt. Mit Zusätzen von 15 % Ca-Bentonit zum Salzgrus kann

die Durchlässigkeit (mit gesättigter Salzlösung) um 4 Größenordnungen gesenkt werden (siehe auch Ausführungen zu Einflussgröße (5)).

Vergleichsrechnungen

1996 wurden von der BGR zur Kompaktion und Permeabilität unter in situ relevanten Bedingungen überschlägliche eindimensionale Berechnungen für eine verfüllte Strecke mit dem Modell einer unendlich ausgedehnten Kreisringscheibe (Steinsalz) mit verfülltem Ringraum (Salzgrus) durchgeführt. Bei $T = 30^{\circ}\text{C}$ und einer Anfangskonvergenzrate von $0,3 \text{ \%/a}$ ($= 9,5 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$) ergeben sich für trockenen Salzgrus auch nach 10.000 Jahren noch Durchlässigkeiten nach Darcy im Bereich 10^{-15} m^2 , bei feuchtem Material und Salzgrus-Bentonit-Gemischen liegen sie bereits nach 100 Jahren bei 10^{-20} m^2 . Daraus ist abzuleiten, dass mit gebirgstrocken eingebrachtem Salzgrus bei niedrigeren Temperaturen sehr lange Kompaktionszeiten für den Nachweis einer Barrierewirkung angesetzt werden müssen.

Untersuchungsbedarf und offene Fragen

Salzgrus Kompaktion

- Einfluss und Wirkung von Feuchte auf das Langzeitverhalten und im Restporositätsbereich (= Schwerpunkt im aktuellen Projekt REPOPERM).
- Einfluss von Zusatzstoffen (Ca-Bentonit, konzeptabhängig).
- Triaxiale Kompaktionsversuche mit zuverlässig bestimmbarer Spannungskomponenten als Ergänzung zu den Oedometerergebnissen; Genauigkeitsanalysen und Bandbreiten-Vergleich.
- Formulierung/Verbesserung zutreffender Stoffgesetze - unter Berücksichtigung der physikalischen Prozesse, die vertrauensvolle Extrapolationen weit über gegenständlich nicht simulierbare Zeiträume hinaus erlauben. Separierung der Einflussgrößen mit schlüssiger Parameterermittlung aus den Ergebnissen der Laborversuche.
- Nachweis/Validierung der Stoffgesetze anhand von nachgerechneten Labor- oder Technikumsversuchen mit bekannten Randbedingungen, um das Vertrauen in die Sicherheitsnachweise mit Extrapolationen über lange Zeiträume zu erhöhen.

Salzgrus Permeabilität

- Korrelation Porosität – Permeabilität für kleine Porositäten (REPOPERM), Übergang zum hydraulisch dichten („kompakten“) Steinsalz.
- Was sind die Ursachen für die unterschiedlichen Permeabilitätswerte für Öl, Gas und Salzlösungen, die aus den vorliegenden Versuchen mit der Auswertung nach DARCY berechnet werden? (Umlösevorgänge, 2-Phasenfluss, kapillarer Sperrdruck).
- Einfluss der Feuchte auf kompaktierenden Salzgrus (Porenstruktur und Verheilungsvorgänge).

3.6.2 Salzbricketts

Salzbricketts sind homogene hoch-vorkompaktierte Salzgrus-Formsteine (Standard: 240 x 115 x 71 mm mit Korngrößen $0,16 < d < 0,5$ mm). Sie sind als Langzeitsicherheitskomponente in einem (Abschluss-)Damm im Salzgebirge vorgesehen. Bei der maschinellen Fertigung werden Porositäten von $\Phi \approx 9 \pm 1$ % erreicht, wobei der hohe Pressendruck von 130 MPa deutlich die In-situ-Spannungen überschreitet. Ziele sind eine deutliche Senkung des Zeitbedarfs in situ für die Kompaktion des noch porösen Materials und der dabei erforderlichen Gebirgsverformung unter Wahrung der „Kompatibilität mit dem Wirtsgestein“, eine geringe Permeabilität und die schnelle Stützwirkung bereits in der frühen Nachbetriebsphase. Bei entsprechenden Testversuchen hat das Ausgangsmaterial jedoch durch Feuchtezutritt erheblich an Festigkeit verloren.

Untersuchungsbedarf und offene Fragen

- Beschreibung der physikalischen Prozesse für die Kompaktion der verbleibenden Porosität, insbesondere bzgl. der Feuchteeffekte.
- Mechanisch/hydraulisches Verhalten an den Grenzen der Bricketts untereinander und zum Gebirge.
- Erstellung eines allgemein akzeptierten Stoffgesetzes zur Salzgruskompaktion, das Extrapolationen erlaubt (siehe auch Salzgrus).

- Fragen analog dem Restporositätsbereich von „langsam“ verdichtetem Salzgrus:
Liegen ähnliche strukturelle Verhältnisse vor ($0,16 < d < 0,5 \text{ mm}$)? Porosität/Permeabilität im Restporositätsbereich? Übergang zum kompakten Steinsalz.

3.6.3 Selbstverheilender Versatz (SVV)

Als Selbstverheilender Versatz wird ein wasserfreies pulverförmiges Magnesiumsulfat (MgSO_4) bezeichnet, das eine Barrierefunktion nach chemischer Reaktion mit Wasser entwickelt. Das feinkörnige Material mit ca. 50 % Porenvolumen ($e = 1,0$) wird pneumatisch eingebaut. Durch Flutung bildet sich festes Salzgestein aus hydratisierten Salzmineralen mit höherem Feststoffvolumen (Quellen). Nach einer Reaktionszeit von 20 - 50 d entsteht ein lösungsdichter Verschluss mit einer Restporosität von 2 - 5 % in isolierten Poren ($k = 10^{-18} - 10^{-20} \text{ m}^2$). Nichtverbrauchtes MgSO_4 verbleibt als selbstverheilende Restmenge für den Fall weiterer Lösungszutritte. Die chemische Stabilität und die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften sind abhängig vom Ausgangsmaterial, Verhältnis Festkörper/Lösung und Flutungsverlauf (langsam/schnell, Fluidruck).

Untersuchungsbedarf und offene Fragen

- Nachweis der Langzeitstabilität.
- Langzeitbeobachtung von SVV-Bauwerken im Steinsalz unter Lösungsdruck $> 50 \text{ bar}$.
- Werden die nichtbenetzten Bereiche des MgSO_4 durch den Gebirgsdruck kompaktiert und welche Folgen ergeben sich bei späterem Lösungszutritt?
- Wie verhalten sich die Übergangsbereiche zum kompakten Steinsalz?

Arteigene Verschlussmaterialien




Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH



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

Arteigene Verschlussmaterialien

Dieter Stührenberg
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Horst-Jürgen Herbert
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig

Klaus Salzer
Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig



Workshop Verschlusssysteme Salz 25. Aug. 2010


Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien




Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH



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

Arteigene Verschlussmaterialien

Inhalt:

1. Salzgrus und
 Salzgrus-Bentonit-Gemische
2. Salzbriketts
3. Selbstverheilender Versatz (SVV)
 - Untersuchungsbedarf / Offene Fragen



Workshop Verschlusssysteme Salz 25. Aug. 2010


Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER

1. Salzgrus

Salzgrus ist im z. Z. gültigen Einlagerungskonzept für ein Endlager in Gorleben als Verfüllmaterial vorgesehen.

Es wird bevorzugt wegen:

- seiner **Kompatibilität mit dem Wirtsgestein**
- seiner (anfänglichen) **Gasdurchlässigkeit**
- **Verfügbarkeit (Auffahrgut, Haufwerk)**

Voraussetzung für die Barrierewirkung:

Weitestgehende Kompaktion des lockeren Versatzaufwerks mit einhergehender Minimierung der Permeabilität

Umsetzung: **stetige Hohlraumkonvergenz bei möglichst geringem Versatzwiderstand**



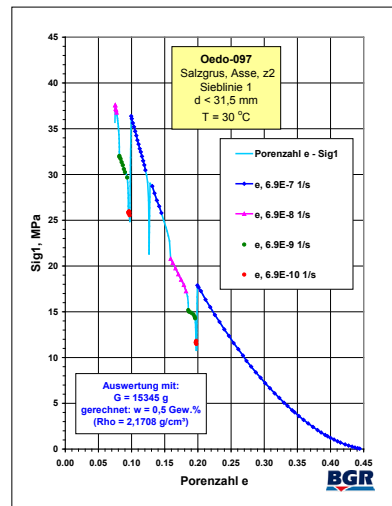
Wesentliche Einflussgrößen bei der Kompaktion (Materialparameter):

- **Salzart (→ z2, Hauptsalz)**
- **Korngröße, Kornverteilung ($d_{max} = \dots$)**
- **Kompaktionsgeschwindigkeit**
- **Temperatur**
- **Feuchtegehalt**
- **(Zusatzstoffe, z. B. Ca-Bentonit)**

Bei Laborversuchen mit vollständiger Kompaktion muss i. d. R. mindestens eine Einflussgröße die In-situ-Verhältnisse überschreiten.



Arteigene Verschlussmaterialien



Oedometerversuch 097:
Kompaktionsverhalten von
Salzgrus, Asse, z2,
d < 31,5 mm,
T = 30°C
weggeregelte Kompaktion

$$\sigma_1 = \frac{F_1 - F_2}{A}$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$$

Die BGR-Oedometerversuche
liefern belastbare Daten auch
für in situ-relevante Kompak-
tionsgeschwindigkeiten.



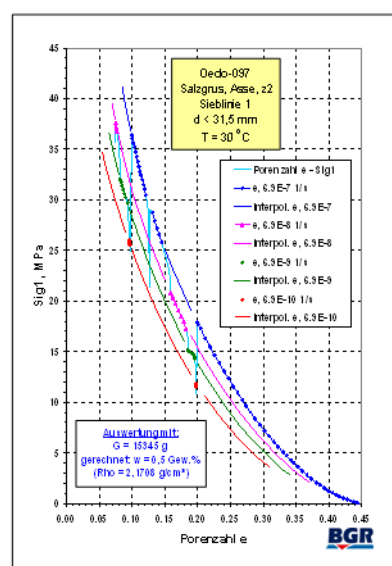
Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien



Oedometerversuch 097:
Kompaktionsverhalten von
Salzgrus, Asse, z2,
d < 31,5 mm,
T = 30°C
weggeregelte Kompaktion

$$\sigma_1 = \frac{F_1 - F_2}{A}$$

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$$

Der Versatzwiderstand des
Salzgruses steigt mit
zunehmender Dichte
(abnehmender Porenzahl)
und mit anwachsender
Kompaktionsgeschwindigkeit



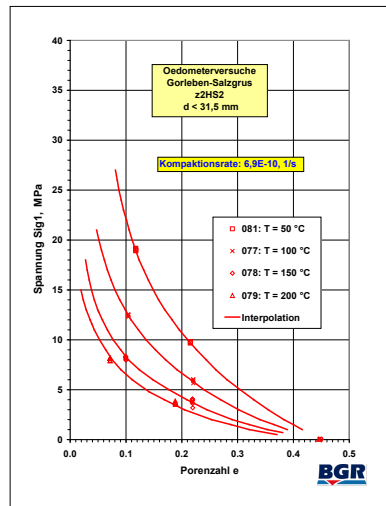
Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien



Oedometerversuche:
Einfluss der Temperatur
auf das Kompaktionsverhalten
von Salzgrus,
Gorleben, z2HS2,
Kompaktionsrate: $6,9E-10$ 1/s

Der Versatzwiderstand des
Salzgruses verringert sich
bei steigenden Temperaturen.

Beispiel

bei $e = 0,2$; $\dot{\epsilon} = 6,9 E-10 s^{-1}$:
 T = 50 °C: Sig1 = 11 MPa
 T = 200 °C: Sig1 = 3 MPa



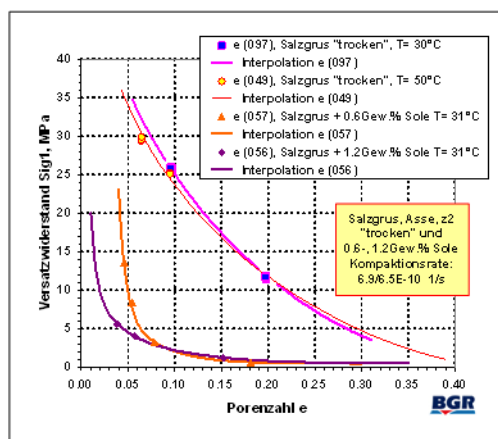
Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien



Oedometerversuche:
Einfluss der Feuchte
auf das Kompaktions-
verhalten von Salzgrus,
Asse, z2,
Kompaktionsrate:
 $6,9E-10$ 1/s

Der Feuchtegehalt des
Saltgruses beeinflusst den
Versatzwiderstand.



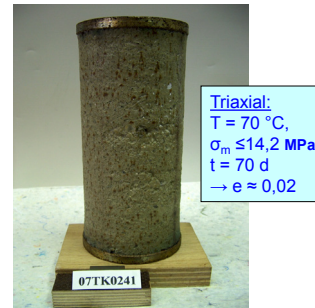
Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien



Unter Raumtemperatur können Permeabilität und Versatzwiderstand von Salzgrus mit einem Ca-Bentonit-Zusatz von 10 – 15 % erheblich vermindert werden. Der Versatzwiderstand verringert sich weiter mit geringen Lösungszusätzen.

Salzgrus mit Zusatzstoff Ca-Bentonit



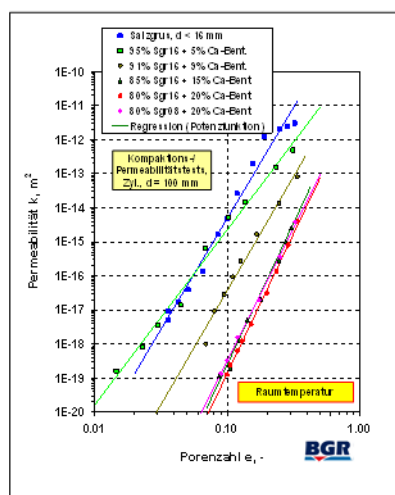
Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien



Ergebnisse der Permeabilitätsversuche mit Salzgrus und Salzgrus-Bentonit-Gemischen.

Auswertung nach Darcy.
Fluid: gesättigte Salzlösung.

Neben der Beschleunigung des Kompaktionsprozesses wird die Permeabilität des Salzgrus-Versatzes durch den Zusatz von Ca-Bentonit im unkompaktiertem Zustand erheblich vermindert.



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010

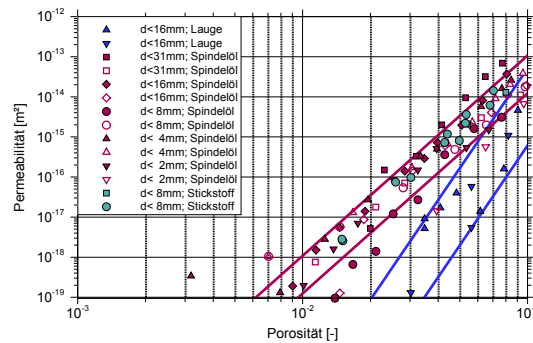


Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien

Permeabilitätsuntersuchungen an Salzgrus



Permeabilitätsversuche:

Das Durchströmungsmedium beeinflusst das Ergebnis nach DARCY.

Mit Gas werden ähnliche Permeabilitäten wie mit Spindelöl gemessen.

Vergleich der Versuche mit Lauge, Spindelöl und Stickstoff

Quelle: Endbericht REPOPERM – Phase 1 (modifiziert)



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010

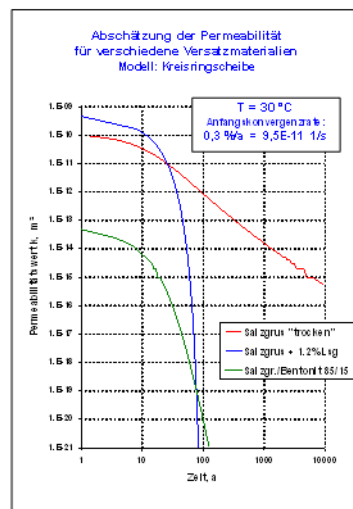
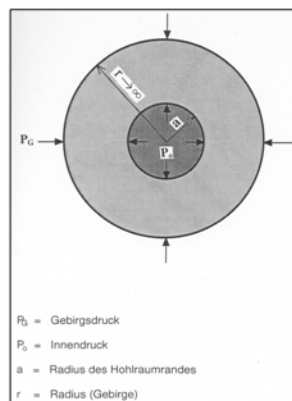


Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien

Überschlägliche Berechnungen zur Kompaktion / Permeabilität (BGR 1996):



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Salzgrus, Kompaktion

Die vollständige Kompaktion kann in vertretbaren Zeiträumen für Teile der verfüllten Hohlräume nicht 1:1 simuliert werden.

Aus den BGR-Laborversuchen liegen zahlreiche Daten zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus unter verschiedenen Einflussgrößen vor, insbesondere auch für in situ-relevante Kompaktionsraten.

Die Porosität von Salzgrus kann materialbedingt bis etwa 1 % genau bestimmt werden.

Untersuchungsbedarf / Offene Fragen:

Einfluss und Wirkung von Feuchte und Zusatzstoffen (Ca-Bentonit) auf das Langzeitverhalten und im Restporositätsbereich (Projekt REPOPERM).

Kompaktionsraten aus triaxialen Versuchen mit hydrostatischen und deviatorischen Belastungen (= vorgegebene Spannungskomponenten).

Abgleich der Daten mit den Ergebnissen aus Oedometerversuchen.

Genauigkeitsanalysen, Bandbreiten.



Salzgrus, Kompaktion

Untersuchungsbedarf / Offene Fragen (2):

Formulierung / Verbesserung belastbarer Stoffgesetze mit Beschreibung der physikalischen Prozesse, die Extrapolationen erlauben.

Wie weit werden auch empirisch formulierte Stoffgesetze akzeptiert?

Schlüssige Parameterermittlung aus den Ergebnissen der Laborversuche, Separierung der Einflussgrößen.

Nachweis / Validierung anhand von nachgerechneten Laborversuchen mit bekannten Randbedingungen, um das Vertrauen in Extrapolationen zu erhöhen.

Übergang zum hydraulisch dichten („kompakten“) Steinsalz



Salzgrus, Permeabilität

Untersuchungsbedarf / Offene Fragen:

Korrelation Porosität – Permeabilität für kleine Porositäten.

Welche Permeabilitäten müssen im Restporositätsbereich nachgewiesen werden?

Was sind die Ursachen für die unterschiedlichen Permeabilitätswerte für Öl, Gas und Salzlösungen, die aus den vorliegenden Versuchen mit der Auswertung nach DARCY berechnet werden?

Welchen Einfluss haben Umlösevorgänge?

Einfluss der Feuchte auf die Porenstruktur von kompaktiertem Salzgrus (kapillarer Sperrdruck, 2-Phasenfluss, Verheilungsvorgänge und deren Nachweis).



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

2. Salzbricketts

Vorgesehen als **Langzeitsicherheitskomponente** in einem (Abschluss-)Damm im Salzgebirge.

Hoch-vorkompaktierte Salzgrus-Formsteine

240 x 115 x 71 mm aus Korngröße $0,16 < d < 0,5 \text{ mm}$,

maschinell gefertigt unter hohem Pressendruck

130 MPa $\gg \sigma$ (in situ), Porosität: $\Phi \approx 9 \text{ } 1\%$.

Ziel: deutliche Senkung des Zeitbedarfs für die Kompaktion des porösen Materials und der dabei erforderlichen Gebirgsverformung.

- Homogenes Ausgangsmaterial
- Wahrung der „Kompatibilität mit dem Wirtsgestein“
- Geringe Permeabilität bereits in der frühen Nachbetriebsphase
- frühe Stützwirkung, aber Festigkeitsreduktion durch Feuchte



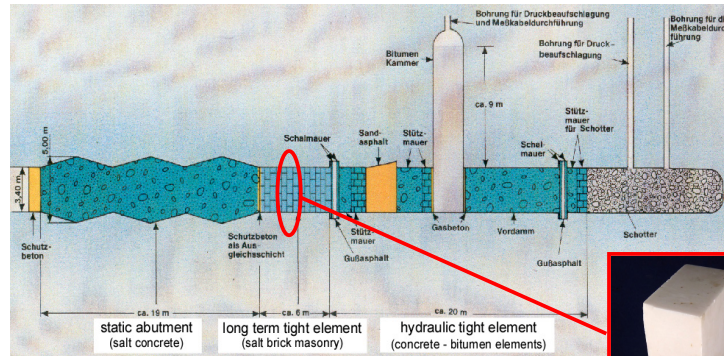
Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

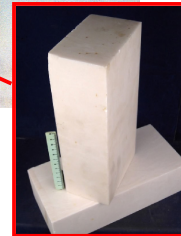
GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien



Salzbriketts als Komponente im Dammbau

Quelle: IfG, Projekt NF-PRO, 1977



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Arteigene Verschlussmaterialien

Salzbriketts

Untersuchungsbedarf / Offene Fragen:

lt. Abschlussbericht NF-PRO:

Beschreibung der physikalischen Prozesse für die Kompaktion der restlichen Porosität, insbes. bzgl. der Feuchteeffekte

Mechanisch/hydraulische Abhängigkeit an den Grenzen der Briketts untereinander und zum Gebirge

Erstellung eines allgemein akzeptierten Stoffgesetzes zur Salzgruskompaktion, das Extrapolationen erlaubt

Fragen analog dem Restporositätsbereich von „langsam“ verdichtetem Salzgrus:

Liegen ähnliche strukturelle Verhältnisse vor ($0,16 < d < 0,5 \text{ mm}$)?

Porosität/Permeabilität im Restporositätsbereich?

Übergang zum kompakten Steinsalz



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

3. Selbstverheilender Versatz (SVV)

Als **Selbstverheilender Versatz** wird ein wasserfreies pulverförmiges **Magnesiumsulfat** (MgSO_4) bezeichnet, das eine Barrierefunktion nach chemischer Reaktion mit Wasser entwickelt.

Eigenschaften und Verfahren:

- Feinkörniges Material mit ca. 50% Porenvolumen ($e = 1,0$), pneumatischer Einbau.
- Durch Flutung entsteht festes Salzgestein aus hydratisierten Salzmineralen mit höherem Feststoffvolumen (Quellen).
- Reaktionszeit 20 - 50 d, lösungsdichter Verschluss mit einer Restporosität von 2 - 5 % in isolierten Poren, $k = 10^{-18} - 10^{-20} \text{ m}^2$.
- Nichtverbrauchtes MgSO_4 verbleibt als selbstverheilende Restmenge für den Fall weiterer Lösungszutritte.



Selbstverheilender Versatz (SVV):

Einbau und Verdichtung im In-situ-Versuch Teutschenthal

Quelle: Bericht „Qualifizierung von Strömungsbarrieren in Salzformationen“ Förderkennz.: 02 C 1335



Selbstverheilender Versatz (SVV)

Die chemische Stabilität und die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften sind abhängig vom

- Ausgangsmaterial
- Verhältnis Festkörper/Lösung
- Flutungsverlauf (langsam/schnell, Fluiddruck)

Untersuchungsbedarf / Offene Fragen:

Nachweis der Langzeitstabilität. (Gibt es natürliche Analoga?)

Langzeitbeobachtung von SVV-Bauwerken im Steinsalz und in Kalisalzen unter Lösungsdruck > 50 bar.

Werden die nichtbenetzten Bereiche des MgSO_4 durch den Gebirgsdruck kompaktiert und welche Folgen ergeben sich bei späterem Lösungszutritt?

Wie verhalten sich die Übergangsbereiche zum kompakten Steinsalz?



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Literatur (Auszug):

REPOPERM – Phase 1

GRS, BGR, DBE-Tec: Restporosität und –permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, Endbericht 2009

EU-Projekt NF-PRO, div. Berichte zu WP 3.5 „Crushed salt engineered barrier behavior“ 2006/2007

Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Hannover 2007:

HERBERT, H.-J.: Self sealing backfill (SVV) – A salt based material for constructing seals in salt mines.

SALZER, K., Popp, T. & Böhnel, H.: Mechanical and permeability properties of highly pre-compacted granular salt bricks.

STÜHRENBERG, D.: Long-term laboratory investigation on backfill



Workshop Verschlussysteme Salz 25. Aug. 2010



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

**Vielen Dank für
die Aufmerksamkeit**



3.7 Nichtarteigene Materialien

Horst-Jürgen Herbert
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Daniela Freyer
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Dittmar Lack
K-UTEC
Matthias Gruner
Technische Universität Bergakademie Freiberg

3.7.1 Einleitung

In diesem Beitrag wird der Kenntnisstand und der Forschungsbedarf zu den nichtarteigenen Materialien vorgestellt, die in Endlagern für radioaktive Abfälle beim Bau von Verschlusssystemen zum Einsatz kommen könnten. Dazu zählen die technische Baustoffe Salzbeton und Magnesiabinder und die natürlichen Verschlussmaterialien Bentonit und Bitumen.

3.7.2 Zementbasierte Baustoffe – Allgemeine Erkenntnisse

Im Kontakt mit NaCl-reichen Lösungen sind Portlandzement-basierte Baustoffe (Salzbetone) weitgehend stabil. Je höher der Mg-Gehalt der Lösungen ist, desto instabiler werden Salzbetone, da die CSH-Phasen, die dem Beton die Festigkeit verleihen zerstört werden. Ca wird durch Mg ersetzt, es bilden sich neue MSH-Phasen). Für Bauwerke in Kalisalzen oder im Steinsalz mit Mg-reichen Lösungen eignen sich MgO-Betone (Magnesiabinder) besser. Diese sind gegen Mg-reiche Lösungen (IP21, IP19) stabil, nicht aber gegen NaCl-Lösung.

3.7.3 Salzbetone

Salzbeton ist ein Gemisch aus Zement, Zuschlagstoffen (Salz, Filteraschen) und Anmachwasser. Der in Morsleben eingesetzte Salzbeton M2 hat die Zusammensetzung: 328 kg CEM III-Zement, 1072 kg Salzzuschlag, 328 kg Filterasche und 267 kg Wasser. Salzbeton hat zwei besondere zeitabhängige Eigenschaften: Erstens erfährt er durch die Austrocknung eine Volumenabnahme, was als Schwinden bezeichnet wird und zweitens verformt er sich unter konstanter Last mit der Zeit, das so genannte Kriechen. Die Festigkeit verleihenden Komponenten sind CSH-, und CAH-Phasen. Diese liegen amorph oder halb-

kristallin als Gele vor. In Salzbetonen sind die CSH- und CAH-Phasen im Kontakt zu NaCl-Lösungen weitgehend stabil, in MgCl_2 -Lösungen dagegen instabil.

Forschungsbedarf – Salzbetone

- Korrosionsverhalten (Lösungsgleichgewichte und Kinetik)
 - Genauere Bestimmung der Stabilität der relevanten CSH-Phasen
 - Identifizierung der wirklich relevanten Korrosionsphasen (ob sich Talk, Serpentin oder Kerolit bildet, ist noch nicht geklärt aber von entscheidender Bedeutung)
 - Das Verhalten der CSH-Phasen bei Anwesenheit unterschiedlicher Mg- und CO_2 -Gehalte in Lösung
- Experimentelle Ableitung der Porositäts/Permeabilitätsbeziehung
- Optimierung der Rezepturen hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit
- Validierung der geochemischen und reaktiven Stofftransport-Modellrechnungen

3.7.4 Magnesiabinder

Sorel-Bindemittel bestehen aus basischen Mg-Salzhydraten. Diese bilden sich in einer exothermen Reaktion aus MgO und MgCl_2 -Lösungen. Die hauptsächlichen Bindemittelphasen sind:

- 3-1-8 Phase (Magnesiumoxichlorid: Koshunowskit) ist die thermodynamisch stabile, d. h. langzeitstabile Phase in MgCl_2 -haltigen Lösungen (ab 50 g/l Lsg)
- 5-1-8 Phase (metastabil)
- Hochtemperaturphasen (9-1-4 Phase)

Rezepturen für verschiedene Magnesiabinder wurden von DBE-Technology, K-UTEC und TU BA Freiberg entwickelt. Die technologische Verarbeitbarkeit wurde nachgewiesen. Rezeptur- und temperaturabhängig kann der Baustoff schrumpfen, volumenstabil bleiben oder quellen.

Die thermodynamischen Eigenschaften von MSH-Phasen sind bei Umgebungstemperaturen bekannt, bei hohen Temperaturen jedoch nur unvollständig. Höchste Betonfestigkeiten werden mit der 5-1-8 Phase erreicht. Die metastabile 5-1-8 Phase wandelt sich bei

Lösungszutritt in die stabile 3-1-8 Phase um. Die Konsequenzen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sind noch nicht quantifizierbar.

Forschungsbedarf – Magnesiabinder

- Struktur und Eigenschaftsbeziehung – d.h. Klärung der Phasenbildung im Grundsystem $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ bei erhöhter Temperatur und Auswirkungen auf die mechanisch/hydraulischen Eigenschaften
- Zeitabhängiges Verformungsverhalten in Abhängigkeit vom Phasenbestand
- Expansionsdruckentwicklung
- Einfluss von Ca_2^+ , CO_2 , SO_4^{2-} auf die Sorelphasenbildung
- Entwicklung von standardisierten Prüfmethoden für Magnesiabaustoffe
- Validierung der geochemischen und reaktiven Stofftransport-Modellrechnungen
- Natürliche Verschlussmaterialien

3.7.5 Bentonit

Bentonite sind Teil des EBS auch in Salzformationen, z. B. bei Schachtverschlüssen. Porenlösungen unterschiedlicher Zusammensetzung, vor allem mit hohen Salzgehalten und hohem pH-Wert, verändern die Mineralogie und das Quellvermögen.

Stand des Wissens

- Porenlösungen mit steigender Ionenstärke (Salzgehalt) führen zu Veränderungen der Schichtladung und somit des Quelldrucks.
- In offenen Systemen steigt die Schichtladung; es kommt zur Illitisierung der Montmorillonite. Das bedeutet reduzierte Quell- und Dichtfähigkeit.
- In geschlossenen Systemen fällt die Schichtladung: es kommt zur Kaolinitisierung bzw. Pyrophyllitisierung, was auch zur Reduzierung der Quellfähigkeit führt.
- Hohe pH-Werte der Porenlösungen beschleunigen die Umwandlung der Montmorillonite und den Verlust der Quellfähigkeit.

Fazit: Bentonit ist in einer Salzumgebung nicht stabil, Montmorillonit wird gelöst und umgewandelt. Die chemisch-mineralogischen Änderungen sind jedoch gering und sehr

langsam. Montmorillonit ist damit auch in einer Salzumgebung als Dichtmaterial einsetzbar. Noch unvollständig sind die Kenntnisse zur Dynamik dieser Prozesse und der Einfluss von Fe im System.

Forschungsbedarf - Bentonite

Langzeitverhalten

- Kinetik der Umwandlung
- Präzisierung der Anforderungen bezüglich der erforderlichen Dichtwirkung und der Zeit, die diese aufrechterhalten bleiben muss
- Und/oder Entwicklung von Low-pH-Zementen für den kombinierten Einsatz Bentonit/Salzbeton

Technische Aspekte

- Konzeptentwicklung für Strecken- und Schachtverschlüsse
- Vermeidung eines direkten Kontaktes von Bentoniten und zementhaltigen Baustoffen
alternativ Verzicht auf zementhaltige Baustoffe
- Entwicklung alternativer Widerlagerkonzepte (Schottersäulen, Mauerwerkskonstruktionen aus Salz, Basalt)

3.7.6 Bitumen/Asphalt

Stand der Technik

Schachtverschlüsse

- Kombinierte Ton-Bitumen-/Asphaltdichtungen für Schachtverschlüsse (seit 1960)
- Gasdichte Systeme für unterirdische Gasspeicher (Burgraf-Bernsdorf)

Streckenverschlüsse

- Streckenverschluss Leopoldshall (1898)
- Streckenverschluss Hope (1983)

Technische Aspekte sind zu lösen

- Flüssigkeitscharakter, Konstruktive Sondermaßnahmen erforderlich
- Dichtelemente aus Asphaltblöcken als Alternative zum Heißeinbau

Forschungsbedarf

- Bautechnische Realisierung von Schotter-Bitumen-Elementen bzw. Schotter-Asphaltelementen
- Verbesserung der Haftung von Bitumen auf der Salzoberfläche
- Langzeitverhalten im Kontakt mit Salzlösungen (unterschiedliche Benetzbarkeit der Salzoberfläche mit beiden Flüssigkeiten)
- Biologische Degradation unter salinaren Bedingungen



**Workshop zu Verschlussystemen in einem Endlager für
wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen**

Nichtarteigene Materialien

Horst-Jürgen Herbert (GRS)
Daniela Freyer (TU BA Freiberg)
Dittmar Lack (K-UTEC)
Matthias Gruner (TU BA Freiberg)

Braunschweig, 24.- 25. August 2010

Workshop zu Verschlussystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010



Inhalt

Technische Baustoffe

- Salzbeton
- MgO-Beton

Natürliche Verschlussmaterialien

- Bentonit
- Bitumen

Workshop zu Verschlussystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Technische Baustoffe

Allgemeine Aussagen:

Es gibt keine Patentrezeptur für zementbasierte Baumaterialien, die für den Einsatz in allen Arten von Salzgesteinen (Salzlösungen) gleichermaßen gut geeignet wären.

Im Steinsalz sind Portlandzement-basierte Baustoffe (Salzbetone) bei Lösungszutritt (NaCl-reiche Lösungen, gesättigt an Halit und Anhydrit) weitgehend stabil. Je höher der Mg-Gehalt der Lösungen steigt, desto instabiler werden Salzbetone, da die CSH-Phasen, die dem Beton die Festigkeit verleihen zerstört werden (Ca wird gegen Mg ausgetauscht, es bilden sich neue MSH-Phasen).

In Kalisalzen sind Salzbetone bei Zutritt Mg-reicher Lösungen (IP21, IP19) instabil.

Für Bauwerke in Kalisalzen oder im Steinsalz mit Mg-reichen Lösungen eignen sich MgO-Betone (Magnesiabinder) besser. Diese sind gegen Mg-reiche Lösungen (IP21, IP19) stabil, nicht aber gegen NaCl-Lösung.

Da der Mg-Gehalt von Salzlösungen in einem Endlager im Salz nicht genau festgelegt werden kann, muss das Verhalten beider Baustoffarten im Kontakt sowohl mit NaCl-reichen als auch mit MgCl₂-haltigen Lösungen ausreichend gut bekannt sein.

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Technische Baustoffe - Salzbetone

Stand des Wissens

Salzbeton hat zwei besondere **zeitabhängige Eigenschaften**:

Erstens erfährt er durch die Austrocknung eine **Volumenabnahme**, was als **Schwinden** bezeichnet wird.

Zweitens verformt er sich unter konstanter Last mit der Zeit, das so genannte **Kriechen**.

Die Festigkeit verleihenden Komponenten sind **CSH-**, und **CAH-Phasen**. Diese liegen nicht oder halb-kristallin, als Gele vor.

In Salzbetonen sind die CSH- und CAH-Phasen im Kontakt zu NaCl-Lösungen weitgehend stabil, in MgCl₂-Lösungen dagegen instabil.

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Technische Baustoffe - Salzbetone

Stand des Wissens

Untersuchungen der GRS zum **Systemverständnis** und zur **Langzeitstabilität** wurden mit **M2-Salzbeton** durchgeführt. Versuche mit leicht veränderten Rezepturen, um die Porosität und Permeabilität künstlich hochzusetzen, um in den relativ kurzen Versuchszeiträumen messbare Veränderungen erwarten zu können – Vertretbare Vorgehensweise weil:

- Stabilität der CSH- und der Aluminatphasen wird durch Ca:Si- und Al:Si-Verhältnisse bedingt
- Ca, Si und Al stammen überwiegend aus den verwendeten Zementen.
- Das Wasser-Zementverhältnis verändert im Wesentlichen die Porosität und Permeabilität, nicht aber diese Verhältnisse.
- Für die Betrachtung der Stabilität dieser Phasen kann also das Wasser-Zementverhältnis variiert werden

Aber!

Untersuchungen zur Bestimmung der Porosität/Permeabilitätsbeziehung müssen mit der Originalrezeptur durchgeführt werden.

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Technische Baustoffe

Forschungsbedarf – Salzbetone

- **Korrosionsverhalten (Bestimmung der Lösungsgleichgewichte)**
 - Genauere Bestimmung der Stabilität der relevanten CSH-Phasen
 - Identifizierung der wirklich **relevanten Korrosionsphasen** (ob sich Talk, Serpentin oder Kerolit bildet ist noch nicht geklärt aber von entscheidender Bedeutung)
 - Das Verhalten der CSH-Phasen bei Anwesenheit unterschiedlicher Mengen Mg und CO₂ im System.
 - Korrosionsgeschwindigkeit im Kontakt mit Lösungen mit der zu erwartenden Bandbreite von Mg-Gehalten
 - Optimierung der Rezeptur hinsichtlich der der Korrosionsbeständigkeit
 - Validierung der geochemischen Modellrechnungen
- Experimentelle Ableitung der Porositäts/Permeabilitätsbeziehung

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Technische Baustoffe

Stand des Wissens zu Magnesiabindern

Sorel-Bindemittel bestehen aus basischen Mg-Salzhydraten. Diese bilden sich in einer exothermen Reaktion aus MgO und MgCl₂-Lösungen. Der so hergestellte Beton kann sehr **große Härten** bei kurzen Abbindezeiten erreichen (Ein Ausreifen bezüglich des kristallinen Phasenbestands wird aber erst nach Wochen bis Monaten erreicht).

Bindemittelphasen:

- 3-1-8 Phase (Magnesiumoxichlorid: Koshunowskit) ist die thermodynamisch stabile, d.h. langzeitstabile Phase in MgCl₂-haltigen Lösungen (ab 50 g/l Lsg)
- 5-1-8 Phase (metastabil)

Von beiden Phasen sind Löslichkeitskonstanten bekannt

- Hochtemperaturphasen (9-1-4 Phase)

Rezepturen wurden entwickelt von DBE-Technology, K-UTEC und TU BA Freiberg

Die technologische Verarbeitbarkeit wurde nachgewiesen.

Rezeptur- und temperaturabhängig kann der Baustoff quellen, volumenstabil bleiben oder quellen

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Technische Baustoffe

Stand des Wissens zu Magnesiabinder

- Die thermodynamischen Eigenschaften von MSH-Phasen sind bei Umgebungstemperaturen bekannt, bei hohen Temperaturen nur unvollständig
- Höchste Betonfestigkeiten werden mit der 5-1-8 Phase erreicht
- Rezepturen führen auch anteilig zur 3-1-8 Phase
- Metastabile 5-1-8 Phase wandelt sich bei Lösungszutritt in stabile 3-1-8 Phase um
- Konsequenzen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, noch nicht quantifizierbar

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Technische Baustoffe

Forschungsbedarf – Magnesiabinder

Phasenbildung im Grundsystem $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ bei **erhöhter Temperatur** und Auswirkungen auf die mechanisch/hydraulischen Eigenschaften - **Struktur und Eigenschaftsbeziehung** (**Lösungsgleichgewichte im Zusammenhang mit UPSCALING Effekten beachten**)

- Zeitabhängiges Verformungsverhalten in Abhängigkeit vom Phasenbestand
- Expansionsdruckentwicklung

Einfluss von Ca^{2+} , CO_2 , SO_4^{2-} auf die Sorelphasenbildung

Entwicklung von standardisierten Prüfmethode für Magnesiabaustoffe

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Natürliche Verschlussmaterialien - Bentonit

Allgemeine Anmerkungen

- Bentonite sind Teil des EBS auch in Salzformationen, z. B. bei Schachtverschlüssen.
- Porenlösungen unterschiedlicher Zusammensetzung (vor allem mit hohen Salzgehalten und hohem pH-Wert) verändern die Mineralogie und das Quellvermögen.
- Für die Langzeitbetrachtung der Funktionalität von Bentonitbarrieren müssen diese Änderungen qualitativ und quantitativ bekannt sein.

Stand des Wissens

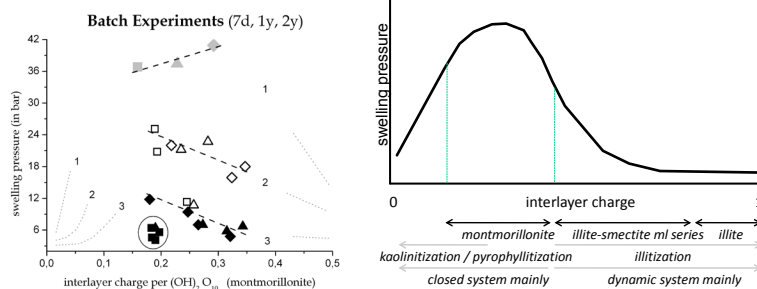
- Porenlösungen mit steigender Ionenstärke (Salzgehalt) führen zu Veränderungen der Schichtladung und somit des Quelldrucks.
- In offenen Systemen steigt die Schichtladung: es kommt zur Illitisierung der Montmorillonite.
- In geschlossenen Systemen fällt die Schichtladung: es kommt zur Kaolinitisierung/Pyrophyllitisierung
- In beiden Fällen wird die Quellfähigkeit reduziert und verschwindet mit der Zeit völlig.
- Hohe pH-Werte der Porenlösungen beschleunigen die Umwandlung der Montmorillonite und den Verlust der Quellfähigkeit.
- **Fazit:** Bentonit ist in einer Salzumgebung nicht stabil, Montmorillonit wird gelöst und umgewandelt.
- Die chemisch/mineralogischen Änderungen sind jedoch gering und sehr langsam.
- **Deshalb:** Montmorillonit ist auch in einer Salzumgebung als Dichtmaterial einsetzbar.

Nicht bekannt sind:

- Die Dynamik dieser Prozesse
- Der Einfluss von Fe im System

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Natürliche Verschlussmaterialien - Bentonit



Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Natürliche Verschlussmaterialien - Bentonit

Forschungsbedarf

Langzeitverhalten

- Kinetik der Umwandlung in **offenen und geschlossenen** Systemen
- Präzisierung der Anforderungen bezüglich der erforderlichen Dichtwirkung und der Zeit, die diese aufrechterhalten bleiben muss
- Und/oder Entwicklung von **Low-pH-Zementen** für den kombinierten Einsatz Bentonit/Salzbeton

Technische Aspekte

- Konzeptentwicklung für Strecken- und Schachverschlüsse
 - Vermeidung eines direkten Kontaktes von Bentoniten und zementhaltigen Baustoffen **alternativ Verzicht auf zementhaltige Baustoffe**
- z. B. Entwicklung alternativer Widerlagerkonzepte (Schottersäulen, Mauerwerkskonstruktionen aus Salz, Basalt?)

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Natürliche Verschlussmaterialien – Bitumen/Asphalt

Stand der Technik

Schachtverschlüsse

- Kombinierte Ton-Bitumen-/Asphaltdichtungen für Schachtverschlüsse (seit 1960)
- Gasdichte Systeme für unterirdische Gasspeicher (Burgraf-Bernsdorf)

Streckenverschlüsse

- Streckenverschluss Leopoldshall (1898)
- Streckenverschluss Hope (1983)

Technische Aspekte sind zu lösen

- Flüssigkeitscharakter Konstruktive Sondermaßnahmen erforderlich
- Dichtelemente aus Asphaltblöcken als Alternative zum Heißeinbau

Workshop zu Verschlussystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

Natürliche Verschlussmaterialien – Bitumen/Asphalt

Forschungsbedarf

- Bautechnische Realisierung von Schotter-Bitumen-Elementen bzw. Schotter-Asphaltelementen
- Verbesserung der Haftung von Bitumen auf der Salzoberfläche
- Langzeitverhalten im Kontakt mit Salzlösungen (unterschiedliche Benetzbarkeit der Salzoberfläche mit beiden Flüssigkeiten)
- Biologische Degradation unter salinaren Bedingungen

Workshop zu Verschlussystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, BS, 24. - 25. August 2010

3.8 Auflockerungszone

Klaus Wieczorek
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Ulrich Heemann, Otto Schulze
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Christian Lerch
DBE TECHNOLOGY GmbH
Peter Kamlot
Institut für Gebirgsmechanik (IfG)

3.8.1 Abstract

Die Auflockerungszone (EDZ) in einem Endlager im Steinsalz stellt eine potentiellen Fließpfad im Falle eines Laugenzutritts dar und beeinflusst insbesondere das System Schacht-/Streckenverschluss-EDZ-ungestörtes Salz.

Die EDZ im Steinsalz wurde seit den 80er Jahren zunächst phänomenologisch untersucht; seit 1994 wurden ihr spezielle Projekte (ALOHA, ALOHA2 (BAMBUS II), ADDIGAS) gewidmet. Diese phänomenologischen Untersuchungen lieferten als Ergebnisse typische Ausdehnungen der EDZ um Strecken von bis zu einem Streckenradius, EDZ-Permeabilitäten bis in die Größenordnung von 10^{-14} m^2 und Porositäten oberhalb von 1 %. Die EDZ-Rückbildung ist in situ schwer beobachtbar, da sie große Zeiträume erfordert.

Aus Laboruntersuchungen wurde das Dilatanzkonzept entwickelt, das die Dilatanz (Volumenzunahme durch Auflockerung bzw. Mikrorissbildung) mit dem mechanischen Spannungszustand verknüpft und damit einen Ansatz für die modelltheoretische Betrachtung der EDZ liefert. Seit der „Cluster Konferenz und Workshop“ der Europäischen Kommission (Luxemburg, November 2003) zur EDZ liegt der Schwerpunkt auf der modelltechnischen Erfassung der EDZ (Projekte Stoffgesetzvergleich, THERESA). Die Modellansätze zum Dilatanzverhalten und zur Rekompaktion wurden weiterentwickelt und an Hand von Laborversuchen kalibriert, außerdem wurde eine aus entsprechenden Modellrechnungen ermittelte zeitlich veränderliche Permeabilität der EDZ um einen Streckenverschluss in einem TSPA- (Total System Performance Assessment) Code implementiert.

Beim TIMODAZ-THERESA Workshop “Impact of THMC processes on the safety of underground radioactive waste repositories” (Luxemburg, September 2009) wurde der Status der EDZ-Untersuchungen zusammengefasst.

Die THM-Prozesse, die zur Ausbildung der EDZ führen, sind hinreichend verstanden und modelltechnisch angemessen umgesetzt. Allerdings bestehen offene Fragen insbesondere in Bezug auf den Zusammenhang zwischen dem mechanischen (Dilatanz und Rekompaktion) und dem hydraulischen (Permeabilität) Verhalten – Stichwort: Permeabilitäts-Dilatanz-Beziehung. Dies gilt sowohl für die Schädigungsentwicklung als auch für die Rekompaktion bzw. Verheilung. Bei der Rekompaktion/Verheilung sind darüberhinaus der Einfluss von Feuchte und von Porenfluiddruck (Gas, Lauge) noch zu quantifizieren.

Insbesondere für Prozess-Verständnis und Modell-Kalibrierung/Validierung der für die Rekompaktion relevanten Mechanismen sind Langzeitexperimente notwendig, um zuverlässige Langzeitprognosen für das Verhalten des Systems Verschluss/EDZ/Steinsalz zu ermöglichen.



Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen

Thema 7: Auflockerungszone (EDZ)

Klaus Wieczorek, GRS
Ulrich Heemann, Otto Schulze, BGR
Christian Lerch, DBE TEC
Peter Kamlot, IfG

Braunschweig, 24./25. August 2010



Begriffsbildung

“The **excavation disturbed zone** is characterized by a change of stress relative to the initial state. Its outer boundary is not clearly delimited. In the interior part of the excavation disturbed zone close to the excavation, a zone with rock properties considerably changed by micro-fracturing exists. This is the **excavation damaged zone (EDZ)** which, in contrast to the rest of the excavation disturbed zone, exhibits significantly changed hydraulic properties.”

Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, Proceedings of a European Commission Cluster conference and workshop, Luxembourg, 3 to 5 November 2003, eds. C. Davies and F. Bernier, Brussels: European Commission.

Auflockerungszone = Excavation Damaged Zone

Workshop zu Verschlusssystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

2

EDZ-Untersuchungen

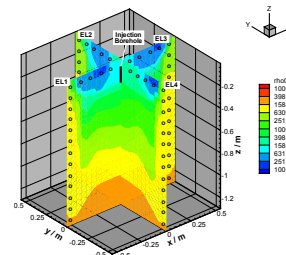
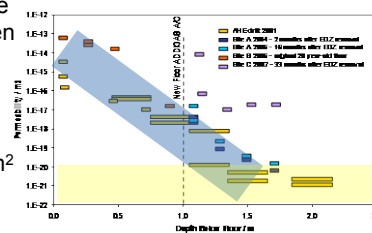
- Phänomenologische Untersuchungen
 - Erste Untersuchungen der EDZ-Ausdehnung und Permeabilität in situ in USA (WIPP Site) seit 1985, in Deutschland seit 1989
 - Seit 1994 spezielle Projekte zur EDZ-Untersuchung: ALOHA, ALOHA 2 (BAMBUS II), ADDIGAS
 - EDZ-Untersuchungen Bestandteil weiterer Projekte (z. B. CARLA)
- Cluster Konferenz und Workshop der Europäischen Kommission (Luxemburg, 3. – 5. November 2003)
- Seitdem liegt ein Schwerpunkt auf der modelltechnischen Erfassung der EDZ (Projekte Stoffgesetzvergleich, THERESA)
- TIMODAZ-THERESA Workshop "Impact of THMC processes on the safety of underground radioactive waste repositories" (Luxemburg, 30. September 2009)

Workshop zu Verschlusssystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

3

Phänomenologie: Ausdehnung und hydraulische Eigenschaften

- Ausdehnung der EDZ um eine typische Strecke 1 – 1.5 m in der Sohle, wenige Dezimeter in den Stößen (< 0.5 – 1 r, Erfahrungswerte)
- EDZ-Permeabilität: Bis Größenordnung 10^{-14} m^2
- EDZ-Porosität nimmt Werte über 1% an (ungestörtes Steinsalz << 0.5%)
- Konturnachschnitt ist effektiv, d. h. es kommt nicht zu einer kurzfristigen Neuausbildung der EDZ (ADDIGAS)

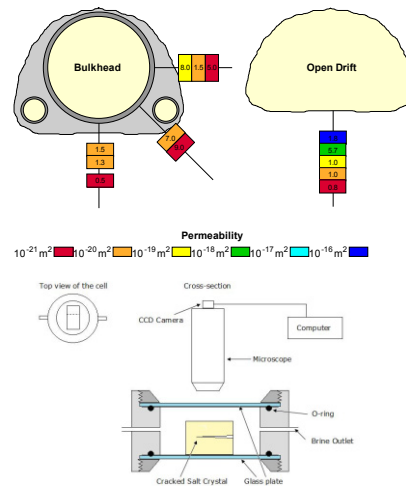


Workshop zu Verschlusssystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

4

Phänomenologie: Rückbildung

- Mechanische Rückbildung durch Rekompaktion ist in situ schwer beobachtbar, vollständige (?) Rückbildung erfordert lange Zeiträume (ALOHA 2)



- Bei Vorhandensein von Salzlösung kann Verheilung beobachtet werden (Laboruntersuchungen von Spiers, THERESA)

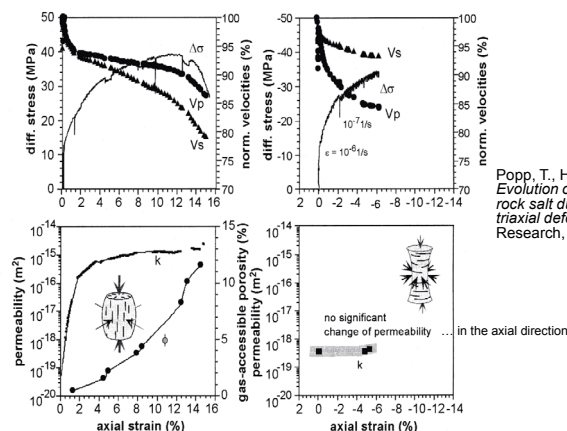
Wieczorek, K., U. Heemann, S. Keesmann, A. Pudewills, S. Olivella, P. Kamlot, C. Spiers, and K. Herchen. 2008. *THERESA project, Work Package 3, Deliverable D6 - calibration of thermal-hydraulic-mechanical (THM) models of the excavation disturbed zone (EDZ) in rock salt*. Brussels: European Commission.

Workshop zu Verschlusssystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

5

Prozessverständnis: Steinsalz unter anisotroper Belastung

Steinsalz erfährt bei Belastung mit Dilatanz eine ausgeprägt richtungsabhängige Mikrorissbildung. Die Entwicklung von Porosität und Permeabilität ist daher anisotrop.



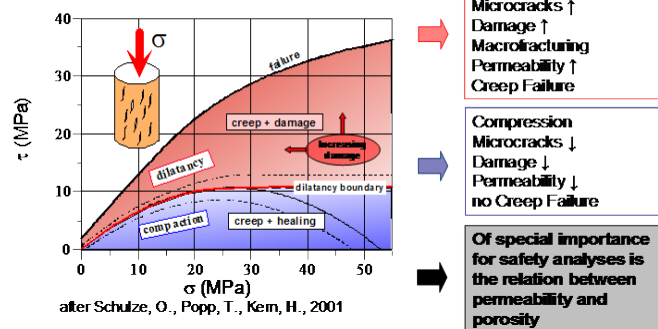
Popp, T., H. Kern, and O. Schulze. 2001. *Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation*. Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. B3, 4061 – 4078.

Workshop zu Verschlusssystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

6

Mechanismus: Dilatanzgrenze

Current Understanding of EDZ Nature and Properties

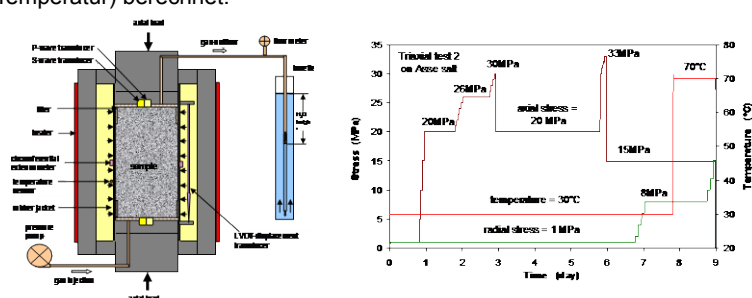


Schulze, O., T. Popp, and H. Kern. 2001. *Development of damage and permeability in deforming rock salt*. Engineering Geology 61, 163 – 180. Elsevier, Amsterdam.

Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, Proceedings of a European Commission Cluster conference and workshop, Luxembourg, 3 to 5 November 2003, eds. C. Davies and F. Bernier, Brussels: European Commission. >> Chapter 4.2

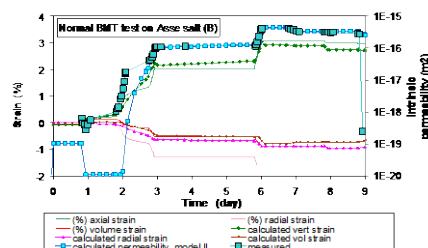
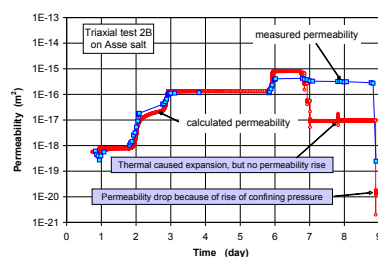
Modellierung

- Eine Reihe von Stoffmodellen zur Beschreibung von Dilatanz und Rekompaktion, die in den Projekten Stoffgesetzvergleich und THERESA weiterentwickelt und kalibriert wurden, steht zur Verfügung.
- Verschiedene Ansätze zur Kopplung der Permeabilität an die Porosität und ggf. den Spannungszustand werden eingesetzt.
- Im THERESA-Projekt wurde mit den verschiedenen Ansätzen ein mehrstufiger Benchmark-Laborversuch mit Dilatanz und Rekompaktion (auch unter erhöhter Temperatur) berechnet.



Modellierungsergebnisse von THERESA

- Alle Modellierungsteams erreichten eine gute Repräsentation des mechanischen Verhaltens der Probe im Laborversuch bereits bei der „Blind Prediction“.
- Die Modellierung der Permeabilität war im Allgemeinen in den meisten Versuchsphasen gut, aber es gab Abweichungen – bei den verschiedenen Ansätzen in verschiedenen Versuchsphasen.



Vergleich von Messungen und Modellierungsergebnissen: IfG (links), CIMNE (rechts).
 Wieczorek, K., T. Rothfuchs, B. Förster, U. Heemann, S. Olivella, Chr. Lerch, A. Pudewills, P. Kamlot, J. Grupa, and K. Herchen. 2009. *THERESA Deliverable D9, Coupled Processes in Salt Host-Rock Repositories - Final Report of Work Package 3*. Brussels: European Commission.

Workshop zu Verschlussystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

9

Relevanz der EDZ für die Langzeitsicherheit eines Endlagers

Die EDZ stellt einen potentiellen Fließpfad im Falle eines Laugenutritts dar und beeinflusst insbesondere das System Schacht- / Streckenverschluss - EDZ - ungestörtes Salz. Als Projekt-Themen bestehen die Fragen:

- Wie lange ist die EDZ ein relevanter Fließpfad, d. h. wie ist das zeitliche Verhalten der Rekompaktion und ggf. Verheilung?

-> THERESA-Versuche zu kurz für eine Validierung von Langzeitprognosen

- Welchen Einfluss hat ein Laugenutritt auf die EDZ-Entwicklung (Kompaktionsbeschleunigung durch erhöhte Kriechgeschwindigkeit <-> Kompaktionsbehinderung durch Porenaufsättigung)?

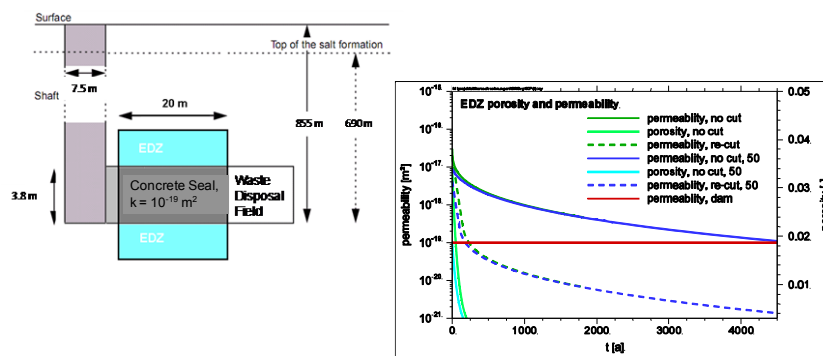
-> Wirkung von Lösung und Porendruck-Effekte sind noch (quantitativ!) zu untersuchen

Workshop zu Verschlussystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

10

Berücksichtigung der EDZ bei der Prognose der Langzeitsicherheit

Im Rahmen von THERESA wurde erstmalig eine zeitabhängige EDZ-Permeabilität im TSPA-Code Modul LOPOS implementiert. Der Permeabilitätsverlauf um einen Streckenverschluss wurde aus einer Prozesslevel-Modellierung – unter Vernachlässigung des Feuchteinflusses auf die Permeabilitätsentwicklung – ermittelt.



Workshop zu Verschlussystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

11

Ergebnisse des Workshop "Impact of THMC processes on the safety of underground radioactive waste repositories" hinsichtlich der EDZ im Salz

In der „Summary of Salt Group Discussions“ wird der Status, soweit er die EDZ betrifft, folgendermaßen zusammengefasst:

- Die THM-Prozesse, die zur Ausbildung der EDZ führen, sind hinreichend verstanden und modelltechnisch angemessen umgesetzt
- Offene Fragen betreffen vor allem
 - Permeabilität – Dilatanzbeziehung
 - Schädigungsentwicklung
 - Verheilung (Feuchteinfluss, Einfluss von Porenfluiddruck (Gas, Lauge))
 - Die für die Rekompaktion relevanten Mechanismen (poroelastische Kompaktion, zeitabhängige Prozesse). Für Prozess-Verständnis und Modell-Kalibrierung / Modell-Validierung sind Langzeitexperimente notwendig.
 - Die Weiterentwicklung und Validierung von Modellen für die Rekompaktion von aufgelockertem Steinsalz.
 - Die Modellimplementation und Durchführung zuverlässiger Langzeitprognosen für das Verhalten des Systems Verschluss/EDZ/Steinsalz.

Workshop zu Verschlussystemen, Braunschweig, 24./25. August 2010

12

3.9 Kontaktfuge

Ralf Mauke
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

3.9.1 Abstract

Abdichtungsbauwerke in einem Endlager für radioaktive Abfälle müssen sehr hohen Anforderungen genügen. Um diese auch für extrem lange Zeiträume gewährleisten zu können, werden für die Nachweisführungen die Bauwerke in Strecken und Schächten in die Komponenten Abdichtbaustoff, Kontaktfuge und hohlraumnaher Gebirgsbereich (Auflockerungszone) unterteilt.

Die hydraulischen Eigenschaften der Kontaktfuge dürfen dabei die querschnittsgemittelte Permeabilität des Abdichtungsbauwerks nicht wesentlich erhöhen.

Bei Abdichtbauwerken im kriechfähigen Steinsalz führen Selbstheilungsmechanismen langfristig zur Verbesserung der hydraulischen Eigenschaften der Kontaktfuge. Da dieser zeitabhängige Effekt jedoch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Szenarien nur schwer für die Nachweisführung zu quantifizieren ist, werden zur Erfüllung der maßgeblichen Anforderungen zwei unterschiedliche technische Konzepte bei der Planung von Verschlusssystemen verfolgt:

- die aktive Kontaktdruckausbildung und
- die Vergütung der Kontaktzone durch Injektionen.

Beim Konzept der aktiven Kontaktdruckausbildung werden quellfähige Abdichtbaustoffe eingesetzt. Hierzu zählen z. B. hochverdichtete Bentonite sowie quellfähige Magnesiabinder- und Zementsysteme. Weitere betrachtete Materialien sind so genannte Quellsalze (z. B. selbstverheilender Versatz, SVV). Das Hauptziel ist die Schaffung eines dauerhaften Expansionsdrucks im Bereich der Kontaktfuge zum Gebirge.

Beim Konzept der Vergütung der Kontaktzone durch Injektionen wird der Kontaktbereich zwischen Abdichtmaterial und Gebirge nachträglich verpresst. Hierbei können chemische

und mineralische Injektionsmittel eingesetzt werden (Injektionsharze, Wasserglas; Tonzementsuspensionen, Zement-Flugasche-Suspensionen, Feinstzemente, Magnesiabinder bzw. Sorelzemente).

Beide Konzepte wurden und werden im Rahmen von verschiedenen FuE-Vorhaben und Planungen für die Stilllegung von Endlagern überprüft und getestet.

Neben dem Nachweis der erforderlichen mechanischen und geochemischen Eigenschaften der Baustoffe (Langzeitbeständigkeit) ist insbesondere die Herstellbarkeit bzw. technische Machbarkeit zu belegen.

Injektionsverfahren für Lockergesteine, welche einen vorhandenen Porenraum auffüllen, sind nicht auf Kontaktzonen in Salzgesteinen übertragbar. Es sind individuelle Lösungen erforderlich, deren Funktionsweise durch Technikums- und in situ-Untersuchungen gezeigt werden muss.

Als Beispiele hierfür zählen folgende Projekte (Auswahl):

- FuE-Projekt CARLA (getestete Injektionsmittel: 2K-Bitumen, Acryl-Gele, Einkomponenten-Polyurethane und niedrigviskose Epoxidharze – Injektion über Ringleitungen)
- Stilllegung ERAM – Planung von Streckenabdichtungen im Steinsalz aus Salzbeton (Vergütung der Kontaktzone durch zementbasiertes Feinstbindemittel über ringförmig angeordnete Injektionsleitungen, umfangreiche Grundsatzuntersuchungen im Labor und Technikum, in situ-Versuch im ERAM)
- Stilllegung ERAM - Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm (Untersuchungen zur Ermittlung der Durchlässigkeit der Kontaktzone eines ca. 10 Jahre alten Dammbauwerks aus Salzbeton im Steinsalz)
- Stilllegung ERAM – Ermittlung der Quelldruckeigenschaften eines In-situ-Abdichtbauwerks aus Magnesiabinder DBM2 im Bergwerk Bleicherode
- Injektionsexperiment im Waste Isolation Pilot Plant - Small Scale Sealing Performance Test (Injektionsgut auf Feinstzementbasis)
- FuE-Projekt im Bergwerk Sondershausen (Bau, Funktionstest und Rückbau eines Streckenverschlusses aus Bentonitformsteinen)

Durch die o. g. Untersuchungen konnte der Wissensstand zur Behandlung von Kontaktfugen sowohl durch positive als auch durch negative Erfahrungen erweitert werden.

Grundsätzlich gelten Kontaktzonen nach wie vor als hydraulische Schwächezonen, insbesondere bei horizontalen Verschlussbauwerken. Daher sollten nur qualitätsgesicherte Abdichtbaustoffe und ausreichend getestete Konstruktionsprinzipien zur Anwendung kommen.

Weiterführende Arbeiten sollten standort- und projektspezifisch ausgerichtet werden.

Offene Fragen betreffen insbesondere folgende Aspekte:

- Konkretisierung möglicher Versuchskonzepte zur Ermittlung der Kontakt-eigenschaften (mechanische, hydraulische und chemische Eigenschaften)
- weitere Untersuchungen zur Verbesserung der technischen Möglichkeiten im Umgang mit Kontaktfugen

Aus Sicht des Autors bestehen weiterhin erhebliche Defizite beim Nachweis einer aktiven Kontaktdruckausbildung im In-situ-Maßstab (dauerhafter Erhalt von Quell- bzw. Expansionsdrücken).

Workshop zu Verschlusssystemen in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen

Impuls-Vortrag zum Thema 8 – Kontaktfuge

Ralf Mauke (BfS)

24. / 25.08.2010 - GRS Braunschweig

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Anforderungen

- Abdichtungsbauwerke (Strecken / Schächte) bestehen aus den Komponenten:
 - ⇒ Baustoff
 - ⇒ **Kontaktfuge**
 - ⇒ hohlraumnaher Gebirgsbereich (Auflockerungszone)
- Die hydraulischen Eigenschaften der Kontaktfuge dürfen die querschnittsgemittelte Permeabilität des Abdichtungsbauwerks nicht wesentlich erhöhen.
- Die Anforderungen an die Eigenschaften der Kontaktfuge sind abhängig von den jeweiligen Randbedingungen und über die Zeit veränderlich.
- Sowohl mechanische als auch geochemische Eigenschaften sind relevant.
- Die Langzeitbeständigkeit der geforderten Eigenschaften muss für den Nachweiszeitraum gezeigt werden können.

- Technische Machbarkeit ist zu belegen (Nachweis der Herstellbarkeit).

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Prinzipien

- Aktive Kontaktdruckausbildung (Expansionsdruck)
 - ⇒ Verwendung quellfähiger Materialien für das Abdichtungsbauwerk (Bentonit, MgO-Binder, Quellsalz, ...)
 - ? Verheilung von Wegsamkeiten im Gebirge
 - ? Entwicklung des Expansionsdrucks in Abhängigkeit von den Randbedingungen
- Vergütung der Kontaktzone durch Injektion
 - ⇒ Verwendung von Feinstbindemitteln, Bitumen, Injektionsharzen, Wasserglas, ...
 - ? Können die geforderten Eigenschaften über den gesamten Nachweiszeitraum gewährleistet werden (z. B. Vorspannung)
 - ? Gibt es eine geeignete Technik, die einen ausreichenden Injektionserfolg gewährleistet

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Problemstellung

- Injektionsverfahren für Lockergesteine (Porenraum) sind nicht auf Salz- oder Hartgestein (Kontaktspalt) übertragbar.
 - ⇒ *individuelle Lösungen erforderlich*
- Selbstheilungsmechanismen im Steinsalz führen langfristig zur Verbesserung der Eigenschaften.
 - ⇒ *Quantifizierung für die Nachweisführung problematisch*
 - ⇒ *Versuche nur in Verbindung mit geeigneten Prognosemodellen zielführend*
- Rheologische Eigenschaften des Gebirges sind maßgeblich:
 - ⇒ *Fracgefahr*
 - ⇒ *Fluidkriterium*
- Langzeitstabilität der Injektionsmittel:
 - ⇒ *varierende Sättigungsgrade an unterschiedlichen Salzen der anstehenden Wässer*

| Verantwortung für Mensch und Umwelt | ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■



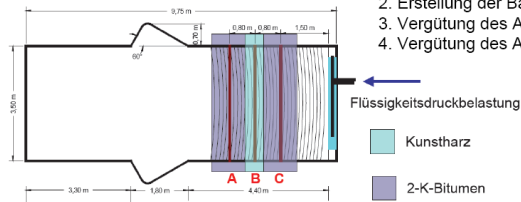
Erfahrungen (Auswahl)

(1)

- Projekt CARLA (tachydrithaltiges Gebirge für HAW nicht relevant)
 - Neues Injektionsmittel (2K-Bitumen)
 - Acryl-Gele und Einkomponenten-Polyurethane nicht geeignet (Störung der Polymerisation, geringe Haftfestigkeit)
 - Niedrigviskose Epoxidharze geeignet (Langzeitstabilität?)
 - Beste Ergebnisse bei kombinierter Anwendung von 2K-Bitumen und Denepox 40

Reihenfolge der Kontaktzonen-Vergütung (Versuch GV2)

1. Vergütung des Abschnitts C mit 2K-Bitumen
2. Erstellung der Bauwerksabschnitte B und A
3. Vergütung des Abschnitts A mit 2K-Bitumen
4. Vergütung des Abschnitts B mit Denepox 40 (Kunstharz)



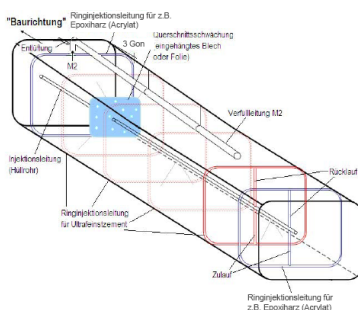
| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Erfahrungen (Auswahl)

(2)

- Projekt ERAM (Streckenabdichtung im Steinsalz aus Salzbeton)
 - Vergütung der Kontaktzone durch zementbasiertes Feinstbindemittel
 - Ringförmig angeordnete Injektionsleitungen
 - Nachweismodell wird durch Labor-, Technikums- und in situ-Versuch belegt



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Erfahrungen (Auswahl)

(3)

- Projekt: Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm
 - ausschließlich theoretische Betrachtung zu Kontaktzonen ist nicht zulässig
 - Untersuchungsprogramm zur Ermittlung der Durchlässigkeit der Kontaktzone
 - Zielwert für die Permeabilität bezogen auf den Langzeitsicherheitsnachweis für das ERAM kann mit hochwertiger Injektion der Kontaktfuge erreicht werden.



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |




Bundesamt für Strahlenschutz

Erfahrungen (Auswahl)

(4)

- Projekt Bleicherode (Großschwindversuch Salzbeton - Injektion mit gefärbtem Injektionsharz zur Visualisierung der Kontaktfuge)



Der Kontaktbereich wird noch überbohrt.



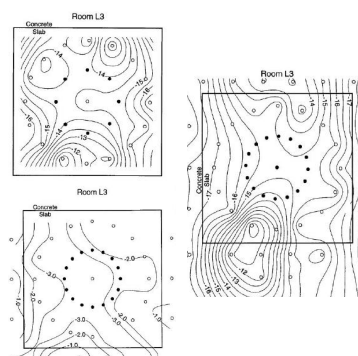
| Verantwortung für Mensch und Umwelt |




Bundesamt für Strahlenschutz

(5)

-



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



(6)

-



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Offene Fragen - erforderliche weiterführende Arbeiten (1)

- (Laborative) Versuchskonzepte zur Ermittlung der Kontakteigenschaften sind noch zu konkretisieren (mechanische/hydraulische/chemische Eigenschaften schon weiter fortgeschritten).
- Schwierigkeit der Formulierung von definierten Eigenschaften für die Nachweisführung zu jedem Zeitpunkt für unterschiedliche Szenarien (ist der Zeitpunkt $t=0$ hinsichtlich Mechanik und Geochemie der worst-case?)
- Quelleigenschaften von Bentonit (Zeitpunkt/-dauer der Aufsättigung, NaCl-Sättigungsgrad der anstehenden Lösungen, Beständigkeit und Gleichmäßigkeit des Quelldrucks bei wechselnden Randbedingungen, Erosionsverhalten)
- Quelleigenschaften von anderen quellfähigen Materialien wie z. B. MgO-Binder-Systeme (Temperaturentwicklung im in situ-Maßstab, Beständigkeit und Gleichmäßigkeit des Quelldrucks im in situ-Maßstab, Langzeitbeständigkeit)

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



Offene Fragen - erforderliche weiterführende Arbeiten (2)

- Lassen sich die Anforderungen an die Kontaktfuge verallgemeinern bzw. kategorisieren?
 - Wirtsgesteinsabhängigkeit
 - Möglichkeiten des Designs (Widerlager, Konus, Streckenneigung, ...)
 - Szenarienabhängigkeit
- Welche technischen Lösungen sind möglich bzw. sind diese bei Streckenabdichtungen bei einem HAW-Endlager überhaupt erforderlich?
- Vorspanninjektionen (Spezialanwendungen im alpinen Druckstollen- und Druckschachtbau mit bis zu 100 bar Innendruckbelastung) – Lassen sich diese seltenen Anwendungen ggf. für Kontaktfugeninjektionen bei Verschlussbauwerken nutzen?
-

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



A

Anhang: Liste der Workshop-Teilnehmer

	Name	Institution
1	Hr. Teichmann	Asse GmbH
2	Hr. Wellmann	BfS
3	Hr. Mauke	BfS
4	Hr. Laske	BfS
5	Dr. Wollrath	BfS
6	Dr. Schulze	BGR
7	Dr. Stührenberg	BGR
8	Dr. Köster, S.	BMWl
9	Hr. Bollingerfehr	DBETEC
10	Frau Dr. Müller-Hoeppe	DBETEC
11	Hr. Jobmann	DBETEC
12	Hr. Teichert	Ercosplan
13	Hr. Czaikowski	GRS
14	Dr. Herbert	GRS
15	Dr. Mönig	GRS
16	Hr. Rothfuchs	GRS
17	Hr. Wieczorek	GRS
18	Dr. Popp	IfG
19	Dr. Salzer	IfG
20	Frau Weise	IfG
21	Dr. Schuhmann	KIT-IFG
22	Hr. Lack	K-UTEC
23	Dr. Pick	NMU
24	Dr. Pitterich	PTKA
25	Dr. Steininger	PTKA
26	Dr. Bittdorf	PTKA
27	Prof. Dr. Kudla	TU - BAF
28	Dr. Gruner	TU - BAF
29	Frau Dr. Freyer	TU - BAF
30	Prof. Dr. Lux	TUC, IfA+D
31	Hr. Berger	TUC, IfB
32	Frau Orzechowski	TUC - IfE
33	Dr. Plischke	TUC - IfE
34	Dr. Wilsnack	IBeWa
35	Hr. Mohlfeld	Zerna Ingenieure

B Anhang: Foto der Workshop-Teilnehmer



Abb. B.1 Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops am 24. und 25.08.2010 in Braunschweig

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-939355-43-4