

**Wissenschaftliche Berichte
FZKA-PTE Nr. 18**

Entsorgungsforschung

**12. Projektstatusgespräch
zu
BMWi-geförderten FuE-Projekten
zur Entsorgung radioaktiver Abfälle**

**Karlsruhe, KIT Campus Nord
09.11. - 10.11.2016**

**Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)**

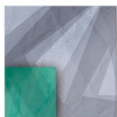
Projekträger für das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

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

Februar 2017



PTKA
Projekträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Vorwort

Das zwölfte Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle wurde am 9. und 10. November 2016 im Karlsruher Institut für Technologie (Campus Nord) veranstaltet. Es setzte die Reihe dieser Veranstaltungen fort, auf denen der aktuelle Stand der von PTKA-WTE betreuten Forschungsprojekte Fachleuten aus Wissenschaft, Behörden und Industrie sowie weiteren interessierten Teilnehmern vorgestellt wird.

Auf der Grundlage des Förderkonzepts „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (2015 - 2018)“ finanziert und fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) anwendungsorientierte Grundlagenforschung zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. Diese Forschung soll im Sinne der Vorsorgeforschung des Bundes zu fundierten wissenschaftlich-technischen Kenntnissen führen, die sowohl eine Voraussetzung und Grundlage dafür sind, dass die Sicherheit komplexer Endlagersysteme beurteilt und über lange Zeiträume nachgewiesen werden kann, als auch Basis dafür sind, dass Endlager errichtet und betrieben werden können.

Bei diesem Projektstatusgespräch wurde der Themenkomplex Sicherheits- und Nachweiskonzepte für Endlager im Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein am ersten Veranstaltungstag detailliert und umfassend dargestellt. Damit sollte der breiteren wissenschaftlichen Öffentlichkeit dieses Gebiet gebündelt vorgestellt werden, auf dem in den letzten Jahren deutliche methodische und die Anwendung betreffende Fortschritte erzielt wurden, z. B. die Realisierung der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben oder die Entwicklung eines neuen Ansatzes für die Anwendung des ewG-Konzeptes auf Endlager im Kristallingestein.

Am zweiten Veranstaltungstag wurde aus den weiteren betreuten Forschungsprojekten eine Auswahl aktuell geförderter Vorhaben präsentiert. Dabei lag der Schwerpunkt auf FuE-Aktivitäten, die sich mit Untersuchungen zur Zustandsüberwachung von Behältern (relevant für die Thematik verlängerter Zwischenlagerzeiten) und „klassischen“ Themen wie der Rückholbarkeit von Endlagerbehältern, Verschlussystemen, Methoden der numerischen Modellierung, geochemischen Prozessen zur Rückhaltung und Sorption von Radionukliden sowie mit sozio-technischen Fragestellungen befassen.

Aus der Vielfalt der Vorhaben wird ersichtlich, dass Ziel führend nur eine multidisziplinäre und interdisziplinäre Herangehensweise sein kann, mit der die anstehenden Aufgaben zu lösen sind.

Im vorliegenden Materialienband sind als Einführung in das Thema Kurzdarstellungen und die Vortragsfolien zusammengestellt.

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

Dr. H. Bittdorf
Dipl.-Ing. M. Bühler
Dr. H. Pitterich
Dr. W. Steininger

Der vorliegende Materialienband dient der aktuellen Unterrichtung der auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle arbeitenden Institutionen und der zuständigen Behörden.

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

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

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

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

des PTKA zu finden.

Inhaltsverzeichnis

Veranstaltungsprogramm	1
J. Mönig, GRS	3
<i>Zweck von Sicherheits- und Nachweiskonzepten und methodische Vorgehensweisen</i>	
M. Jobmann, DBE Technology.....	27
<i>Verbundprojekt AnSichT: Methodik eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tongestein – Überblick</i>	
S. Mrugalla, BGR	52
<i>Verbundprojekt AnSichT: Geologische Rahmenbedingungen und ihre Auswirkungen</i>	
W. Bollingerfehr, DBE Technology.....	71
<i>Verbundprojekt KOSINA: Konzeptentwicklung und Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein generisches HAW-Endlager in flach lagernden Salzschichten</i>	
T. Popp, IfG GmbH & J. Hammer, BGR.....	103
<i>Verbundprojekt KOSINA: Geologische Grundlagen und gebirgsmechanische Modellierungen</i>	
N. Müller-Hoeppe, DBE Technology	143
<i>Verbundprojekt CHRISTA: Technisches Endlagerkonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallingesteinsformation in Deutschland</i>	
J. Wolf, GRS.....	167
<i>Verbundprojekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallingesteinsformation in Deutschland – Einführung</i>	
T. Reich, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.....	200
<i>Radionuklidrückhaltung in Tongestein - Wissensstand und offene Fragen</i>	
A. Hampel, Wissenschaftlicher Berater & B. Reedlunn, Sandia National Laboratories	233
<i>Verbundprojekte zu Stoffgesetzen für Steinsalz: Schlussfolgerungen aus den Vorhaben I bis III und Vorstellung des Projektes WEIMOS</i>	
U. Hampel, TU Dresden	311
<i>Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hoch-radioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung (DCS-Monitor)</i>	
M. Schmidt, KIT	337
<i>Experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander)</i>	

P. Herold, DBE Technology	367
<i>(Sicherheits-)technische Auswirkungen der Rückholbarkeit von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen auf die Endlagerauslegung in Salz- und Tongesteinsformationen</i>	
H. Shao, BGR.....	390
<i>DECOVALEX – International Benchmarking Project for Radioactive Waste Isolation</i>	
W. Kudla, M. Gruner, TU Bergakademie Freiberg & P. Herold, DBE Technology	408
<i>Ergebnisse des FuE-Vorhabens ELSA II (Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle)</i>	
G. Wittum, Goethe-Universität Frankfurt am Main & A. Schneider, GRS	457
<i>Simulation dichtegetriebener Grundwasserströmungen mit Höchstleistungsrechnern</i>	
H. Wirth, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Referat II A 6.....	508
<i>BMWi-Forschungsförderung - Projektförderung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Schlusswort)</i>	

Veranstaltungsort

Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt
(FTU), KIT - Campus-Nord
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Hinweise zur Anreise:

www.fortbildung.kit.edu/informationen.php

Anmeldung

Anmeldeunterlagen:

www.ptka.kit.edu/wte/146.php

Um Anmeldung bis zum 21.10.2016 wird
gebeten.

Anmeldeformular bitte zurücksenden per

E-Mail: vanessa.frey@kit.edu

Fax: 0721 608 929231 oder

Post: siehe nebenstehende Anschrift.

Die Teilnahme ist kostenlos.

Stand:04.11.2016



Organisation

Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)
Abteilung Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Campus Nord
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
www.ptka.kit.edu/wte/145.php

Ansprechpartner

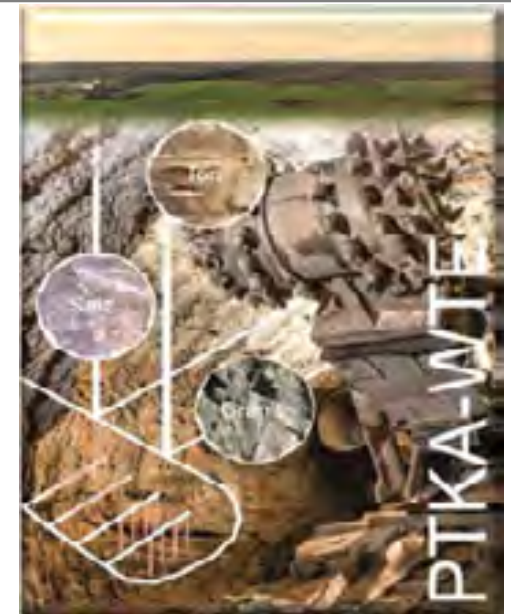
Dr. Holger Bittdorf
Telefon: 0721 608 25792
E-Mail: holger.bittdorf@kit.edu
Dipl.-Ing. Michael Bühler
Telefon: 0721 608 24844
E-Mail: michael.buehler@kit.edu



12. Projektstatusgespräch zu BMW-geförderten FuE- Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle

Karlsruhe
09.11. - 10.11.2016

Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)



Programm

Mittwoch, 09. November 2016

13:00 - 13:15

Begrüßung

U. Breuer, Vizepräsident, KIT

13:15 - 13:45

Zweck von Sicherheits- und Nachweiskonzepten und methodische Vorgehensweisen

J. Mönig, GRS

Verbundprojekt AnSicht

13:45 - 14:15

Methodik eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tongestein – Überblick

M. Jobmann, DBE Technology

14:15 - 14:45

Geologische Rahmenbedingungen und ihre Auswirkungen

S. Mrugalla, BGR

14:45 - 15:15 Kaffeepause

Verbundprojekt KOSINA

15:15 - 15:45

Konzeptentwicklung und Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein generisches HAW-Endlager in flach lagernden Salzschieben

W. Bollingerfehr, DBE Technology

15:45 - 16:15

Geologische Grundlagen und gebirgsmechanische Modellierungen

T. Popp, IfG GmbH, J. Hammer, BGR

Verbundprojekt CHRISTA

16:15 - 16:45

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallin-gesteinsformation in Deutschland – Einführung

J. Wolf, GRS

16:45 - 17:15

Technisches Endlagerkonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallin-gesteinsformation in Deutschland

N. Müller-Hoeppe, DBE Technology

17:45 - 22:00 Empfang im Casino des KIT CN

22:00 Bustransfer zu den Hotels in Karlsruhe

Donnerstag, 10. November 2016

09:00 - 09:45

Radionuklidrückhaltung in Tongestein - Wissensstand und offene Fragen

T. Reich, Johannes Gutenberg-Universität Mainz

09:45 - 10:30

Verbundprojekte zu Stoffgesetzen für Steinsalz: Schlussfolgerungen aus den Vorhaben I bis III und Vorstellung des Projektes WEIMOS

A. Hampel, Wissenschaftlicher Berater, B. Reedlunn, Sandia National Laboratories

10:30 - 11:00

Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hoch-radioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung (DCS-Monitor)

U. Hampel, TU Dresden

11:00 -11:30

Experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander)

M. Schmidt, KIT

11:30 - 12:45 Mittags-Imbiss vom Buffet

12:45 - 13:15

(Sicherheits-)technische Auswirkungen der Rückholbarkeit von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen auf die Endlagerauslegung in Salz- und Tongesteinsformationen

P. Herold, DBE Technology

13:15 - 13:45

DECOVALEX – International Benchmarking Project for Radioactive Waste Isolation

H. Shao, BGR

13:45 - 14:15

Ergebnisse des FuE-Vorhabens ELSA II (Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle)

W. Kudla, M. Gruner, TU Bergakademie Freiberg, P. Herold, DBE Technology

14:15 - 14:45

Simulation dichtegetriebener Grundwasserströmungen mit Höchstleistungsrechnern

G. Wittum, Goethe-Universität Frankfurt am Main, A. Schneider, GRS

14:45 Schlusswort

H. Wirth, BMWi

15:00 Bustransfer zum Hauptbahnhof Karlsruhe

Zweck von Sicherheits- und Nachweiskonzepten und methodische Vorgehensweise

*Jörg Mönig, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH,
Theodor-Heuss-Str. 4, 38122 Braunschweig*

Sicherheitskonzepte sind Teil des täglichen Lebens und sie sind in vielen Bereichen von Bedeutung. So ergab eine Google-Suchanfrage für den Begriff Sicherheitskonzept ca. 638.000 Treffer. Sicherheitskonzepte werden für ganze Stadtregionen und für einzelne Gebäude aufgestellt, sie spielen bei der Vorbereitung von Massenveranstaltungen eine große Rolle und sind auch für IT-Systeme relevant.

Die Definitionen für den Begriff Sicherheitskonzept ähneln sich in den verschiedenen Bereichen. Im Allgemeinen basiert ein Sicherheitskonzept auf einer Analyse möglicher Angriffs- und Schadensszenarien mit dem Ziel, ein definiertes Schutzniveau zu erreichen. Allen Sicherheitskonzepten gemeinsam ist die strukturierte Vorgehensweise. Auf Basis der Schutzziele für das zu schützende Objekt erfolgt eine Analyse der potentiellen Gefahren sowie der Schadensszenarien. Darauf aufbauend werden Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse bzw. ihrer Schadenshöhe entwickelt sowie Maßnahmen geplant und Mittel bereitgestellt, falls die Ereignisse doch eintreten. Zum Abschluss wird das Sicherheitskonzept festgelegt und genehmigt. Falls notwendig und möglich erfolgt eine versicherungstechnische Absicherung des akzeptablen Restrisikos.

Der Begriff Nachweiskonzept ist im täglichen Leben viel weniger gebräuchlich. Eine Google-Abfrage ergab lediglich ca. 5.400 Treffer. Nachweiskonzepte sind vor allem im technischen und bautechnischen Bereich anzutreffen (Schweißverbindungen, Tragwerksbemessung sowie in Verbindung mit Staudämmen und Bauwerken).

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe werden die Begriffe Sicherheits- und Nachweiskonzept erst seit einigen Jahren verwendet gewinnen aber an Bedeutung. Im Abschlussbericht des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) von 2002 sowie in den Sicherheitsanforderungen des BMUB an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle von 2010 taucht der Begriff Sicherheitskonzept jeweils zweimal auf, in der Stellungnahme der Entsorgungskommission (ESK) des BMUB zum Endlager für radioaktive Abfälle in Morsleben von 2013 siebenmal und 17 mal im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle von 2016. Der Begriff Nachweiskonzept taucht nur in den beiden letztgenannten Dokumenten auf (dreimal bzw. zwölfmal). In diesem Zusammenhang ist interessant, dass ein Bericht zur Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) in der Trefferliste zur o.a. Google-Abfrage des Begriffes Nachweiskonzept an 3. Stelle aufgeführt wurde.

Hintergrund dieser Entwicklung ist, dass sich in den letzten Jahren im internationalen Rahmen, z.B. auf Ebene der OECD-NEA und der IAEA, ein gemeinsames Verständnis zur Bedeutung und zum Inhalt eines Safety Case für die Endlagerung radioaktiver Abfälle entwickelt und konsolidiert hat. Eine wichtige Grundlage für einen Safety Case ist demnach die Formulierung eines Sicherheitskonzeptes.

Zentrale Zielsetzung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund ist die Isolation der Radionuklide von der Biosphäre sowie der möglichst weitgehende Verbleib der Radionuklide am Ort ihrer Einlagerung. Während die Isolation der Abfälle von der Biosphäre durch die Tiefenlage erreicht wird, soll der Einschluss der Radionuklide durch die Eigenschaften der geologischen Barriere in Verbindung mit einem darauf abgestimmten technischen Endlagerkonzept sichergestellt werden.

In Deutschland hat der AkEnd bereits 2002 den Begriff einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) geprägt. Gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMBU ist der ewG der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Barrieren den Einschluss der Radionuklide sicherstellt.

Das Sicherheitskonzept beschreibt verbalargumentativ und in systematischer Weise, wie die natürlichen Gegebenheiten, Prozesse und technischen Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu führen sollen, dass die Sicherheit im betrachteten geologischen Umfeld erreicht wird. Das Sicherheitskonzept ist also mit der jeweiligen geologischen Situation am betrachteten Standort verknüpft. Daher werden sich Sicherheitskonzepte für Endlager in Kristallin-, Salz- oder Tongesteinen stets in wichtigen Punkten unterscheiden. Aber selbst bei Standorten mit demselben Wirtsgesteinstyp können standortspezifische Unterschiede beim Sicherheitskonzept auftreten.

Im Rahmen der vom BMWi geförderten FuE-Vorhaben ISIBEL bzw. AnSicht wurden Sicherheitskonzepte und Nachweiskonzepte für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salzgestein in steiler Lagerung bzw. im Tongestein entwickelt. Das vom BMUB geförderte FuE-Vorhaben VSG baute auf den Erkenntnissen des Vorhabens ISIBEL auf und entwickelte die Methoden weiter. Aktuell werden im FuE-Vorhaben KOSINA entsprechende Arbeiten zur Endlagerung in Salzgestein in stratiformer Lagerung durchgeführt sowie im Vorhaben CHRISTA erste Überlegungen für ein Endlager im Kristallingestein angestellt. Vereinzelt werden Beispiele aus diesen Vorhaben im Vortrag angeführt.

Bei der Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes sind als Randbedingungen die regulatorischen Anforderungen, die Art und Menge der radioaktiven Abfälle und die geologischen Standortgegebenheiten zu berücksichtigen. Die Kenntnisse zu den oftmals gekoppelten physikalischen und chemischen Prozessen, die im Endlagersystem ablaufen, fließen ebenfalls ein.

Die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden einige Leitgedanken formuliert. So ist beispielsweise bei der Endlagerung in

einer Salzformation ein Leitgedanke, dass der sofortige und dauerhafte Einschluss der Radionuklide vorrangig dadurch erreicht werden soll, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird. Dieses Beispiel zeigt, dass die Leitgedanken sich zum Teil auf spezifische Charakteristika des Wirtsgesteins beziehen. Für ein Endlager in einer Tonformation könnte aufgrund des dort vorhandenen Porenwassers ein entsprechender Leitgedanke nicht formuliert werden.

Ausgehend von den Leitgedanken werden Grundanforderungen an die Endlagerung in dem betrachteten Endlagersystem formuliert, aus denen dann konkrete Zielsetzungen und technische Maßnahmen abgeleitet werden. Beispielhaft sind einige spezifische Zielsetzungen für ein Endlager in einer Tonformation in Folie 17 aufgeführt.

Die aus den Zielsetzungen abgeleiteten technischen Maßnahmen sind überwiegend auch in der Vergangenheit Grundlage der Sicherheitsbetrachtungen gewesen. Ein ausformuliertes Sicherheitskonzept ermöglicht aber eine ganzheitliche Betrachtung und Darstellung, wie in einem bestimmten Endlagersystem die Sicherheit gewährleistet werden soll. In diesem Zusammenhang muss betont werden, dass Teilfragen bzw. technische Optimierungen zu Einzelaspekten, zum Beispiel zum Monitoring, stets vor diesem Hintergrund geklärt bzw. vorgenommen werden müssen.

Das Nachweiskonzept beschreibt schließlich, wie die Sicherheit des Endlagersystems auf Basis des Sicherheitskonzeptes nachgewiesen werden soll. Das Nachweiskonzept ist also immer mit dem Sicherheitskonzept direkt verknüpft. Im Nachweiskonzept erfolgt eine qualitative Beschreibung aller zu führenden Einzelnachweise. Dabei sind auch die jeweiligen Bewertungsmaßstäbe zu benennen, soweit es keine regulatorischen Vorgaben (z.B. Sicherheitsanforderungen des BMUB) gibt. Aus Sicht des Autors müssen die Bewertungsmaßstäbe vor ihrer Anwendung in einem Verfahren festgelegt und kommuniziert werden. Die Gesamtheit der Einzelnachweise ermöglicht schließlich Aussagen zum Sicherheitsniveau, das mit dem gewählten technischen Endlagerkonzept an dem Standort erreicht wird.

Die vom BMWi geförderten FuE-Vorhaben, in denen u.a. Sicherheitskonzepte und Nachweiskonzepte für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in unterschiedlichen geologischen Situationen in Deutschland entwickelt wurden bzw. werden, schaffen zentrale Grundlagen für eine spätere Anwendung im Rahmen des Standortauswahlverfahrens in Deutschland.

Zweck von Sicherheits- und Nachweiskonzepten und methodische Vorgehensweise

Jörg Mönig

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Bereich Endlagersicherheitsforschung
Theodor-Heuss-Str. 4, 38122 Braunschweig

12. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten
FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle
Karlsruhe, 09.11. – 10.11.2016

Sicherheitskonzepte sind Teil des täglichen Lebens

Google-Abfrage zu „Sicherheitskonzept“

- ca. 638.000 Treffer

Sicherheitskonzepte sind Teil des täglichen Lebens



© sborisov, www.fotolia.com.



© Tiberius Gracchus, www.fotolia.com.



© refresh (PIX), www.fotolia.com.



Rock am Ring 2016; © SWR3.

Sicherheitskonzept – Wikipedia (gekürzt)

Ein **Sicherheitskonzept** stellt im Allgemeinen eine Analyse möglicher Angriffs- und Schadensszenarien mit dem Ziel, ein definiertes Schutzniveau zu erreichen, dar.

Allen Sicherheitskonzepten gemeinsam ist die strukturierte Vorgehensweise:

- Bestimmung des zu schützenden Objektes und der Schutzziele
- Analyse der Bedrohungen / Schadensszenarien / Gefahren
- Bewertung von Eintrittswahrscheinlichkeit und potentieller Schadensschwere sowie Ermittlung des Schadenserwartungswerts
- Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit/Schadenshöhe
- Planung von Maßnahmen und Bereitstellung von Mitteln zur Schadensbekämpfung und -eindämmung, wenn das Risiko schlagend wird
- Festlegung, Genehmigung und – falls nötig und möglich – versicherungstechnische Absicherung des akzeptablen Restrisikos

Nachweiskonzept

Google-Abfrage zu „Nachweiskonzept“

- ca. 5.470 Treffer
- Themengebiete
 - Schweißverbindungen
 - Nachweiskonzepte für Staudämme und Bauwerke
 - Tragwerksbemessung
 - Endlagerung radioaktiver Abfälle
 - VSG: Sicherheits- und Nachweiskonzept AP4. - GRS-277 (2012)
3. Stelle der Fundortliste)

Nennung des Begriffes Sicherheitskonzept

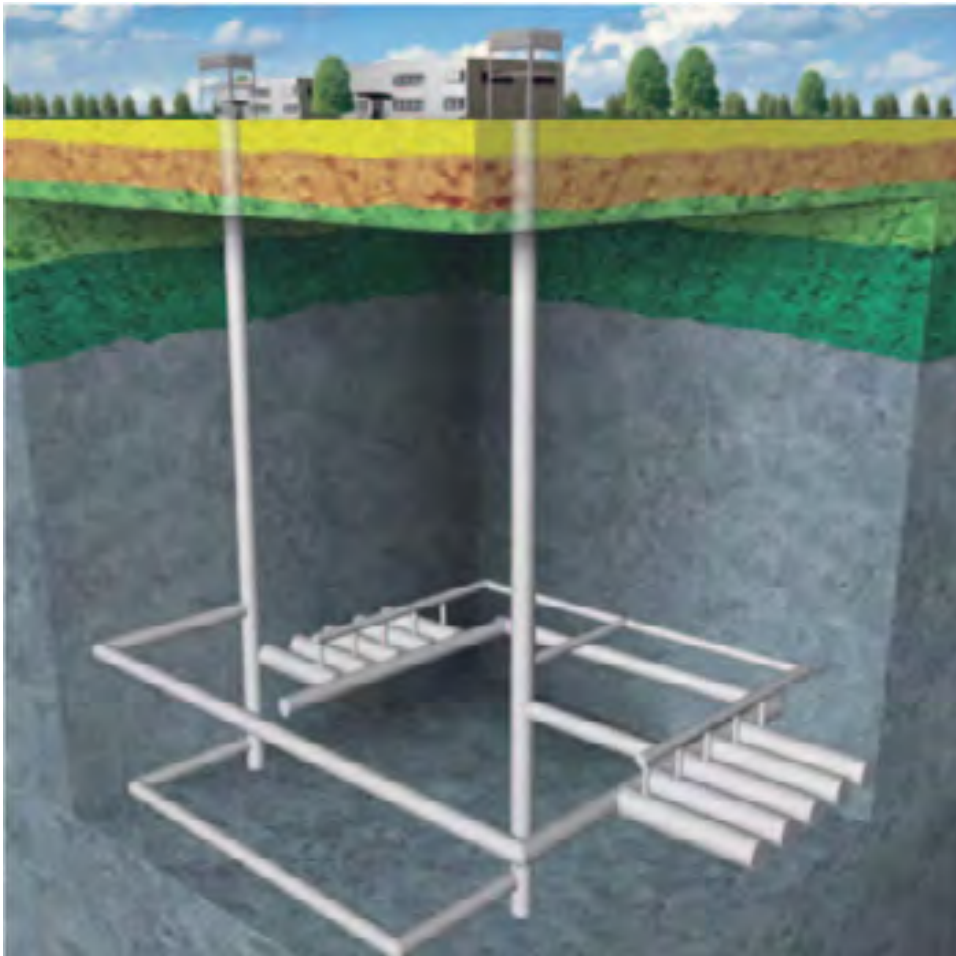
Dokument	Jahr	Fundstellen
AkEnd-Abschlussbericht (272 Seiten)	2002	2
Planunterlage zur Stilllegung des ERA Morsleben (BfS, 320 Seiten)	2009	1
Sicherheitsanalyse für das ERA Morsleben (GRS-Bericht, 458 Seiten)	2009	0
BMU-Sicherheitsanforderungen Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (30 Seiten)	2010	2
Stellungnahme der ESK zum ERAM (50 Seiten)	2013	7
Endbericht Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle (681 Seiten)	2016	17

Nennung der Begriffe Sicherheitskonzept & Nachweiskonzept

Dokument	Jahr	Fundstellen
AkEnd-Abschlussbericht (272 Seiten)	2002	2
Planunterlage zur Stilllegung des ERA Morsleben (BfS, 320 Seiten)	2009	1
Sicherheitsanalyse für das ERA Morsleben (GRS-Bericht, 458 Seiten)	2009	0
BMU-Sicherheitsanforderungen Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (30 Seiten)	2010	2
Stellungnahme der ESK zum ERAM (50 Seiten)	2013	7 (3*)
Endbericht Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle (681 Seiten)	2016	17 (12*)

* Nennung des Begriffs Nachweiskonzept

Merkmale einer Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen Untergrund



System mit passiver Sicherheit

großskaliges System (km-Bereich)

- Gesamtsystem aus geologischen Gegebenheiten und technischem Komponenten
- nicht standardisierbar
- heterogene Systemeigenschaften
- räumliche und zeitliche Variabilität

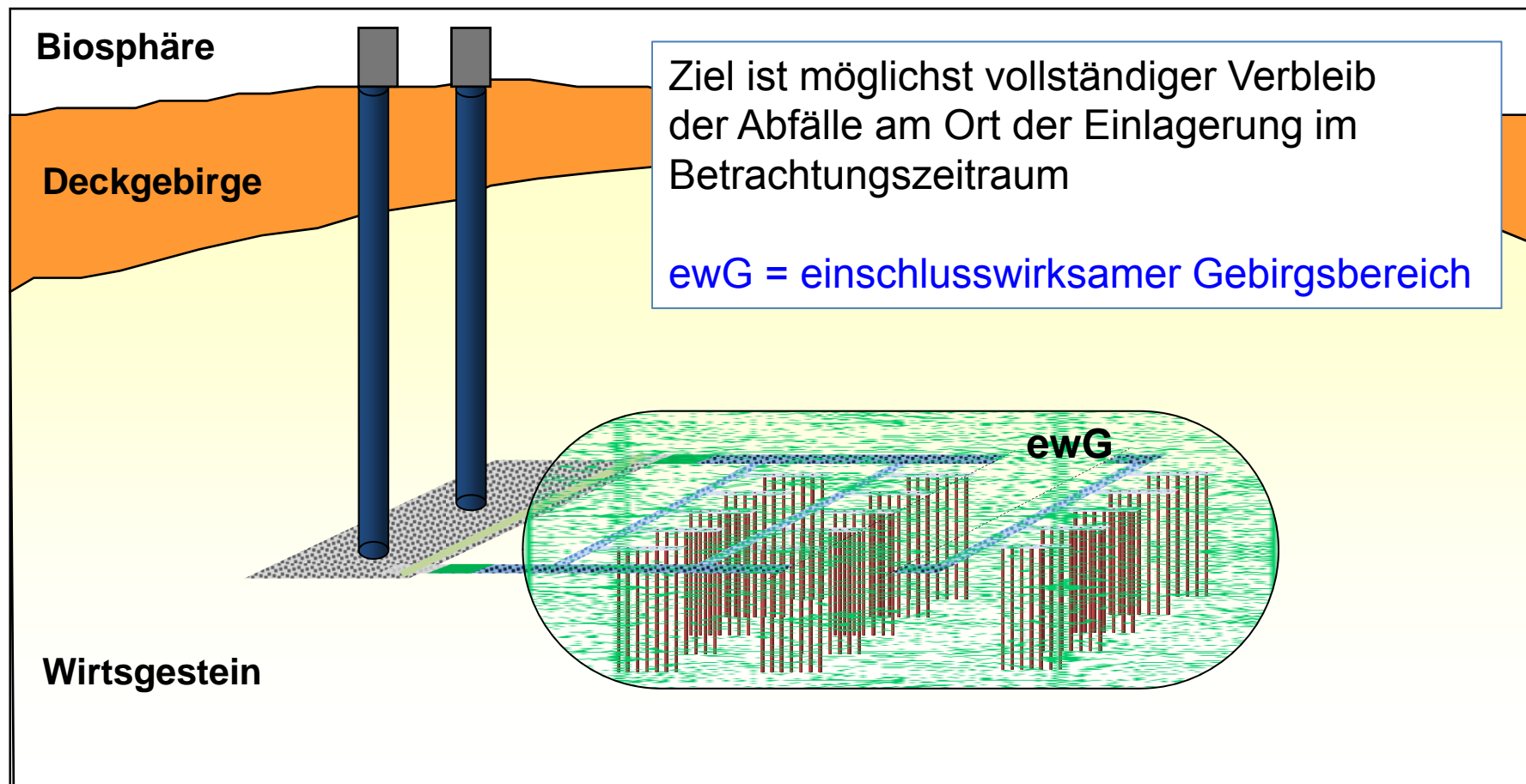
viele Einzelprozesse mit komplexen Kopplungen

vielfältige Ungewissheiten

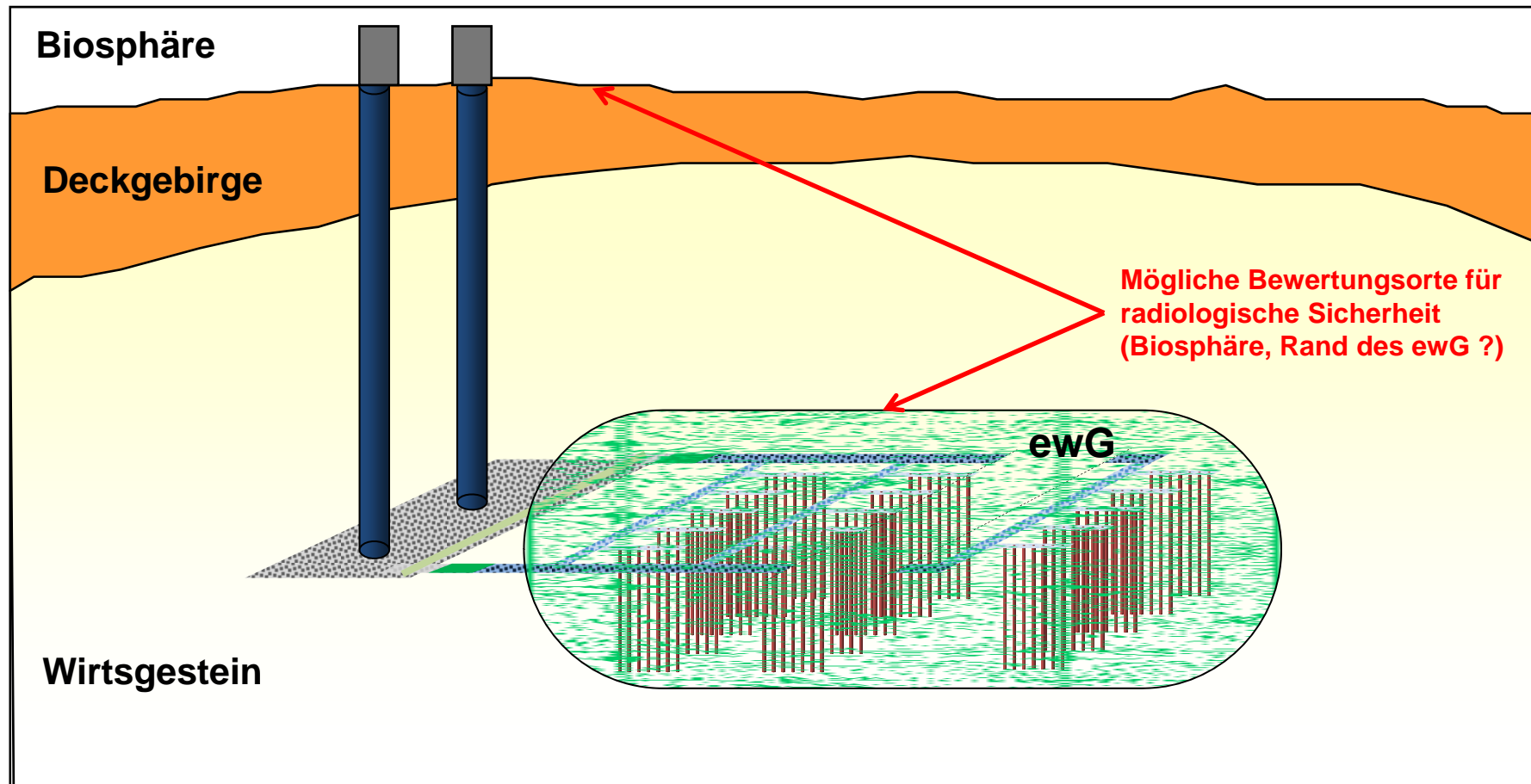
lange Betrachtungszeiten (1 Mio. a)

- → Betrachtung von Szenarien

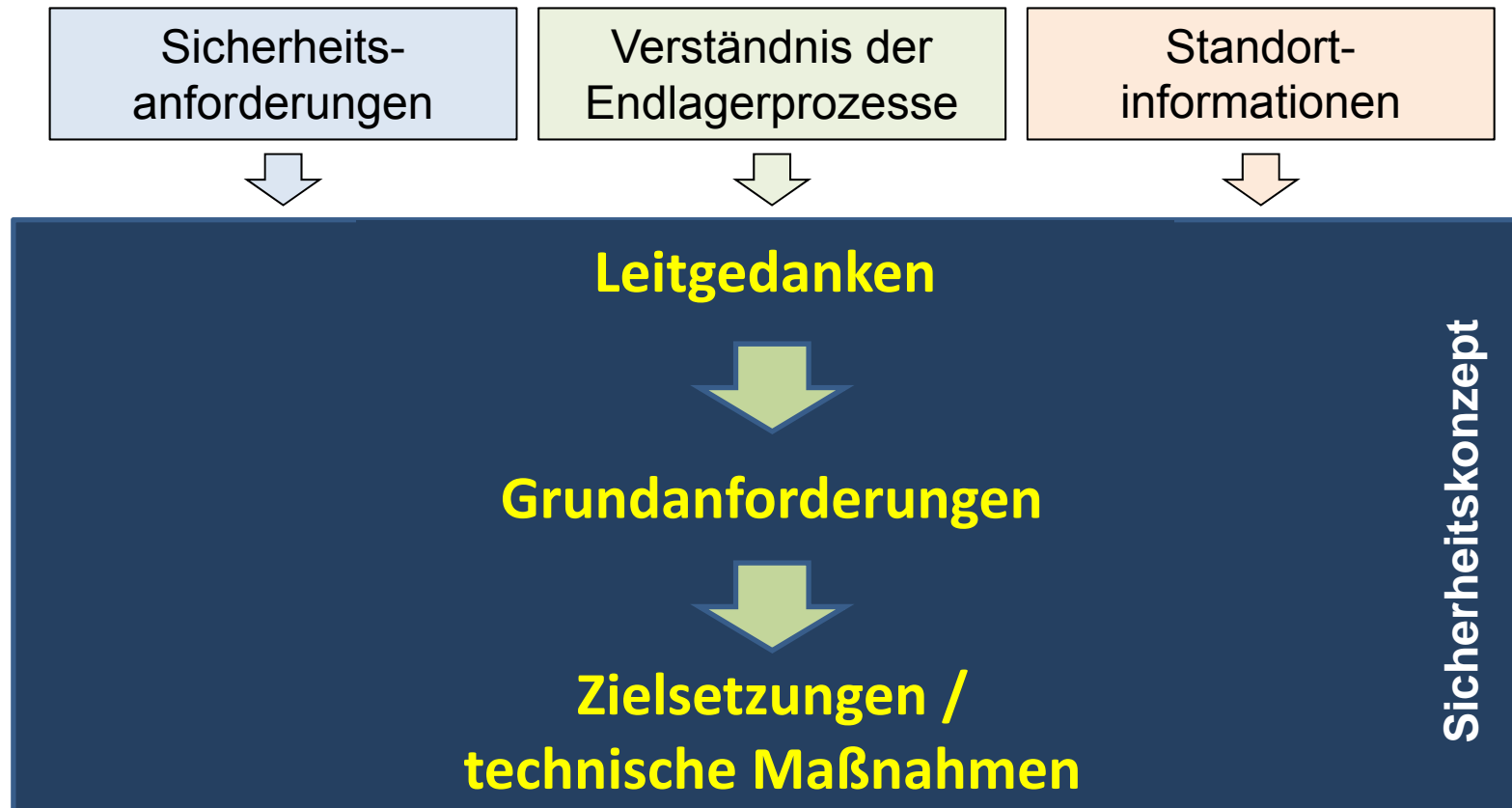
Zielsetzung der Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen Untergrund



Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)

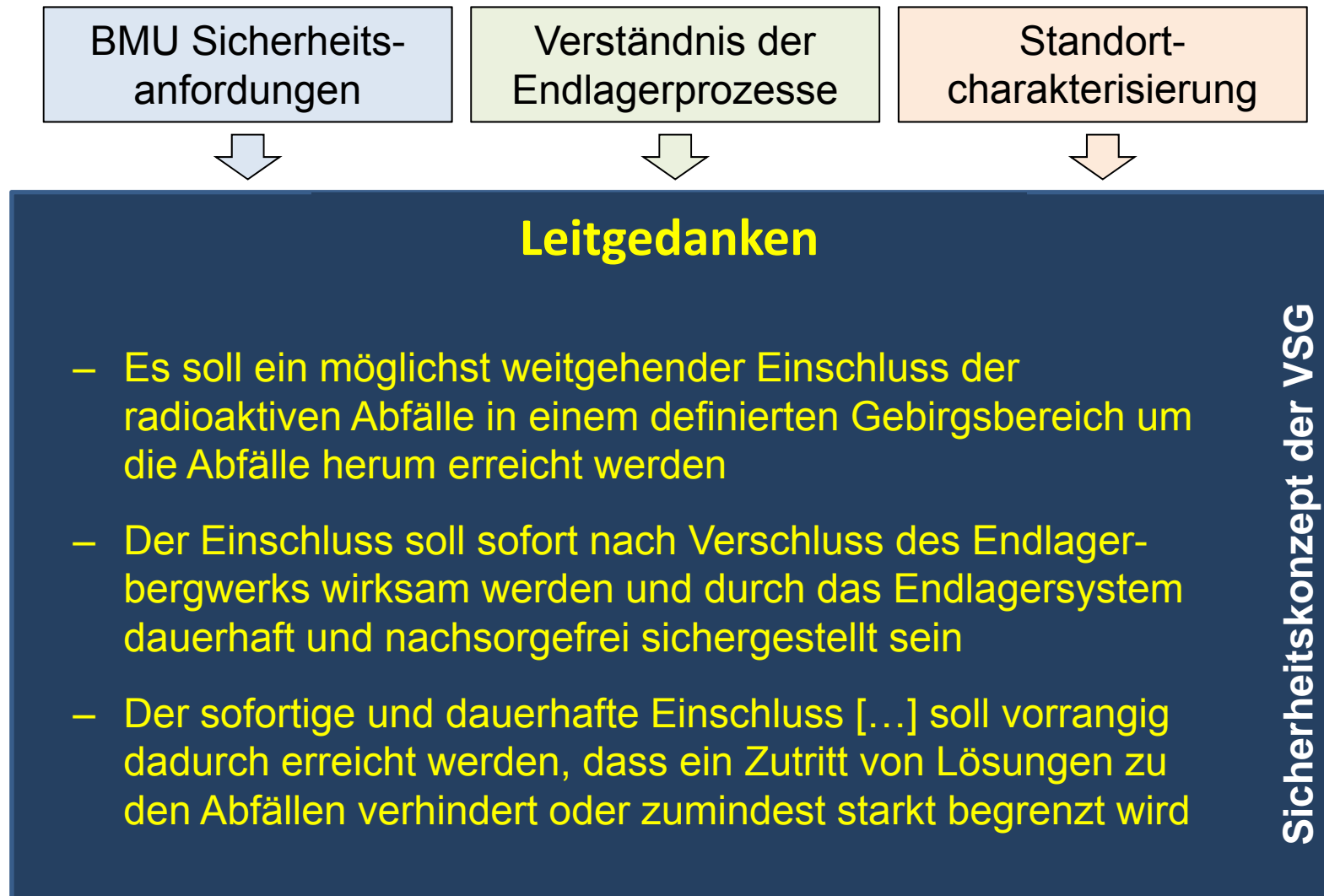


Wie erarbeitet man ein Sicherheitskonzept?

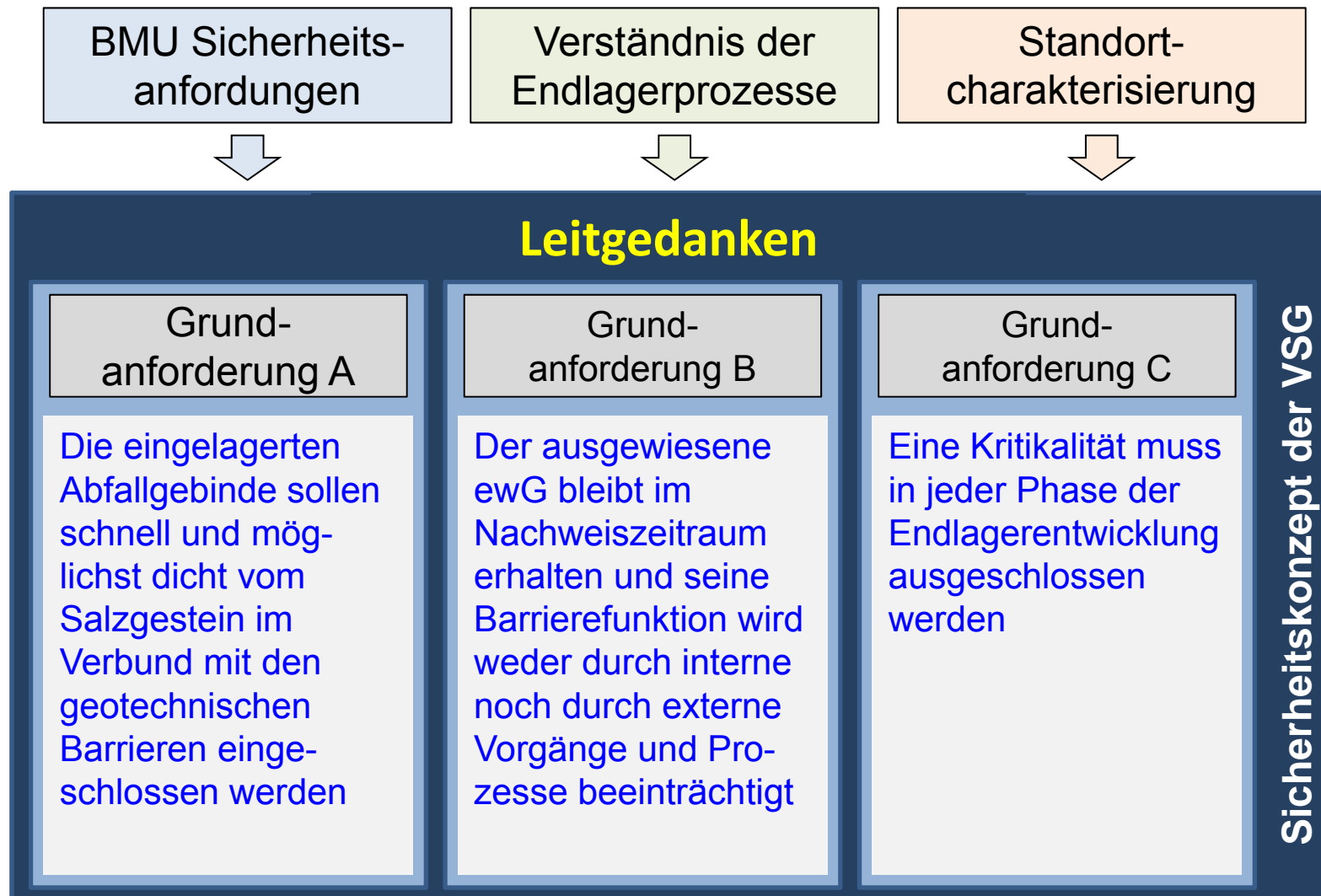


Das Sicherheitskonzept beschreibt verbalargumentativ, wie die natürlichen Gegebenheiten, Prozesse und technischen Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu führen sollen, dass die Sicherheit im betrachteten geologischen Umfeld erreicht wird.

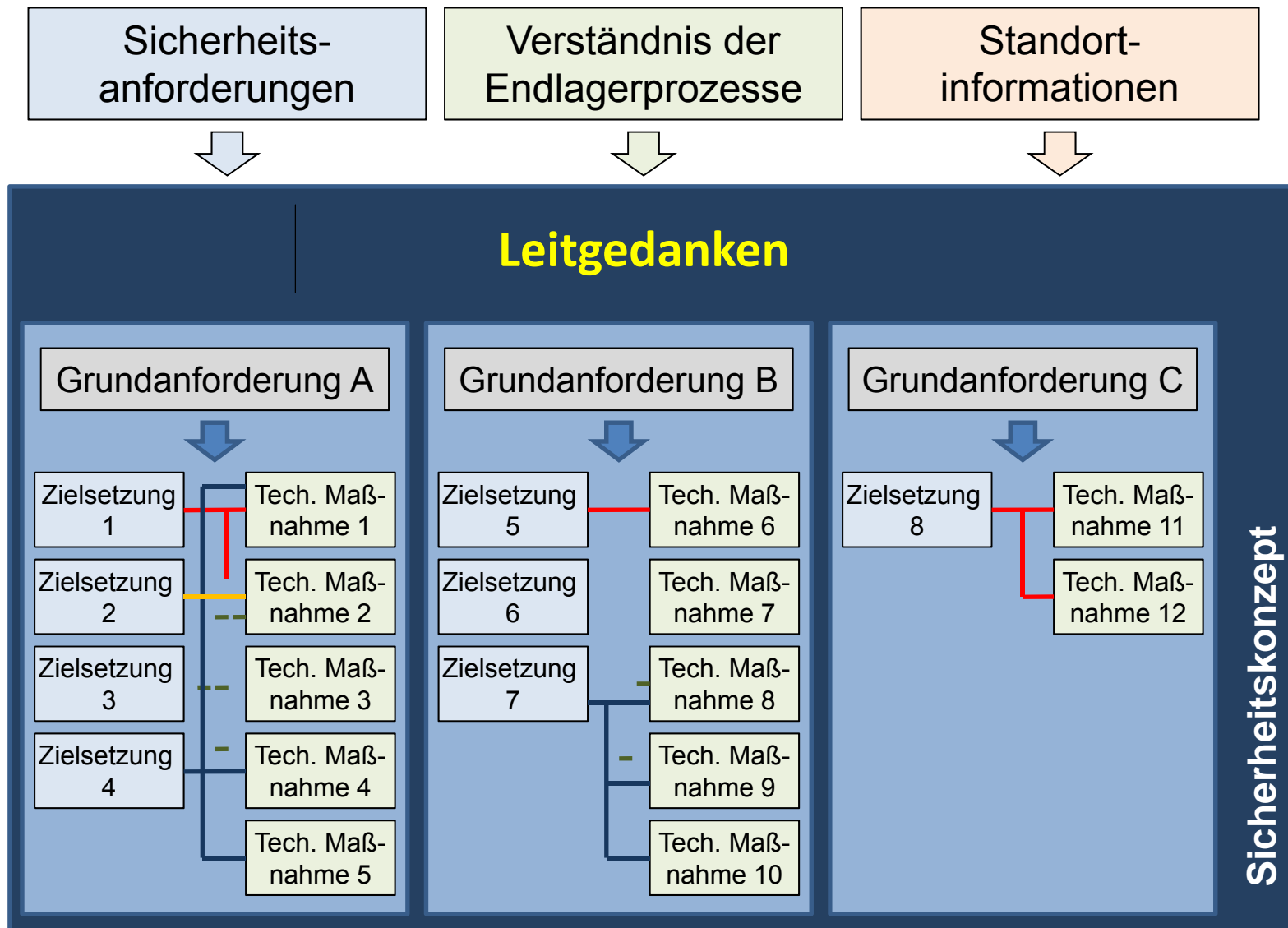
Sicherheitskonzept für ein Endlager in einem Salzstock



Sicherheitskonzept für ein Endlager in einem Salzstock



Ableitung des Sicherheitskonzeptes



Beispiel für technische Maßnahmen im Sicherheitskonzept der VSG

Auffahrung der Grubenbaue der Einlagerungsbereiche in Gesteinsbereichen, die frei von Lösungseinschlüssen mit sicherheitsrelevanten Volumen sind und günstige Kriecheigenschaften aufweisen. (→ z2HS).

Minimierung der abfallnah eingebrachten Feuchtigkeit

- Begrenzung der Korrosion der Abfallbehälter und der Gasbildung

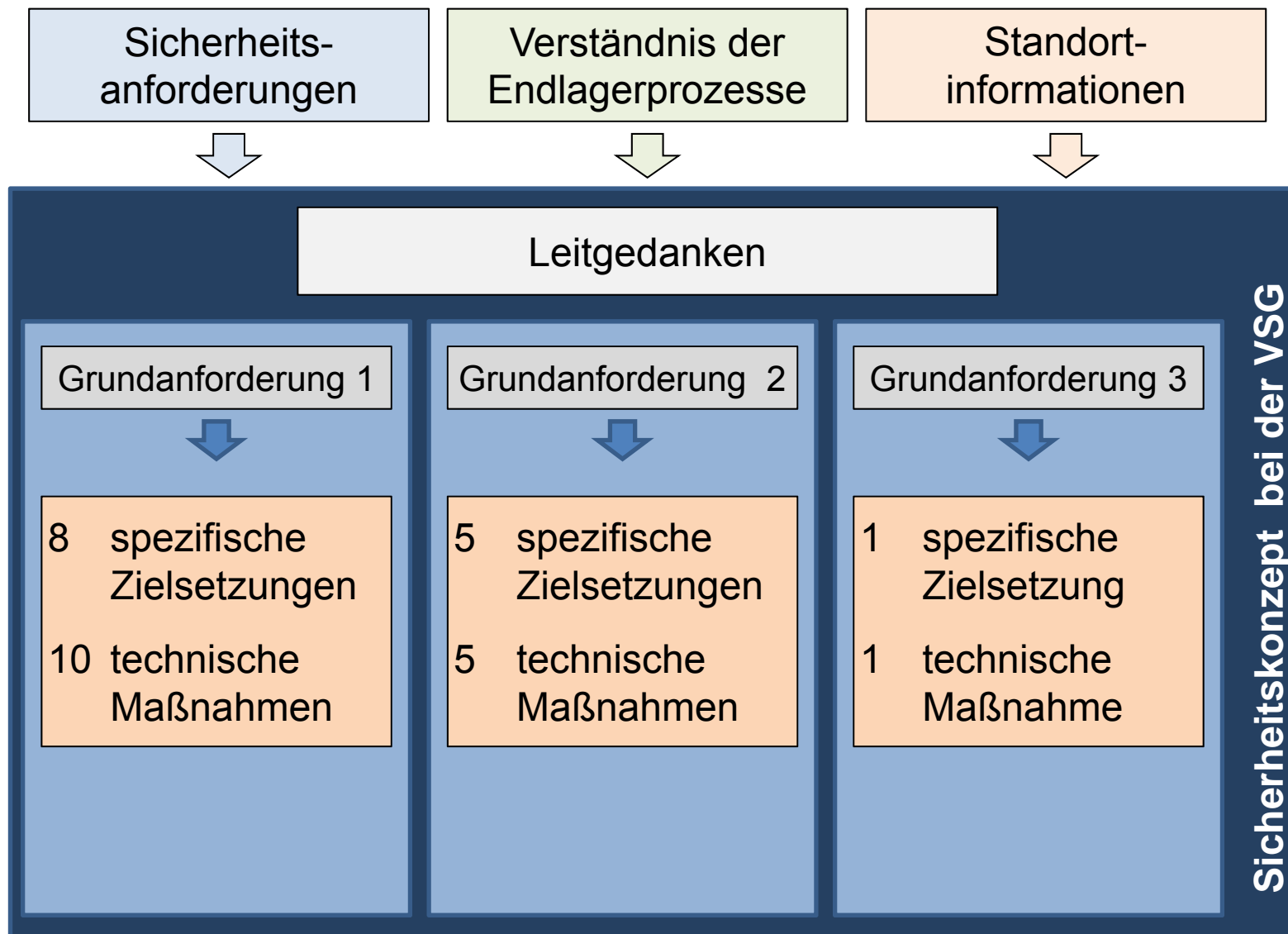
Verfüllung der Hohlräume in den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche mit Salzgrus

- beschleunigte Verheilung der Auflockerungszone
- Reduzierung der im Gebirge herrschenden Differenzspannungen

Auslegung der Schachtverschlussbauwerke mit mehreren Dichtelementen

- unabhängige Wirkungsweise über unterschiedliche Materialien

Überblick zum Sicherheitskonzept bei der VSG



Auszüge aus dem Sicherheitskonzept für ein Endlager im Tongestein

Wichtige spezifische Zielsetzungen

- Erhalt des ewG, keine Beeinträchtigung der Barrierenfunktion durch interne/externe Vorgänge
- Behinderung des Radionuklidtransports aus dem ewG
 - Begrenzung des advektiven Transports von Porenwässern
 - Begrenzung des diffusiven Transports
 - Wiederherstellung der ursprünglichen, niedrigen Permeabilität der Gesteinsformation
- Keine Ausbildung von sekundären Wegsamkeiten innerhalb des ewG (z.B. durch Rissbildung durch Druckaufbau über Bildung von Korrosionsgasen)
- Beschränkung der mikrobiellen Prozesse im Endlager (Temperatur im Buffer um die Abfälle > 100 °C, geringere Porosität)

Quelle: Rübel & Meleshyn – GRS-338 (2014)

Nachweiskonzept

Das Nachweiskonzept beschreibt, wie die Sicherheit des Endlagersystems auf Basis des Sicherheitskonzeptes nachgewiesen werden soll.

(Definition aus GRS-277)

- Qualitative Beschreibung aller zu führenden Einzelnachweise
- Benennung der Bewertungsmaßstäbe, soweit es keine regulatorischen Vorgaben (z.B. Sicherheitsanforderungen des BMIUIB) gibt.

Ausgangspunkt ist der sichere Einschluss der Radionuklide (und sonstigen Schadstoffe) im ewG

- **Sicherer** Einschluss = allenfalls geringfügige Freisetzung aus dem ewG
- **Vollständiger** Einschluss angestrebt, aber keine Anforderung, deren Einhaltung nachzuweisen ist

Beispiel: Betrachtete Aspekte beim Vorhaben VSG

Ausweisung und Lage des ewG

Erhalt des ewG im Nachweiszeitraum

- Mächtigkeit der Salzbarriere im ewG
- Integrität der geologischen Barriere
- Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke

Kritikalität

VSG war Forschungsvorhaben, daher keine vollständige Liste der in einem Verfahren zu führenden Nachweise

Einschluss der Radionuklide im ewG während des Nachweiszeitraums

- Bewertung am Rand des ewG mittels des Indikators RGI
 - sicherer Einschluss: $RGI < 1$; vollständiger Einschluss: $RGI = 0$
- Bewertung der radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre

Aus dem Nachweiskonzept leiten sich die Arbeiten im Rahmen der Systemanalyse ab

Zusammenfassung

Ein Sicherheitskonzept ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und Darstellung, wie in einem bestimmten Endlagersystem die Sicherheit gewährleistet werden soll

- unter Berücksichtigung der Randbedingungen (regulatorische Anforderungen, Art und Menge der radioaktiven Abfälle und Endlagerbehälter, geologische Standortgegebenheiten)
- Teilfragen/Optimierungen müssen stets vor diesem Hintergrund geklärt/vorgenommen werden.

Ein Nachweiskonzept beschreibt Vorgehensweisen und Bewertungsgrundlagen für die einzelnen notwendigen Einzelnachweise

- direkt gekoppelt mit dem Sicherheitskonzept

Die Gesamtheit der Einzelnachweise ermöglicht Aussagen zum Sicherheitsniveau, das mit dem gewählten technischen Endlagerkonzept an dem Standort erreicht wird.

Vielen Dank

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Verbundprojekt ANSICHT

Methodik eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tongestein – Überblick –

Jobmann¹, M., Bebiolka², A., Burlaka¹, V., Herold¹, P., Jahn², S., Lommerzheim¹, A., Maßmann², J., Meleshyn³, A., Mrugalla², S., Reinhold², K., Rübels³, A., Stark², L., Ziefle², G.

¹DBE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstraße 55, D-31224, Peine, Germany.

²Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stillweg 2, D-30655 Hannover

³Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), Theodor-Heuss-Straße 4, D-38122 Braunschweig

Auf der Grundlage des Standes von Wissenschaft und Technik sowie unter Berücksichtigung international bewährter Konzepte sollte im Rahmen des Verbundprojektes ANSICHT die Methodik eines Sicherheitsnachweises für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle im Tongestein in Deutschland entwickelt werden.

Grundlegende Elemente eines solchen Sicherheitskonzeptes sind zum einen eine geologische Standortbeschreibung sowie eine geowissenschaftliche Langzeitprognose zur zukünftigen Entwicklung der Standortregion. Zum anderen gehört dazu ein Endlagerkonzept, das sowohl die Einlagerung in das Wirtsgestein als auch ein Verschlusskonzept beschreibt, mit dessen Hilfe die bergmännischen Zugänge in geeigneter Weise verschlossen werden können. Nach Untersuchungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) existieren in Deutschland Tongesteinsformationen, die als Wirtsgesteine für die Einlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle potenziell geeignet sind. Diese Formationen liegen z.B. im Niedersächsischen Becken oder im süddeutschen Molassebecken (Hoth et al. 2007).

In den aktuellen Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) ist das Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, das sogenannte ewG-Konzept, verankert, das besagt, dass dieser definierte Gebirgsbereich über einen Zeitraum von 1 Million Jahre weder durch geologische Prozesse noch durch den Einfluss des Endlagers in seiner isolierenden Funktion geschwächt werden darf. In den Sicherheitsanforderungen sind dazu Kriterien genannt, die sogenannten Integritätskriterien, deren Einhaltung im Rahmen der Sicherheitsnachweise zu zeigen ist.

Im Rahmen des Projektes ANSICHT wurde mit Hilfe von generischen geologischen Standortmodellen und unter Berücksichtigung der gesetzlichen Anforderungen ein erster Entwurf für die Methodik eines Sicherheitsnachweises erarbeitet. Diese Methode besteht in der Verknüpfung von geologischen Rahmenbedingungen mit der Entwicklung eines Endlagerkonzeptes, insbesondere eines Einlagerungs- und Verschlusskonzeptes und eines darauf basierenden Nachweises der Barrierenintegrität sowie der Analyse von erwarteten und alternativen Endlagerentwicklungen.

Durch die im Projekt ANSICHT erzielten Ergebnisse wurde eine grundlegende Voraussetzung für die sicherheitstechnischen und nachweisgestützten Auslegungen von Endlagerkomponenten sowie für Errichtung, Betrieb und Schließung eines in einer Tonformation zu betreibenden Endlagers geschaffen.

Literatur:

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Stand: 30. September 2010, Bonn.

Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

Methodik eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tongestein in Deutschland

Verbundprojekt ANSICHT 2012 - 2017

Jobmann¹, M., Bebiolka², A., Burlaka¹, V., Herold¹, P., Jahn², S., Lommerzheim¹, A., Maßmann², J., Meleshyn³, A., Mrugalla², S., Reinhold², K., Rübel³, A., Stark², L., Ziefle², G.

¹DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

²Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Berlin

³Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), Braunschweig

Projektförderung:



Projektbetreuung:



Durchführung:



== Hintergrund ==

Zielsetzung

Auf der Grundlage des Standes von Wissenschaft und Technik sowie mit Blick auf international bewährte Konzepte sollte die Methodik eines Sicherheitsnachweises für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle im Tongestein in Deutschland entwickelt werden.

Grundlagen

FuE-Projekte: z.B.: ERATO, GENESIS, GEIST (DBETEC)

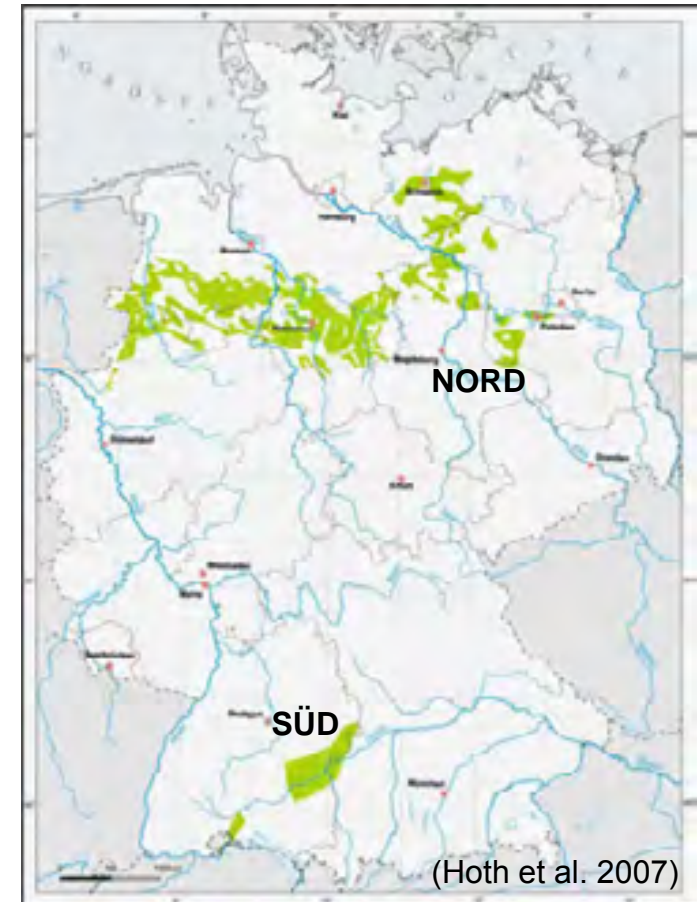
FuE-Projekte: z.B.: Safety Indicators, Toni (GRS)

Regionale Tonstudie (BGR) →

FuE-Projekte: ISIBEL, VSG (GRS, BGR, DBETEC)

Literatur:

Z.B. Arbeiten von: TU Clausthal, Andra, Nagra, etc.



Grundlagen

- Sicherheitskonzept
- Sicherheits- / Integritätskriterien
- Geologische Standortbeschreibung und zukünftige Entwicklung (s. nächster Vortrag)
- Einlagerungskonzept und Endlagerdesign
- Verfüll- und Verschlusskonzept

Systemanalyse

- FEP-Katalog (vollständige Systembeschreibung)
- Szenarienanalyse (Referenzszenario + Alternativszenarien)
- Integritätsnachweis der geologischen Barriere
- Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren
- Radiologischer Nachweis

Grundlagen

Sicherheitsanforderungen des BMU (2010)

Nachsorgefreier Einschluss der RN im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG)

Geringfügige Freisetzungen von RN am Rand des ewG

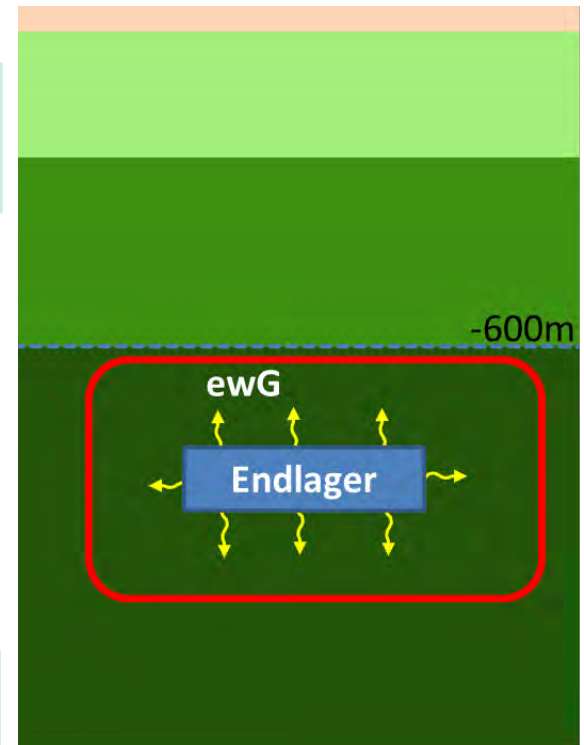
ANSICHT

Prinzip: Einschluss der Radionuklide durch Behinderung des Schadstofftransportes

Begrenzung des advektiven Stofftransportes

Begrenzung des diffusiven Stofftransportes

Wiederherstellung der ursprünglichen geringen Permeabilität im ewG



Auffahrung und Errichtung des Bergwerkes

- Einlagerungssohle im Tiefenbereich zwischen 600 und 800 m
- Endlagerkonzept kompatibel mit der Mächtigkeit und der Ausdehnung des Wirtsgesteins
- Endlager ist allseitig vom Wirtsgestein umschlossen
- Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Abfallgebände werden gemäß BMU (2010) berücksichtigt

Wiederherstellung / Erhaltung der Integrität der geologischen Barriere

- Minimierung des aufzufahrenden Hohlraumvolumens
- Auffahrungen erfolgen gebirgsschonend
- Einlagerung im Rückbau
- Verschließen von Bohrlöchern, Strecken und Schächten
- Verfüllung der offenen Hohlräume mit arteigenem Material

Grundlagen: Behälter und Inventare



CSD-Kokille:
1,34 x 0,43 m, 0,5 t

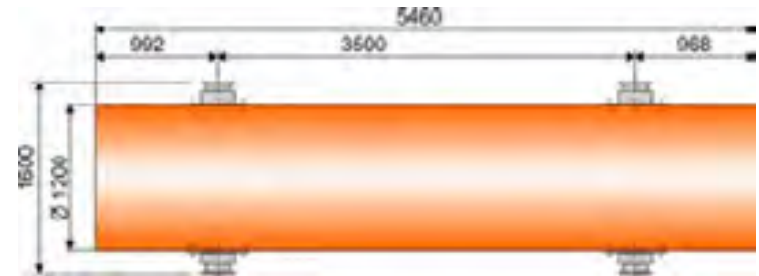
Abfallstrom				Bohrloch	Strecken
Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	UO ₂	12.450 BE	6.990 RK-BE	4.660 Pollux-3
		MOX	1.530 BE		
	SWR	UO ₂	14.350 BE	2.600 RK-BE	1.734 Pollux-3
		MOX	1.250 BE		
	WWER-DWR	UO ₂	5.050 BE	1.010 RK-BE	674 Pollux-3
	Strukturteile BE-Kondition.			874 RK-ST	2620 Mosaik
Wiederaufarbeitung	CSD-V		3.729 Kokillen	1.245 RK-HA	1.245 Pollux-3
	CSD-B		308 Kokillen	103 RK-WA	35 Pollux-9
	CSD-C		4.104 Kokillen	1.368 RK-WA	456 Pollux-9



MOSAIK-Behälter:
1,50 x 1,06 m, ca. 6 t



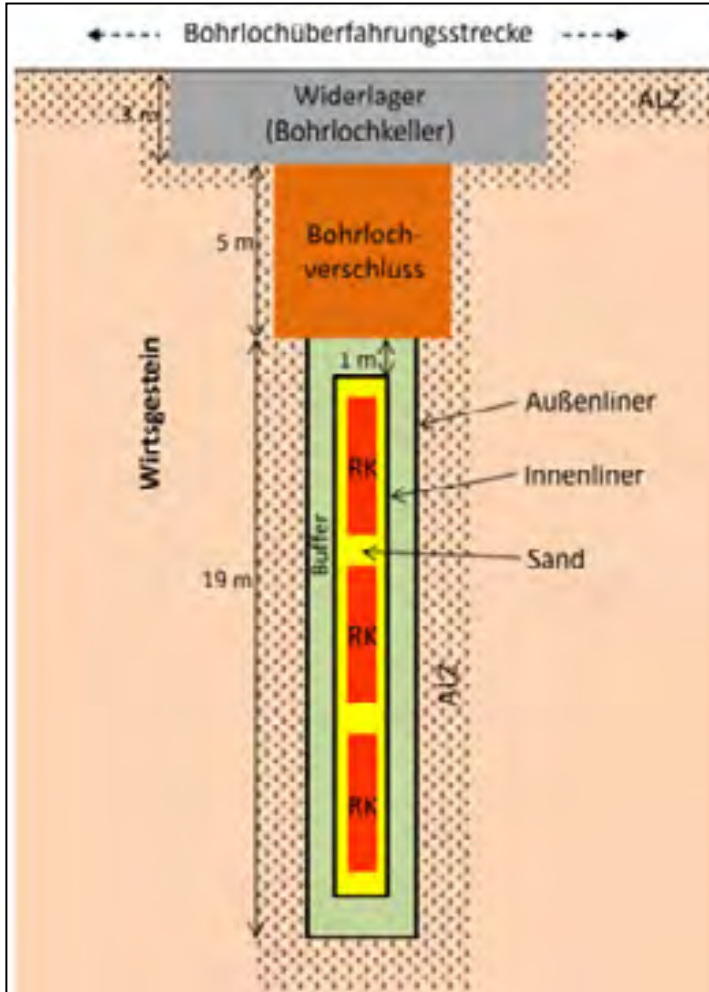
Rückholbare Kokille (RK):
4,98 x 0,43 m, 5,3 t



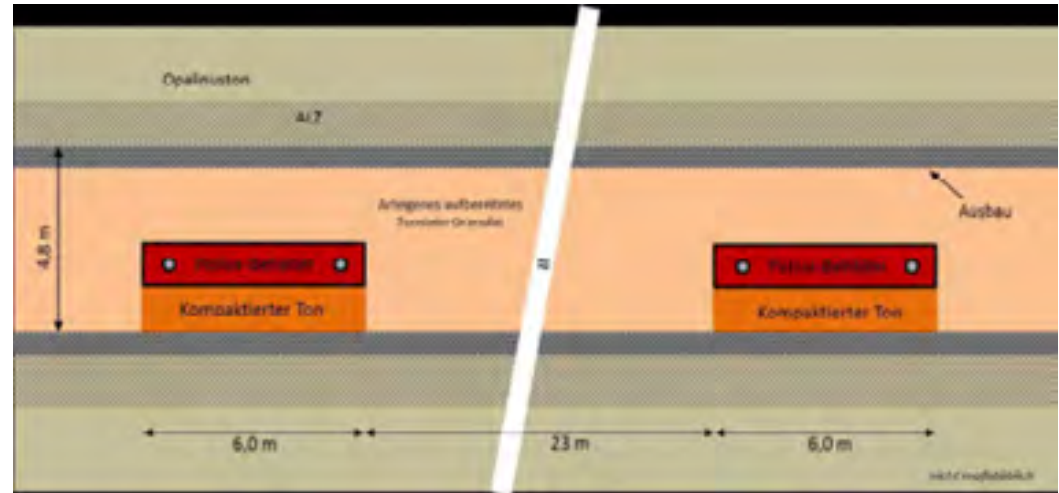
POLLUX-Behälter:
5,46 x 1,20 m (BE), 38 t
5,46 x 1,30 m (CSD-V)

Grundlagen: Einlagerungskonzepte

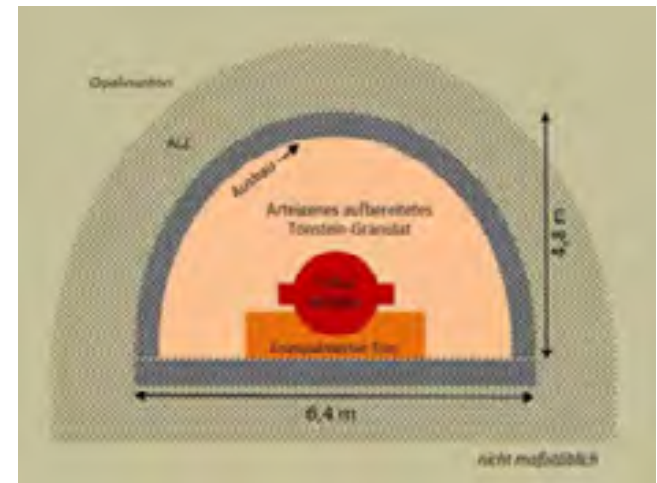
Vertikale Bohrlochlagerung
Standortmodell NORD



Horizontale Streckenlagerung
Standortmodell SÜD

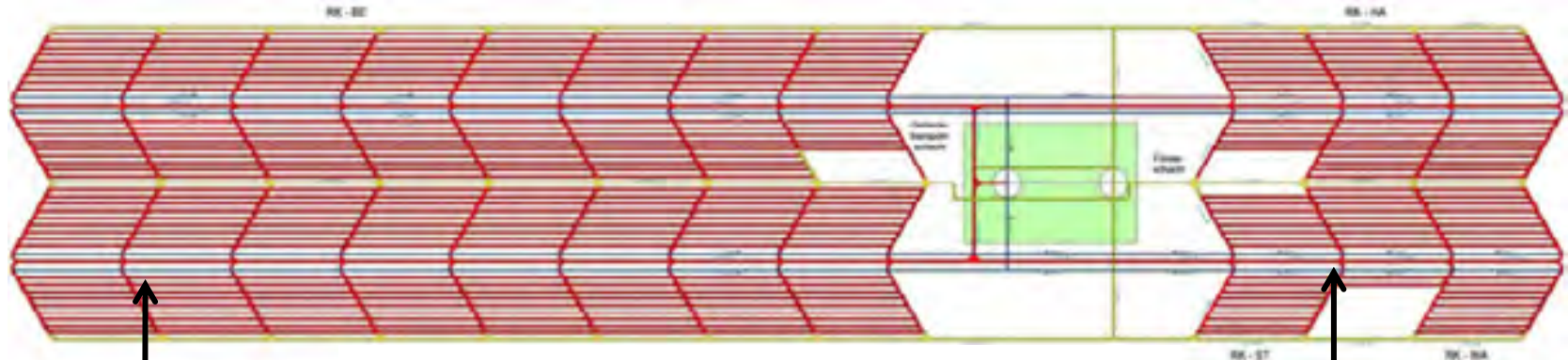


Auswahl nach
geologischen
Randbedingungen



Grundlagen: Grubengebäude

Endlagerkonzept Nord, vertikale Bohrlochlagerung

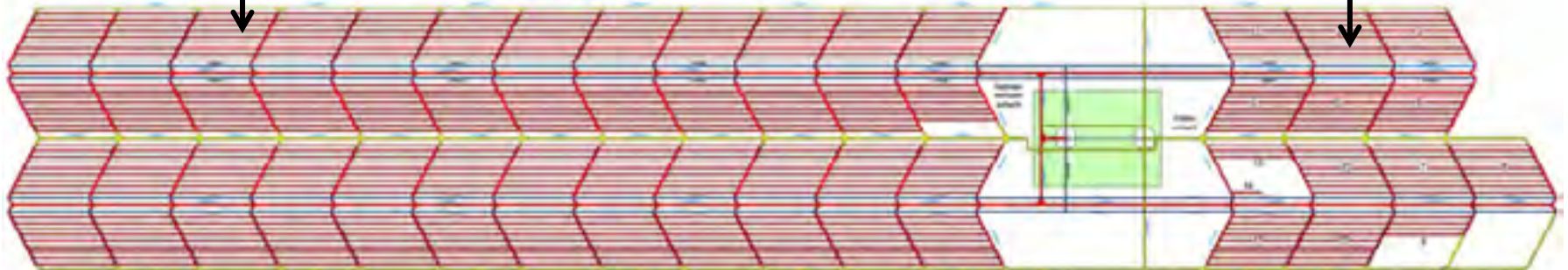


Ausgediente Brennelemente

32 BE-Felder mit je 9 Bohrlochstrecken (12/13 BL)
12 WA-Felder mit je 9 Bohrlochstrecken (12/13 BL)

Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

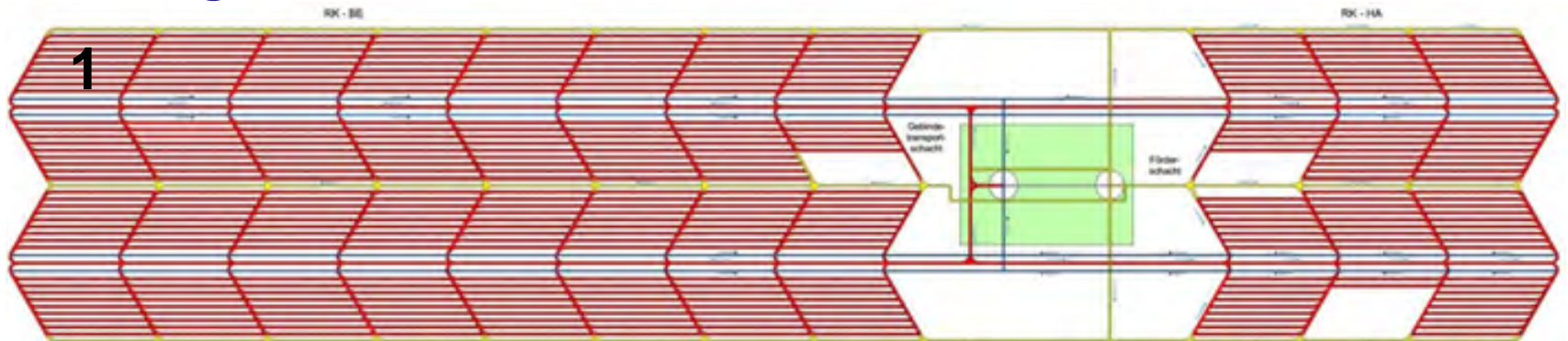
Endlagerkonzept Süd, horizontale Streckenlagerung



48 BE-Felder mit je 9 Einlagerungsstrecken
13 WA-Felder mit je 9 Einlagerungsstrecken

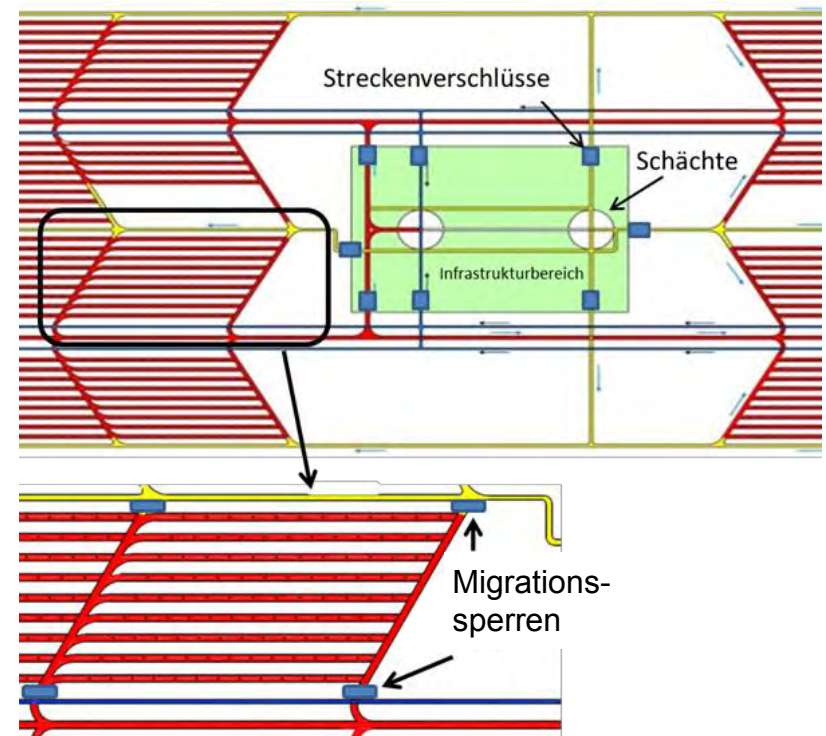
(Verändert nach Pöhler et al. 2010)

Grundlagen: Verschlusskonzept

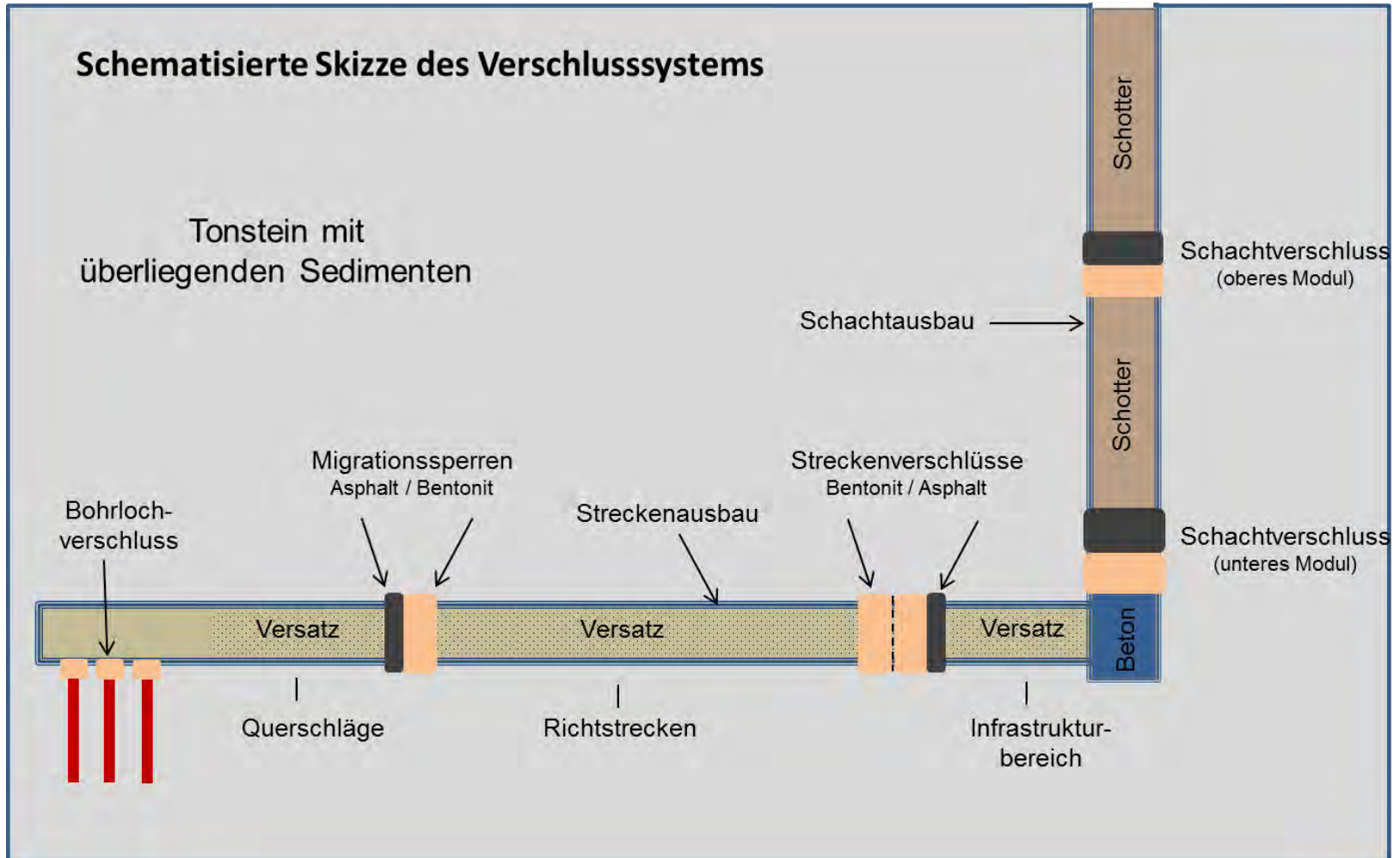


SA §8.5:

Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.



Grundlagen: Verschlusskonzept

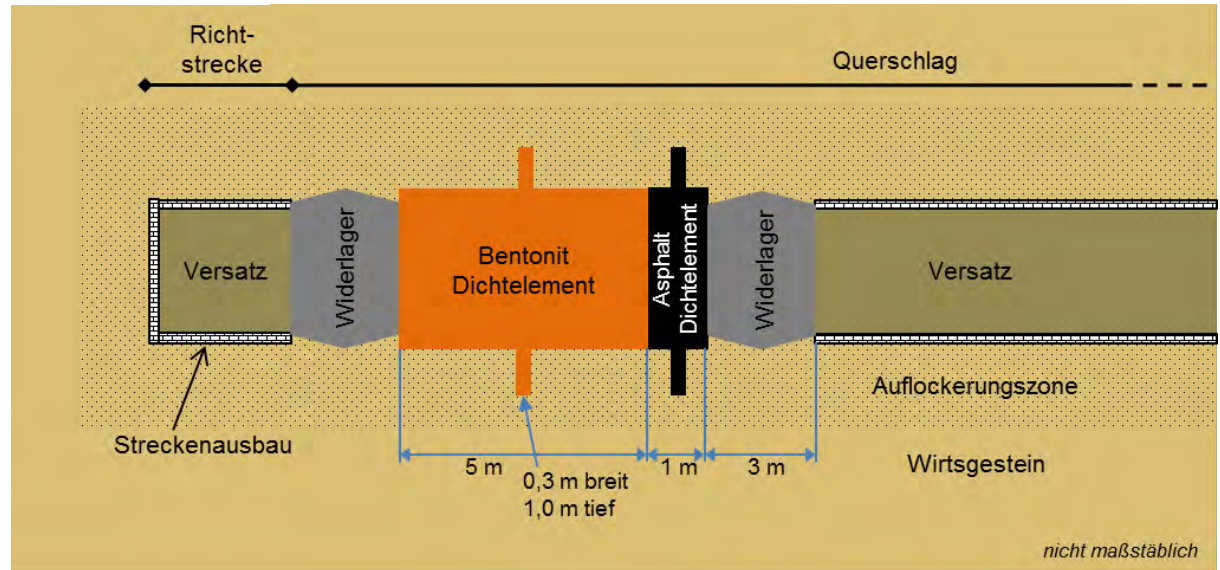


SA §8.7:

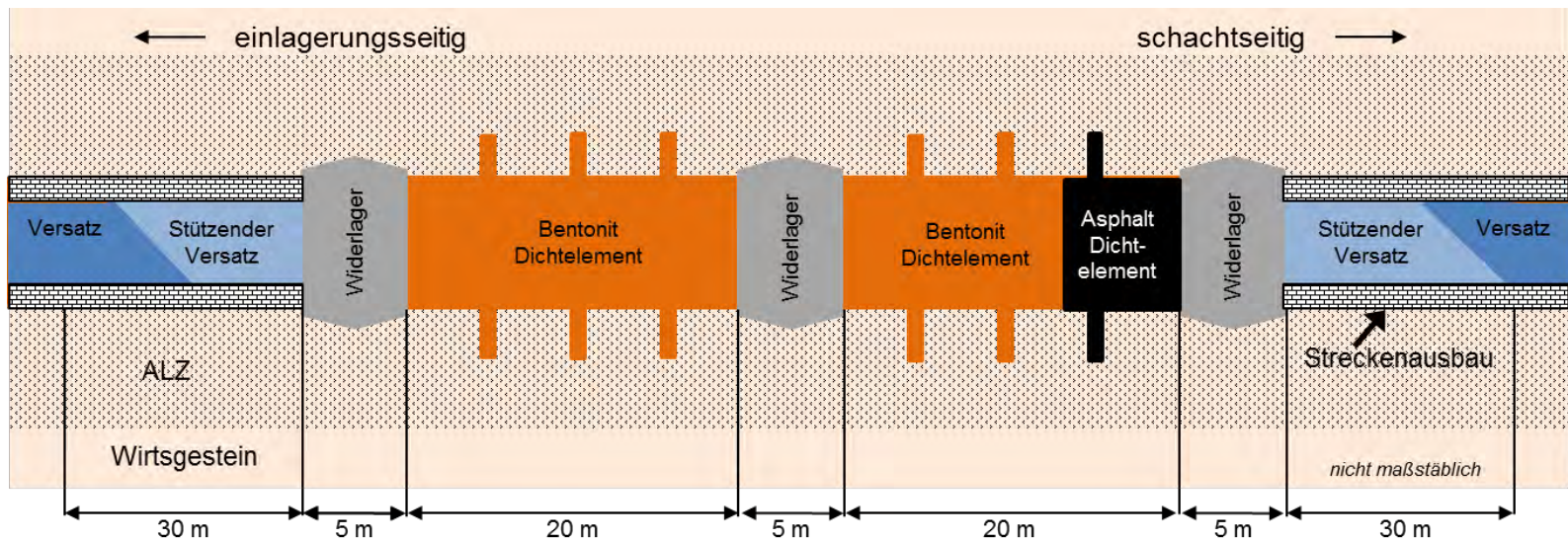
Das Barrierensystem soll redundant und diversitär ausgerichtet sein.

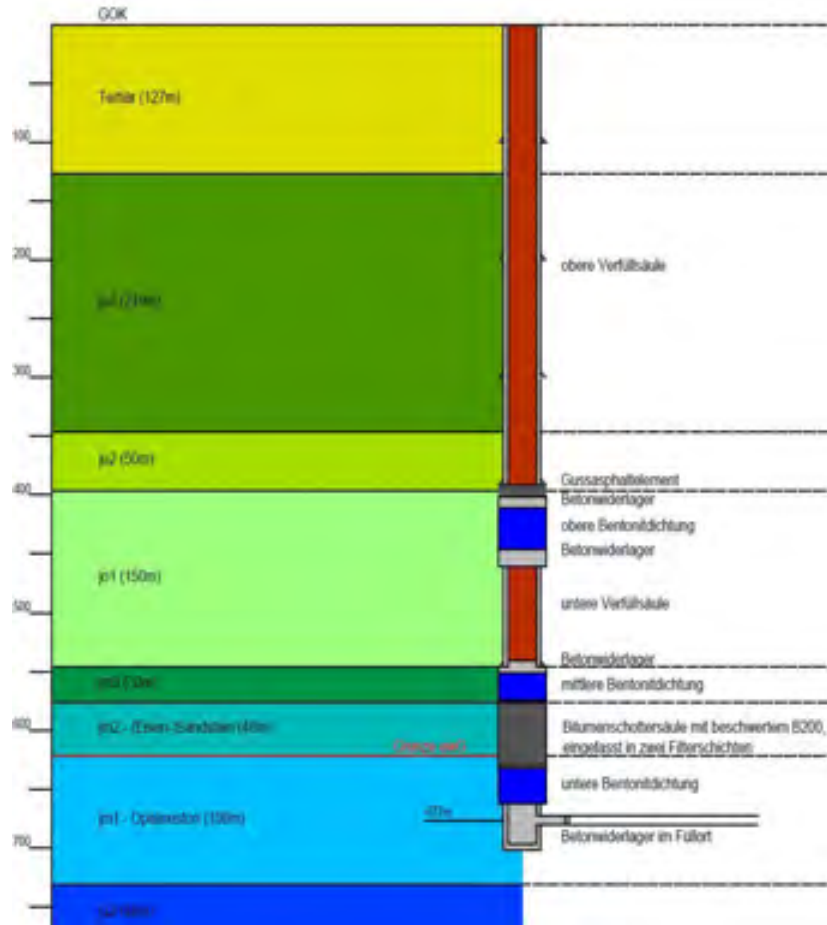
Grundlagen: Verschlusskonzept

Migrationssperre
(Abdichtungen zu den Einlagerungsfeldern)

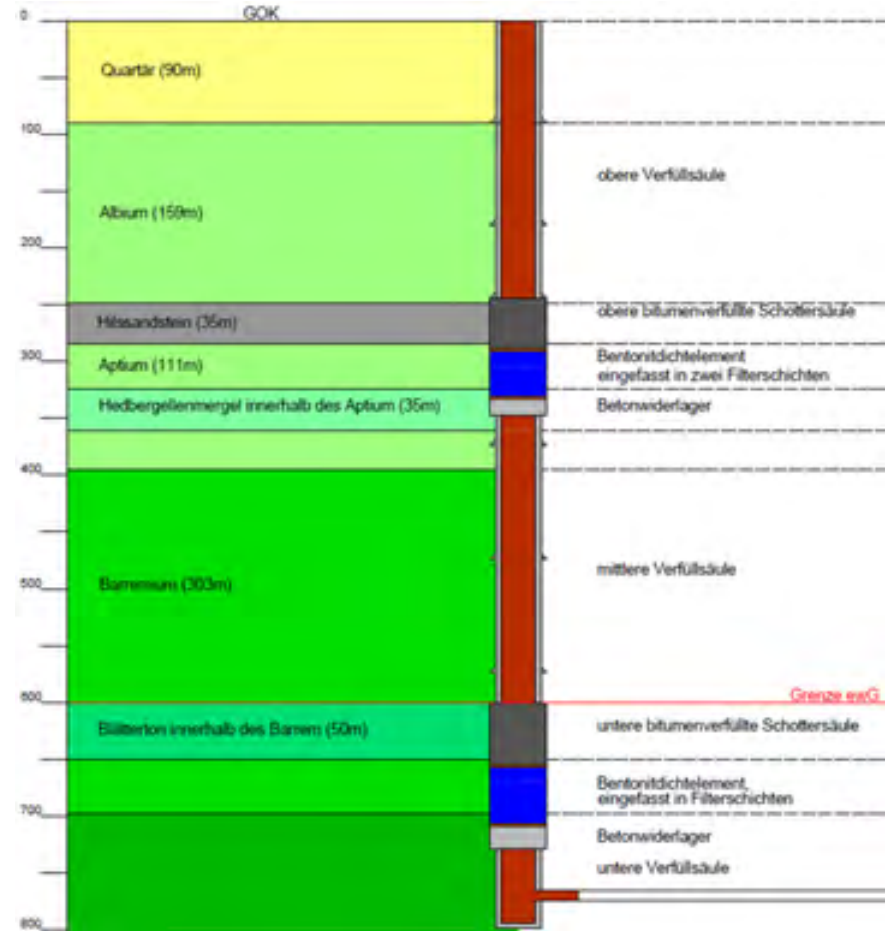


Streckenverschluss
(Abdichtungen zum Infrastrukturbereich)





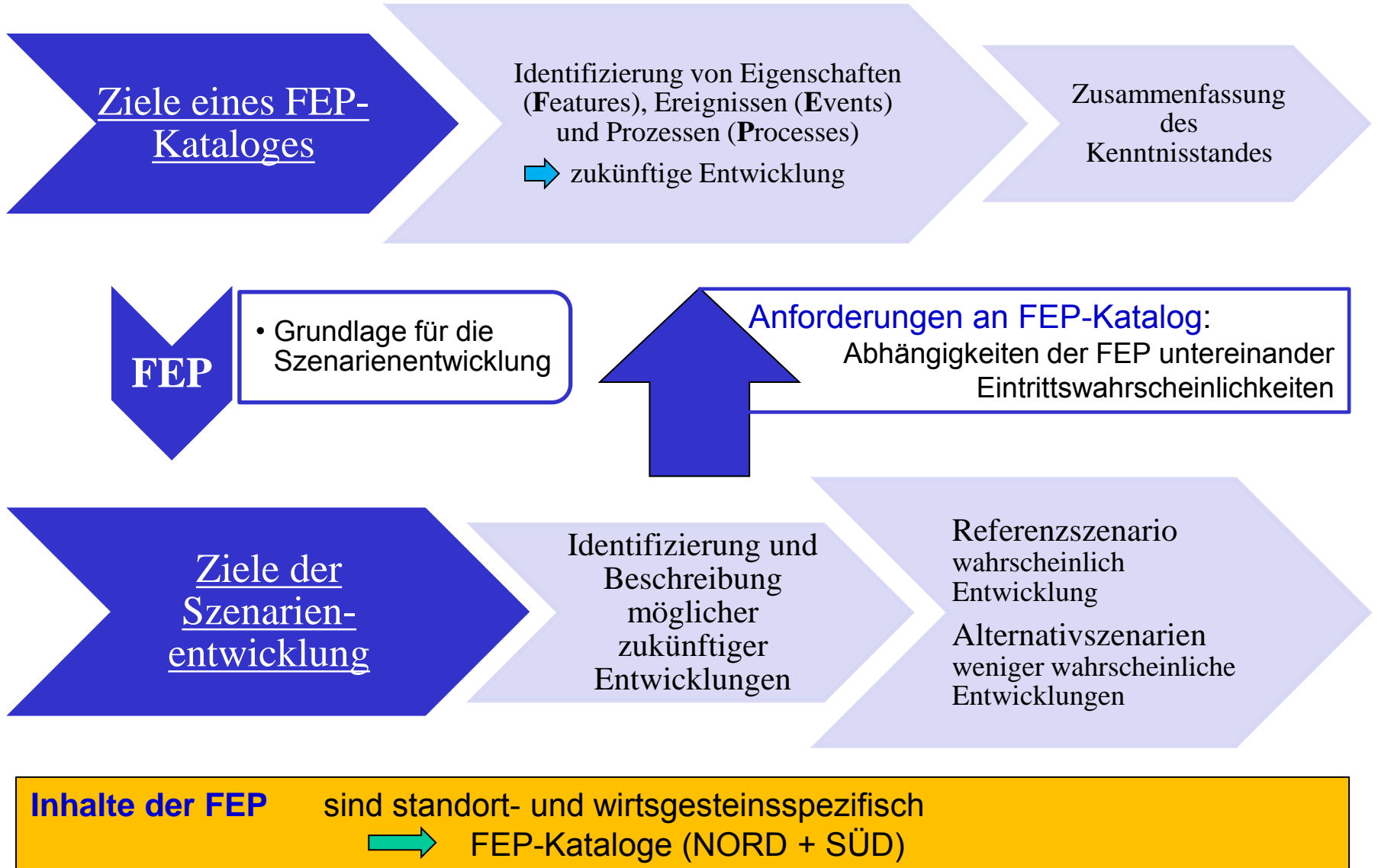
Schachtverschluss Standortmodel SÜD



Schachtverschluss Standortmodel NORD

Systemanalyse

Systemanalyse: FEP-Katalog + Szenarientwicklung



== Integrität geologische Barriere: Kriterien SA § 7.2.1 ==

*Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten (**Dilatanz-Kriterium**)*

*Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt. (**Fluiddruck-Kriterium**)*

*Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden (**Temperatur-Kriterium**)*

Es ist zu zeigen, dass ggf. im ewG vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im ewG durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.

Als ("**Advektions-Kriterium**") benannt

== Integrität geologische Barriere: Umsetzung der Kriterien ==

Das **Dilatanz-Kriterium** ist eingehalten, wenn der Spannungszustand unterhalb der Schädigungsgrenzen und somit auch der Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen liegt.

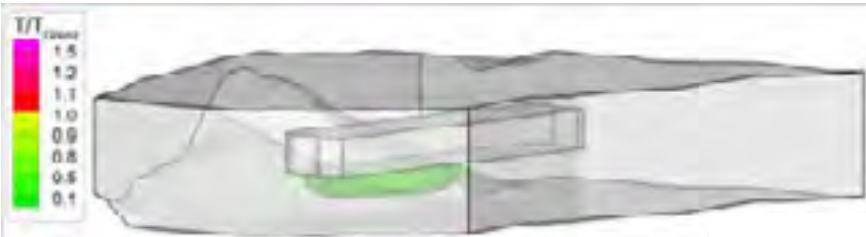
Das **Fluidruck-Kriterium** ist eingehalten, wenn die effektiven Spannungen nicht im Zugspannungsbereich liegen.

Das **Temperatur-Kriterium** ist eingehalten, wenn eine Temperatur von 150°C im Gestein nicht überschritten wird.

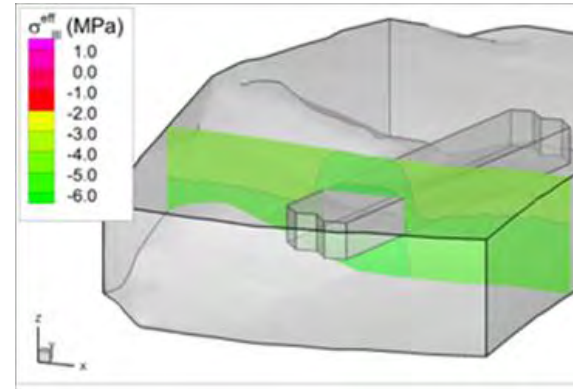
Das **Advektions-Kriterium** ist eingehalten, wenn ein gelöster konservativer Tracer innerhalb des Nachweiszeitraums nicht allein auf Grund der Bewegung des Porenwassers vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden kann.

Die Integrität ist nachgewiesen, wenn alle 4 Kriterien eingehalten sind

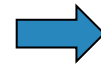
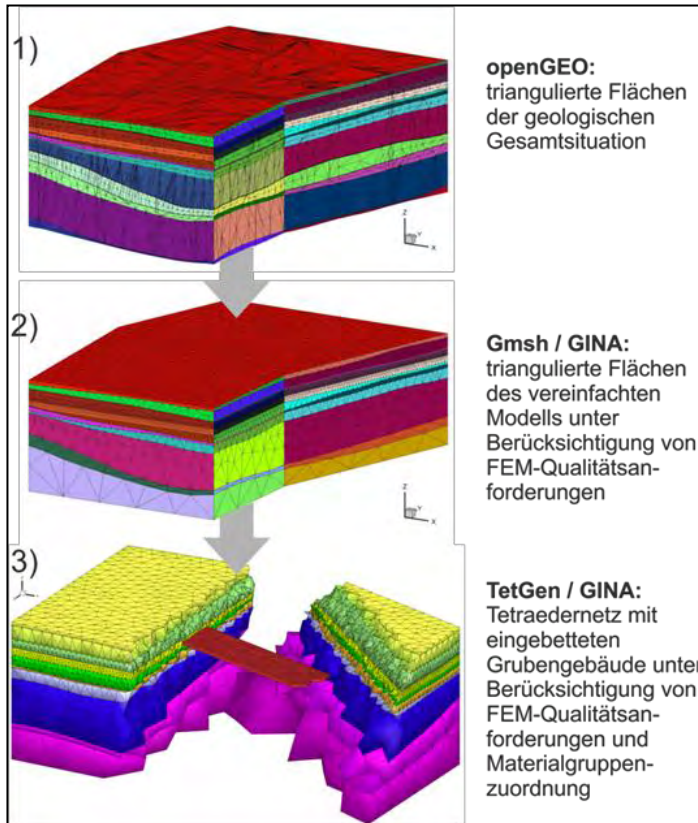
Auswertung



Das T-Kriterium ist erfüllt, wenn $T/T_{\text{Grenz}} < 1$



Fluiddruck-
Kriterium
 $\sigma_{\text{III}}^{\text{eff}} < 0$



Zusammenstellung plausibler
und konsistenter Datensätze
(Literatur, Konrad, Nagra, Andra)



Ergebnis:

Auf Basis der

- vorgeschlagenen Kriterien und
 - eines plausiblen Datensatzes
- kann der Nachweis geführt werden

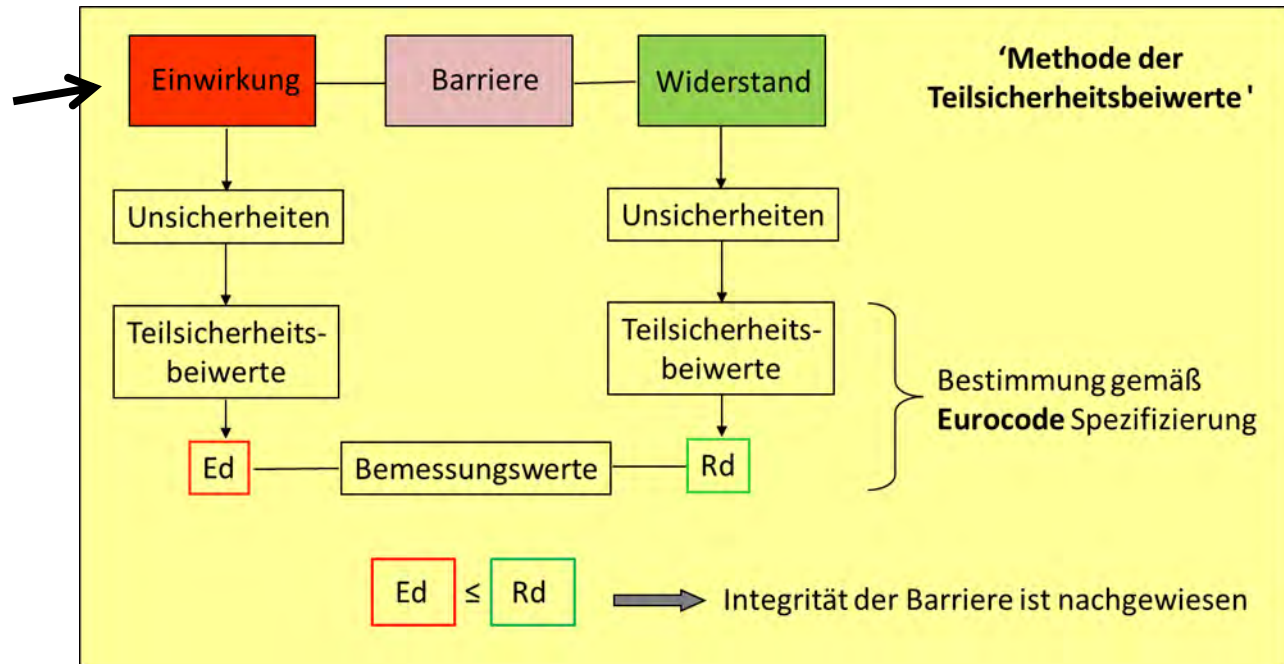
Integrität geotechnische Barrieren

FuE-Projekt ÜBERSICHT

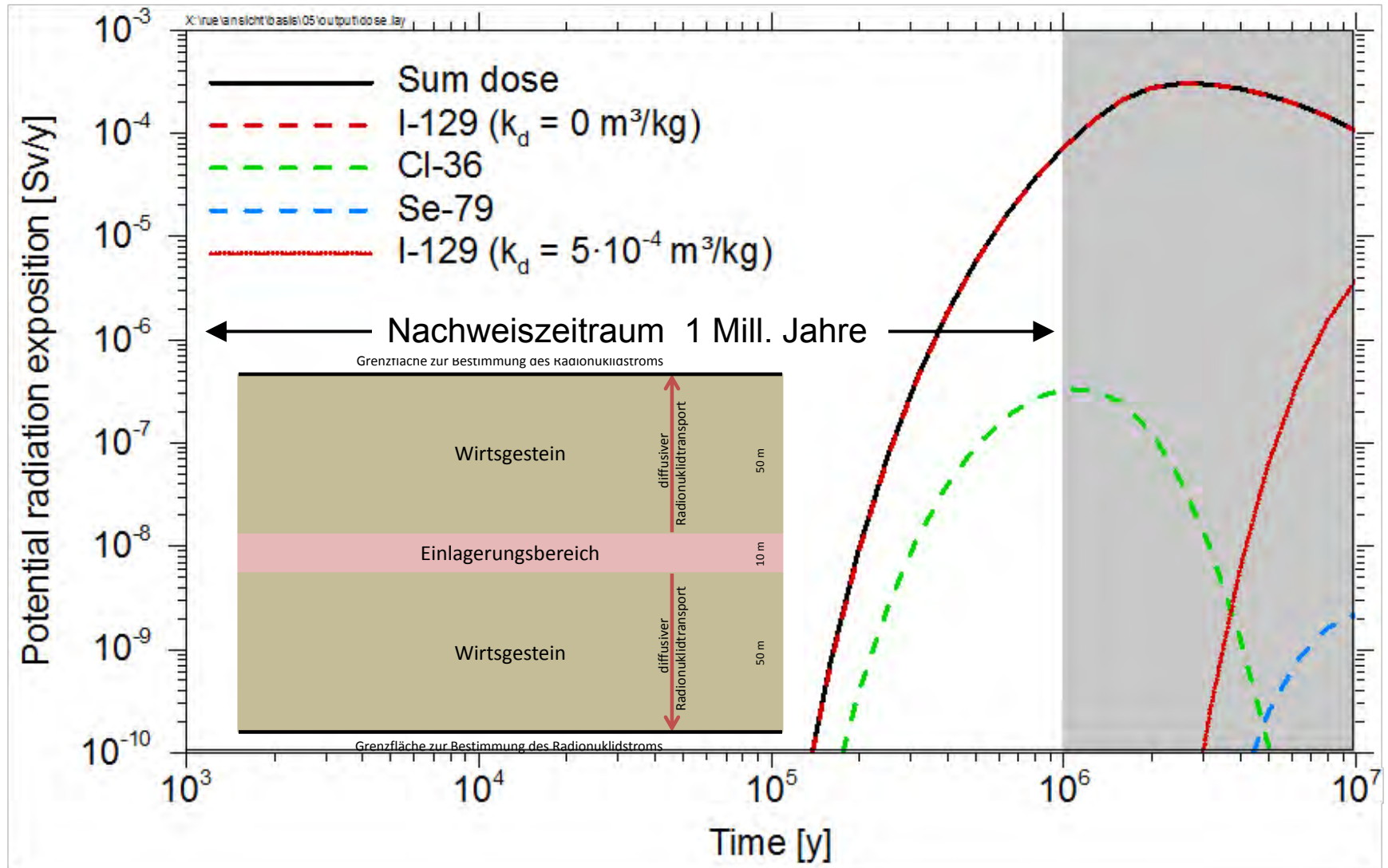
Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine (Müller-Hoeppe & Ebert 2008).

Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit einzelner Barrieren eines Endlagers in Granit und Tonstein wurde die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte eingesetzt und die prinzipielle Anwendbarkeit gezeigt.

Identifikation einwirkender FEP aus dem FEP-Katalog

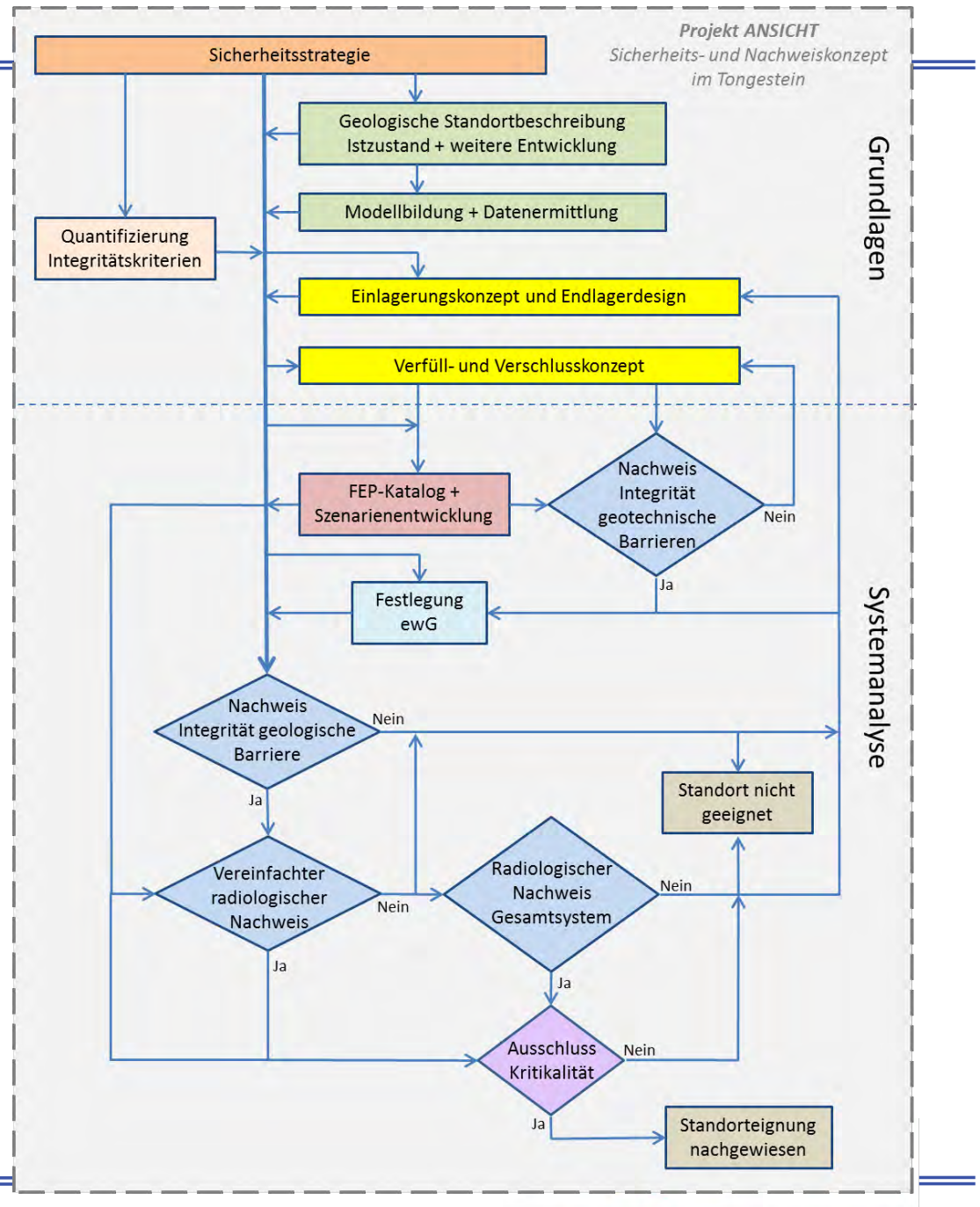


Radiologischer Nachweis



Berechnung des diffusiven Radionuklidtransports mit CLAYPOS

== Konzeptstruktur



== Zusammenfassung ==

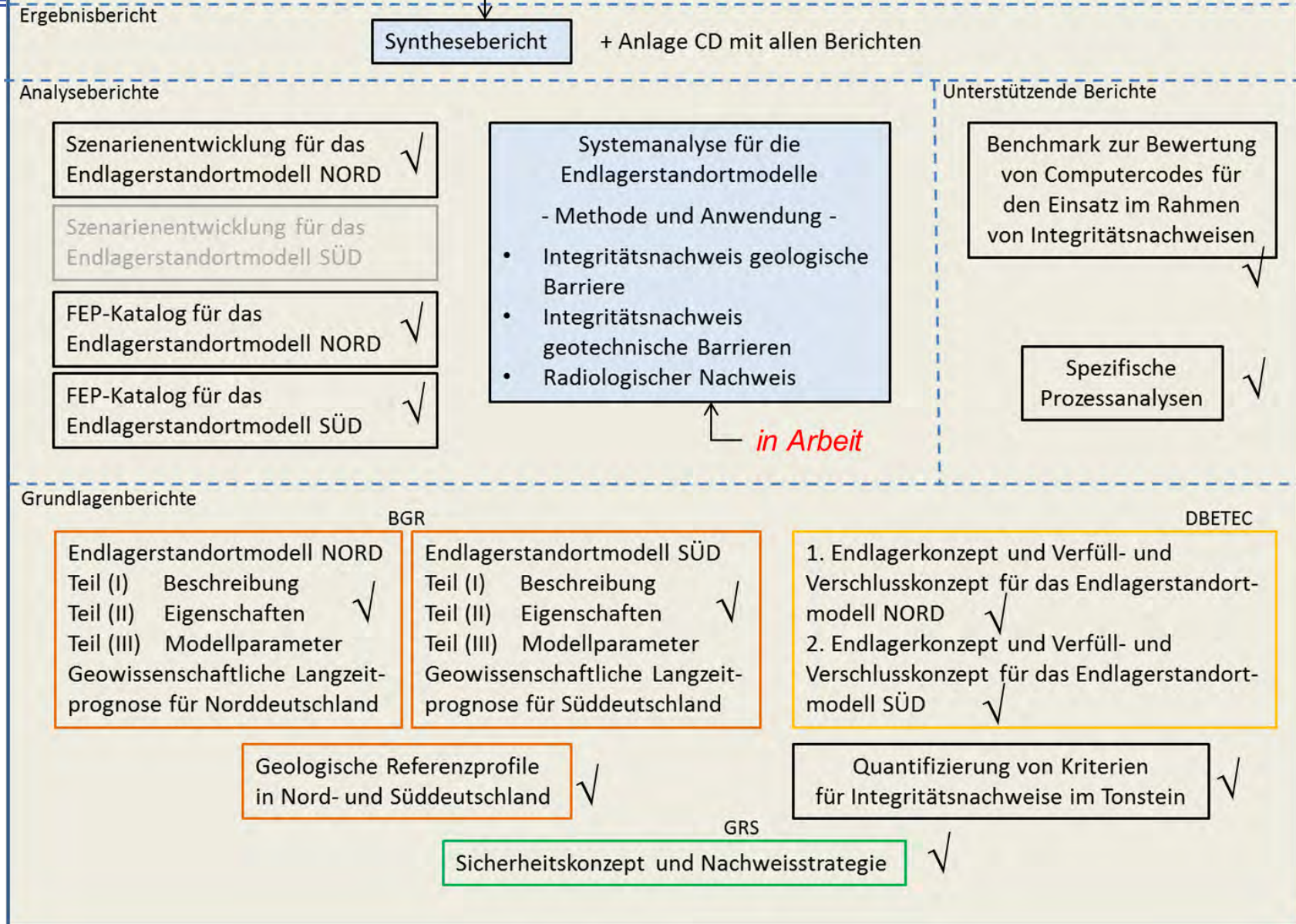
Was wurde erreicht:

- Geologische Beschreibungen und geowissenschaftliche Langzeitprognosen für potenzielle Standortregionen und
- daraus abgeleitet generische geologische Modelle (inkl. Datenbasis) anhand derer ein Sicherheitsnachweis erprobt und illustriert werden kann.
- Endlagerkonzepte inkl. Verschlusskonzepten
- Vollständige Systembeschreibungen durch entwickelte FEP-Kataloge und
- daraus abgeleitet ein Referenzszenario und Alternativszenarien (NORD)

Die ursprünglich im Rahmen der FuE-Projekte ISIBEL und VSG (Steinsalz) entwickelte Methodik für einen Sicherheitsnachweis kann mit einigen Anpassungen und Ergänzungen prinzipiell auf Tonstandorte übertragen werden.

Offene Punkte:

- Es fehlt ein Behälterkonzept mit einer Auslegung für die Bedingungen an Tonsteinstandorten
- Viele Weitere ...



Vielen Dank !

Projektförderung:



Projektbetreuung:



Durchführung:



Verbundprojekt ANSICHT

Geologische Rahmenbedingungen und ihre Auswirkungen

Mrugalla, S.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover

Im Rahmen des Verbundprojektes ANSICHT soll die Methode zur Führung eines Sicherheitsnachweises für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle im Tongestein in Deutschland entwickelt und anhand eines generischen Modells getestet werden. Das generische Modell soll dafür einer in Deutschland vorkommenden Tongesteinsformation entsprechen, realistische Gesteinseigenschaften widerspiegeln und repräsentative geologische Rahmenbedingungen aufweisen.

Auf Grundlage der AkEnd Auswahl- und Ausschlusskriterien, die in Hoth et al. (2007) angewendet wurden, um untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in Deutschland zu selektieren, war die Auswahl von nur einer Formation nicht sinnvoll. Um den unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Gesteinszusammensetzungen sowohl vom Nebengebirge als auch vom Wirtsgestein gerecht zu werden, wurden zwei generische Modelle aufgebaut.

Das Modell NORD beinhaltet als Wirtsgestein die Formationen Barremium und Hauterivium der Unterkreide und weist regionalgeologische Einflüsse des Niedersächsischen Beckens auf. Auf ca. 70 km² und einer Gesamtmächtigkeit von 4.000 m ist es aus 17 Modell-Einheiten vom Zechstein bis zum Quartär aufgebaut. Das Wirtsgestein ist 500-600 m mächtig und ermöglicht einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) ab einer Tiefe von 600 m u. GOK.

Im Gegensatz dazu beinhaltet das Modell SÜD den Opalinuston als Wirtsgestein und spiegelt die Einflüsse des größeren in Hoth et al. (2007) in Süddeutschland ausgewiesenen Bereichs wieder. Es enthält mit einer Gesamtmächtigkeit von etwa 1.000 m 16 Modell-Einheiten vom Muschelkalk bis zum Quartär und deckt eine Fläche von ca. 140 km² ab. Das Wirtsgestein ist nur ca. 100-130 m mächtig und liegt entsprechend der natürlichen Gegebenheiten der Gesamtregion leicht geneigt im Modell.

In beiden Modellen sind alle Schichten lithologisch und hydrogeologisch charakterisiert. Zusätzlich wurden weitere Parameter aus anderen Projekten oder Literaturdaten für die Schichten zusammengestellt um beispielhafte Rechnungen zum Test der Integritätsnachweise durchführen zu können.

Unterschiede ergeben sich vor allem bei der geologischen Entwicklung. So sind im Modell NORD z. B. kaltzeitliche Prozesse mit mehreren Eisüberdeckungen und Rinnenbildungen wahrscheinlich. Im Modell SÜD hingegen sind sie unwahrscheinlich.

Sowohl der geologische Aufbau der Modelle als auch die ablaufenden Prozesse zeigen Auswirkungen auf die Endlagerplanung. Im Norden ist auf einer Fläche von ca. 7,8 km² eine Bohrlochlagerung mit 27 m tiefen Vertikalbohrungen geplant. Die Einlagerungssohle liegt bei etwa 770 m u. GOK. Die geneigten und geringmächtigeren Opalinuston Schichten im Modell SÜD erlauben dies nicht. Dort wurde daher eine Streckenlagerung in 670 m u. GOK geplant. Der Flächenbedarf steigt in dieser Variante auf ungefähr 10 km² an. Außerdem wurde im Bereich des Schachtes eine zusätzliche Abdichtung geplant um Wasserzutritte aus einem überregional verbreiteten Karstgrundwasserleiter zu verhindern.

Der Aufbau von zwei Modellen ermöglicht im Verbundprojekt ANSICHT einen umfassenden Test der Nachweismethode für verschiedene Endlagerauslegungen und unter Berücksichtigung verschiedener geologischer Entwicklungen.

Literatur:

Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

„ANSICHT“

Methodik und Anwendungsbezug eines
Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein

Geologische Rahmenbedingungen und ihre Auswirkungen

Sabine Mrugalla



12. Projektstatusgespräch - 9./10. November 2016 - Karlsruhe

Vielen Dank an das gesamte Projektteam!

DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

M. Jobmann, V. Burlaka, P. Herold, A. Lommerzheim, M. Polster

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), Braunschweig

A. Rübel, A. Meleshyn

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Berlin

S. Mrugalla, A. Bebiolka, J. Gerardi, S. Jahn, S. Keller, T. Kühnlenz, J. Maßmann, T. Nowak,
L. Ptock, K. Reinhold, J. Sönke, L. Stark, G. Ziefle

Projektförderung:



Projektbetreuung:



Durchführung:



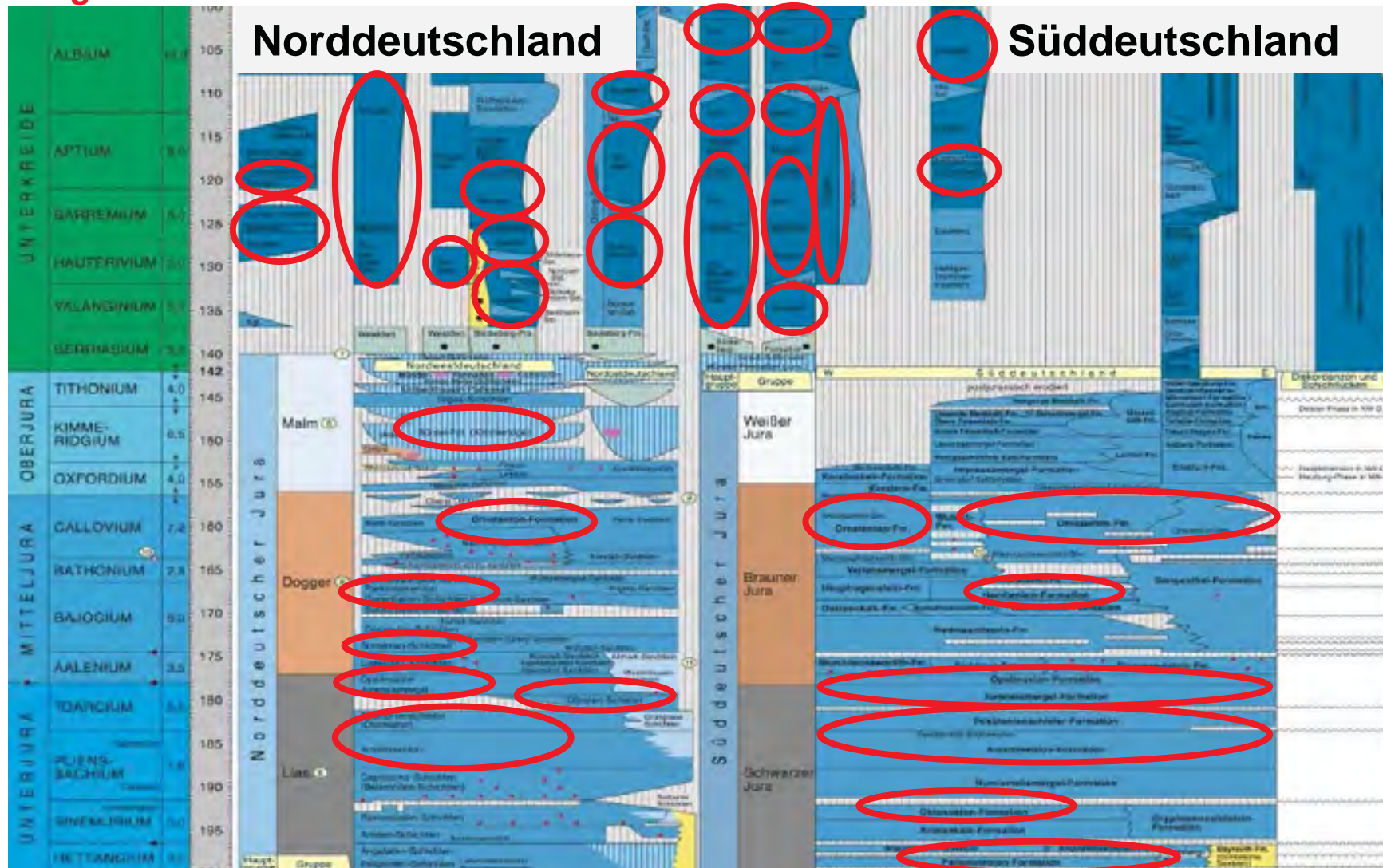
Ziel des Projekts:

Test der bisher für **Salzgesteine** entwickelten **Methode** zur Führung eines Sicherheitsnachweises für ein **HAW Endlager** im **Tongestein**.

Allgemeine Merkmale des benötigten generischen Modells:

- entspricht einer in Deutschland vorkommenden Tongesteinsformation
- spiegelt realistische Gesteinseigenschaften wider
- weist repräsentative geologische Rahmenbedingungen auf

Tongesteinsformationen



DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION [HRSG.] (2002):
Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002.– Potsdam.

**Wir brauchen
Kriterien für die Auswahl
der Tongesteinsformationen !**

Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands



Untersuchung und Bewertung von
Tongesteinsformationen

HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.– Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin / Hannover.

Auswahlkriterien:

- Tiefenlage 300 bis 1.000 m
- Mächtigkeit min. 100 m
- Fläche über 10 km²
- Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10⁻¹⁰ m/s

Ausschlusskriterien:

- Erdbeben (maximal Zone 1)
- aktive Störungszonen
- Hebungen bis max. 1 mm/a
- aktiver Vulkanismus (Quartär)




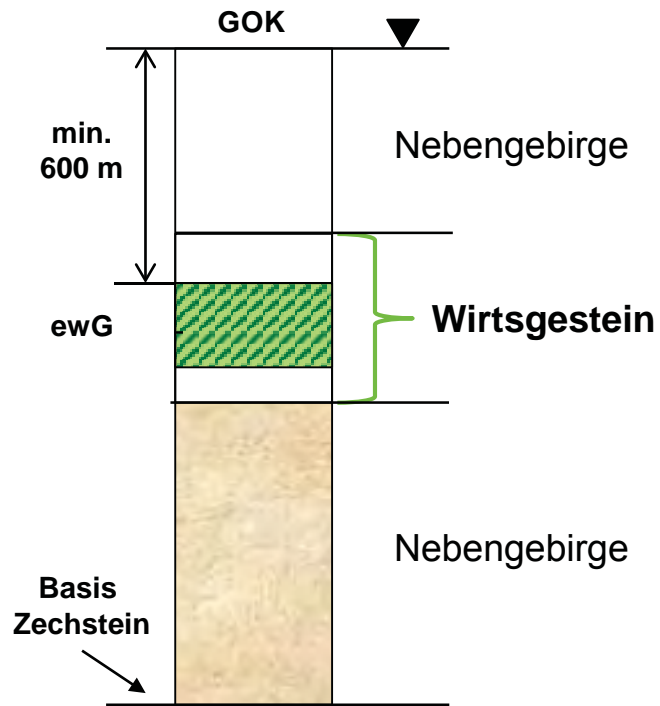
- Die **Auswahl von nur einer Tongesteinsformation**, die Nord- und Süddeutschland repräsentiert **ist nicht möglich**.
- **Geologische Rahmenbedingungen** weisen Unterschiede auf, denen mit einem Modell nicht Rechnung getragen werden kann.

Fazit:

Trennung in zwei Modelle

Nord und Süd.

 untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in Deutschland (HOTI et al. 2007)



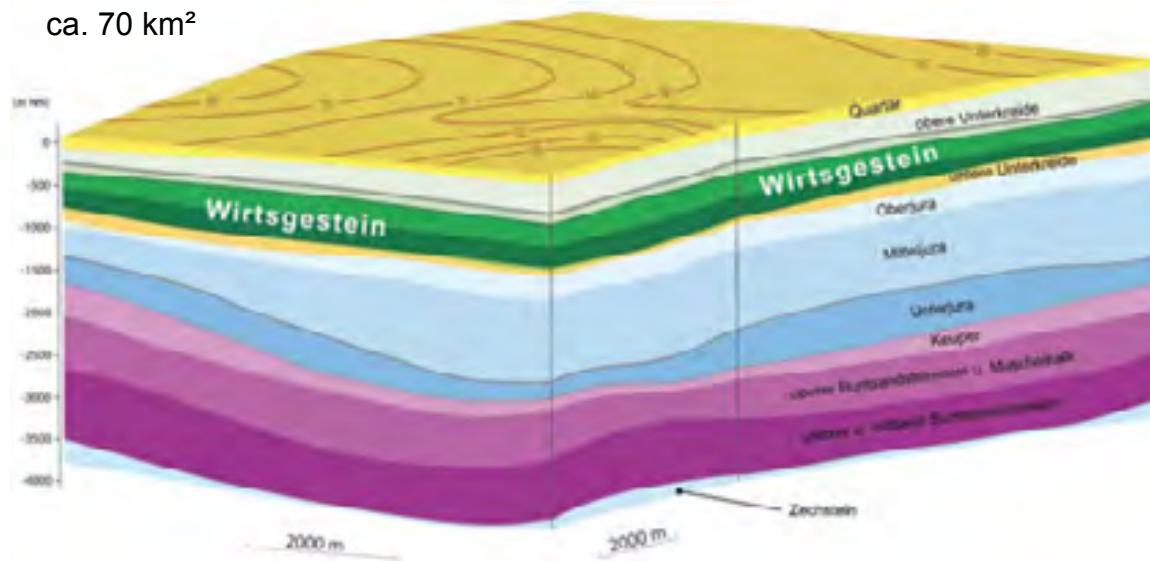
Rahmenbedingungen NORD:

Regionale Einflüsse: **vergleichbar mit dem östl. Niedersächsischen Becken**

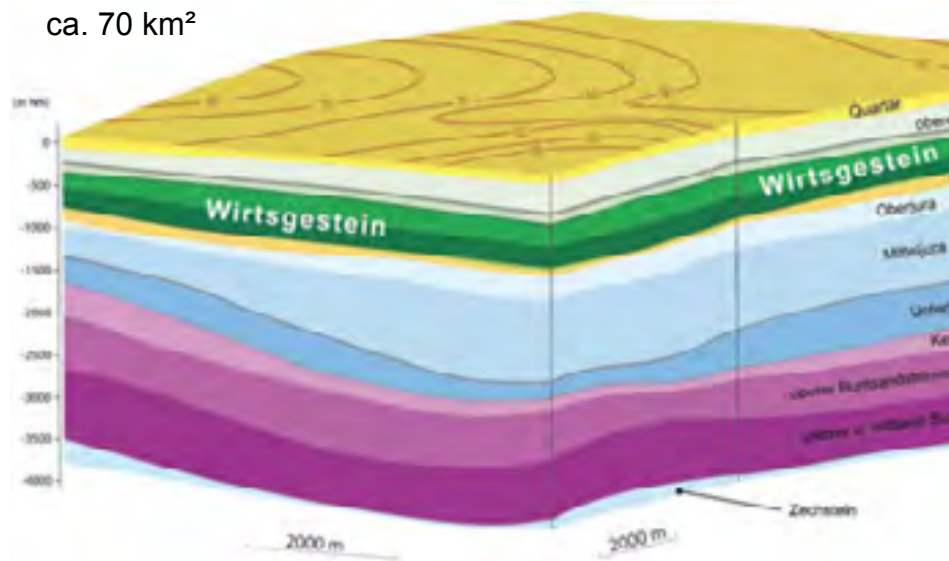
Tongesteinsformation: **Unterkreide** Wirtsgestein: **Barremium & Hauterivium**

Tiefenlage: **ewG min. 600 m u. GOK** Basis: **Zechstein**

ca. 70 km²

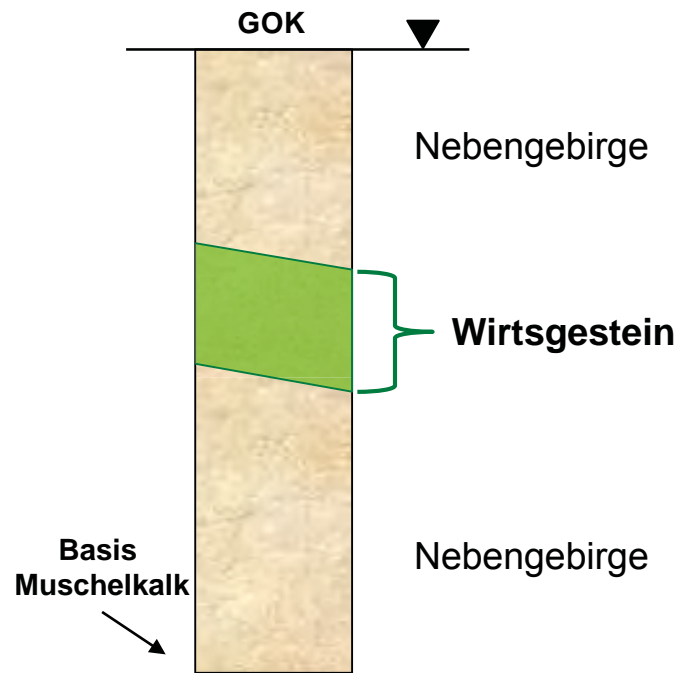


- 17 Modell-Einheiten vom Zechstein bis zum Quartär
- ca. 4000 m Gesamtmächtigkeit
- Wirtsgestein ist ca. 500 – 600 m mächtig
- Gesteinsparameter aus Projekten wie z. B. Mt. Terri übertragen



Modell-Einheit	Lithologische Ausprägung	Durchlässigkeit
Quartär	Sande, Kiese sowie Geschiebelehm und -mergel, Turm, Schluffe	
Albium	Ton- und Mergelstein, zunächst 25-35 m Flammmergel	
Hilssandstein	Sandstein	
Aptium	Tonstein, Tonmergel- und Mergelstein Ober-Aptium: smektreiche tonförmige Lagen Unter-Aptium: lagenweise Bitberone	
Barremium	Ton- und Tonmergelstein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Hauterivium	Ton- und Tonmergelstein	
Valanginium	Ton- und Tonmergelstein	
Wealden	Wechsellagerung von Ton- und Sandstein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Oberjura	Kalkstein, lagenweise Anhydrit und Evaporite	
Mitteljura	Ton- und Mergelstein	
Aalen Sandstein	Sandstein	
Unterjura	Ton- und Mergelstein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Rhät Sandstein	Sandstein	
Keuper	Ton- und Schluffstein, untergeordnet sandige und evaporitische-tonige-schluffartige Lagen	
Muschelkalk + Oberer Buntsandstein	Kalk- und Mergelstein, Salz- und Tongestein	
Mittlerer + Unterer Buntsandstein	Sand- und Tongestein	
Zechstein	Salzgestein	

- 17 Modell-Einheiten vom Zechstein bis zum Quartär
- ca. 4000 m Gesamtmächtigkeit
- Wirtsgestein ist ca. 500 – 600 m mächtig
- Gesteinsparameter aus Projekten wie z. B. Mt. Terri übertragen



Rahmenbedingungen SÜD:

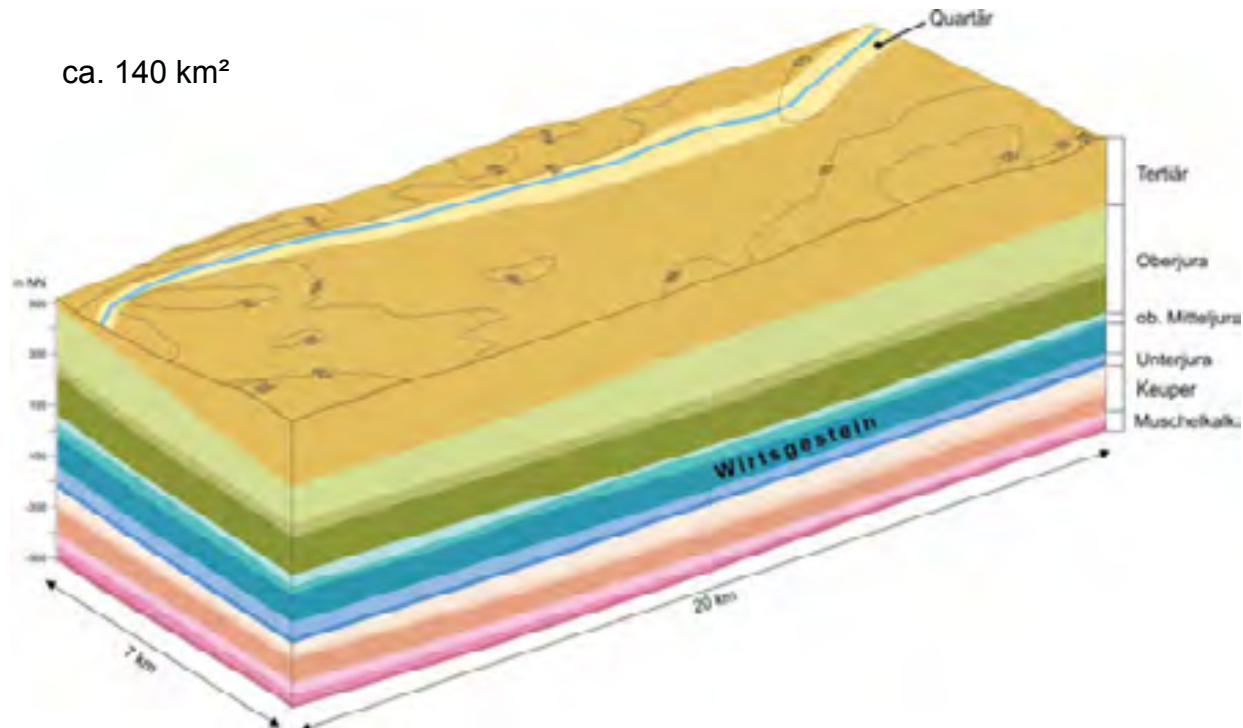
Regionale Einflüsse: **keine vergleichbare Eingrenzung nötig**

Tongesteinsformation: **Opalinuston (Jura)**

Wirtsgestein: **Opalinuston**

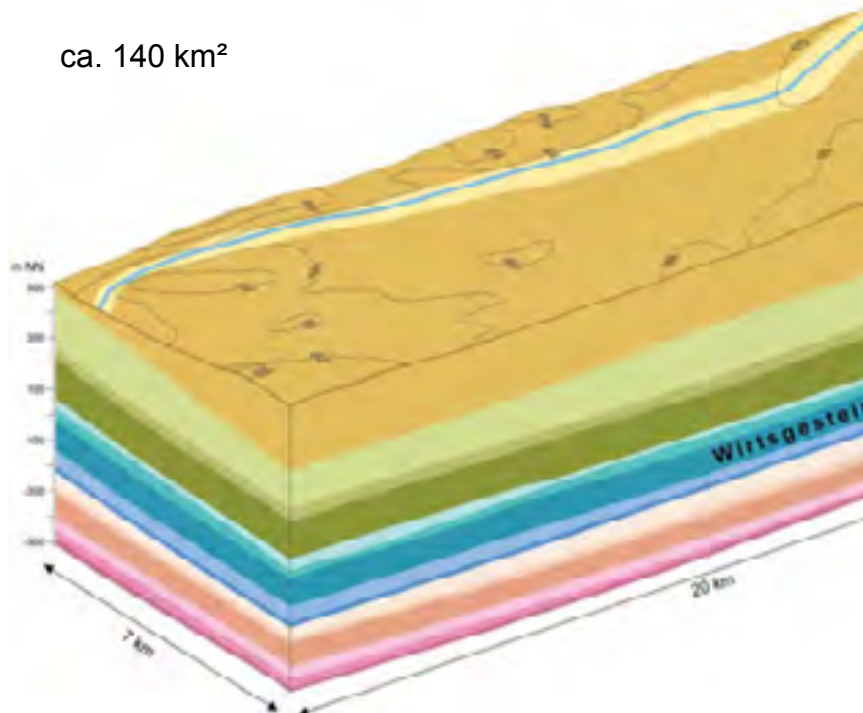
Tiefenlage Oberfläche: **500 bis 700 m u. GOK**

Basis: **Muschelkalk**



- 16 Modell-Einheiten vom Muschelkalk bis zum Quartär
- ca. 1000 m Gesamtmächtigkeit
- Wirtsgestein ca. 100 – 130 m mächtig
- Gesteinsparameter aus Projekten wie z. B. Mt. Terri übertragen

ca. 140 km²



- 16 Modell-Einheiten vom Muschelkalk bis zum Quartär
- ca. 1000 m Gesamtmächtigkeit
- Wirtsgestein ca. 100 – 130 m mächtig
- Gesteinsparameter aus Projekten wie z. B. Mt. Terri übertragen

Modell-Einheit	Lithologische Ausprägung	Hohlraum-Typ	Durchlässigkeit
q	Geste, Kiese	Poren	
tms	Mergelstein, wechselnde Anteile von Kalk und Ton, Kalkstein (Süßwasserkalke)	Poren	
jo3	Kalkstein, Mergelstein (geschichtete Fazies)	Kluft	
jo2	Kalkstein, Dolomitstein (Massenkalk Fazies)	Karst, Kluft, Poren	
jo1	Kalkstein, Kalkmergelstein, Mergelstein (geschichtete Fazies)	Kluft	
jm3	Tonmergelstein, einzelne Kalkstein-Lagen		
jm2	eisenreicher Sandstein (tonig, kalkig), Tongestein, Tonmergelstein	Kluft, Poren	
jm1	Tongestein		
ju2	Tonmergelstein, Mergelstein		
ju1	tonige Sandsteine, sandige Tonmergelsteine, einzelne Kalkstein-Lagen		
k3	Tongestein, Mergelstein, Karbonatkonkretionen		
k2	Sandstein, untergeordnet Tongestein	Poren, Kluft	
k1	Tongestein, feinsandige Schluff-Tongesteine, untergeordnet Dolomitstein und sandige Lagen		
m3	Dolomitstein	Kluft, Poren	
m2	Anhydrit, einzelne Tongesteinstagen		
m1	toniger, fein- bis grobkörniger arkosider Sandstein	Kluft, Poren	

Prozess	Modell-NORD	Modell-SÜD
Kaltzeit – Gletscherüberdeckung	wahrscheinlich, ca. 500 m Eismächtigkeit	unwahrscheinlich
Kaltzeit - Rinnenbildung	wahrscheinlich	unwahrscheinlich
Regression / Transgression	wahrscheinlich	unwahrscheinlich
Erosion	flächenhaft, gering ausgeprägt	fluviatil, gering ausgeprägt
Halokinese	unwahrscheinlich <i>(in Ndt. jedoch möglich)</i>	unwahrscheinlich

Auswirkungen auf die Systementwicklung sind unterschiedlich!

Bei Auslegung der technischen Barrieren zu beachten.

NORD	SÜD
<p>Wirtsgestein:</p> <ul style="list-style-type: none">➤ ca. 500 – 600 m mächtig,➤ +/- söhlige Lagerung	<p>Wirtsgestein:</p> <ul style="list-style-type: none">➤ ca. 100 – 130 m mächtig,➤ Schichten mit 1° leicht geneigt
<ul style="list-style-type: none">• Bohrlochlagerung in kurzen Vertikalbohrungen (27 m)• Einlagerungssohle ca. 770 m u. GOK• Fläche ungefähr 7,8 km²	<ul style="list-style-type: none">• Streckenlagerung• Einlagerungssohle ca. 670 m u. GOK• Fläche ungefähr 10 km²• Zusätzliche Abdichtung des Schachts im Bereich des Karstaquifers (Injektion)

Gemeinsame ANSICHT Berichte:

...auf der Homepage der DBE

www.dbetec.de



ANSICHT Berichte der BGR:

...auf der Homepage der BGR

www.bgr.bund.de



Dort finden Sie:

- Bericht zur Auswahl der Referenzregionen
- Geowissenschaftliche Langzeitprognosen NORD und SÜD
- Standortmodellbeschreibungen NORD und bald auch SÜD

Oder Sie fragen mich jetzt! 😊



FuE-Vorhaben KOSINA

Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschiechten in Deutschland und Überprüfung des entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes

Wilhelm Bollingerfehr, DBE TECHNOLOGY GmbH

Gemäß Formulierung im Standortauswahlgesetz (StandAG) von 2013 sollen alle Wirtsgesteine, die in Deutschland für die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Frage kommen, untersucht werden. Dazu gehören auch flach lagernde Salzschiechten. Für steil lagernde Salzstrukturen (Salzstöcke) wurden bereits methodische Ansätze für Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie technische Endlagerkonzepte entwickelt; für flach lagernde Salzschiechten gibt es vergleichbare Untersuchungen bisher nicht. Das Verbund-Vorhaben KOSINA hat daher zum Ziel, erstmalig ein technisches Konzept für ein solches Endlager auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen (Typ: flache Lagerung und Typ: Salzkissen) zu entwickeln. Dies soll auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes einschließen. Damit soll eine technisch-wissenschaftliche Grundlage geschaffen werden für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen. Mit dem Vorhaben, das gemeinsam von BGR, DBE TECHNOLOGY, GRS und IfG bearbeitet wird, sollen fünf Teilziele erreicht werden:

- Herleitung von generischen geologischen Modellen inklusive Modellparameter
- Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes
- Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein Endlager
- Nachweis der Integrität der geologischen Barriere (Integritätsnachweis)
- Schaffung von wissenschaftlich-technischen Grundlagen

Die Bearbeitung wurde dementsprechend in folgende Arbeitspakete strukturiert: Grundlagen ermitteln und zusammenstellen; Erstellung generischer geologischer Modelle und Ableitung von Modellparametern; Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes; Analyse der Integrität der geologischen Barriere; Entwicklung von Endlagerkonzepten für vier Einlagerungsvarianten (je zwei für den Typ flache Lagerung und den Typ Salzkissen); Analyse der radiologischen Konsequenzen; Bewertung der Betriebssicherheit; Dokumentation der Ergebnisse in einem Synthesebericht.

In einem 107 Seiten umfassenden Zwischenbericht, der Ende 2015 veröffentlicht wurde, sind die Ergebnisse der Grundlagenermittlung zusammengestellt und beschrieben worden, wie z.B. Art und Menge der endzulagernden Abfälle, Anforderungen für die Endlagerplanung, eine Beschreibung salinärer Schichtenfolgen in Deutschland sowie die Grundzüge für ein Sicherheits- und Nachweiskonzept. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurde mit Hilfe von Referenzprofilen mit einer für Deutschland typischen salinaren Schichtenfolge jeweils ein generisches geologisches 3D-Modell für den Typ flache Lagerung und den Typ Salzkissen erarbeitet und mit den Arbeiten zur Integritätsanalyse der geologischen Barriere begonnen. Die Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für Endlager in flacher Lagerung wurden zu einem angepassten Sicherheitskonzept, das den sicheren Einschluss der Abfälle im Endlager in einem ewG ermöglicht, weiterentwickelt. Davon ausgehend wurden für den Typ flache Lagerung für zwei Einlagerungsvarianten (Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern und horizontale Bohrlochlagerung von Brennstabkorkillen) Grubengebäude geplant und erstmalig dazu eine Einlagerungstechnik für die horizontale Bohrlochlagerung konzipiert. Zur Auslegung der Grubengebäude wurden detaillierte thermische Berechnungen im Nahfeld durchgeführt, um die 200°C-Auslegungstemperatur (wie in der VSG) einzuhalten. Darüber hinaus wurde für nachfolgende Modellberechnungen zur radiologischen Konsequenzenanalyse für relevante Punkte im Grubengebäude die zeitliche Entwicklung der Temperaturen berechnet. Für den Typ Salzkissen wurden die entsprechenden Modellbildungen, Berechnungen und Planungen begonnen, sodass von einem planmäßigen Abschluss des Vorhabens Anfang 2018 auszugehen ist.

FuE-Vorhaben **KOSINA**

**Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für
wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden
Salzschichten in Deutschland und Überprüfung des
entwickelten **Sicherheits- und Nachweiskonzeptes****

Ein Verbundprojekt von:  **GRS BGR DBE TEC IfG**
DBE TECHNOLOGY GmbH

(Wilhelm Bollingerfehr, DBE TECHNOLOGY GmbH)

12. Projektstatusgespräch BMWi/PTKA

Karlsruhe, 9. und 10. November 2016

Inhalt

- Motivation
- Zielsetzung
- Bearbeitungskonzept
- Aufgaben und bisherige Ergebnisse
- Ausblick/Meilensteine

Motivation

- **Gemäß StandAG 2013: Untersuchung aller in Deutschland in Frage kommenden Wirtsgesteine für ein HAW-Endlager**
- **Auch die in Deutschland existierenden flach lagernden Salzvorkommen**
- **Sicherheits- und Nachweiskonzept (SiNaKo) für ein HAW-Endlager in Steinsalz (Typ: steile Lagerung) verfügbar (s. ISIBEL)**
- **Deshalb generische Endlagerkonzepte und SiNaKo für flach lagernde Salzstrukturen entwickeln (Typ: flache Lagerung und Typ: Salzkissen)**

— Zielsetzung —

Erstes Teilziel:

- *Herleitung von generischen geologischen Modellen inklusive Modellparameter*

Zweites Teilziel:

- *Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes*

Drittes Teilziel:

- *Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein Endlager*

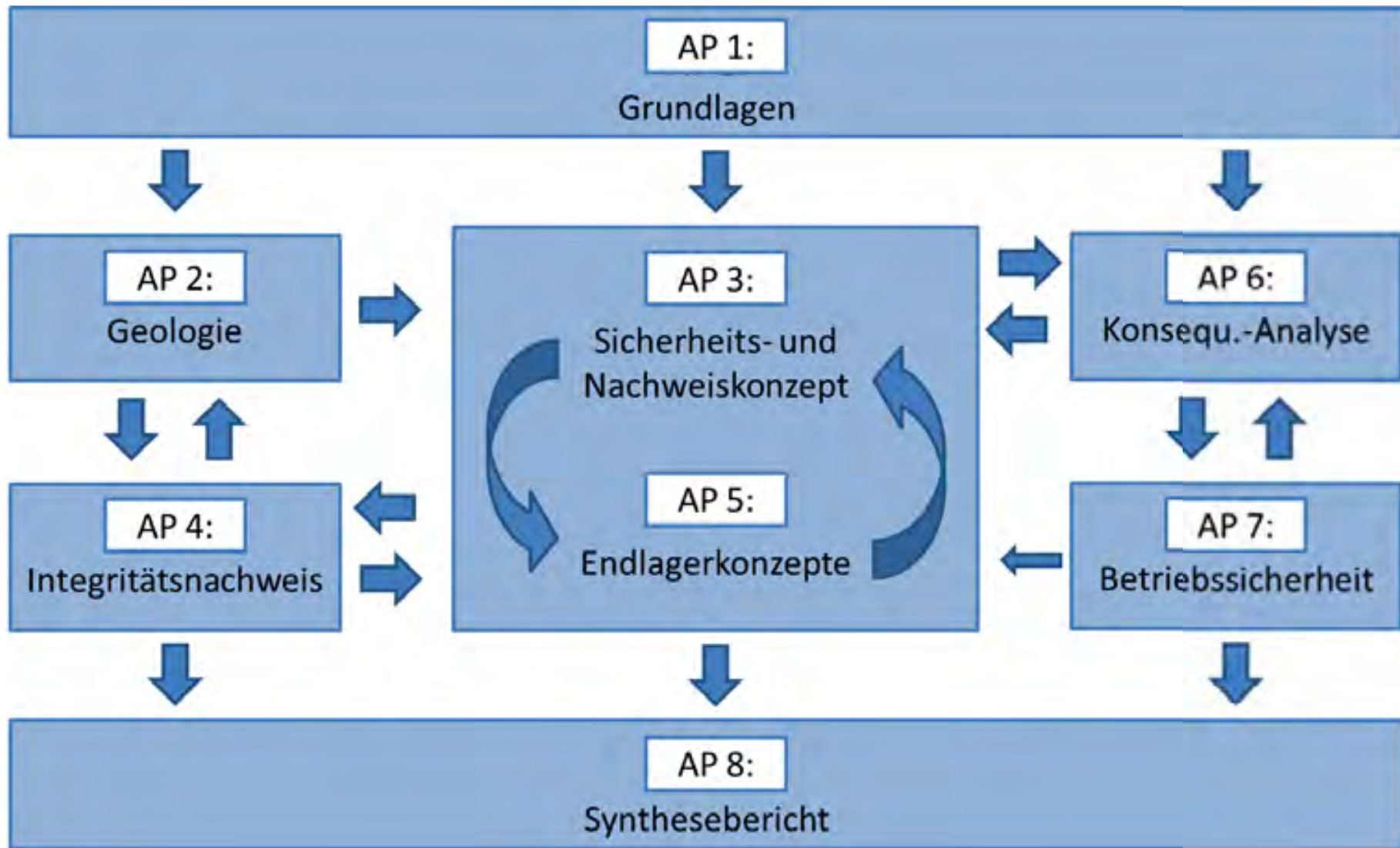
Viertes Teilziel:

- *Nachweis der Integrität der geologischen Barriere (Integritätsnachweis) und radiologische Konsequenzenanalyse*

Fünftes Teilziel:

- *Schaffung von wissenschaftlich-technischen Grundlagen*

Bearbeitungskonzept



== Zwischenbericht: Ergebnisse AP 1 ==



The image shows the table of contents page. At the top right, there is a logo for 'DBE TEC | DBE TECHNOLOGY GmbH'. The title is 'Inhaltsverzeichnis'. The table lists the following sections and page numbers:

1	Einleitung	1
2	Zusatz	3
3	Grundlagenermittlung	3
3.1	Art und Menge der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente und deren Endlagerbehälter	5
3.1.1	Mengenprofil der ausgedienten Brennelemente und radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	6
3.1.2	Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente	10
3.1.3	Anzahl der Abfallgebirge mit Gesamtmessvolumina	27
3.2	Beschreibung salinar geprägter Schichtfolgen in Deutschland	32
3.3	Vorliegende Sicherheits- und Nachweiskonzepte	39
3.4	Anforderungen zur Endlagerkonzeptentwicklung	43
3.4.1	Sicherheitsanforderungen des Umweltministeriums	43
3.4.2	Anforderungen nach Bergrecht	44
3.4.3	Anforderungen nach Atomrecht	47
3.4.4	Anforderungen nach dem Sicherheitskonzept	48
3.4.5	Konflikte der Anforderungen	50
4	Erstellung der generischen geologischen Modelle, Abbildung im Modellkoordinaten	51
4.1	Strukturgeologische Merkmale der flach lagernden Steinsalzfolgen und Salzkinen	51
4.2	Vorgehensweise	52
4.2.1	Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen 3-D-Modelle	52
4.2.2	Schichtfolge für die Referenzprofile sowie Definition des Wettstein und Einlagerungsbereichs	64
4.3	Erstellung des geologischen Referenzschnittes für den Typ „flache Lagerung“	58
4.4	Ausblick	60
5	Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes	63
5.1	Vorgehensweise	63
5.2	Randbedingungen und Zielsetzungen	63
5.3	Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes	65

== AP2: Generische Geologische Modelle ==

Aufgabenstellung:

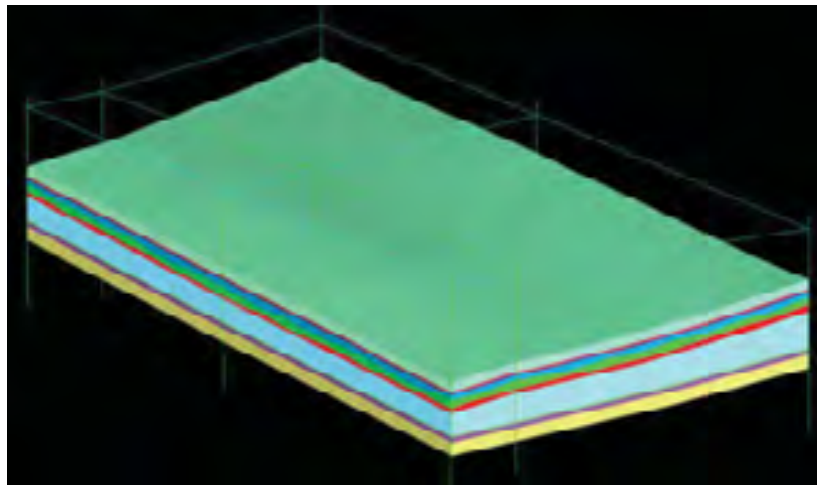
- 1. Herleitung von generischen geologischen Modellen für zwei Typen der „flachen Lagerung“ (Typ flache Lagerung und Typ Salzkissen) auf der Basis der BGR-Studie
„Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland“**
- 2. Ableitung von Mindestanforderungen zur geologischen Barrierenmächtigkeit auf Basis vorliegender Erfahrungen sowie vorläufiger Modellrechnungen (AP4)**
- 3. Zusammenstellung und Begründung der geologischen Randbedingungen und Modellparameter für die numerischen Modellrechnungen**

AP2: Generische Geologische Modelle

Modell A: Typ Flache Lagerung



Modell B: Typ Salzkissen



Erstellung von 3D-Modellkörpern auf Grundlage typischer in Deutschland vorkommender flacher Salzstrukturen;

Beispiel für Modell A: Typ flache Lagerung (nach BGR)

**Weitere Details:
s. Vortrag von Popp/Hammer**

== AP3: Sicherheits- und Nachweiskonzepte ==

Aufgabenstellung:

1. **Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Salzformationen**
2. **Entwicklung eines auf dem Sicherheitskonzept basierenden Nachweiskonzeptes**
3. **Entwicklung eines Konzeptes zum Umgang mit Ungewissheiten**

AP3: Sicherheits- und Nachweiskonzepte

Leitgedanken zum gewählten Sicherheitskonzept für ein Endlagersystem in flachen Salzstrukturen:

- *Möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum (einschlusswirksamer Gebirgsbereich-ewG)*
- *Sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksamer Einschluss*
- *Durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellter Einschluss*
- *Einschlusswirksamkeit durch Verhinderung oder zumindest starke Begrenzung von Lösungszutritten*

Leitgedanken basieren auf den Sicherheitsanforderungen des BMUB und gelten gleichermaßen für alle Endlagersysteme im Wirtsgestein Salz; daher identisch mit den für ein Sicherheitskonzept bei Endlagern in Salzstöcken (steile Lagerung) formulierten Leitgedanken (ISIBEL und VSG).

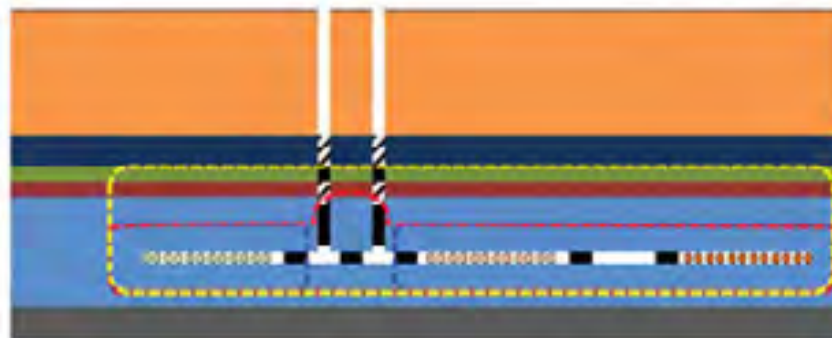
AP3: Sicherheits- und Nachweiskonzepte

GRS

Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des ewG

Vorgaben der Sicherheitsanforderungen BMUB:

- Der ewG ist räumlich und zeitlich zu definieren
- Keine konkreten Vorgaben bzw. Einschränkungen für die Lage/Größe des ewG



→ Weitere Bearbeitung: endgültige Festlegung des ewG im AP6

Zwischenergebnis:

Grundzüge eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für flach lagernde Salzstrukturen wurden entwickelt und beschrieben.

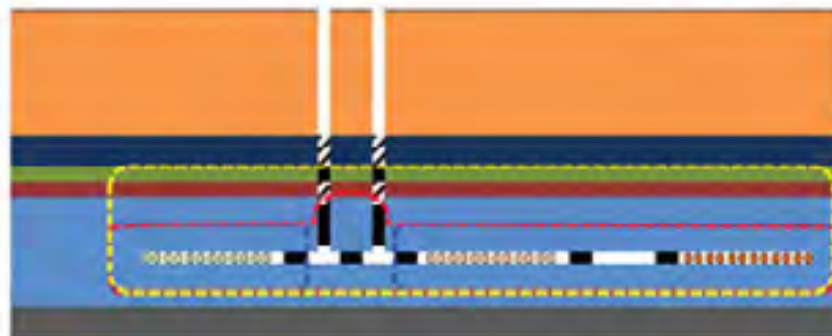
AP3: Sicherheits- und Nachweiskonzepte

GRS

Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des ewG

Vorgaben der Sicherheitsanforderungen BMUB:

- Der ewG ist räumlich und zeitlich zu definieren
- Keine konkreten Vorgaben bzw. Einschränkungen für die Lage/Größe des ewG



→ Weitere Bearbeitung: endgültige Festlegung des ewG im AP6

Zwischenergebnis AP6:

wirksamer Schachtverschluss im Z2 ausreichend, daher **ewG**
tendenziell = **rote Linie**, aber Integritätsnachweis AP 4 abzuwarten

== AP 4: Integritätsanalyse der geologischen Barriere ==

Aufgabenstellung:

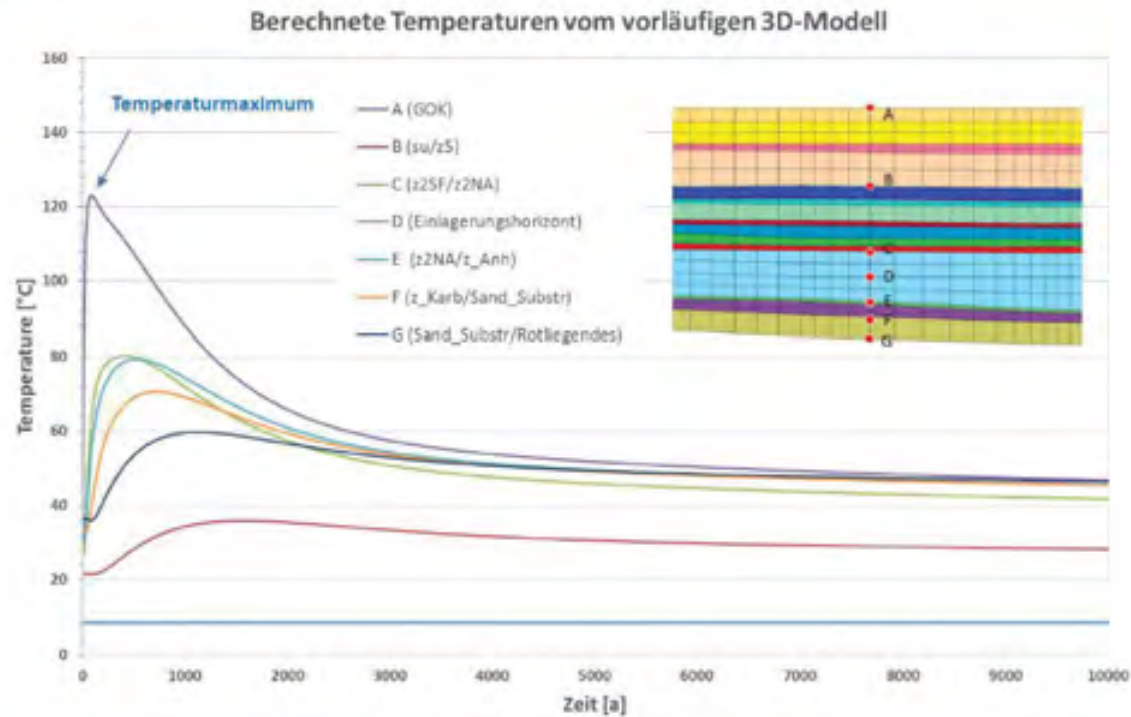
1. Durchführung von Modellrechnungen zur Ableitung der erforderlichen Barrierenmächtigkeiten als Basis zur Herleitung generischer Standortmodelle
2. Kalibrierung der Berechnungsmodelle zur Integritätsanalyse an Versagensfällen geologischer Barrieren durch fluiddruckgetriebene Perkolationsentlang diskreter Fließwege im Salzgestein
3. Durchführung von THM-gekoppelten Modellrechnungen zur Überprüfung der Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren für zwei generische Standortmodell-Typen

== AP 4: Integritätsanalyse der geologischen Barriere ==

Beispiel: Überprüfung der Berechnungstools

Anlass der Temperaturstudie

- Die Ergebnisse vorher:



KOSINA – 10. Projektgespräch, 01.09.2016

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe
GEOZENTRUM MANNHEIM

2

Weitere Details:
s. Vortrag von
Popp/Hammer

== AP 5: Endlagerkonzepte ==

Endlagerkonzepte für vier Einlagerungsvarianten:

Typ: flache Lagerung

- Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern
- Bohrlochlagerung (horizontal) von Kokillen (BSK-H)

Typ: Salzkissen

- Bohrlochlagerung (vertikal) von Kokillen (BSK-V)
- Direkte Endlagerung von CASTOR[®]-Behältern

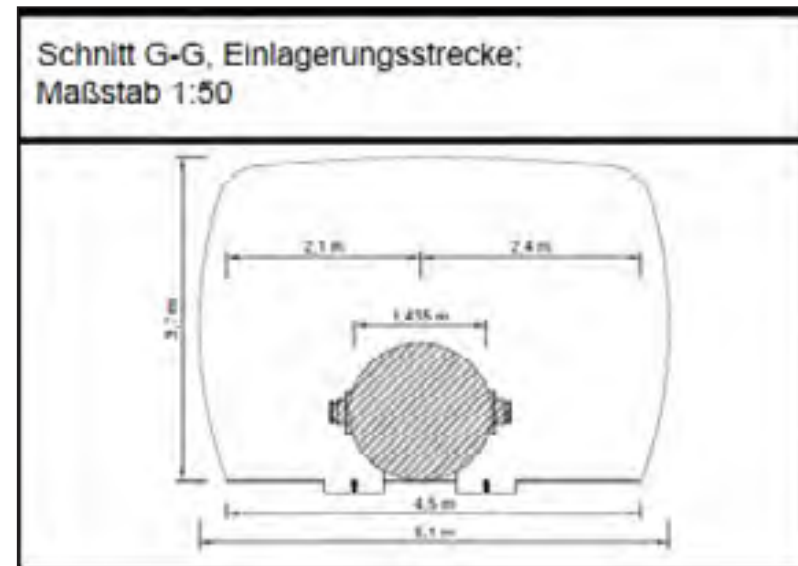
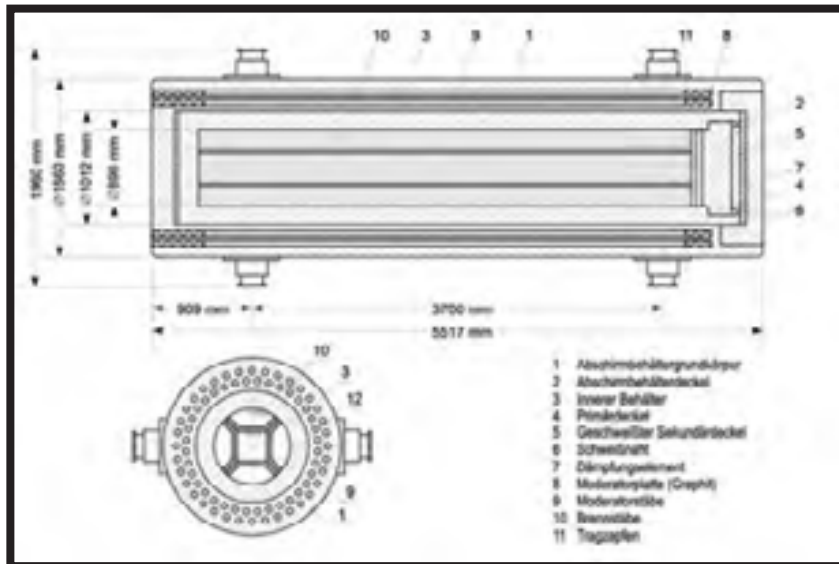
Aufgaben jeweils:

- Grubengebäudekonzeption und -auslegung (Planungen und Temperaturberechnungen)
- Transport- und Einlagerungstechnik und –systeme
- Verfüll- und Verschlusskonzepte

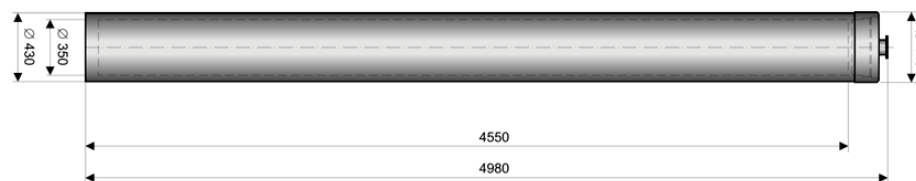
AP 5: Einlagerungsvarianten

Typ: Flache Lagerung

➤ Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern



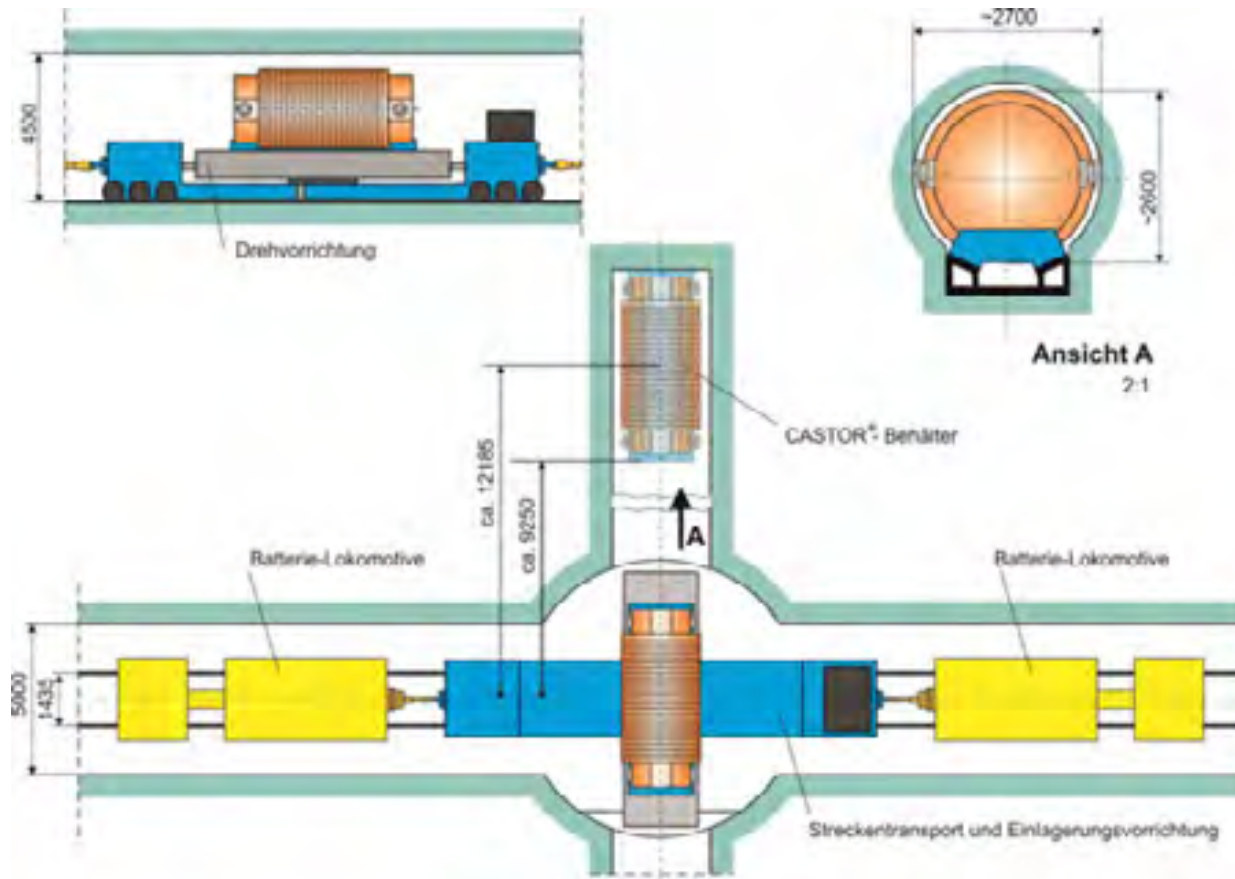
➤ horizontale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK-H)



AP 5: Einlagerungsvarianten

Typ: Salzkissen

- Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Kurzbohrlöchern



**Konzept:
DIREKT**

AP 5: Entwicklung Endlagerkonzepte

Wesentliche Grundlagen und Anforderungen:

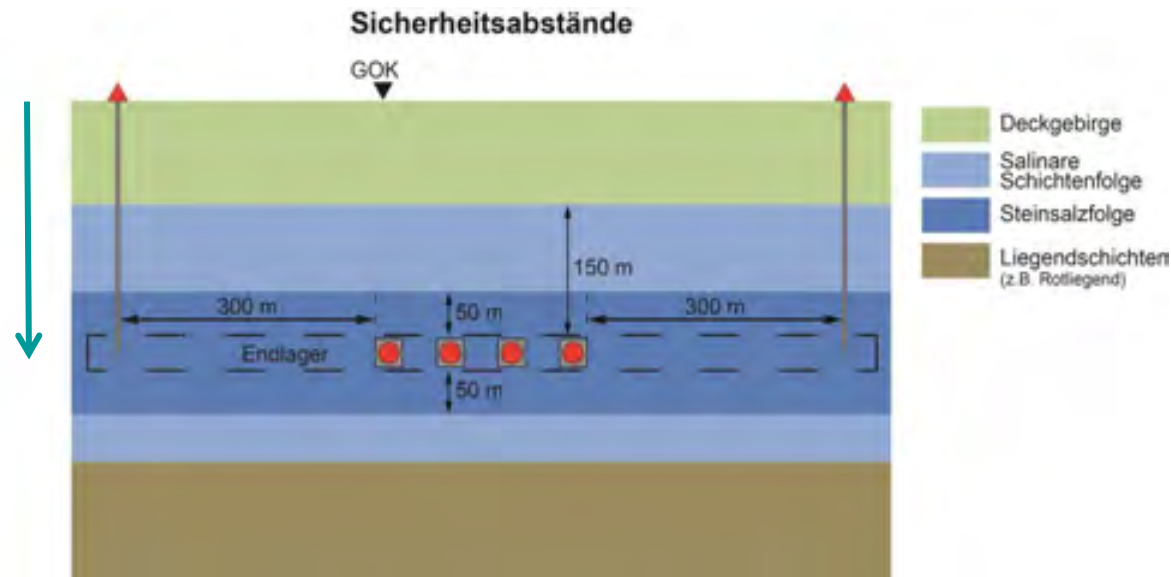
- Abfallmengengerüst (s. VSG)
- Generische geologische Modelle
- Vorläufiges Sicherheits- und Nachweiskonzept
- Anforderungen aus gesetzl. Regelwerk + Verordnungen (z.B. AtG, StrISchV, Bundesberggesetz, Sicherheitsanforderungen BMU-2010)

Festlegung:

vorläufige, den Endlagerplanungen zugrunde liegende Sicherheitsabstände

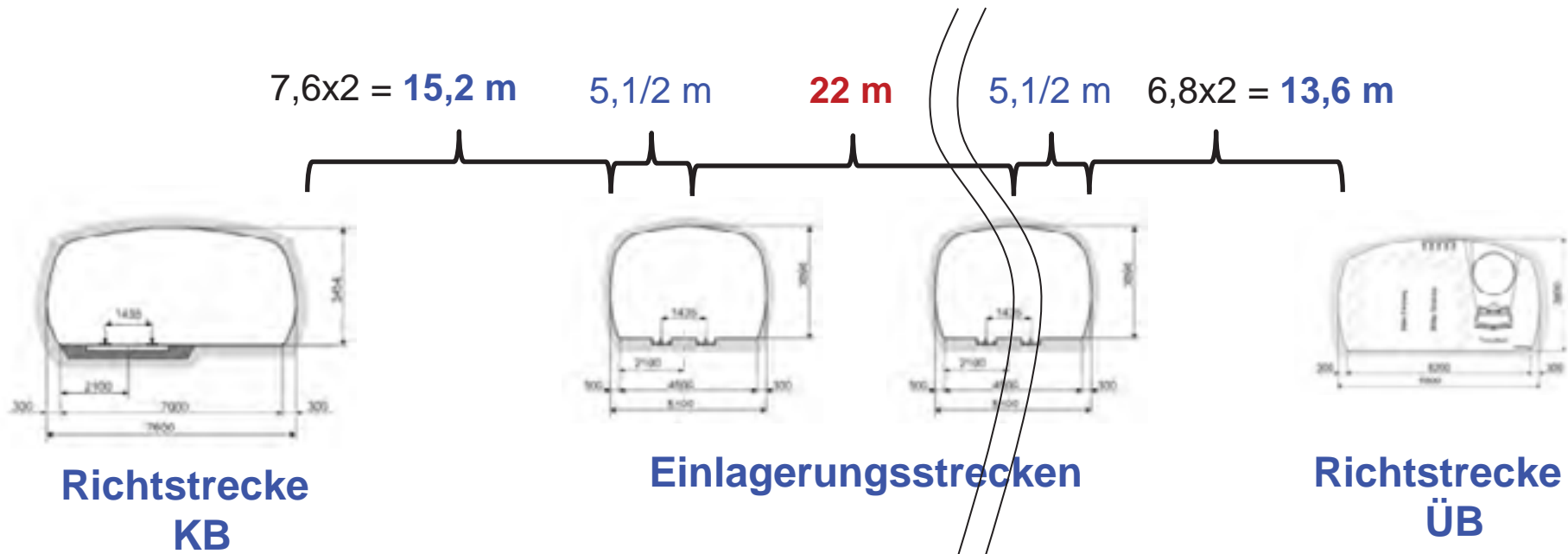
Teufenlage des
Grubengebäudes:
500-1000m u GOK

Schematische
Darstellung



AP 5: Einlagerungsfeld POLLUX[®]-9 CSD-V

Ermittlung der Dimensionen eines Einlagerungsfeldes



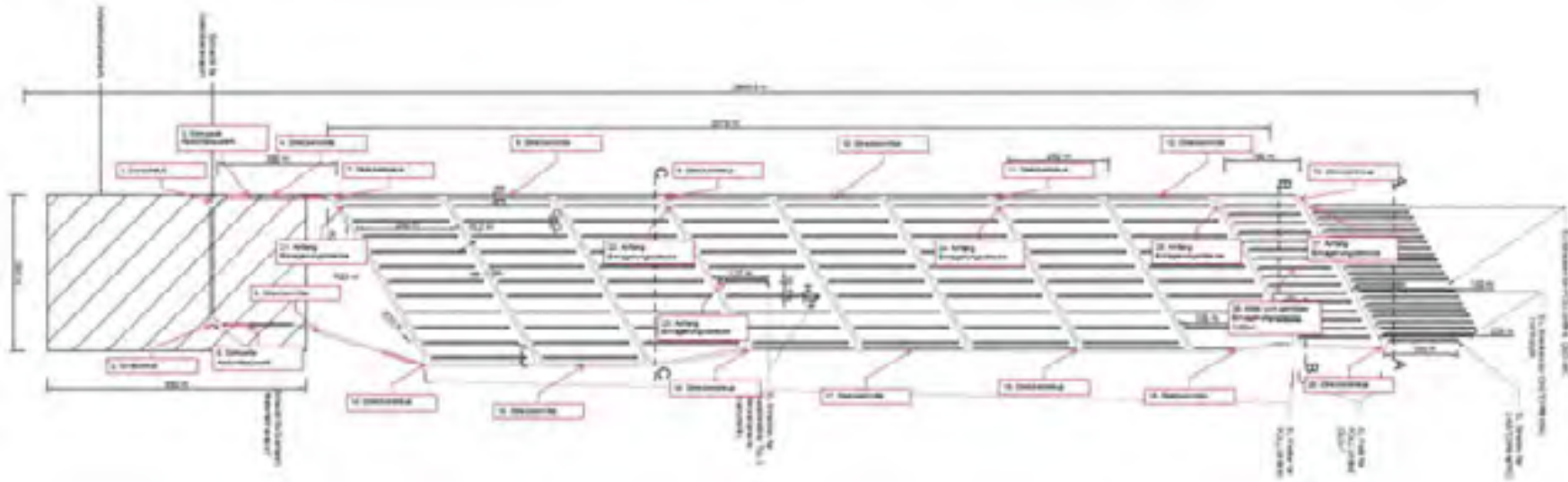
Feldesbreite =

$$(7,6 \text{ m} + 15,2 \text{ m} + (n-1) \times 22 \text{ m} + 5,1 \text{ m} + 13,6 \text{ m} + 6,8 \text{ m})$$

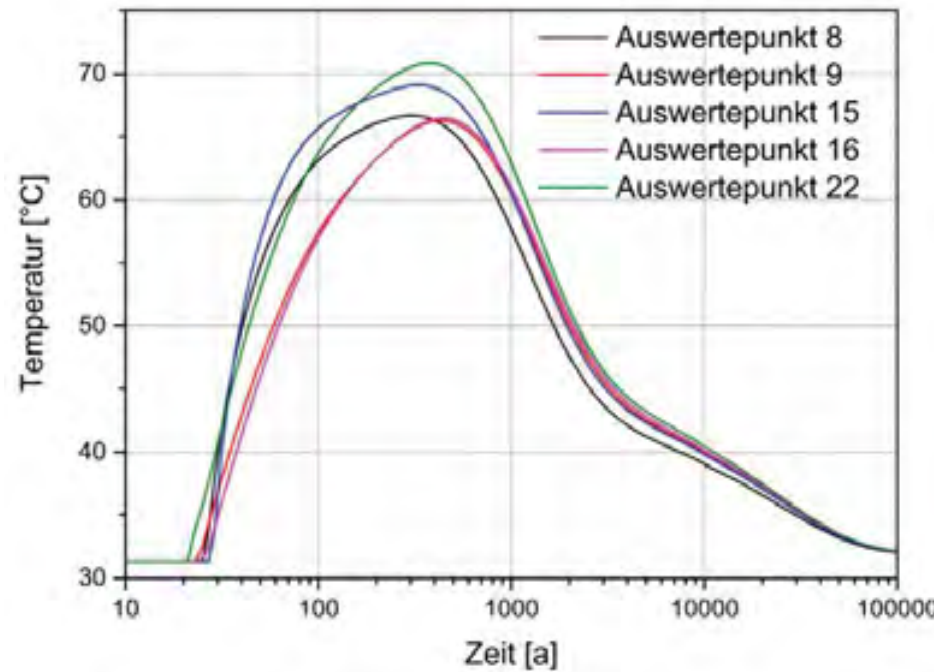
Mit $n = 16$, also 16 Einlagerungsstrecken im Feld, ergibt die Formel: **378,3 m**

AP 5: Simulation der Wärmeausbreitung

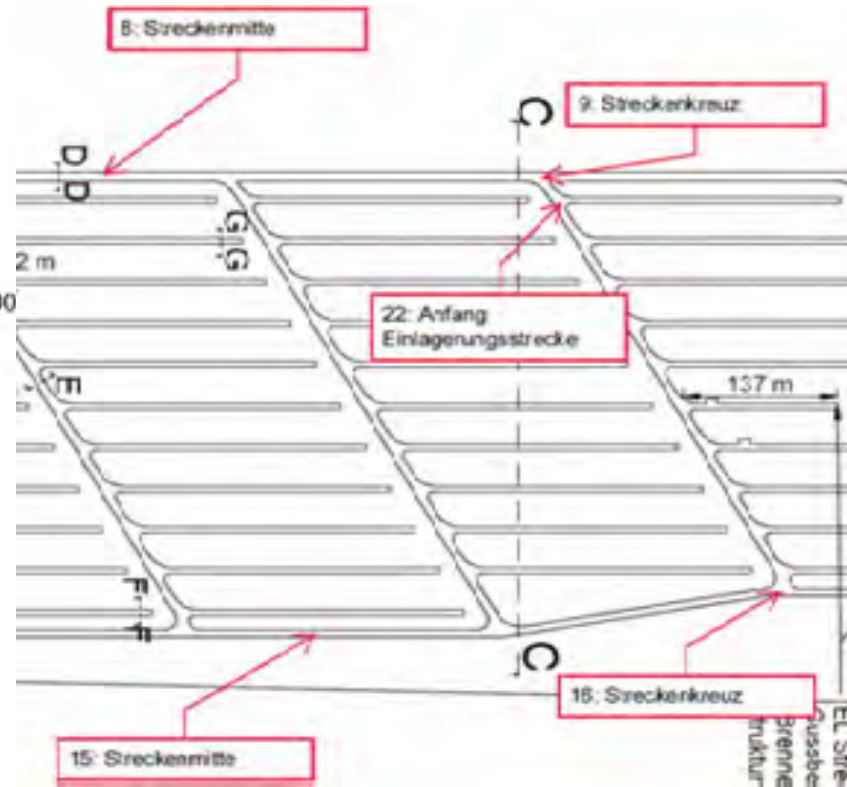
- **Diskrete Modellierung** jedes einzelnen Behälters als **Linienquelle**
- Berücksichtigung der realen **Zwischenlagerzeiten** der Behälter
- Berücksichtigung der **Einlagerungsfrequenz** und **Einlagerungszeiten**
- Berechnung mit: $\lambda = 5,9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $C_p = 860 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$
- **Auswertung** der Temperaturen über **100.000 Jahre**



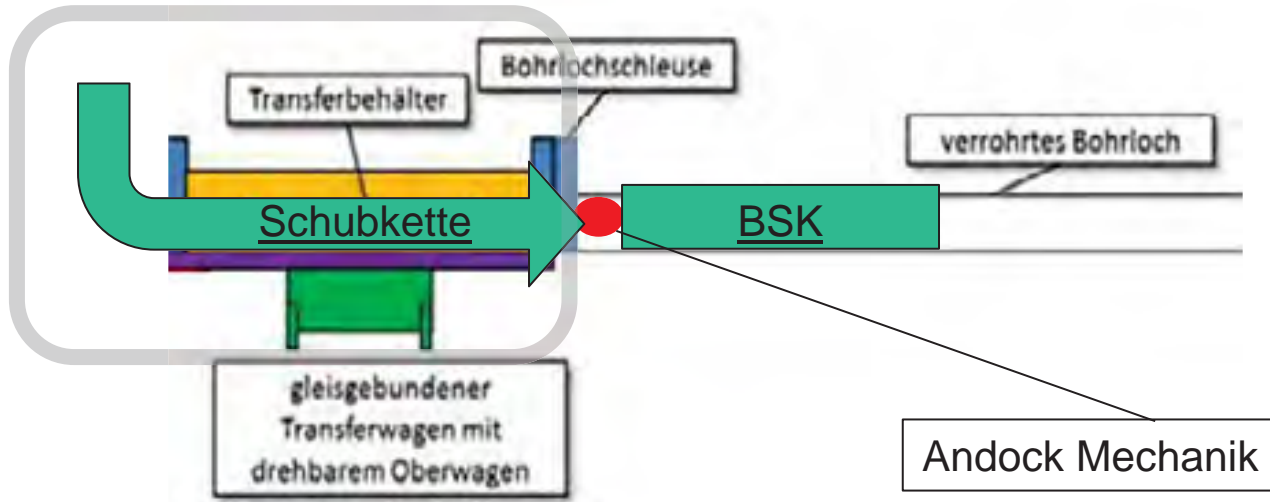
AP 5: Zeitlicher Temperaturverlauf im Endlager



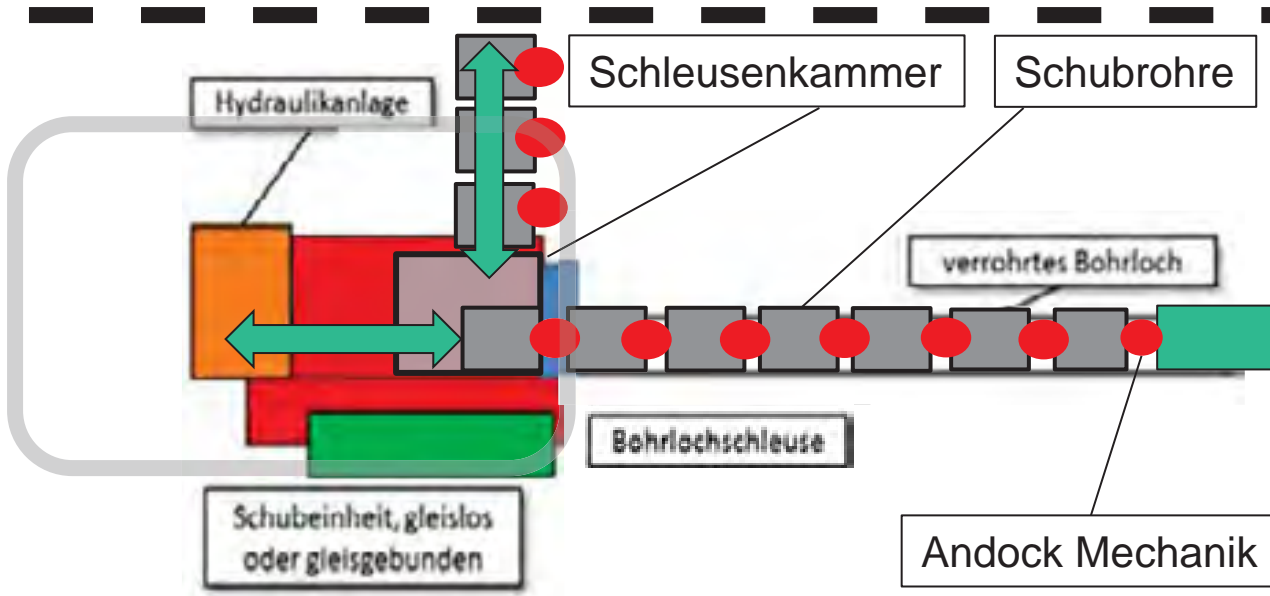
Beispiele für berechnete Temperaturen an ausgewählten Punkten im Grubengebäude



AP 5: Einlagerungskonzept horiz. Bohrlochlagerung =



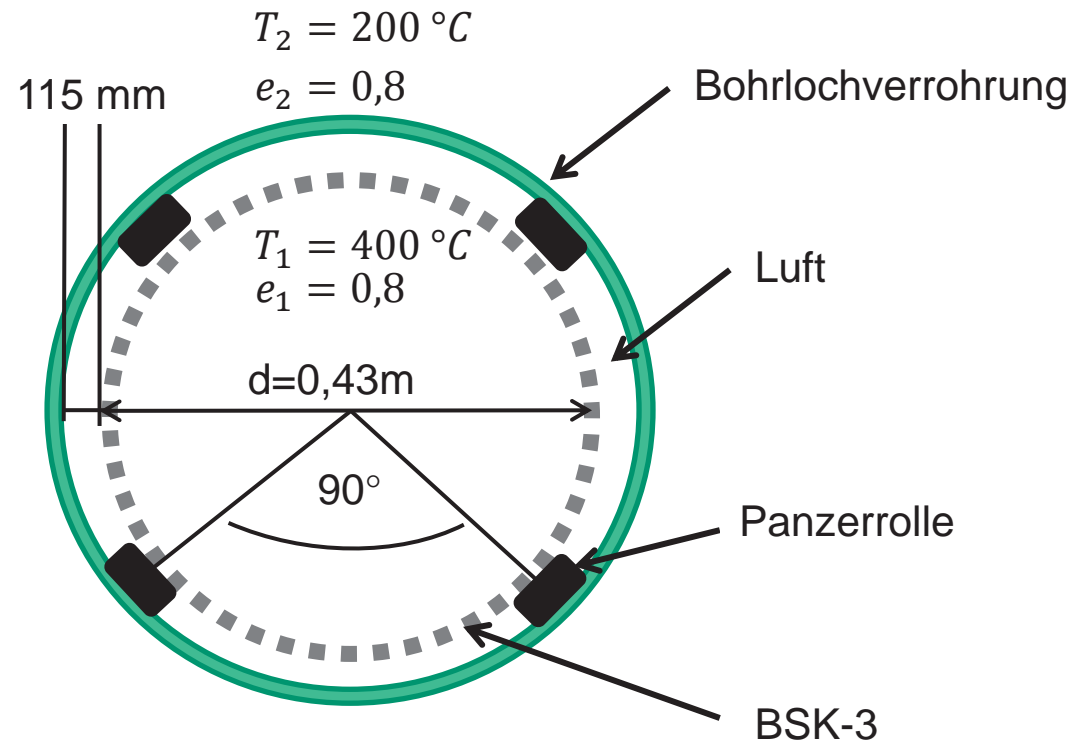
1



2



AP 5: Wärmestrahlung im horizontalen Bohrloch



- Wärmestrahlungsanteil am gesamten Wärmetransport: **99%!**
- äquivalente Wärmeleitfähigkeit für den Luftspalt: $\lambda_{\text{äq}} = 2,70\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- Vergleich mit Luft und Sand:
 $\lambda_{\text{Luft}} = 0,03\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
und $\lambda_{\text{Sand}} = 0,70\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

== AP 5: Endlagerkonzepte ==

Zwischenergebnis:

Typ: flache Lagerung

- ✓ Thermische Berechnungen zur Dimensionierung des Grubengebäudes abgeschlossen
- ✓ Grubengebäude geplant und Partnern bereitgestellt
- ✓ Zeitliche Wärmeausbreitung im jeweiligen Grubengebäude abgeschlossen und Ergebnisse bereitgestellt
- ✓ Einlagerungskonzepte (Streckenlagerung POLLUX[®] und horizontale Bohrlochlagerung von BSK-H) erstellt
- ✓ Verfüll- und Verschlusskonzept in Anlehnung an VSG gewählt

Typ: Salzkissen

- Grundlegende Arbeiten (Lage der Einlagerungshorizonte in geol. Struktur) begonnen

== AP 6: Analyse der radiologischen Konsequenzen ==

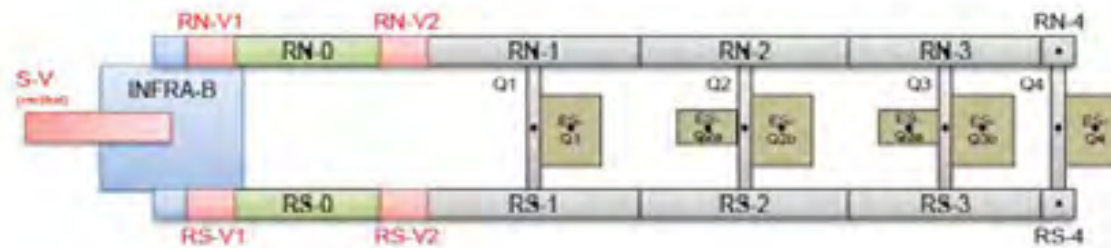
Aufgabenstellung:

1. **Ableitung von Rechenfällen zur radiologischen Konsequenzenanalyse, Überprüfung der Anwendbarkeit vorhandener radiologischer Indikatoren (RGI, etc.)**
2. **Überprüfung der Anwendbarkeit des vorhandenen Instrumentariums zur radiologischen Konsequenzenanalyse anhand der ermittelten Testfälle und Indikatoren**

AP 6: Analyse der radiologischen Konsequenzen

Modellstruktur für das Nahfeld

Segmentstruktur LOPOS für die Streckenlagerung
(abgeleitet aus Grundriss Grubengebäude vom 28.07.2016)



Quelle: GRS

Zwischenergebnis:

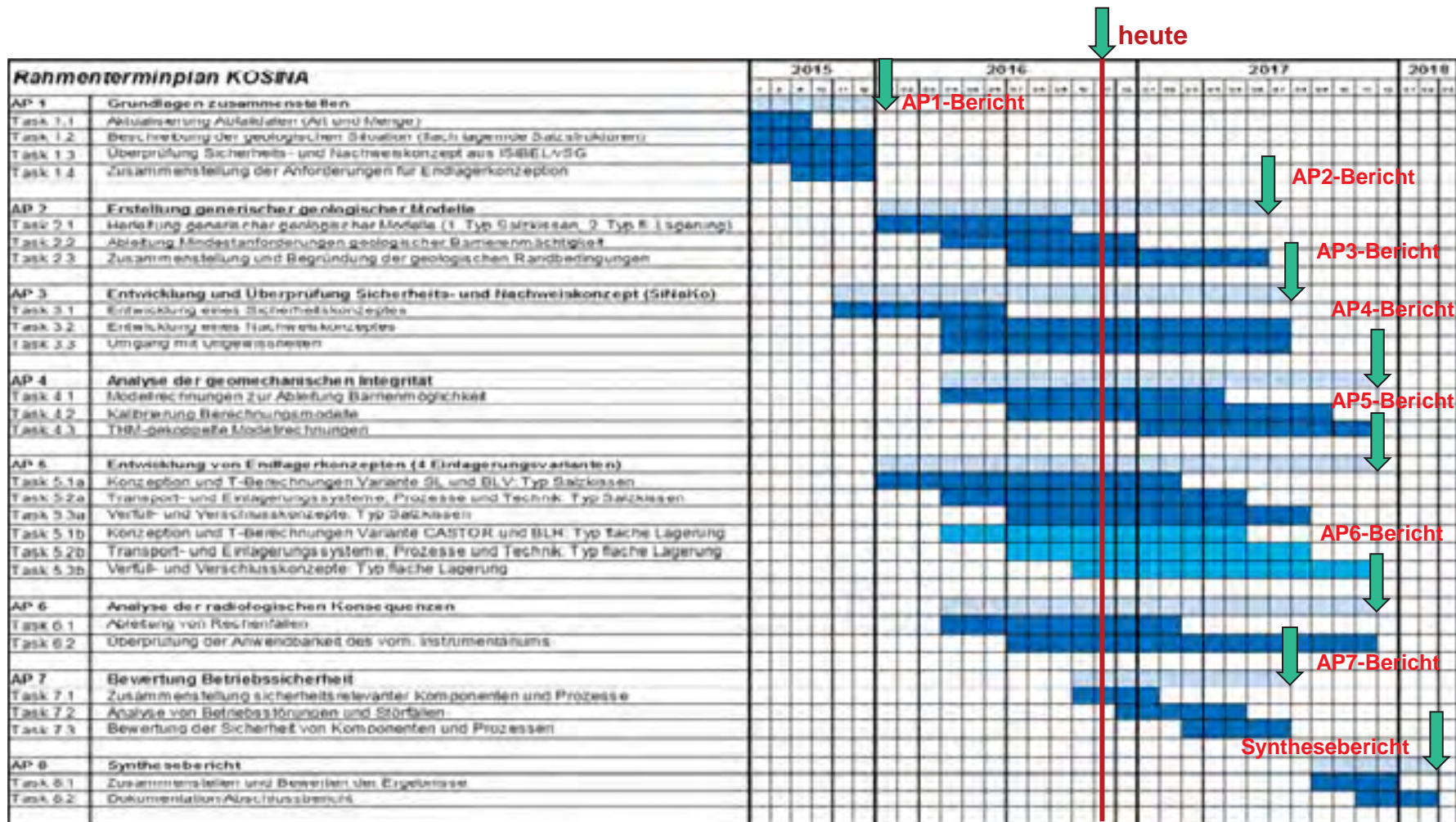
- Geeignete Rechenfälle und Indikatoren identifiziert
- Modellaufbau und orientierende Rechnungen gestartet
- Abstimmung von Geometrien des jeweiligen Grubengebäudes, Modellparameter und zeitliche Entwicklung von Temperaturen in Arbeit

== AP 7: Betriebssicherheit ==

Aufgabenstellung:

- 1. Die Bewertung der Betriebssicherheit beinhaltet:**
 - **Beschreibung der Betriebsabläufe (Transporte, Einlagerung, Verfüll- und Verschlussmaßnahmen, etc.) für die vorgenannten vier Einlagerungsvarianten**
 - **Überprüfung bisher durchgeführter Betriebssicherheitsuntersuchungen (ISIBEL und VSG)**
 - **Abweichungsanalyse und ggf. weitere Betrachtungen**
- 2. Schwachstellen, mögliche Betriebsstörungen und potenzielle Störfälle identifizieren und analysieren.**
- 3. Bewertung, wie Schwachstellen, Betriebsstörungen und potenzielle Störfälle beherrscht oder eliminiert werden können.**

Ausblick/Meilensteine



Danksagung

Danke für die Vorhabensförderung und Betreuung:



Danke den Kollegen von:

- BGR** Ralf Eikemeier
Sandra Fahland
Jörg Hammer
Tatjana Kühnlenz
Wenting Liu
Eike Völkner
- DBETec** Niklas Bertrams
Sabine Dörr
Wolfgang Filbert
Eric Simo
- GRS** Dieter Buhmann
Jonathan Kindlein
Jörg Mönig
Jens Wolf
- IfG** Markus Knauth
Wolfgang Minkley
Dirk Naumann
Till Popp



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

KOSINA - Geologische Grundlagen und gebirgsmechanische Modellierungen

T. Popp (IfG) / J. Hammer (BGR)

Das Standortauswahlgesetz (StandAG 2013) sieht die Untersuchung aller in Deutschland für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle in Frage kommenden Wirtsgesteine vor. Daraus ergibt sich unter anderem die Notwendigkeit der detaillierten geowissenschaftlichen Bearbeitung der in Deutschland existierenden flach lagernden Salzvorkommen. Ein methodischer Ansatz für ein Sicherheits- und Nachweiskonzept im Wirtsgestein Steinsalz wurde schon für den Lagerstättentyp steile Lagerung im Rahmen des FuE-Vorhabens ISIBEL entwickelt und in der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) angewandt. Das Vorhaben KOSINA knüpft an diese Ergebnisse an und hat zum Ziel, ein standortunabhängiges Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland zu entwickeln sowie ein Sicherheits- und Nachweiskonzept zu entwickeln und zu überprüfen.

Für die Realisierung des Vorhabens mussten zuerst die geologischen Grundlagen zusammengestellt und projektbezogen bewertet werden. Unter anderem wurde von der BGR gemeinsam mit IfG der Kenntnisstand zur räumlichen Verbreitung der flach lagernden Steinsalzfazies in Deutschland, zu ihrer lithologischen Zusammensetzung sowie zu den geologischen Lagerungsverhältnissen zusammengefasst.

Davon ausgehend wurde jeweils ein generisches geologisches 3D-Modell für den Typ „flache Lagerung“ und den Typ „Salzkissen“ erarbeitet. Als Grundlage für die Erstellung des jeweiligen 3D-Modells wurde ein Referenzprofil mit einer typischen stratigraphischen Schichtenabfolge aus den in Deutschland für die Regionen mit flach lagernden Salzschieben bzw. Salzkissen beschriebenen Gegebenheiten abgeleitet. Bei der Erstellung der Schnitte wurden die in anderen Studien empirisch abgeleiteten Mindestanforderungen zur Tiefenlage und Barrierenmächtigkeit zugrunde gelegt. Entsprechend wurden für jede Modellkonstellation ein generischer geologischer Schnitt sowie drei senkrecht dazu verlaufende geologische Schnitte als Basis für ein realitätsnahes 3D-Modell erstellt. Die 3D-Modelle bilden die Grundlage für die räumliche Positionierung des Endlagers und die anschließende Festlegung der Modellgebiete für die Integritätsnachweise.

Die Notwendigkeit zur Durchführung von Integritätsanalysen der geologischen Barriere leitet sich direkt aus den 2010 erschienenen Sicherheitsanforderungen des BMU ab, wobei nachzuweisen ist, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre für sämtliche wahrscheinliche Entwicklungen sichergestellt ist. Die Integritätsanalysen der geologischen Barriere erfolgen durch die BGR und das IfG, die jeweils unterschiedliche Modellansätze verfolgen, womit eine entsprechende Redundanz der Ergebnisse gegeben ist. Die BGR nutzt als Rechenprogramm den FEM-code JIFE mit den verschiedenen BGR-Kriechansätzen; das IfG setzt das ITASCA-Programm UDEC ein, in das der visko-elasto-plastische Modellansatz von Minkley zur Beschreibung von Schädigungsprozessen implementiert ist.

Aktuell liegt der Schwerpunkt in dem geometrischen Modellaufbau und der Durchführung von Kalibrierungsrechnungen auf Basis der speziell für die flache Lagerung recherchierten Modellparameter. Die Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle werden anhand des Dilatanz- und des Minimalspannungskriteriums bewertet. Die vorläufigen Berechnungen dokumentieren, dass die größten thermo-mechanisch-hydraulischen Beanspruchungen der geologischen Barriere in den ersten hundert Jahren nach Verschluss des Endlagers auftreten, so dass in der nachfolgenden zeitlichen Entwicklung ein Integritätsverlust immer unwahrscheinlicher wird. Da der Typ „Salzkissen“ eine größere Salzmächtigkeit des Staßfurt-Steinsalzes gegenüber dem Typ „flache Lagerung“ aufweist, erscheinen dort die Rahmenbedingungen für ein Endlager wärmeentwickelnder Abfälle insgesamt günstiger.

FuE-Vorhaben **KOSINA**

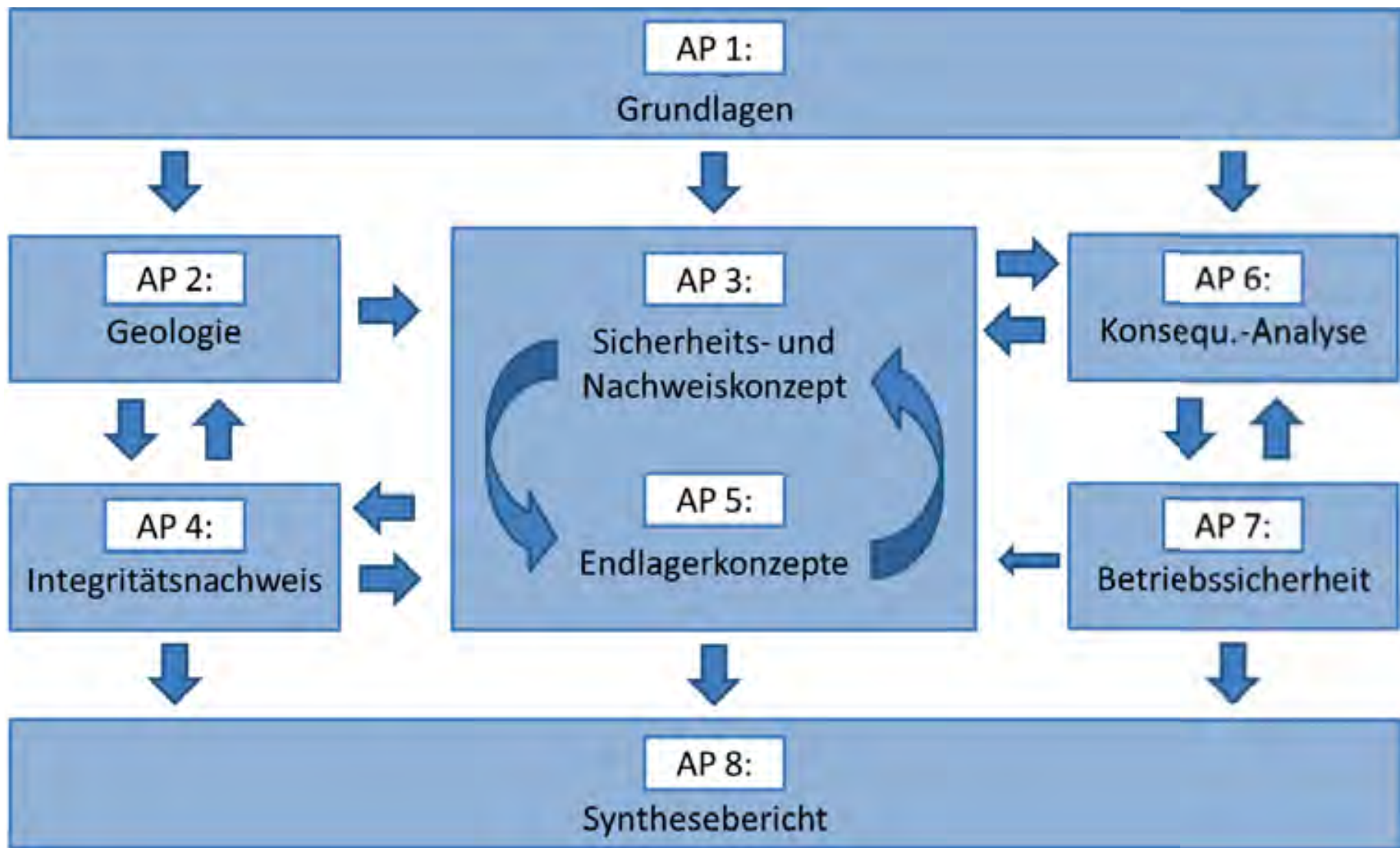
Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschiechten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines **S**icherheits- und **N**achweiskonzeptes

Geologische Grundlagen und gebirgsmechanische Modellierungen

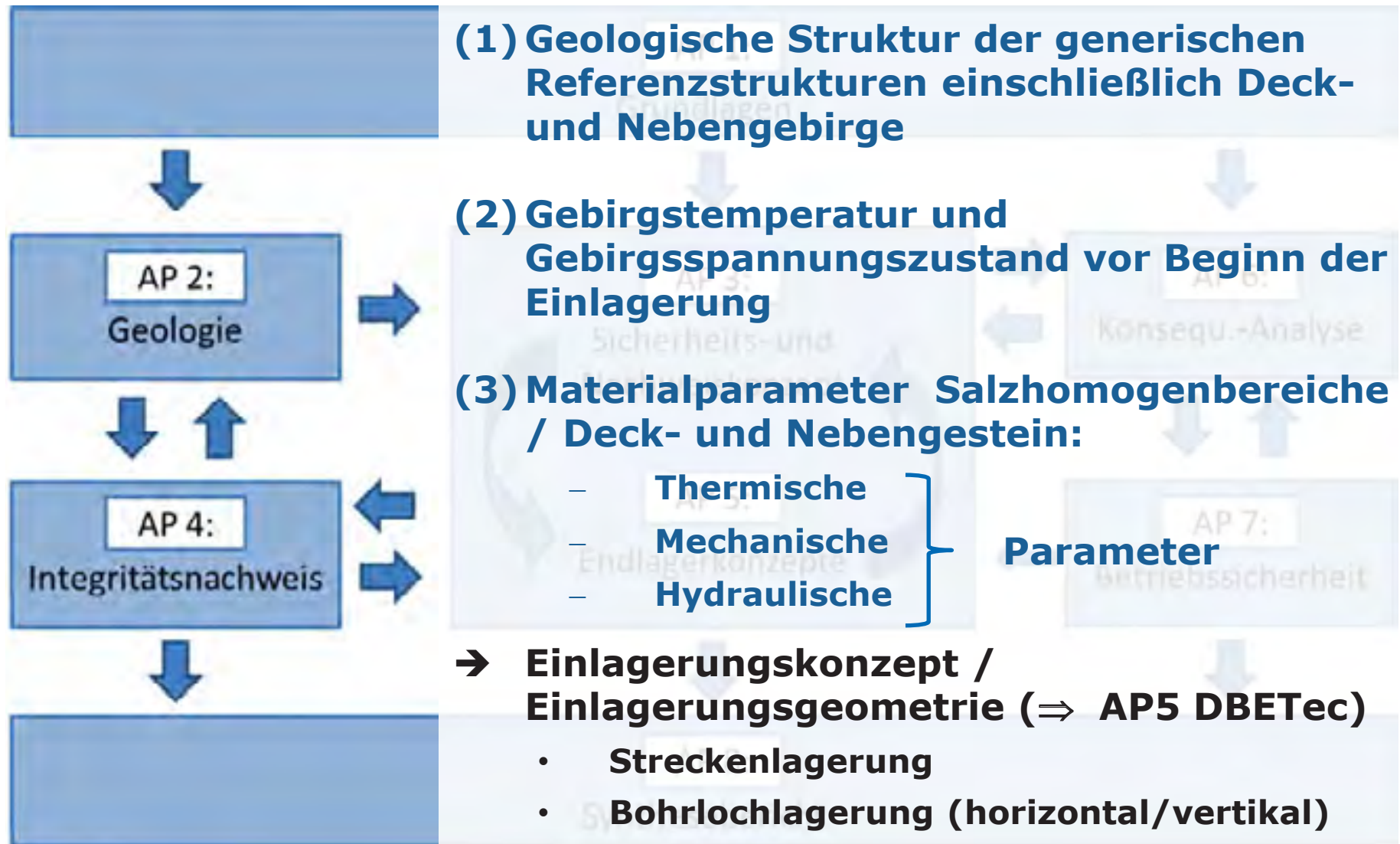
T. Popp (IfG) / J. Hammer (BGR)

- **AP 2 Erstellung von generischen geologischen Modellen, Ableitung von Modellparametern**
 - Methodik
 - Arbeitsstand
- **AP 4 Analyse der geomechanischen Integrität**
 - Methodik
 - Arbeitsstand

Bearbeitungskonzept



Teilziele AP2 – Geologische Modellerstellung / Modellparameter

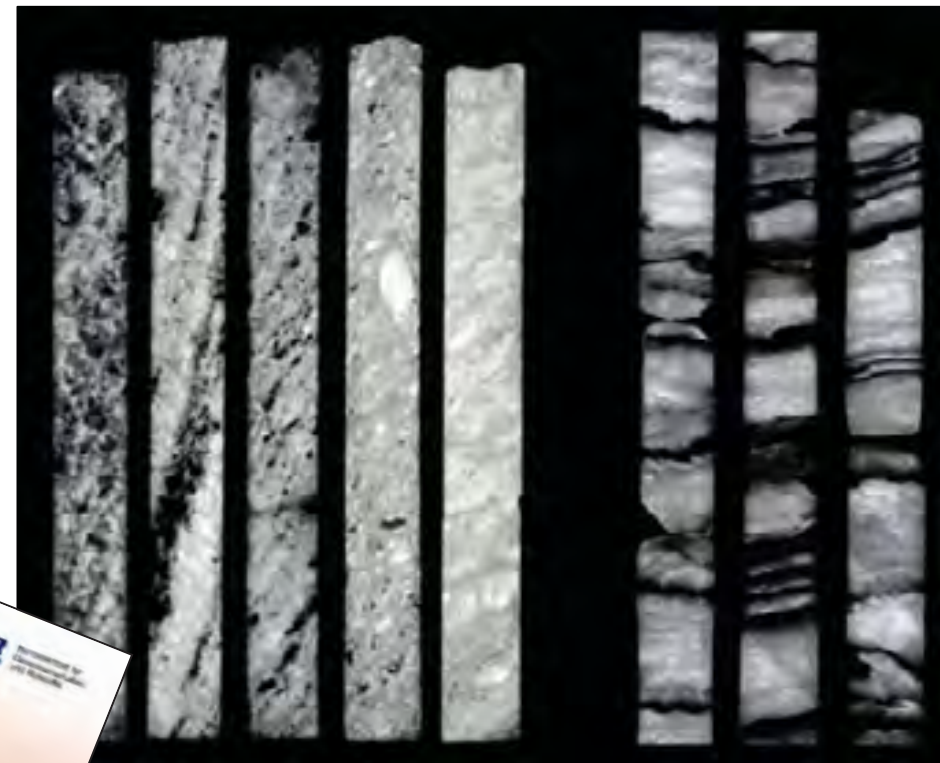


➤ Zusammenstellung und Auswertung der zugänglichen Literaturquellen zu flach lagernden Salinarschichten in Deutschland

Basis:

- *BGR-Studie „Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland“ (2014)*

Hinweis: Im Vorhaben erfolgt keine Standortsuche oder Eignungsbewertung, sondern nur **Bestandsanalyse in Bezug auf repräsentative generische Modelle**



Steißfurt-Hauptsalz,
Salzstock Gorleben

Steißfurt-Hauptsalz,
Teutschenthal

Gegenüberstellung typischer Ausbildungsformen von halotektonisch veränderten und weitgehend flach lagernden Steinsalzschiefern (Durchlichtfotos polierter Kernanschliffe. Höhe der Kerne ca. 1 m).

Quelle: BGR, 2014

Vorkommen flach lagernder Steinsalzfolgen – Stratigraphie / Verteilung



Perm
Zechstein
Rotliegend-Salz



Trias
Muschelkalk-Salz
Röt-Salz



Trias
Keuper – Salz



Tertiär-Salz

System	Serie / Gruppe	Internationale Stufe / Subgruppe / Formation		
Quartär	ca. 12 Ma			
Neogen	Pliozän	Ober Unte		
	Miozän	Ober Unte		
Paläogen	Oligozän	Chetium Rupelium		
	Eozän	Präborium Borinikum Lutetium		
		Ypresium Thanetium Selandium		
	Päliozän	Caenium Maastrichtium		
	Kreide	Oberkreide	Campanium Santonium Coniacium Turonium Cenozoicum	
			Albium Aptium Barremium Hauterivium Valdegiacium	
Unterkreide		ca. 142 Ma	Berriasium	
			Tithonium Kimmeridgium Oxfordium	
Jura		Oberjura (Malm)	Colliatum Balthonium	
		Mitteljura (Dogger)	Reptium Aalenium Staudium	
	Unterjura (Lias)	Plimstachium Spessarium Hettangium		
Trias	Keuper	ca. 201 Ma	Eder-Formation Amalut-Formation Weiser-Formation Subgert-Formation Gralkalk-Formation Erfurt-Formation	
			Oberer Muschelkalk Mittlerer Muschelkalk Unterer Muschelkalk Röt-Formation	
			Solfing-Formation Hassleisen-Formation Deffern-Formation Völschhausen-Formation Quickborn-Formation Bemburg-Formation Calvörde-Formation	
	Buntsandstein	ca. 201 Ma	Fulda-Formation Friesland-Formation Ohrn-Formation Aler-Formation Leine-Formation Säulke-Formation Werra-Formation	
			Ebe-Subgruppe Havel-Subgruppe Mürit-Subgruppe Altmark-Subgruppe	
Perm	ca. 201 Ma	Zechstein Rotliegend		

Tertiär-Salz

Oberer Jura
Malm - Salz

Trias
Keuper – Salz
Muschelkalk-Salz
Röt-Salz

Perm
Zechstein
Rotliegend-Salz

■ Vorkommen von Steinsalzlagern

Auswahl Generischer Modellgebiete



- ✓ **Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien**
- ✓ **Mindestanforderungen an das generische Modellgebiet**
 - Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-10}$ m/s
 - Einlagerungshorizont > 100 m mächtig
 - Tiefe der Oberfläche > 300 m unter GOK
 - Ausreichende flächenmäßige Ausdehnung, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht
 - keine Informationen welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen über etwa 10^6 Jahre zweifelhaft erscheinen lassen
- Endlagerbergwerk max. Tiefe 1000 m
- keine Gebirgsschlaggefährdung

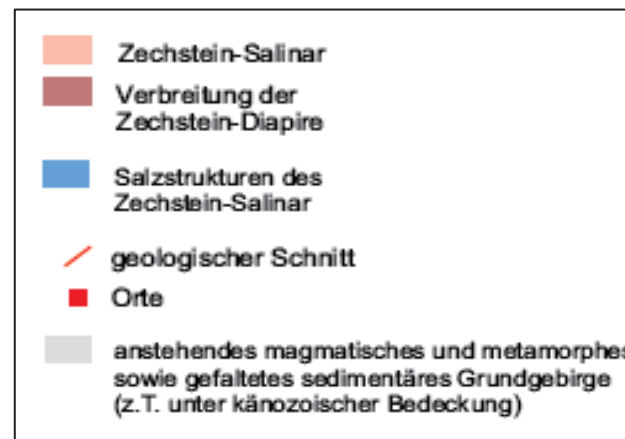
Quelle: AkEnd (2002) / Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016)

Flach lagernde Zechstein-Salzformationen in Deutschland



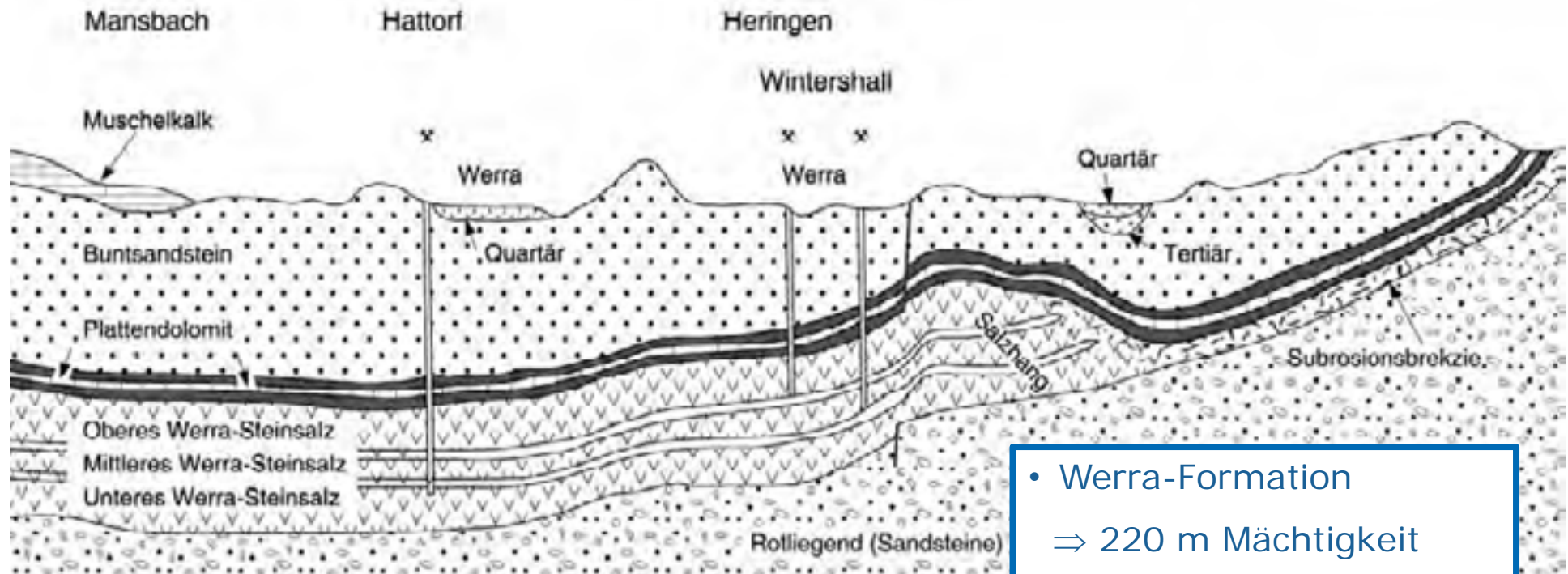
Vorkommen

- Südlicher Teil des Norddeutschen Beckens
 1. Niederrhein-Becken
 2. Werra-Fulda-Becken
 3. Thüringer-Becken
 4. Solling-Becken
 5. Scholle von Calvörde-Block
 6. Niederlausitz-Becken



Quelle: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Zechstein-Salinare in Deutschland (nach: /Kulick 1984/, /Freudenberger 1996/, /BGR 2004/, Verbreitung der Zechsteinstrukturen nach /BGR 2014/)

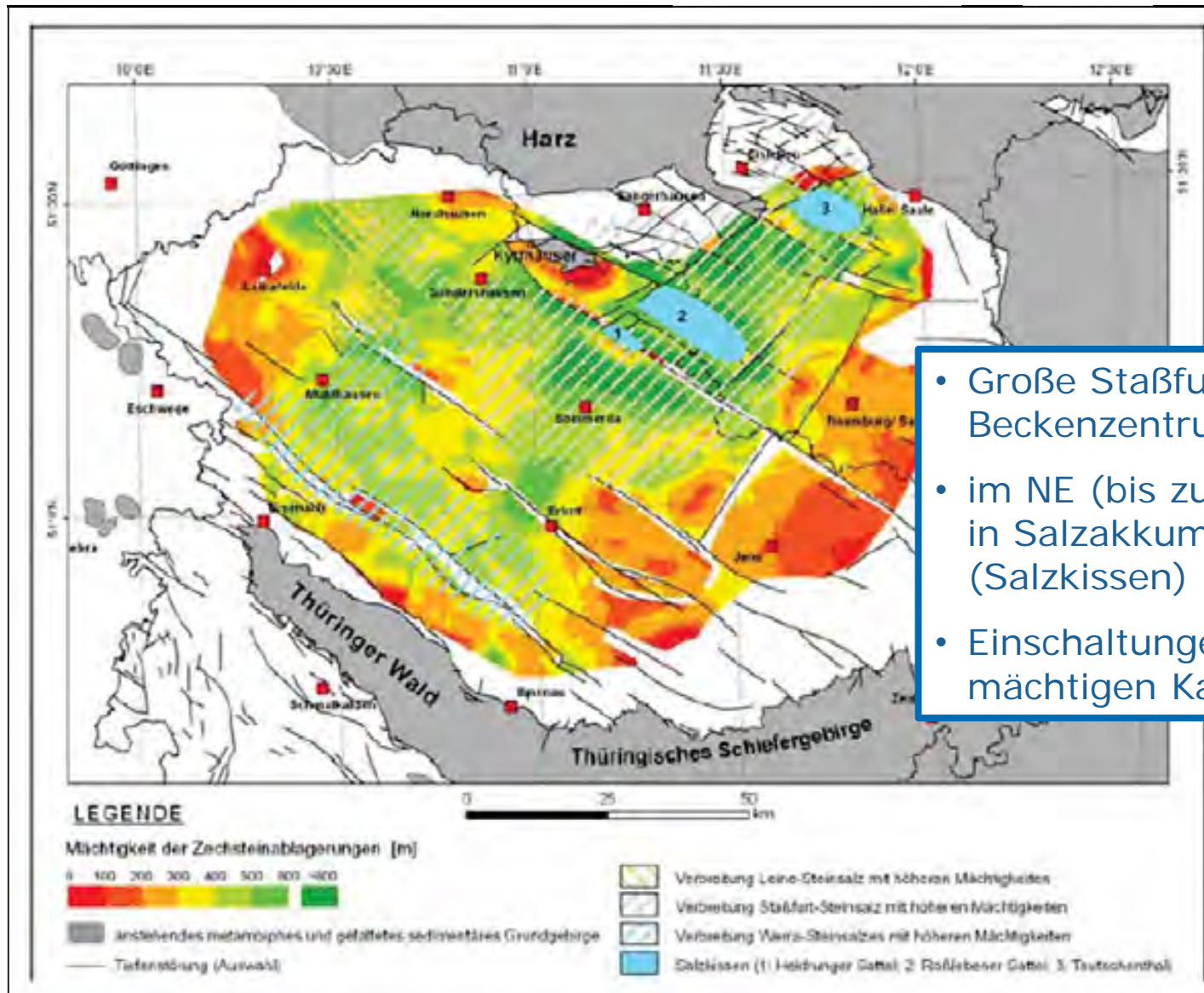
Beispiel: Werra-Fulda Becken – Geologisches Profil



- Werra-Formation
⇒ 220 m Mächtigkeit
- Lagerstätten-Top:
⇒ Teufen zwischen 600m
und 1000 m

(Quelle: Ahorner & Sobisch, 1988)

Beispiel: Thüringer Becken – Mächtigkeiten Staßfurt-Folge



- Große Staßfurt-Mächtigkeiten im Beckenzentrum
- im NE (bis zu mehr als 500m – in Salzakkumulationsgebieten (Salzkissen))
- Einschaltungen des bis zu 20m mächtigen Kaliflözes Staßfurt

Auswahl von generischen Referenzstandorten - Lagerungsformen

Modell A: Typ "Flache Lagerung"



Gekennzeichnet durch weitgehend homogene, ungestörte Lagerungsbedingungen

Modell B: Typ "Salzkissen"



Entstehung

- ⇒ Salzabwanderung infolge Dichte-Unterschiede (Salz/Deckgebirge)
- ⇒ Kissenbildung: Akkumulation infolge der Mobilität vor allem der Staßfurt-Formation)
- ⇒ Kein Durchdringen des Deckgebirges

Auswahl von generischen Referenzstandorten - Lagerungsformen

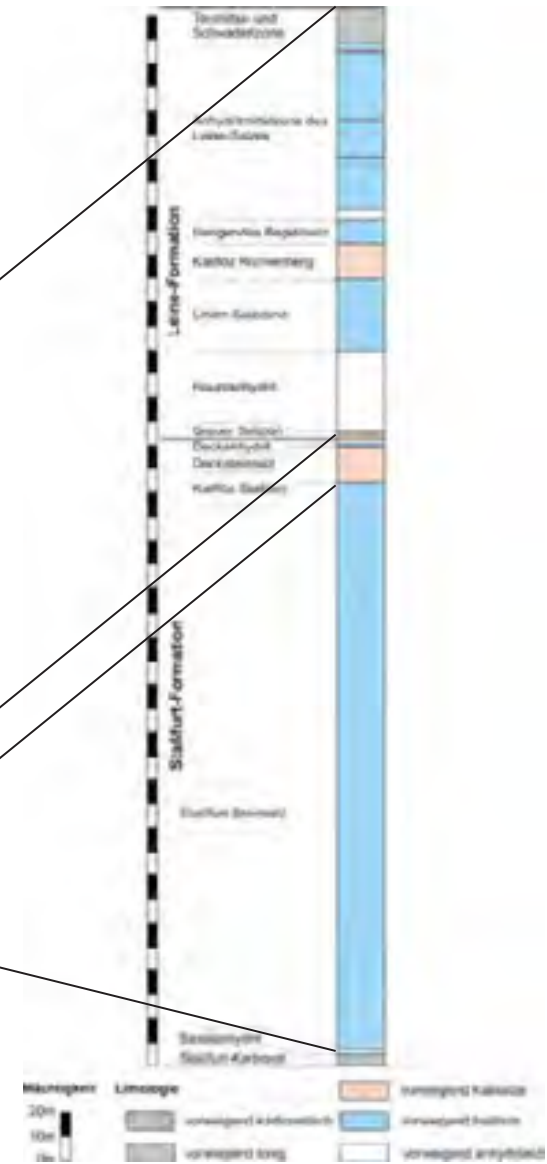
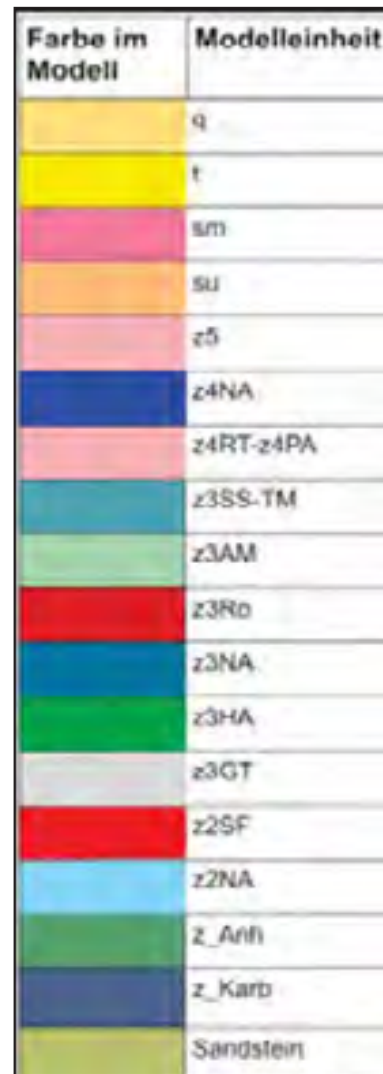
Grube Teutschenthal

“Neue Werkstatt” – Staßfurt Kalilager z2SF

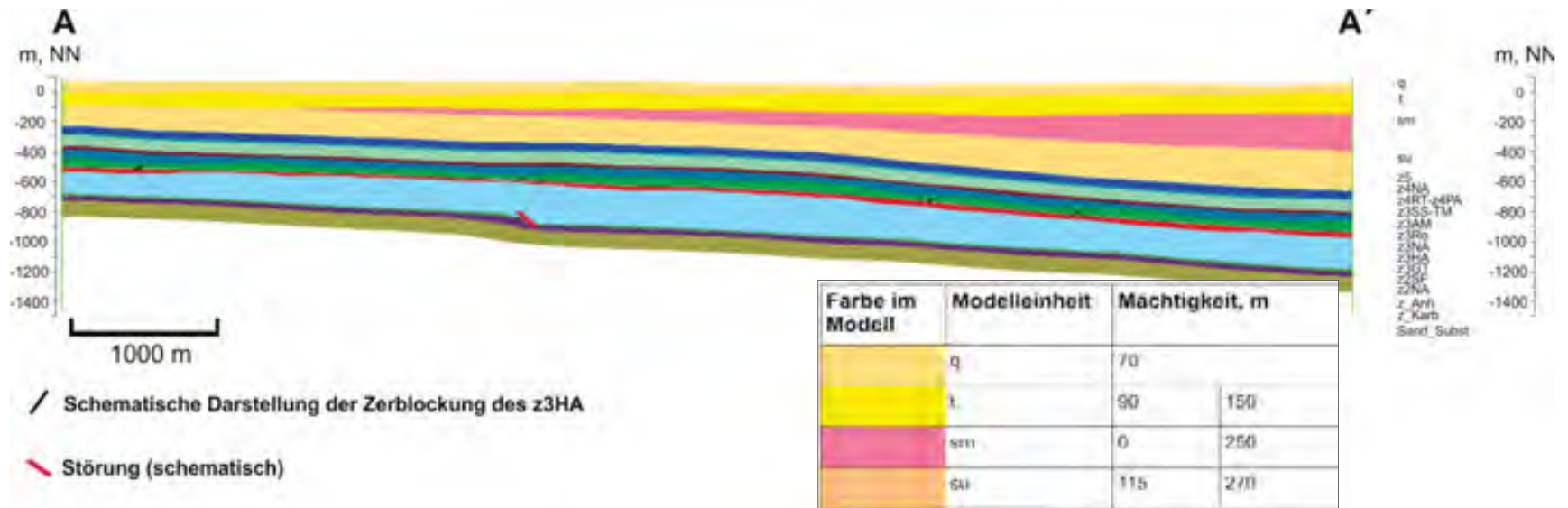


Quelle: IfG

Geologisches Normalprofil – Flache Lagerung / Salzkissen



Generisches Referenzprofil – „Flache Lagerung“



Teufenlage der Basis Staßfurt-Steinsalz:

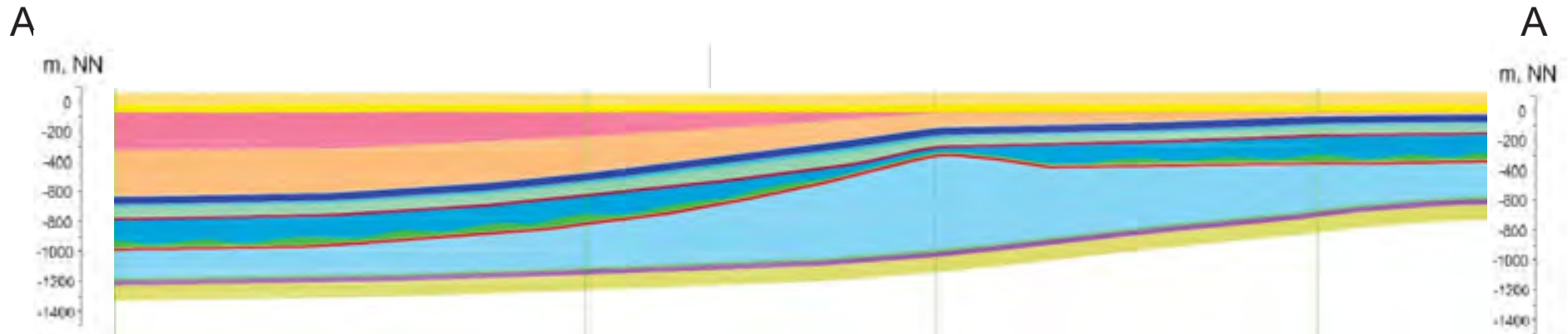
von -700 m bis -1200 m

Teufenlage Top Staßfurt-Steinsalz:

von -550 m bis -1000 m

Farbe im Modell	Modelleinheit	Mächtigkeit, m	
[Yellow]	q	70	
[Light Yellow]	t	90	150
[Pink]	sm	0	250
[Orange]	su	115	270
[Light Red]	z5	5	
[Dark Blue]	z4NA	50	
[Light Red]	z4RT-z4PA	5	
[Teal]	z3SS-TM	10	
[Light Green]	z3AM	75	
[Red]	z3Ro	18	
[Blue]	z3NA	32	52
[Green]	z3HA	70	35
[Light Blue]	z3GT	5	
[Dark Blue]	z_KWfB	35	
[Olive Green]	Sandstein	100	

Generisches Referenzprofil – „Salzkissen“



Teufenlage der Basis Staßfurt-Steinsalz:
von -600 m bis -1200 m

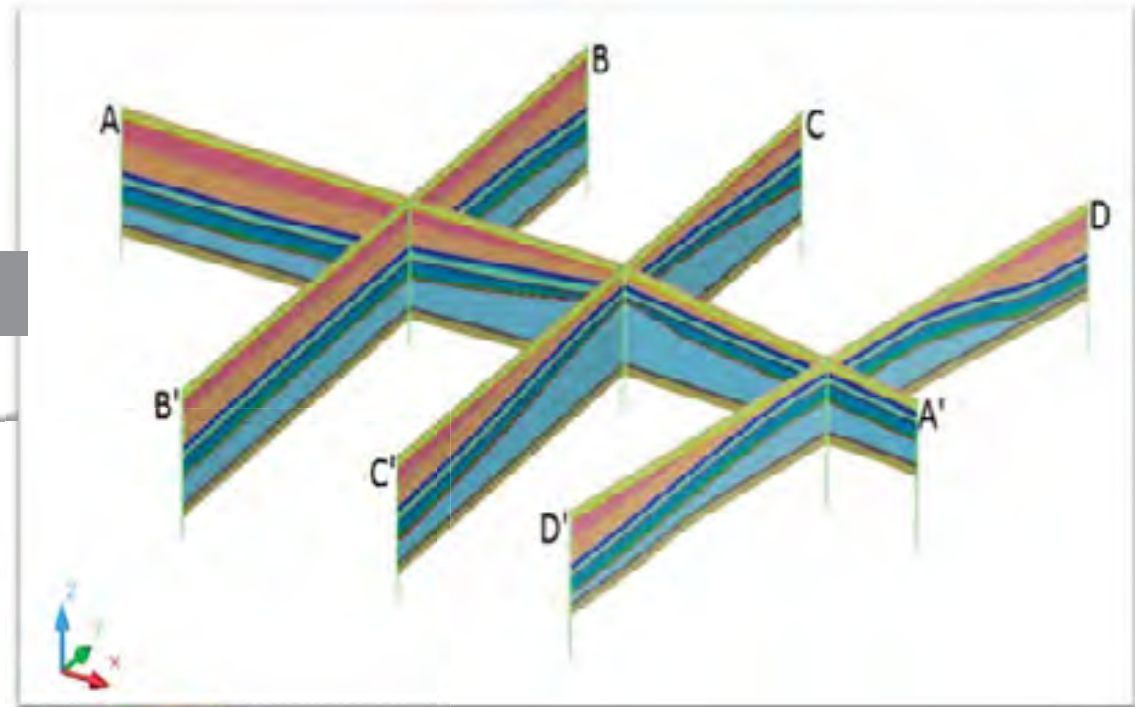
Teufenlage Top Staßfurt-Steinsalz:
von -250 m bis -1000 m

Farbe	Modelleinheit	Mächtigkeit, m
Orange	q	75
Yellow	l	50
Pink	sm	5 - 330
Light Orange	su	5 - 330
Light Blue	z5	5
Dark Blue	z4NA	45
Pink	z4RI-z4PA	5
Light Green	z3SS-TM	15
Light Green	z3AM	50 - 70
Red	z3Ro	18
Blue	z3NA	25 - 165
Green	z3IIA	8 - 50
Light Green	z3GI	5
Red	z2NA	200 - 600
Light Blue		
Light Green		
Purple	z Karb	35
Yellow	Sandstein Substrat	100

Modellentwicklung – Räumliche Ausdehnung über Querprofile

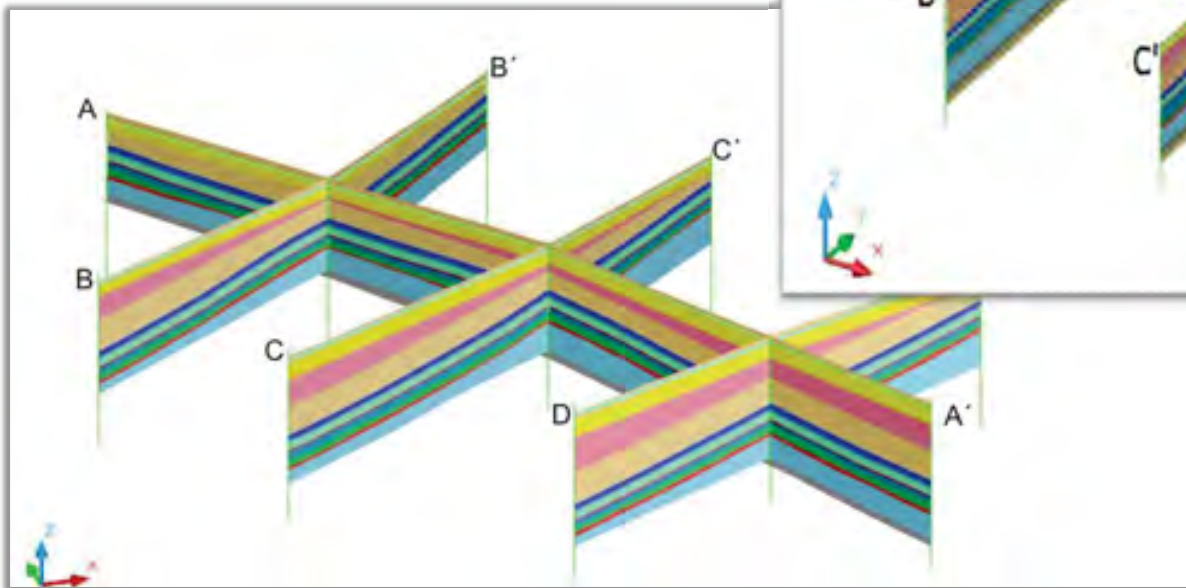
Modell B: Typ "Salzkissen"

Modellerstreckung: 9,9 km x 12,3 km

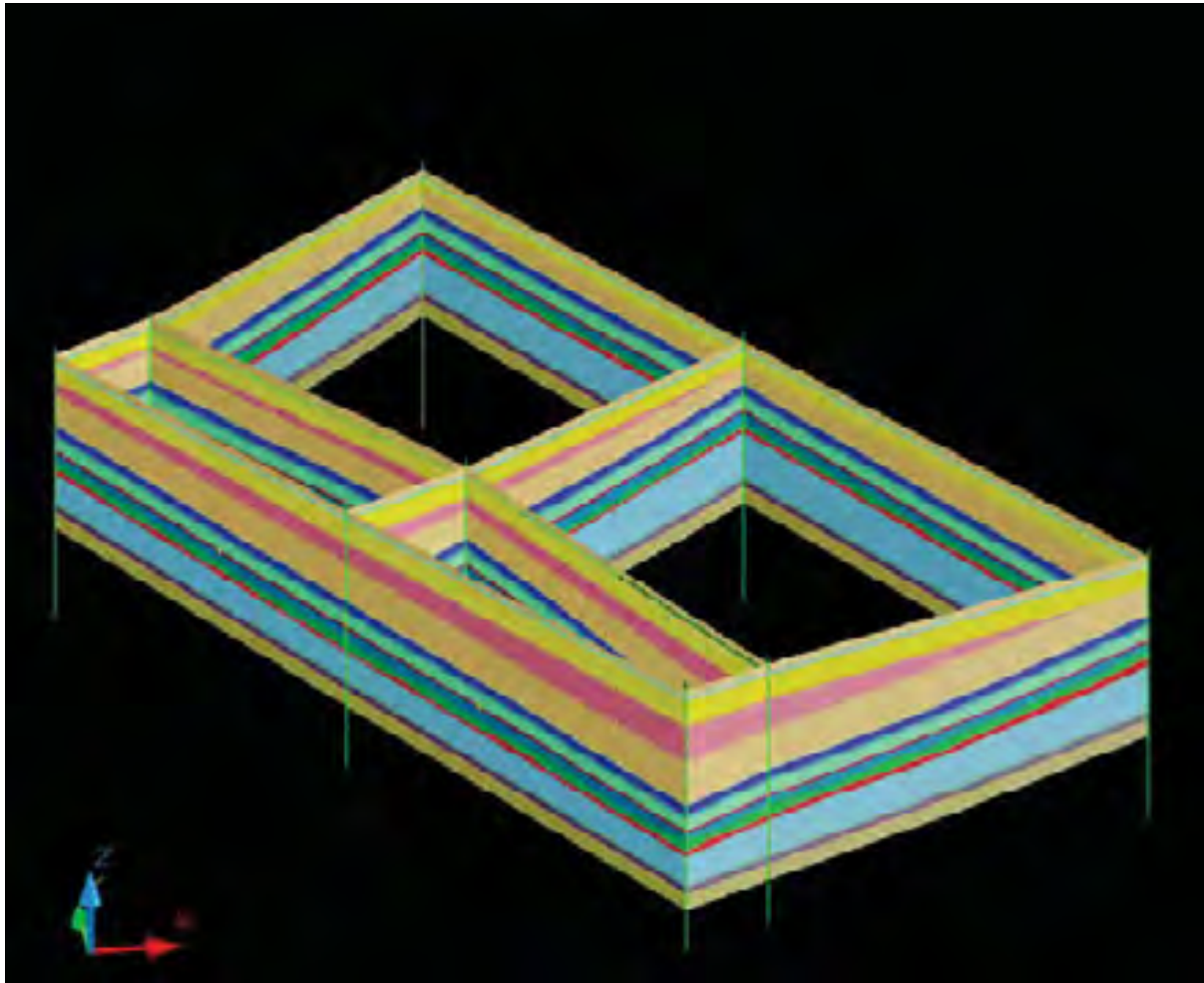


Modell - Typ "Flache Lagerung"

Modellerstreckung: 2,6 km x 5 km



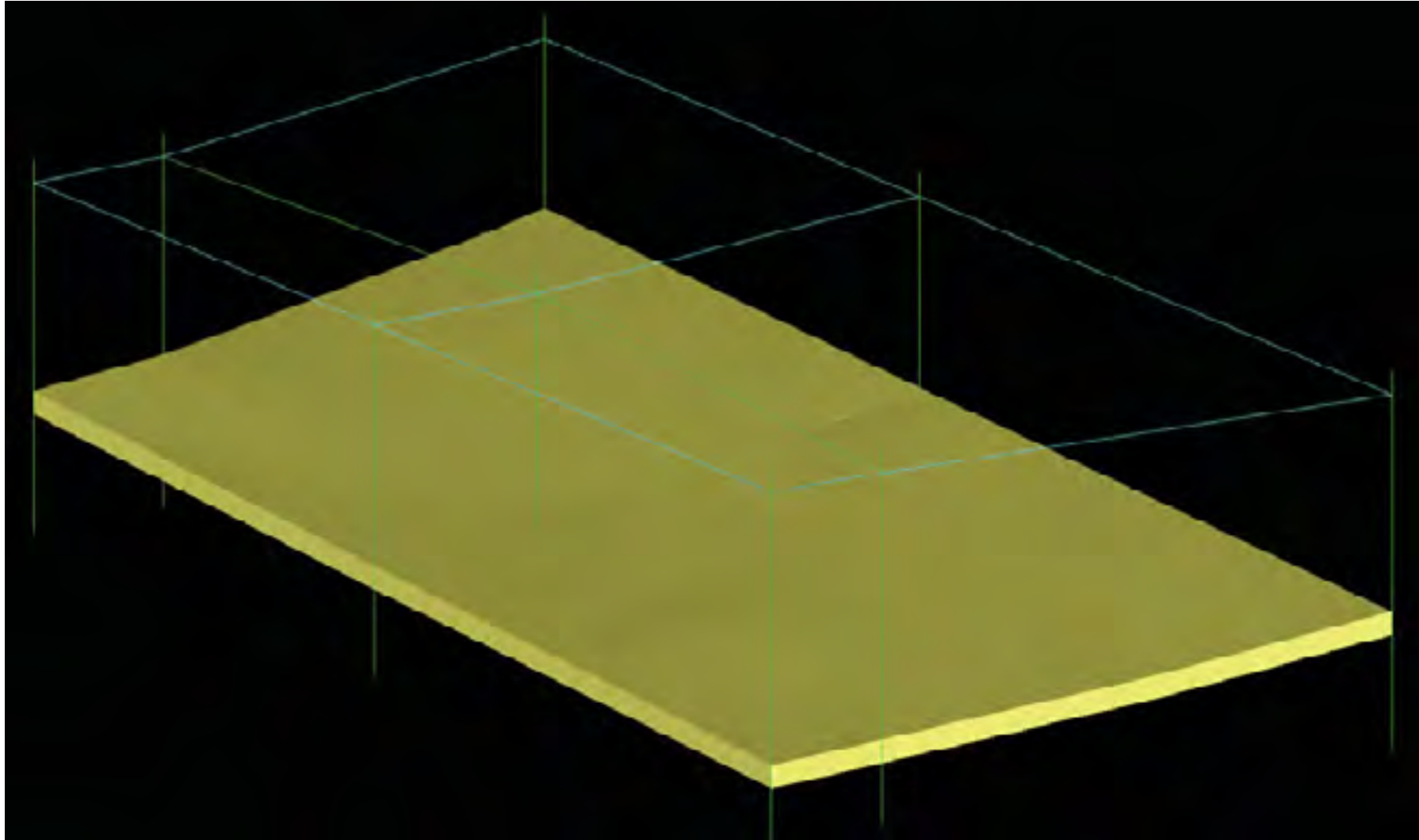
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Blockbild



Modellerstreckung: 2,6 km x 5 km

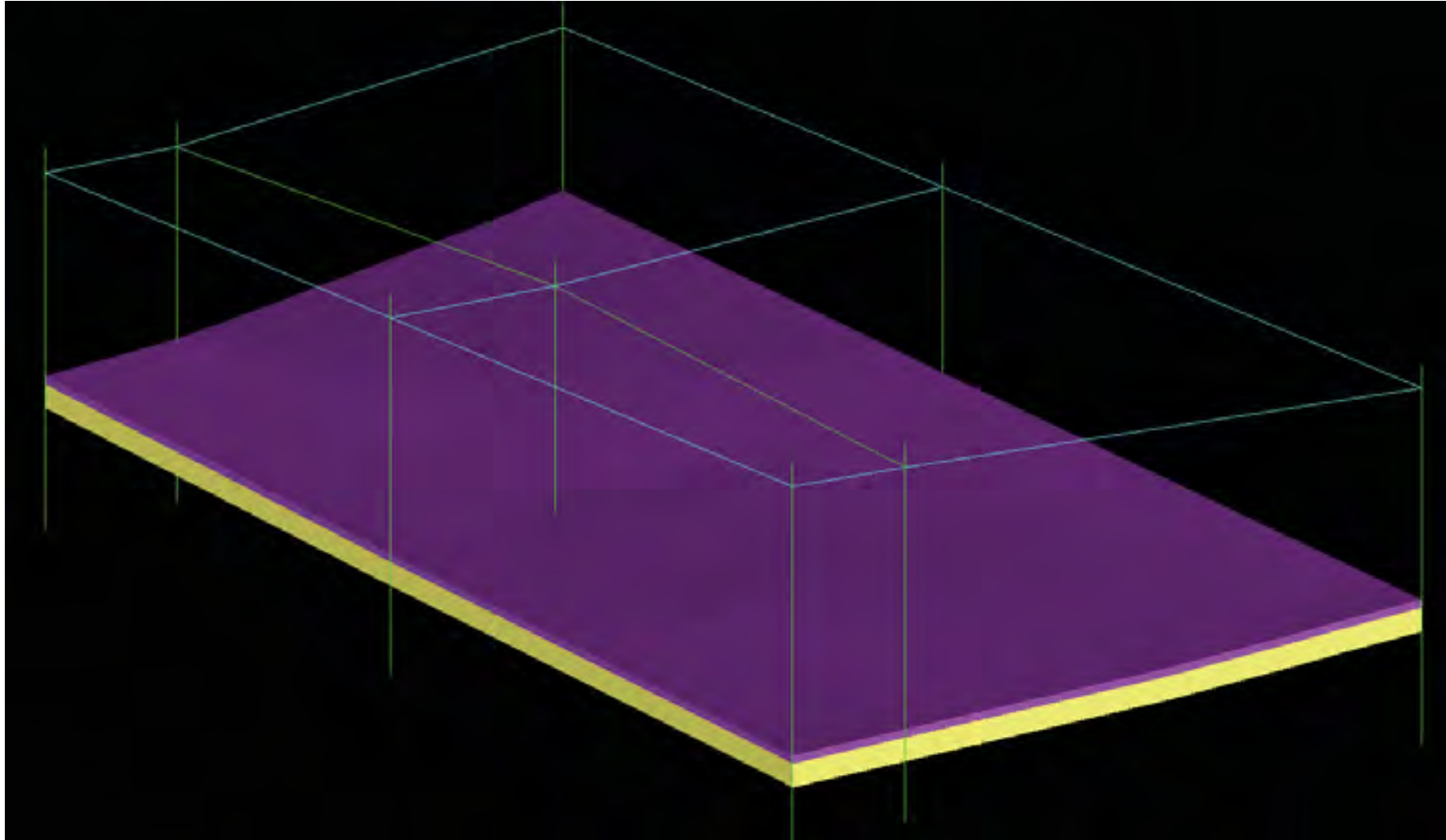
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Rotliegend-Sandstein



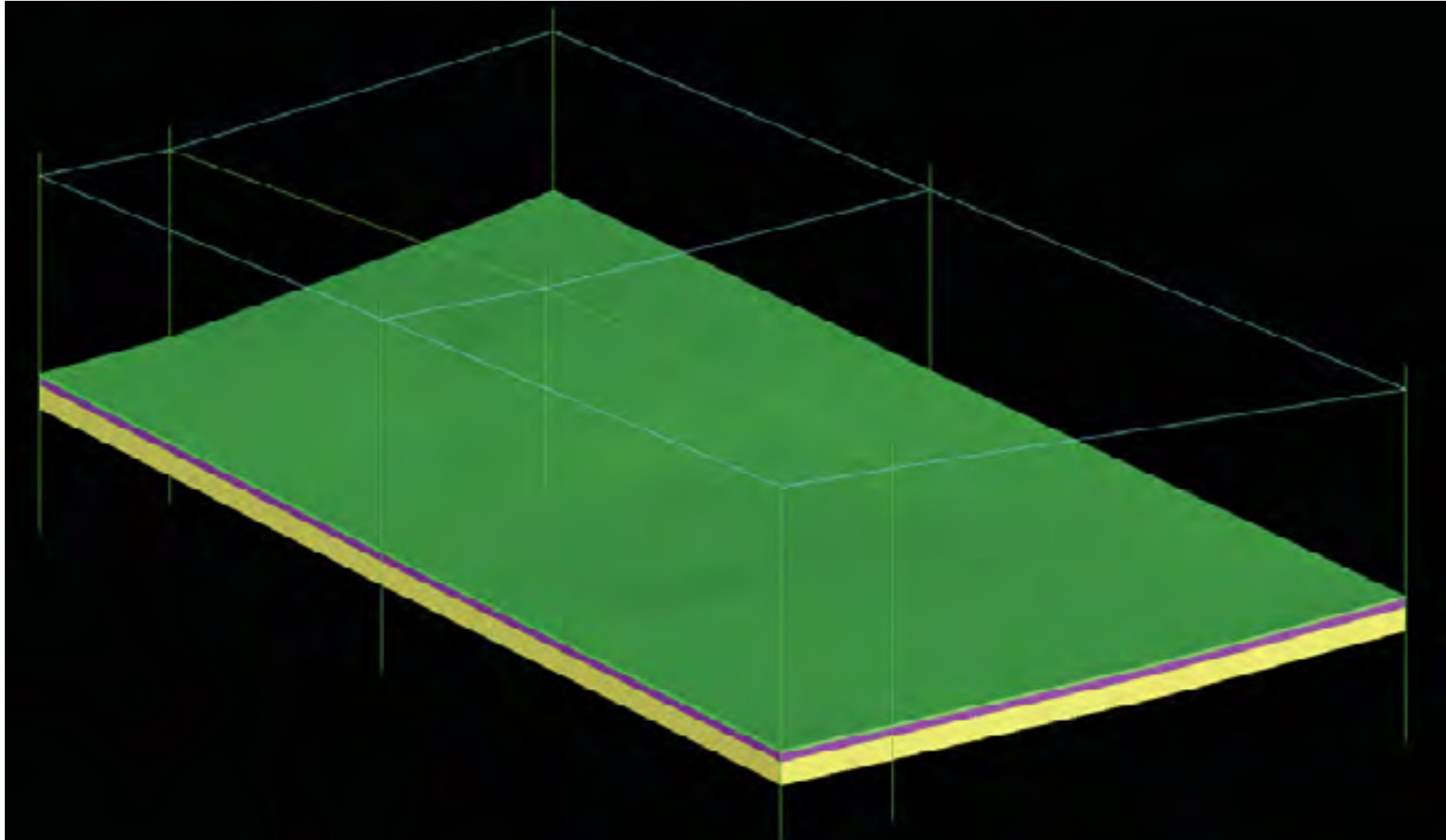
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

z_Karbonat (z1/z2)



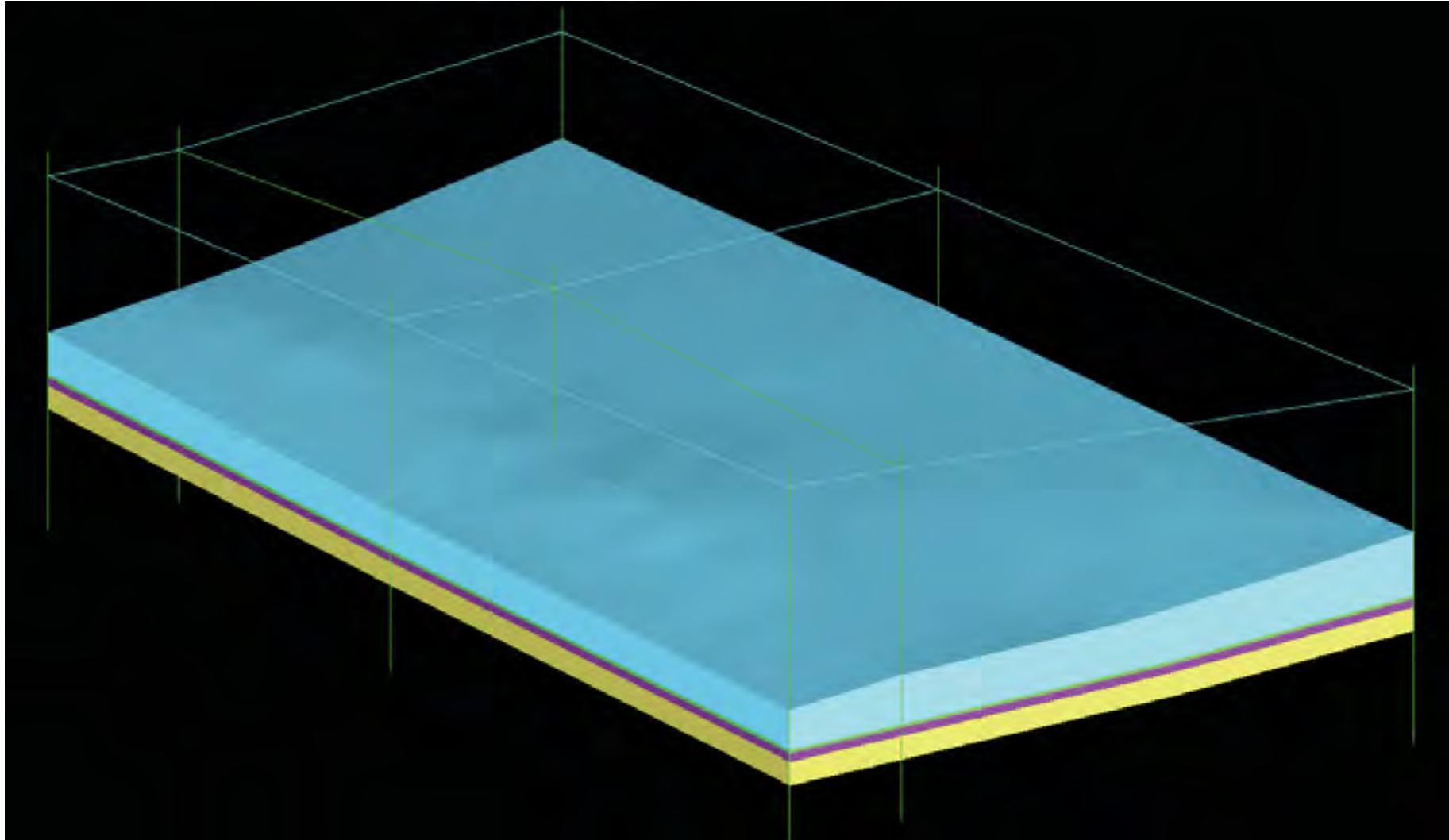
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

z_Basalanhydrit (z1/z2)



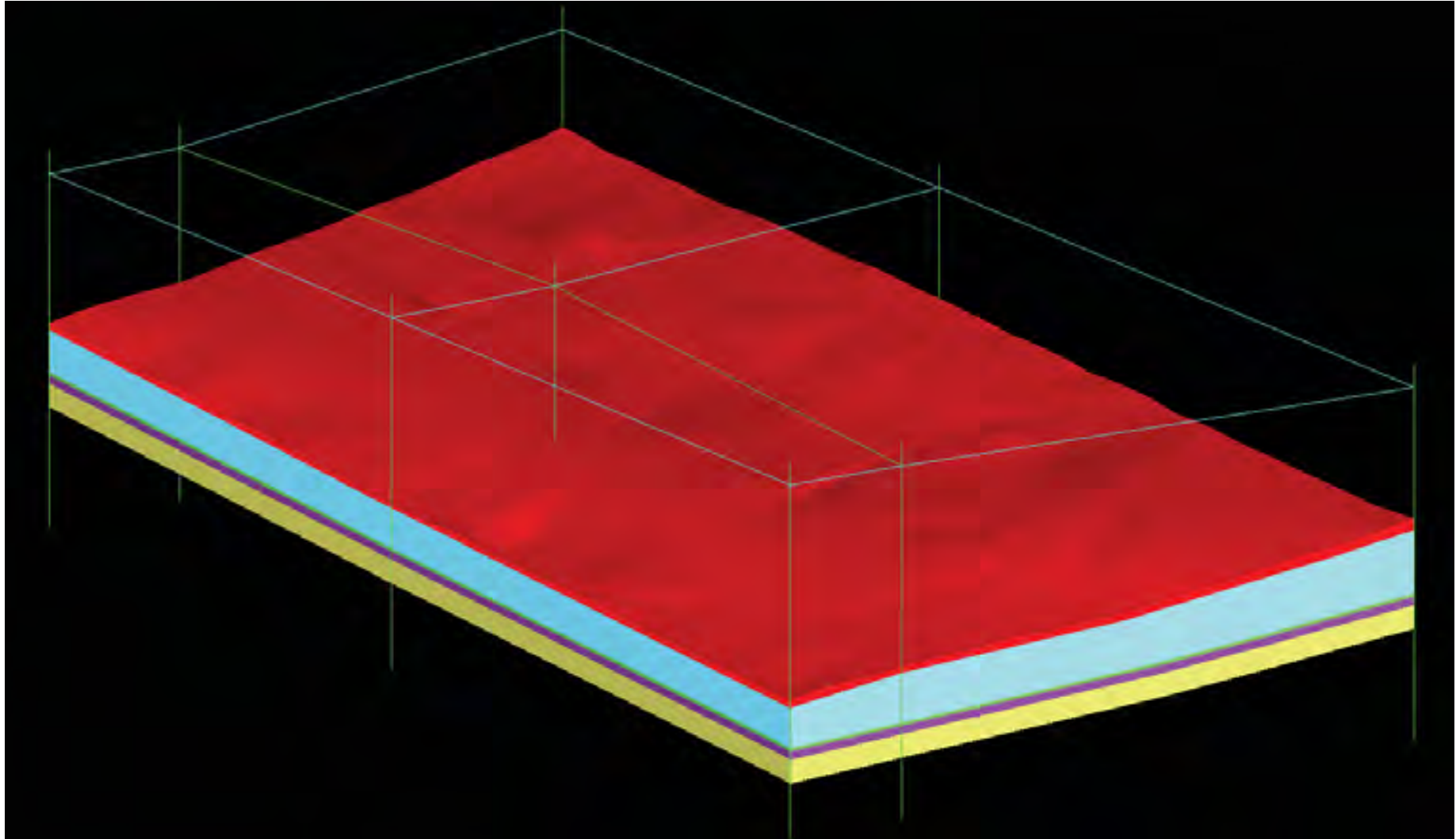
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Steißfurt - Steinsalz z2NA



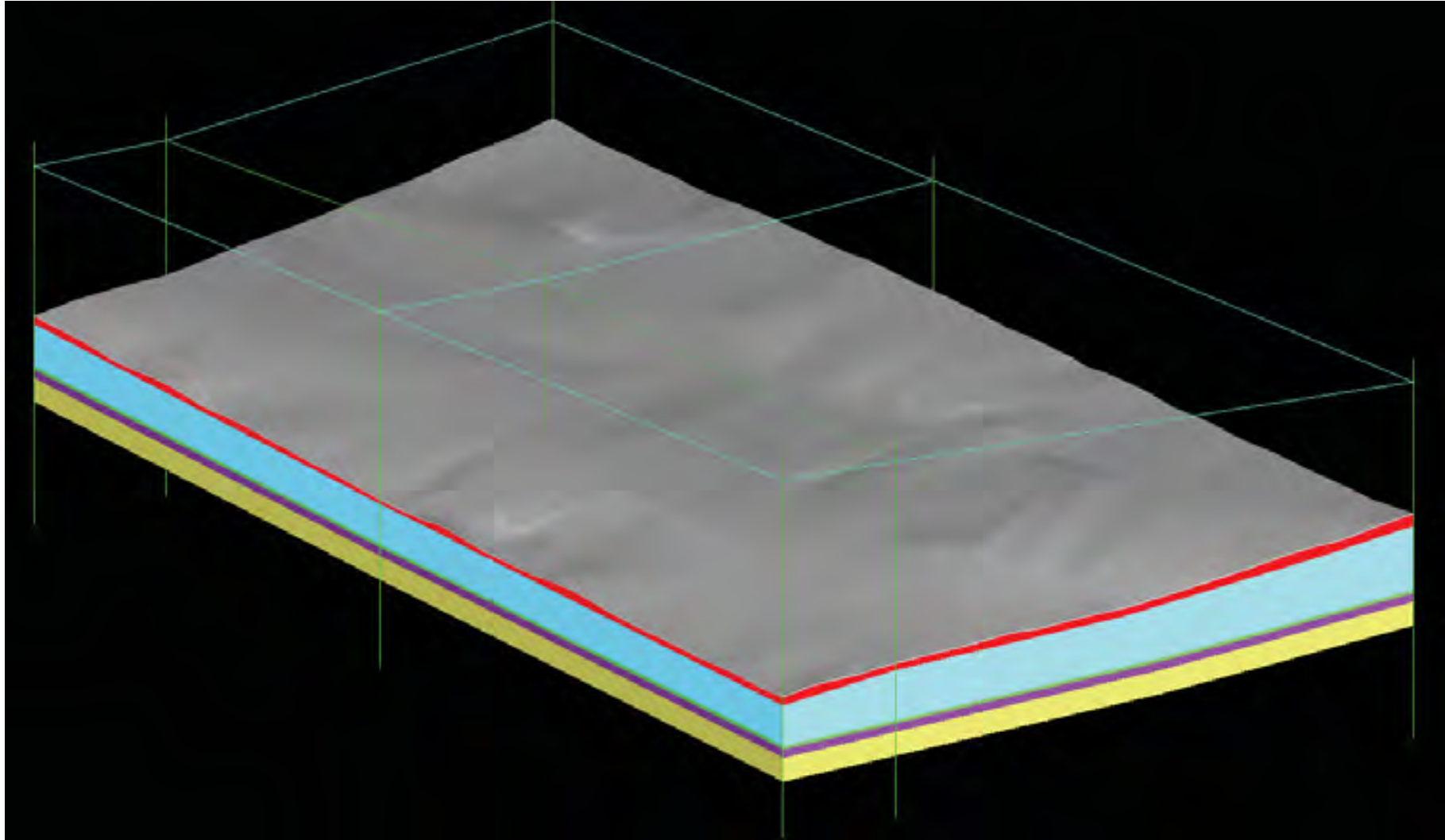
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Steißfurt - Kaliflöz z2SF



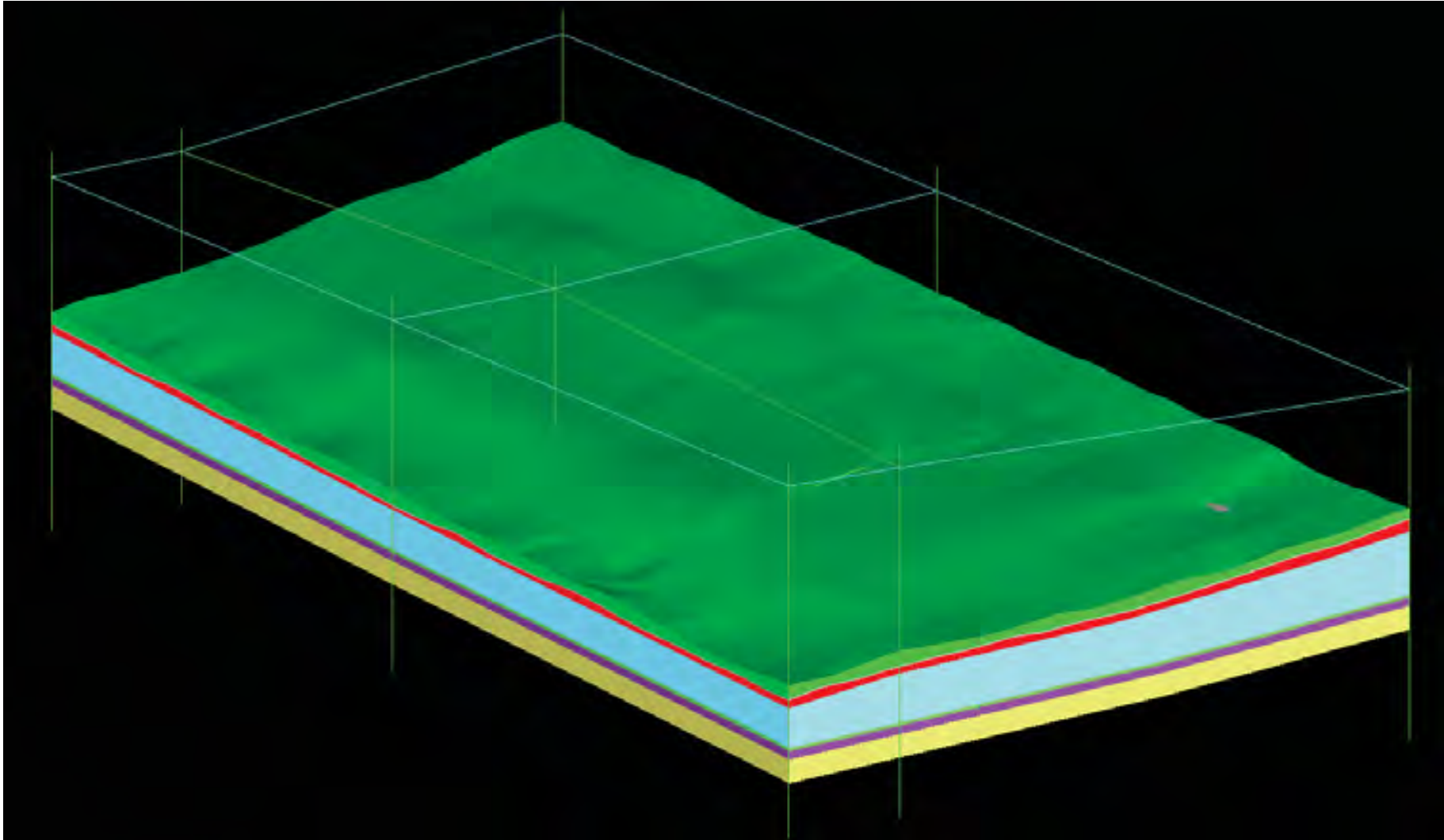
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Grauer Salzton z3GT



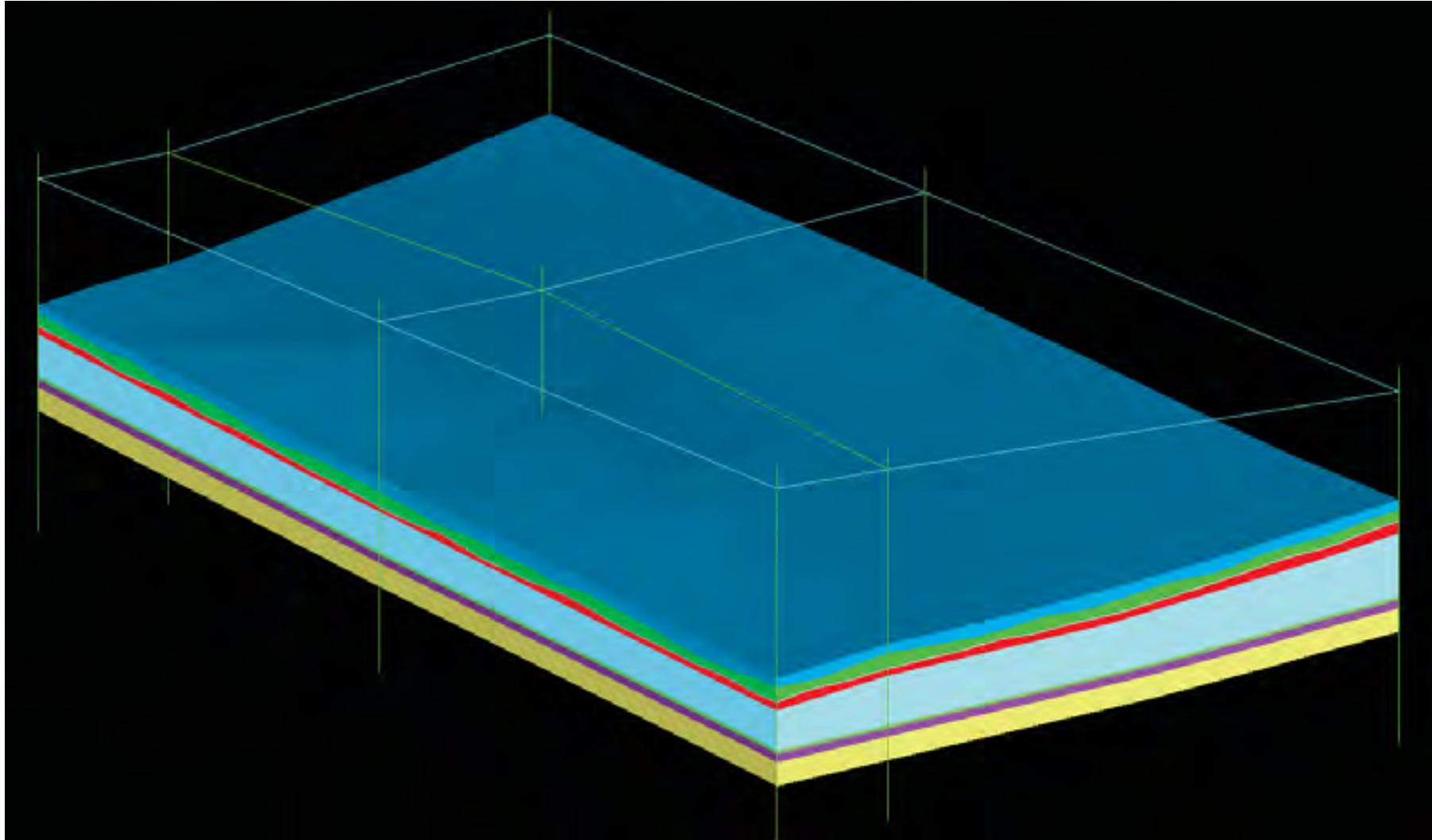
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Hauptanhydrit z3HA



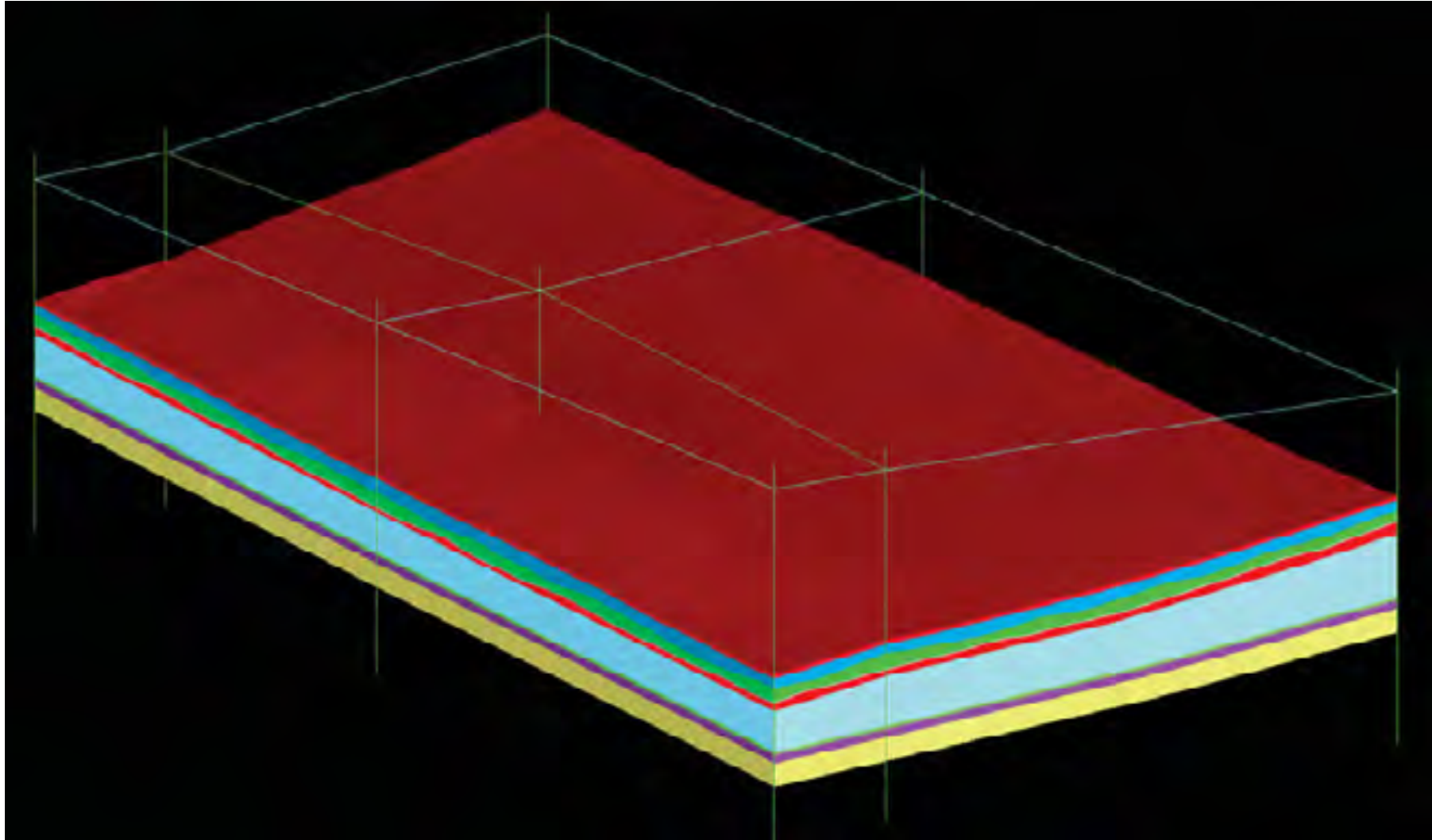
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Leinsteinsalz z3NA



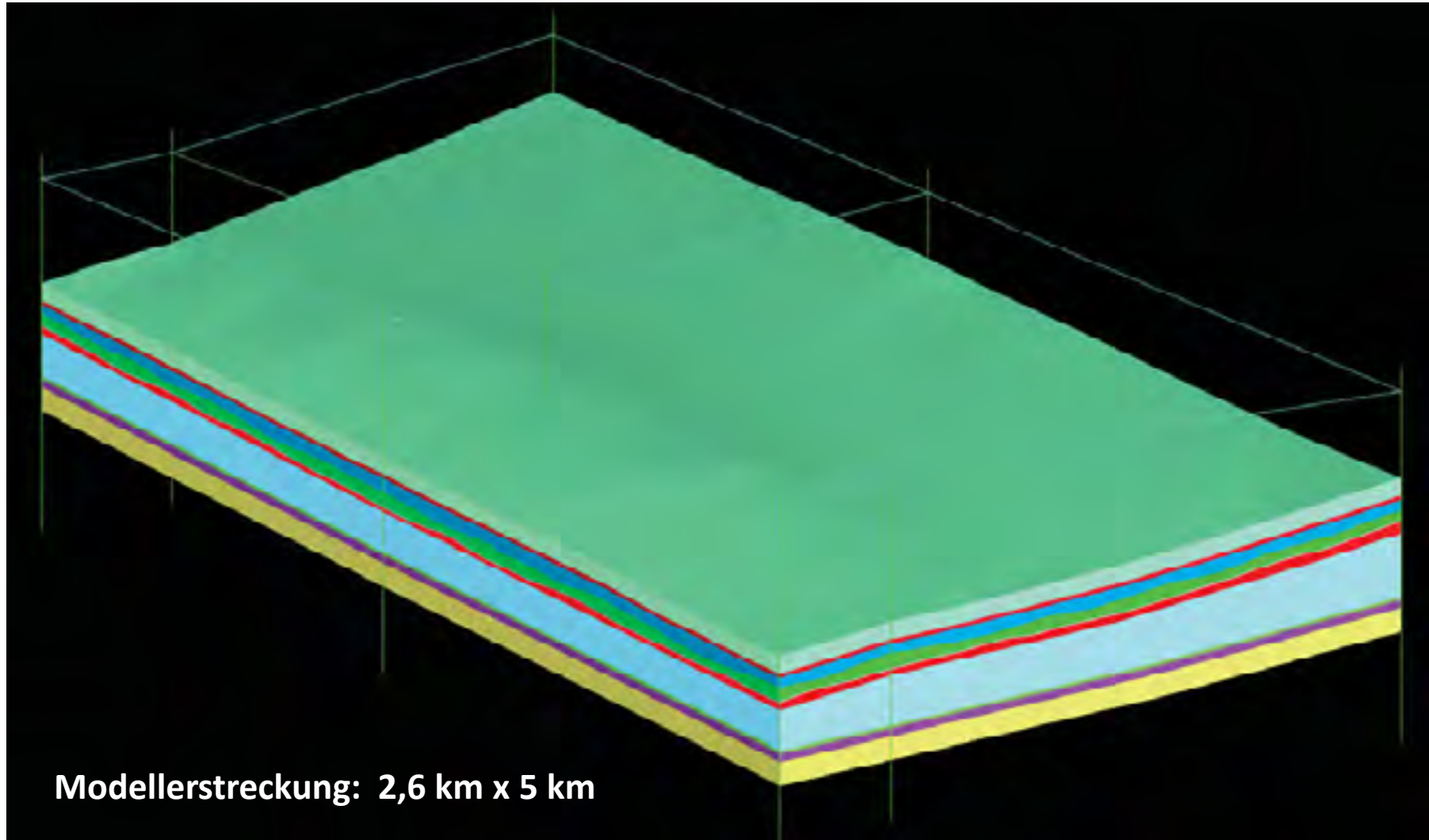
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Roter Salztun z3RO



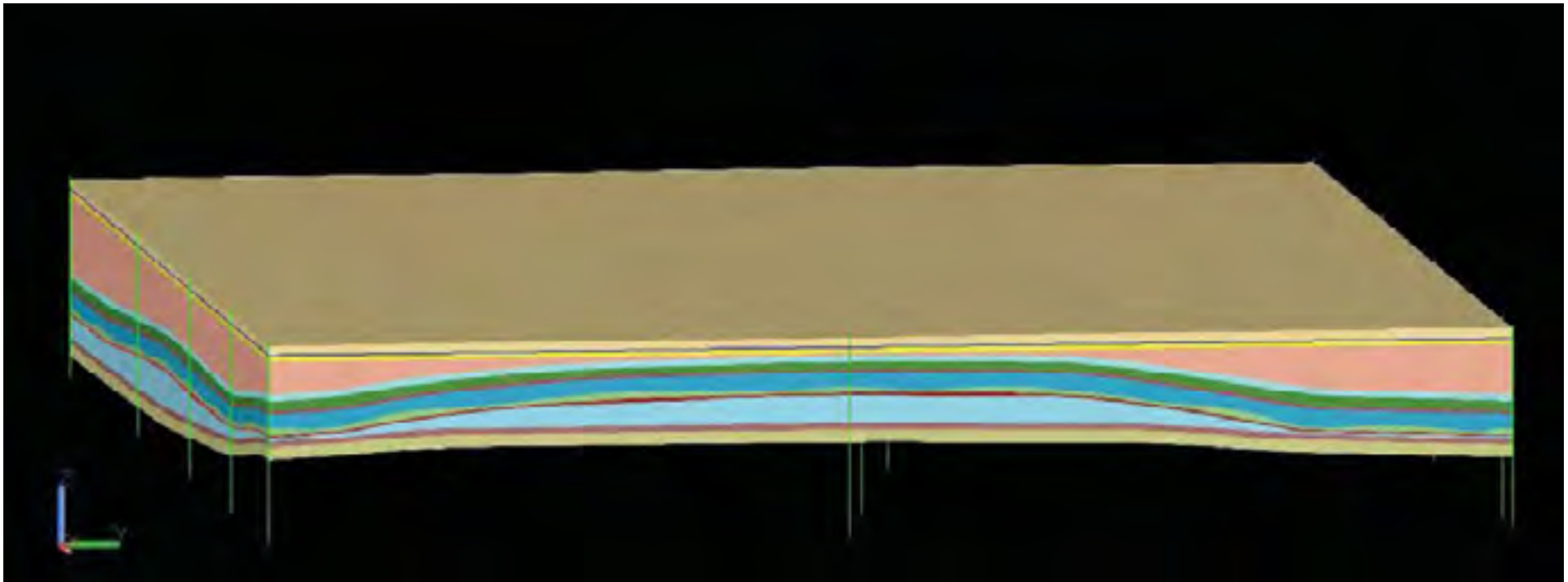
3D-Modell „Flache Lagerung“ - Modellschichtaufbau

Anhydritmittelsalz z3AM



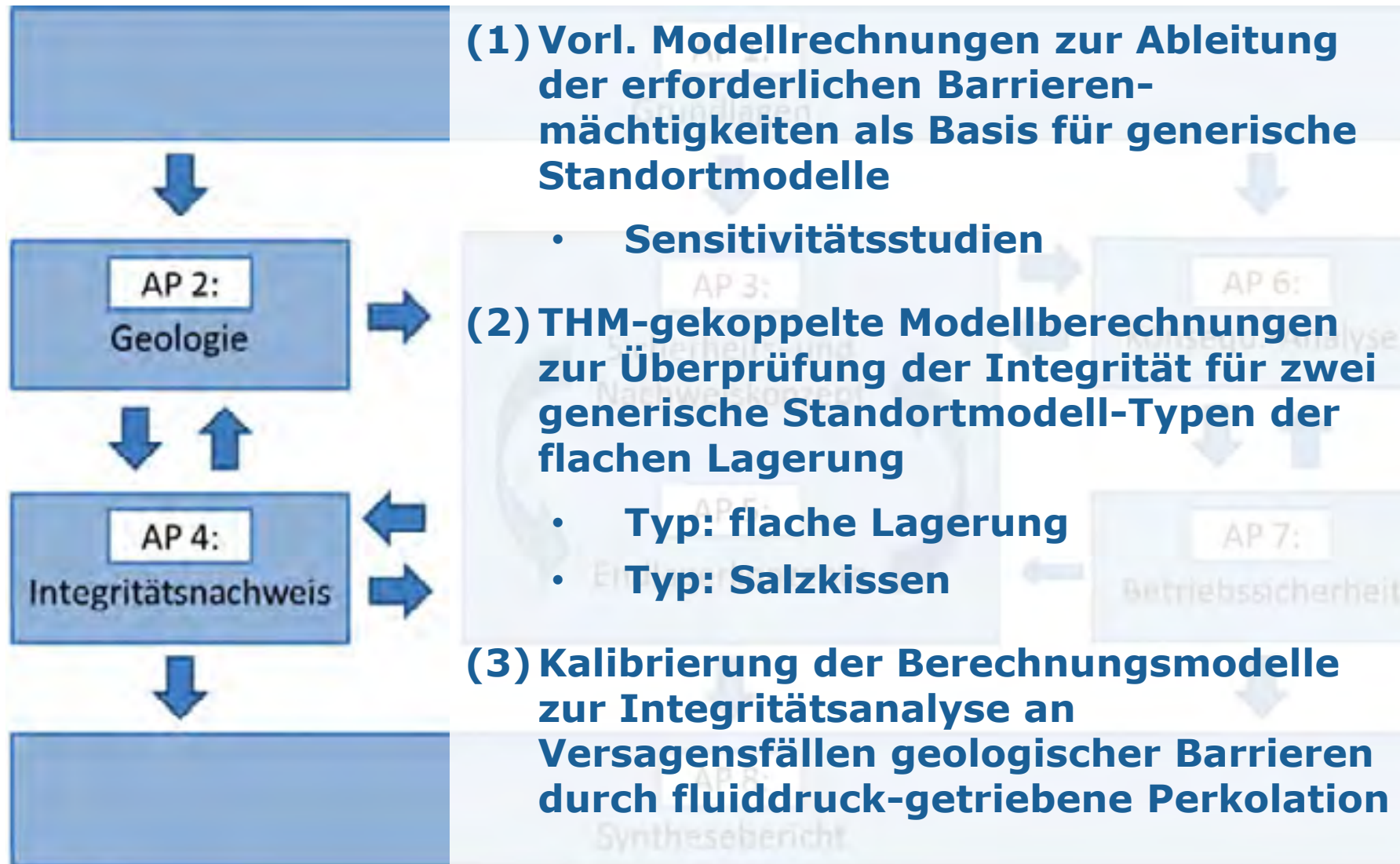
Modellerstreckung: 2,6 km x 5 km

3D-Modell „Salzkissen“ – Schichtaufbau einschließlich Deckgebirge



Modellerstreckung: 9,9 km x 12,3 km

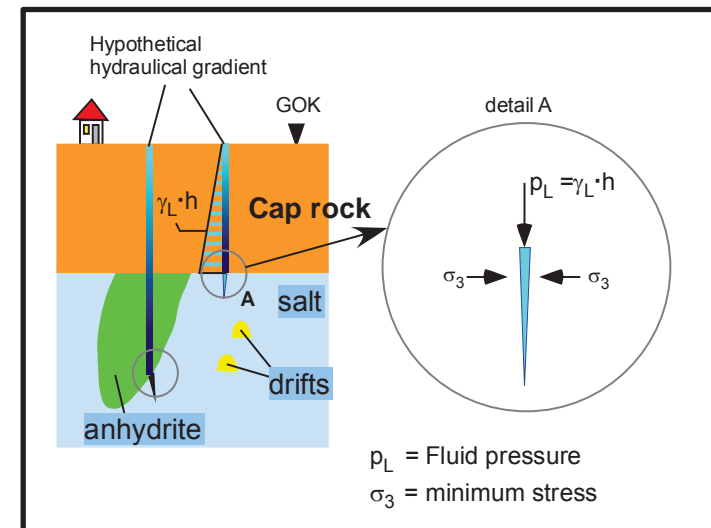
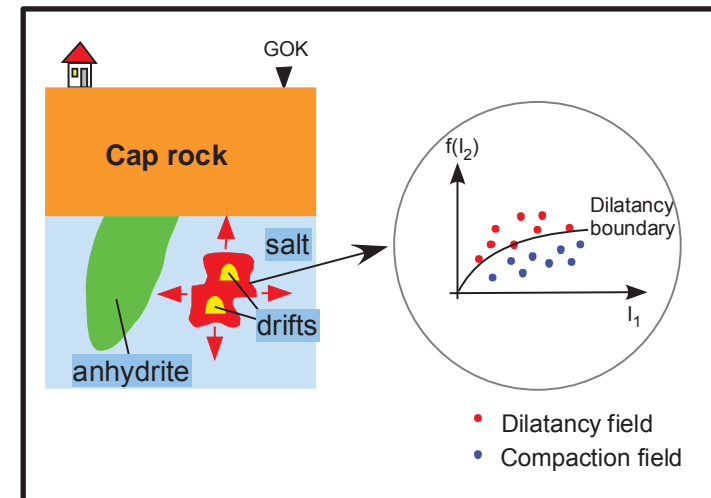
Teilziele AP4 - Analyse der geomechanischen Integrität



Integritätsnachweis – Konzept

- Permeabilität innerhalb einer Salzbarriere entsteht nur unter speziellen mechanischen oder hydraulischen Randbedingungen, wenn sich als mikro-physikalischer Prozess (Perkolation) vernetzte Wegsamkeiten ausbilden, nach Überschreitung einer kritischen Schwelle:
- Diese korrespondiert nach BMU (2010):
 - (1) unter deviatorischen Bedingungen mit der **Dilatanzgrenze** und
 - (2) unter erhöhten Fluiddrücken mit dem **Minimalspannungs- oder Fluiddruckkriterium**

⇒ **Nachweis einer ausreichenden nichtbeeinflussten Salzbarriere**



Geomechanische Modellkonzepte – Kriechen/Schädigung

BGR – Ansatz

Referenz BGRa

$$\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^{\text{cr}} = A \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma^*} \right)^n$$

Verbesserte Temperaturabhängigkeit:

$$\text{BGRb} \quad \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^{\text{cr}} = \left[A_1 \cdot e^{-\frac{Q_1}{R \cdot T}} + A_2 \cdot e^{-\frac{Q_2}{R \cdot T}} \right] \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma^*} \right)^n$$

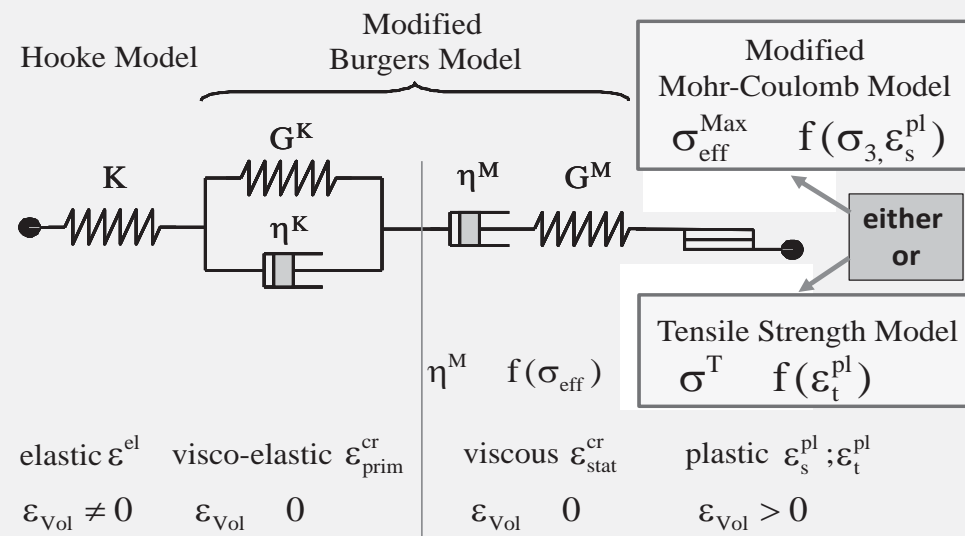
Kriechen von Kaligestein:

$$\text{BGR}_{\text{SF}} \quad C \cdot A(C^* - 1) e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma^*} \right)^{n-2}$$

Beschreibung von Schädigung:

$$\text{Rv-Konzept:} \quad \dot{\epsilon}_{ij}^{\text{dil}} = \frac{1}{3} \cdot \dot{\epsilon}_{\text{dil,vol}} \cdot \delta_{ij}$$

IfG – elasto –visko-plastischer Ansatz



- **Bewährte Modellkonzepte**
- **Wechselseitige Ergänzung bzw. Überprüfung**

Materialparameter - BGR/IfG-Zwischenbericht (2016)

Gesteinsschichten/ Geologische Einheit	Gesteinsschichten Homogenbereich	Symbol	Dichte	Teufen druck- gradient	Wärme- leitfähig- keit	Spezif. Wärme- kapazität	Wärme- ausdehnungs- koeffizient	E- modul	Poisson- zahl
			[kg/m ³]	[MN/m ³]	[W/(m·K)]	[J/(kg·K)]	[1/K]	[MPa]	[-]
Quartär	Quartär	Q	2000	0,022	2,3	950	1,00E-05	100	0,33
Tertiär	Tertiär	T	2100	0,022	2,1	905	1,00E-05	500	0,33
mittlerer Bundsandstein unterer Bundsandstein Ohre-Sedimente	Buntsandstein	S	2500	0,022	2,6	760	1,00E-05	15000	0,27
Aller-Steinsalz Roter Salztun- Pegmatitanhydrit	Aller-Steinsalz	NA4	2235	0,022	5,2	860	4,00E-05	25000	0,27
Schwadensalz / Tonmittelsalz Anhydritmittelsalz	Anhydritmittelsalz	AM3	2275	0,022	5,0	860	3,50E-05	30000	0,27
Kaliflöz Ronnenberg	Kaliflöz Ronnenberg	K3	1850	0,022	1,5	903	2,50E-05	16000	0,26
Leine-Steinsalz Hauptanhydrit	Leine-Steinsalz Hauptanhydrit	NA3 A3	2160 2700	0,022 0,022	5,2 4,2	860 860	4,00E-05 1,60E-05	25000 60000	0,25 0,25
Grauer Salztun Kaliflöz Stassfurt	Kaliflöz Stassfurt	K2	1850	0,022	1,5	903	2,50E-05	17000	0,28
Staßfurt-Steinsalz Staßfurt-Steinsalz_EB	Staßfurt-Steinsalz	NA2	2160	0,022	5,2	860	4,00E-05	33000	0,25
Basal-Anhydrit Zechstein-Karbonat	Anhydrit/Karbonat	A2/C2	2700	0,022	4,2	860	1,60E-05	30000	0,27
Sandstein Rotliegendes	Rotliegendes	R	2500	0,022	2,7	760	1,00E-05	17000	0,27

Beschreibung von Kriechprozessen – Die Herausforderung

Wie verformt sich Salz langfristig?

Randbedingungen:

Prognosezeitraum: $10^3 < \text{Zeit (Jahres)} < 10^6$
 Verformungsbetrag: $0.1 < \varepsilon < 1$
 Temperaturen: $20^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$
 Verf. Rates: $1 \cdot 10^{-17} < \dot{\varepsilon} \text{ (1/s)} < 3 \cdot 10^{-11}$

Kriech-Mechanismen:

„Pressure solution creep“ vs. **Versetzungskriechen**



grain boundary sliding, dissolution precipitation, no Xtal plasticity



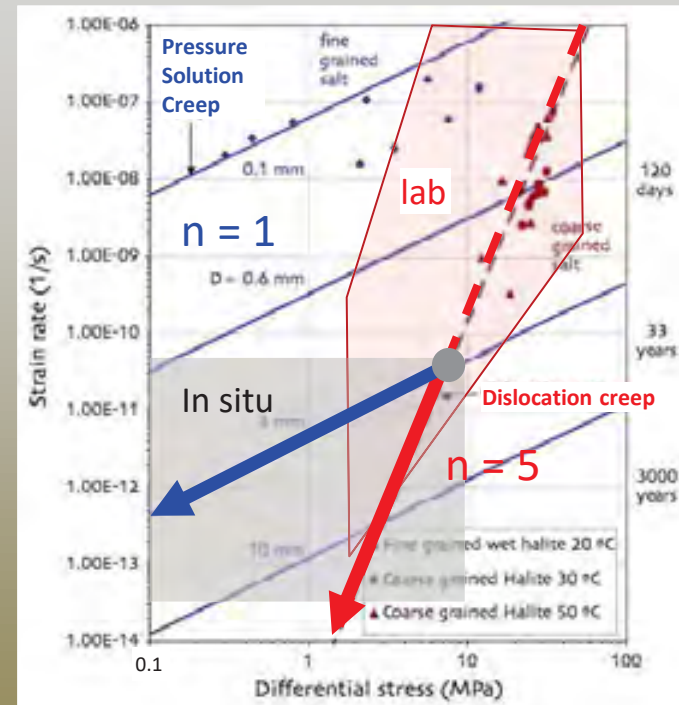
dislocations, subgrains

water assisted dynamic recrystallization



Experimentelle Versuchsdauer ist begrenzt!

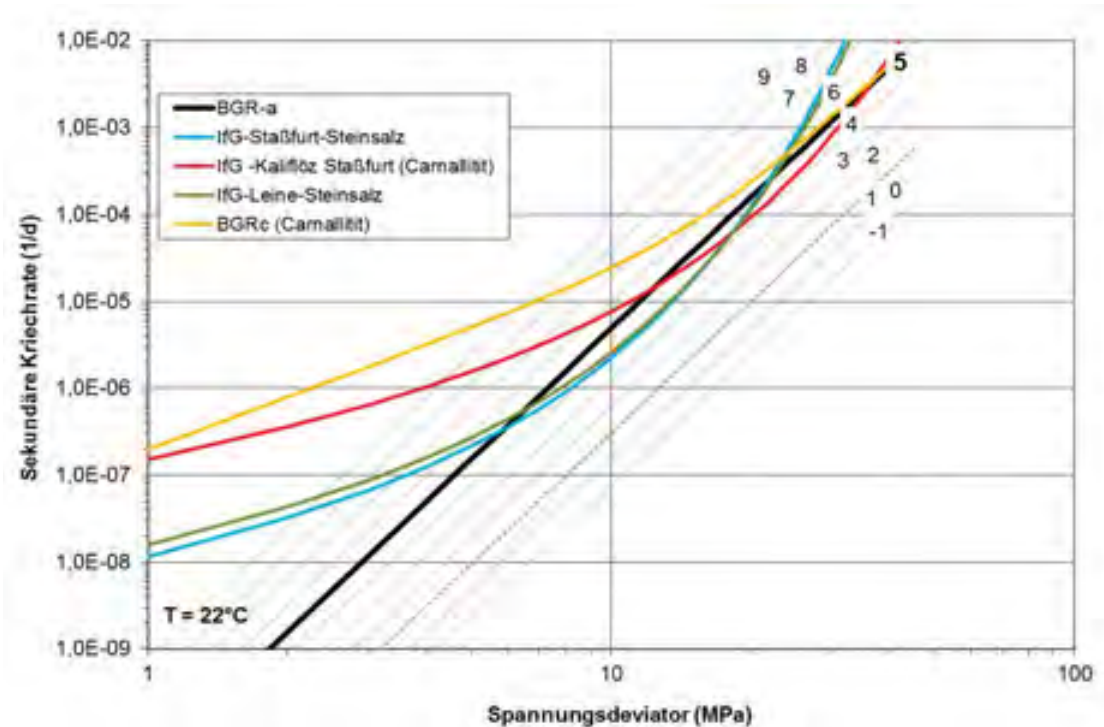
Deformation-Mechanismus Karte



Nach Urai, 2012

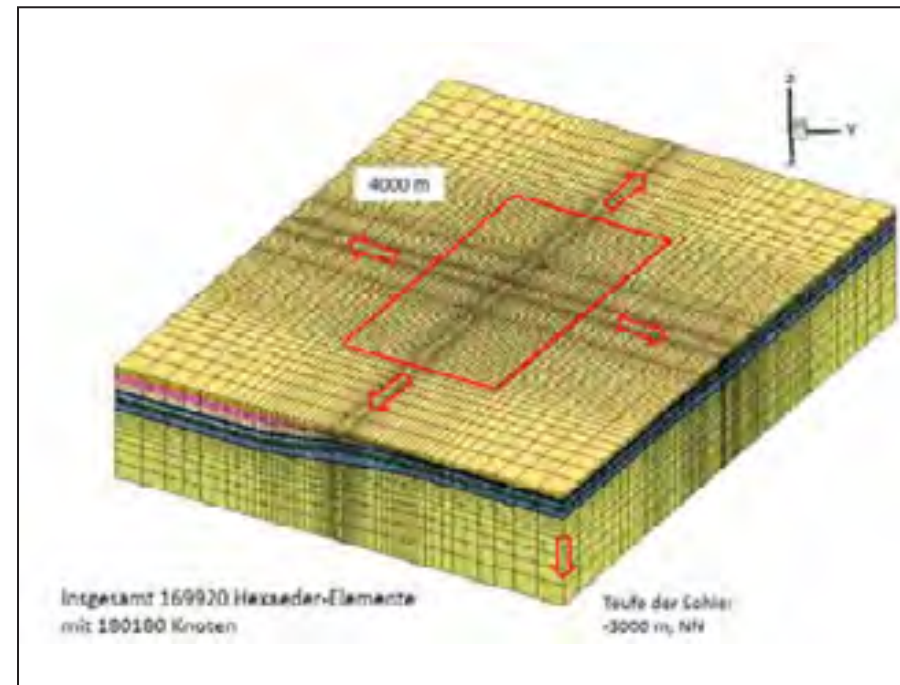
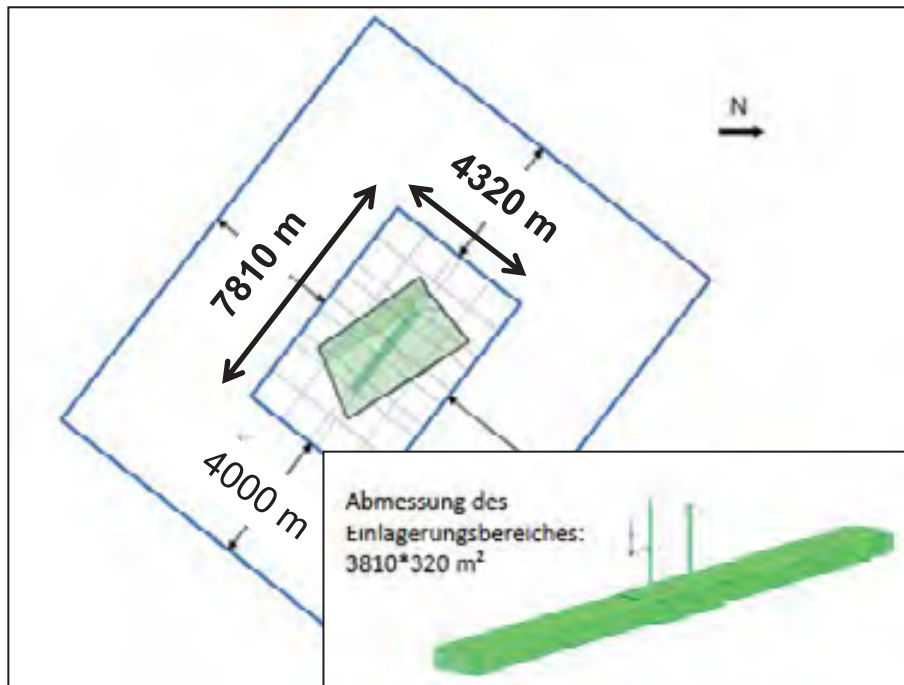
Vorgehensweise KOSINA

- **IfG:** Exponentialansatz für Stein- bzw. Kalisalz
- **BGR:**
 - BGR_a für Steinsalz ⇒ Referenz Morsleben
 - BGR_{SF} für Carnallit



Stratigraphie	Empfehlung Klasse			BGR _a * Faktor			
	tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch	
z2HS	2	4	7	1/8	1/2	4	Ostfeld
Z3LS	2	5	6	1/8	1	2	Zentralteil

3D-Modellaufbau – Thermo-mechanische Modellrechnungen (BGR)



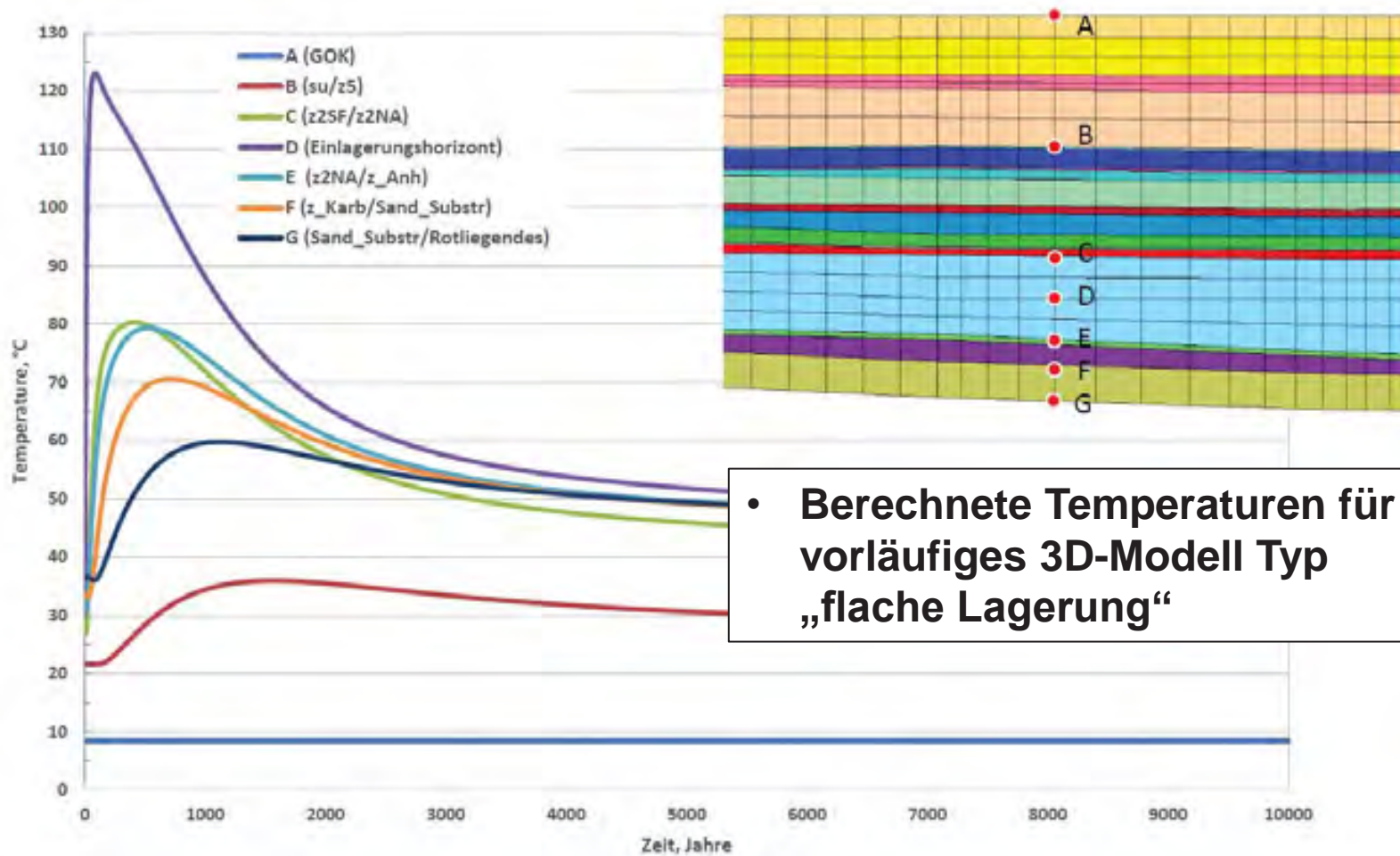
Entwicklung eines großräumigen 3D-Modells

→ **Untersuchung Fernfeldeffekte**

JIFE

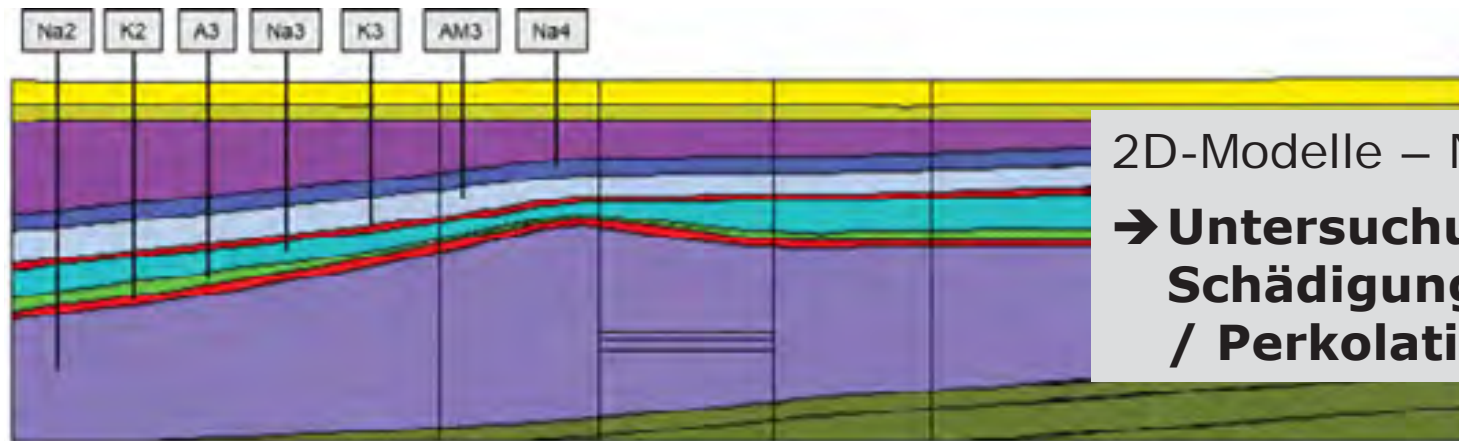
- FEM-Programm für THMC-Berechnungen,
- Entwicklung für Spezialanforderungen der BGR (Stoffgesetze, große 3D-Strukturen, lange Berechnungszeiträume, gekoppelte Prozesse, etc.),
- Steuerung des Berechnungsablaufs,
- Berechnungsauswertung.

Kalibrierung – Thermo-mechanische Modellrechnungen (BGR)



- Berechnete Temperaturen für vorläufiges 3D-Modell Typ „flache Lagerung“

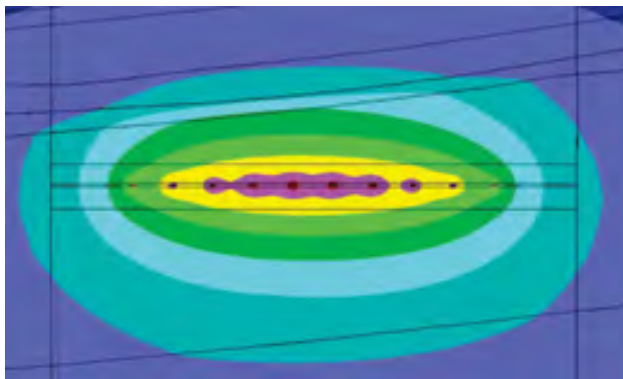
Kalibrierung – Thermo-mechanische Modellrechnungen (IfG)



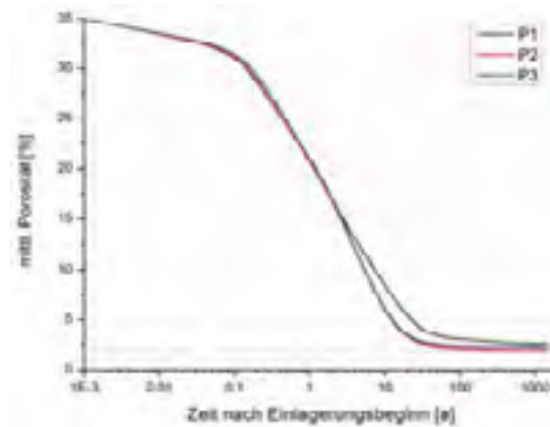
2D-Modelle – Nah-/Fernfeld
→ **Untersuchung von
Schädigungsprozessen
/ Perkolat**

- 2D-Modell „Salzkissen“ mit expl. Berücksichtigung von Einlagerungsstrecken und –behältern (ITASCA-code UDEC)

➤ Temperaturentwicklung an Behälteroberfläche

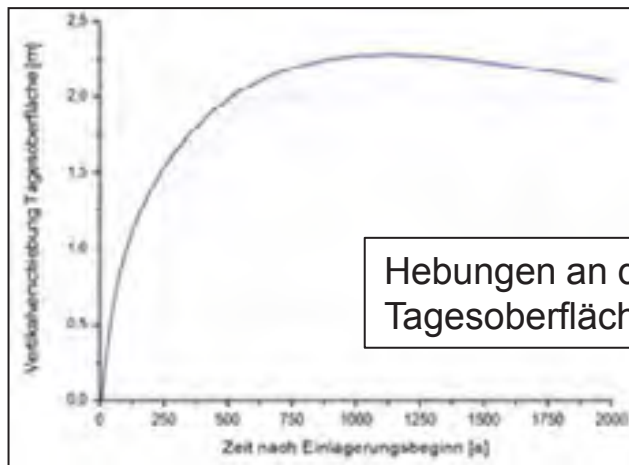
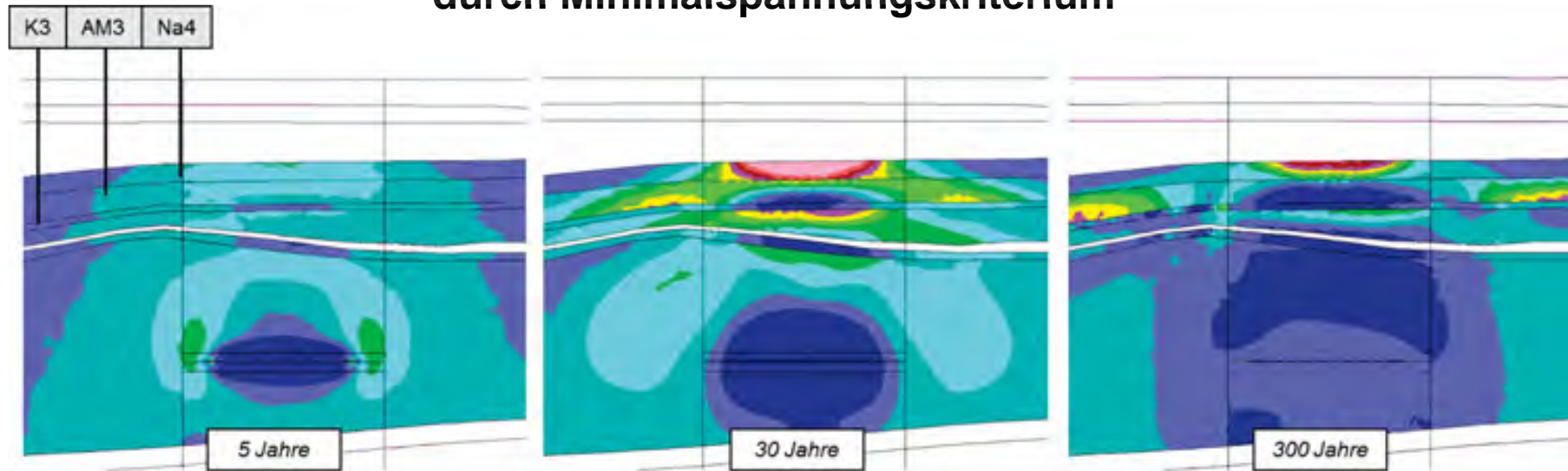


➤ Modellierung Versatzkompaktion



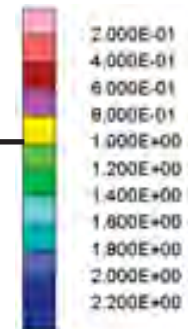
Vorläufige Ergebnisse – Barrierenintegrität Salzkissen (IfG)

- **2D-Modell: Bewertung Barrierenintegrität kontinuums-mechanisch durch Minimalspannungskriterium**



Hebungen an der Tagesoberfläche

Minimalspannungskriterium S
(Verletzung bei $S < 1$)



Stand der Bearbeitung / Ausblick

- ✓ **Die geologischen Grundlagen liegen vor**
 - Beschreibung des Kenntnisstandes zur Verbreitung salinar geprägter Schichtenfolgen in Deutschland
 - Ableitung der Randbedingungen für die Erstellung der generischen geologischen Modelle / Zusammenstellung THM-Parameter
- ✓ **Entwicklung generischer geologischer 3D-Referenzmodelle ist abgeschlossen**
 - Flache Lagerung - Salzmächtigkeit: 150 m – 265 m
 - Salzkissen - Salzmächtigkeit: 200 m – 600 m
- **Analyse der mechanischen Integrität wurde begonnen**
 - BGR + IfG: Aufbau der Modelle “Flache Lagerung” / “Salzkissen” für THM-Berechnungen
 - Kalibrierungsrechnungen / vorläufige Nachweisrechnungen
 - **Wegen höherer Salzmächtigkeit Vorteile Typ “Salzkissen” gegenüber Typ “Flache Lagerung”**
- ❖ **Durchführung Integritätsanalysen (u.a. Perkolationsrechnungen zur Fluidausbreitung)**
- ❖ **Intensivierung der Zusammenarbeit mit US-Kollegen zur Flachen Lagerung**

Vielen Dank!



unter den
FKZ 02E11395 (BGR)
FKZ 02E11405A (DBE)
FKZ 02E11405B (GRS)
FKZ 02E11405C (IfG)

Unseren Kollegen:

BGR Ralf Eickemeier
Sandra Fahland
Tatjana Kühnlitz
Wenting Liu
Eike Völkner

DBETec Niklas Bertrams
Wilhelm Bollingerfehr
Sabine Dörr
Wolfgang Filbert
Eric Simo

GRS Dieter Buhmann
Jonathan Kindlein
Jörg Mönig
Jens Wolf

IfG Markus Knauth
Wolfgang Minkley
Dirk Naumann

Technisches Endlagerkonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallinformation in Deutschland

Müller-Hoeppe¹, N.; Becker², D.-A.; Hammer³, J.; Jahn³, S.; Jobmann¹, M.; Lommerzheim¹, A.; Noseck², U.; Krone¹, J.; Weber³, J. R.; Weitkamp³, A.; Wolf², J. W.

¹DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine ²Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), Braunschweig
³Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover

In Schweden und Finnland liegt ein ausführungsreifes technisches Konzept – das KBS-3-Konzept – zur Endlagerung Wärme entwickelnder, hochradioaktiver Abfälle in einer Kristallinformation (Granit) vor. Es besteht darin, die radioaktiven Abfälle als ganze Brennelemente in Kupferbehältern sicher einzuschließen, die durch sie umgebende Bentonitpuffer vor mechanischen Beschädigungen geschützt werden und die weiterhin das chemische Milieu stabil halten. Bei der Anzahl von 6.000 Behältern, die in Schweden endgelagert werden sollen, wird das Versagen eines einzelnen Behälters mit unerkanntem, aber maßgeblichem Fertigungsfehler angesetzt, der die Ursache für die Freisetzung von Radionukliden ist. Die daraus resultierende, potenzielle Individualdosis bzw. das daraus resultierende Risiko führen nicht zu einer Überschreitung der einzuhaltenden Richtwerte im Nachweiszeitraum.

Im FuE-Vorhaben CHRISTA wird u. a. geprüft, ob das KBS-3-Konzept auf deutsche Verhältnisse übertragbar ist.

Aufgrund der in Deutschland vorhandenen MOX-Brennelemente ist die Einlagerung ganzer Brennelemente nicht möglich, da schon ein einziges dieser Brennelemente u. U. dazu führt, dass die Auslegungstemperatur von 100 °C an der Behälteroberfläche überschritten wird. Deshalb wurde die in Deutschland getestete Brennstabkockille (BSK), in die gezogene Brennstäbe und MOX-Abfälle eingebracht werden können, als Basis gewählt. Analog zum KBS-3-Behälter wird die BSK mit einem Kupfermantel nach finnisch/schwedischer Ausführungsart versehen. Daraus ergibt sich ein Behälterkonzept, dessen Behälter kleiner und leichter sind, als die in Schweden und Finnland. Damit ist gewährleistet, dass die Behälter eingelagert werden können. Wie in Schweden bereits erprobt wurde, können auch die Bentonitformteile (Bentonitringe), aus denen der Puffer hergestellt wird, produziert und eingebaut werden. Allerdings ergibt sich aus dem deutschen Abfallmengengerüst und der Endlagerauslegung in Deutschland eine Anzahl von ca. 15.000 Endlagerbehältern, die endgelagert werden müssen.

Ein weiterer und wesentlicher Unterschied besteht zwischen den deutschen und den schwedischen Sicherheitsanforderungen, wie der Vergleich in der Tabelle zeigt.

Tabelle: Zusammenstellung von maßgeblichen Unterschieden in den Sicherheitsanforderungen in Deutschland und Schweden/Finnland

Deutschland	Schweden/Finnland
Rückholbarkeit in der Betriebsphase	Erprobt, aber keine Anforderung
Bergbarkeit in einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers	Keine Anforderung
Nachweiszeitraum 1.000.000 Jahre	Nachweiszeitraum 100.000 Jahre
Ausweisung eines ewG, Bewertung der Freisetzung am Rand des ewG	Bewertung der Freisetzung mittels Individualdosis bzw. individuellem Risiko, kein ewG erforderlich

Vor dem Hintergrund der Unterschiede zwischen Schweden/Finnland und Deutschland wurden mögliche technische Optionen, mit denen auf die deutschen Sicherheitsanforderungen unter grundsätzlicher Nutzung des KBS-3-Konzeptes reagiert werden kann, zusammengestellt. Es ergaben sich die zwei möglichen Optionen „überlagernder ewG“ (Typ Bb) und „multipler ewG“ (Typ M), aus denen die Konzeptvariante mit einem ewG-Typ M weiter betrachtet wurde, wobei orientierende Berechnungen zeigten, dass bei Integrität des ewG-Typ M eine Freisetzung von Radionukliden wenig wahrscheinlich ist. Zur Vervollständigung des ewG sind geotechnische Barrieren erforderlich, die höheren Anforderungen genügen müssen als die in Schweden und Finnland vorgesehenen Barrieren zum Verschluss der Einlagerungsstrecken. Erste technische Konzepte zum Verschluss eines ewG im Kristallin wurden entwickelt und erscheinen erfolgshöflich.

Technisches Endlagerkonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallinformation in Deutschland

Ergebnisse aus dem Vorhaben CHRISTA unter Einbezug des Gutachtens Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde hoch radioaktive Abfälle

Müller-Hoeppe¹, N., Becker², D.-A., Hammer³, J., Jahn³, S., Jobmann¹, M., Lommerzheim¹, A.,
Noseck², U., Krone¹, J., Weber³, J. R., Weitkamp³, A., Wolf², J. W.

¹DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

²Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), Braunschweig

³ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover



== Aufgabe ==

AP 2: Prüfung der Übertragbarkeit des KBS-3-Konzeptes

Behälterkonzept

Es wird geprüft und bewertet, inwieweit das KBS-3-Behälterkonzept vor dem Hintergrund des Deutschen Abfallinventars angewendet werden kann. Dies soll insbesondere vor dem Hintergrund der endzulagernden MOX-Brennstäbe und dem Problem der Kritikalität sowie erforderlicher Zwischenlagerzeiten erfolgen.

Einlagerungskonzept

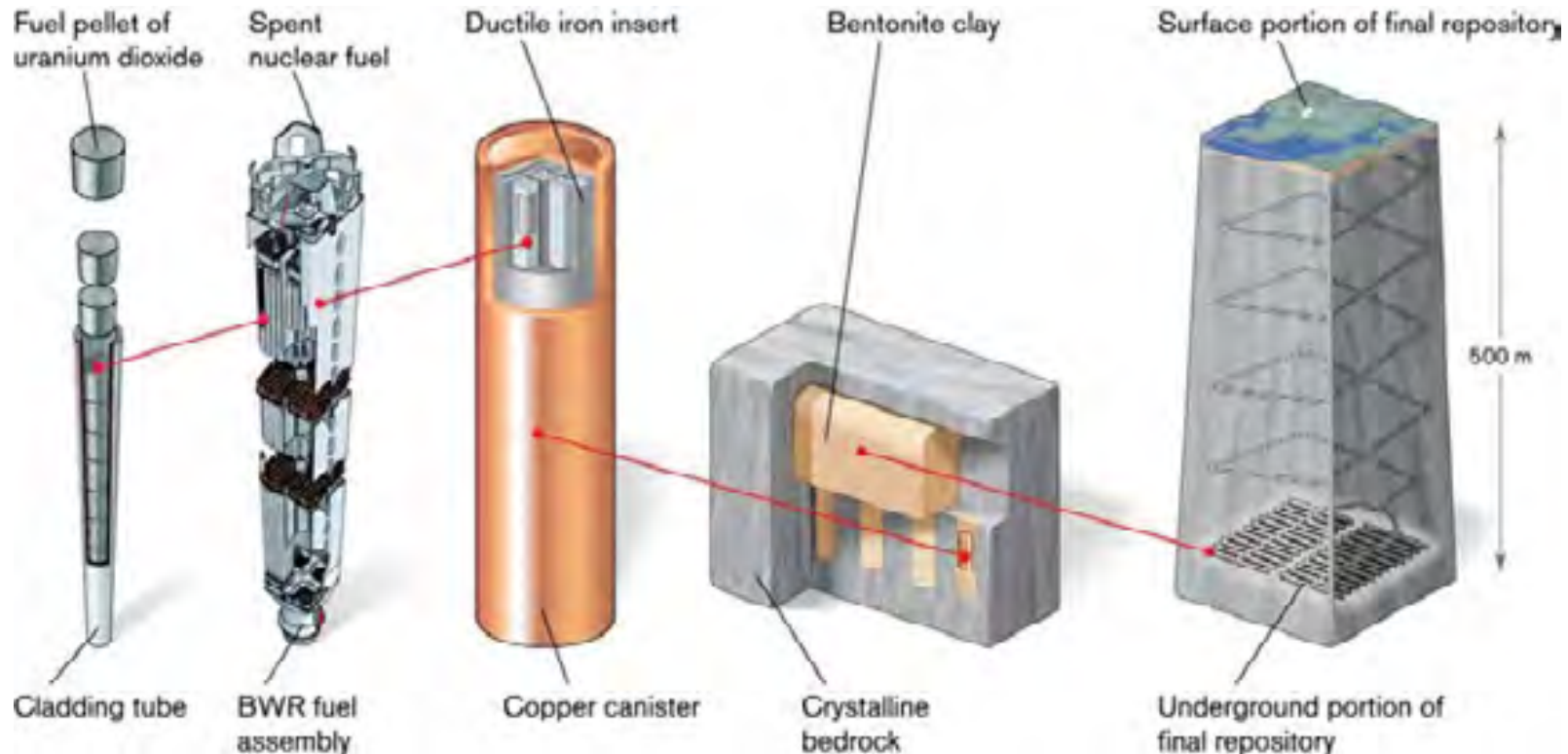
Es wird qualitativ geprüft und bewertet, inwieweit das KBS-3-Einlagerungskonzept vor dem Hintergrund des Deutschen Abfallinventars, des Raumbedarfs und der verfügbaren geologischen Gegebenheiten angewendet werden kann. Eventuell notwendige Anpassungen, die sich aus der Bearbeitung des AP1 ergeben, werden beschrieben.

Barrierenkonzept

Es wird qualitativ geprüft und bewertet, inwieweit das KBS-3-Barrierenkonzept vor dem Hintergrund des Deutschen Abfallinventars und der verfügbaren geologischen Gegebenheiten angewendet werden kann. Diese Prüfung beinhaltet zum einen die verfügbaren Materialien für einen Buffer sowie dessen Fertigungsformen und Einbaukonzeptionen. Zum anderen betrifft dies die Materialien und Bauformen von Strecken- und Schachtverschlüssen sowie das Zusammenwirken aller Barrierekomponenten mit Blick auf das Sicherheits- und Nachweiskonzept.

Granit: KBS-3-Konzept

Technisches Endlagerkonzept



Sicherheitskonzept

Quelle: SKB

- Behälter schließen radioaktive Abfälle ein
- Puffer dient mechanischem Schutz der Behälter und der Stabilisierung des geochemischen Milieus
- Begrenzte Freisetzung infolge unerkannter Fertigungsfehler (mind. 1 Behälter)

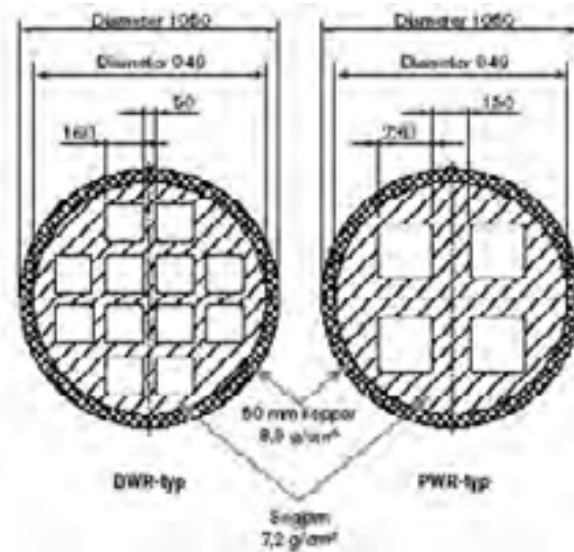
== KBS-3-Konzept: Einschluss im Kupferbehälter ==



SWR-BE

WWER-440 SF

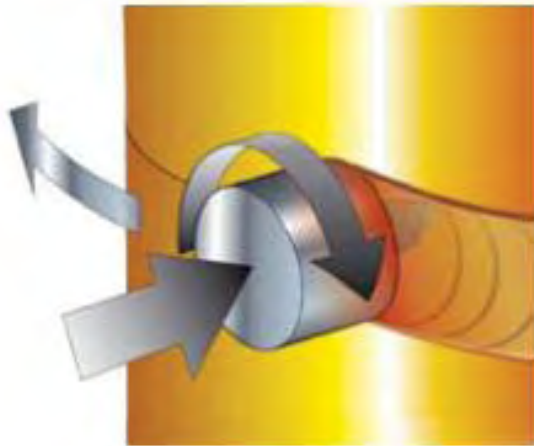
EPR/DWR-SF



Quelle: SKB



== KBS3-Konzept: Schweißnaht des Kupferbehälters ==



Reib(rühr)schweißen - FSW



Allmähliches Herausziehen des Dorns

Quelle: SKB

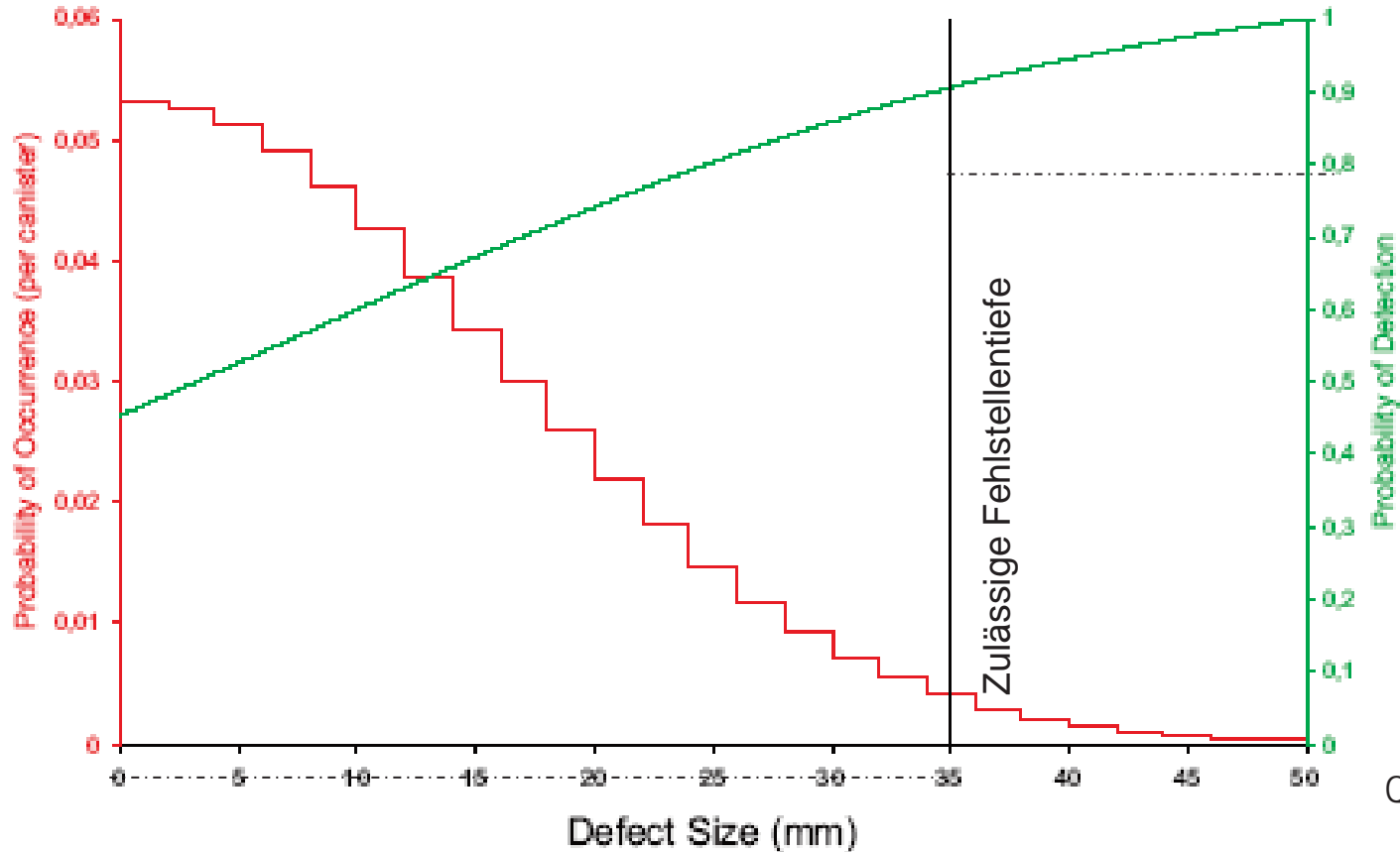


Schweißnahtgefüge



== KBS3- Konzept: Zuverlässigkeit der Schweißnaht ==

Ultraschallprüfung → Auflösung begrenzt



Versagenswahrscheinlichkeit: $p_f < 0,004 \cdot 0,009 = 3,6 \cdot 10^{-4}$ → guter Wert für Prototypen

Üblicher Ansatz $p_f < 1 \cdot 10^{-3}$

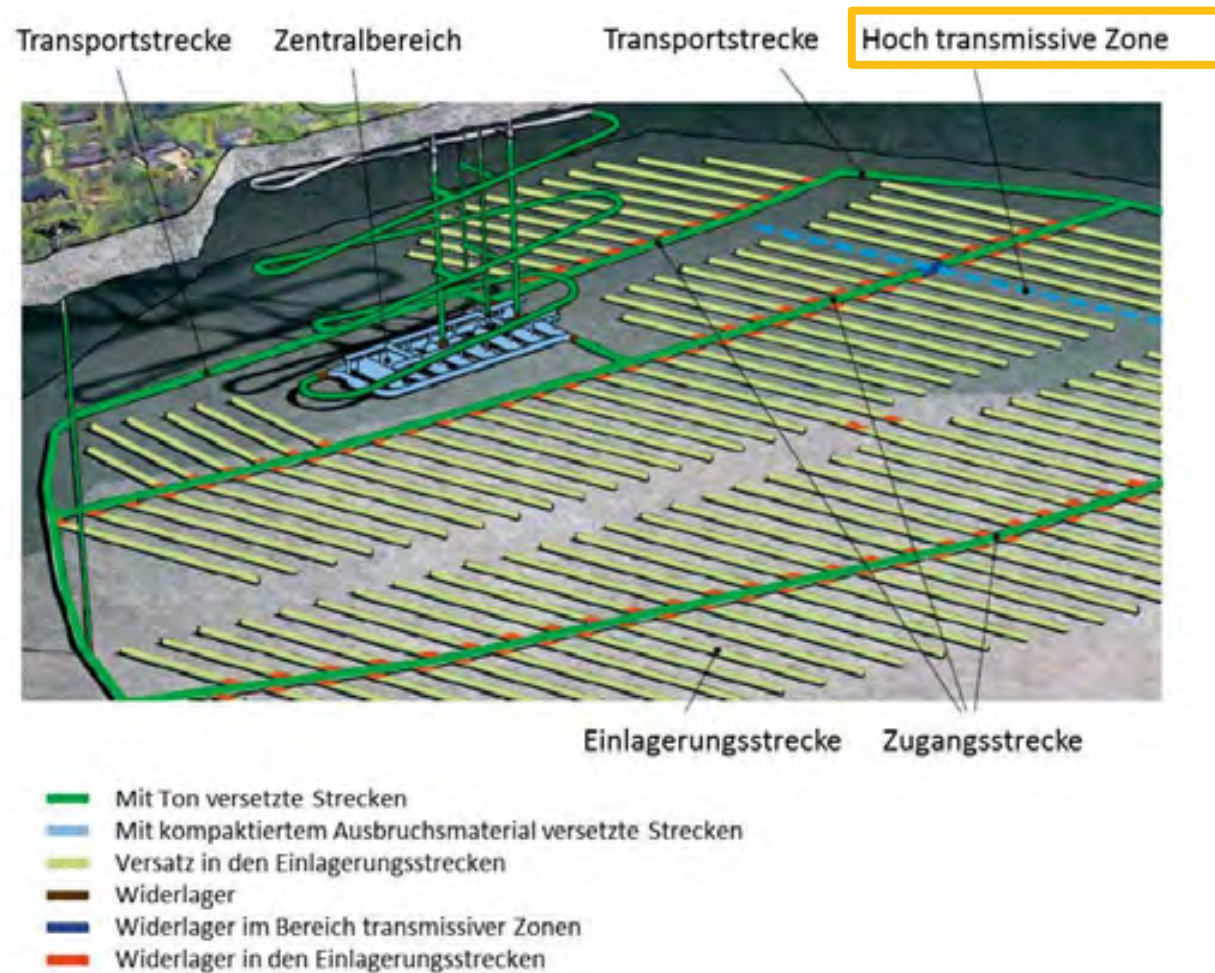
Entscheidend: Wieviele Behälter werden eingelagert? → ca. 6000 in Schweden

KBS-3-Konzept: Puffer



Fertigung, Handhabung und Einbau des Puffers sind erprobt

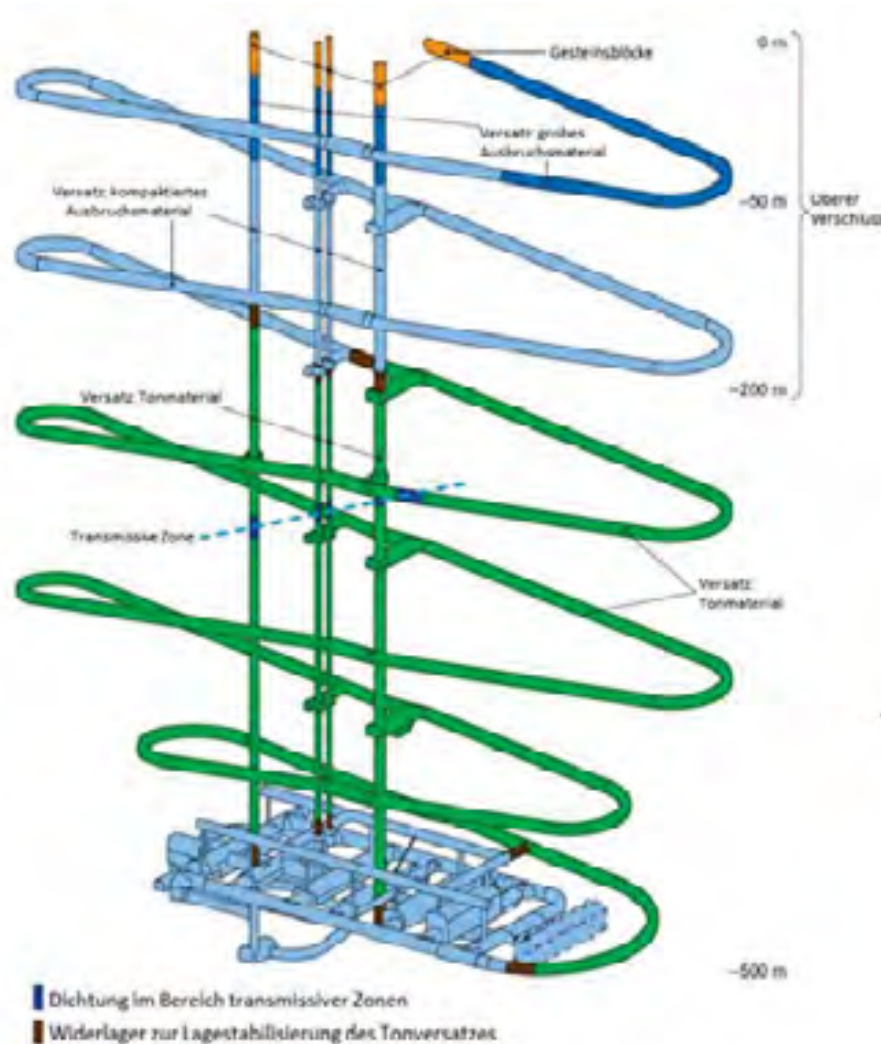
== KBS-3-Konzept: Verfüll- und Verschließkonzept ==



Quelle: SKB

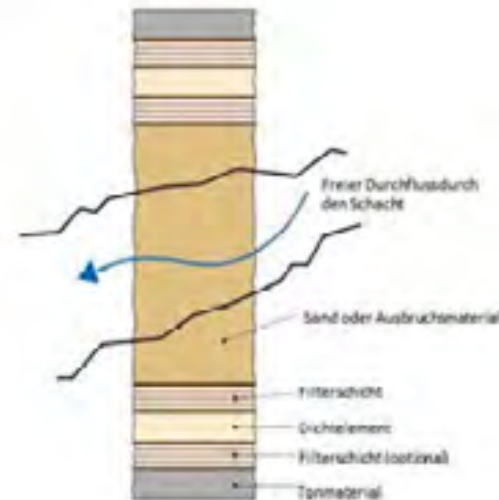
- Bedeutung geotechnischer Barrieren ist gering → keine langzeitliche Einschlussfunktion
- Funktionsdauer beschränkt auf Betriebsphase

== KBS-3-Konzept: Verfüll- und Verschleißkonzept ==



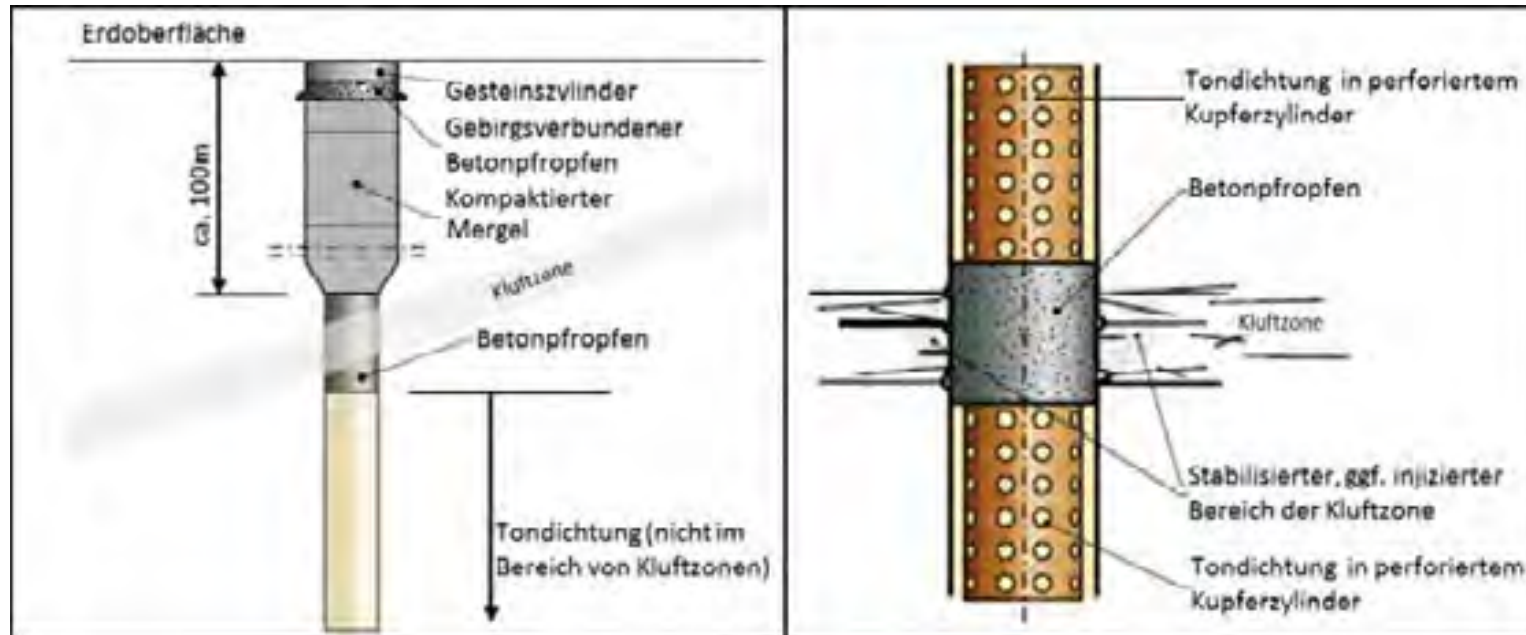
Verhinderung menschlichen Eindringens

Erhaltung der vorhandenen hydraulischen Fließwege



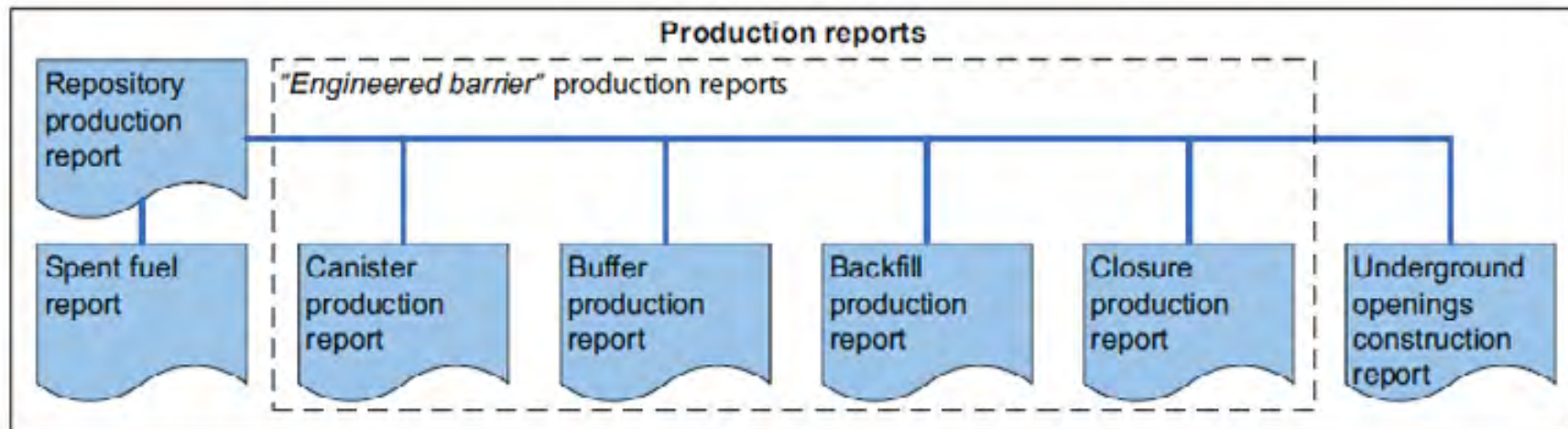
Quelle: SKB

== KBS-3-Konzept: Verschluss Erkundungsbohrungen ==



Quelle: SKB

== KBS-3-Konzept: Production Reports ==



Quelle: SKB

- Planungsvorgaben
- Referenzkonzept
- Konformität des Referenzkonzeptes mit den Planungsvorgaben
- Geplante Herstellung und ggf. Bauablauf
- Anfangszustand als Ergebnis der Herstellung (as built data) in Bezug auf die Eigenschaften, die für die Sicherheitsfunktion maßgeblich sind

→ Verknüpfung von Langzeitsicherheitsanalyse und technischer Herstellbarkeit/Nachweisbarkeit einschließlich Bauablauf

Prüfung Übertragbarkeit - Vorgehensweise

Abfallart	Abfallcode	Endlagerfähigkeit	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennstäbe	UWV	CASTOR® 3112	736
	SWV	CASTOR® 3152	300
	SWER-DWR	CASTOR® 44334	81
Summe ab Castorstationen		-	1087 (= 1000)
CND-V	HRYVNC (F)	CASTOR® HW 2528 00	108
		CASTOR® HW 2528 00 TN 90 TN 90 U	
	Setabw (LH) (UK) (UK HW)	CASTOR® HW 2528	21
	NEK (D) (HW HW)	CASTOR® HW 2528 00	5
CAC-B	ARFV8 NC (F)	CASTOR® HW 2528	5
CAC-C	ARFV8 NC (F)	FOCUS	152
Summe: Wiederaufbereitungsabfälle		-	291
Ausgediente Reaktorabfälle	SWV	CASTOR® 3112/3152	1036
	SWV 2	CASTOR® 3112	4
Mit Versuchs- und Forschungsreaktoren	SWV 2	CASTOR® 3112	30
	SWV 2	CASTOR® 3112	30
	SWV 2	CASTOR® 3112	30
Summe		-	1511 (= 1471)

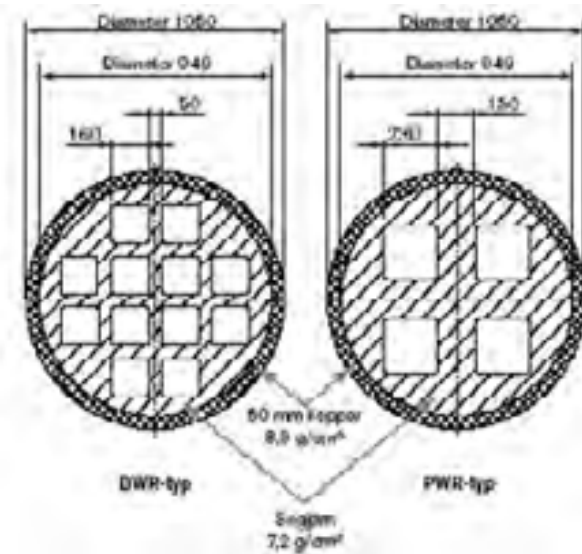
Quelle: VRS
Anfrage zum Gültigkeit



Schrittweises Vorgehen – Was ist anders?

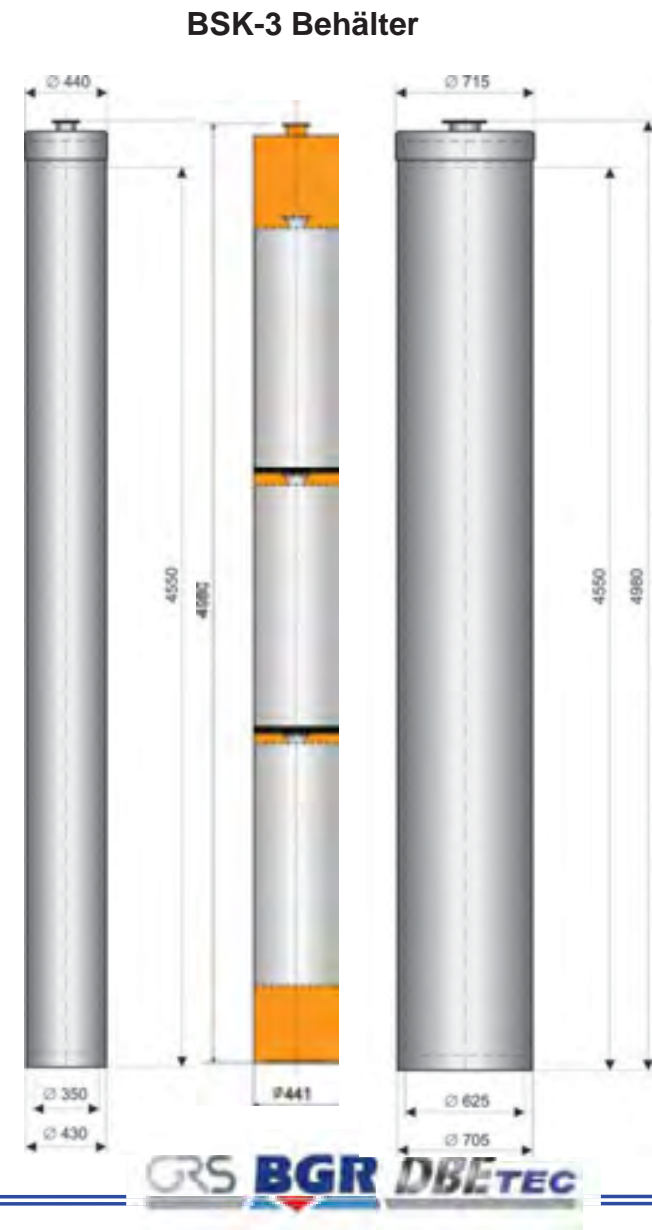
- Abfallmengengerüst
- Betriebssicherheitliche Anforderungen bei der Einlagerung
- Sicherheitsanforderungen des BMU
 - Rückholbarkeit in der Betriebsphase
 - Bergbarkeit in einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers
 - Nachweiszeitraum 1 000 000 Jahre
 - Ausweisung eines ewG (Wirtsgesteine Ton und Salz)
- Neu: „Kommissionsbericht“ Einbezug von Kristallingestein in Deutschland

= 1. Schritt: Abfallmengegerüst - Behälterkonzept

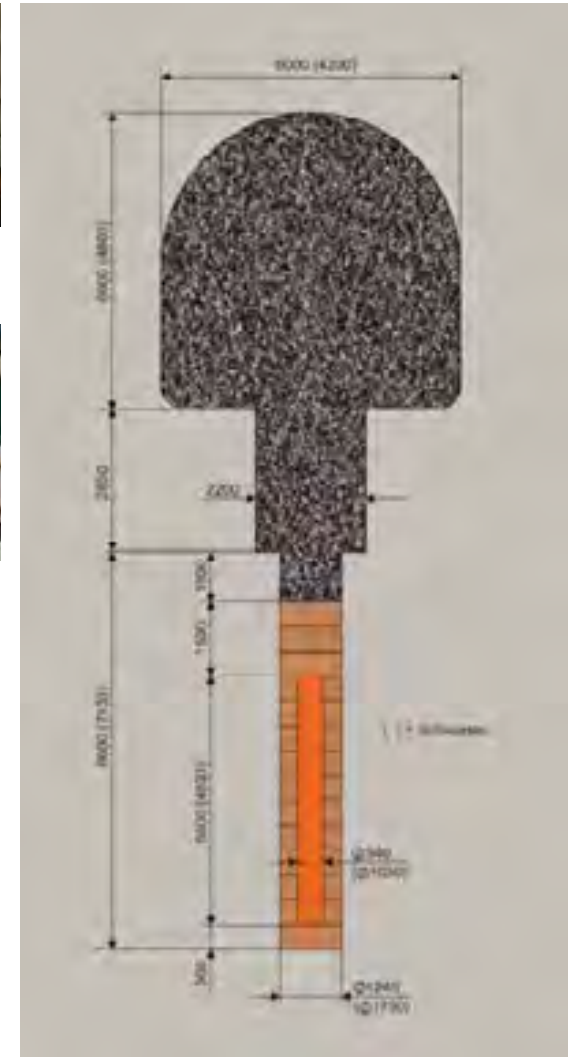
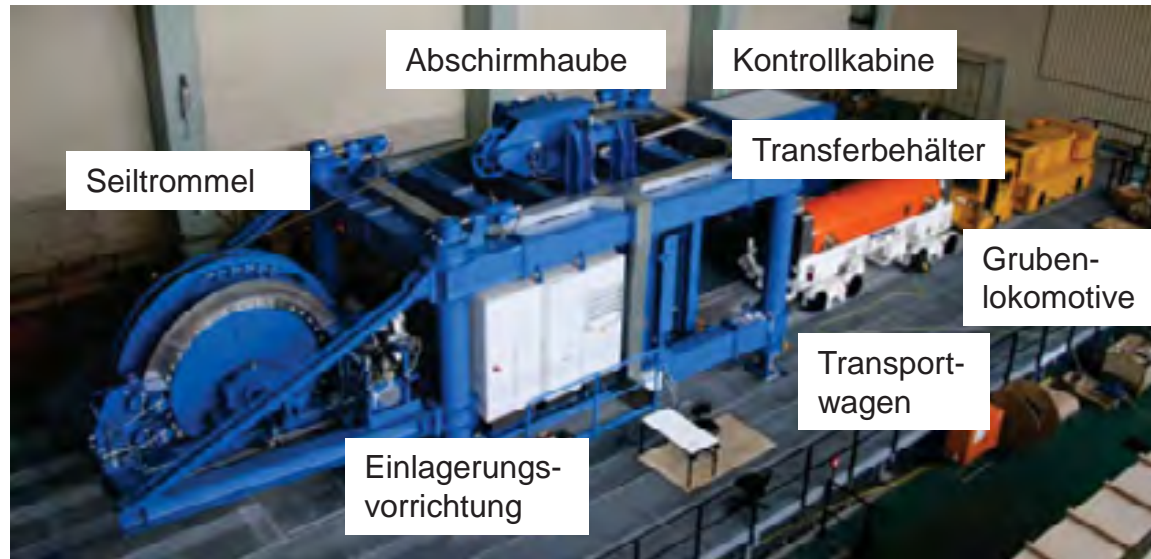


1 MOX-BE führt zur Überschreitung von 100 °C an der Behälteroberfläche (Temperaturgrenzwert)

- Einlagerung von Brennstabgemischen
- Nutzung des BSK-3 Behälters mit Kupferhülle → BSK-Cu
- Äußere Abmessungen ~ gleich oder kleiner als KBS-3-Behälter
- Gewicht ist geringer als der KBS-3-Behälter
- Einlagerung der BSK-Cu ist möglich



= 2. Schritt: Einlagerungstechnik Bohrlochlagerung



Einlagerungstechnik der BSK-3 ist gemäß deutschen Vorschriften erprobt

→ Die Modifikation BSK-Cu ist gering

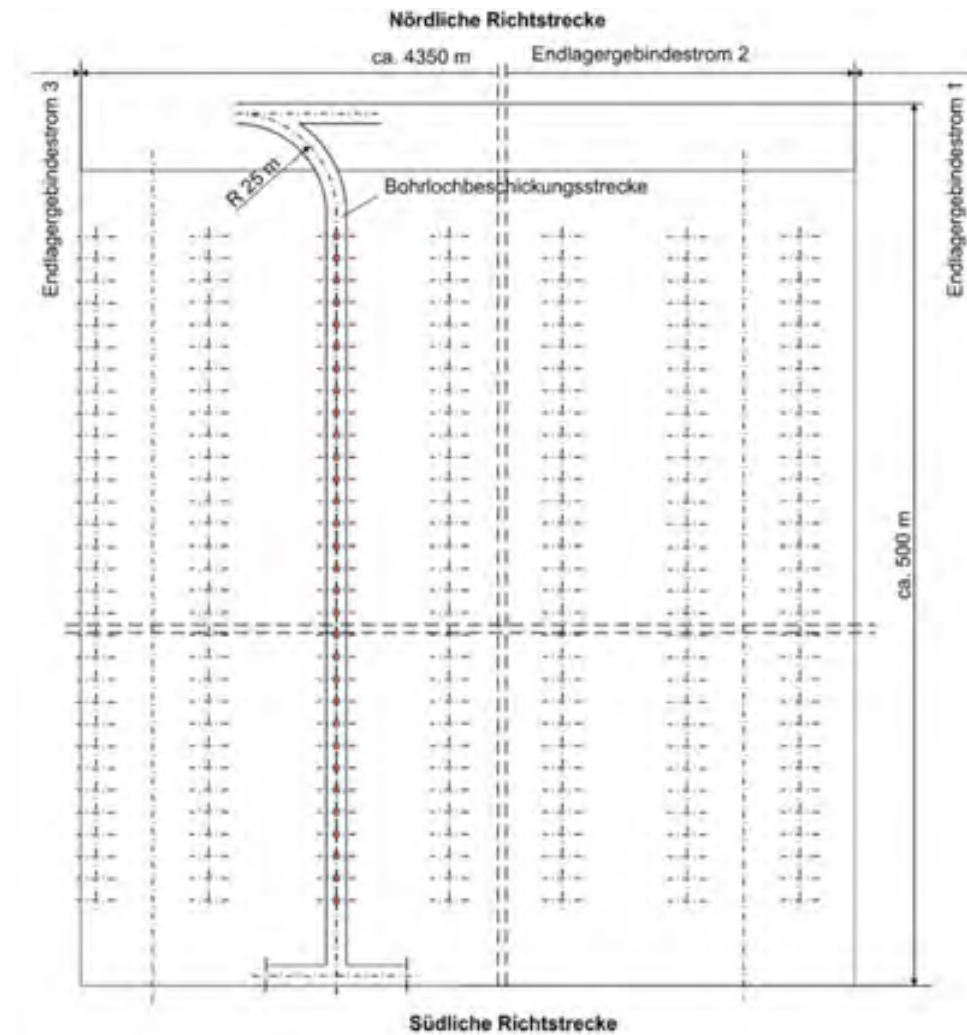
→ Die BSK-Cu kann eingelagert werden

→ Der Einsatz der in Deutschland genehmigungsfähigen Einlagerungstechnik führt nur zu geringfügiger Modifikation der Abmessungen von Einlagerungsstrecke und -bohrloch

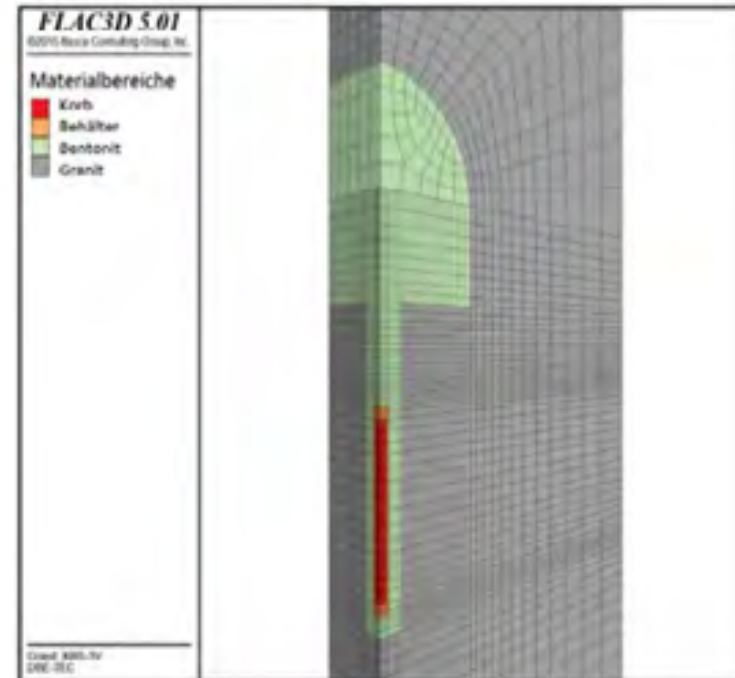
→ Einlagerung ist in Deutschland genehmigungstechnisch möglich

= 3./4. Schritt: Endlagerplanung und -auslegung

Grubengebäude - Einlagerungsfeld



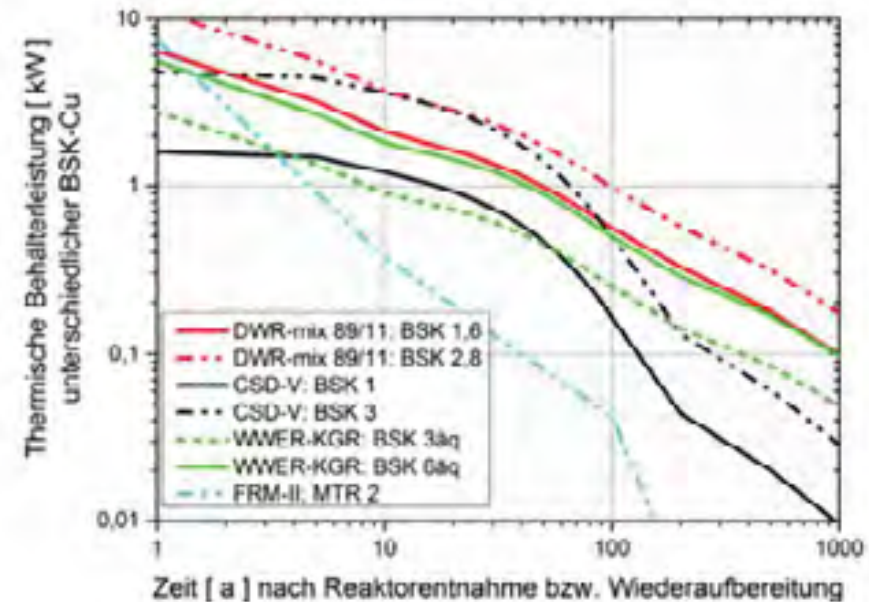
Rechenmodell thermische Auslegung



Auslegungskriterium
Grenztemperatur von 100 °C
an der Behälteroberfläche
(Kontakt Behälter-Puffer)

= 4. Schritt: Endlagerauslegung

Thermische Behälterleistung der BSK-Cu-deutsches Abfallmengengerüst



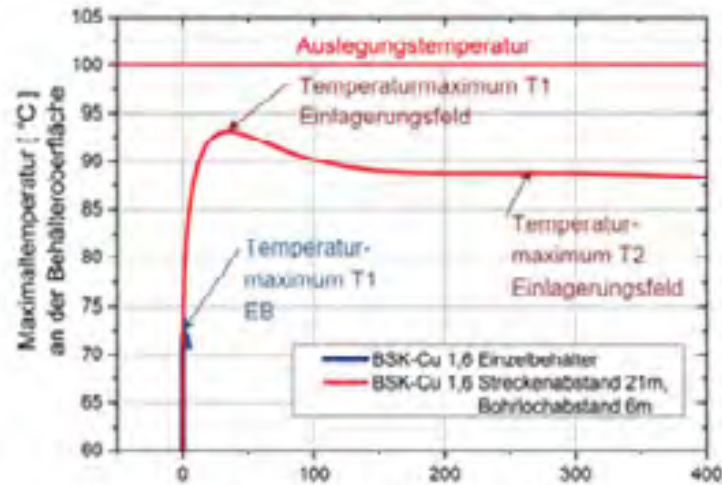
Granit 100	Behälter		Gesamtanteil	Einlagerung		Zwischenlagerzeit	
	Beladung	Anzahl		Beginn	Ende	Beginn	Ende
AVR, THTR, KNK, OH, BER		481	3,25%	01.01.2050	22.12.2050		
CSD-B	3	47	0,32%	23.12.2050	26.01.2051	66,0	46,1
CSD-C	3	1.368	9,25%	27.01.2051	05.11.2053	66,1	48,8
WWER	6,1*2,5	332	2,25%	06.11.2053	09.07.2054	63,8	59,5
CSD-V	2	1.868	12,63%	10.07.2054	24.04.2058	69,5	53,3
DWR+SWR	1,8	10.656	72,07%	24.04.2058	08.12.2079	68,3	56,9
FRM		33	0,22%	08.12.2079	01.01.2080		
			0,00%				
Behälteranzahl	14.785						
Taktfrequenz	0,7						

Zwischenlagerzeit der einzelnen Abfallgebinde bei Einlagerung

Annahmen

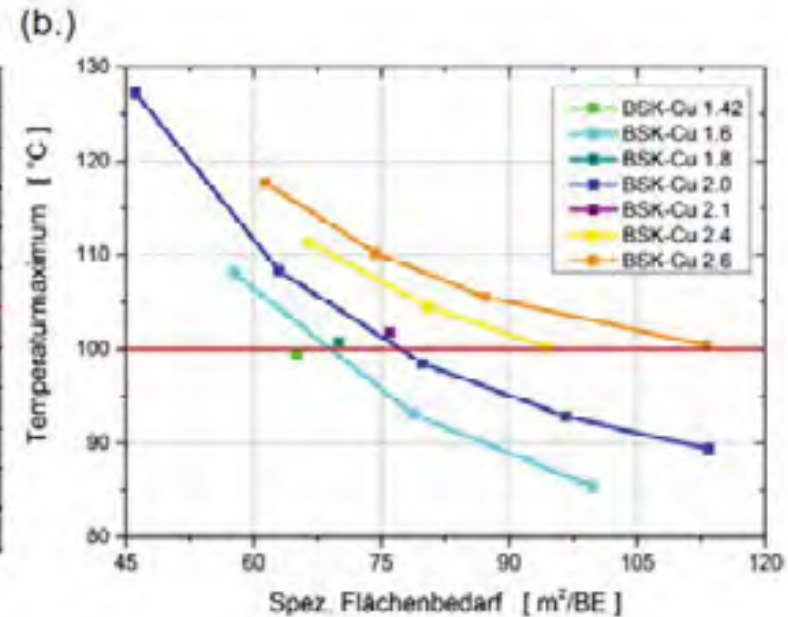
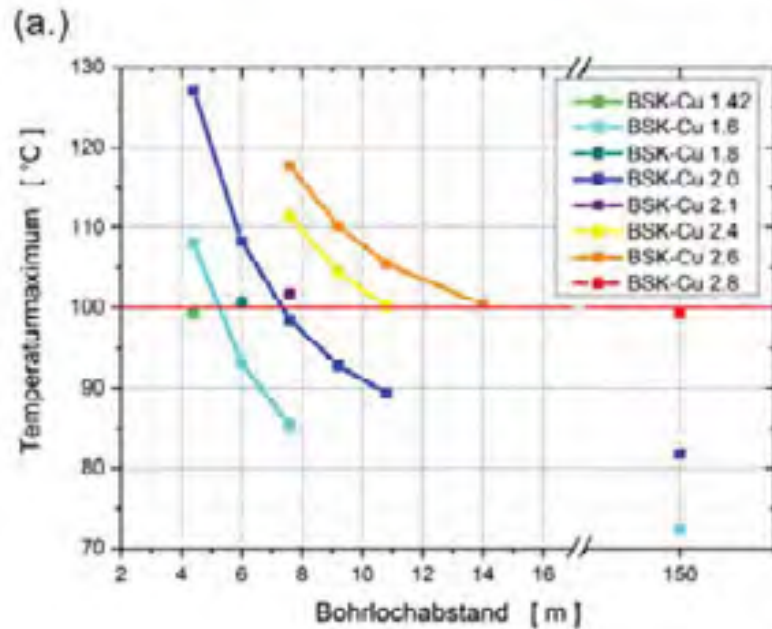
Einlagerungsbeginn ab 2050
Einlagerungsbetrieb bis 2080

= 4. Schritt: Endlagerauslegung



Temperaturkriterium von 100 °C wird für verschiedene Einlagerungsvarianten erfüllt

→ Anzahl der BSK-Cu in Deutschland ~ 15 000



5. Schritt: Technisches Sicherheitskonzept

Nachweiszeitraum: 1 000 000 statt 100 000 Jahre

Behälteranzahl: ~ 15 000 statt 6 000 → höhere Anzahl an Behältern mit Fertigungsfehlern

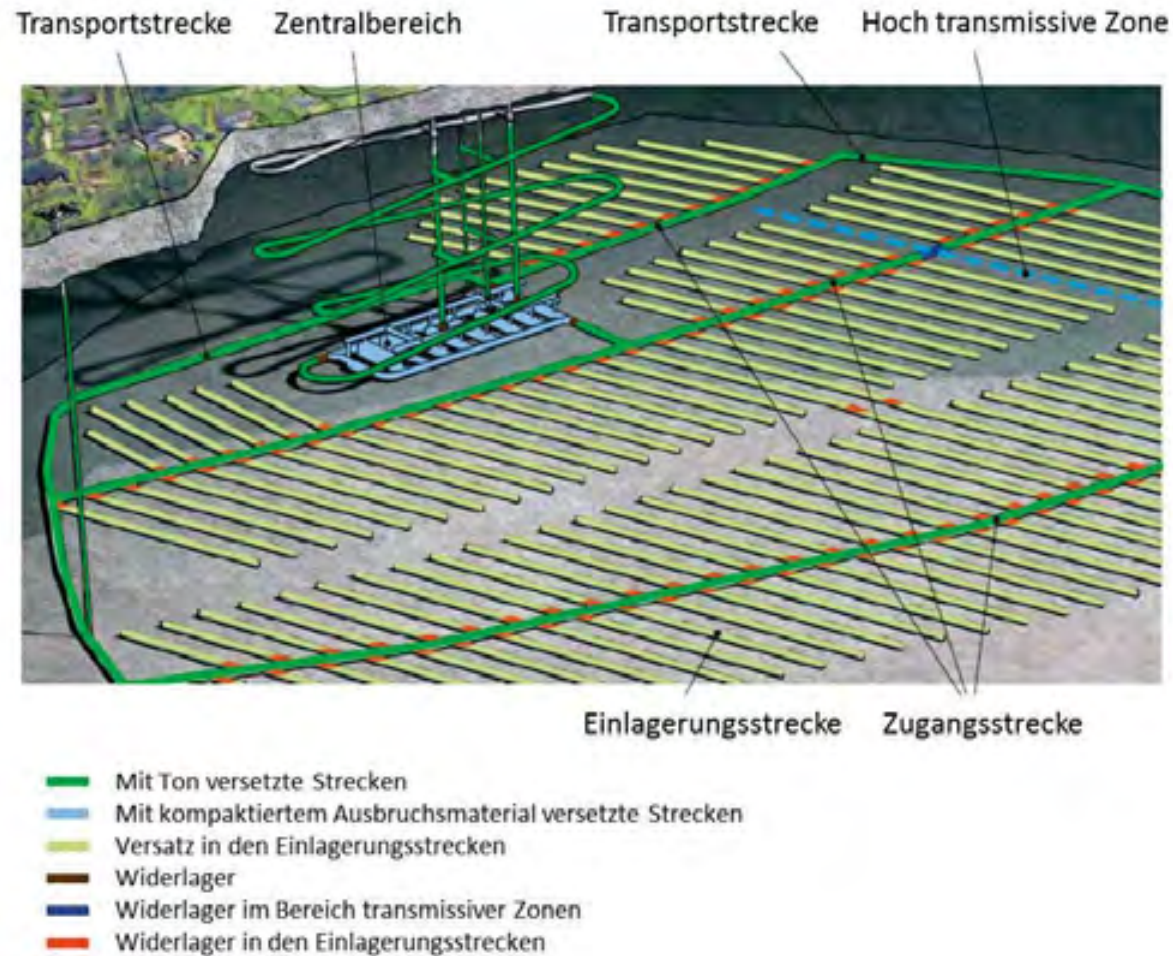
- Verbesserung des Behälter Puffer-Systems
- Gemäß Sicherheitsanforderungen BMU 2010 → Nutzung des ewG im Kristallin!

Nr	Betrachtungsfall						Bemerkung/Konsequenz
	Behälter	Behälterstandzeit [a]	Fertigfehler [%]	Buffer [10 ⁴ a]	Fertigfehler [%]	ewG Typ M	
1	RSK-Cu	100 000	0,1	wie KBS-3	mech. Schutz	nein	Freisetzung Grund: geringe Behälterstandzeit von 100 000 a
2	BSK-Cu	10 ⁴	0,1	wie KBS-3	mech. Schutz	nein	Freisetzung Grund: unerkannter Fertigungsfehler
3	BSK-Cu (Doppelte Cu-hülle)	10 ⁴	0,1	wie KBS-3	mech. Schutz	nein	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: Durch die zweite Kupferhülle ist eine Freisetzung wenig wahrscheinlich, da dies das gleichzeitige Auftreten von maßgeblichen Fertigungsfehlern in beiden Hüllen unterstellen würde.
4	RSK-Cu	100 000	0,1	ja große Mächtigkeit	0,1	nein	Freisetzung Grund: geringe Behälterstandzeit von 100 000 a und unerkannte Fertigungsfehler beim Buffer, der eine große Mächtigkeit haben müsste.
5	BSK-Cu	10 ⁴	0,1	ja große Mächtigkeit	0,1	nein	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: Eine Freisetzung würde das gleichzeitige Auftreten von maßgeblichen Fertigungsfehlern in beiden Behältern im gleichen Bereich unterstellen.
6	BSK-Cu (Doppelte Cu-hülle)	10 ⁴	0,1	wie KBS-3	0,1	nein	Wie Fall 3 , da mechanische Schutzfunktion auch bei Fertigungsfehler gewährleistet ist.
7	BSK-Cu	100 000	0,1	ja	0,1	ja	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: es wird erfolgreicher Integritätsnachweis des multiplen ewG unterstellt (Beispielhaft gezeigt für Behälterstandzeit von nur 1 000 a)
8	BSK-Cu	10 ⁴	0,1	ja	0,1	ja	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: es wird erfolgreicher Integritätsnachweis des multiplen ewG unterstellt (Beispielhaft gezeigt für Behälterstandzeit von nur 1 000 a)

} **Gewähltes Sicherheitskonzept**



6. Schritt: Verfüllen und Verschließen

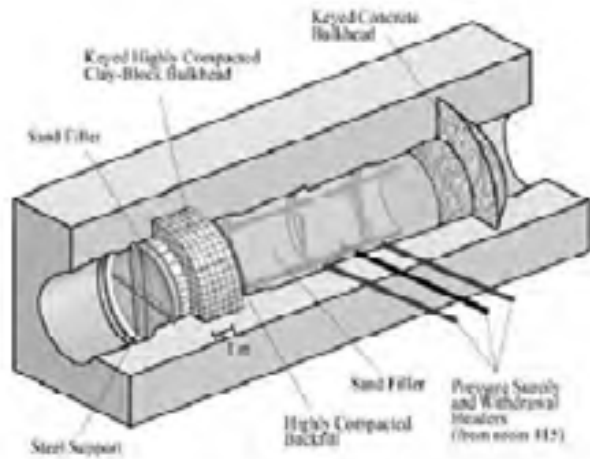


Quelle: SKB

Bedeutung der meisten geotechnischer Barrieren ist gering → Konzept analog KBS-3

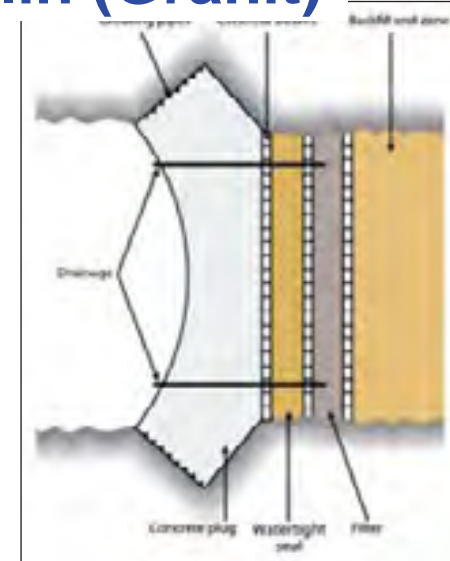
Ausnahme infolge Sicherheitskonzept: Geotechnische Barriere zum ewG Typ M

7.Schritt: Versuchsbauwerke im Kristallin (Granit)



TSX, Canada

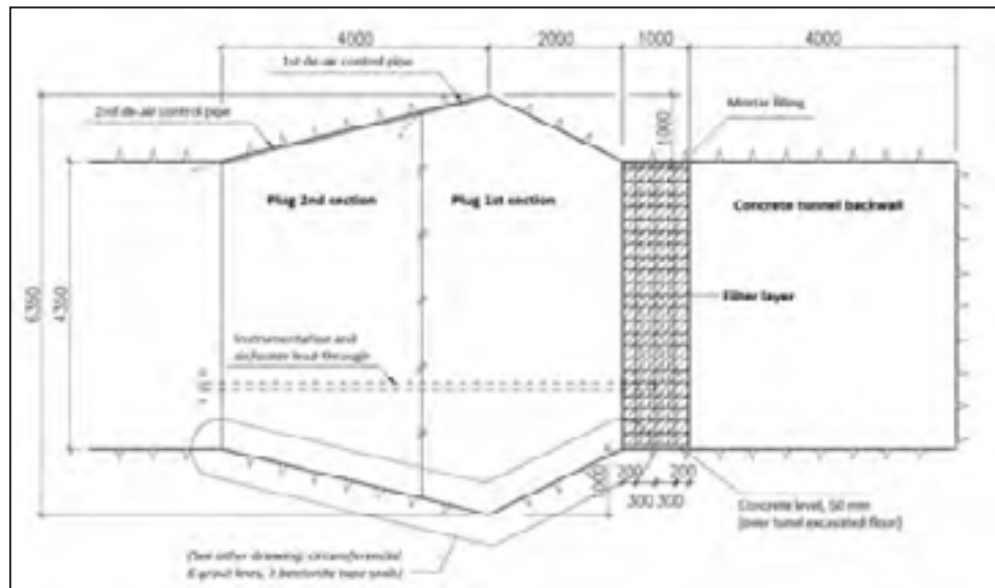
- Wasser wurde auf 85 °C erhitzt
- Integrale Permeabilität
 - Betondichtung: $1E-17 \text{ m}^2$
 - Bentonitdichtung: $1E-18 \text{ m}^2$



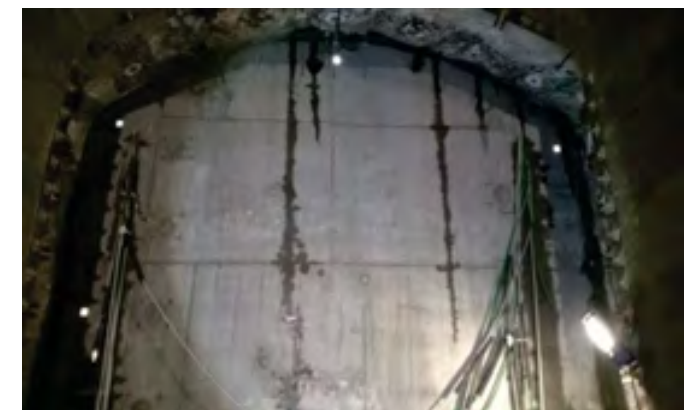
Source: SKB

DOMPLU, Schweden & POPLU, Finnland

- Große hydraulische Gradienten aufgebracht
- Wasserdurchtritt erkennbar (erwartet)



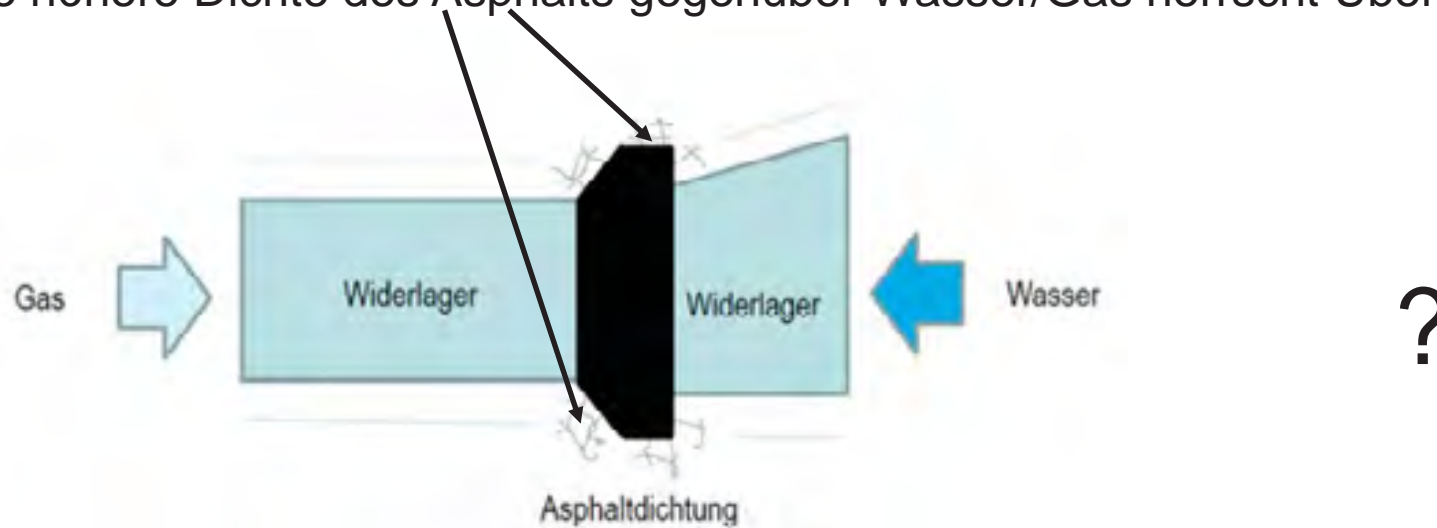
Source: POSIVA



Entwürfe für Verschlüsse & Funktionsweisen



Vermeidung eines Perkolationsnetzwerkes in der EDZ ist entscheidend →
 Durch die höhere Dichte des Asphalts gegenüber Wasser/Gas herrscht Überdruck



Streckenverschlüsse:

Ein ewG im Kristallin erscheint konstruktiv möglich

→ weitere Untersuchungen notwendig



— Zusammenfassung und Ausblick —

Ein Endlagerkonzept im Kristallin in Anlehnung an das KBS-3-Konzept ist an einem geeigneten Standort nach derzeitigem Kenntnisstand in Deutschland möglich

- unter Berücksichtigung
 - des Abfallmengengerüsts in Deutschland
 - eines angepassten Behälterkonzeptes
 - Einsatz der genehmigungsfähigen Einlagerungstechnik
- unter Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des BMU 2010
- und unter Berücksichtigung des Kommissionsberichtes

Aufgrund der klaren Strukturierung und der umfassend dokumentierten Untersuchungen in Schweden/Finnland ist eine Adaption der Planungen vergleichsweise schnell möglich, wobei deutsche Besonderheiten zu berücksichtigen sind.

Es gibt alternative Endlagerkonzepte im Kristallin (z.B. Kanada, Tschechien), die aber noch nicht so weit entwickelt sind und deshalb nicht vertieft wurden.

aber: Ein Referenzstandort im Kristallin fehlt in Deutschland!



Wir handeln verantwortungsbewusst und nachhaltig für Mensch und Umwelt und nehmen somit unsere gesellschaftliche Verpflichtung wahr

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich im Kristallin – Ergebnisse aus dem Vorhaben CHRISTA

DBE Technology: M. Jobmann, J. Krone, A. Lommerzheim, N. Müller-Hoeppe, C. Müller

BGR: J. Hammer, S. Jahn, J.R. Weber, A. Weitkamp

GRS: D.-A. Becker, U. Noseck, J. Wolf

Mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) hat der Deutsche Bundestag 2013 beschlossen, für die Auswahl eines Standortes für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle neben Ton- und Salzformationen auch Kristallingestein zu berücksichtigen. Im Jahr 2002 hatte der vom Bundesumweltministerium eingesetzte Arbeitskreis Endlagerung (AkEnd) in seinen Empfehlungen für ein Standortauswahlverfahren einem Sicherheitskonzept den Vorrang eingeräumt, bei dem die radioaktiven Abfälle durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) eingeschlossen werden, der aus gering bzw. praktisch undurchlässigen und hinreichend mächtigen Formationen (Ton-, Salzgestein) besteht. Dieses Konzept wird als ewG-Konzept bezeichnet und liegt auch den 2010 vom Bundesumweltministerium veröffentlichten Sicherheitsanforderungen für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle zugrunde.

Die im Jahr 2013 gemäß StandAG gebildete Endlagerkommission hat mit ihren im Juni 2016 vorgelegten Empfehlungen für das Standortauswahlverfahren einerseits vom AkEnd die für das ewG-Konzept entwickelten Auswahlkriterien weitgehend übernommen und andererseits die Vorgabe des StandAG zur gleichwertigen Berücksichtigung von Kristallingesteinsvorkommen grundsätzlich bestätigt.

Im Projekt CHRISTA wurde untersucht, ob sich das in den aktuellen Sicherheitsanforderungen geforderte Konzept der Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussvermögen, das auf Salz- und Tonformationen abgestellt ist, auch auf Kristallingestein übertragen lässt. Es wurde davon ausgegangen, dass der Sicherheitsnachweis auf Basis des in den aktuellen Sicherheitsanforderungen verankerten ewG-Konzeptes eine Einbeziehung der geologischen Barriere erfordert. Rein technische Lösungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle (z.B. das „ewB-Konzept“) wurden in CHRISTA nicht verfolgt.

Möchte man Kristallingesteine als Option bei der Auswahl eines Endlagerstandortes berücksichtigen und gleichzeitig an den Grundzügen des den deutschen Sicherheitsanforderungen zugrunde gelegten ewG-Konzepts festhalten, ergeben sich die folgenden Optionen:

1. Man findet eine Kristallinformation mit hohem Einschlussvermögen
2. Man findet eine durch Schichten mit hohem Einschlussvermögen überdeckte Kristallinformation (Typ „überlagernder ewG“)
3. Man findet innerhalb einer Kristallinformation mehrere Bereiche mit einem hohen Einschlussvermögen (Typ „multipler ewG“)

Die erste Option ist aufgrund der Tatsache, dass Kristallingesteine in der Regel bis in mehrere hunderte Meter unter der Erdoberfläche geklüftet sind, als wenig realistisch einzustufen. Bei dem Typ „überlagernder ewG“ wird die Einschlussfunktion durch überlagernde Sedimentgesteine mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit (z.B. Salze, Tone) und den Schachtverschluss gewährleistet. Bei dem Typ „multipler ewG“ werden mehrere kleinere ewG-Komponenten ausgewiesen, bei denen davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Komponenten in hinreichend gering geklüfteten

Gesteinsblöcken im Wirtsgestein positioniert werden. Die Einschlussfunktion basiert auf der geringen hydraulischen Durchlässigkeit dieser Wirtsgesteinsblöcke in Kombination mit den technischen Barrieren, die die Zugänge verschließen. Für eine Bewertung, welche der drei prinzipiell möglichen Optionen in Deutschland in Frage kommen, fehlen z.T. die dafür notwendigen Informationen zu den geologischen Verhältnissen. Im Vorhaben CHRISTA wurden daher vorhandene Erkundungsdaten und einsetzbare Erkundungsmethoden zusammengestellt.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass eine Endlagerung im Kristallin möglich ist, die dem ewG-Konzept entspricht. Die dafür in Frage kommenden geologischen Konfigurationen (Typ „überlagernder ewG und Typ „multipler ewG“) müssen noch auf der Grundlage geologischer Erkundungsdaten ausgewiesen werden. Da sich die bereits bestehenden Endlagerkonzepte für Skandinavien nicht direkt auf die deutschen Verhältnisse übertragen lassen, besteht ein erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, um sowohl Konzepte als auch einen belastbaren Sicherheitsnachweis für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Kristallingesteinen in Deutschland zu erarbeiten. Diese Arbeiten sind insofern bedeutsam, da sich daraus auch wichtige Anforderungen an geeignete Kristallingesteine ergeben, die bereits bei den ersten Schritten der Standortauswahl zu berücksichtigen sind.



Der einschlusswirksame Gebirgsbereich im Kristallin – Ergebnisse aus dem Vorhaben CHRISTA

M. Jobmann, J. Krone, A. Lommerzheim, N. Müller-Hoeppe, C. Müller
J. Hammer, S. Jahn, J.R. Weber, A. Weitkamp
D.-A. Becker, U. Noseck, J. Wolf

12. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten
zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, 9./10.11.16, Karlsruhe

Das Vorhaben CHRISTA

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland

Verbundvorhaben BGR, DBE Technology, GRS

Laufzeit: 01.07.2015 bis 30.06.2016

Das Vorhaben CHRISTA

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland

- Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein
 - Ausweisung eines ewG im Kristallin?
 - Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins?
 - Berechnungen zur Migration von Radionukliden

Das Vorhaben CHRISTA

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland

- Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein
 - Ausweisung eines ewG im Kristallin?
 - Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins?
 - Berechnungen zur Migration von Radionukliden
- Bestehende Behälter- bzw. Einlagerungs- und Barrierenkonzepte auf deutsche Verhältnisse übertragbar? → Vortrag N. Müller-Hoeppe

Das Vorhaben CHRISTA

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland

- Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein
 - Ausweisung eines ewG im Kristallin?
 - Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins?
 - Berechnungen zur Migration von Radionukliden
- Bestehende Behälter- bzw. Einlagerungs- und Barrierenkonzepte auf deutsche Verhältnisse übertragbar?
- Synthese bisheriger Untersuchungen im Kristallingestein in Deutschland
→ verfügbare Erkundungsmethoden

Das Vorhaben CHRISTA

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland

- **Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein**
 - **Ausweisung eines ewG im Kristallin?**
 - **Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins?**
 - **Berechnungen zur Migration von Radionukliden**
- Bestehende Behälter- bzw. Einlagerungs- und Barrierenkonzepte auf deutsche Verhältnisse übertragbar?
- Synthese bisheriger Untersuchungen im Kristallingestein in Deutschland
→ verfügbare Erkundungsmethoden

Teil 1:

Ausweisung eines ewG im Kristallin

Grundlage: Sicherheitsanforderungen / Sicherheitsprinzipien

Die Sicherheitsanforderungen gehen von einem Endlagerkonzept aus, bei dem die radioaktiven Abfälle **in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussvermögen endgelagert** werden.

(...)

4.1 Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen **im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen** und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.

4.2 Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.

(...)

4.6 Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.

(...)

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG)

Der ewG ist gemäß Sicherheitsanforderungen definiert als (BMU 2010):

„der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.“

Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd 2002):

„der Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum – im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren – den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss.“

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG)

Der ewG ist gemäß Sicherheitsanforderungen definiert als (BMU 2010):

„der **Teil des Endlagersystems**, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.“

Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd 2002):

„der **Teil der geologischen Barrieren**, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum – im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren – den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss.“

Randbedingungen im Vorhaben CHRISTA

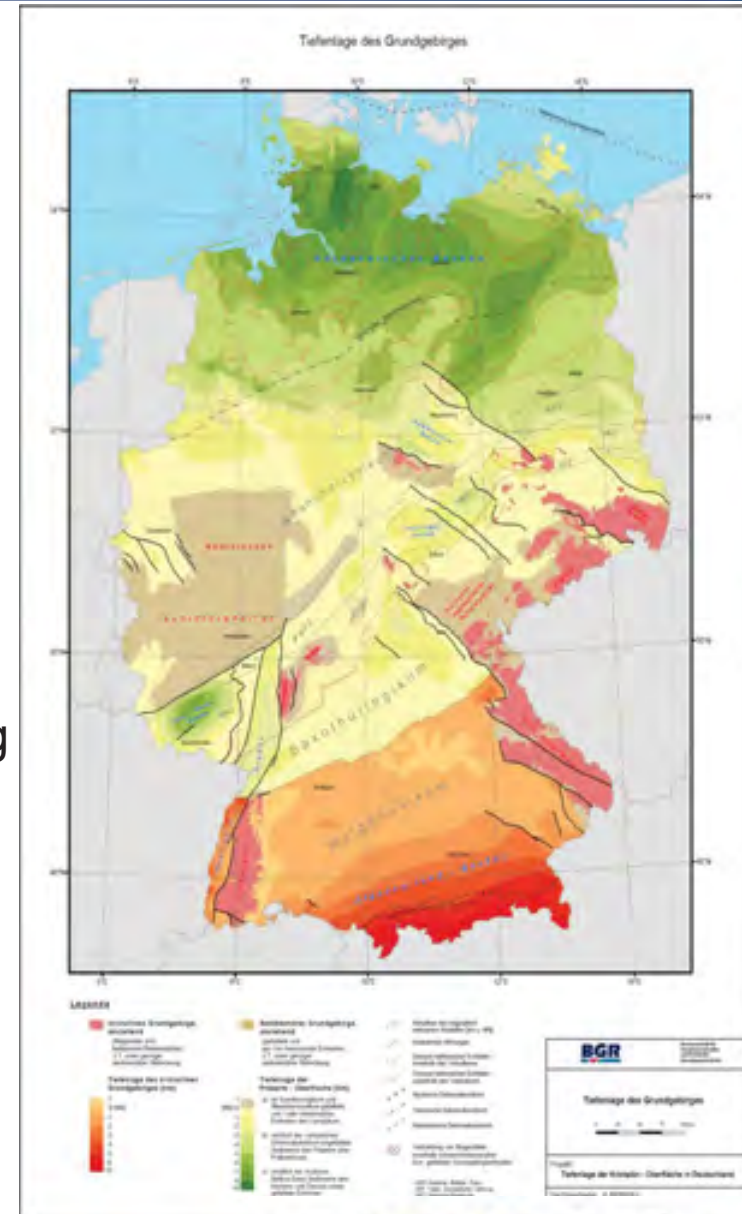
- Sicherheitsprinzipien der Sicherheitsanforderungen gelten
 - ewG-Konzept (primäre Sicherheitsfunktion: Einschluss)
 - Konzentration der Abfälle
- ewG muss einen Teil der natürlichen geologischen Barriere einschließen
→ ewB-Konzept (ESK 2015) im Vorhaben nicht weiter verfolgt
- Bei der räumlichen Ausweisung des ewG wird unterstellt, dass die Sicherheitsanforderungen dem Antragsteller eine möglichst große Flexibilität einräumen wollen, d.h. unter anderem, dass es innerhalb der Wirtsgesteinsformation mehrere voneinander getrennte ewG-Bereiche geben kann und keine unmittelbare Vorgabe für die Ausdehnung des ewG gibt, solange nicht fundamentale Sicherheitsprinzipien verletzt werden.
- Bei der zeitlichen Ausweisung werden die Sicherheitsanforderungen so ausgelegt, dass der ausgewiesene ewG für den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre erhalten bleiben muss.

Kristallingesteine in Deutschland

Kristallingesteine =

Metamorphite und/oder Magmatite

- Granit
- Gneiss
- Entstehung in der Erdkruste / Intrusion (Gebirgsbildung)
- Effektive Porosität $\ll 1\%$
- Hohe Standfestigkeit
- Druck- /Temperaturentlastung führt zur Klüftung des Gesteins
- Vorkommen in ganz Deutschland



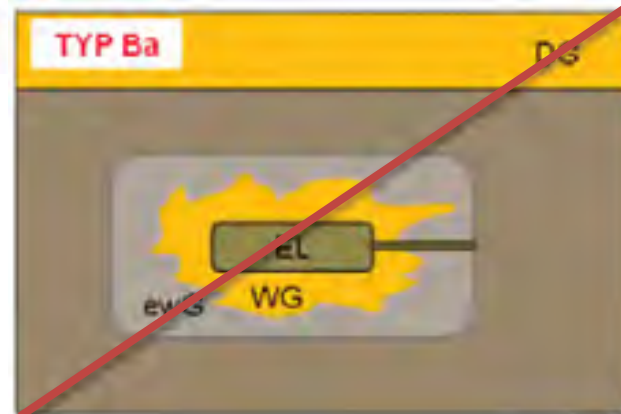
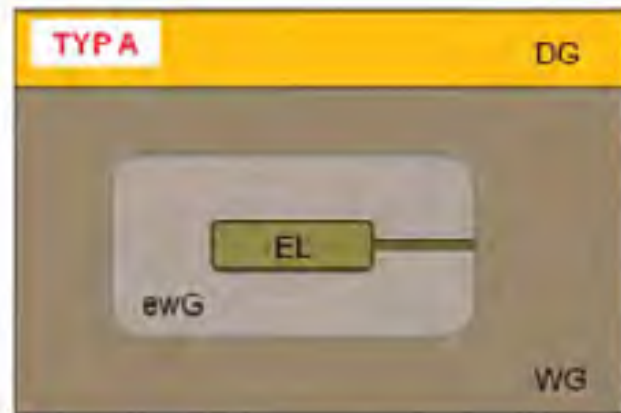
ewG-Konfigurationen nach AkEnd



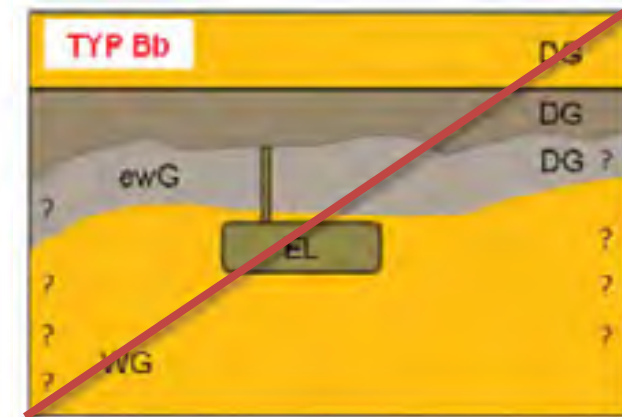
- DG Deckgebirge
- WG Wirtsgestein
- ewG einschlusswirksamer Gebirgsbereich
- technischer Verschluss des ewG
- EL Einlagerungsbereich
- Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung
- Gesteinskörper ohne sicherheitsrelevante Barrierewirkung



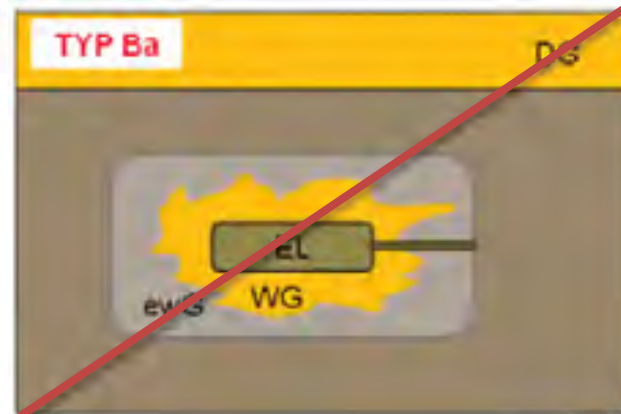
ewG-Konfigurationen nach Sicherheitsanforderungen (BMU 2010)



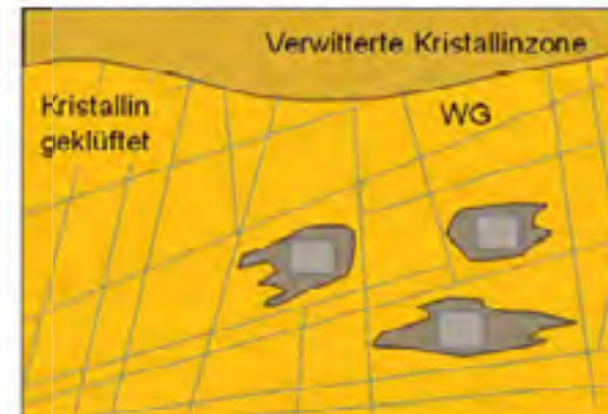
- DG Deckgebirge
- WG Wirtsgestein
- ewG einschlusswirksamer Gebirgsbereich
- technischer Verschluss des ewG
- EL Einlagerungsbereich
- Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung
- Gesteinskörper ohne sicherheitsrelevante Barrierewirkung



ewG-Konfigurationen für Kristallin im Vorhaben CHRISTA



- DG Deckgebirge
- WG Wirtsgestein
- ewG einschlusswirksamer Gebirgsbereich
- technischer Verschluss des ewG
- EL Einlagerungsbereich
- Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung
- Gesteinskörper ohne sicherheitsrelevante Barrierewirkung



Varianten zur Ausweisung eines ewG im Kristallin

Konfigurationstyp	Geologie Wirtsgestein	Vorkommen	erfüllt Zielsetzung der Sicherheitsanforderungen	erfüllt Anforderungen an ewG
TYP A	ungeklüftet	unwahrscheinlich	ja	standort- spezifisch
TYP A	hydraulisch unwirksame Klüfte	weniger wahrscheinlich	ja	
TYP A	geklüftet	wahrscheinlich	nein	
TYP Ba	nicht existent			
TYP Bb	geklüftet	wahrscheinlich	zu prüfen	
Typ M		zu prüfen	zu prüfen	

Teil 2:

Nachweis der Integrität im Kristallin

Integrität des ewG

- Hierfür ist vom Antragsteller der ewG räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen Barrieren zu zeigen, dass
 - die Ausbildung von solchen sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des ewG ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass
 - ggf. **im ewG vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG** teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im ewG durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.
- Bei Salinar- und Tongesteinen ist die Integrität des ewG zusätzlich anhand folgender Kriterien zu prüfen:
 - Dilatanzkriterium
 - Fluiddruckkriterium
 - Temperaturkriterium

Integritätsnachweis Typ Bb

- ewG ist Teil der sedimentären Überdeckung des Wirtsgesteins
 - Integritätsnachweis wird für Sedimente (z.B. Tonstein und Salz) und nicht für geklüftetes kristallines Gestein geführt
 - Abstand EL ↔ ewG beachten
 - Anwendung der für Salz und Tonstein genannten Kriterien
 - Ton: AnSichT (Vortrag M. Jobmann)
 - Salz: ISIBEL / VSG
 - die Überdeckung, die als ewG ausgewiesen wird, muss für den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleiben
- geowissenschaftliche Langzeitprognose (z.B. eiszeitliche Rinnenbildung)



Integritätsnachweis Typ M

- Hydraulische wirksame Klüfte definieren Grenzen, gegenseitige Beeinflussung der einzelnen ewG-Komponenten nicht ausgeschlossen
 - Sicherheitsdistanzen $d1?$, $d2?$



- Kriterien
 - Dilatanz:** Berücksichtigung Klüftigkeit in die Berechnungen zum Festigkeitsverhalten eines Hartgesteins möglich, Qualifizierung eines entsprechenden Stoffgesetzes für Kristallin-Standorte in Deutschland noch durchzuführen
 - Fluiddruck:** möglicher Ansatz über effektive Zugspannung
 - Temperatur:** zu prüfen
Es zu erwarten, dass thermische Restriktionen eher aus der Temperaturverträglichkeit anderer Komponenten des Endlagersystems resultieren.

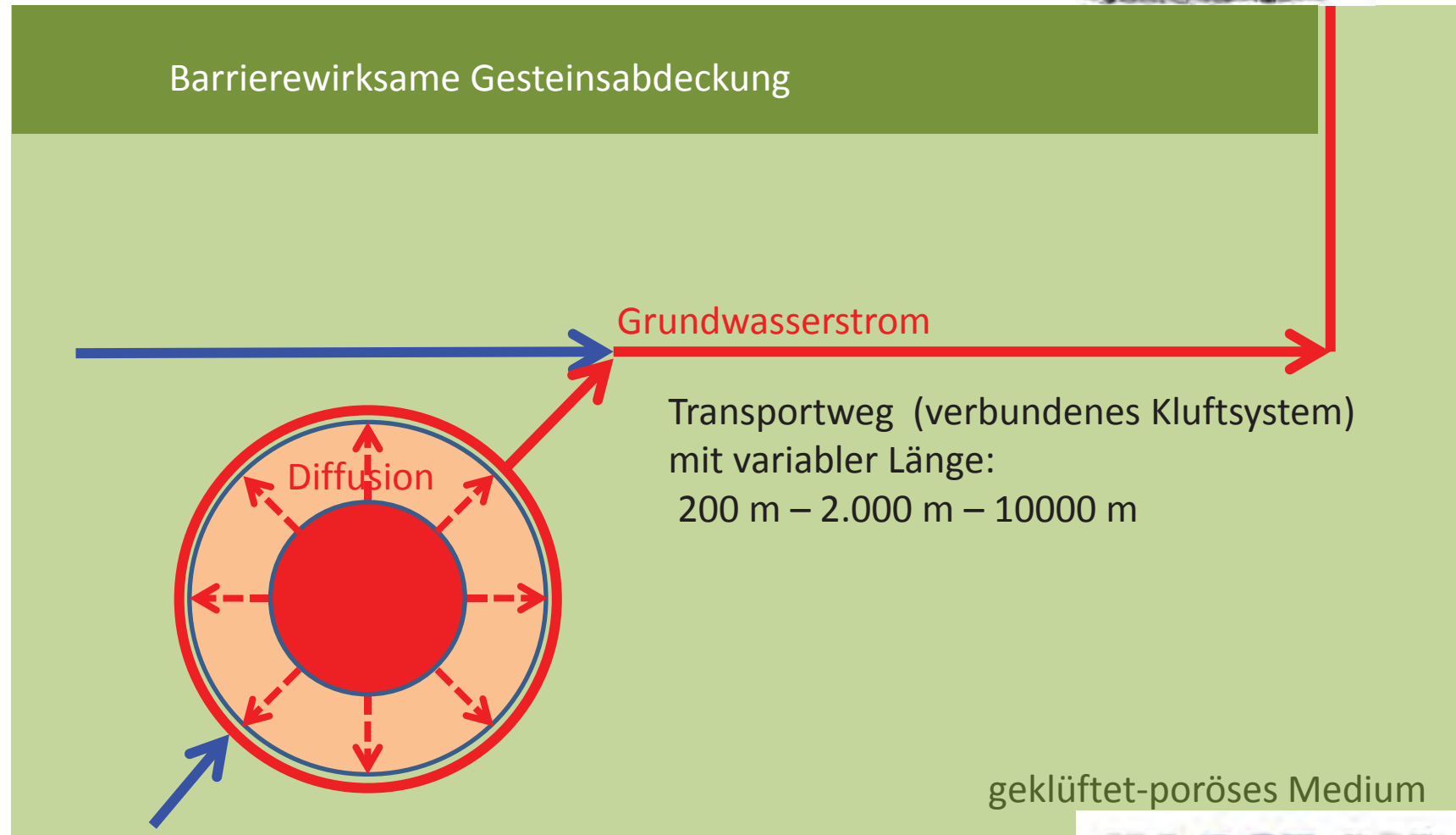
Teil 3:

Migration von Radionukliden im Kristallin

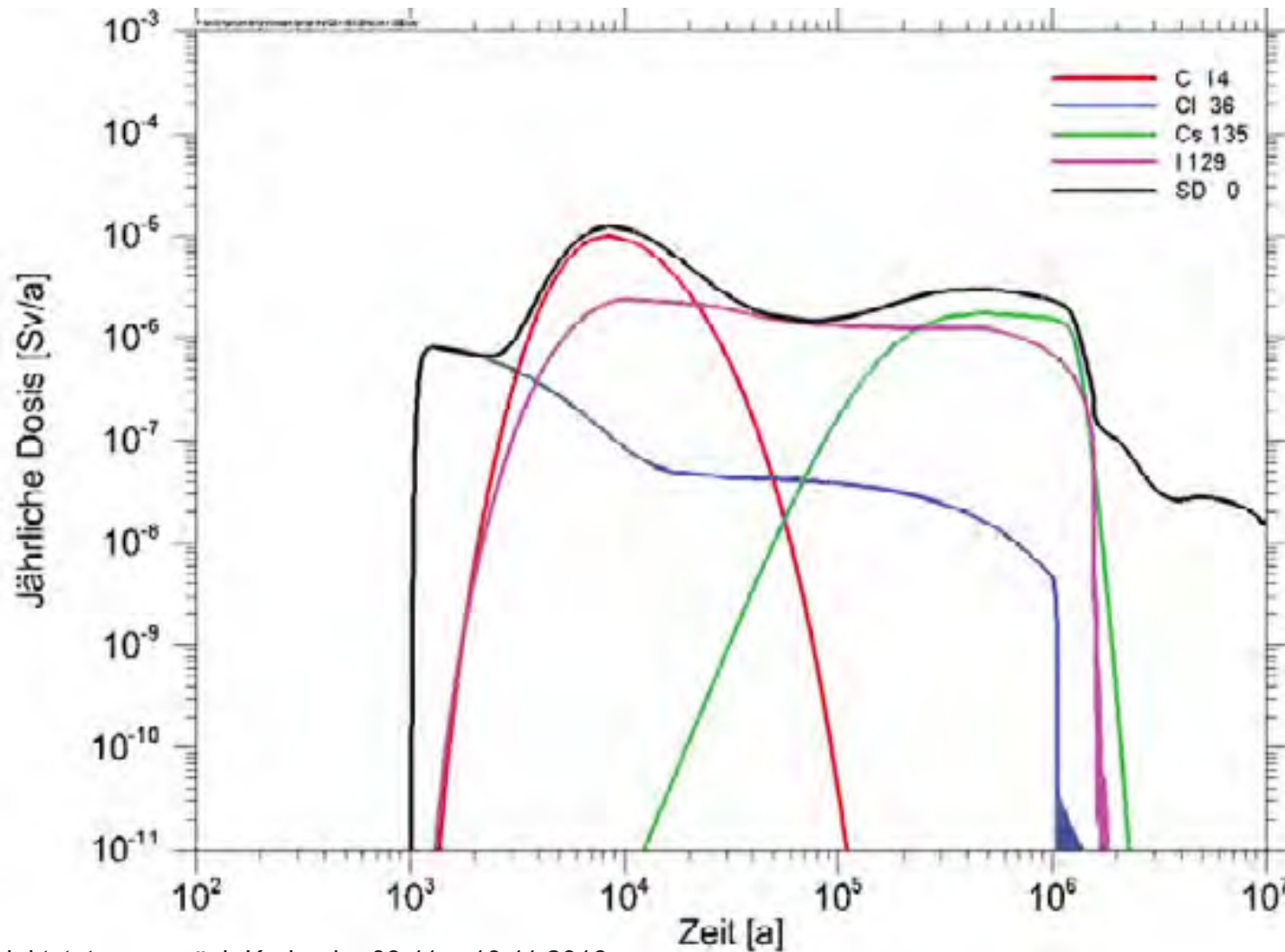
Orientierende Rechnungen zur Radionuklidmigration

- Dosis als Analysegröße, keine Prognoserechnungen
- Randbedingungen
 - nur abgebrannte Brennelemente, Behälter, Lebensdauer 1.000 Jahre
 - Bentonitbuffer, unverändert über Berechnungszeitraum
 - viele Daten (Grundwasserstrom (!), Kluftsystem (!), KD, Löslichkeiten, etc.) aus dem Vorhaben SPA (2000) entnommen
 - „Barrieren“ basieren nicht auf einem in sich konsistenten auf das WG abgestimmte Einlagerungskonzept
 - am konkreten Standort können Ergebnisse um Größenordnungen abweichen
- Ziel der Berechnung
 - indikative Abschätzung Ausdehnung (Typ B), Mächtigkeit Barrieren (Typ M)
 - Überprüfung der vorhandenen Werkzeuge der Sicherheitsanalyse
 - keine Verwendung des vereinfachten Nachweis

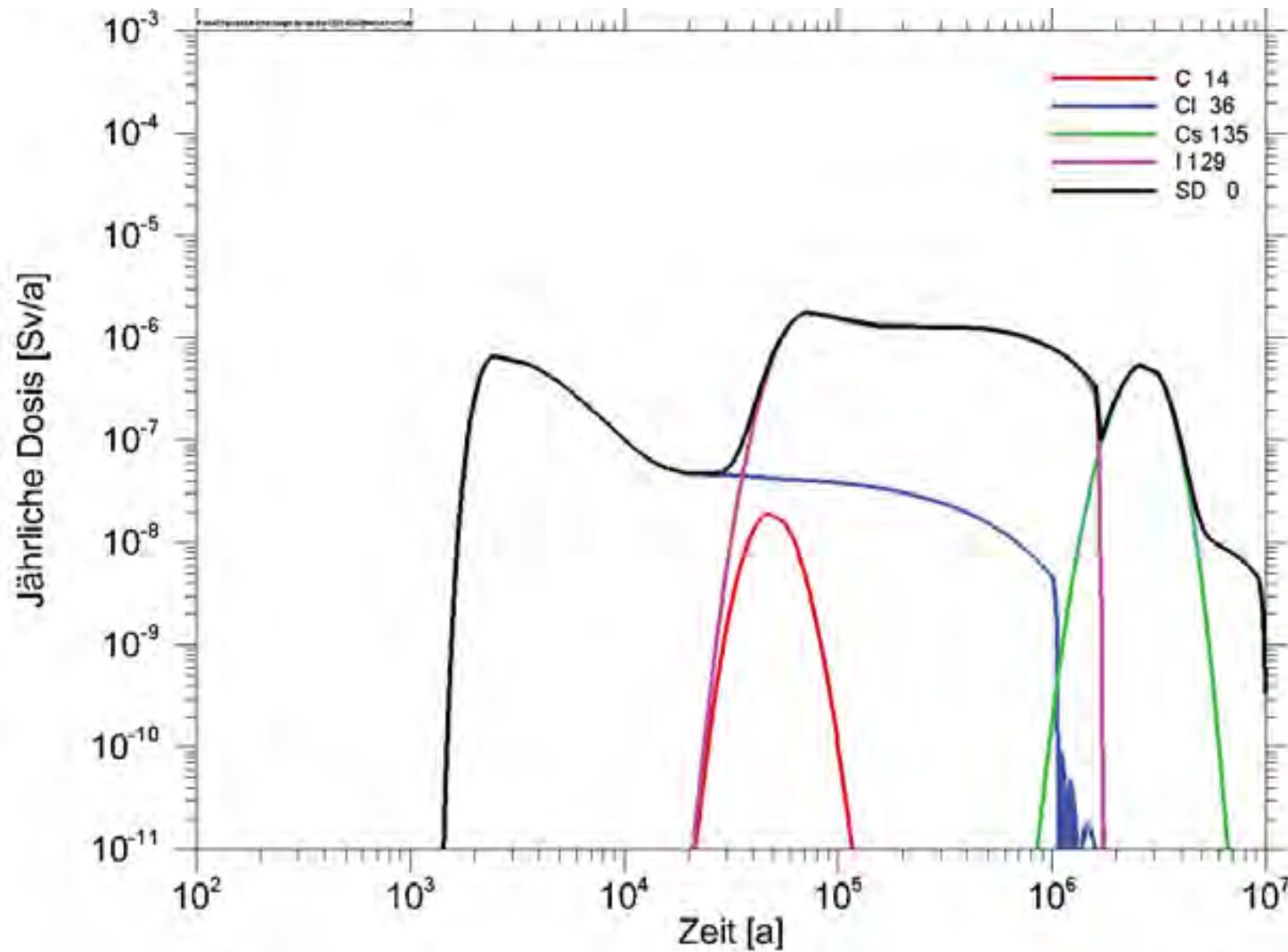
Modellrechnung für Typ Bb



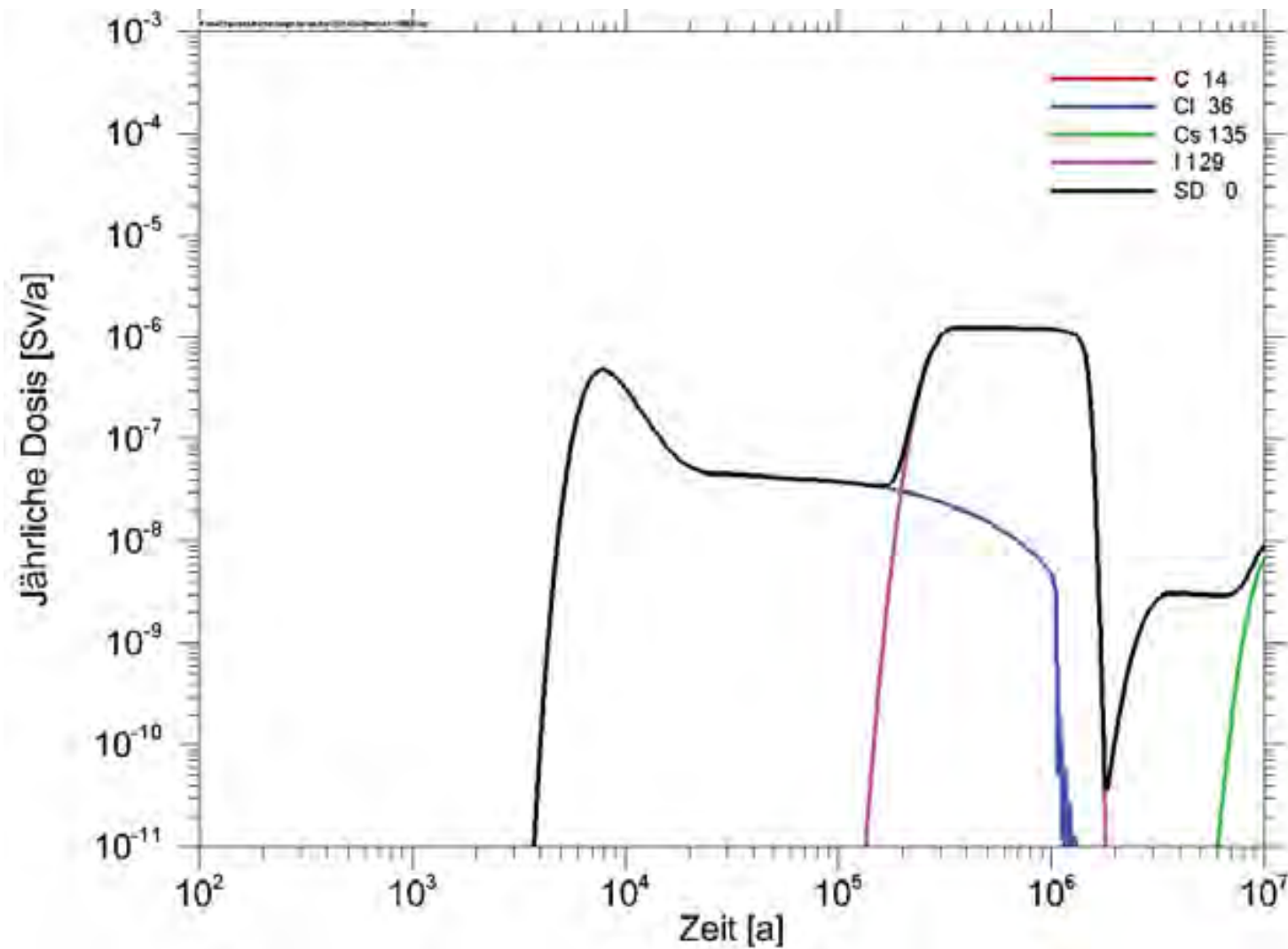
Rechenergebnis Fall Bb – 200 m Transportweg



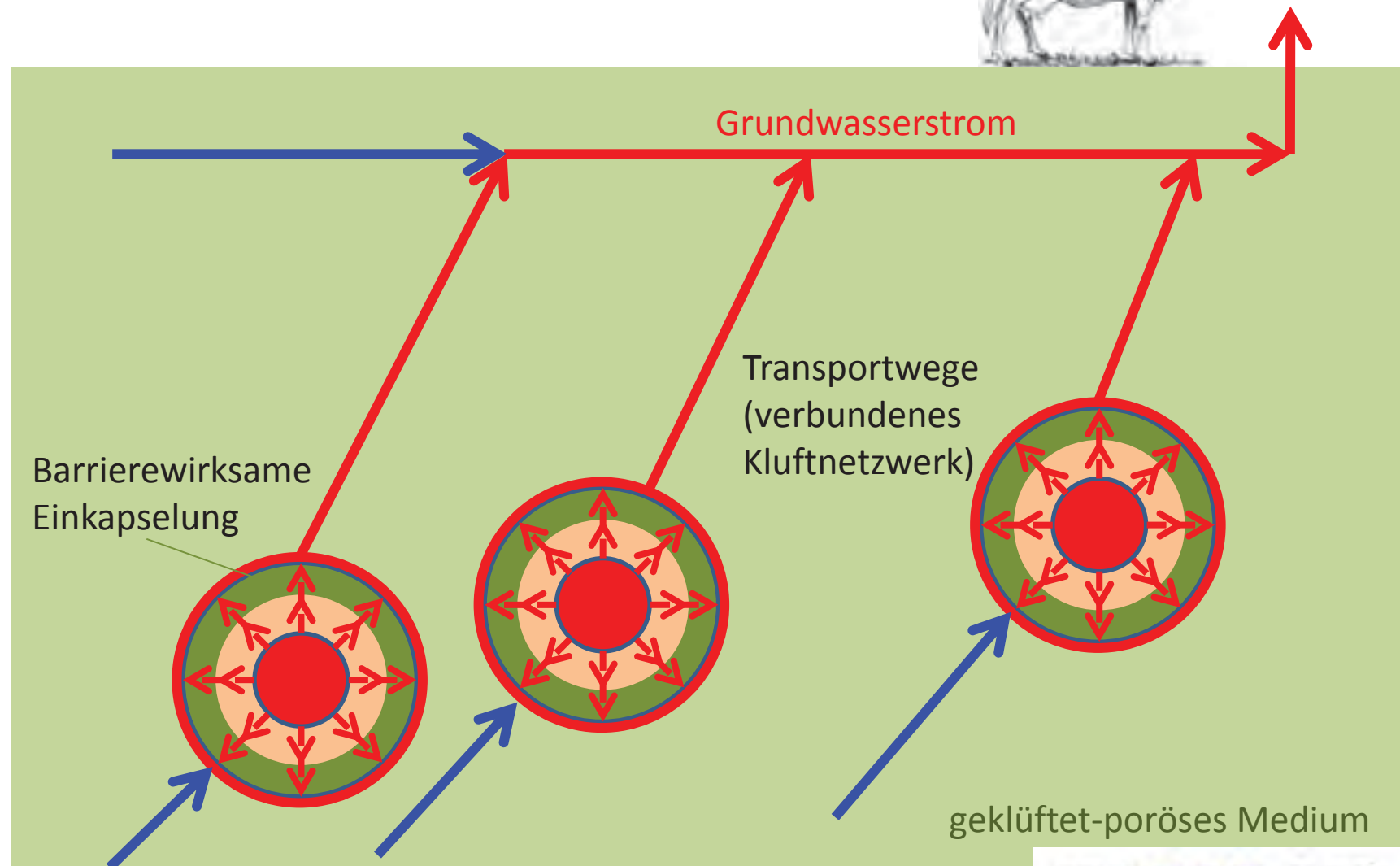
Rechenergebnis Fall Bb – 2.000 m Transportweg



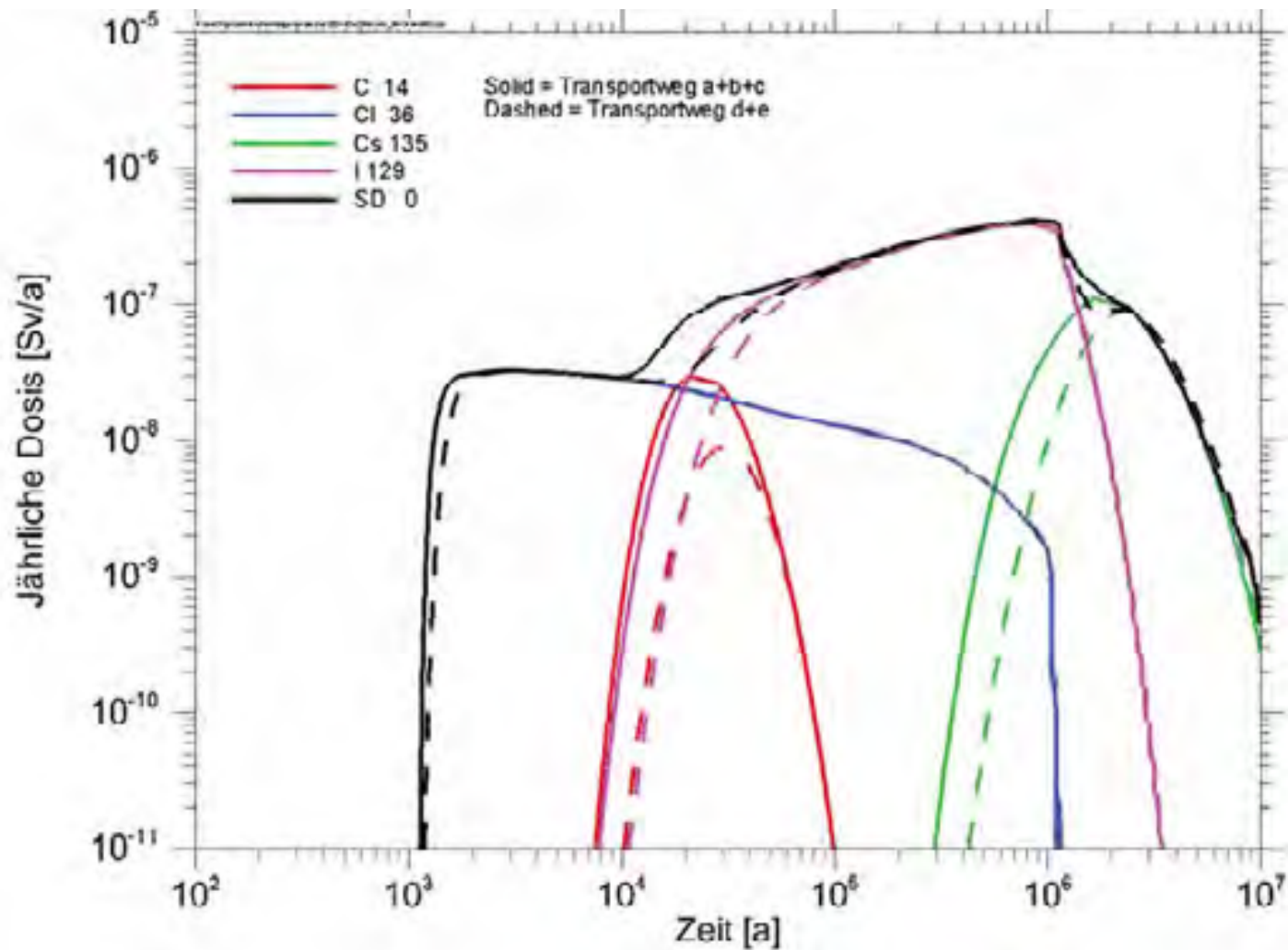
Rechenergebnis Fall Bb – 10.000 m Transportweg



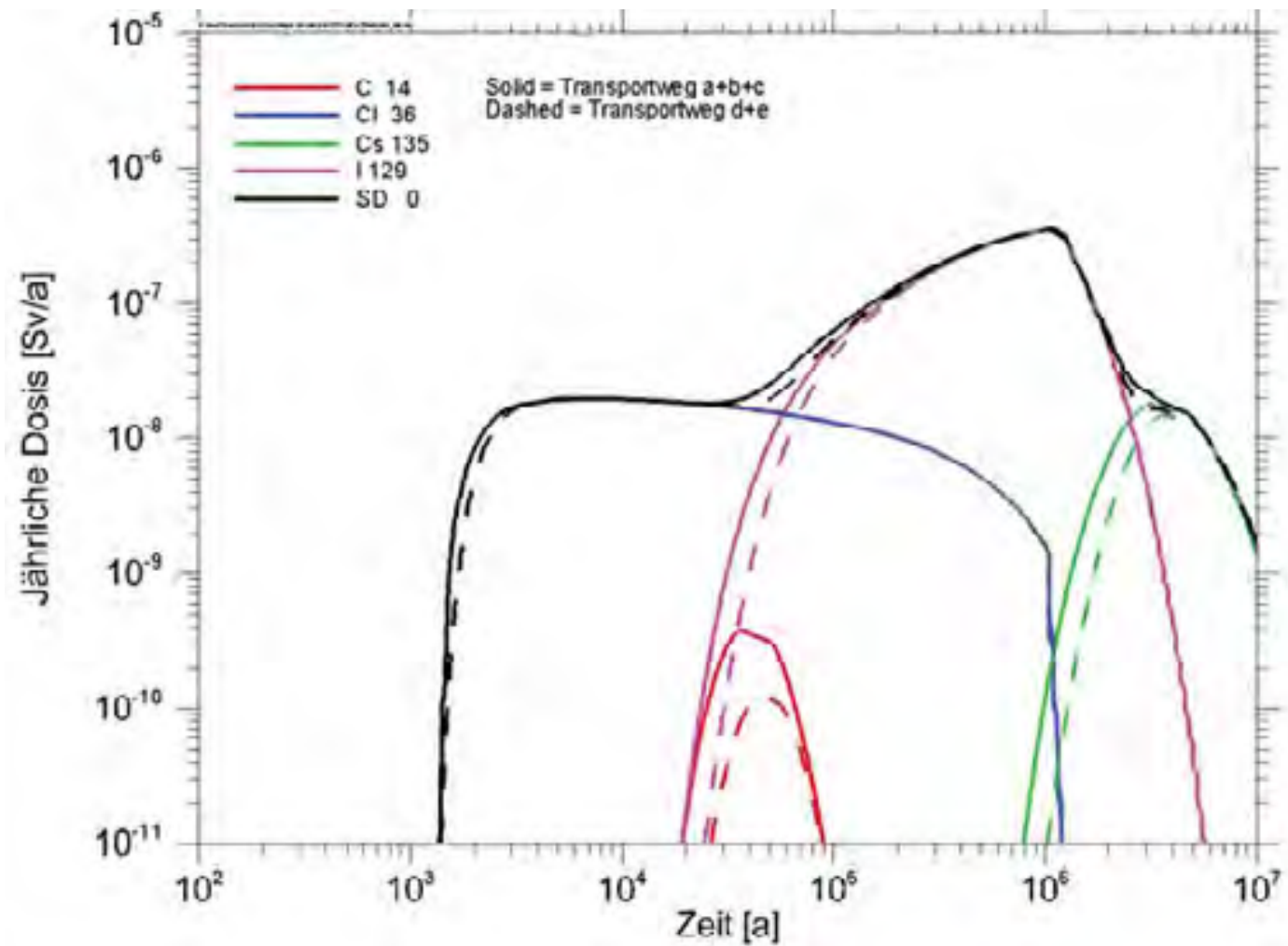
Modellrechnung für Typ M



Rechenergebnis Fall M – 0,5 m ungeklüftetes Kristallin



Rechenergebnis Fall M –1 m ungeklüftetes Kristallin (Referenz)



Zusammenfassung und Ausblick

- ewG-Konfiguration Typ A im Kristallin mit einem hohen Einschlussvermögen unwahrscheinlich
- Empfehlung Vorhaben CHRISTA: Typ Bb (AkEnd) und Typ M weiter verfolgen:
 - Sicherheitskonzept
 - Nachweiskonzept (Werkzeuge/Kriterien für Integritäts- / radiologische Analyse)
 - Geologische Konfigurationen in D?
 - Features, Events and Processes
- ewB-Konzept mit bisher in D diskutierten Sicherheitsprinzipien schwer vereinbar
- Endlagerteufe auch im Kristallin begrenzt (deutlich unterhalb von 1.000 m Betriebssicherheit?, Wärmeausbreitung)
- Endlagersystem ist Kombination aus Geologie und Endlager
 - Grundzüge des technischen Konzept müssen frühzeitig vorliegen
 - Übernahme ausländische Konzepte?

→ Vortrag N. Müller-Hoeppe

Vielen Dank!

Gefördert durch:



BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

unter den FKZ 02E11375A/B

Inhaltsangabe zum Vortrag

“Radionuklidrückhaltung in Tongestein - Wissensstand und offene Fragen”

T. Reich, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Kernchemie

Der Vortrag gibt einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse, die von dem Aktiniden-Verbund in den Jahren 2003-2015 im Rahmen von drei durch das BMWi geförderten FuE-Vorhaben mit Ton als Wirtsgestein erzielt worden sind. Die Partner des Projektverbundes, bestehend aus sechs universitären Einrichtungen und zwei Großforschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft sowie die bearbeiteten Themenschwerpunkte der drei Projektphasen werden vorgestellt. Neben den wissenschaftlichen Ergebnissen, die in den Abschlussberichten [1-3] und in über 100 Publikationen niedergelegt sind, leistet der Projektverbund einen wichtigen Beitrag zur Nachwuchsförderung und zum Kompetenzerhalt auf dem Gebiet der Kern- und Radiochemie sowie der kerntechnischen Sicherheit.

Nachdem kurz auf wichtige Charakteristika der Aktiniden, wie Löslichkeit sowie Redox- und Sorptionsverhalten, eingegangen wird, werden die Zusammensetzung des als Referenzmaterial für ein natürliches Tongestein eingesetzten Opalinustons (Felslabor Mont Terri, Schweiz) sowie die in den Experimenten verwendeten synthetischen Tonporenwässer mit mittleren und hohen Ionenstärken angegeben.

Da Sorptions- und Diffusionsprozesse das Migrationsverhalten der Aktiniden im Tongestein bestimmen, werden in dem Vortrag dazu ausgewählte Ergebnisse vorgestellt. Dabei werden die Einflüsse von pH, Temperatur, Ionenstärke sowie die An- und Abwesenheit von Huminstoffen auf die Sorption und Diffusion von Aktiniden in Opalinuston diskutiert. Weiterhin wird gezeigt, dass es mit Hilfe des Modells 2 SPNE SC/CE (2 site protolysis non-electrostatic surface complexation cation exchange) und der SIT (specific ion interaction theory) möglich ist Sorptionsverläufe von Aktiniden an verschiedenen Tonmineralien wie Illit und Montmorillonit auch bei hohen Ionenstärken zu modellieren und entsprechende thermodynamische Konstanten zu bestimmen. Zahlreiche spektroskopische Untersuchungen zusammen mit quantenmechanischen Berechnungen dienen dabei der Absicherung der zugrundeliegenden Modellannahmen und der Erarbeitung eines Prozessverständnisses.

Neben der Bestimmung von Diffusionsparametern für die Diffusion von Uran und Neptunium (Np) in Opalinuston in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zusammensetzung der mobilen Phase, wird am Beispiel von Np(V) gezeigt welchen Einfluss die natürliche Heterogenität des Tongesteins auf die Redoxspeziation der Aktiniden bei der Diffusion hat.

Um den Einfluss von Tonorganika auf das Migrationsverhalten von Aktiniden abschätzen zu können, wurden im Projektverbund für eine Reihe von kleinen organischen Molekülen die thermodynamischen Komplexbildungskonstante sowie Reaktionsenthalpien und -entropien bestimmt. Dies wird im Vortrag am Beispiel der Komplexierung von Curium(III) mit Acetat gezeigt.

Der Projektverbund hat sich weiterhin mit der Frage beschäftigt, ob und wie Borat, das aus einem Endlager freigesetzt werden kann oder in verschiedenen geologischen Formationen enthalten ist, die Mobilität von Aktiniden beeinflusst. Die dazu durchgeführten spektroskopischen Untersuchungen,

Löslichkeitsstudien und quantenmechanischen Berechnungen zeigen, dass Borat keine mobilisierende Wirkung auf dreiwertige Aktiniden ausübt.

Die vorgestellten FuE-Arbeiten des Verbundes sind das Ergebnis einer effektiven Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern aus Universitäten und Großforschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft, wobei eine eng Abstimmung der Versuchsbedingungen und eine Unterstützung bei methodischen Entwicklungen innerhalb des Verbundes, aber auch im Kontakt zu Experten im In- und Ausland erfolgte. Ziele des Projektverbundes sind insbesondere die Entwicklung eines Prozessverständnisses für die Radionuklidmigration, die Bereitstellung von umfassenden und abgesicherte thermodynamischen Daten für Datenbanken und die Langzeitsicherheitsanalyse sowie die Nachwuchsförderung und der Kompetenzerhalt

Die laufenden Arbeiten des Aktiniden-Verbundes erfolgen im Rahmen des FuE-Verbundvorhabens GRaZ (2015-2018), bei dem es um die geochemisch Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen geht. Die dabei bisher erzielten Ergebnisse werden die Projektpartner auf ihrem nächsten öffentlichen Workshop am 5. und 6. April 2017 an der Universität Mainz präsentieren.

Literatur

1. Migration of actinides in the system clay, humic substances, aquifer
C. M. Marquardt (Editor), Wissenschaftliche Berichte FZKA 7407, Forschungszentrum Karlsruhe (2008).
2. Interaction and transport of actinides in natural clay rock with consideration of humic substances and clay organic compound
C. M. Marquardt (Editor), KIT Scientific Reports 7633, Karlsruher Institut für Technologie (2012).
3. Retention of radionuclides relevant for final disposal in natural clay rock and saline system
C. M. Marquardt (Editor), KIT Scientific Reports, Karlsruher Institut für Technologie (in Vorbereitung).

Radionuklidrückhaltung in Tongestein – Wissensstand und offene Fragen

T. Reich

Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Kernchemie

12. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur
Entsorgung radioaktiver Abfälle

Karlsruhe, 09.-10.11.2016

• Gliederung

Angaben zum Projektverbund

Wichtige Charakteristika der Aktiniden, des Tongesteins und der Porenwässer

Prozesse, die das Migrationsverhalten der Aktiniden im Tongestein bestimmen:

Sorption

Diffusion

Komplexierung mit Tonorganika

Wechselwirkung von Aktiniden mit Borat

Zusammenfassung und Ausblick

• Angaben zum Projektverbund

FuE-Vorhaben im Wirtsgestein Ton

Der Projektverbund besteht seit 1995 und begann mit zwei Projektphasen zum Wirtsgestein Salz.

2003-2007

Migration von Aktiniden im System Ton, Huminstoff, Aquifer

2006-2011

Wechselwirkung und Transport von Aktiniden im natürlichen Tongestein unter Berücksichtigung von Huminstoffen und Tonorganika

2011-2015

Rückhaltung endlagerrelevanter Radionuklide im natürlichen Tongestein und in salinaren Systemen

• Angaben zum Projektverbund

Partner des Projektverbundes

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Inst. f. Ressourcenökologie



Universität Mainz, Inst. f. Kernchemie



Karlsruher Institut für Technologie, Inst. f. Nukleare Entsorgung



TU Dresden, Professur für Radiochemie



TU München, Fachgebiet Theoretische Chemie



Universität Heidelberg, Phys.-Chem. Institut



Universität Potsdam, Inst. f. Chemie / Phys. Chemie



Universität des Saarlandes, Fachrichtung 8.1 Chemie, Anorg. Festkörperchemie



- Angaben zum Projektverbund

Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt

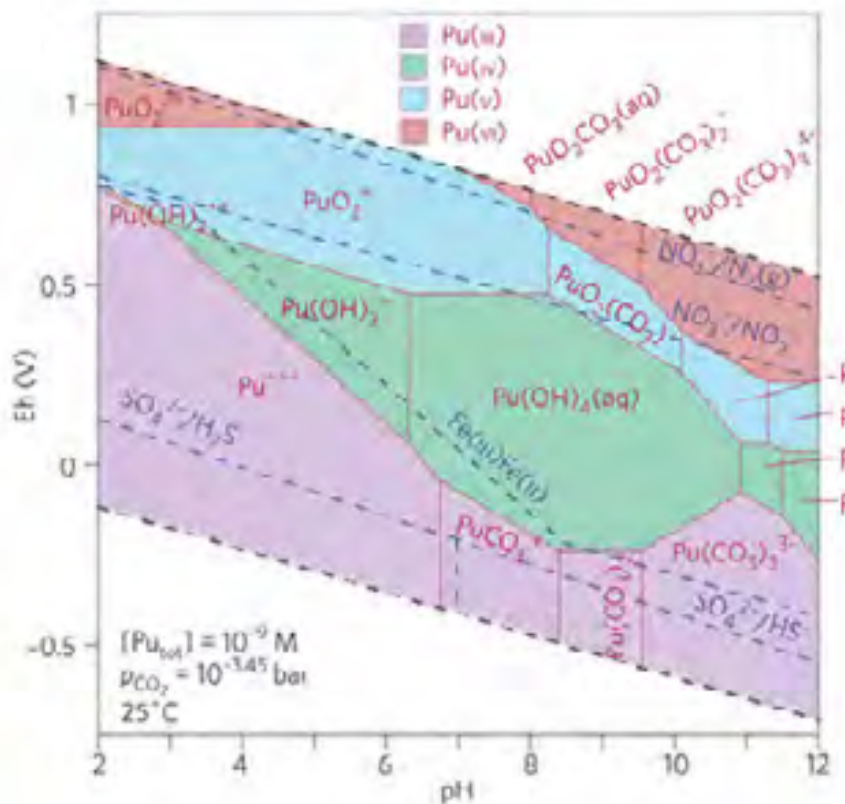
3 Förderperioden (2003-2015)

Bachelor/Master/Diplom:	65
Doktoranden/innen:	40
Post-Docs:	31
Summe:	136

• Charakteristika der Aktiniden

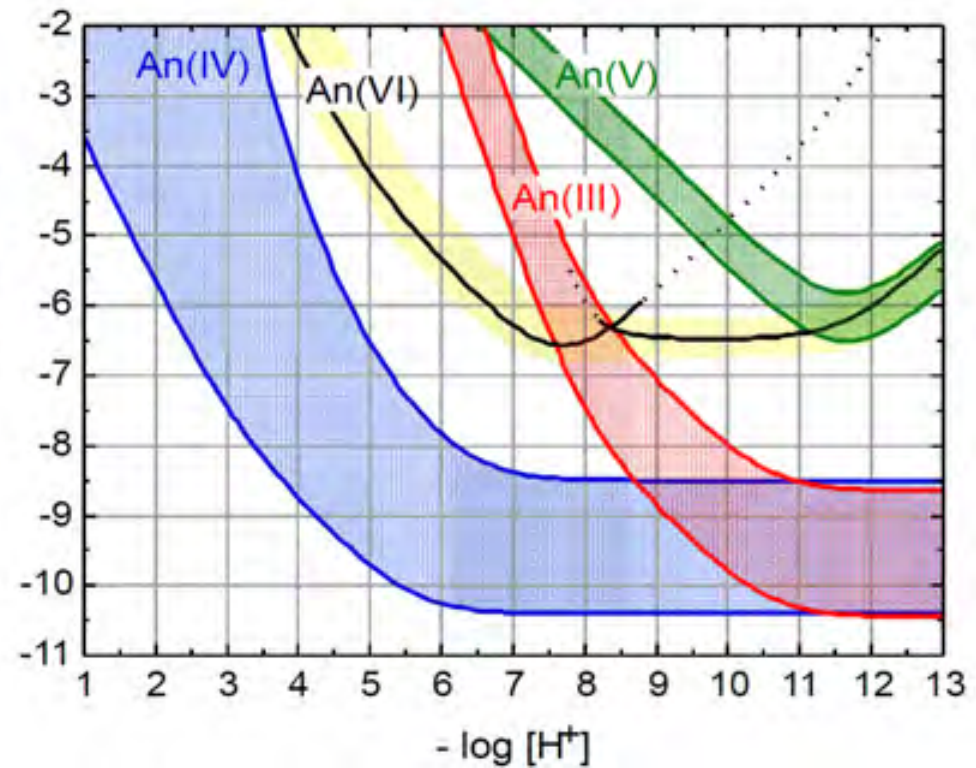
Löslichkeit und Redoxverhalten

Stabilitätsfelder von Plutoniumoxidationsstufen in Abhängigkeit von pH und Eh



Ewing, Nature Mat. (2015)

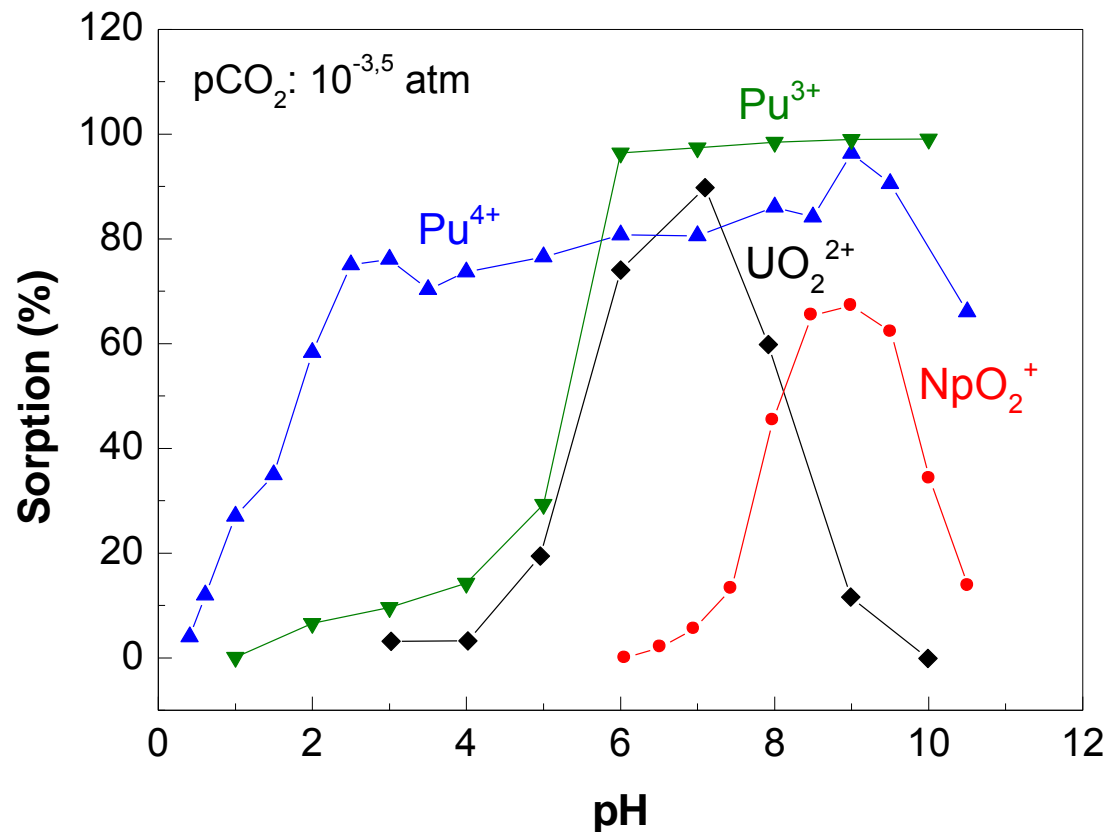
Löslichkeit von Aktinidenhydroxiden in Abhängigkeit vom pH



Neck et al., C. R. Chimie (2007)

• Charakteristika der Aktiniden

Sorption der Aktiniden am Tonmineral Kaolinit



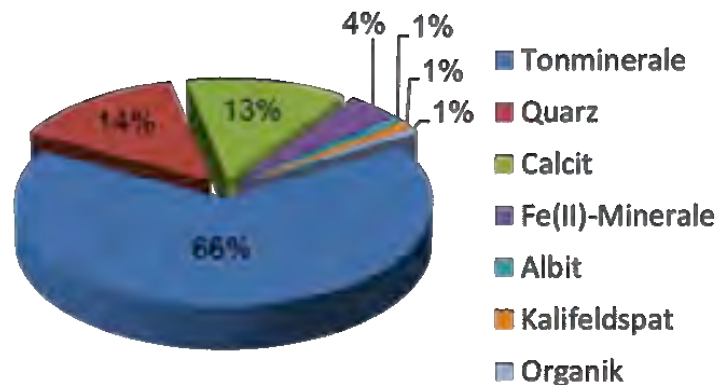
S. Amayri et al., Radiochim. Acta 99 (2011) 349; A. Krepelova et al., Radiochim. Acta 94 (2006) 825;
R.A. Buda et al., Radiochim. Acta 96, (2008) 657

• Charakteristika des Wirtsgesteins

Opalinuston und Porenwässer

OPA PW [1]

Salz	mol/L
NaCl	0,21
CaCl ₂	0,026
MgCl ₂	0,017
Na ₂ SO ₄	0,014
NaHCO ₃	0,0005
KCl	0,0016
<hr/>	
pH	7,6
<hr/>	
I / mol/L	0,42



Schacht
Konrad [2]

VGL [3]

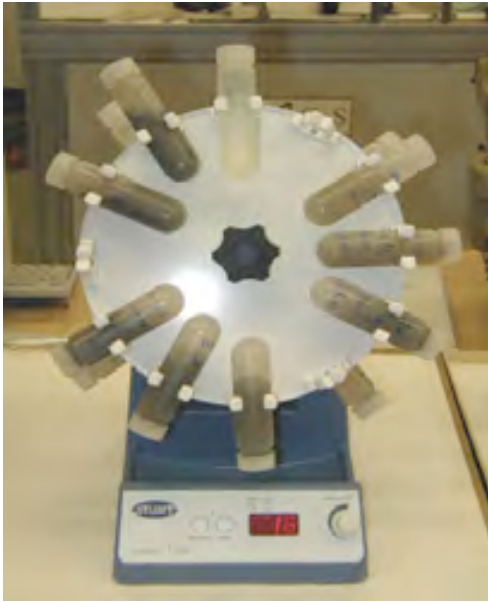
Salz	mol/kg	mol/L
NaCl	2,52	2,52
CaCl ₂	0,12	0,01
MgCl ₂	0,048	-
Na ₂ SO ₄	-	0,008
Na ₂ CO ₃	-	-
KCl	-	0,005

[1] F.J. Pearson, PSI Internal Report TM-44-98-07, 1998.

[2] W. Brewitz, Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, 1982.

[3] Mitteilung von A. Meleshyn, GRS, 2015.

- Sorption von Aktiniden und chemischen Analoga



$$K_d = \frac{[An]_{surf}}{[An]_{tot.aq}} \times \frac{V}{S}$$

- Sorption von Eu(III) an Opalinuston in NaCl

Einfluss von pH, Temperatur und Huminsäure (HA)

$\log K_d$ [L kg ⁻¹]	2	3	4	5
pH < 6				
T = 25°C		3 M 0,01 M		
25°C + HA		3 M 0,01 M		
T = 60°C		3 M 0,01 M		
60°C + HA		3 M 0,01 M		
pH > 6				
T = 25°C				
25°C + HA				
T = 60°C				3 M 0,01 M
60°C + HA				

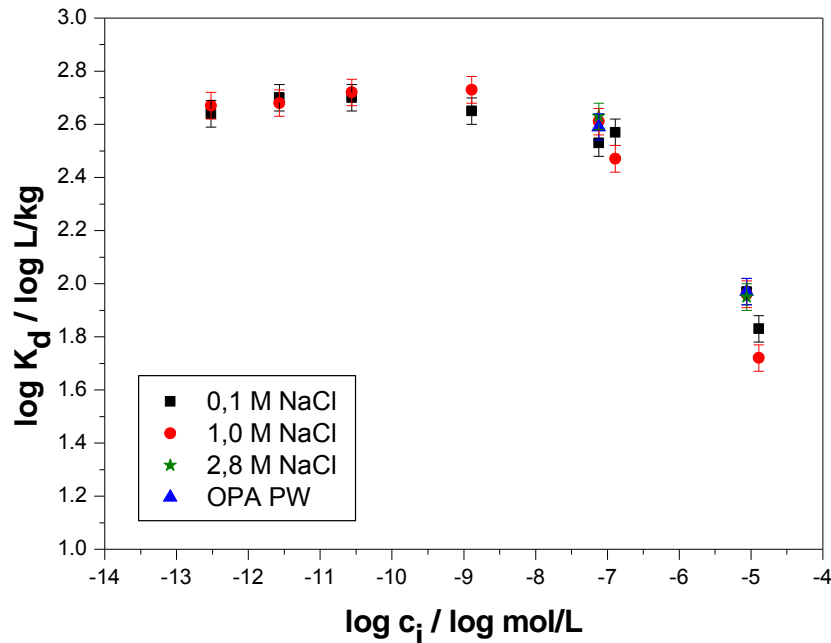
R. Kautenburger et al. BMWi-Abschluss-Workshop 12./13.05.2015

09.-10. November 2016 | 12. Statusgespräch

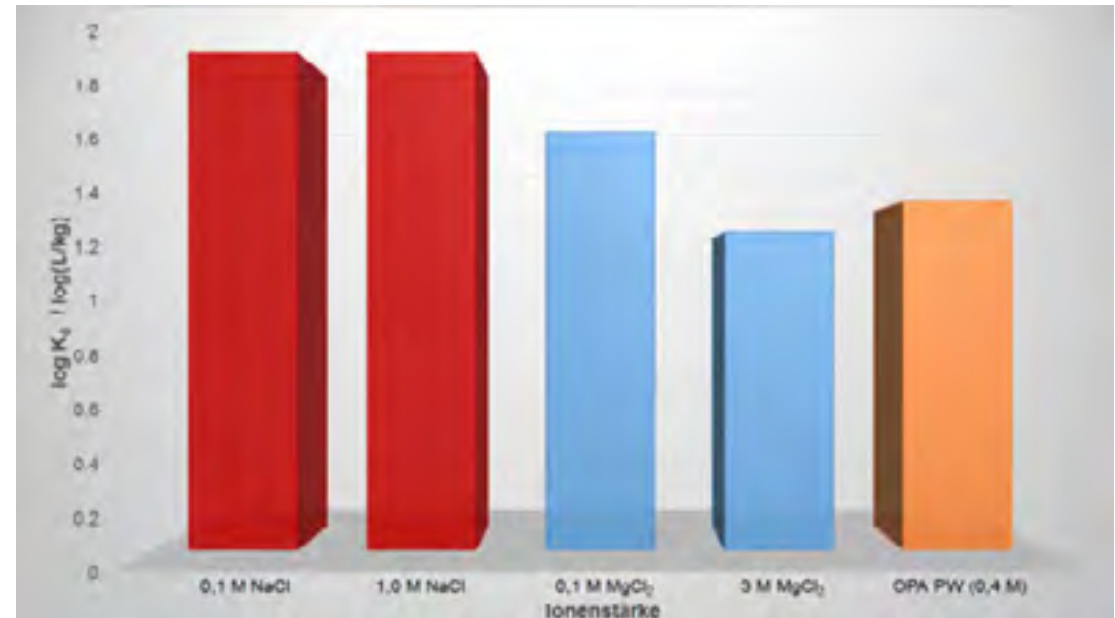


• Sorption von Np(V) an Opalinuston

Vergleich verschiedener Elektrolytlösungen



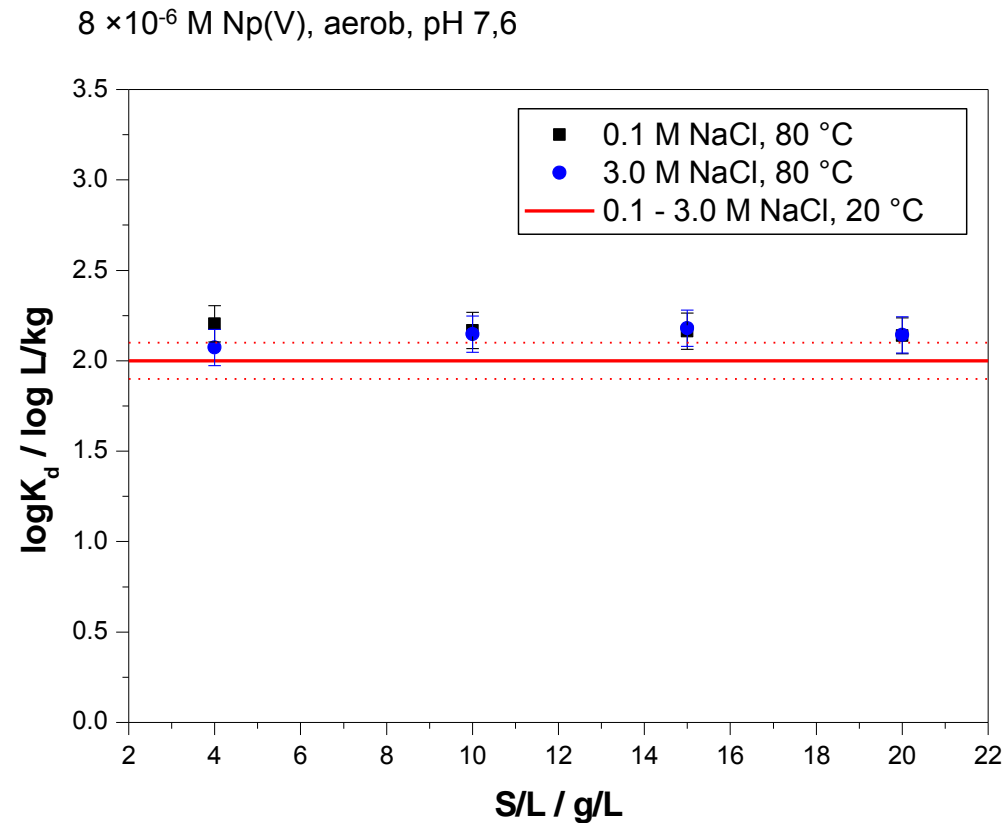
$8 \times 10^{-6} \text{ M Np(V)}$, aerob, pH 7,6



Geringer Einfluss der Ionenstärke der Elektrolytlösungen über großen Np(V)-Konzentrationsbereich

• Sorption von Np(V) an Opalinuston

Einfluss der Temperatur



Zwischen 20-80 °C kein Temperatureinfluss auf die Np(V) Sorption

• Sorption von U(VI) an Montmorillonit

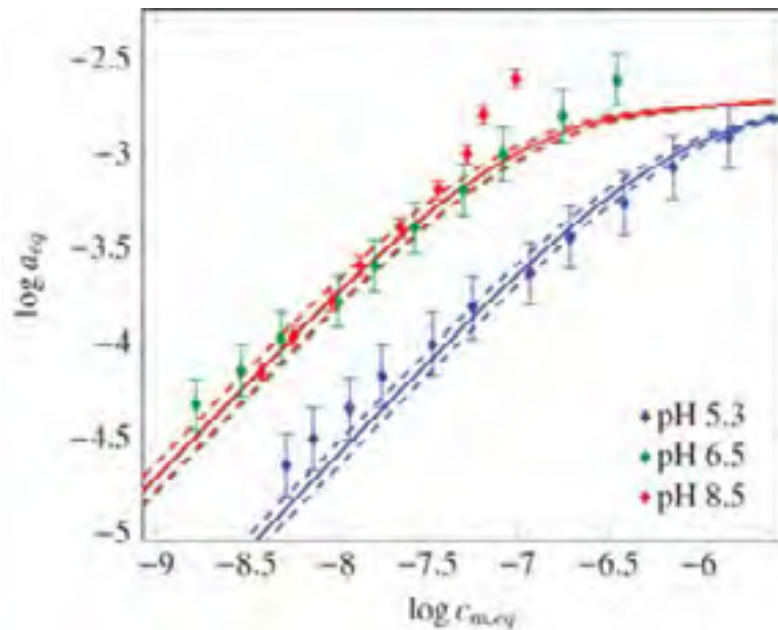
Modellierung der Sorption mit 2 SPNE SC/CE und SIT

Uran(VI)-Konzentration: $1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-7}$ mol/kg

Elektrolyt ähnlich dem Grundwasser in Schacht Konrad:

2,52 mol/kg NaCl 0,12 mol/kg CaCl₂ 0,048 mol/kg MgCl₂

N₂-Atmosphäre, 23 °C



Ergebnis der Sorptionsmodellierung

Oberflächenkomplex	log k (Fit)
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2^+$	$1,70 \pm 0,06$
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2\text{OH}$	$-4,48 \pm 0,10$
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2(\text{OH})_3^{2-}$	$-20,8 \pm 0,1$

• Sorption von U(VI) an Montmorillonit

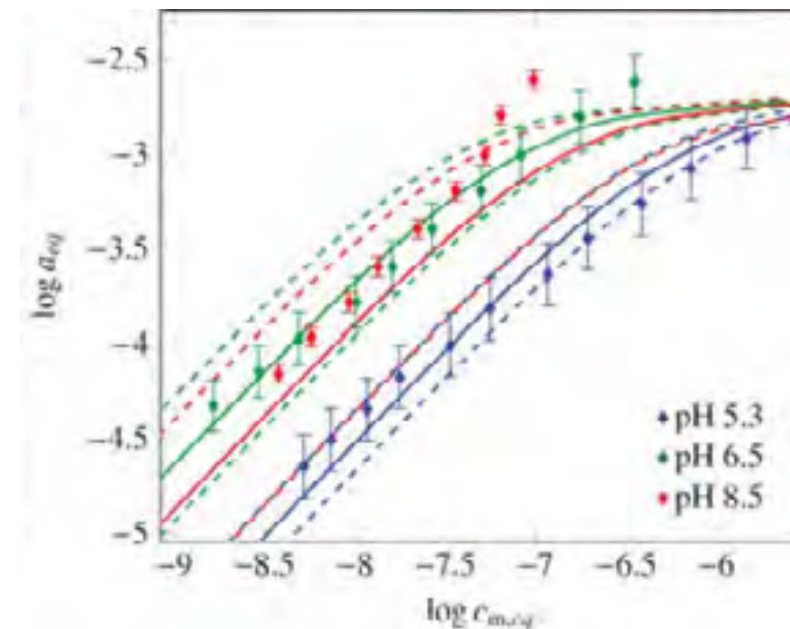
Modellierung der Sorption mit 2 SPNE SC/CE und SIT

Aus Sorptionsisothermen in NaCl und CaCl₂ ermittelte k_0 für $I = 0$

Oberflächenkomplex	$\log k_0$
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2^+$	$2,24 \pm 0,13$
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2\text{OH}$	$-3,84 \pm 0,47$
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2(\text{OH})_3^{2-}$	$-20,4 \pm 0,5$

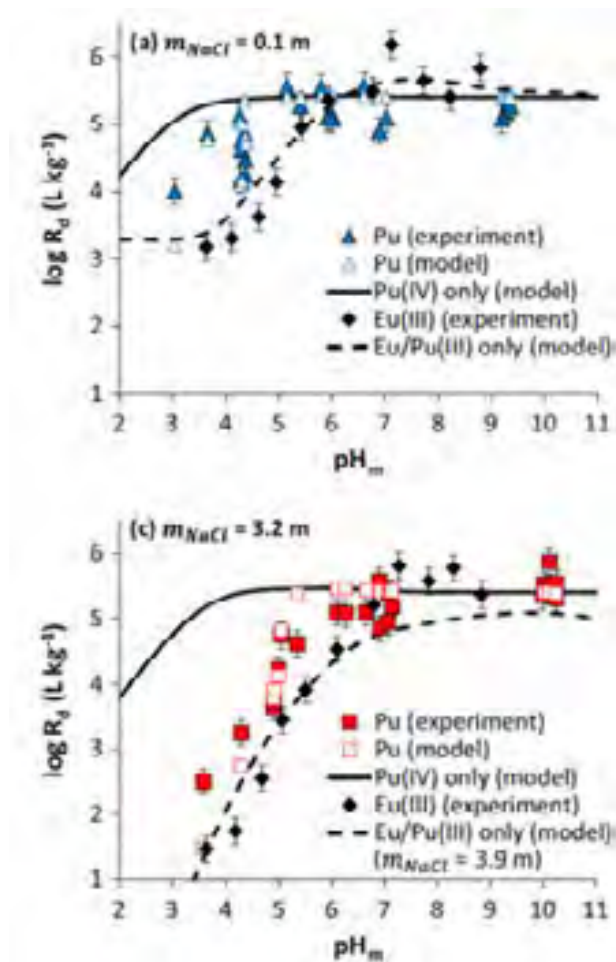
Für das simulierte Grundwasser aus k_0 berechnete k

Oberflächenkomplex	$\log k$ (berechnet)
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2^+$	$1,75 \pm 0,13$
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2\text{OH}$	$-4,37 \pm 0,47$
$\equiv\text{S}^{\text{S}}\text{OUO}_2(\text{OH})_3^{2-}$	$-21,0 \pm 0,5$



• Sorption von Eu(III) und Pu(IV) an Na-Illit

Redoxspeziation und Einfluss der Ionenstärke von NaCl

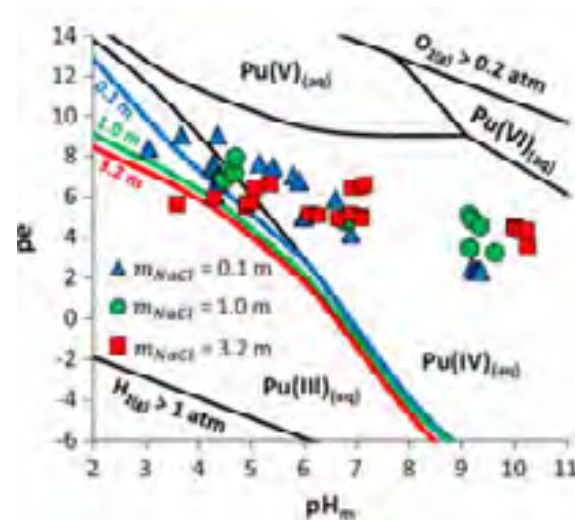


$3 \times 10^{-9} \text{ M Eu(III)}$

$8 \times 10^{-11} \text{ M Pu (85 \% Pu(IV))}$

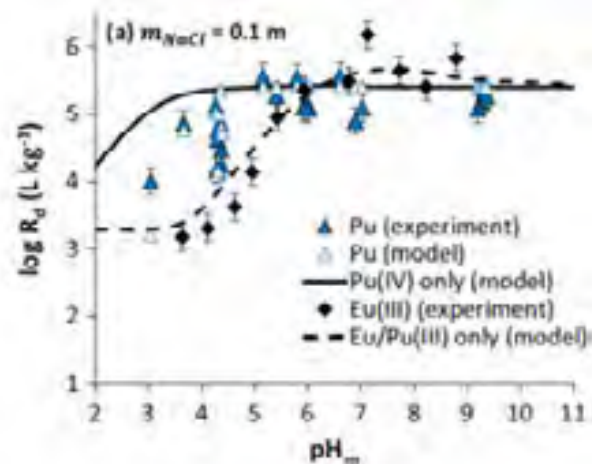
Anaerobe Bedingungen

Gleichgewichtseinstellung von einem Jahr für Pu-Experiment



- Sorption von Eu(III) und Pu(IV) an Na-Illit

Modellierung der Sorption mit 2 SPNE SC/CE und SIT

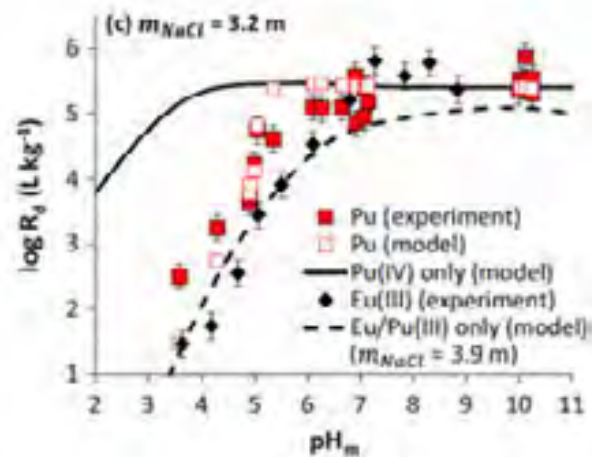


Eu(III)

Modell beschreibt die Sorptionsverläufe in Abhängigkeit von pH_m und m_{NaCl}

Pu(IV)

Modell sagt nur eine schwache Abhängigkeit der Sorption im Bereich $0,1 < m_{\text{NaCl}} < 3,2 \text{ m}$ voraus.



Gemessener R_d abhängig von Pu-Redoxspeziation in Lösung (Pu(X); X = III, IV, V oder VI):

$$R_{d,tot} = \frac{\sum_X R_d(X) \times [Pu(X)]_{tot.aq}}{\sum_X [Pu(X)]_{tot.aq}}$$

- Diffusion von Aktiniden



$$J = -D_e \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

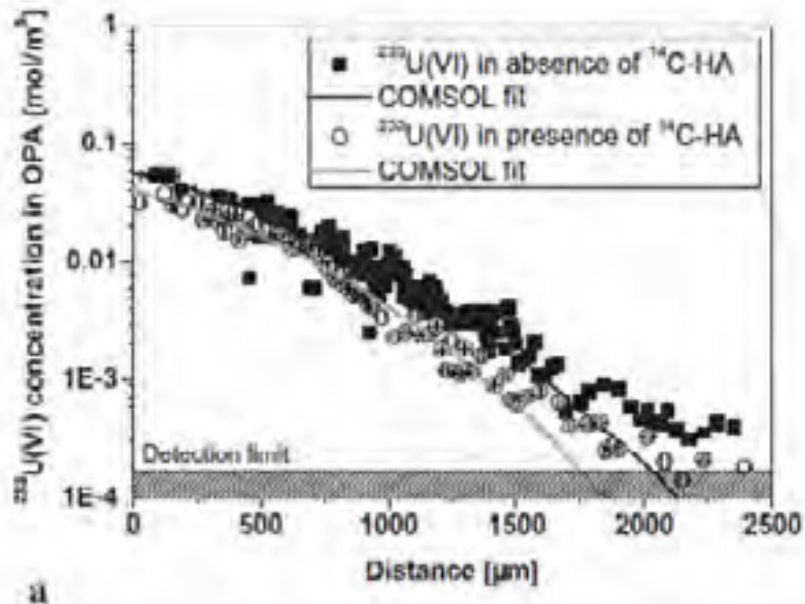
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_e}{\alpha} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$$\alpha = \varepsilon + \rho \cdot K_d$$

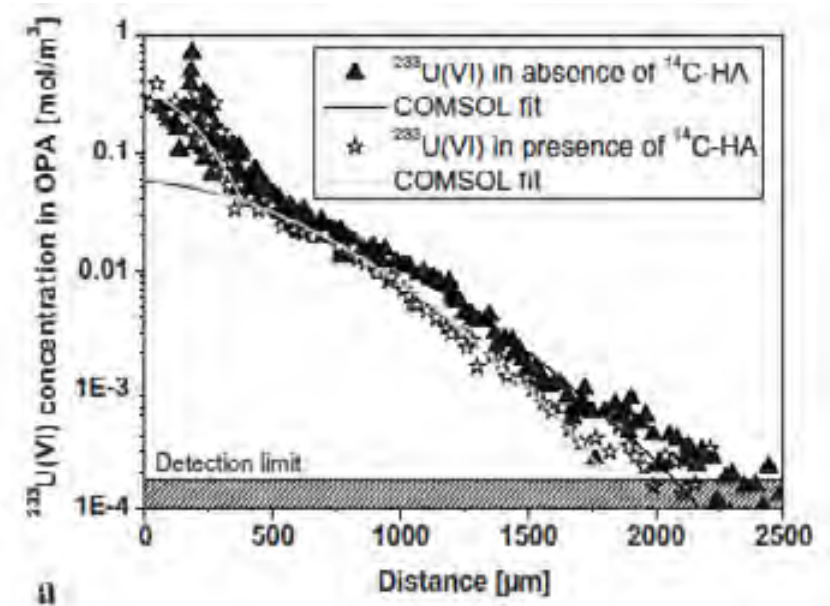
• Diffusion von U(VI) in Opalinuston

Einfluss von Temperatur und Huminsäure (^{14}C -HA)

25 °C



60 °C



Huminsäure

- Kein signifikanter Einfluss auf Diffusion von U(VI) (bei 25 °C und 60 °C)

• Diffusion von U(VI) in Opalinuston

Einfluss von Temperatur und Huminsäure (^{14}C -HA)

25 °C

	/	^{14}C -HA
U(VI)-Spezies	$\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ (aq)	
D_e [$\times 10^{-12}$ m ² /s]	1,9(4)	1,2(3)
K_d [m ³ /kg]	0,025(3)	0,020(3)

60 °C

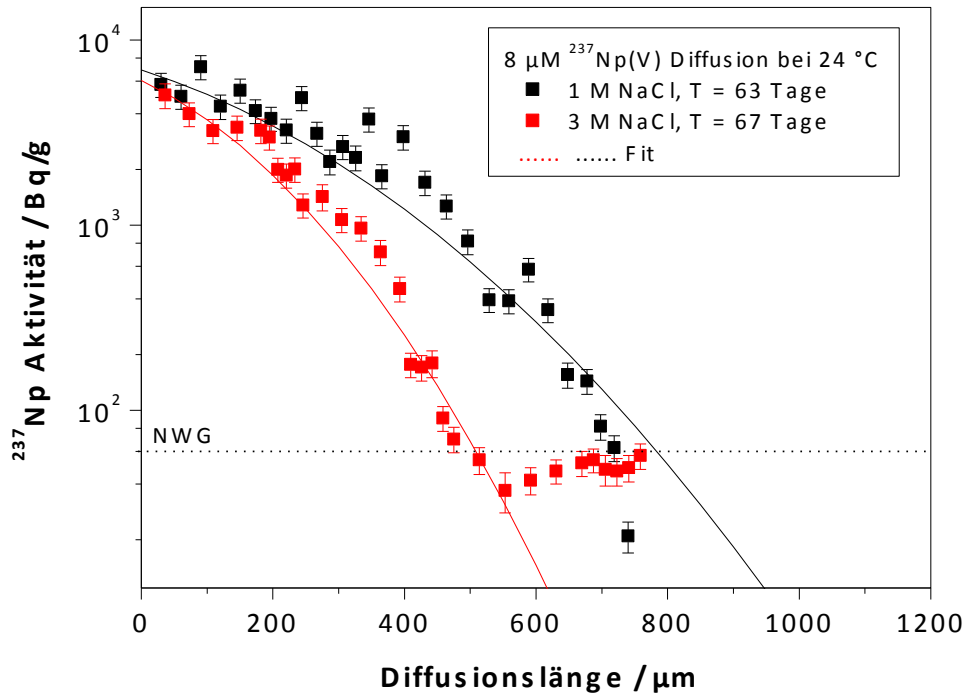
		^{14}C -HA	
	/		
		kolloidal	aquat.
		3(1)	3,0(5)
		2,2(8)	2,5(5)
		0,25(5)	0,045(5)
		0,30(5)	0,050(5)

Temperatur

- Zunahme von D_e mit Temperatur ($E_a \approx 10$ kJ/mol)
- Neue kolloidale Uran-Spezies bei 60 °C
- Stärkere Wechselwirkung von U(VI) mit dem Ton bei höherer Temperatur

• Diffusion von Np(V) in Opalinuston

Einfluss von Ionenstärke und mobiler Phase bei 24 °C



Elektrolyt	$^{237}\text{Np(V)}$	
	D_e ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	$\log K_d$ (L/kg)
1 M NaCl [1]	$6,9 \pm 1,2$	$2,5 \pm 0,1$
3 M, NaCl [1]	$2,4 \pm 1,0$	$2,3 \pm 0,1$
OPA PW [2]	$6,9 \pm 1,1$	$2,0 \pm 0,1$

Ionenstärke

- Deutliche Abnahme von D_e im NaCl-Medium
- Kein signifikanter Einfluss auf den K_d -Wert

[1] S. Amayri et al., Abschlussbericht BMWi-Projekt 02 E 10991 (2016)

[2] T. Wu et al., Environ. Sci. Technol. 43 (2009) 6567

• Diffusion von Np(V) in Opalinuston

Einfluss von Temperatur und mobiler Phase

Elektrolyt	²³⁷ Np(V)		
	D_e ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	$\log K_d$ (L/kg)	E_a (kJ/mol)
1 M NaCl, 60 °C [1]	17,5 ± 1,8	2,5 ± 0,1	21,3 ± 2,4
1 M NaCl, 24 °C [1]	6,9 ± 1,2	2,5 ± 0,1	
OPA PW, 60 °C [1]	15,0 ± 1,6	1,5 ± 0,1	17,7 ± 2,0
OPA PW, 24 °C [2]	6,9 ± 1,1	2,0 ± 0,1	

Temperatur

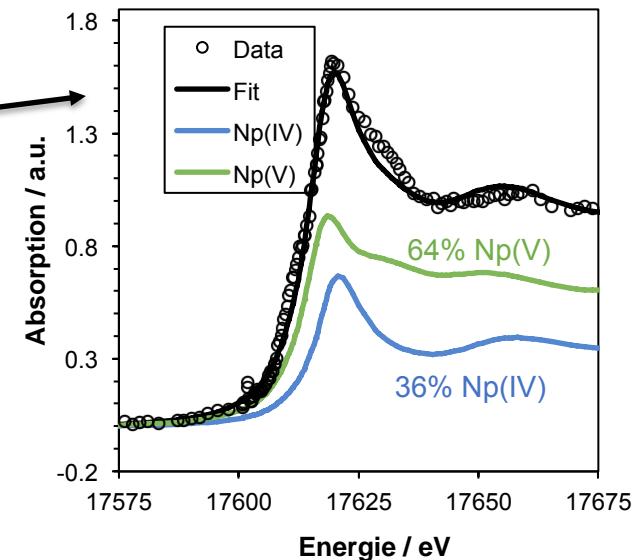
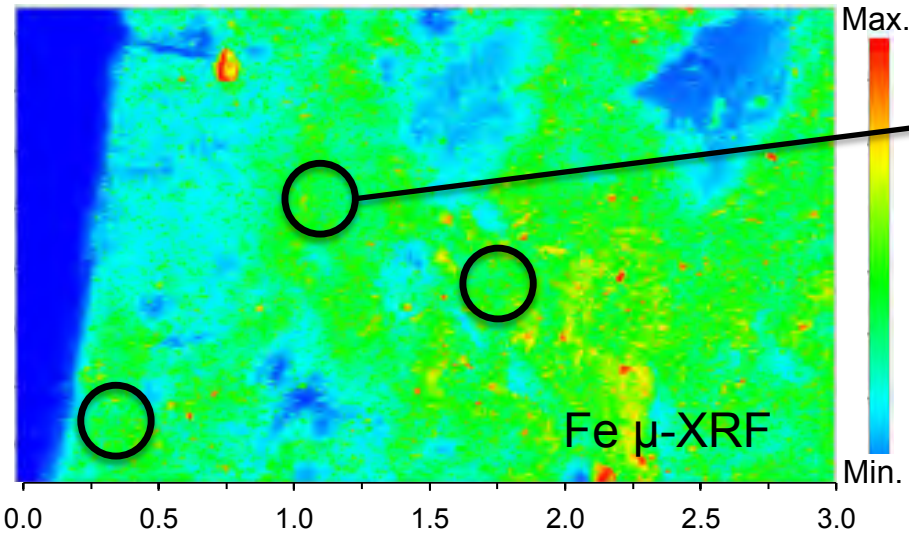
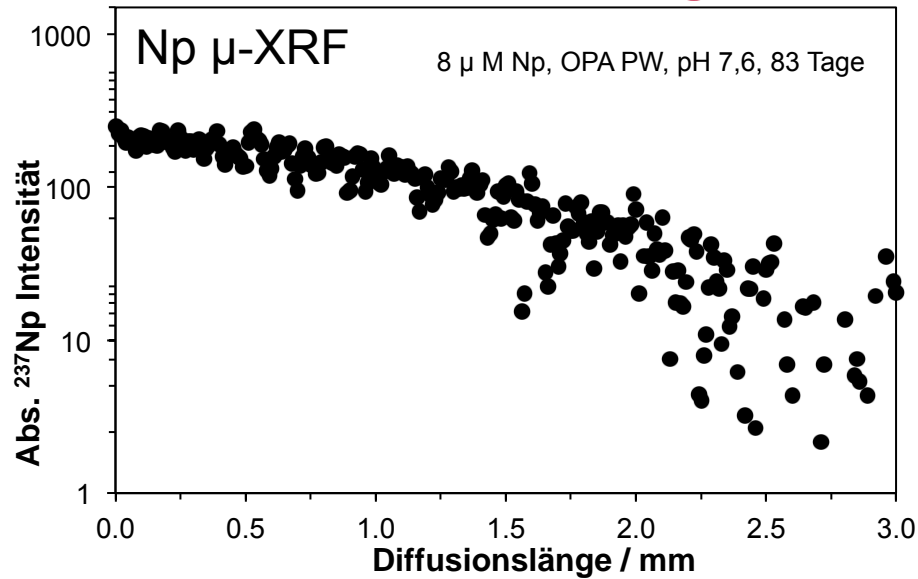
- Zunahme von D_e
- Kein signifikanter Einfluss auf den K_d -Wert

[1] S. Amayri et al., Abschlussbericht BMWi-Projekt 02 E 10991 (2016)

[2] T. Wu et al., Environ. Sci. Technol. 43 (2009) 6567

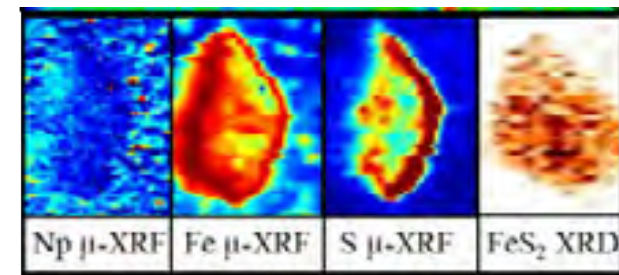
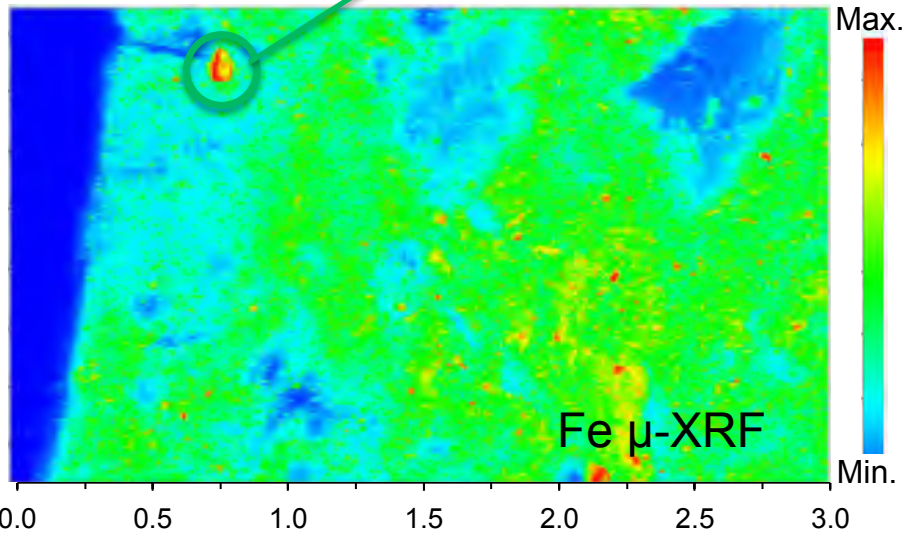
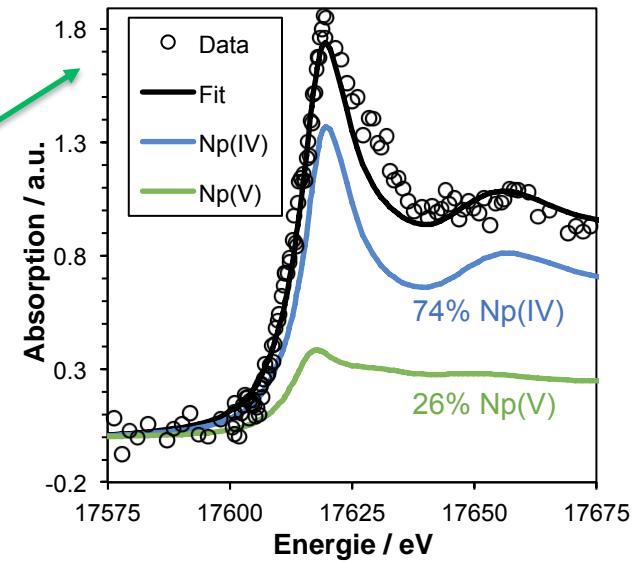
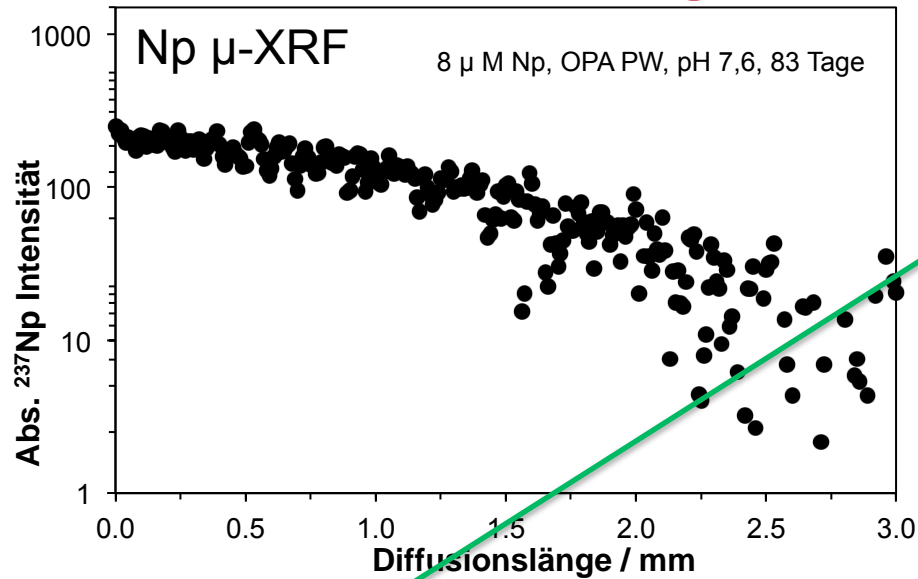
Speziation von Np(V) nach Diffusion in Opalinuston

Einfluss der Heterogenität des Tones

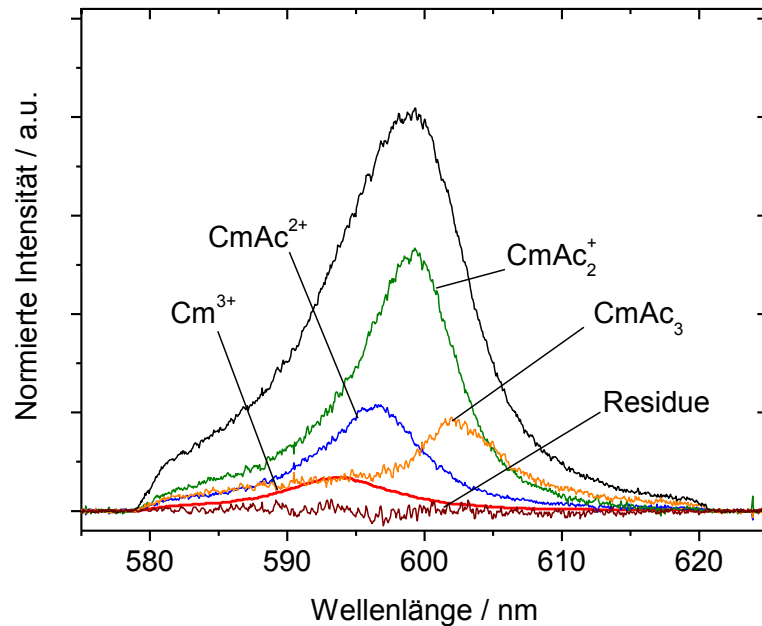


Speziation von Np(V) nach Diffusion in Opalinuston

Einfluss der Heterogenität des Tones



• Komplexierung von Aktiniden mit Tonorganika



$$\ln K^0(T) = -\frac{\Delta_r H^0}{R \cdot T} + \frac{\Delta_r S^0}{R}$$

• Komplexierung von Aktiniden mit Tonorganika

Organische Moleküle im Tongestein

- Vorkommen kleiner organischer Moleküle
- Bildung durch Radiolyse aus höheren organischen Molekülen

	Opalinuston ^[1]	Callovo-Oxfordian ^[2]
Formiat	2 μ M	2 μ M
Acetat	203 μ M	1865 μ M
Propionat	27 μ M	127 μ M
Lactat	9 μ M	8 μ M
Malat	-	< 1 μ M

[1] Courdouan et al., Appl. Geochem., 22, 2926–2939, 2007

[2] Courdouan et al., Appl. Geochem., 22, 1537–1548, 2007

- Komplexierung von Cm(III) mit Acetat

Bestimmung von $\Delta_r H^0$ und $\Delta_r S^0$

	$\text{Cm}^{3+} + \text{Ac}^- \leftrightarrow \text{CmAc}^{2+}$		$\text{CmAc}^{2+} + \text{Ac}^- \leftrightarrow \text{CmAc}_2^+$		$\text{CmAc}_2^+ + \text{Ac}^- \leftrightarrow \text{CmAc}_3$	
	$\Delta_r H_m^0 / \text{kJ/mol}$	$\Delta_r S_m^0 / \text{J/K}\times\text{mol}$	$\Delta_r H_m^0 / \text{kJ/mol}$	$\Delta_r S_m^0 / \text{J/K}\times\text{mol}$	$\Delta_r H_m^0 / \text{kJ/mol}$	$\Delta_r S_m^0 / \text{J/K}\times\text{mol}$
NaClO ₄	3 ± 13	70 ± 37	33 ± 15	139 ± 52	29 ± 36	100 ± 106
NaCl	6 ± 2	79 ± 8	28 ± 12	125 ± 41	25 ± 9	92 ± 29
CaCl ₂	6 ± 3	88 ± 10	35 ± 9	146 ± 26	42 ± 60	141 ± 174

D.R. Fröhlich et al., Dalton Trans. 43 (2014) 3958

- **Komplexierung von An(III)/Ln(III) mit Borat**
-

Borat-Quellen in einem Endlager

Inventar im Endlager:

- verglaste HAW-Abfälle: Laugungsexperimente $\sim 0,1$ g/L Bor
- Kerntechnik: borsäurehaltige Verdampferkonzentrate
- Bauwerk: Zementzuschlagstoff (bis 1 Ma%, Betonverflüssiger)

Geologische Formationen:

- salines Tongestein: [B] $\sim 2,2$ g/kg (Lagerstätte Leine-Folge)
- Anhydrit: [B] $\sim 0,2$ g/kg (Lagerstätte Staßfurt-Folge)
- WIPP, New Mexiko, USA: Boraxablagerungen ([B] $\sim 0,49$ g/kg)

• Komplexierung von An(III)/Ln(III) mit Borat

Schlussfolgerung

- Schwache Komplexierung von An(III)/Ln(III) mit Boratspezies
- Geringere Löslichkeit und Ausfällung von An(III)/Ln(III)-Boratphasen beobachtet

=> Borat besitzt keine mobilisierende Wirkung auf An(III)

• Zusammenfassung und Ausblick

“Aktiniden-Verbund”

- Effektive Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern aus Universitäten und Großforschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft
- Abstimmung der Versuchsbedingungen und Unterstützung bei methodischen Entwicklungen
- Enger Kontakt zu Experten im In- und Ausland
- Bündelung des in Deutschland vorhandenen Know-hows

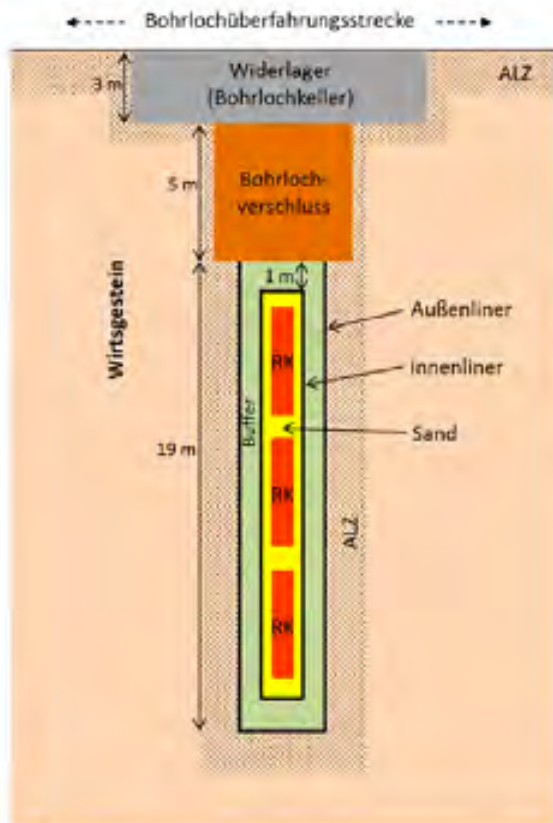
- Entwicklung eines Prozessverständnisses für die Radionuklidmigration
- Umfassende und abgesicherte thermodynamische Daten für Datenbanken (z.B. THEREDA, NEA TDB) und die Langzeitsicherheitsanalyse

- Beitrag zur Nachwuchsförderung und zum Kompetenzerhalt auf den Gebieten der Kern- und Radiochemie sowie der kerntechnischen Sicherheit

• Zusammenfassung und Ausblick

Verbundprojekt GRaZ (2015-2018)

Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ)



Arbeitspakete:

1. Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (mittlere bis hohe Ionenstärke)
2. Radionuklidrückhaltung an Tongestein (hyperalkalin, mittlere bis hohe Ionenstärke)
3. Thermodynamische Daten/geochemische Modellierung
4. Methodenentwicklung

Abb. 4: Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrloches

Quelle: DBE Technology, Techn. Bericht zum Projekt AnSichT, 2014

09.-10. November 2016 | 12. Statusgespräch

Verbundprojekte zu Stoffgesetzen für Steinsalz: Schlussfolgerungen aus den Vorhaben I bis III und Vorstellung des Projektes WEIMOS

(Joint Projects on Constitutive Models for Rock Salt: Conclusions from Phases I to III and Introduction of the Project WEIMOS)

Andreas Hampel, Hampel Consulting, Mainz, Germany

Benjamin Reedlunn, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA

Abstract

Well-tested constitutive models and calculation procedures are required for reliable numerical simulations performed for the design, stability analysis, and evaluation of the long-term behavior of underground repositories for radioactive wastes in rock salt. A main goal of the calculations is to check and prove the long-term integrity of the geological barrier.

In three joint projects between 2004 and 2016, constitutive models for the thermo-mechanical behavior of rock salt were tested and compared by the following partners: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (project I); Dr. Andreas Hampel, Scientific Consultant, Mainz; Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig; Karlsruher Institut für Technologie; Leibniz Universität Hannover; Technische Universität Clausthal; Technische Universität Braunschweig (project III); Sandia National Laboratories, Albuquerque and Carlsbad, NM, USA (project III).

In these studies, numerous recalculations of systematic laboratory tests and simulations of selected underground structures were performed in order to check the ability of the involved models to describe reliably the various deformation phenomena in rock salt – transient and steady-state creep, evolution of damage and dilatancy (volumetric strains), creep failure and short-term strength, post-failure behavior, residual strength – and their dependences of in-situ relevant boundary conditions – stresses, temperatures, and deformation rates – in a wide range.

The partners performed the calculations successfully and the results were in good agreement with each other and with experimental results from the laboratory and from in-situ measurements. This demonstrates the applicability of the involved models and confirms that the partners do have appropriate tools for model calculations.

The studies have also revealed needs for the further development of the models in four topics:

- Deformation behavior at small deviatoric stresses
- Influence of temperature and stress state on the damage reduction
- Deformation behavior resulting from tensile stresses
- Influence of inhomogeneities (layer boundaries, interfaces) on deformation

These subjects are explored experimentally and theoretically in the new joint project WEIMOS (Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz; English title: Joint Project: Further Development and Qualification of the Rock Mechanical Modeling for the Final HLW Disposal in Rock Salt; period: April 1st, 2016 – March 31st, 2019) of the partners Dr. Hampel, IfG Leipzig, LU Hannover, TU Braunschweig, TU Clausthal, and Sandia National Laboratories.



12. Projektstatusgespräch ZU BMW-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle

Karlsruhe, 09.-10. November 2016

Verbundprojekte zu Stoffgesetzen für Steinsalz:

Schlussfolgerungen aus den Vorhaben I bis III und Vorstellung des Projektes WEIMOS



Dr. Andreas Hampel



Benjamin Reedlunn



History (\approx 1980s – 1990s):

Constitutive models for thermomechanical deformation of rock salt:

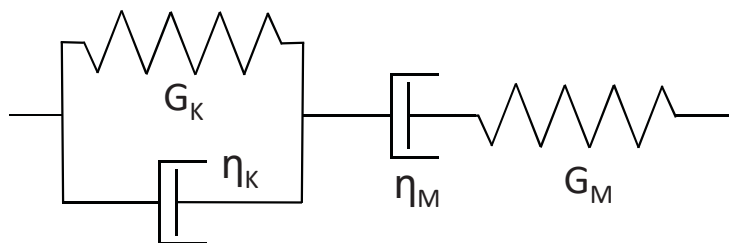
developed by several groups based on numerous lab tests with rock salt and in-situ measurements

Modeling: Macroscopic deformation behavior is a result of microphysical mechanisms:

e.g. creep: generation, annihilation, glide, climb, cross-slip of dislocations,
interaction of dislocations with each other and with “impurities” (salt minerals),
formation of subgrains

Different physical and mathematical descriptions, e.g. for creep:

... using rheological elements

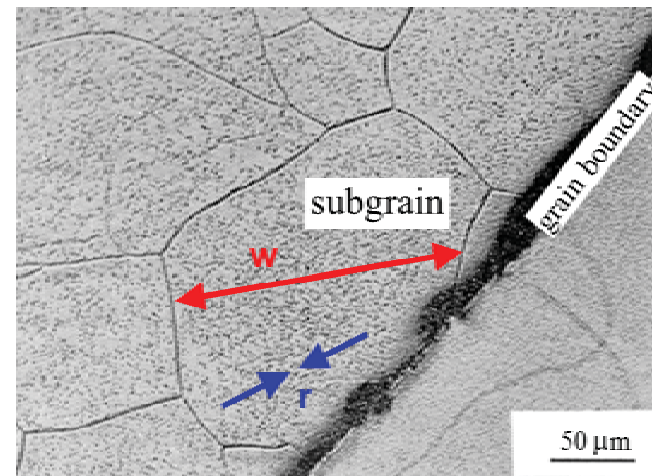


Kelvin element
(transient creep)

Maxwell element
(steady-state creep)

... or

describing the evolution of the microstructure



w : subgrain size

r : dislocation spacing

$$\sim T, \sigma_{eq}, \epsilon$$

Joint Project I – III

Partner	Constitutive Model	Physical basis
BGR Hannover (JP I)	CDM	Evolution of deformation microstructure
A. Hampel, Mainz	CDM	
IfG Leipzig	Günther/Salzer Model	Advanced strain hardening approach
	Minkley Model	
KIT Karlsruhe	KIT Model	
Leibniz Universität Hannover (LUH)	Lubby-MDCF Model	
Technische Universität Clausthal (TUC)	Lux/Wolters Model	
Technische Universität Braunschweig (TUBS, JP III)	TUBSsalt	
Sandia National Laboratories Albuquerque + Carlsbad, NM, USA (JP III)	MD Model (creep)	

In 2000, Udo Hunsche (BGR): Let's perform a comparison of the models!

-> How?

Development of a procedure

1. Perform systematic lab test series with certain salt types

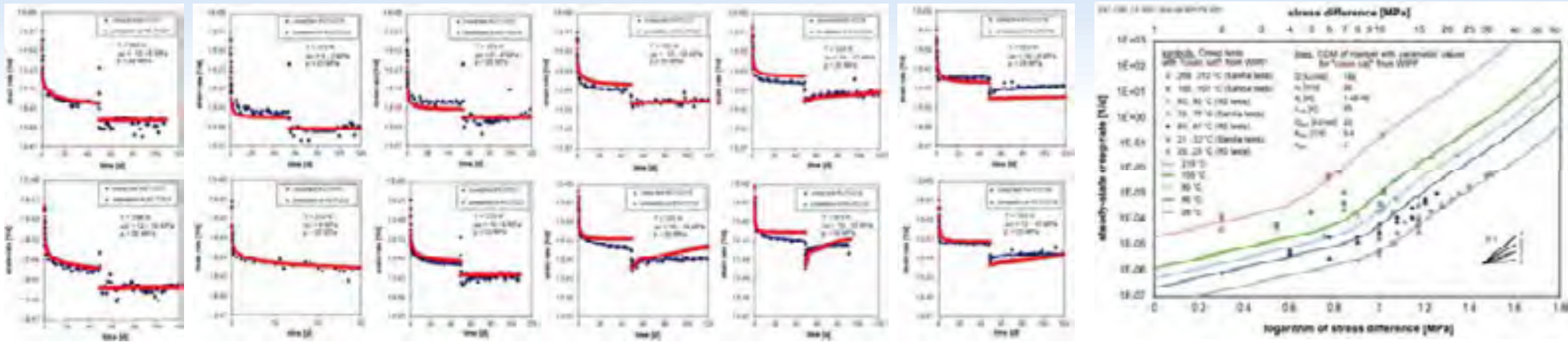
- investigate (well-controlled in the lab) the various deformation phenomena (creep, evolution of damage & dilatancy, (creep) failure, post-failure behavior, healing, ...) and their dependences on in-situ relevant boundary conditions ($\sim \sigma_{eq}, \sigma_3, T, d\varepsilon/dt$)

2. Recalculate the lab tests

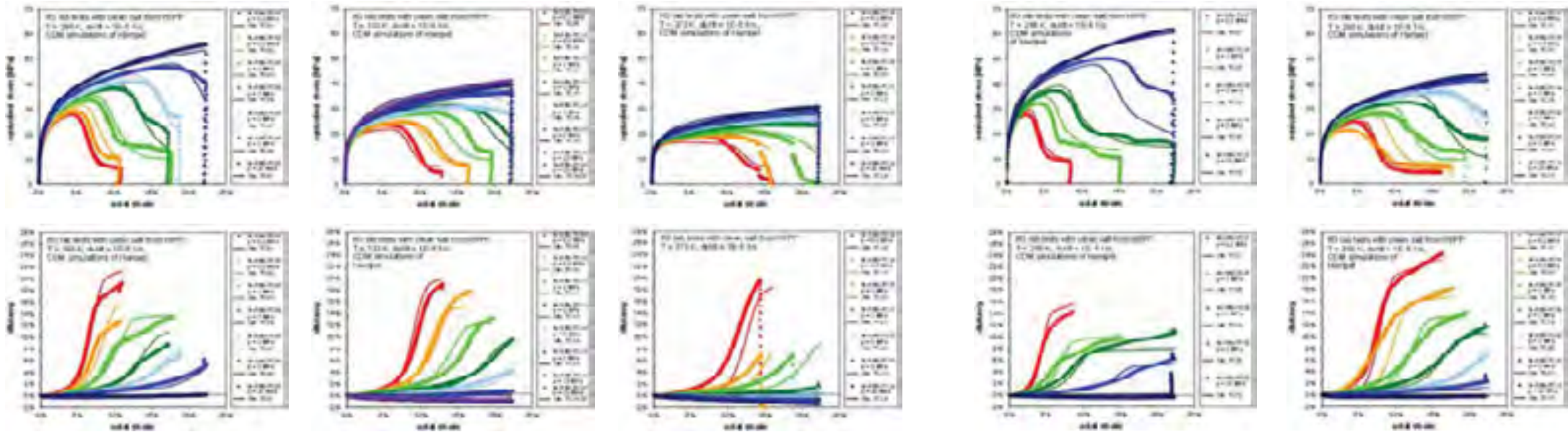
- check the ability of the models to describe the various deformation phenomena and the dependencies
 - determine a unique set of parameter values for each type of salt
- => constitutive model is prepared and valid to model various potential in-situ situations

Perform & recalculate systematic series of lab tests with one salt type (ex.: clean salt from WIPP)

Creep tests at different temperatures and stress differences



Strength tests at different confining stresses, temperatures, and deformation rates



All tests were recalculated with one unique set of parameter values

Development of a procedure

1. Perform systematic lab test series with certain salt types

- investigate (well-controlled in the lab) the various deformation phenomena (creep, evolution/reduction of damage & dilatancy, failure, post-failure behavior, healing, ...) and their dependencies on in-situ relevant boundary conditions ($\sim \sigma_{eq}, \sigma_3, T, d\varepsilon/dt$)

2. Recalculate the lab tests

- check the ability of the models to describe the various deformation phenomena and the dependencies
 - determine a unique set of parameter values for each type of salt
- => constitutive model is prepared and valid to model various potential in-situ situations

3. Simulate real underground structures that display the considered phenomena

- check the suitability of the models
- compare the partner's results with each other and with in-situ measurements

Joint Projects (funded by)	Period	Main objectives: investigate and compare constitutive models and modeling procedures
I (BMBF)	2004 – 2006	Modeling of basic deformation phenomena in rock salt: transient & steady-state creep, evolution of damage & dilatancy, creep failure, post-failure behavior, residual strength
II (BMBF)	2007 – 2010	3-D simulations of real underground structures, temporal extrapolations, calculation of permeability in DRZ of a highly- loaded pillar
III (BMW i)	2010 – 2016	Modeling of <ul style="list-style-type: none"> • damage reduction and healing (-> long-term integrity) <ul style="list-style-type: none"> a) rock salt from Asse mine • temperature dependence of deformation (-> HLW) <ul style="list-style-type: none"> a) rock salt from Asse mine (domal salt), b) rock salt from WIPP (bedded salt)



WEIMOS (BMW i)	2016 – 2019	Further development and qualification of the rock mechanical modeling for the final HLW disposal in rock salt
-------------------	-------------	---

Simulation of real underground structures

JP III.1: Simulations of damage reduction and healing in the Asse mine

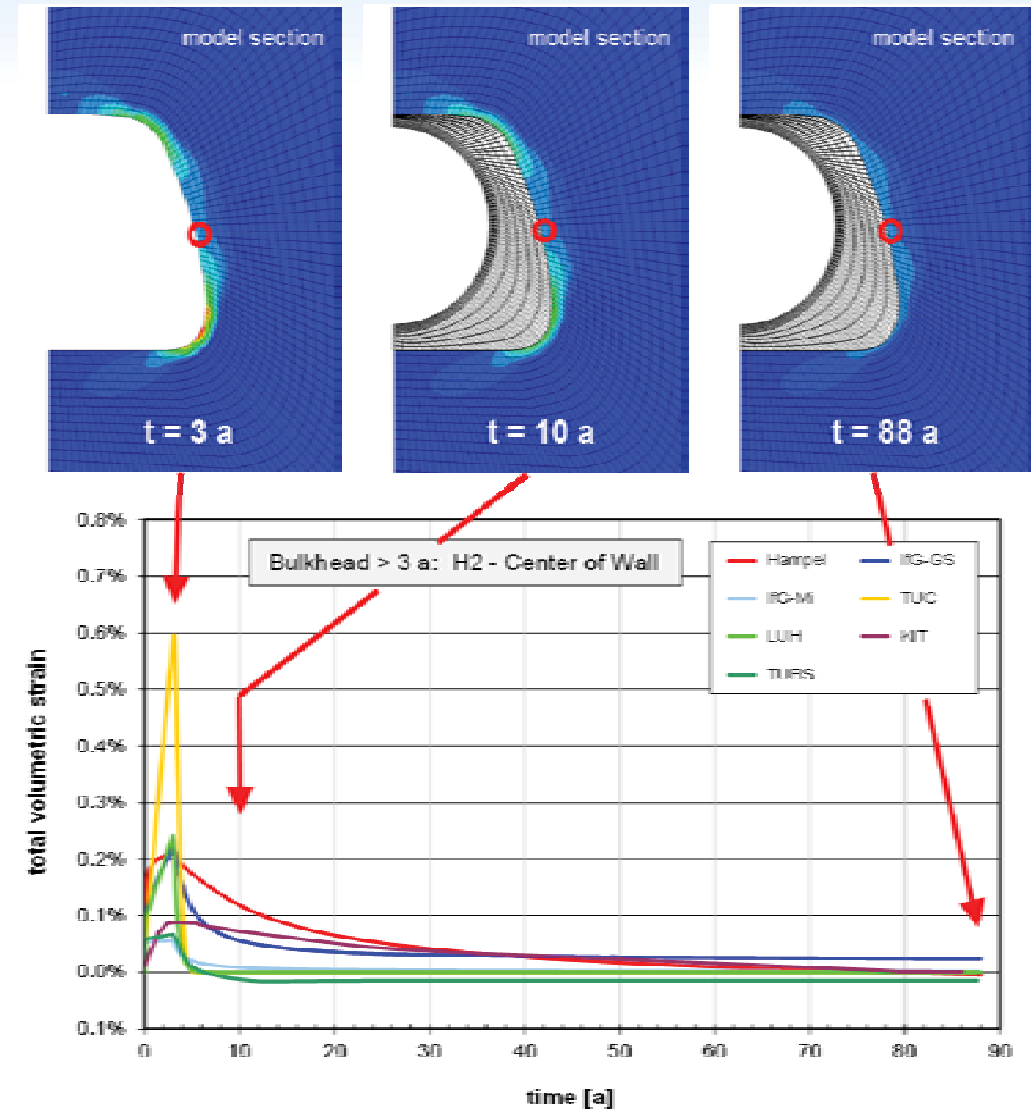
Bulkhead ("Dammjoch", Asse mine)



Basis for modeling & parameter determination:
by now only 2 reliable laboratory healing tests (TUC)

=> **WEIMOS:**

- more healing tests at different T and $\Delta\sigma$
- dilatancy measurements with very high resolution (TUC lab, WIPP salt)

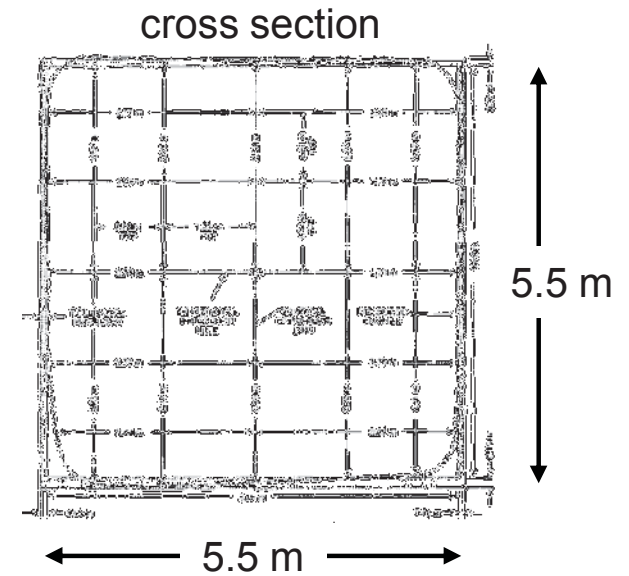
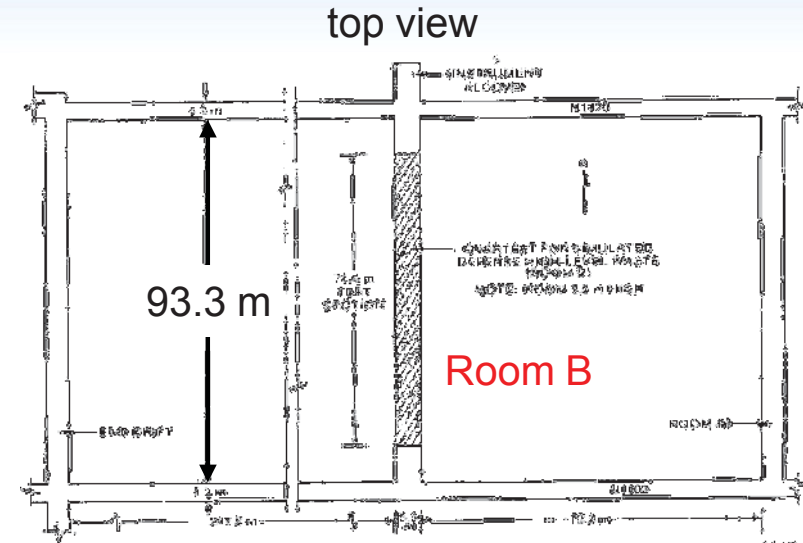
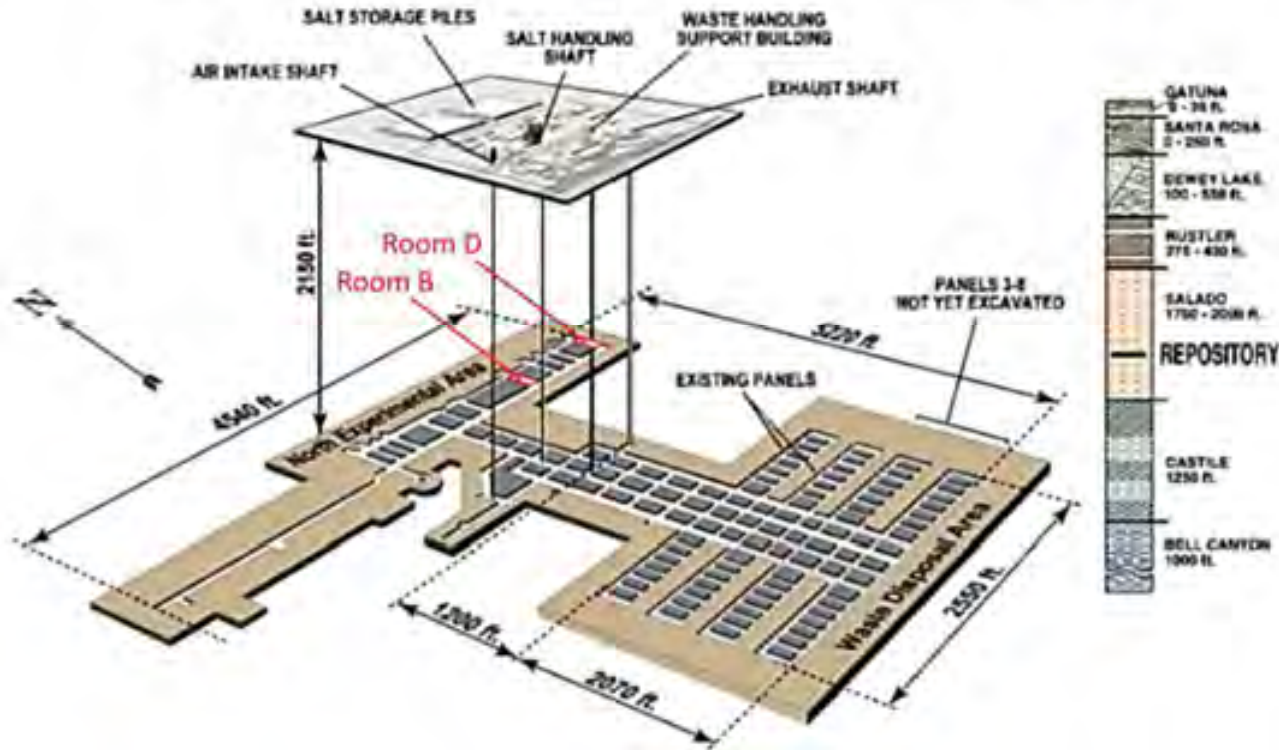


Simulation of real underground structures

JP III.2: Simulations of in-situ temperature influence in WIPP

- a) Isothermal Room D
 - b) heated Room B
- } (identical geometry)

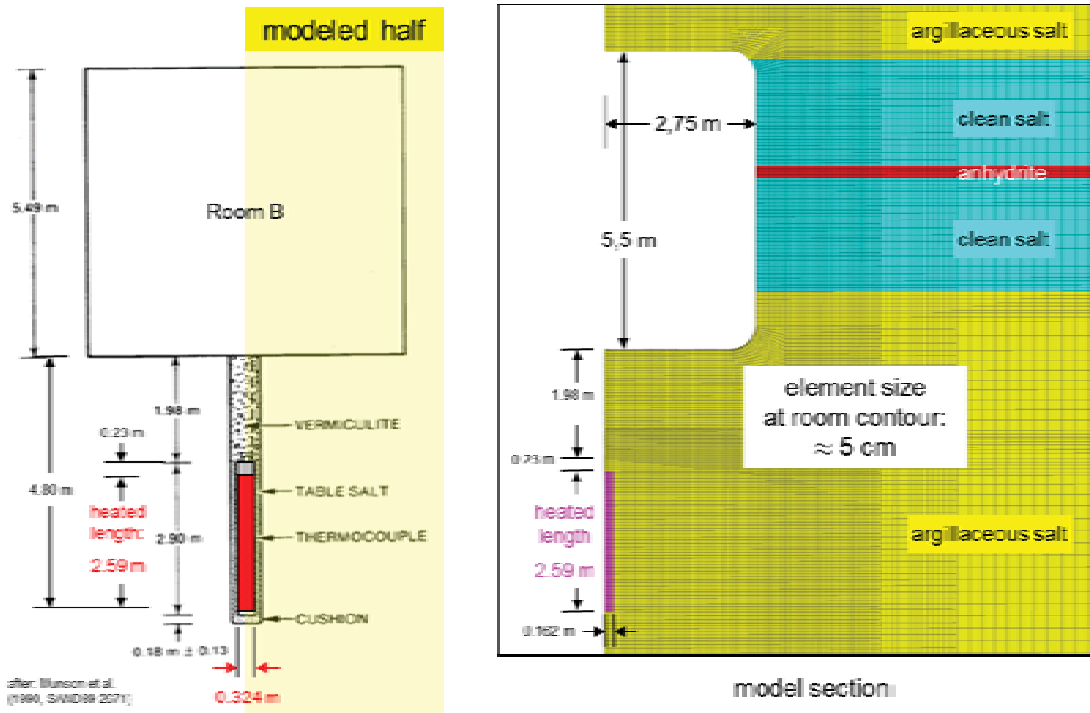
WIPP Facility and Stratigraphic Sequence



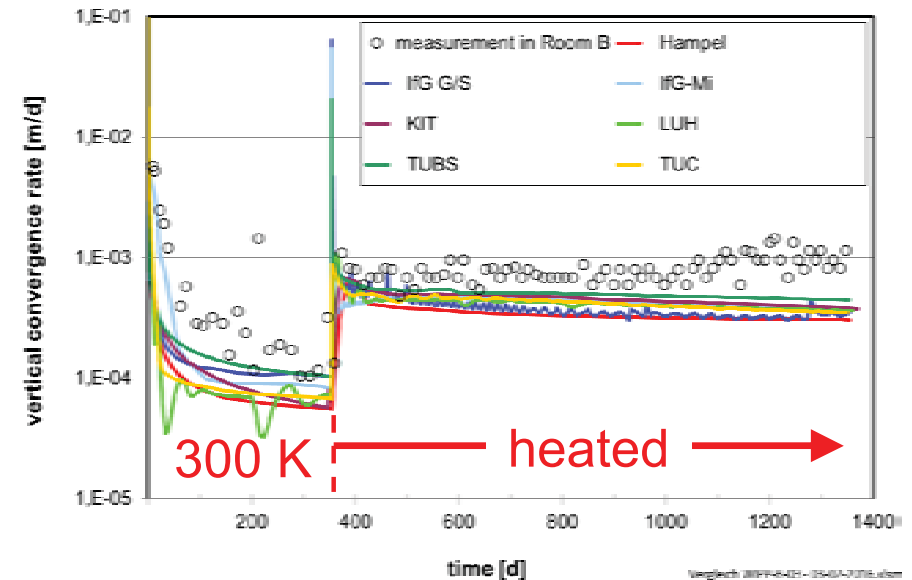
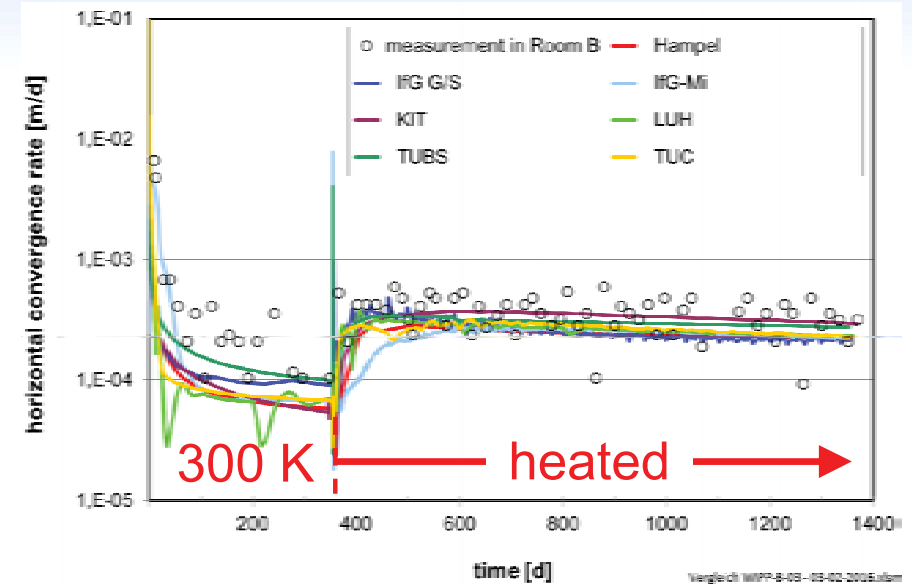
Simulation of real underground structures

JP III: Simulations of in-situ temperature influence at WIPP

Salt below Room B heated after 354 days



convergence rates of Room B

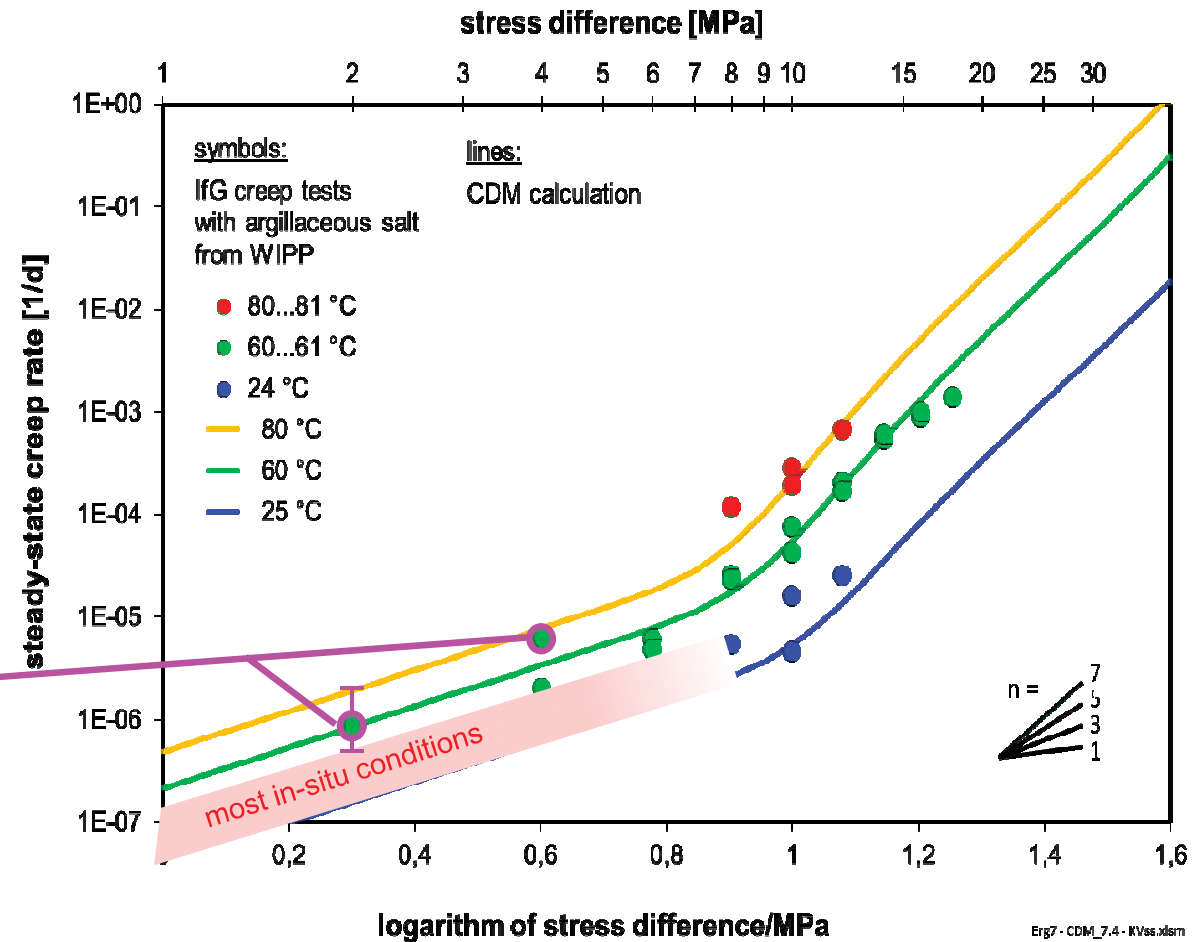
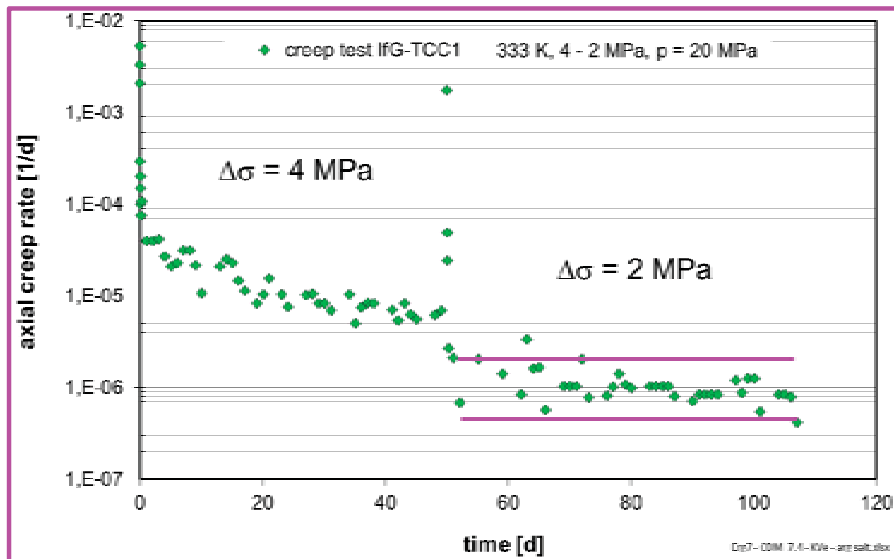


Simulated with unique parameter values only from lab tests with WIPP salt

Study: influence of modeling of small, in-situ relevant deviatoric stresses

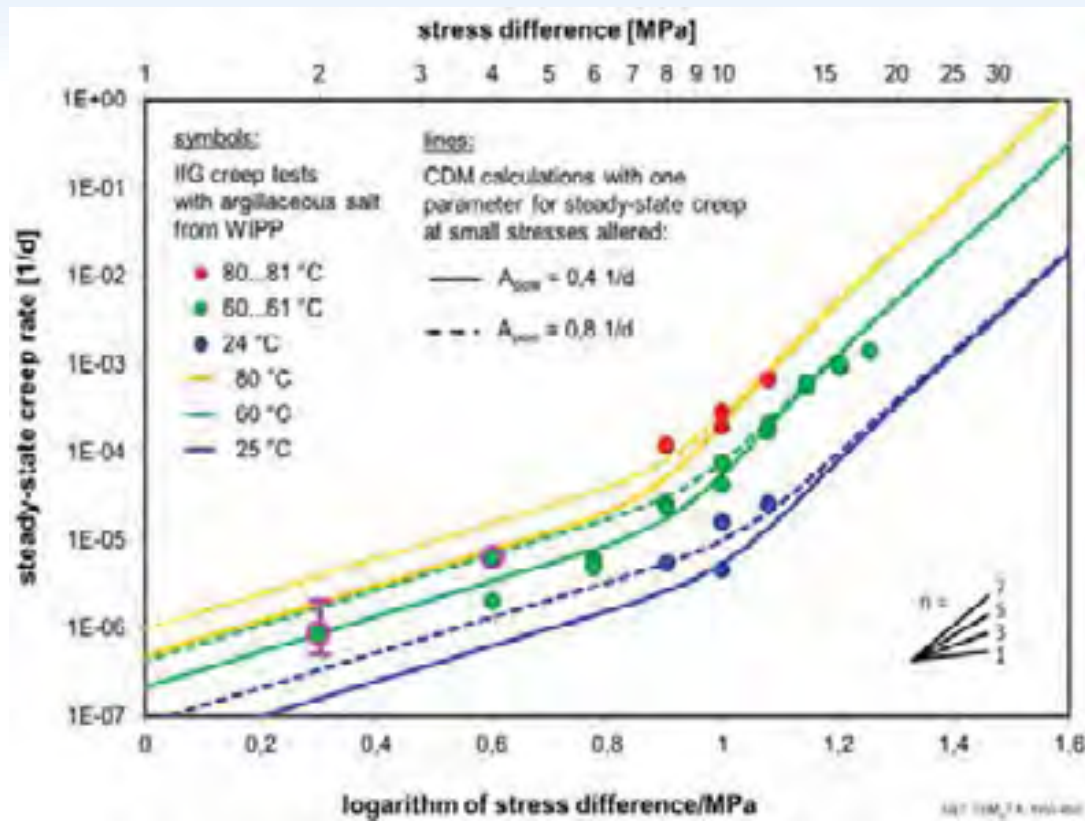
steady-state creep rates of WIPP salt

creep test with WIPP salt at 4 and 2 MPa

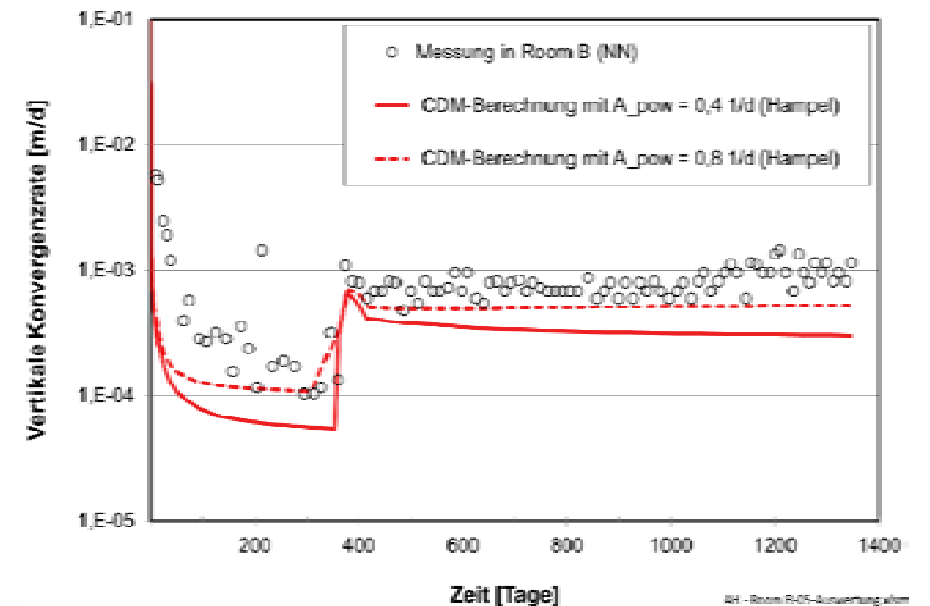
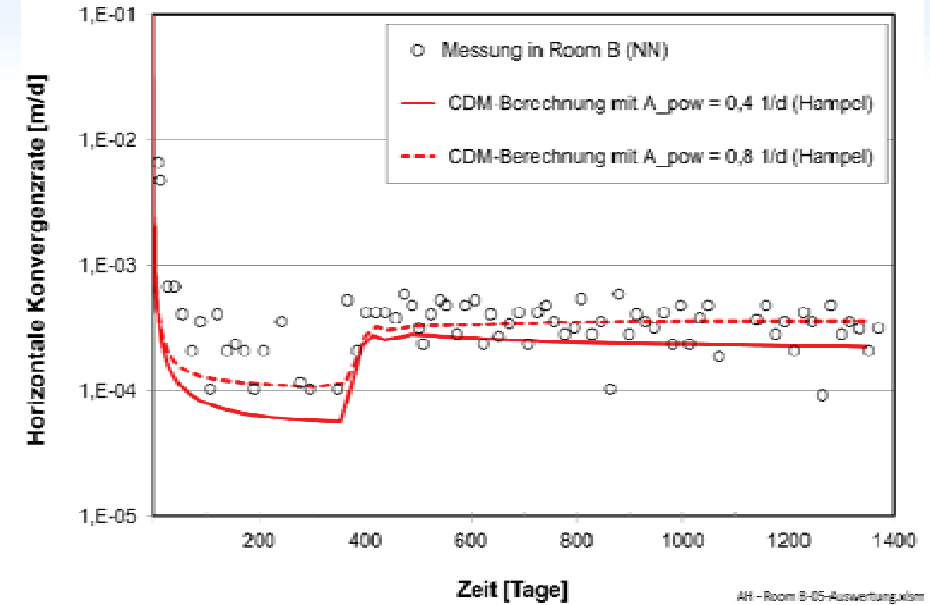


Study: influence of modeling of small, in-situ relevant deviatoric stresses

steady-state creep rates of WIPP salt



convergence rates of Room B

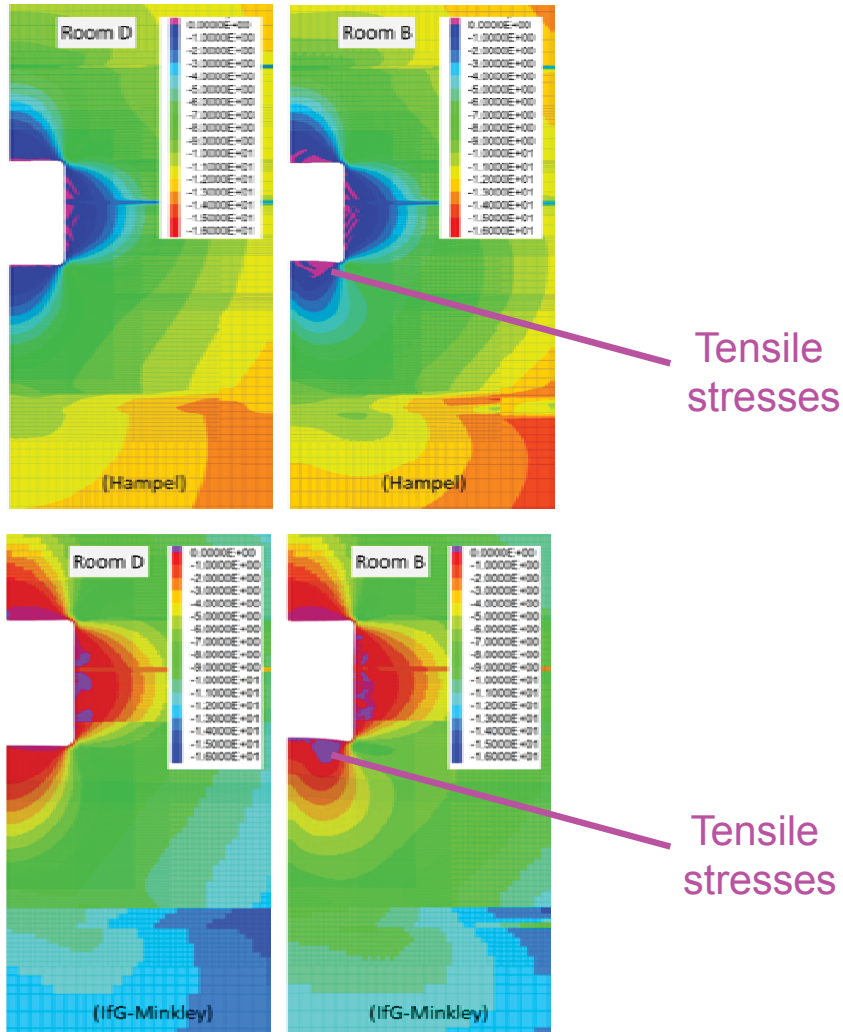


=> **WEIMOS:**

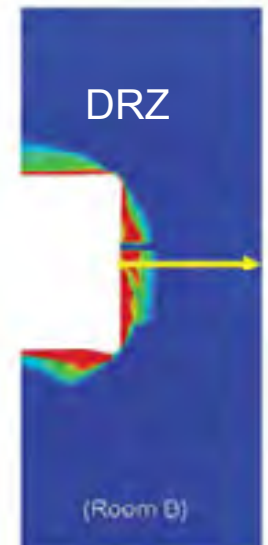
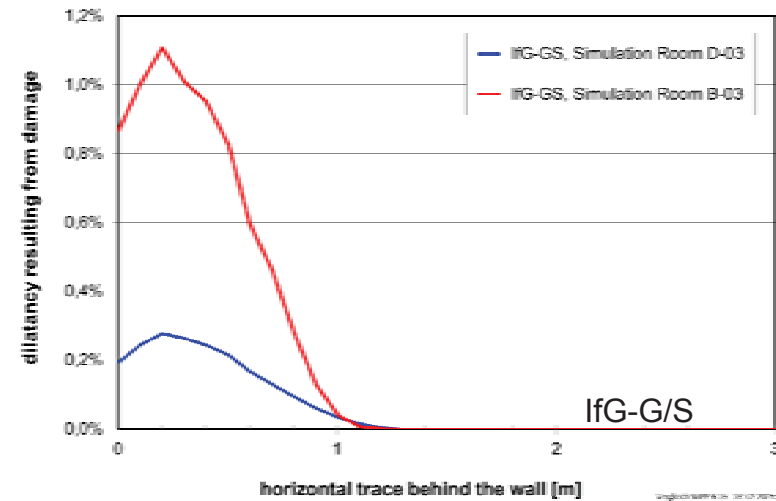
- triaxial creep tests at RT and small $\Delta\sigma$ (WIPP salt)
- very stable boundary conditions
- strain measurement with very high resolution

WEIMOS: Further development of the rock-mechanical modeling

- I. T and $\Delta\sigma$ influence on damage reduction
- II. Deformation behavior at small stresses
- III. Deformation resulting from tensile stresses



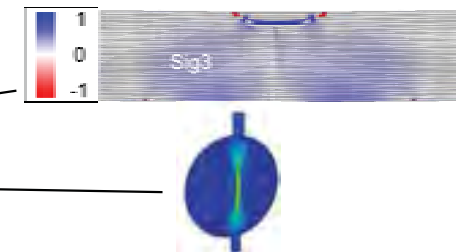
-> influence of tensile stresses



WEIMOS:

started with basic calculation studies:

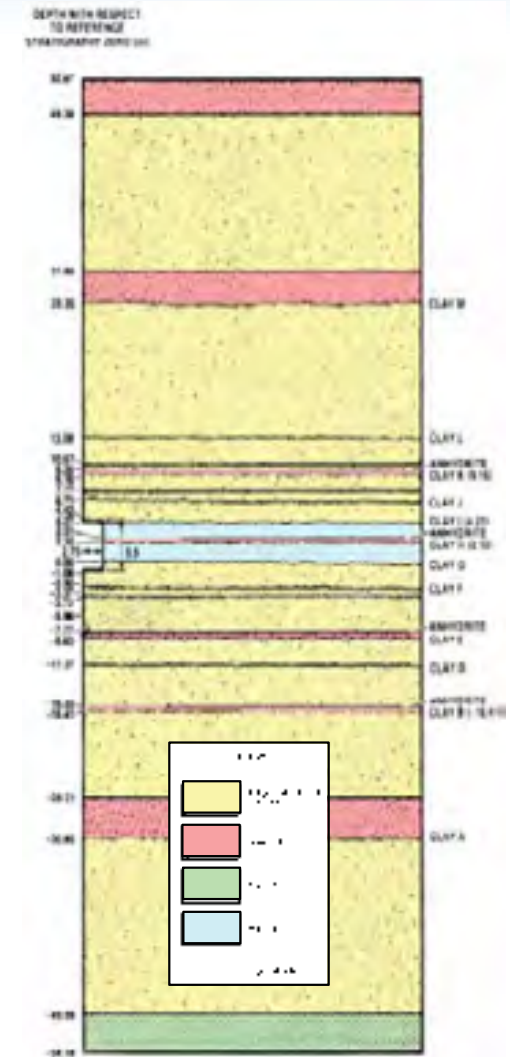
- bending beam
- Brazilian test



WEIMOS: Further development of the rock-mechanical modeling

- I. T and $\Delta\sigma$ influence on damage reduction
- II. Deformation behavior at small stresses
- III. Deformation resulting from tensile stresses
- IV. Modeling of layer boundaries and interfaces

- influence on convergence ?
(e.g. WIPP: sliding on clay seams)
- influence on damage and dilatancy in the DRZ ?
 - lab: shear tests on layered salt specimens / blocks (Sandia / RESPEC ?)
 - in-situ experiments ?
- improved understanding of shear stresses & strains
- improved rock-mechanical modeling
- reduced uncertainties

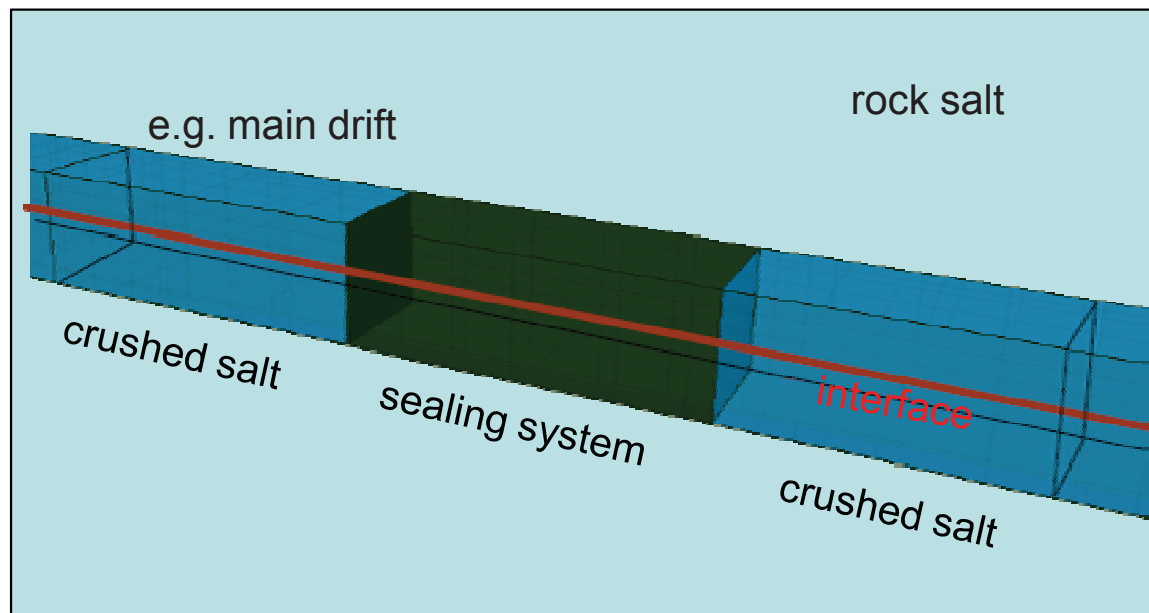


Munson et al. (1990):
Sandia Report SAND89-2671

Demonstration of improved modeling in WEIMOS (I – IV)

V. Virtual Demonstrator

Simulation of a complex model to demonstrate the improved modeling of the various investigated phenomena



- small deviatoric stresses
- damage reduction and healing
- influence of interfaces/layer boundaries
- influence of e.g. thermally induced tensile stresses

Simulation: step 1: open drift
 step 2: installation of dam & backfill
 step 3: post-operational phase and long-term behavior

Conclusions from Joint Project phases I – III

We have developed a procedure to compare different constitutive models

- performance and recalculation of systematic lab tests
- simulations of typical in-situ situations

Constitutive models with a unique salt-type-specific set of parameter values

- are appropriate to describe various thermo-mechanical deformation phenomena and their dependencies on in-situ relevant boundary conditions in a wide range
transient and steady-state creep,
evolution of damage and dilatancy,
creep failure and short-term strength,
post-failure behavior and residual strength,
(damage and dilatancy reduction and healing) } $\sim \sigma_{eq}, \sigma_3, T, d\varepsilon/dt$
- are prepared to calculate various in-situ situations in rock salt
- some aspects need more experimental investigation and further development of the modeling

-> new Joint Project WEIMOS

Joint Project WEIMOS (April 2016 – March 2019)

“Further Development and Qualification of the Rock Mechanical Modeling for the Final HLW Disposal in Rock Salt”

Identified needs for further development:

1. Deformation behavior at small deviatoric stresses
2. Deformation behavior resulting from tensile stresses
3. Influence of inhomogeneities (layer boundaries, interfaces) on deformation
4. Influence of temperature and stress state on damage reduction

Procedure:

- Experimental investigations (laboratory, in situ?)
- Recalculations of lab tests, simulations of basic examples and real in-situ structures
- Further development of rock mechanical modeling
- Comparison of results, validation & qualification of the models and modeling procedures

**Main goal: Improved analysis and proof of long-term integrity
of the geological barrier rock salt (CRZ: Containment providing Rock Zone)**

Exceptional service in the national interest



Reinvestigation into Closure Predictions of Room D at the Waste Isolation Pilot Plant

Benjamin Reedlunn
Sandia National Laboratories

Project Update Meeting
Karlsruhe Institute of Technology
November 10th, 2016



Sandia National Laboratories is a multi-program laboratory managed and operated by Sandia Corporation, a wholly owned subsidiary of Lockheed Martin Corporation, for the U.S. Department of Energy's National Nuclear Security Administration under contract DE-AC04-94AL85000. SAND NO. 2016-8560 C

Outline



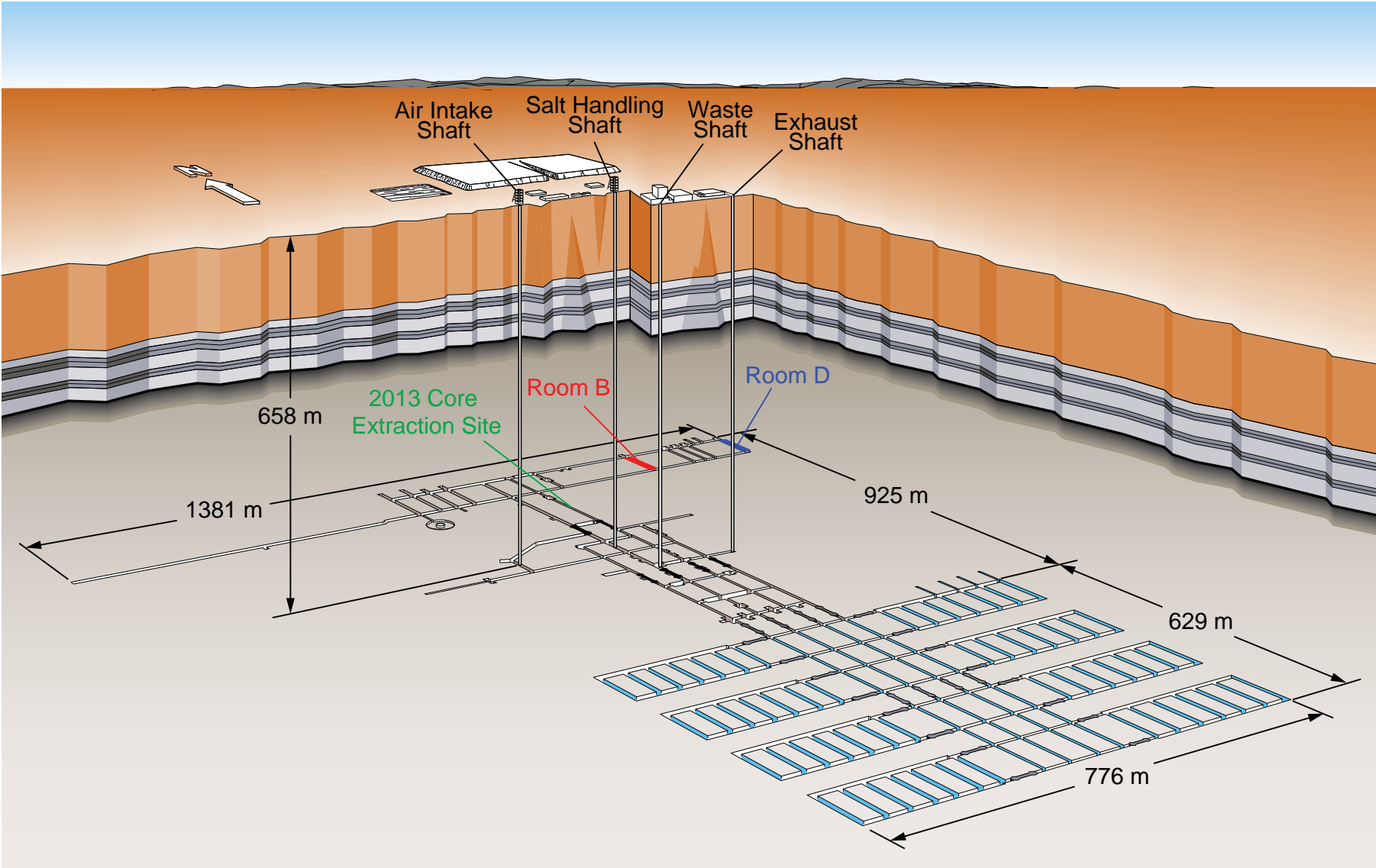
- Background
 - WIPP Room B and D
 - Munson-Dawson Model
 - Legacy Simulations

- Reinvestigation
 - Resolving the numerics
 - Munson-Dawson Model Recalibration
 - New predictions

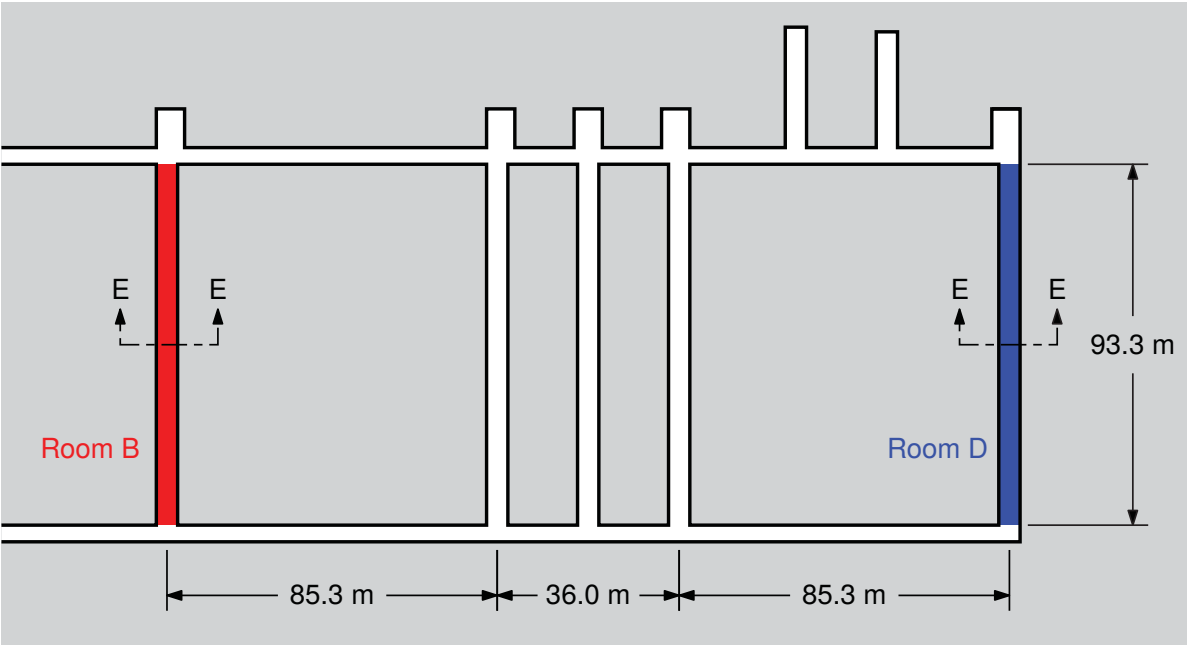
- Summary

WIPP Room B and D

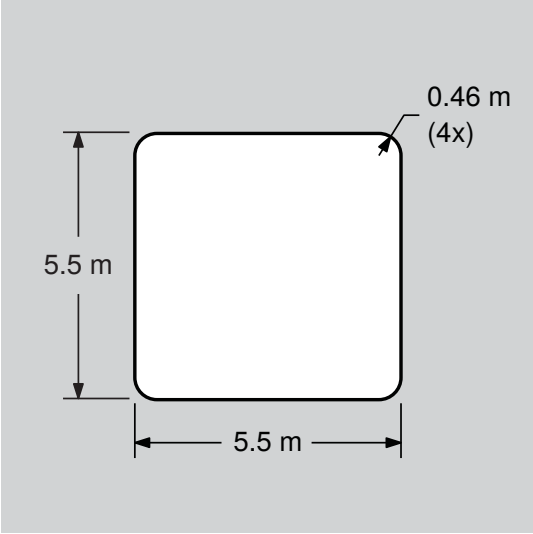
Rooms B and D at WIPP



Room B and D Dimensions



Plan View



Section E-E

Photos of Room B and D

Room B



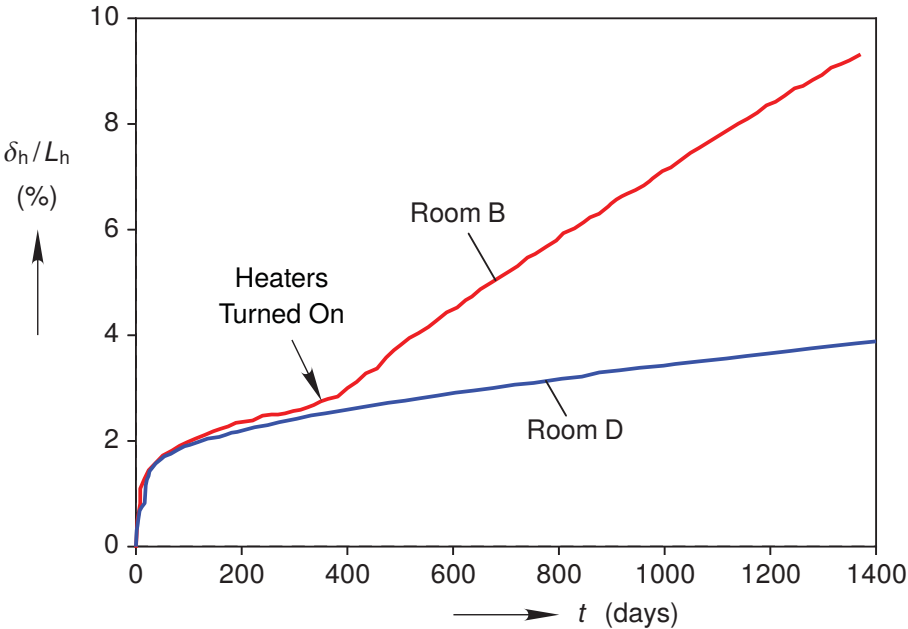
Room D



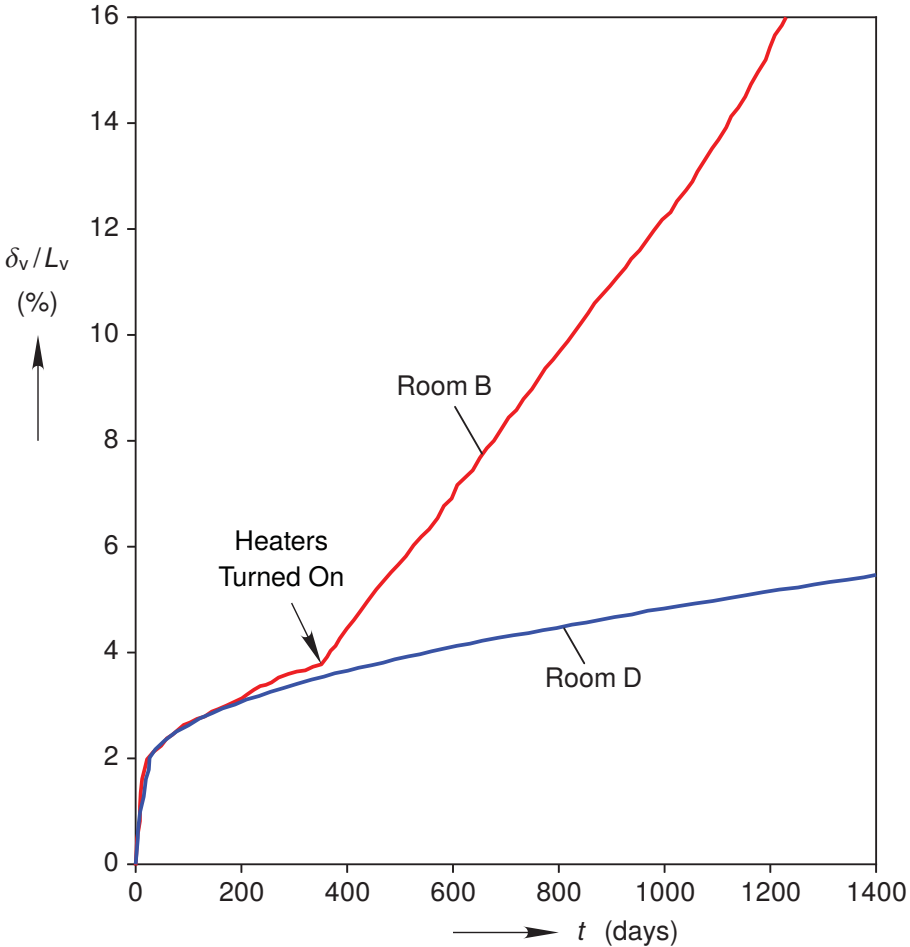
In-Situ Closure Measurements



Horizontal Closure

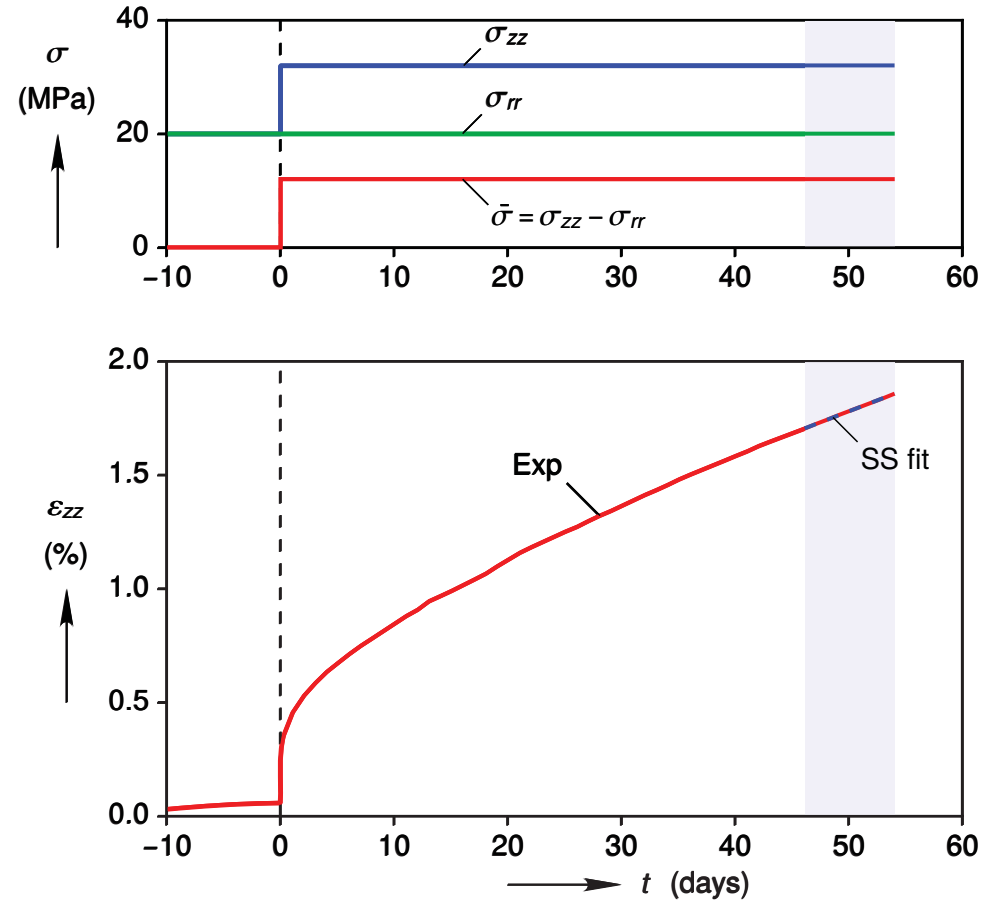
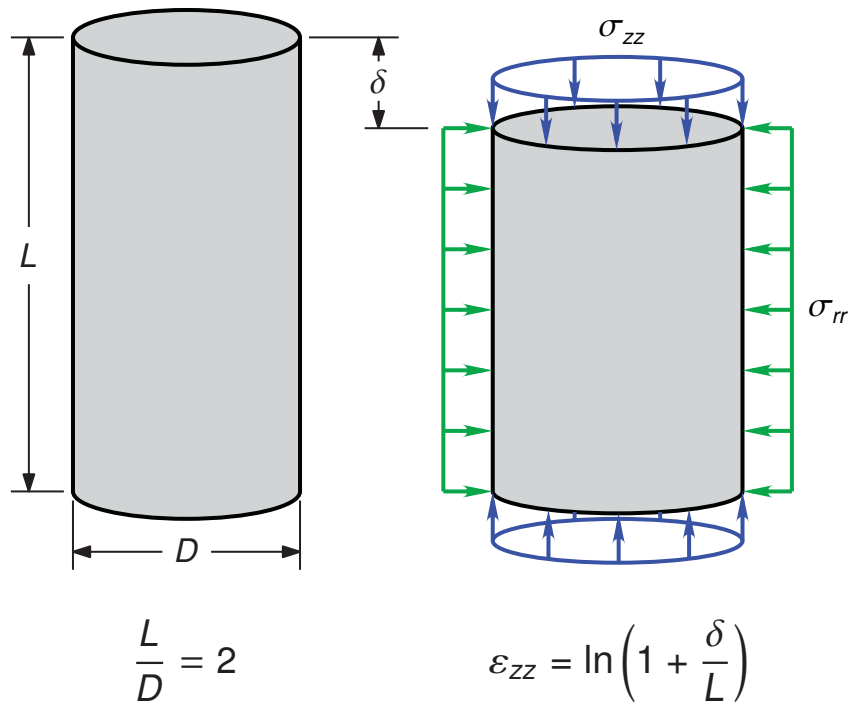


Vertical Closure

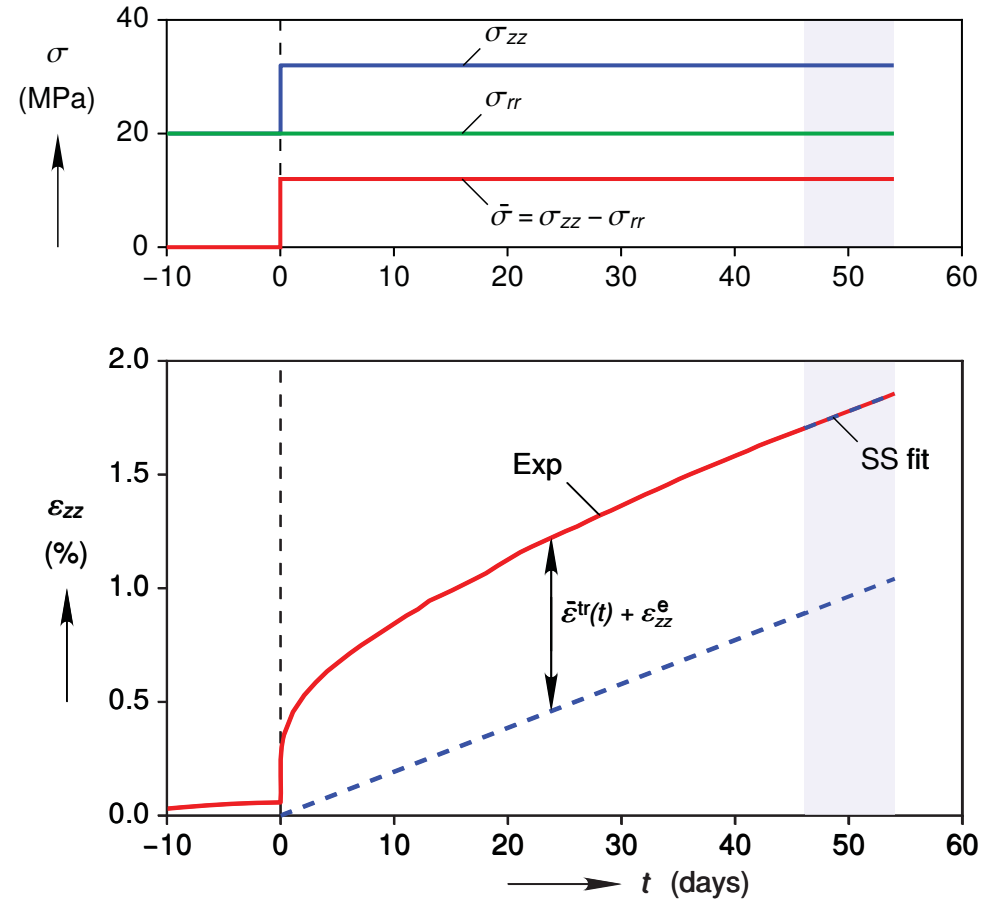
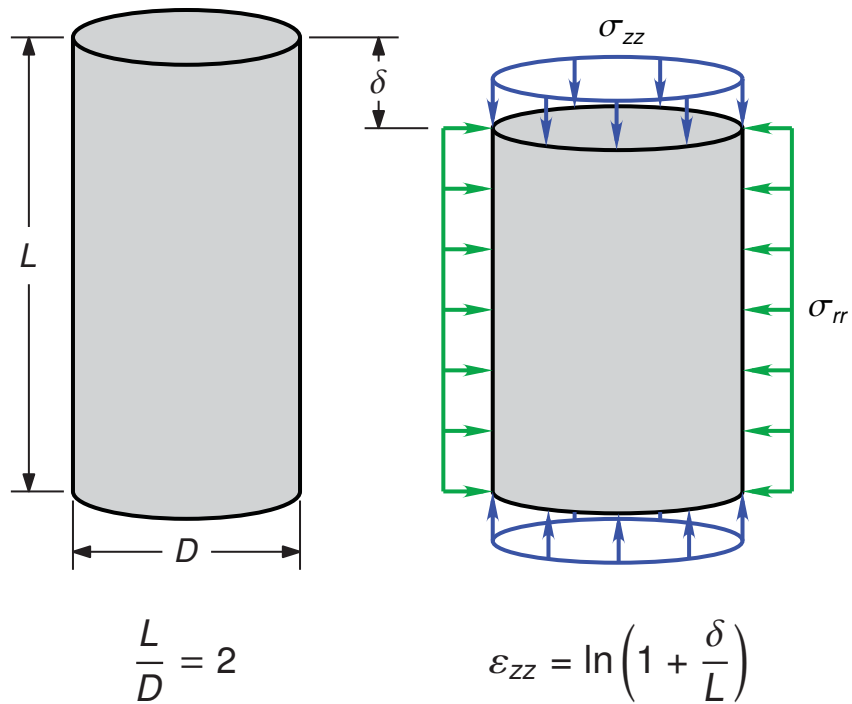


Munson-Dawson Model

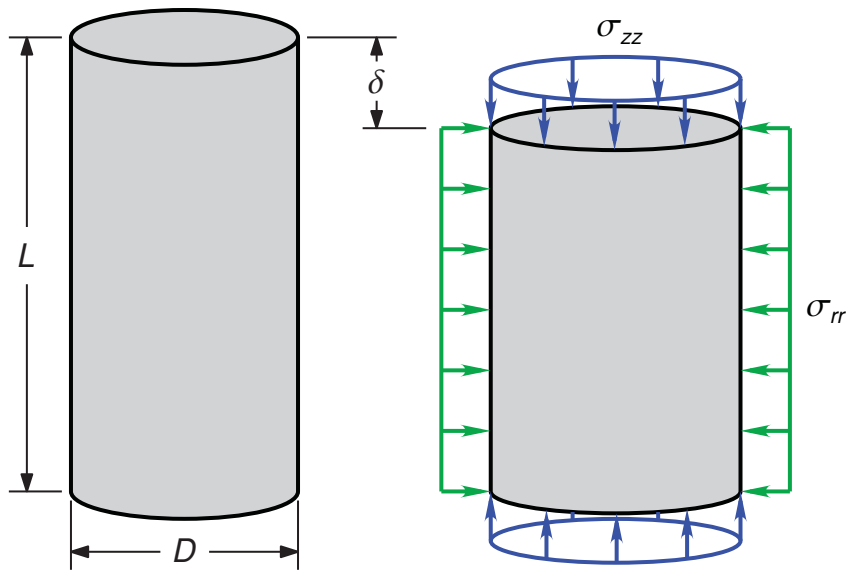
Triaxial Creep Tests



Triaxial Creep Tests

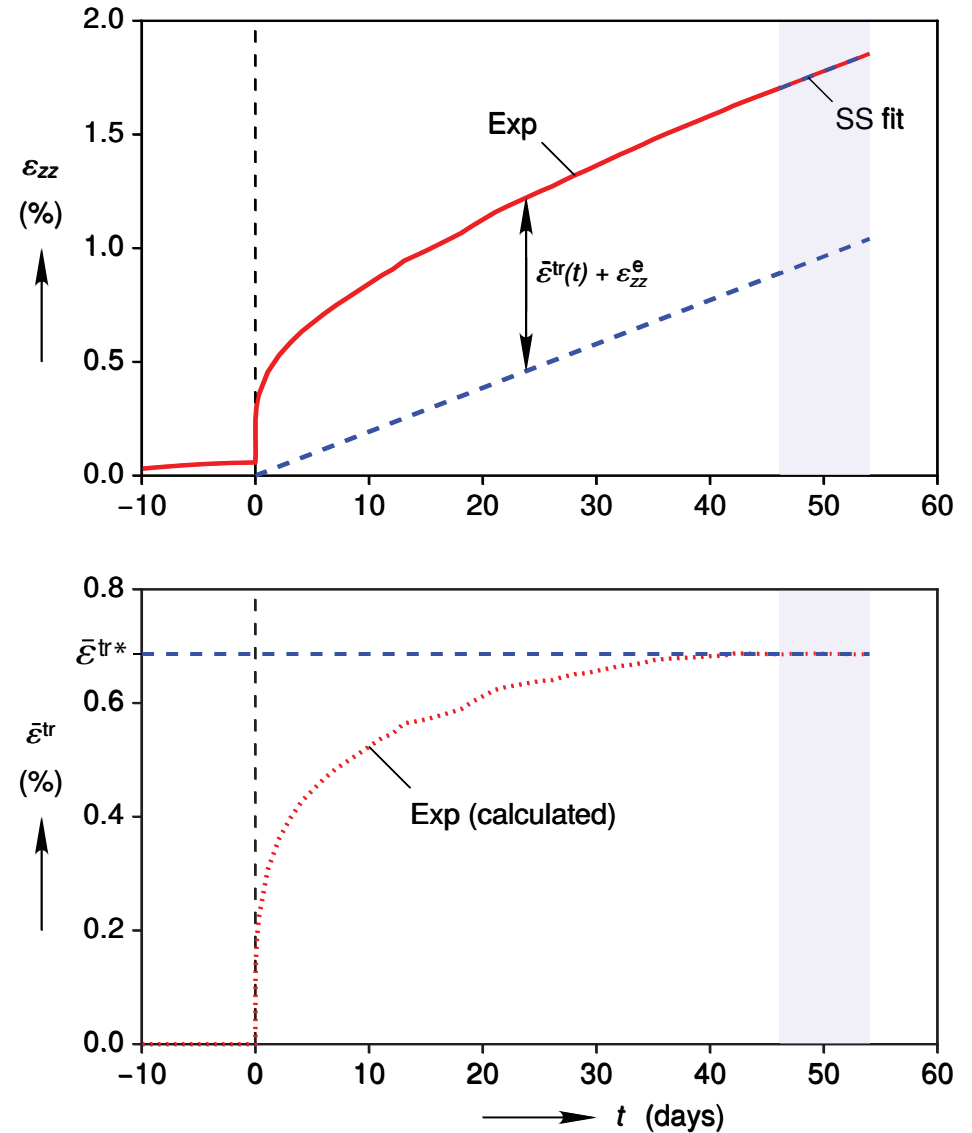


Triaxial Creep Tests



$$\frac{L}{D} = 2$$

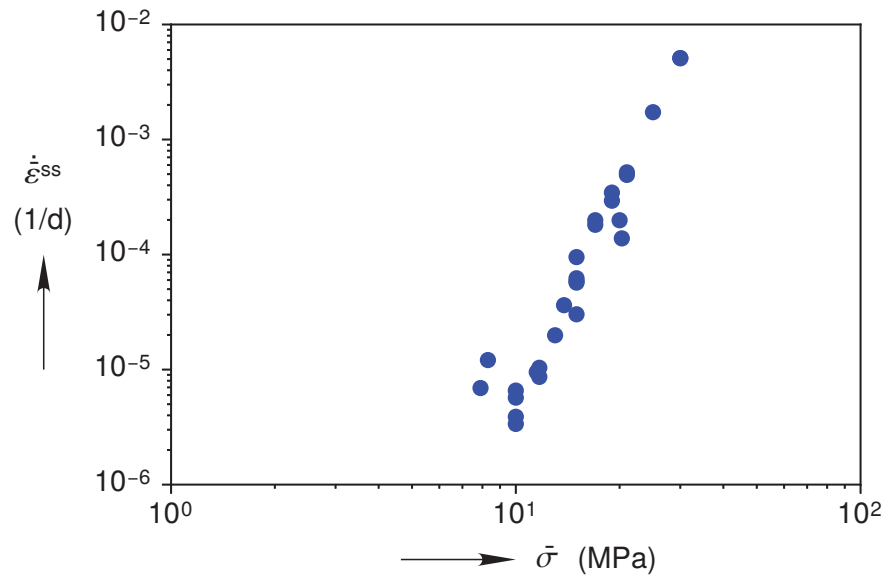
$$\epsilon_{zz} = \ln\left(1 + \frac{\delta}{L}\right)$$



Munson-Dawson Calibration

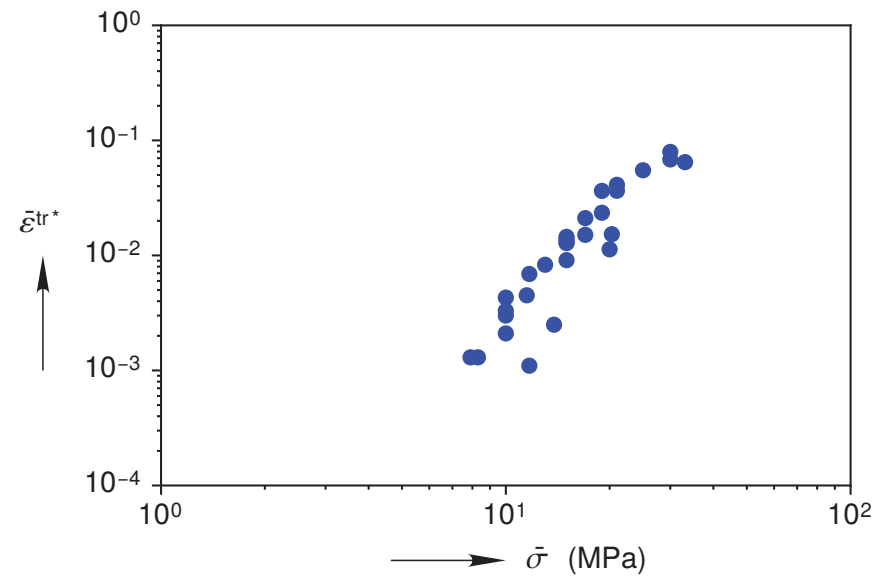


Steady State Rate



$$\dot{\epsilon}^{ss} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^n$$

Transient Limit

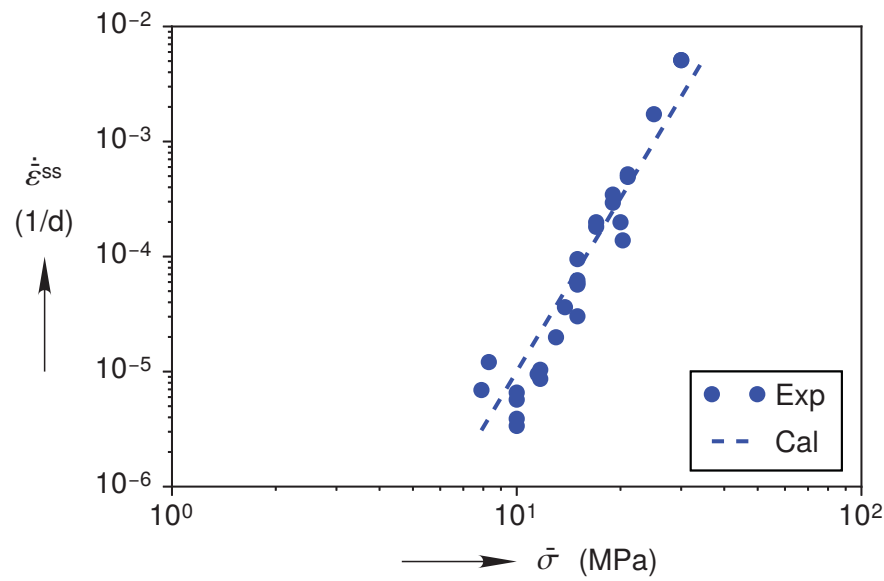


$$\bar{\epsilon}^{tr*} = K_0 \exp(cT) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^m$$

Munson-Dawson Calibration

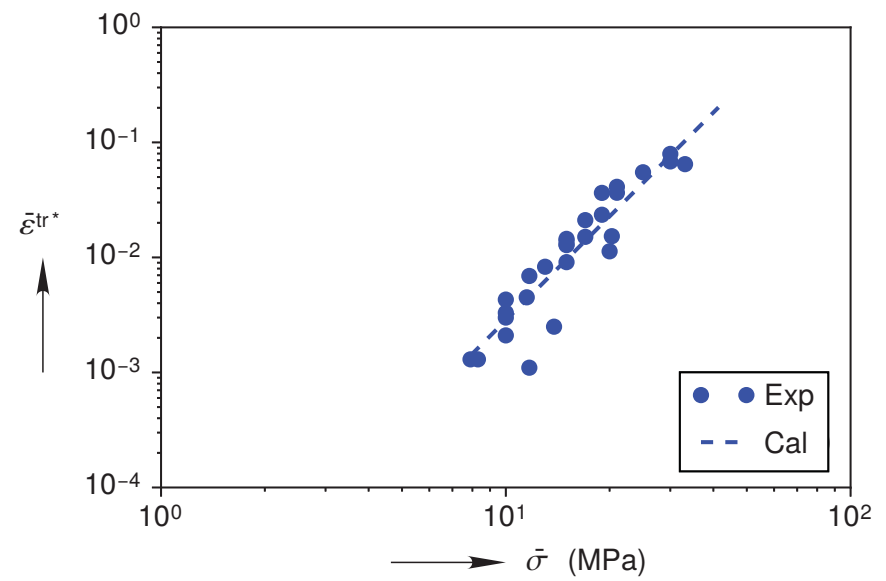


Steady State Rate



$$\dot{\epsilon}^{ss} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^n$$

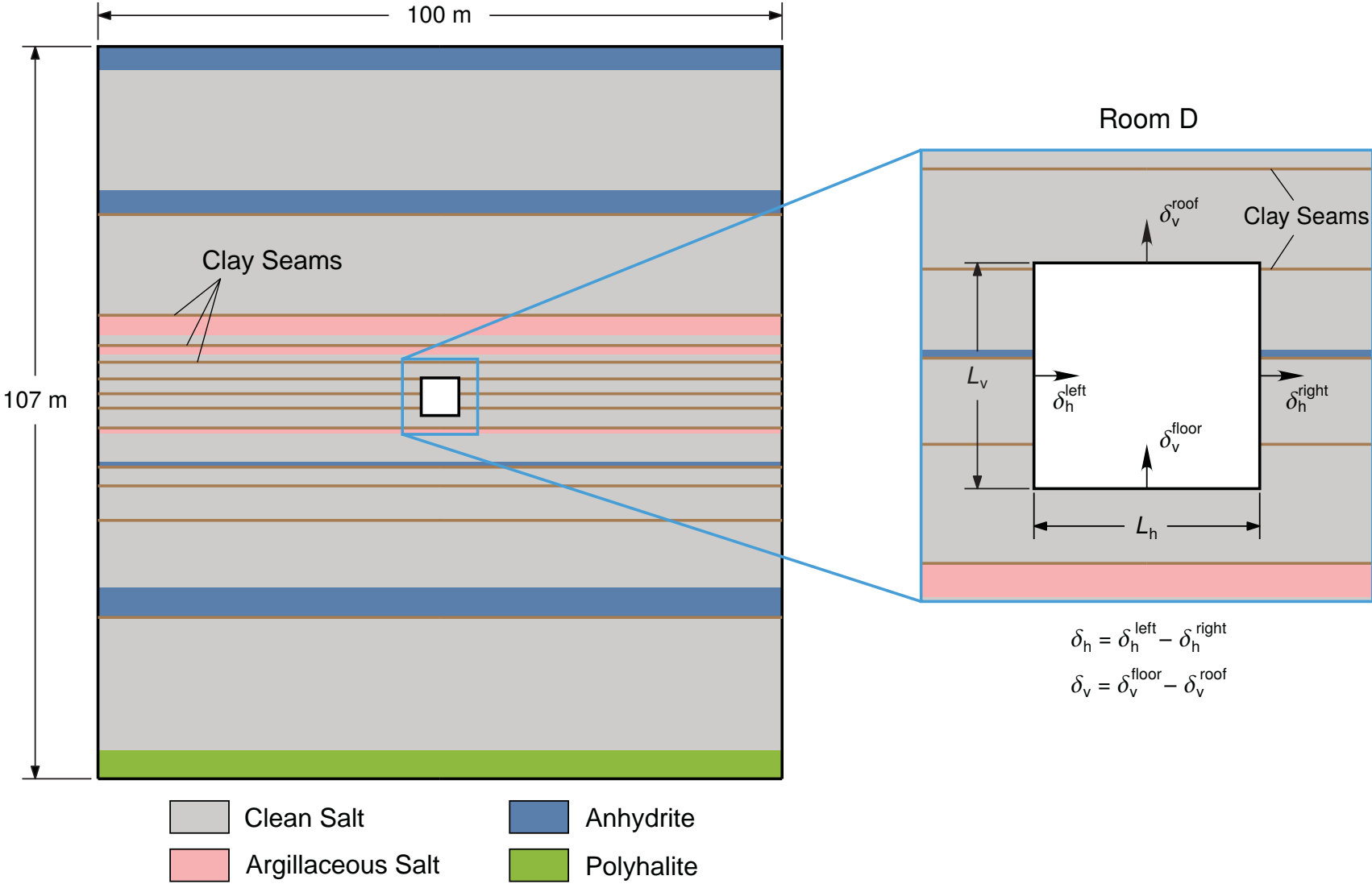
Transient Limit



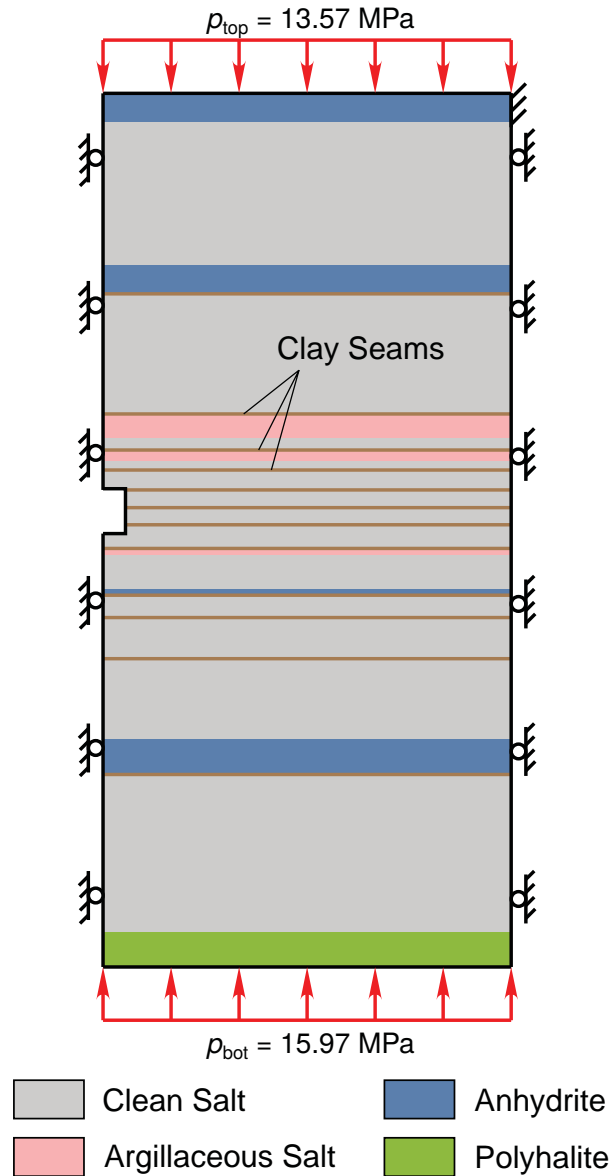
$$\bar{\epsilon}^{tr*} = K_0 \exp(cT) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^m$$

Legacy Simulations

Idealized Stratigraphy



Model Setup

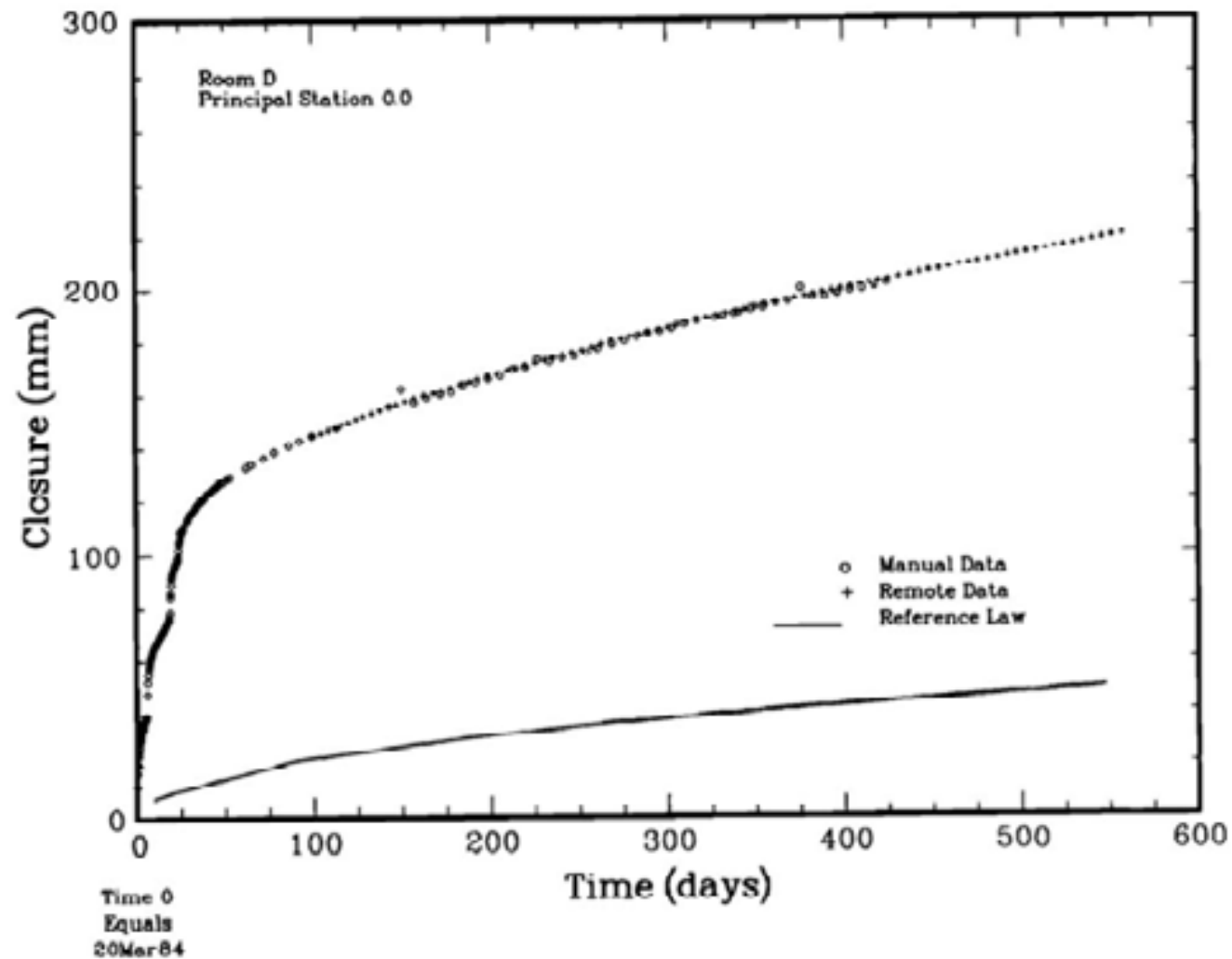


- Clean and Argillaceous Salt
 - Munson-Dawson model
 - Separate parameter sets

- Anhydrite and Polyhalite
 - Drucker-Prager model
 - Elastic perfectly plastic
 - Separate parameters sets

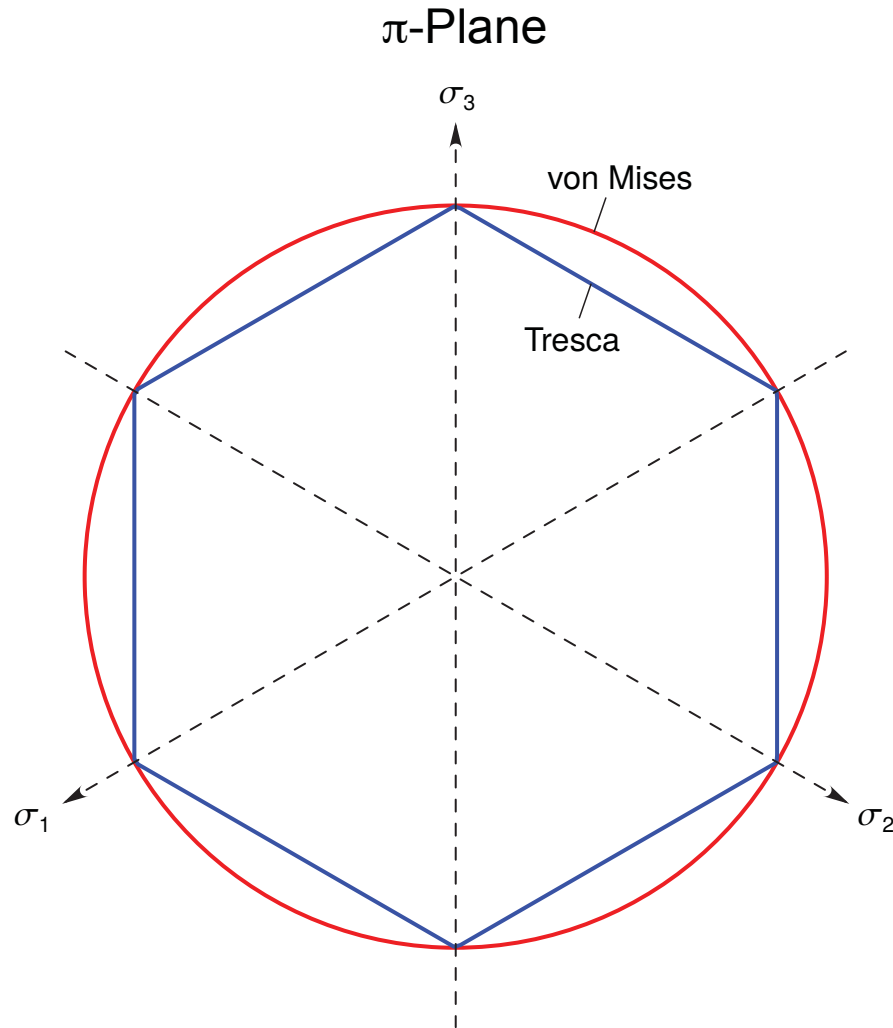
- Clay Seams
 - Coulomb friction

Legacy Simulations



Munson, DE, Torres, TM, & Blankenship, DA. 1986. Early results from the thermal/structural in situ test series at the WIPP. In: The 27th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

Changed the Equivalent Stress



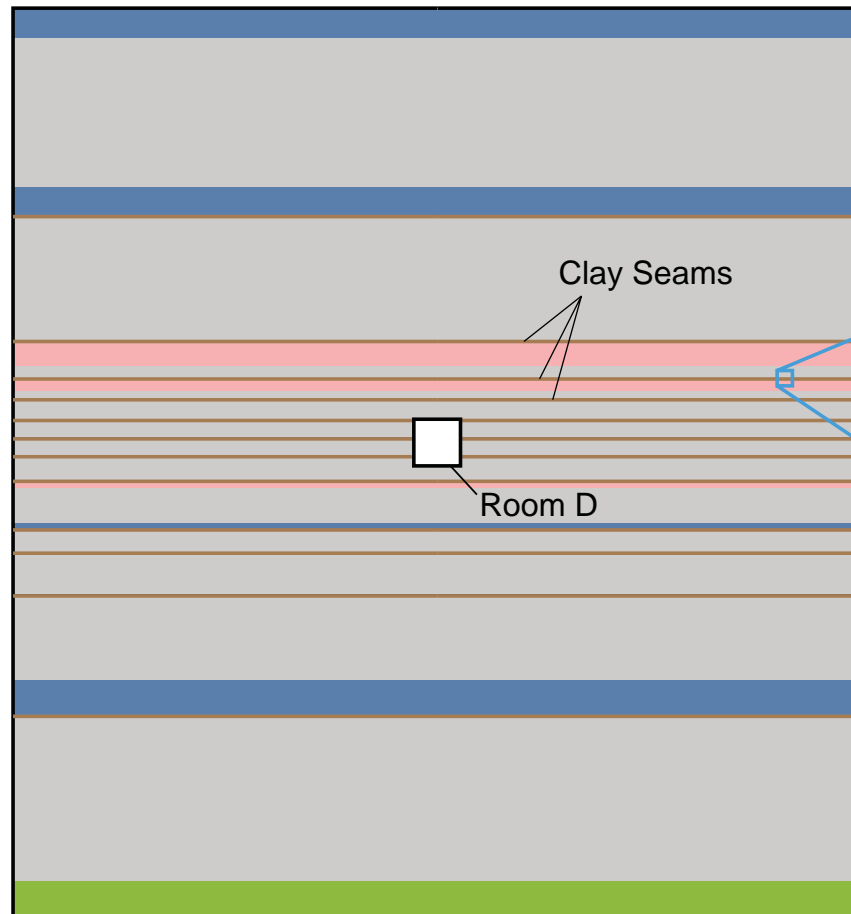
Steady State
Creep Rate

$$\dot{\epsilon}^{ss} \propto \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu} \right)^n$$

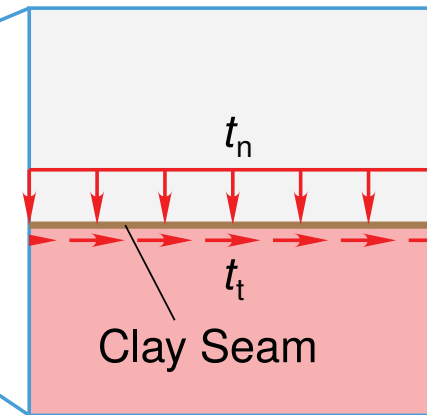
Transient Creep
Strain Limit

$$\bar{\epsilon}^{tr*} \propto \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu} \right)^m$$

Changed the Friction Coefficient



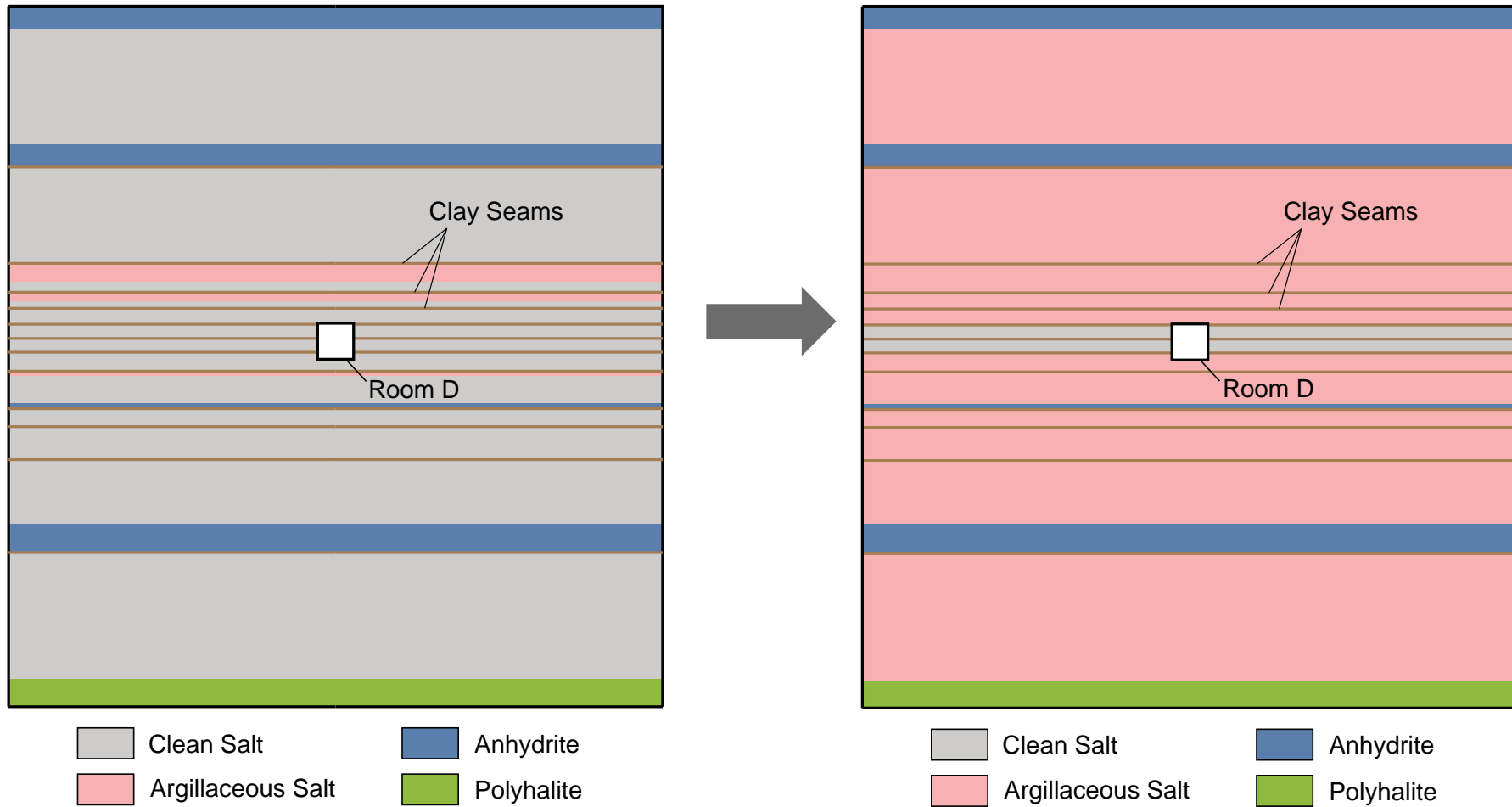
- Clean Salt
- Anhydrite
- Argillaceous Salt
- Polyhalite



Coulomb Friction
 $t_t = \eta t_n$

Friction coefficient treated as
a free parameter
 $\eta = 0.4 \rightarrow 0.2$

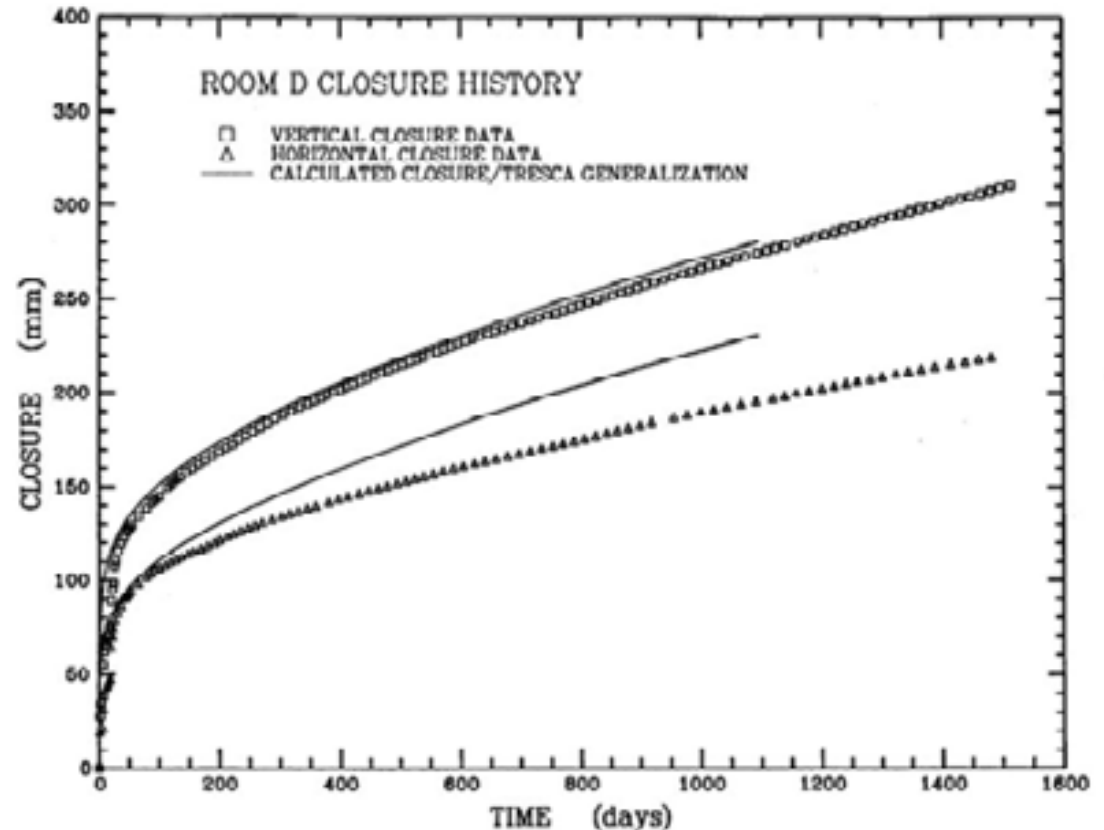
Changed the Stratigraphy



Legacy Predictions



- Changed from von Mises to Tresca equivalent stress
- Changed the clay seam friction coefficient from 0.4 to 0.2
- Changed from mostly clean salt to mostly argillaceous salt
- Changed the material model calibrations
 - Argillaceous strain limit treated as a free parameter



Munson, D., Fossum, A. Senseny, P., Advances in Resolution of Discrepancies Between Predicted and Measured In Situ WIPP Room Closures, SAND88-2948, 1988

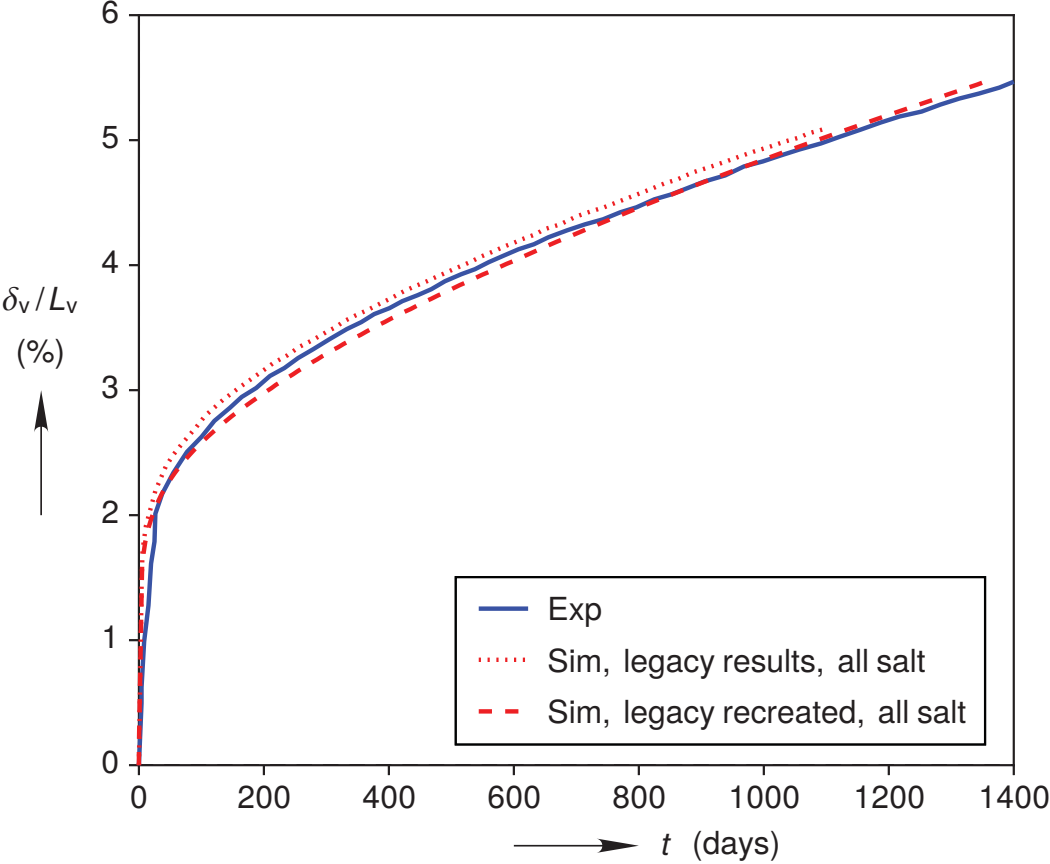
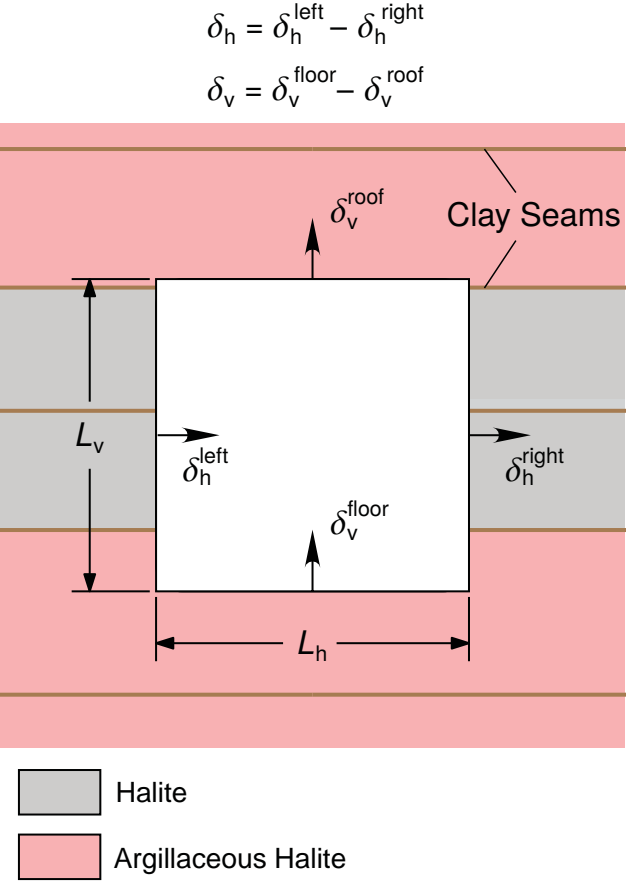
Legacy Predictions



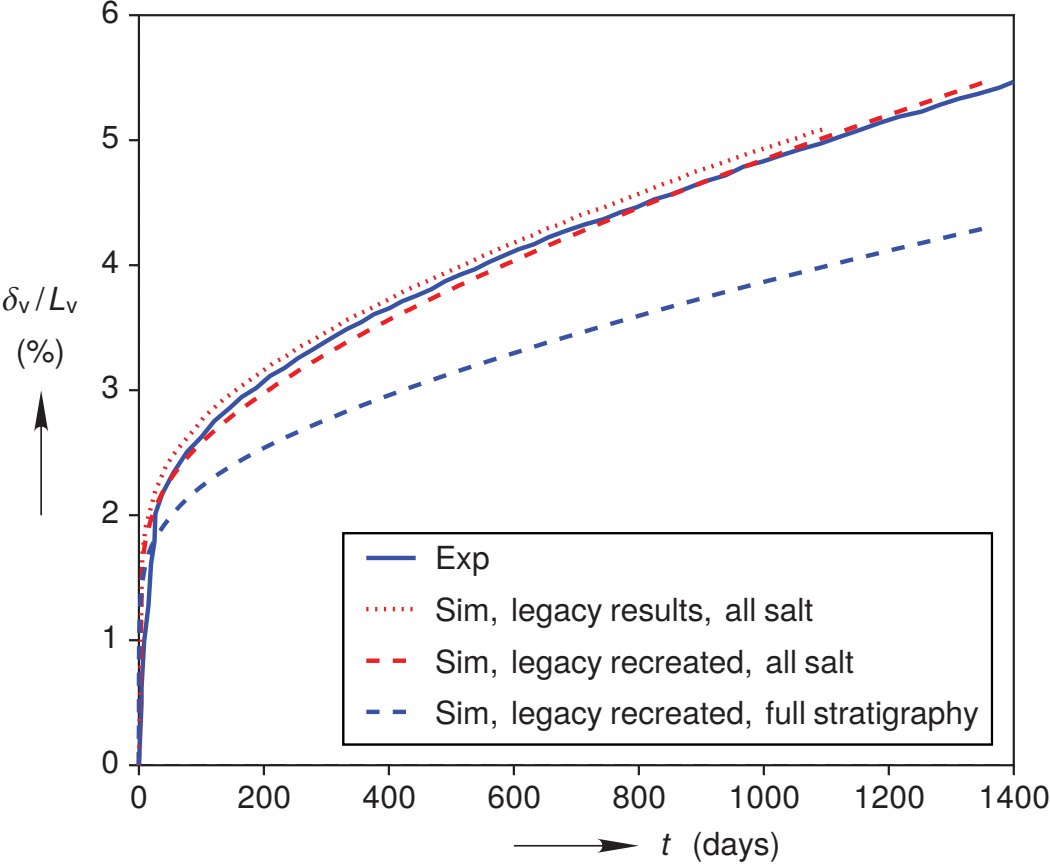
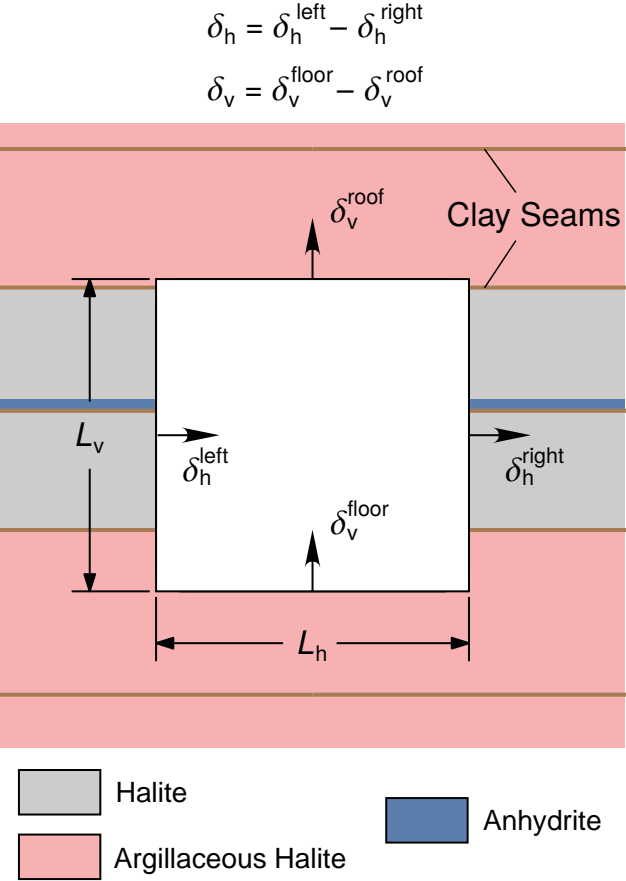
- Tuning of model parameters is common industry practice
 - Tune against one *in-situ* measurement
 - Compare against other *in-situ* measurements
- Our goal is to predict **solely** from laboratory test data
 - Requires a stronger scientific basis
 - Enables predictions at a **new** repository

Updating the Legacy Simulations

Recreation of Legacy Simulations

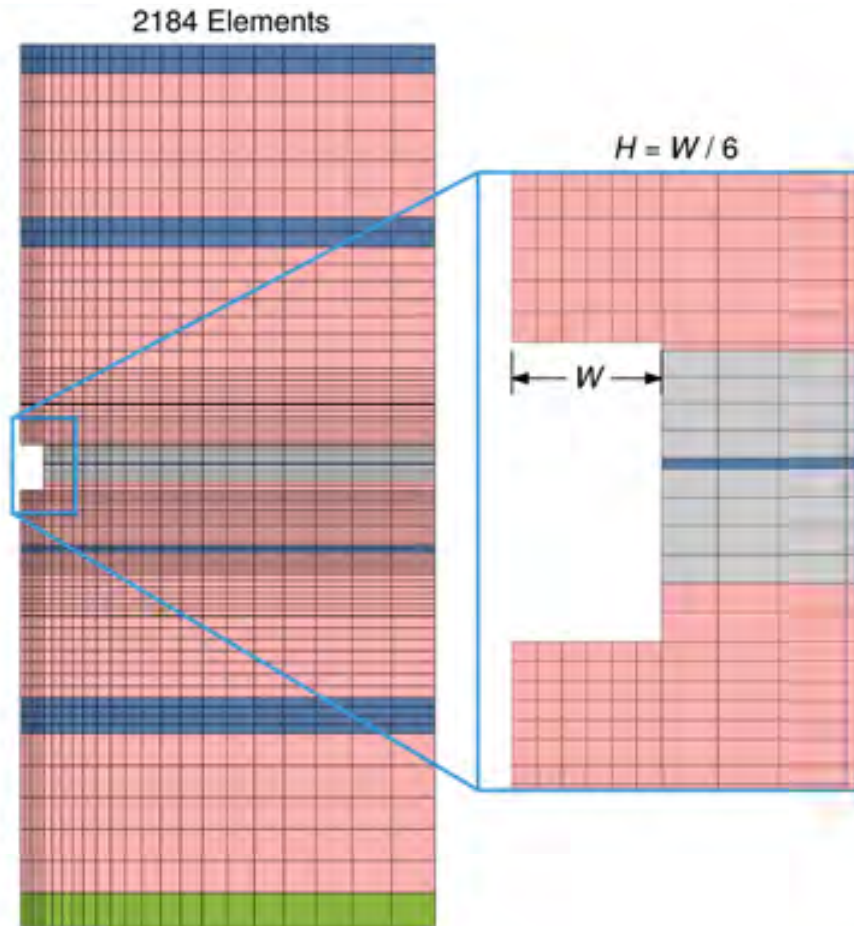


Recreation of Legacy Simulations

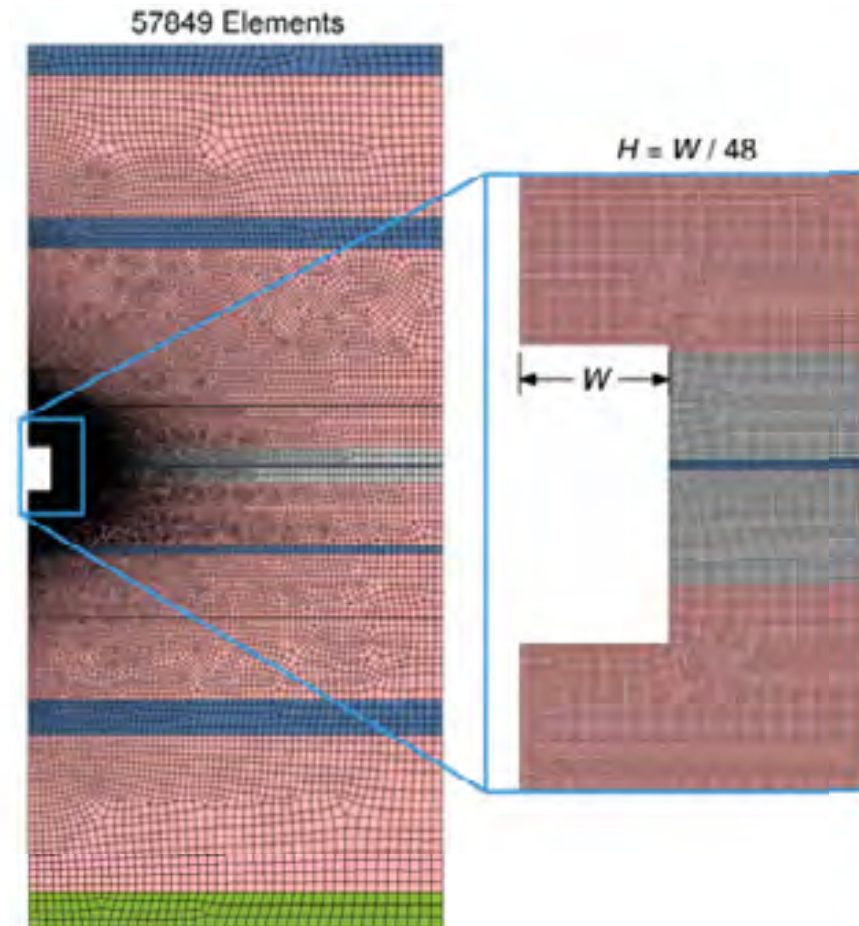


Changed the Mesh

Legacy Mesh

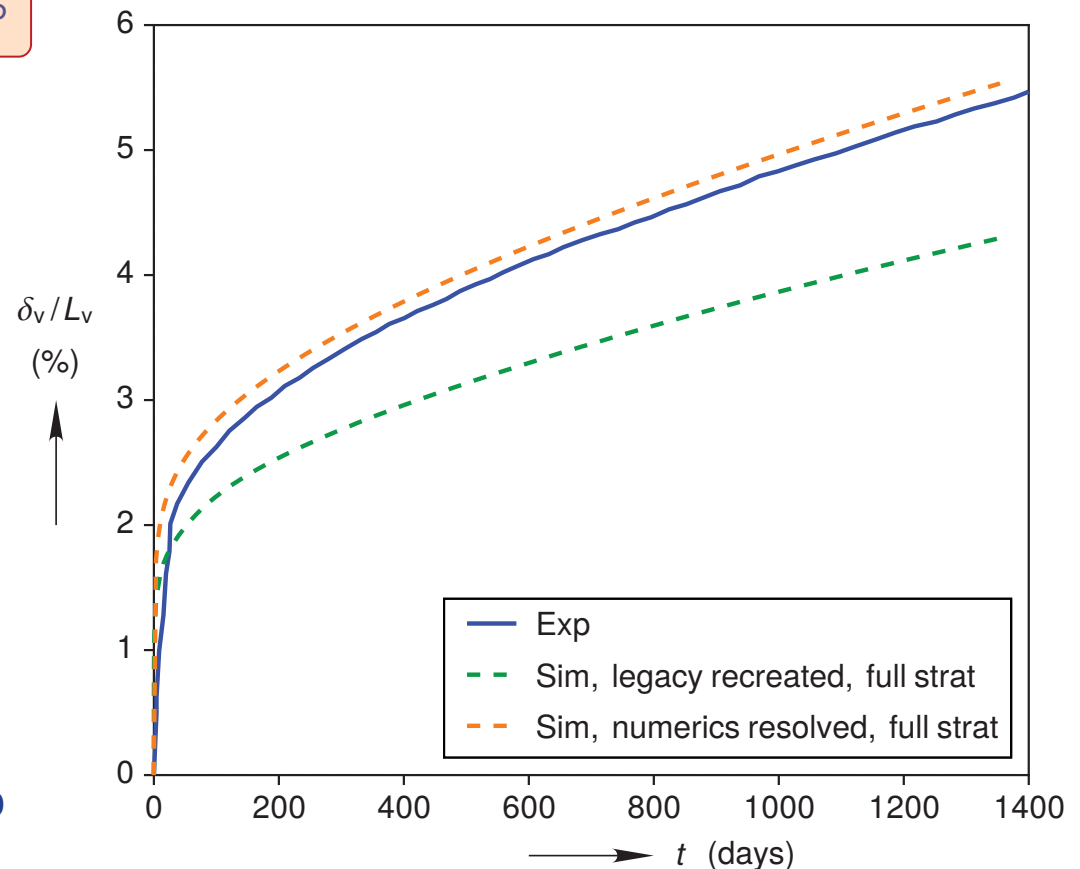


Current Fine Mesh



Resolving the Numerics

- Changed the Mesh
- Changed $R_{tol} = 10^{-3}$ to $R_{tol} = 10^{-5}$
- Switched to a higher quality element type
- Changed the contact enforcement algorithm
- Switched from non-associated flow rule to an associated flow rule for the anhydrite
- Added a pressure ramp down to ease into the instantaneous excavation



Munson-Dawson Model Recalibration

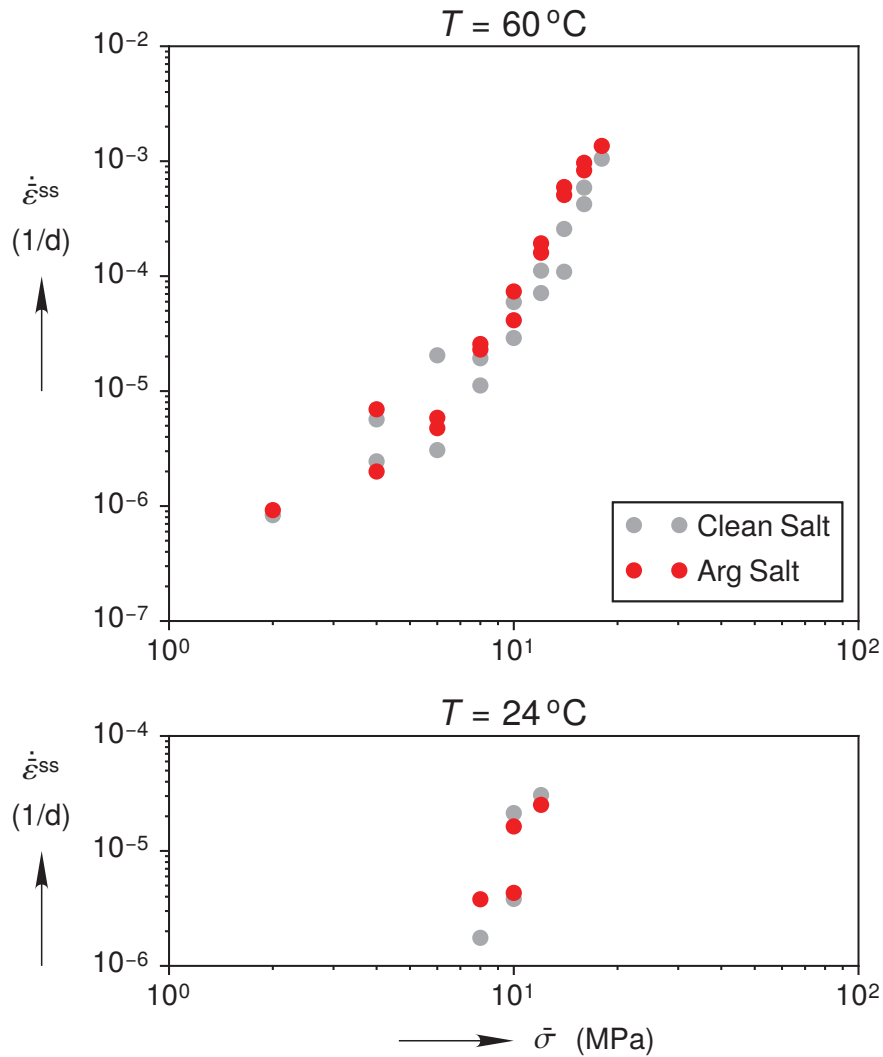
New Cores Extracted in 2013



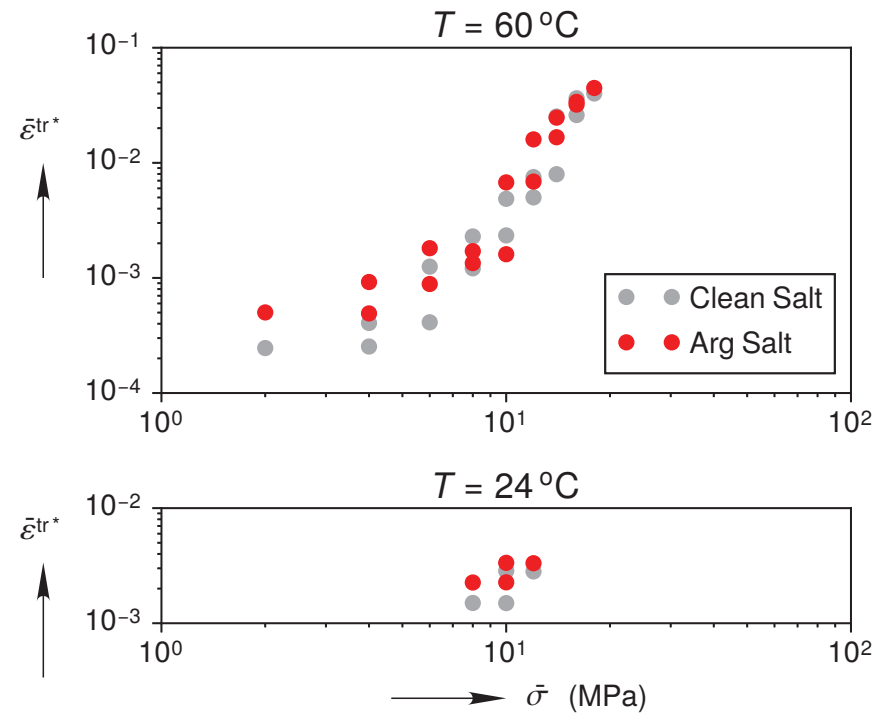
Clean vs. Argillaceous



Steady State Rate



Transient Limit

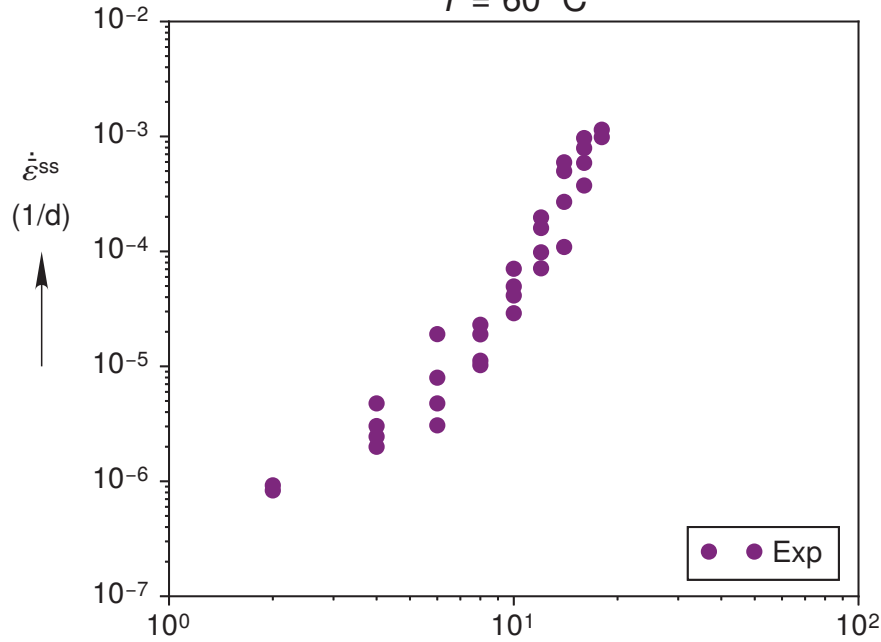


New Munson-Dawson Calibration



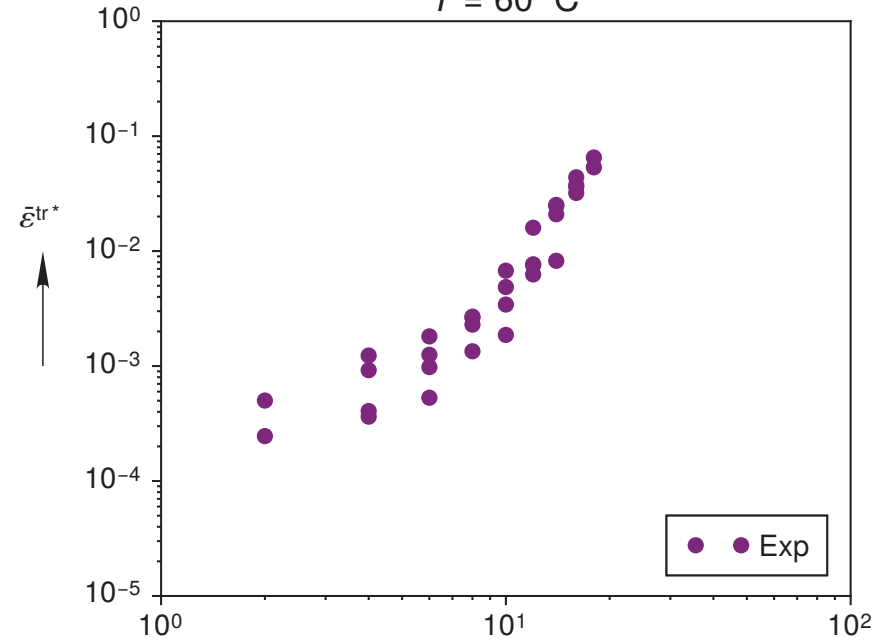
Steady State Rate

$T = 60^\circ\text{C}$

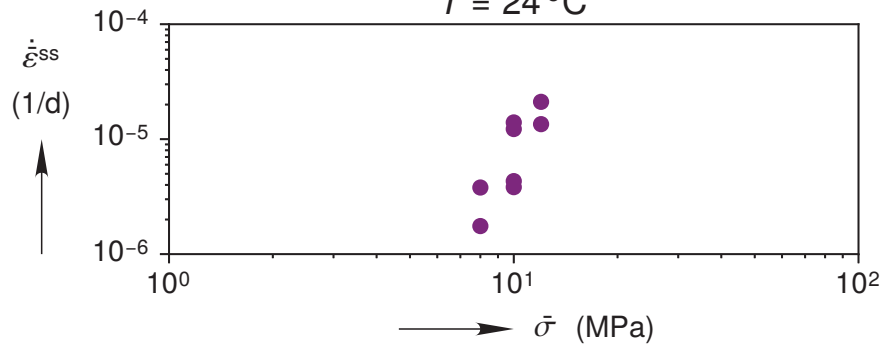


Transient Limit

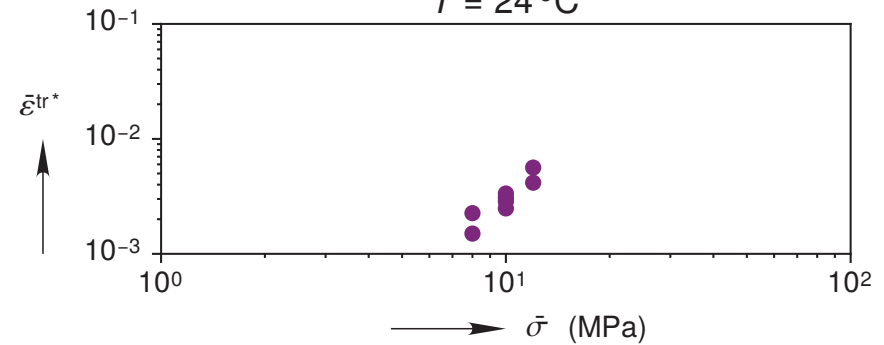
$T = 60^\circ\text{C}$



$T = 24^\circ\text{C}$



$T = 24^\circ\text{C}$

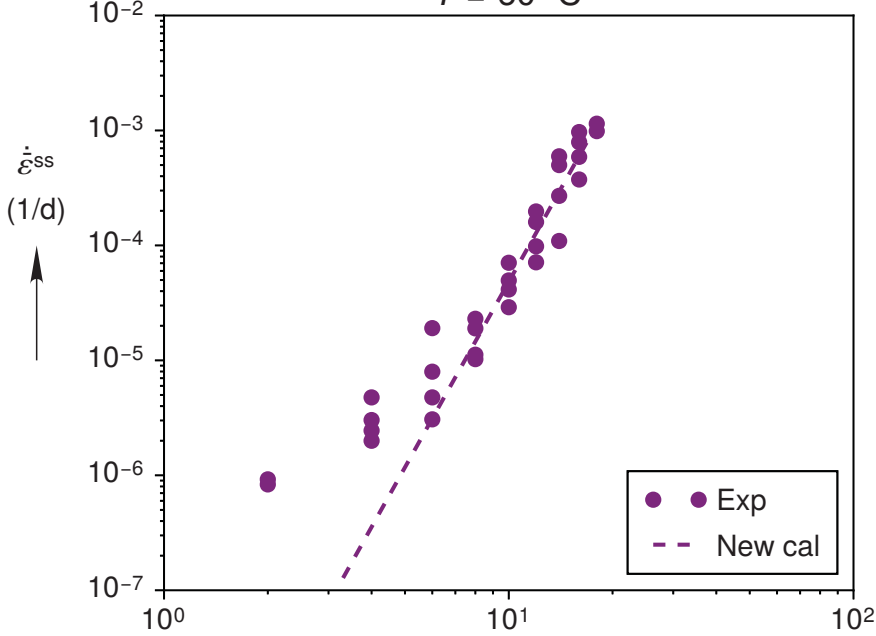


New Munson-Dawson Calibration



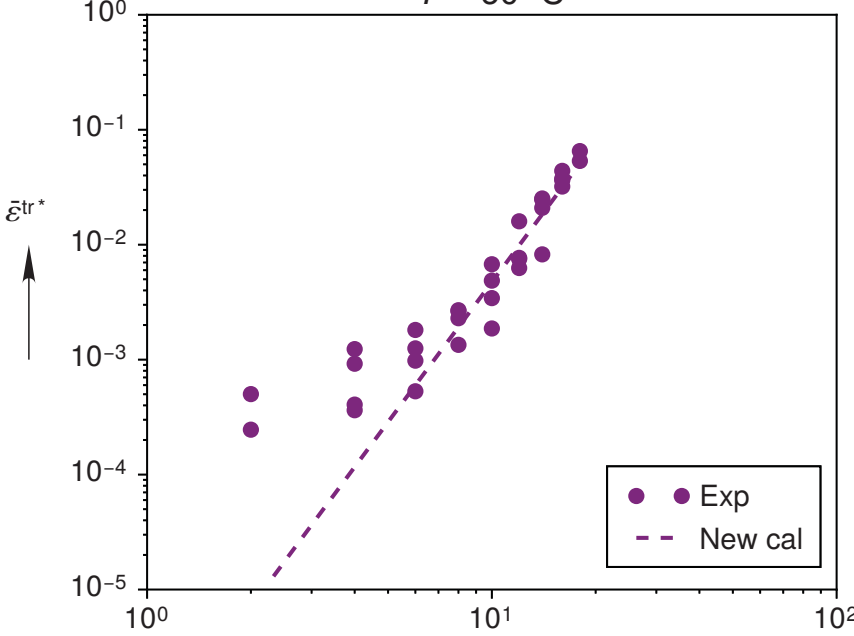
Steady State Rate

$T = 60^\circ\text{C}$

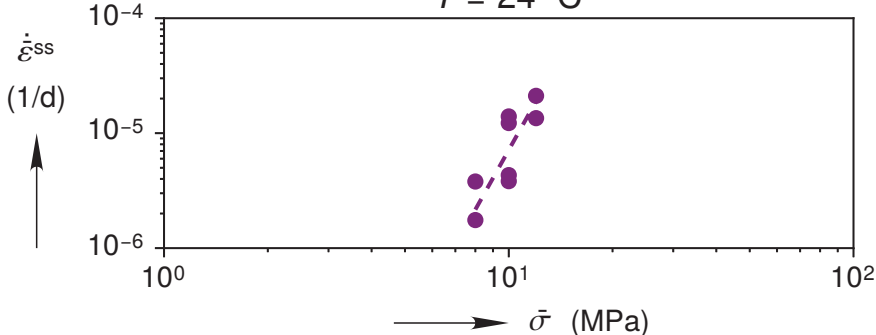


Transient Limit

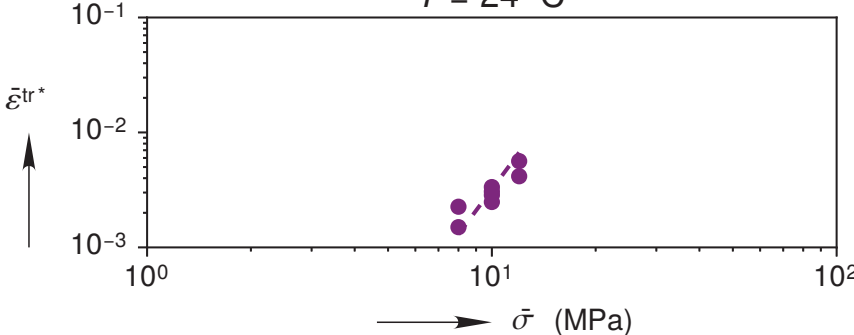
$T = 60^\circ\text{C}$



$T = 24^\circ\text{C}$



$T = 24^\circ\text{C}$

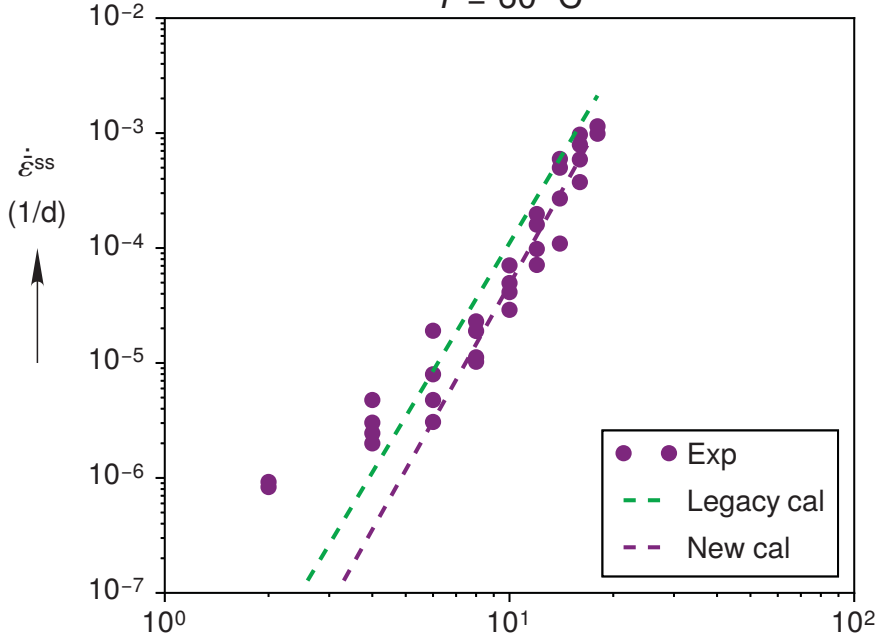


New Munson-Dawson Calibration



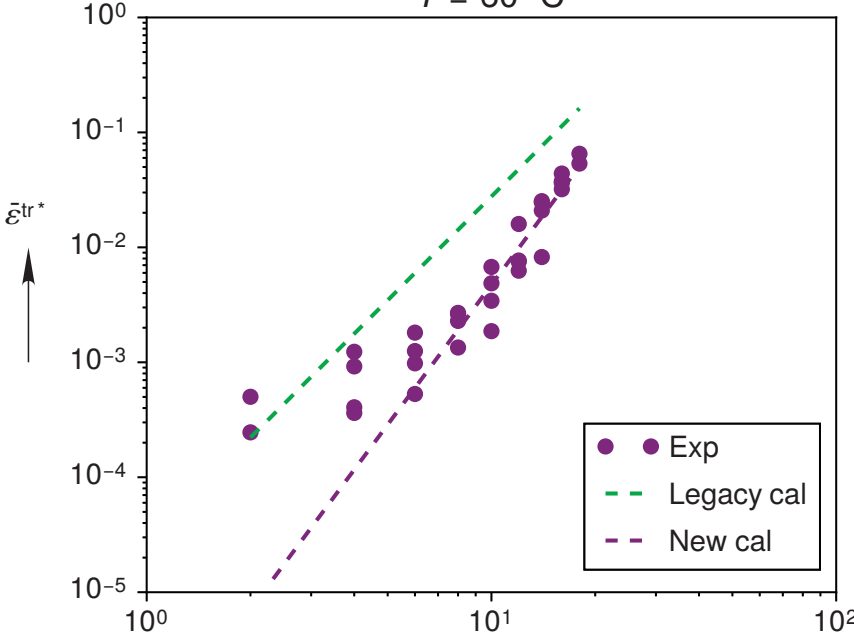
Steady State Rate

$T = 60^\circ\text{C}$

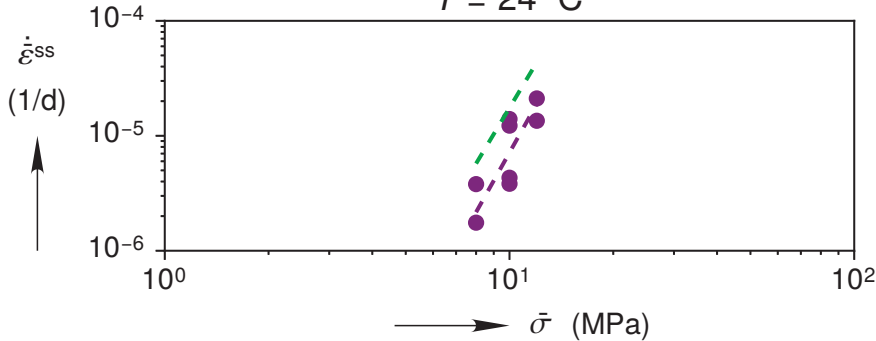


Transient Limit

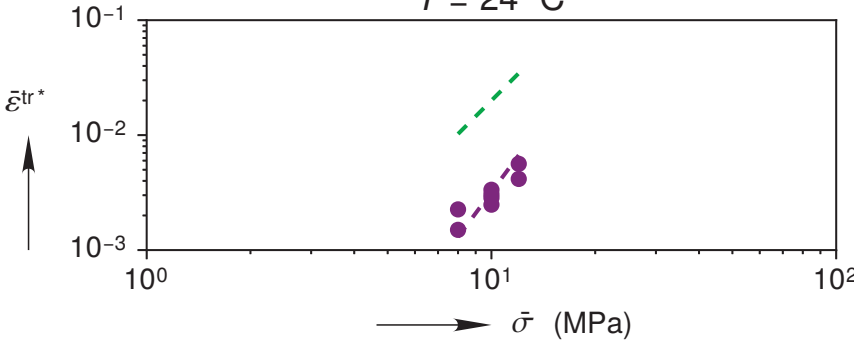
$T = 60^\circ\text{C}$



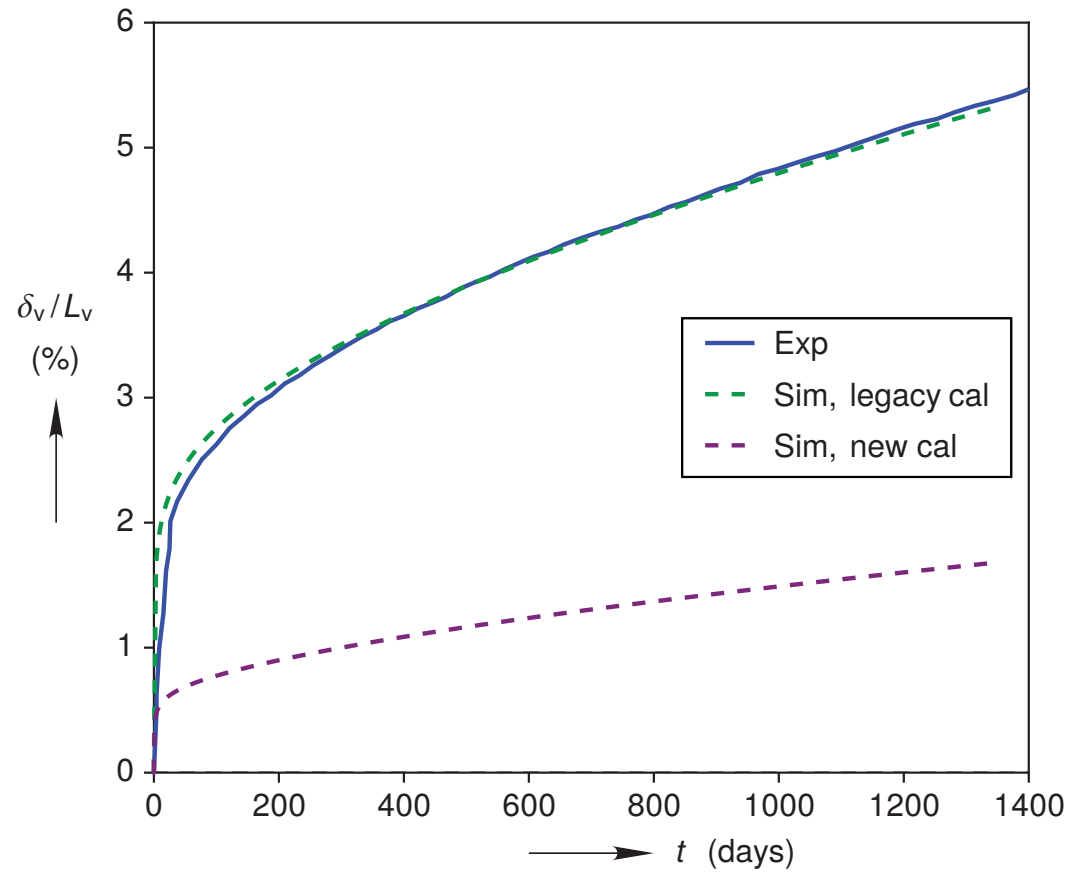
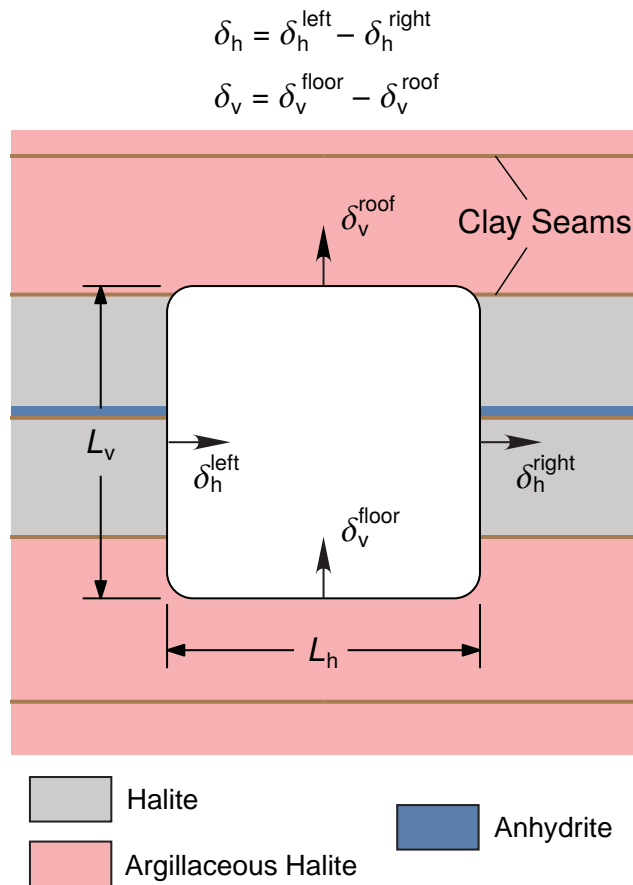
$T = 24^\circ\text{C}$



$T = 24^\circ\text{C}$



Closure Prediction with New Calibration



List of Open Questions

- Creep at low equivalent stresses
- Extent of simulation area
- 1983 stratigraphy vs. Munson stratigraphy
- Creep of argillaceous vs. clean salt
- Lost transient strains
- Sliding at clay seams
- Anhydrite strength

Summary

Summary



- In 1987, the simulations under-predicted the room closure by roughly 4X. In 1989, Darrell Munson adjusted the model to match the experiments.
- After including the anhydrite and resolving the numerics, the predictions match the experiments.
- New, laboratory based, salt calibration under-predicts the room closure by roughly 3X.
- Open questions remain
 - Creep at low equivalent stresses
 - Extent of simulation area
 - 1983 stratigraphy vs. Munson stratigraphy
 - Creep of argillaceous vs. clean salt
 - Lost transient strains
 - Sliding at clay seams
 - Anhydrite strength

Thank you for your attention.

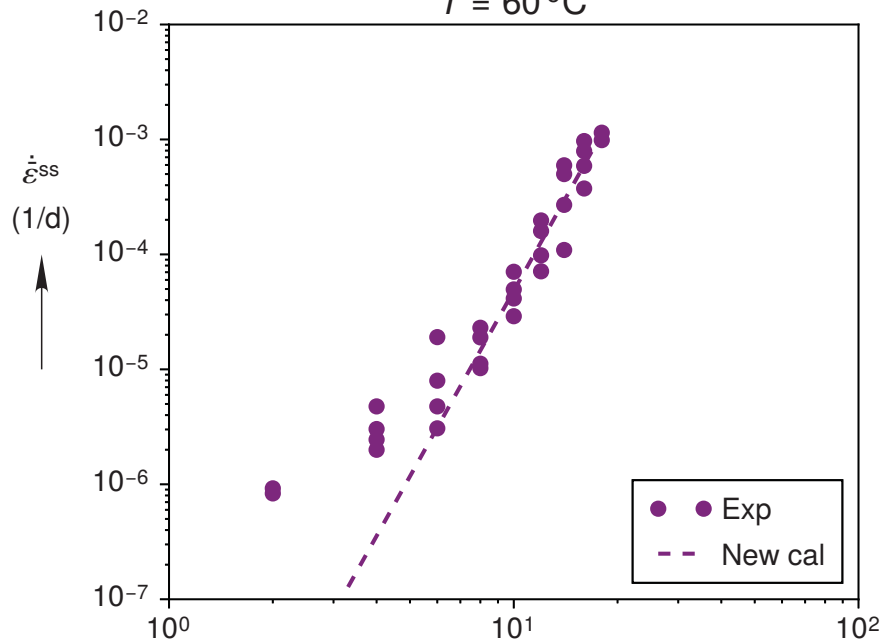
Extra Slides

Creep at Low Equivalent Stresses



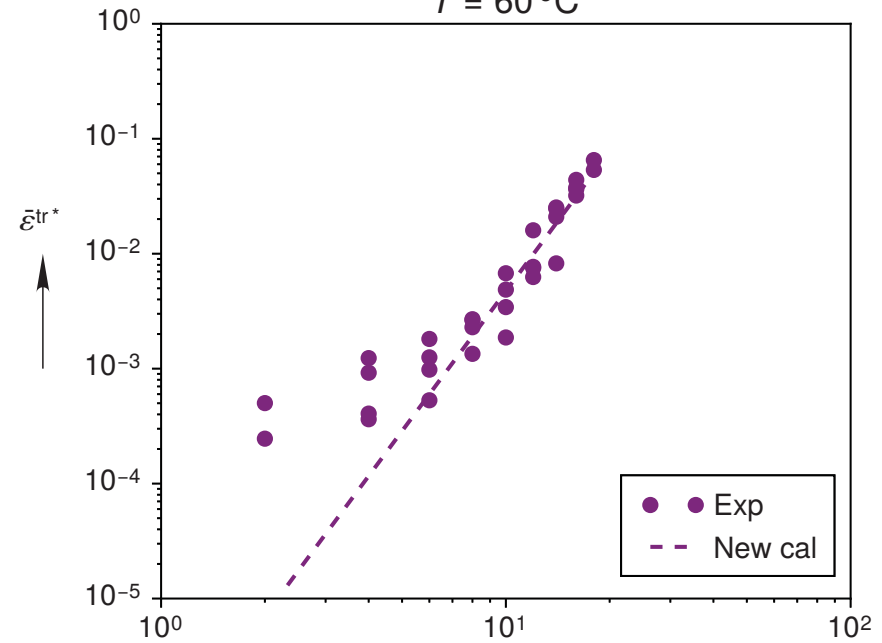
Steady State Rate

$T = 60^\circ\text{C}$

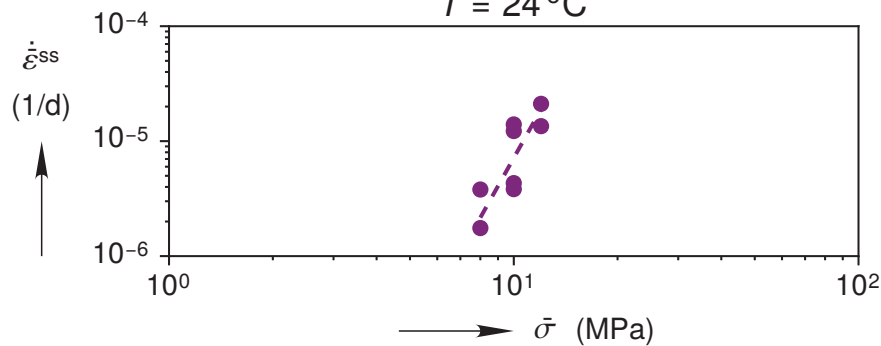


Transient Limit

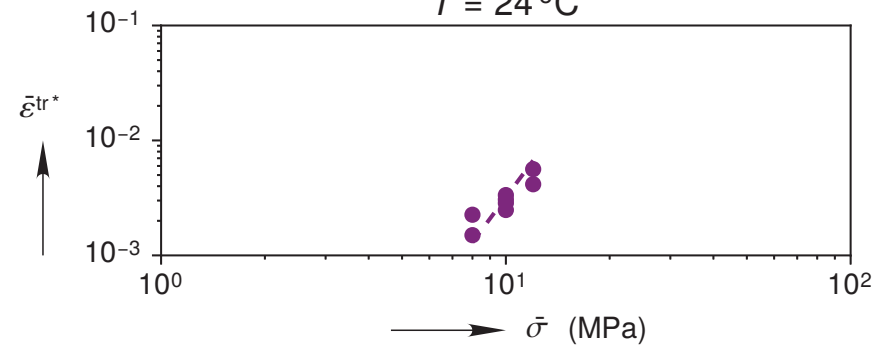
$T = 60^\circ\text{C}$



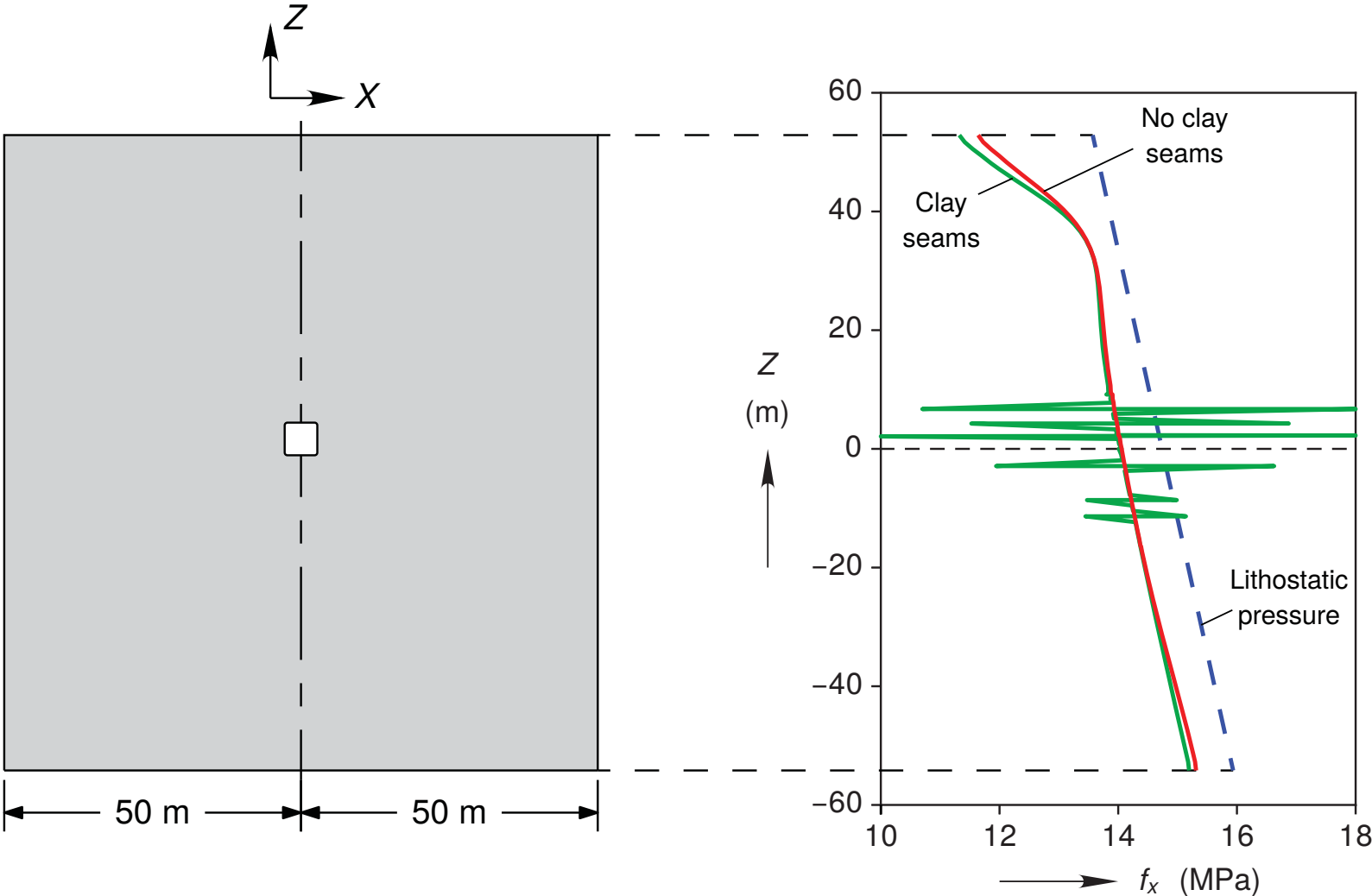
$T = 24^\circ\text{C}$



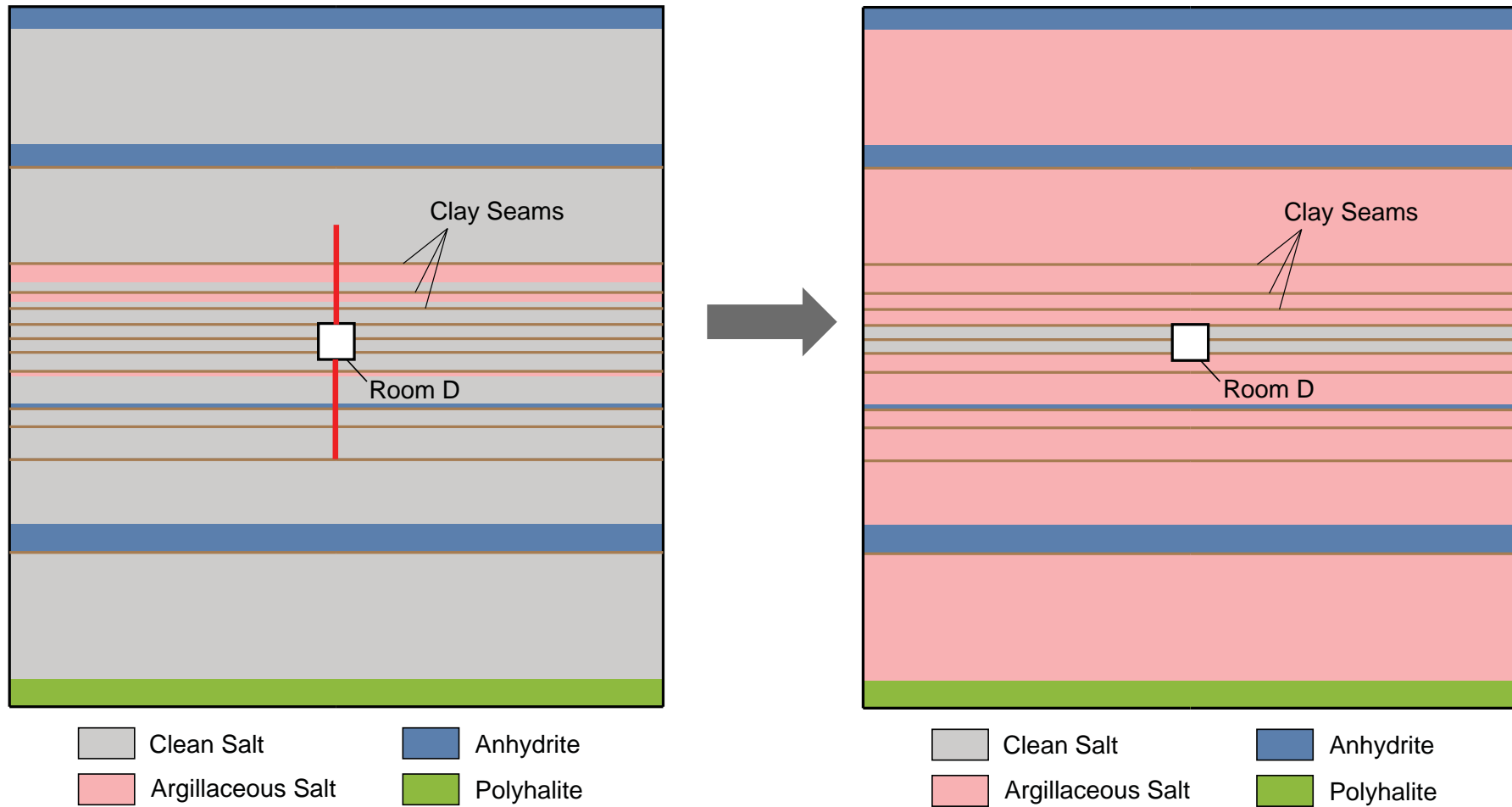
$T = 24^\circ\text{C}$



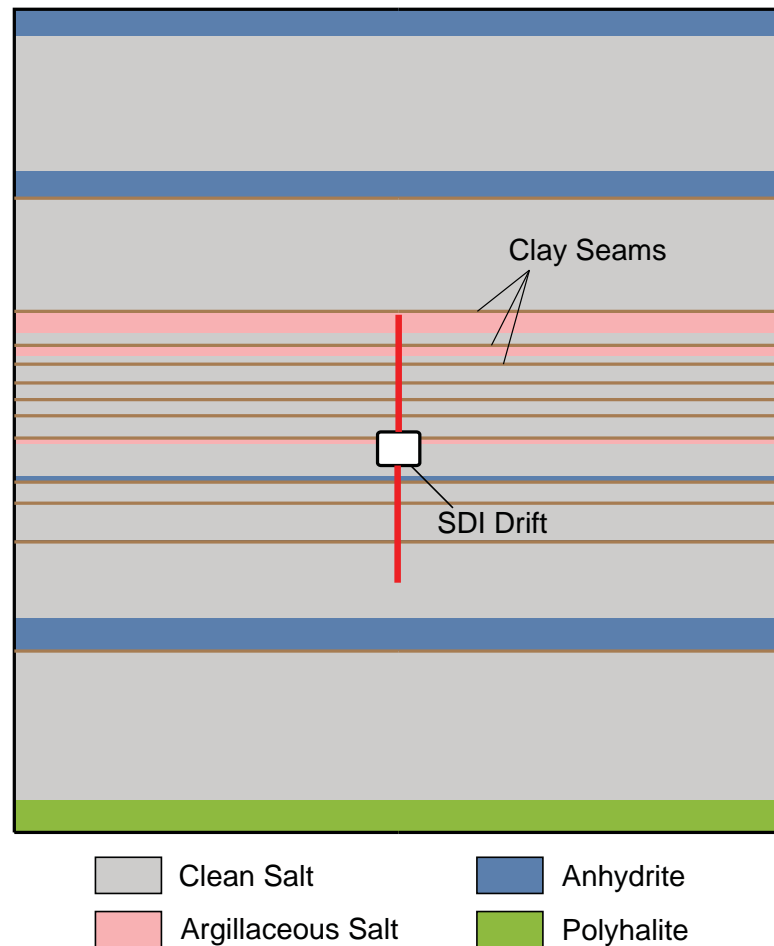
Extent of the Simulation Area



Changed the Stratigraphy



Stratigraphy Reassessment



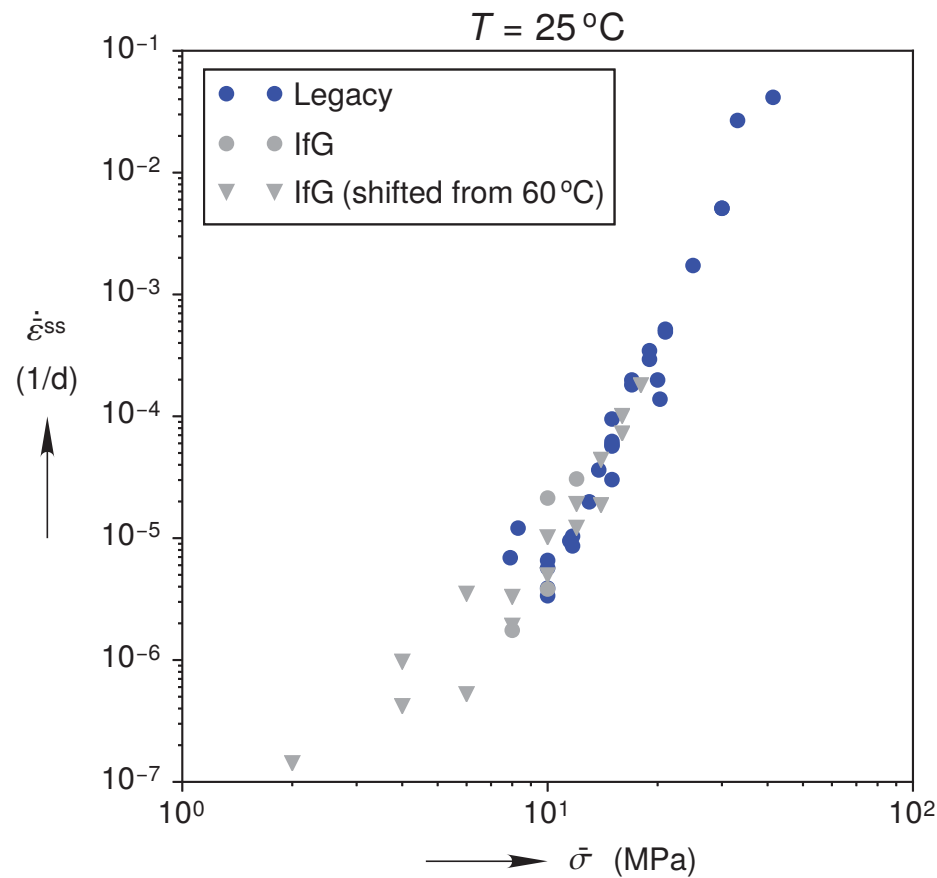
Dennis Powers (Consulting Geologist):

“This study does not sustain the assessment of Munson et al. (1989) that all of the halite within the reference stratigraphy, with the exception of halite above and below anhydrite a, could or should be treated as argillaceous halite.”

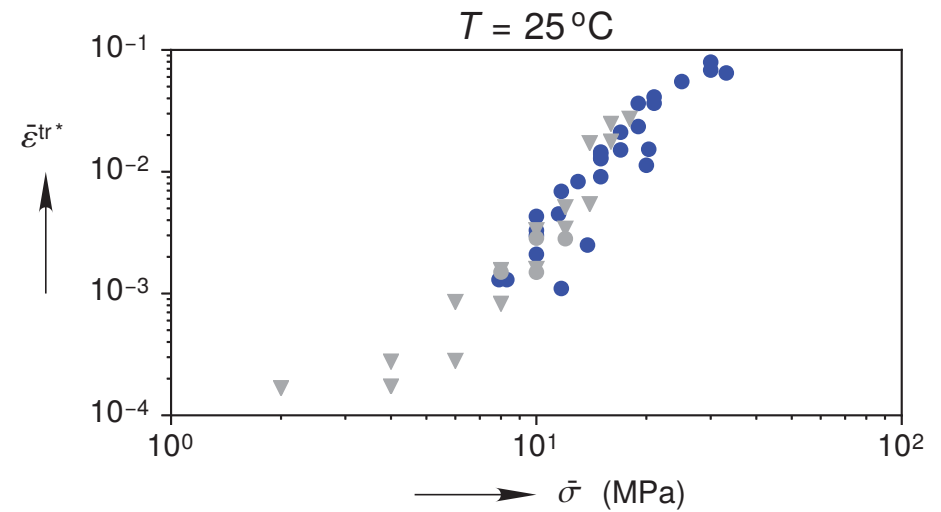
Clean Salt: Legacy vs IfG



Steady State Rate



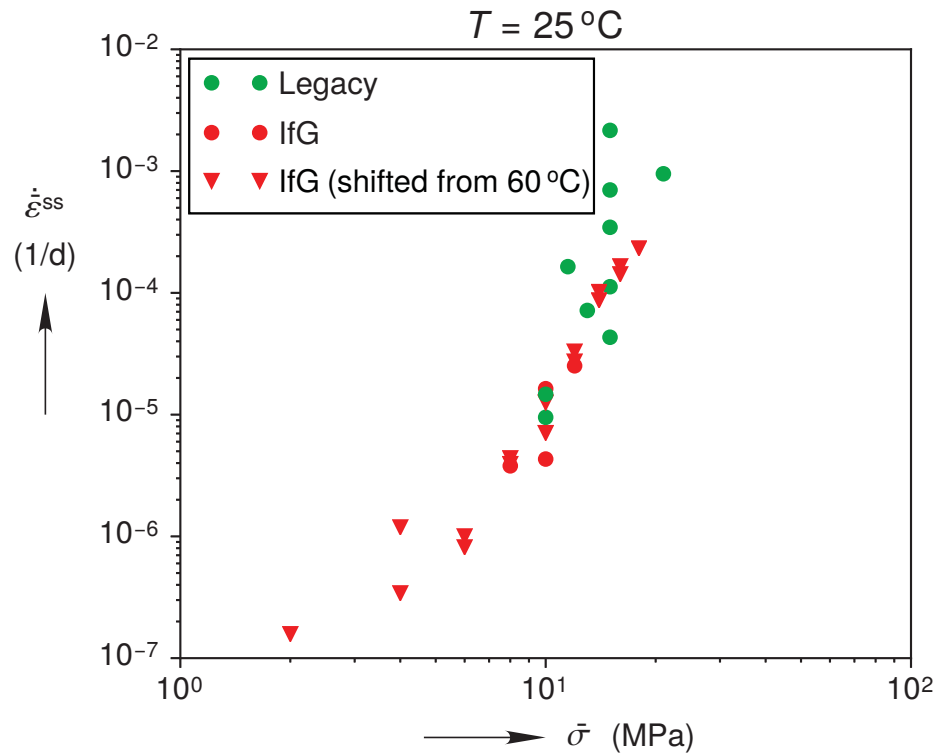
Transient Limit



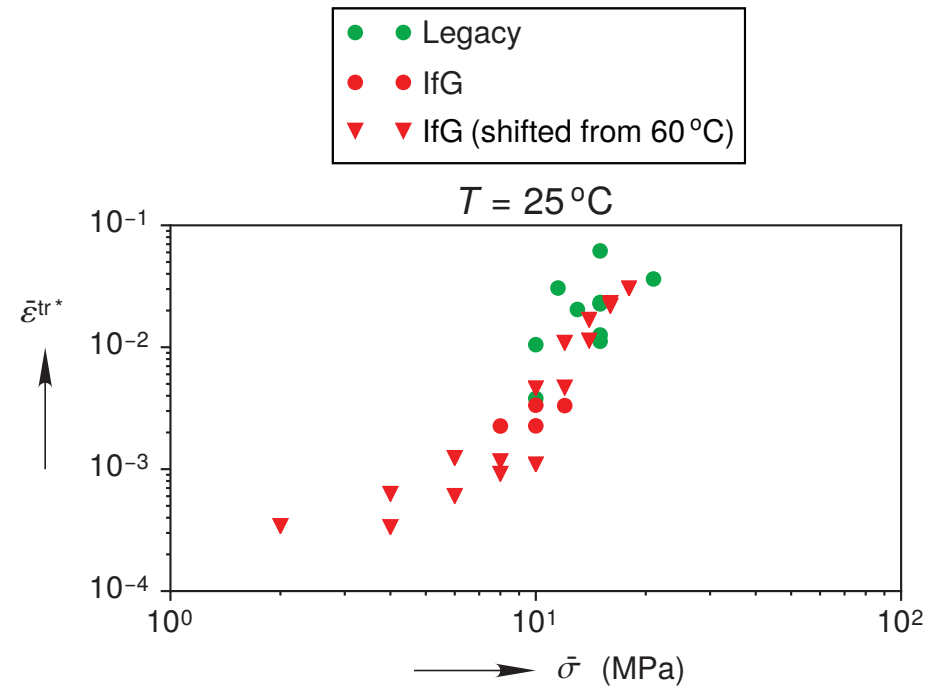
Argillaceous Salt: Legacy vs IfG



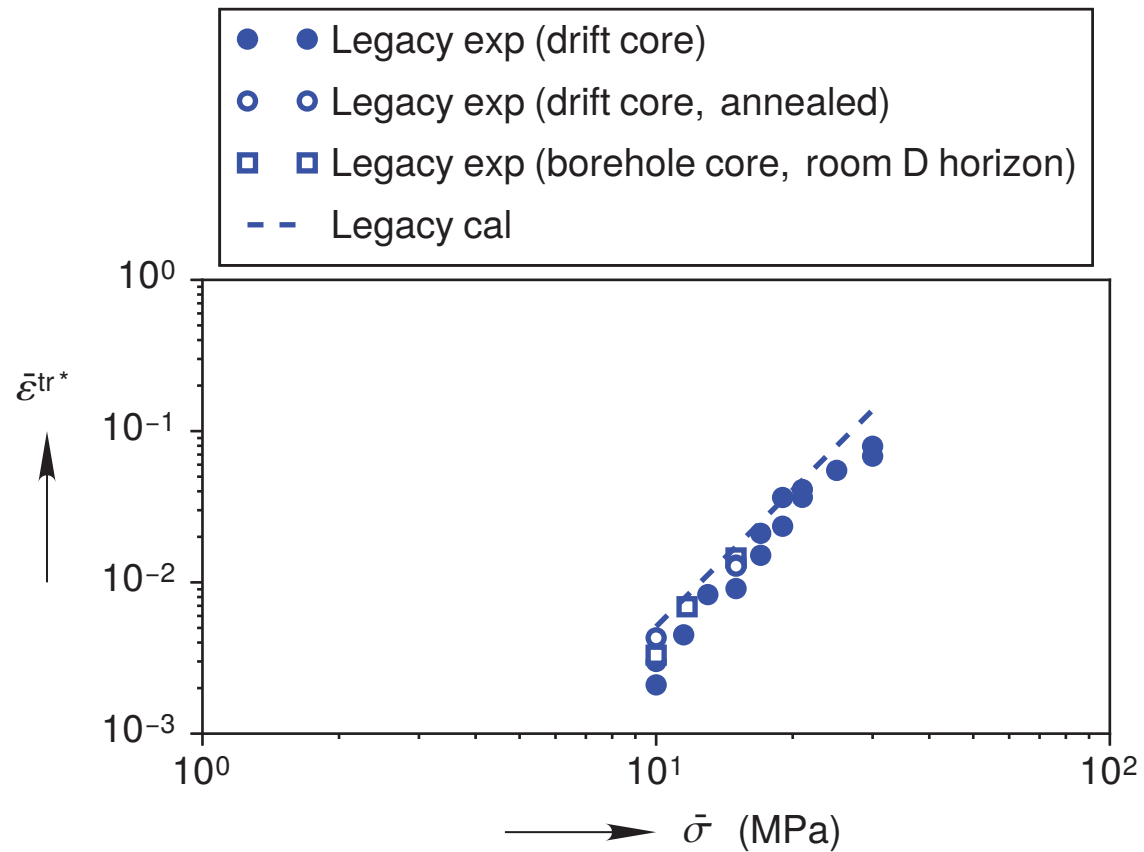
Steady State Rate



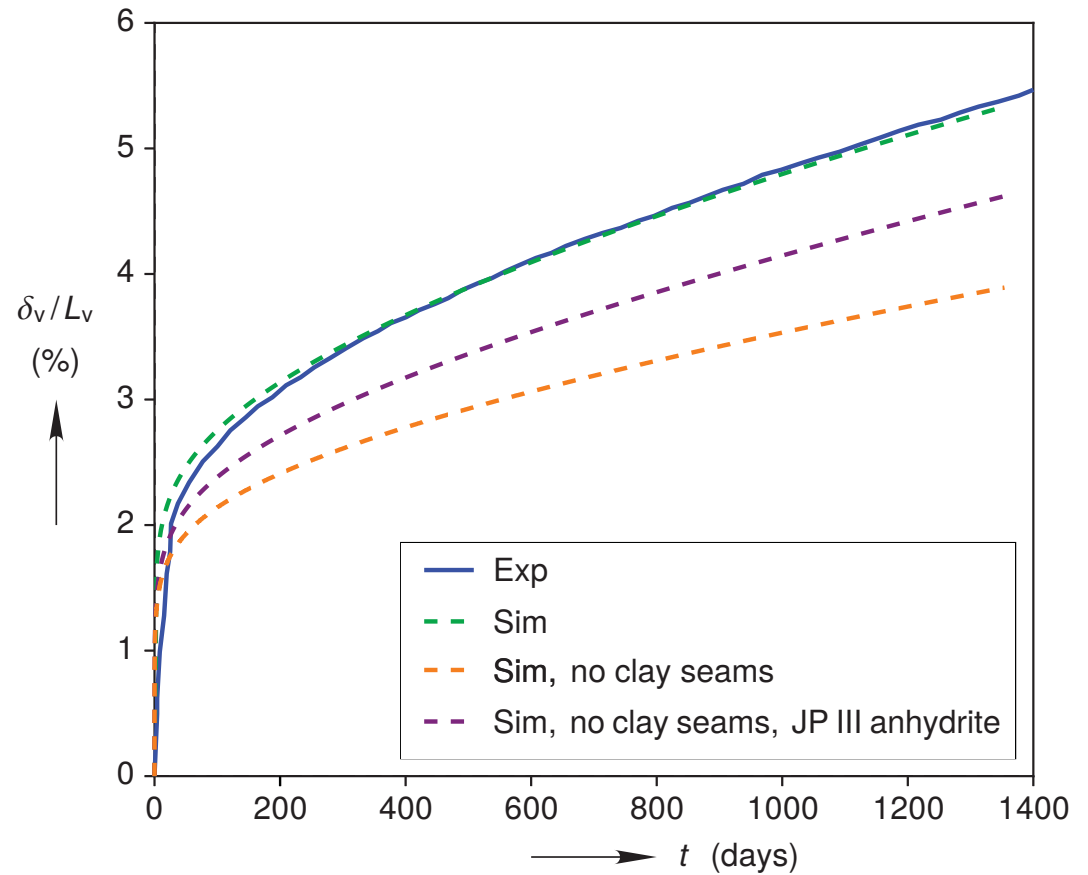
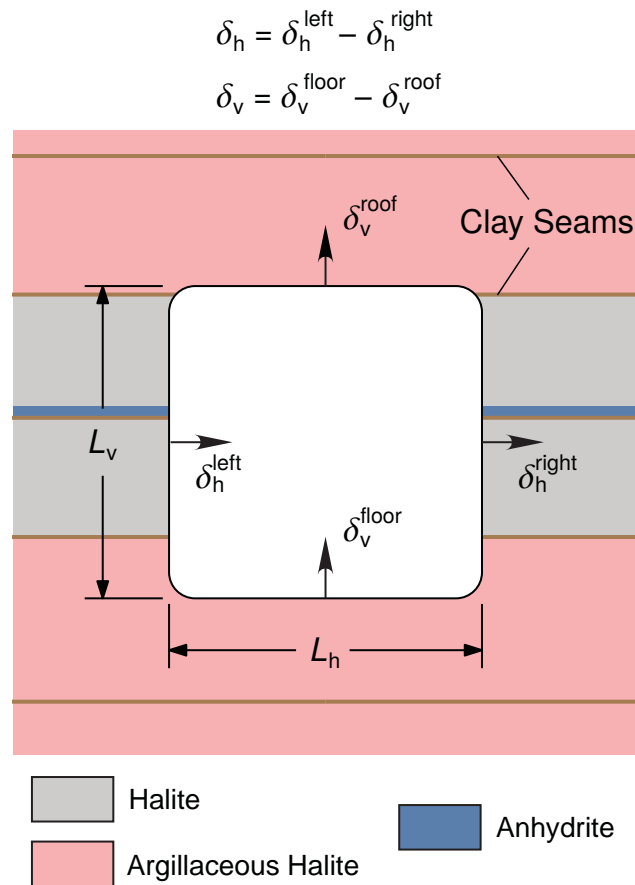
Transient Limit



Lost Transient Strains



Clay Seams and Anhydrite Strength

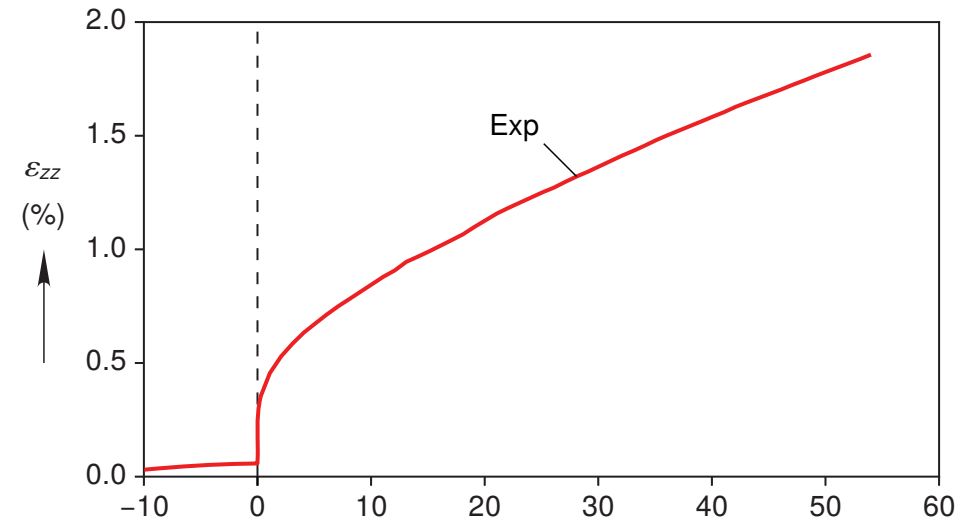


Munson-Dawson Calibration



Transient Creep ODE

$$\dot{\epsilon}^{\text{tr}} = \exp \left[\delta_h \left(1 - \frac{\bar{\epsilon}^{\text{tr}}}{\bar{\epsilon}^{\text{tr}*}} \right)^2 \right] \dot{\epsilon}^{\text{ss}} - \dot{\epsilon}^{\text{ss}}$$

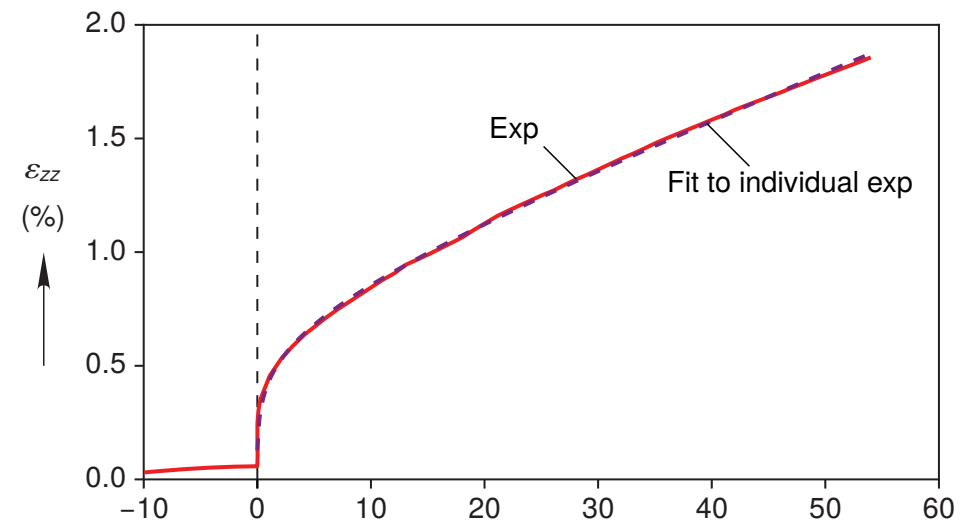


Munson-Dawson Calibration



Transient Creep ODE

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{\text{tr}} = \exp \left[\delta_h \left(1 - \frac{\bar{\epsilon}^{\text{tr}}}{\bar{\epsilon}^{\text{tr}*}} \right)^2 \right] \dot{\bar{\epsilon}}^{\text{ss}} - \dot{\bar{\epsilon}}^{\text{ss}}$$

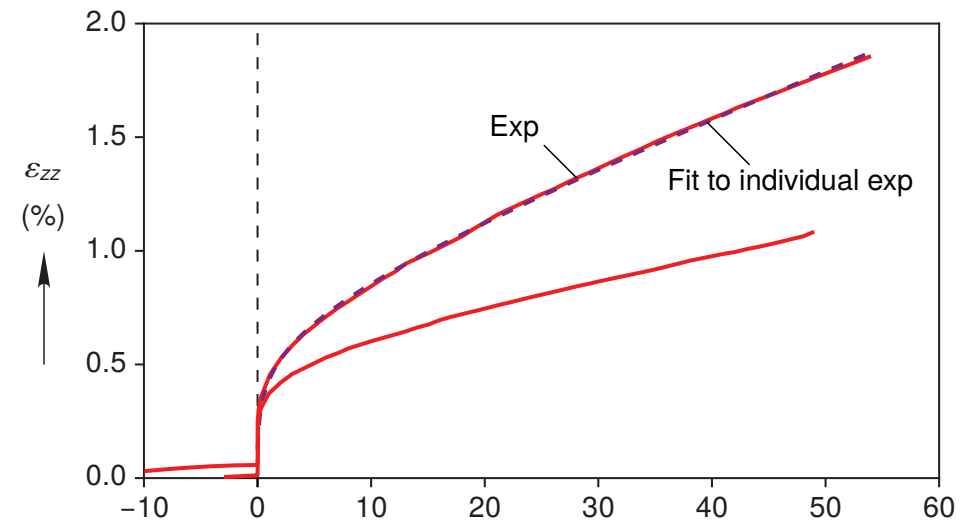


Munson-Dawson Calibration



Transient Creep ODE

$$\dot{\epsilon}^{\text{tr}} = \exp \left[\delta_h \left(1 - \frac{\bar{\epsilon}^{\text{tr}}}{\bar{\epsilon}^{\text{tr}*}} \right)^2 \right] \dot{\epsilon}^{\text{ss}} - \dot{\epsilon}^{\text{ss}}$$

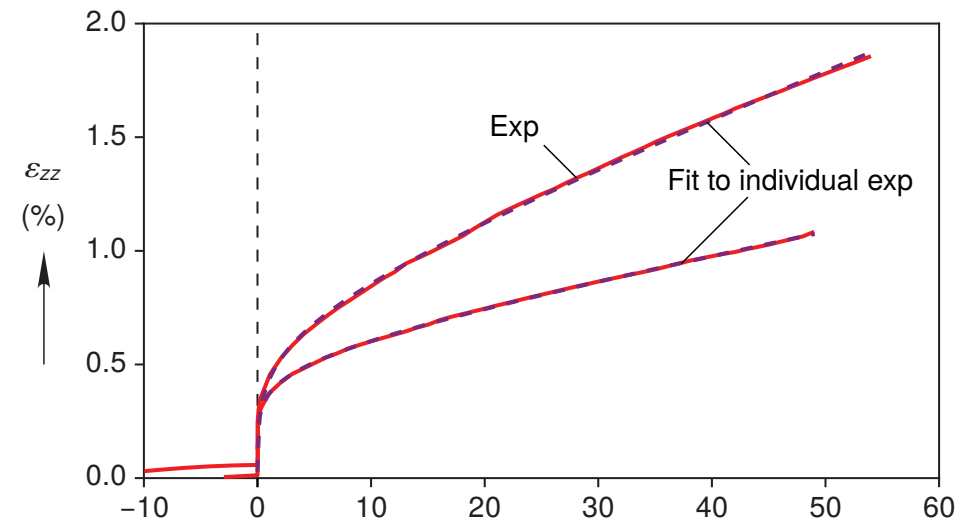


Munson-Dawson Calibration



Transient Creep ODE

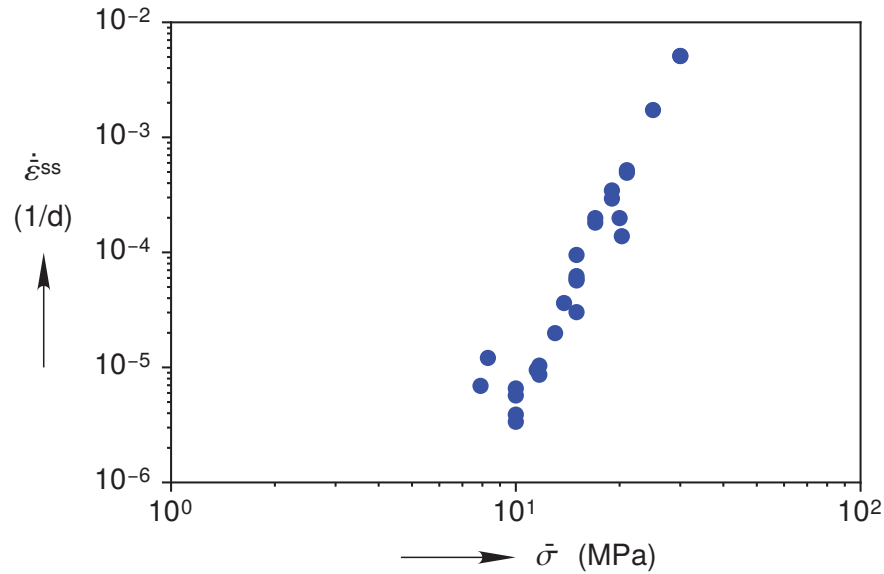
$$\dot{\epsilon}^{\text{tr}} = \exp \left[\delta_h \left(1 - \frac{\bar{\epsilon}^{\text{tr}}}{\bar{\epsilon}^{\text{tr}*}} \right)^2 \right] \dot{\epsilon}^{\text{ss}} - \dot{\epsilon}^{\text{ss}}$$



Munson-Dawson Calibration



Steady State Rate

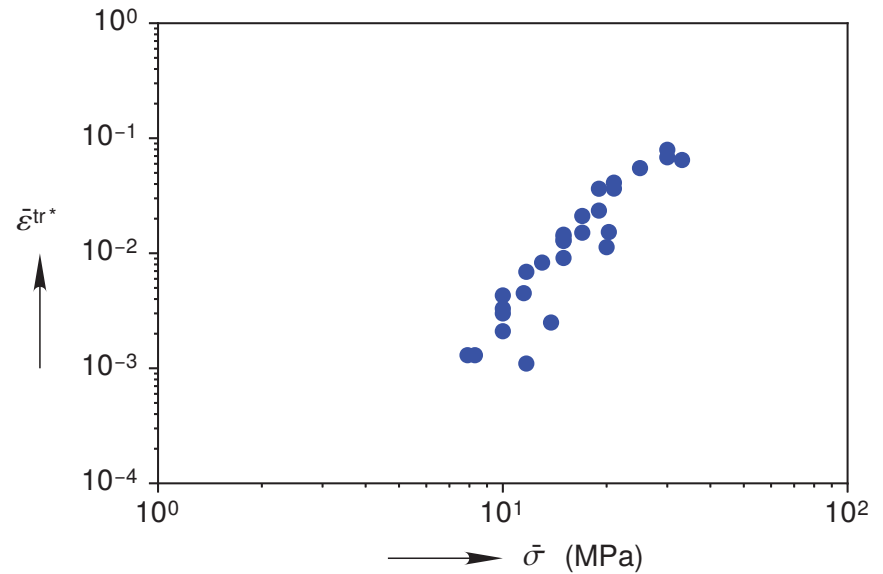


$$\dot{\epsilon}^{ss} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^n$$



$$\log_{10} [\dot{\epsilon}^{ss}] = \log_{10} \left[\frac{A}{\mu^n} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \right] + n \log_{10} \bar{\sigma}$$

Transient Limit



$$\bar{\epsilon}^{tr*} = K_0 \exp(c T) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^m$$

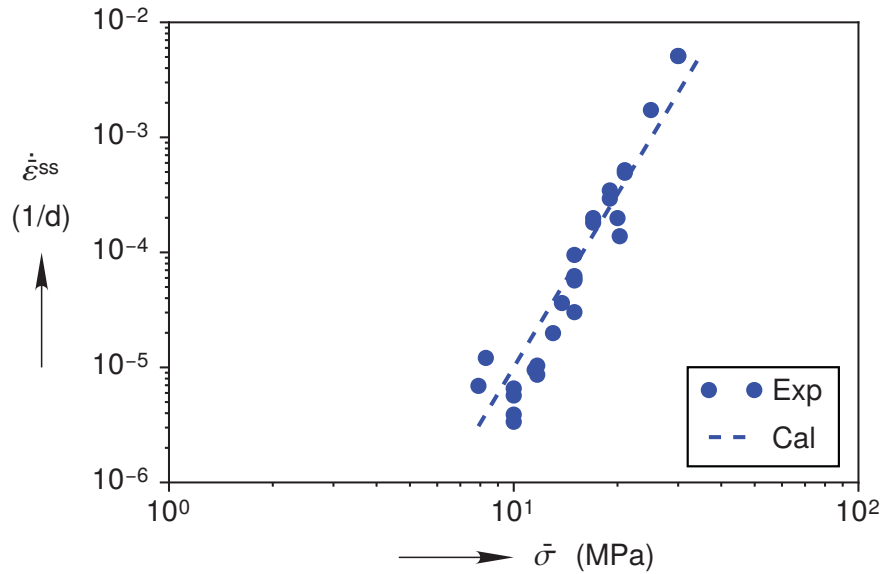


$$\log_{10} [\bar{\epsilon}^{tr*}] = \log_{10} \left[\frac{K_0}{\mu^m} \exp(c T) \right] + m \log_{10} \bar{\sigma}$$

Munson-Dawson Calibration



Steady State Rate

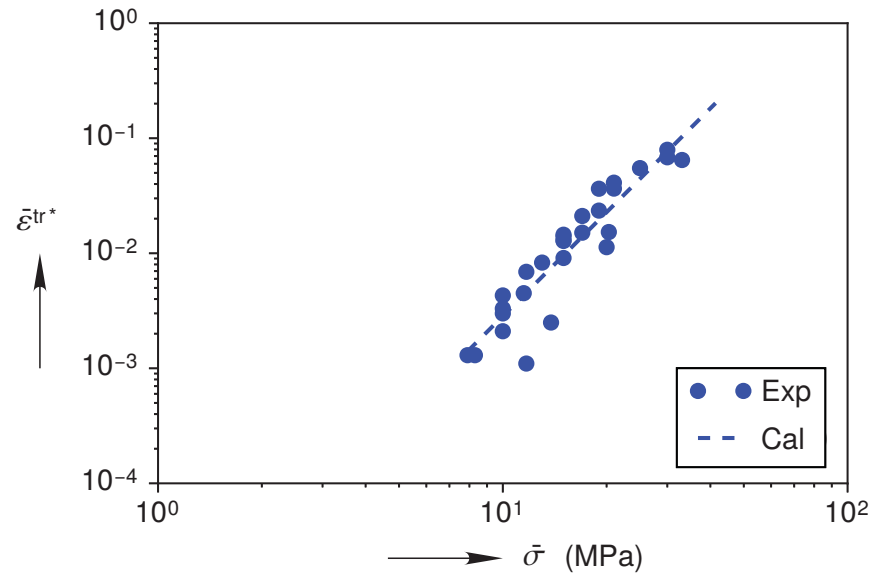


$$\dot{\epsilon}^{ss} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^n$$



$$\log_{10} [\dot{\epsilon}^{ss}] = \log_{10} \left[\frac{A}{\mu^n} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \right] + n \log_{10} \bar{\sigma}$$

Transient Limit



$$\bar{\epsilon}^{tr*} = K_0 \exp(c T) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\mu}\right)^m$$

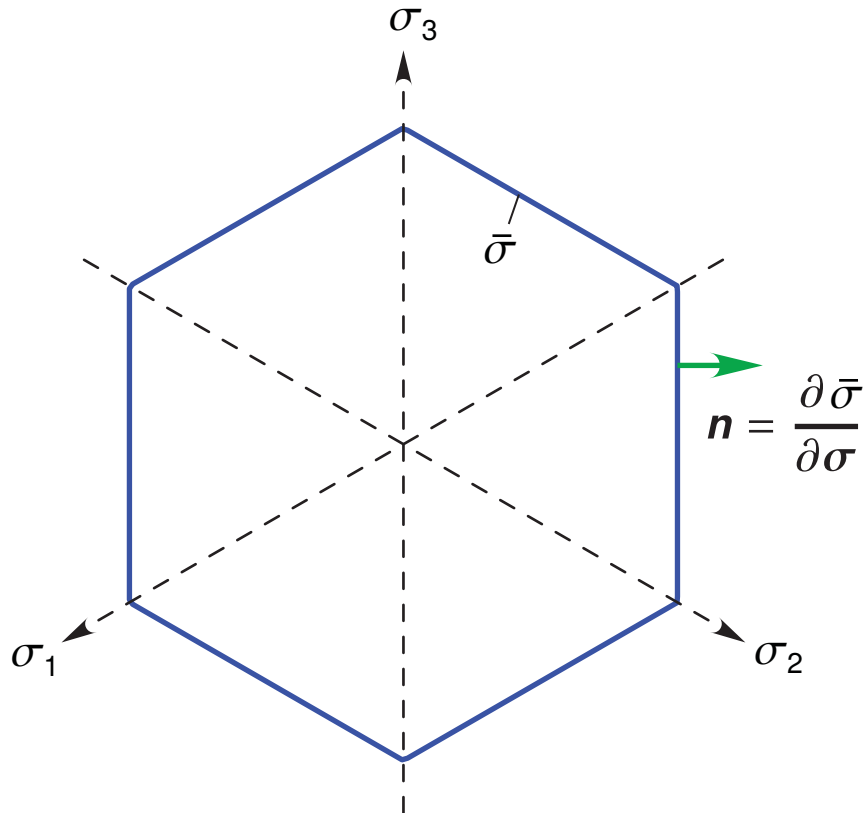


$$\log_{10} [\bar{\epsilon}^{tr*}] = \log_{10} \left[\frac{K_0}{\mu^m} \exp(c T) \right] + m \log_{10} \bar{\sigma}$$

Munson Dawson: 3D Generalization



Tresca Equivalent Stress



$$\bar{\sigma} = \max (|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

Additive Decomposition

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}} = \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{in}}$$

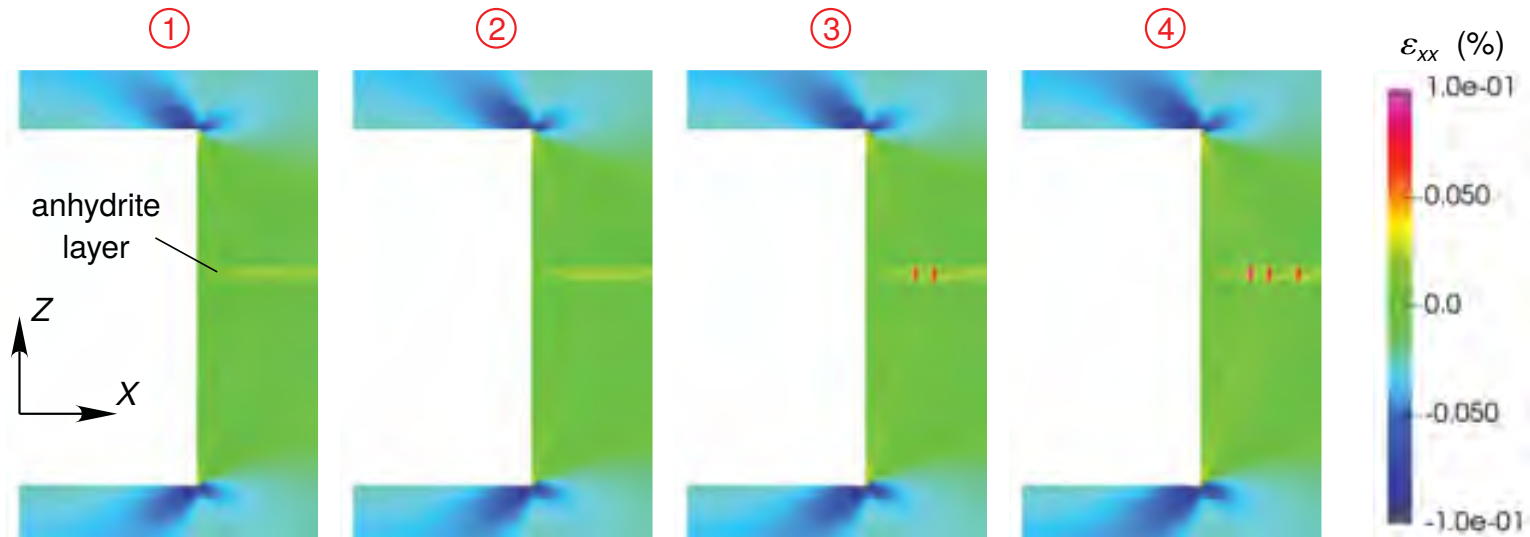
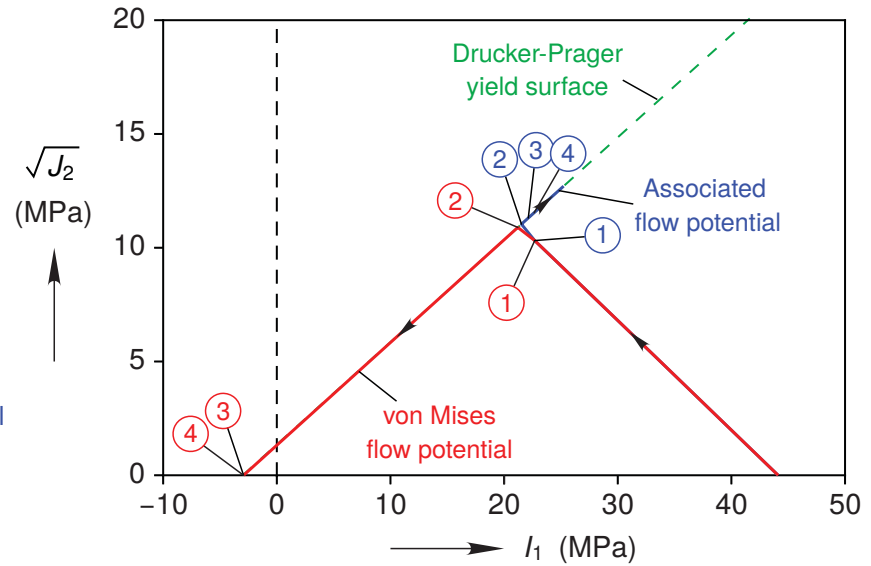
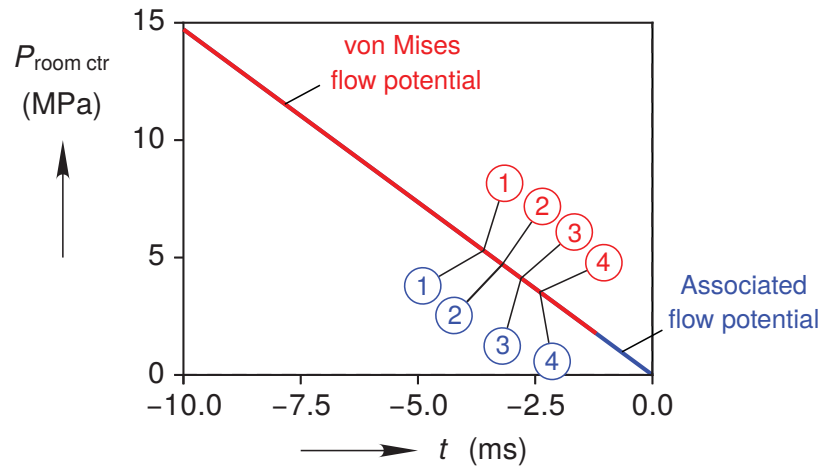
Associated Flow Rule

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{in}} = \left(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{ss}} + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{tr}} \right) \mathbf{n}$$

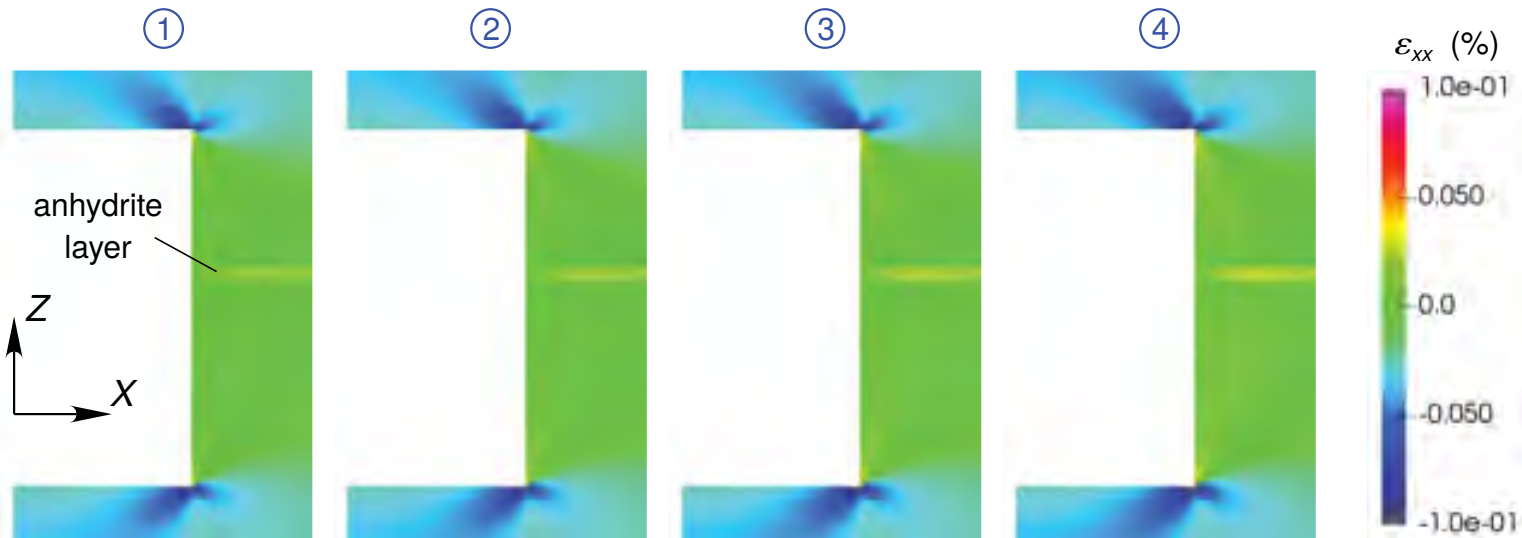
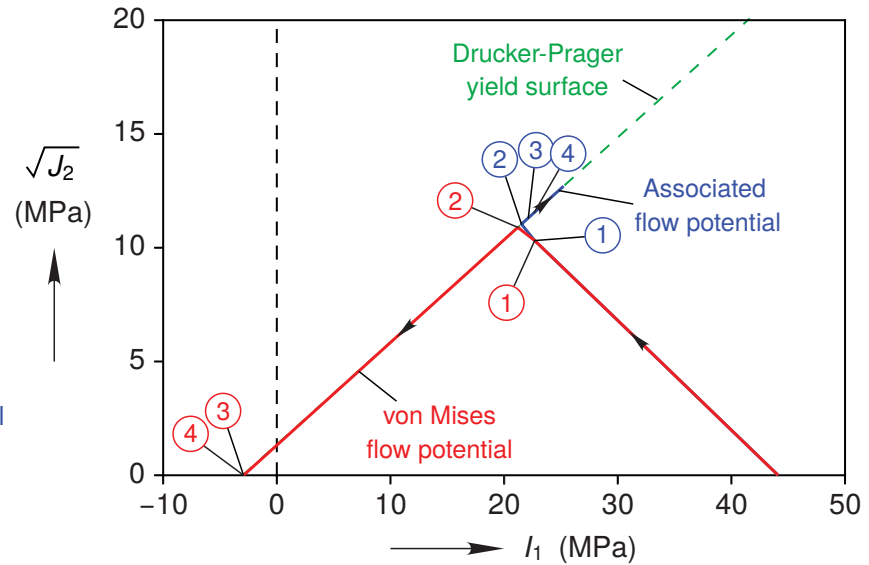
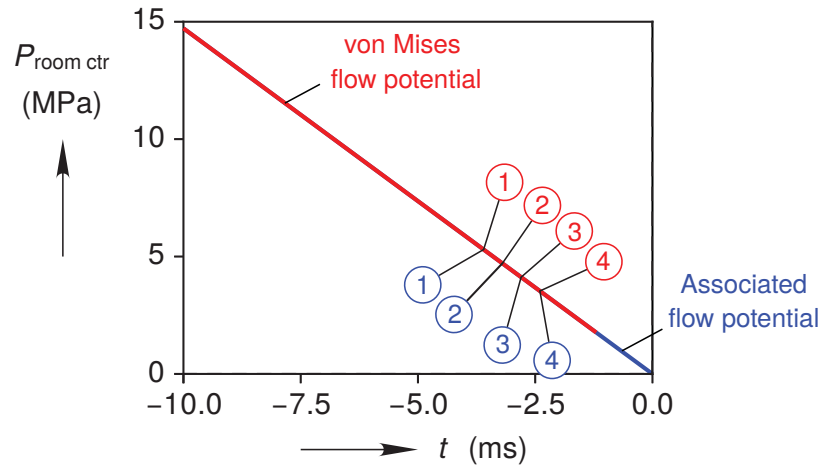
Generalized Hooke's Law

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbb{C} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e$$

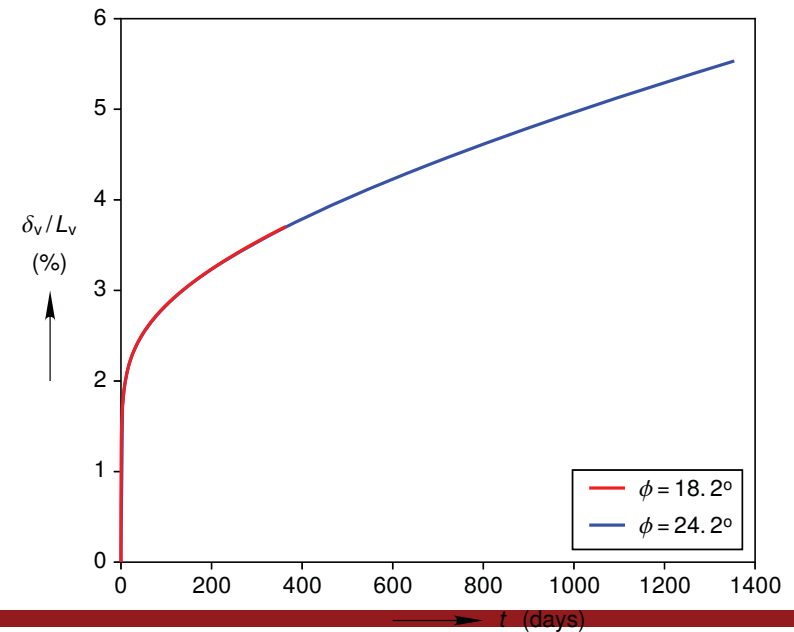
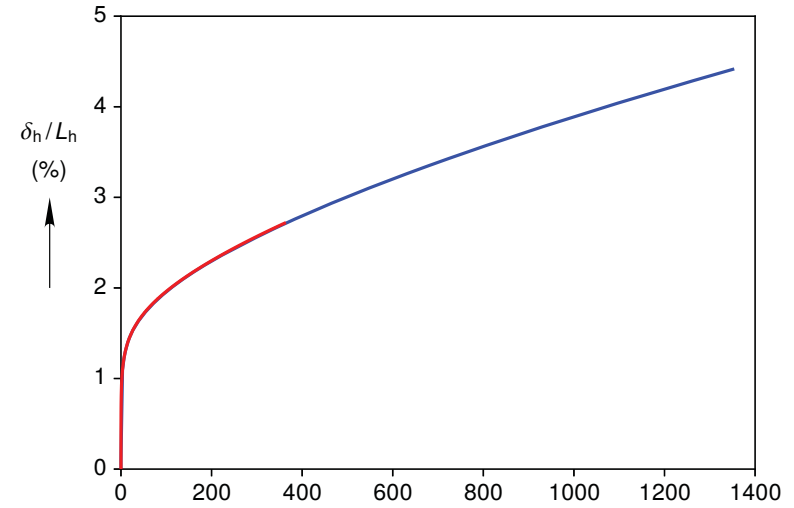
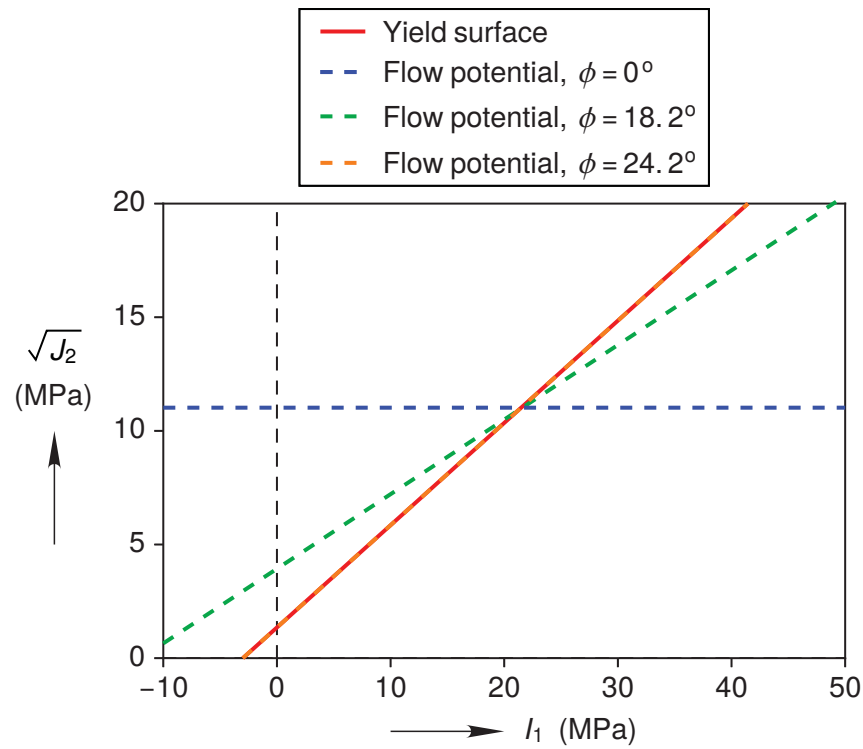
Anhydrite Issue



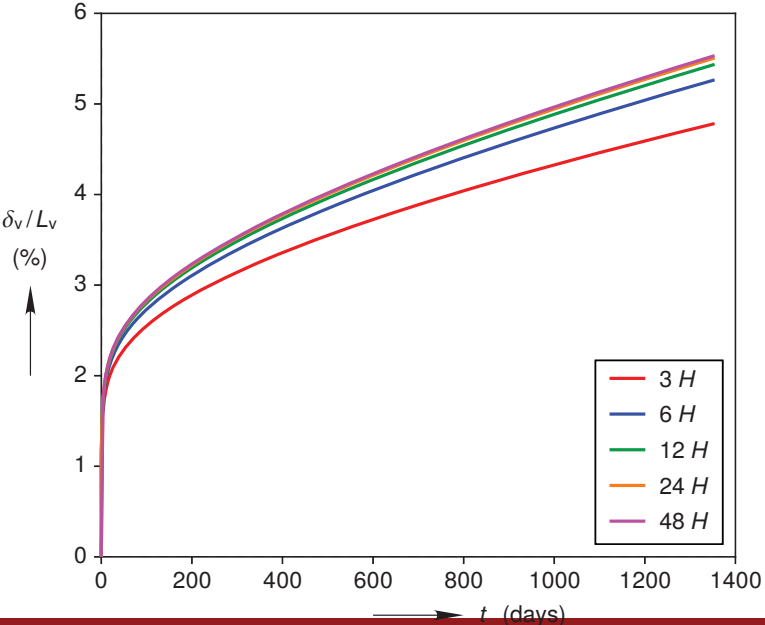
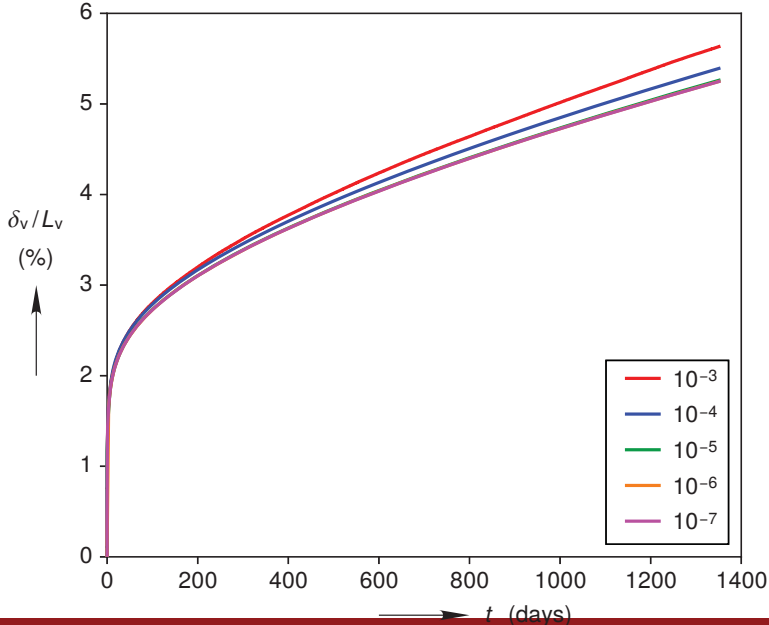
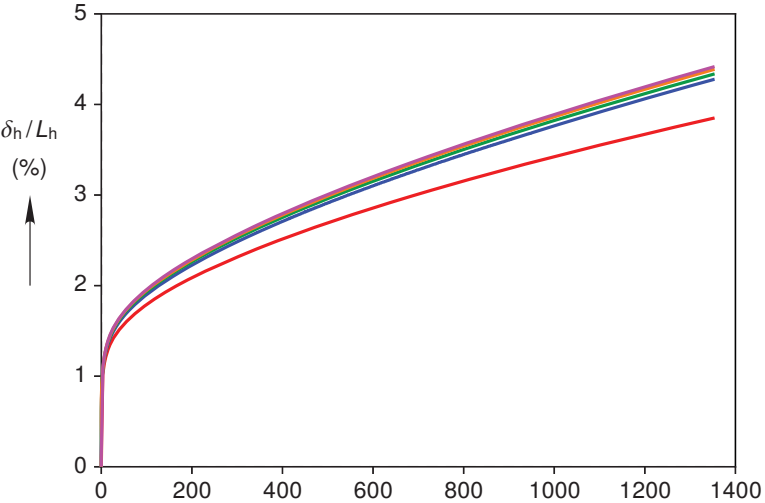
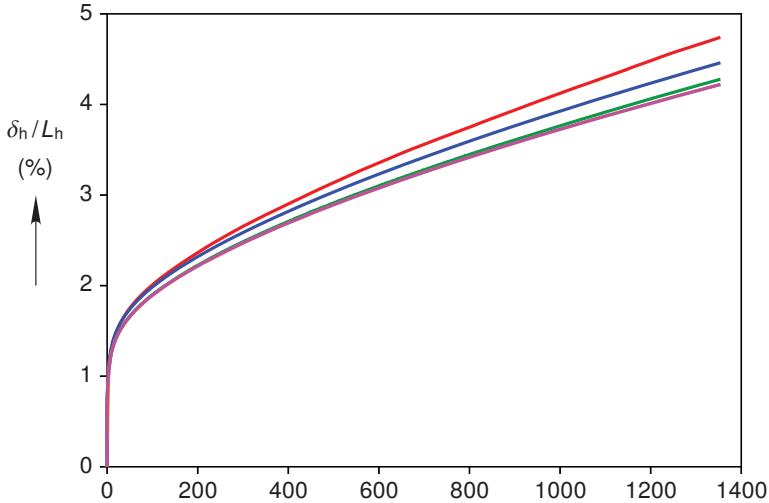
Anhydrite Issue



Anhydrite Dilatation Angle Sensitivity



Residual and Mesh Convergence



Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung (DCS-MONITOR)

U. Hampel¹, A. Kratzsch², R. Rachamin¹, M. Wagner¹, S. Schmidt², D. Fiß², S. Reinicke²

¹*Technische Universität Dresden, AREVA-Stiftungsprofessur für bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik*

²*Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*

12. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, Karlsruhe, 09.11. - 10.11.2016

Bis zur Verfügbarkeit eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen besteht in Deutschland die Notwendigkeit, abgebrannte Brennelemente an den Kraftwerksstandorten sicher zwischenzulagern. Es ist derzeit davon auszugehen, dass hierfür erhebliche Zeiträume von mehr als 50 Jahren in Betracht gezogen werden müssen. Die Trockenlagerung der Brennelemente erfolgt in Transportbehältern vom Typ Castor V/19 bzw. Castor V/52. Dabei stellt sich die Frage nach Verhalten und Zustand der Brennelemente über einen längeren Zwischenlagerzeitraum. Eine extrapolative Modellierung des radiochemischen und thermomechanischen Materialverhaltens ist nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik für abschließende Bewertungen schwierig, da vorhandene Daten, zum Beispiel über das Hüllrohrverhalten, mit einigen Unsicherheiten behaftet sind. Daraus ergibt sich im Sinne der öffentlichen Daseinsvorsorge für die Gesellschaft eine Notwendigkeit, Möglichkeiten der nichtinvasiven Langzeitüberwachung der Transportbehälter und deren Inhaltes vorzusehen. Dies ist insbesondere zur Sicherstellung der späteren Transportfähigkeit in ein Endlager notwendig. Da die Transportbehälter vorrangig für den Schutz der Umgebung vor ionisierender Strahlung ausgelegt sind, ist eine Außeninstrumentierung zur Behälterinhaltsüberwachung schwierig. Dicke Stahlwände von 47 cm Stärke schränken jedweden signaltechnischen Zugang zum Untersuchungsobjekt stark ein.

Ziel des geplanten Vorhabens ist es, Möglichkeiten und Methoden zu sondieren, mit denen eine nichtinvasive Behälterüberwachung bzw. eine Detektion von Veränderungen des Behälterinhalts in seinen thermischen und mechanischen Eigenschaften ermöglicht wird. Über einen Zeitraum von 3 Jahren werden vier potenzielle Diagnoseverfahren, die für die Bewertung des Zustands des Behälterinventars in Frage kommen, hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Die sind die Strahlungsemissionsanalyse, thermographische Verfahren, Myonen-Bildgebung sowie akustische Spektroskopie.

Das Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 1501518A/B) gefördert.

Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung

DCS-MONITOR

Förderinitiative „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle“ des BMWi

Laufzeit: 01.02.2016 - 31.01.2019



AREVA-Stiftungsprofessur für bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Hampel
Dr. Reuven Rachamin
Dipl.-Math. Michael Wagner



Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kratzsch
M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Schmidt
Dipl.-Ing. (FH) Daniel Fiß
Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Reinicke

Motivation

Nr. 112/13 | Berlin, 26.07.2013

Standortauswahlgesetz tritt in Kraft

Altmaier: Ergebnisoffene Suche nach einem Endlager-Standort beginnt

Das Standortauswahlgesetz für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist heute im Bundesgesetzblatt verkündet worden und tritt morgen in Kraft. "Damit beginnt die ergebnisoffene Suche nach einem Standort für ein Endlager", sagte Bundesumweltminister Peter Altmaier. Das Zustandekommen des Gesetzes unterstreiche eindrucksvoll die Funktionsfähigkeit des demokratischen Grundkonsenses in Deutschland. "Eine der umstrittensten Fragen in unserem Land ist in einem großen politischen Konsens gelöst worden. Dies ist dank der Kompromissfähigkeit aller Beteiligten von Bund, Ländern und Parteien gelungen", betonte Altmaier.

Nach dem Inkrafttreten steht jetzt die praktische und detaillierte Umsetzung des Gesetzes an. "Jetzt geht die Arbeit erst wirklich los. Auch dazu brauchen wir den parteiübergreifenden Konsens. Die Kommission, die das Auswahlverfahren vorbereiten soll, sollte möglichst noch vor der Wahl einvernehmlich besetzt werden. Das wäre ein Signal, dass der Geist des Konsenses auch zukünftig trägt", sagte Altmaier.

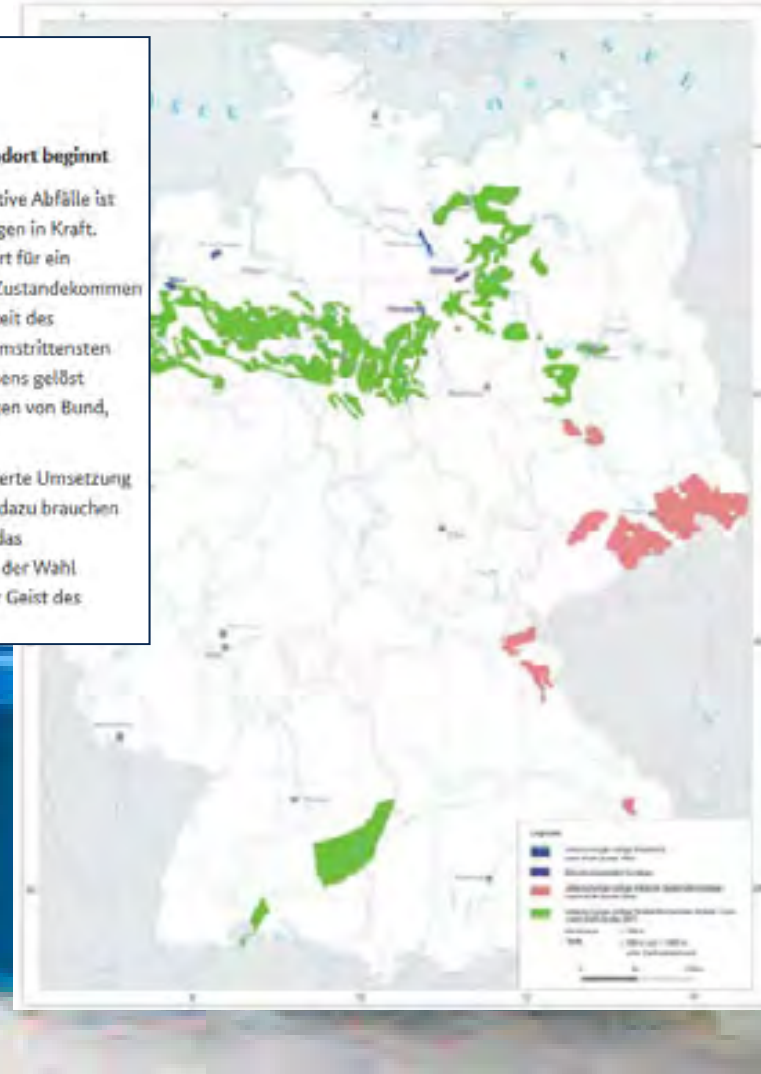


Bild: <http://www.kernenergie.de>

4.11.2016

12. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, Karlsruhe, 09.11. - 10.11.2016

Folie Nr. 2

Motivation

StandAG:

- Ergebnisoffene Suche in allen potenziellen Wirtsgesteinen
- Verfügbarkeit eines Endlagers > 50 Jahre

Die Betreiber der Kernkraftwerke verfügen über atomrechtliche Genehmigungen zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in Transport- und Lagerbehältern der Bauart CASTOR V in den jeweiligen Standortzwischenlagern.

AtG:

§ 6 Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen

(5) Die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in kerntechnischen Anlagen nach Absatz 3 in Verbindung mit Absatz 1 soll 40 Jahre ab Beginn der ersten Einlagerung eines Behälters nicht überschreiten. Eine Verlängerung von Genehmigungen nach Satz 1 darf nur aus unabweisbaren Gründen und nach der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen.

Motivation

- Derzeit liegen keine genauen Kenntnisse über das Langzeitverhalten der Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern vor.
- Schädigungen durch Gasdruckaufbau unter H₂-Versprödung in Hüllrohren und damit verbundene Kernbrennstofffreisetzung im Behälter sind denkbar.
- Eine Kenntnis über den Zustand der Brennelemente in den Behältern auch nach längeren Zwischenlagerzeiten ist für die Weiterbehandlung der Abfälle (Transport, Umlagerung) wichtig!

Transport- und Lagerbehälter vom Typ Castor

(GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH)

- Außenmaße 594 cm x \varnothing 244 cm
- Leergewicht 108 t
- Körper: monolithischer Sphäroguss (mit PE-Einbauten)
- Wandstärke allseitig 47 cm, Radialberippung
- Beladung CASTOR V/19: 19 DWR-Brennelemente
- Beladung CASTOR V/52: 52 SWR-Brennelemente
- Füllgas He
- Doppeldeckel mit Drucküberwachung (Druckschalter)



<http://www.gns.de>

Das Objekt: TLB vom Typ Castor

(GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH)

Fragestellung 1: Langzeitverhalten des Behälters?

- Deckeldichtungen: Langzeitverhalten unbekannt
- Korrosiver Angriff von außen (gut überwachbar)

Fragestellung 2: Langzeitverhalten des Inventars?

- Druckaufbau durch Edelgase und Wasserstoffversprödung
 - ⇒ Berstrisse an Hüllrohren (?)
 - ⇒ Kernbrennstoffverlagerung (?)
 - ⇒ innerhalb der Hüllrohre (?)
 - ⇒ außerhalb der Hüllrohre (?)



<http://www.gns.de>

Langzeitverhalten des Inventars?

Gesicherte Kenntnisse

Brennstoffmatrix im Betrieb

- Aufreißen der Brennstoffmatrix durch hohe Temperaturgradienten im Betrieb: Bildung von Bruchfragmenten. Dadurch erhöhte Freisetzung gasförmiger Spaltprodukte.
- Auflockerung des Brennstoffgefüges durch Anhäufung metallischer Spaltprodukte (Palladium, Rhodium, Ruthenium, Molybdän, Technetium) entlang der Korngrenzen.

Brennstab im Betrieb

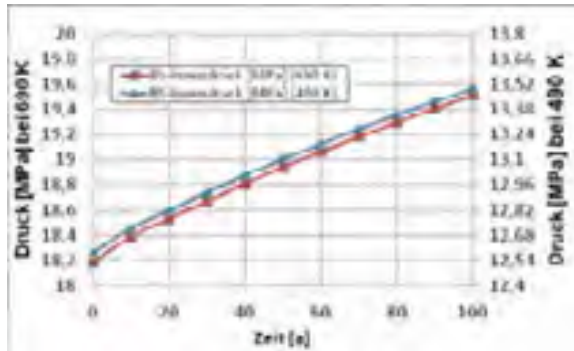
- Wandschwächung durch Korrosion (und Fretting)
- Hydrid-Einlagerungen

Brennstab bei Nachbetriebslagerung

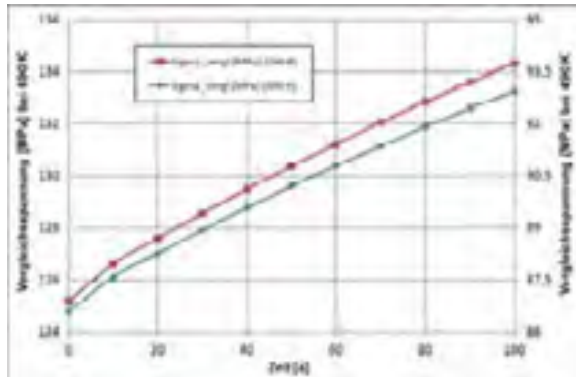
- Temperaturerhöhung: Zersetzung von Hydriden
- Radialer Spannungsgradient im Hüllrohr durch erhöhten Innendruck
- Abkühlung: radiale Ausfällung von Hydriden entlang des Spannungsgradienten
- Dadurch Ausbreitung von tangentialen Rissen sowie das Herabsetzen der Duktilität
- Anstieg des Innendrucks durch Freisetzung von Edelgasen aus Brennstoff

Langzeitverhalten des Inventars?

Ellinger et al. GRS-A-3597, 2010

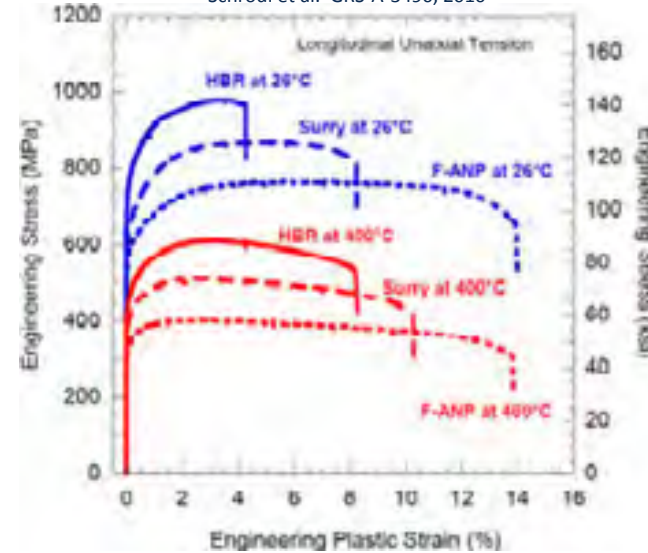


Berechneter zeitlicher Verlauf des Edelgasgesamtdruckes in einem Brennstab nach Entladung aus dem Reaktor bei einem erreichten Endabbrand von 50 MWd/kgU für die Gastemperaturen von 490 K (217 °C) und 690 K (417 °C)



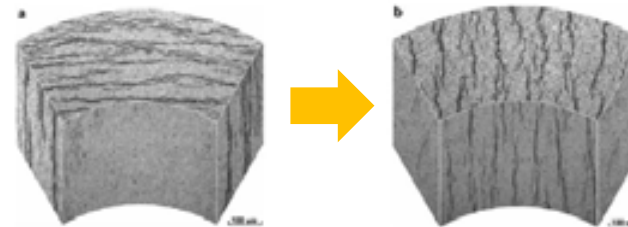
Berechneter zeitlicher Verlauf der Axial- und Tangentialspannung bei einem erreichten Endabbrand von 50 MWd/kgU für die Gastemperaturen von 490 K (217 °C) und 690 K (417 °C)

Schrödl et al. GRS-A-3490, 2010



Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Zry-4 im Bereich der plastischen Verformung: Unbestrahlt (F-ANP), niedriger Abbrand (Surry 36 MWd/kgU), hoher Abbrand (HBR: 67 MWd/kgU), Temperaturen: 26 °C, 400 °C

Klinger, R.: Sicherheitsaspekte bei der längerfristigen Zwischenlagerung wärmenentwickelnder radioaktiver Abfälle. GRS Fachgespräch, 2015



Folie Nr. 8

Langzeitliches nichtinvasives Monitoring von Behälterinhalten bei verlängerter Zwischenlagerung

Frage: Ist es prinzipiell möglich, durch berührungsfreies Messen Aussagen über den Inventarzustand des Behälters (Brennelemente) zu treffen?

Falls ja:

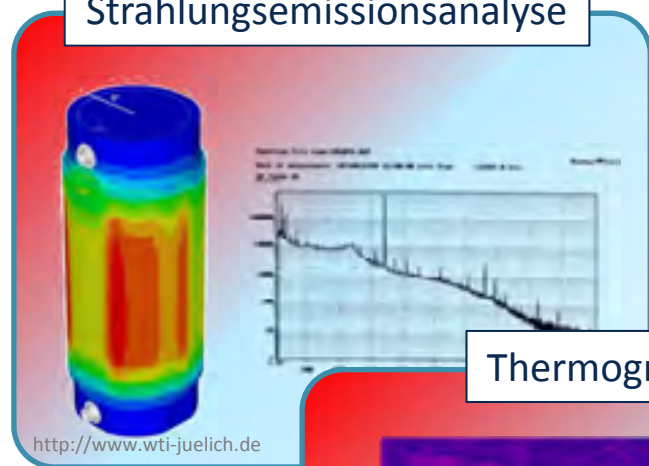
- In welchem Detaillierungsgrad?
- Mit welchen Messzeiten?
- Mit welchen Unsicherheiten?
- Was ist dafür erforderlich (Messtechnik, Prozeduren)?



Potenzielle Verfahren zur Zustandsüberwachung

Zunehmende Komplexität und Aussagekraft

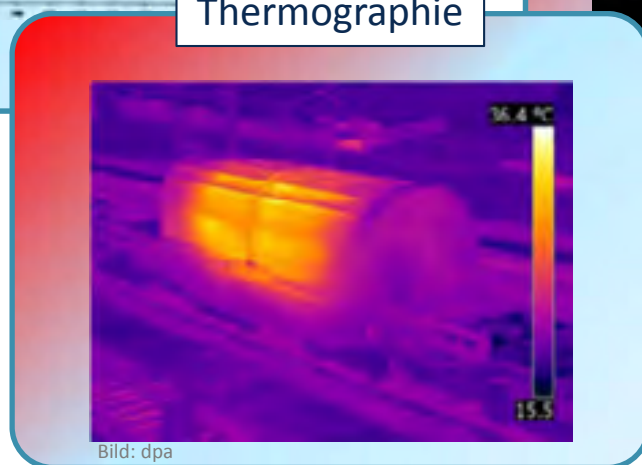
Strahlungsemissionsanalyse



Myonenbildgebung



Thermographie



Akustische Spektroskopie



Strahlungsemissionsanalyse

Prinzip:

- Räumlich aufgelöste Messung des externen Gamma- und Neutronenstrahlungsfeldes
- Rückschluss auf interne Quellverteilung = Brennstoffinventarverteilung

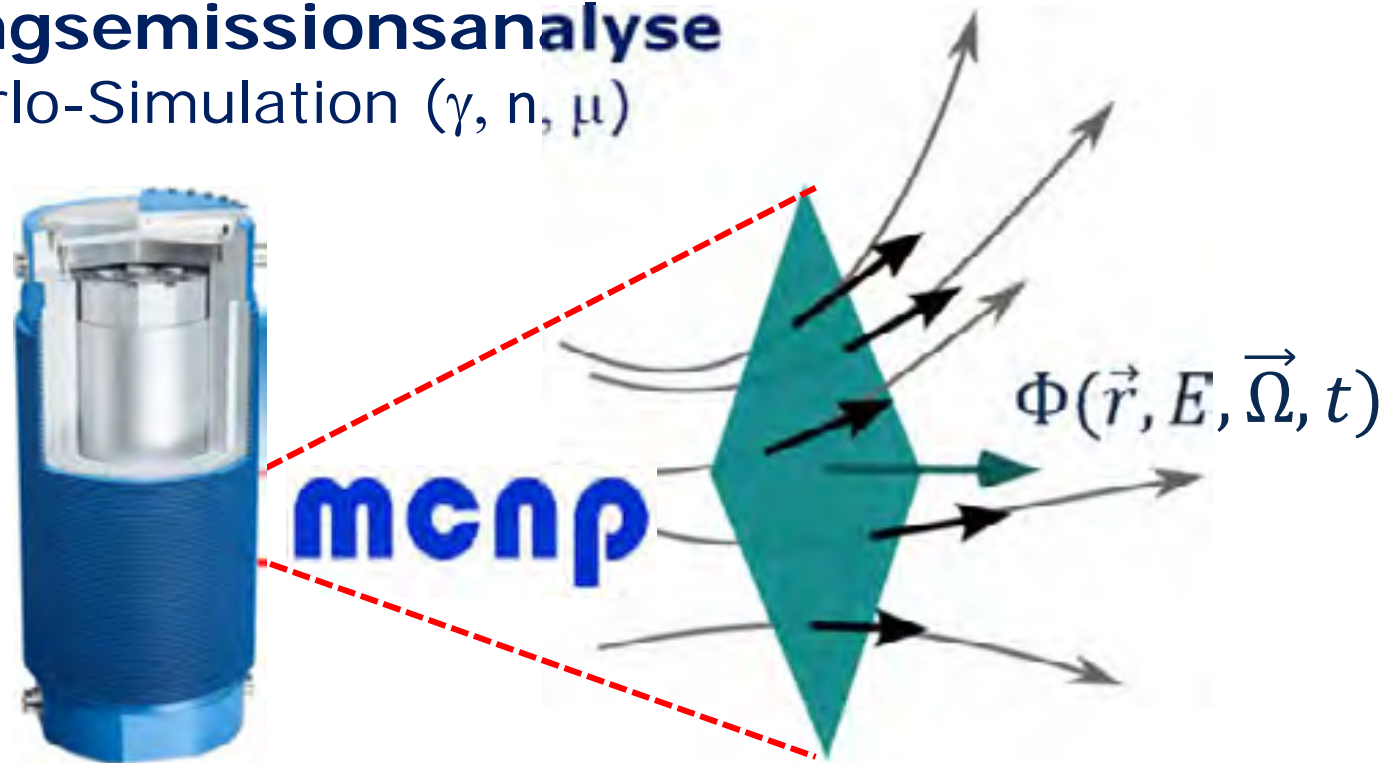
SWOT

- ☺ Konzeptionell einfache Umsetzung
- ☺ Vergleichsweise kurze Messzeiten
- ☹ Starke Strahlungstreuung im Behälterkörper
- ☹ Selbstabschirmung innerer Brennelemente (besonders für CASTOR V/52)



Strahlungsemissionsanalyse

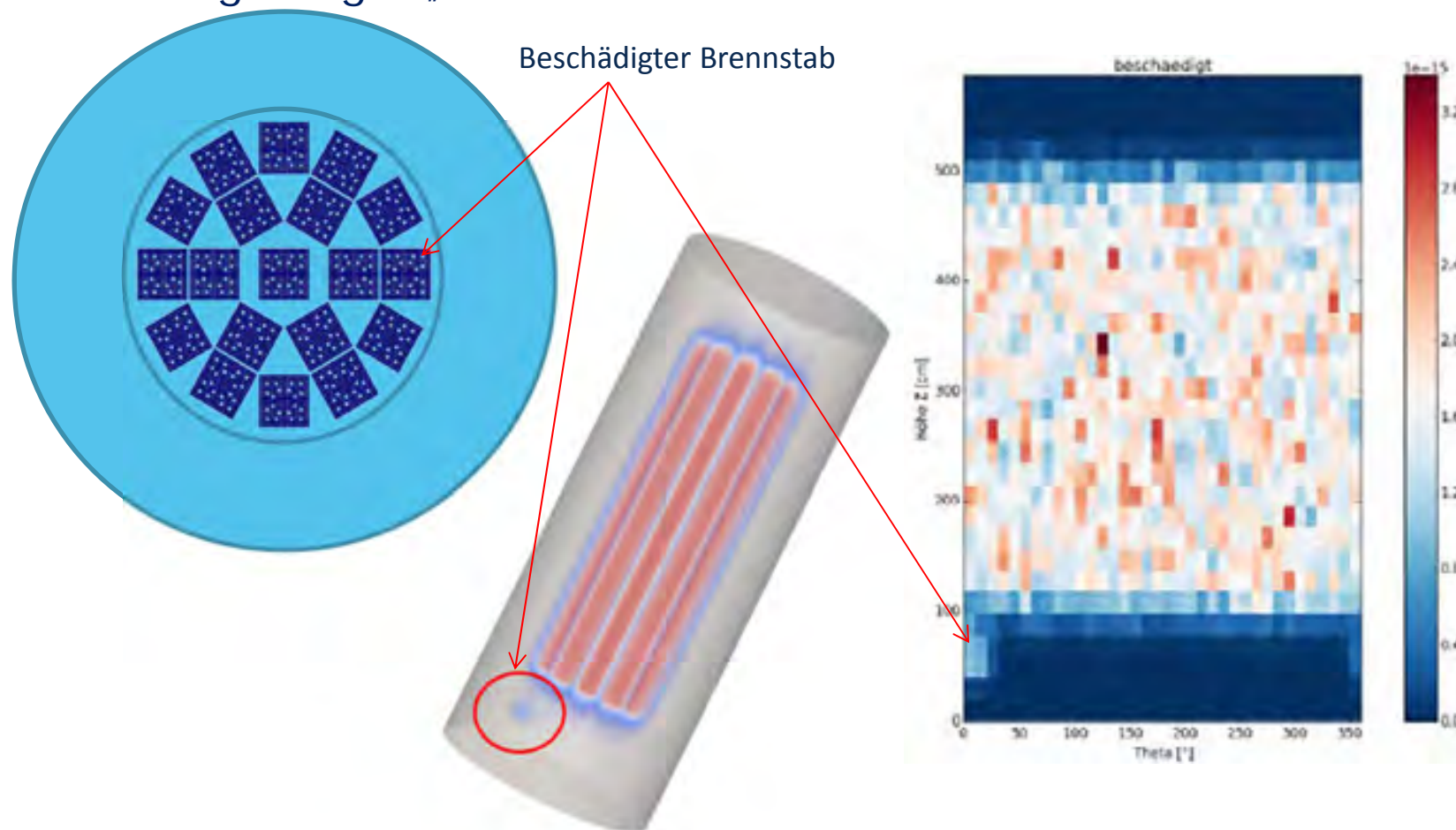
Monte-Carlo-Simulation (γ , n , μ)



- Statistische Lösung der Boltzmannschen Strahlungstransportgleichung
- Berechnung der spektralen raumwinkelbezogenen Strahlungsflussdichte für gegebene Behältergeometrie und Quellverteilung (Brennelemente, Nuklidvektor gemäß Abbrand)
- Ermittlung der Strahlungsflussdichte an virtuellen Detektoren

Strahlungsemissionsanalyse

Inventarverlagerung – „Naive“ MCNP-Studie



Thermographie

Prinzip:

- Räumlich aufgelöste Vermessung des Oberflächentemperaturfeldes
- Rückschluss auf interne Wärmequellenverteilung = Brennstoffinventarverteilung

SWOT

- ☺ Konzeptionell einfache Umsetzung
- ☺ Vergleichsweise kurze Messzeiten
- ☹ Abnehmende Leistung der Wärmequelle
- ☹ Diffusive Wäremausbreitung durch Behälterwand mindert räumliche Auflösung

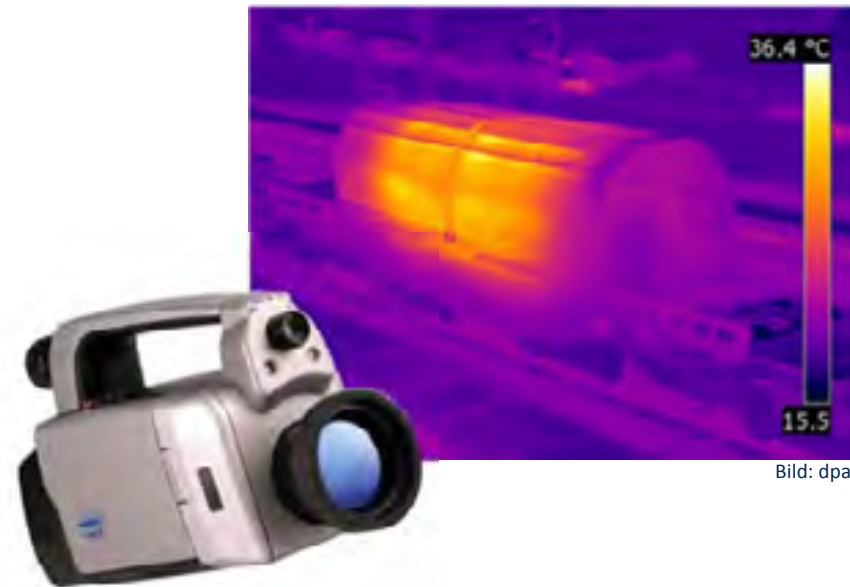
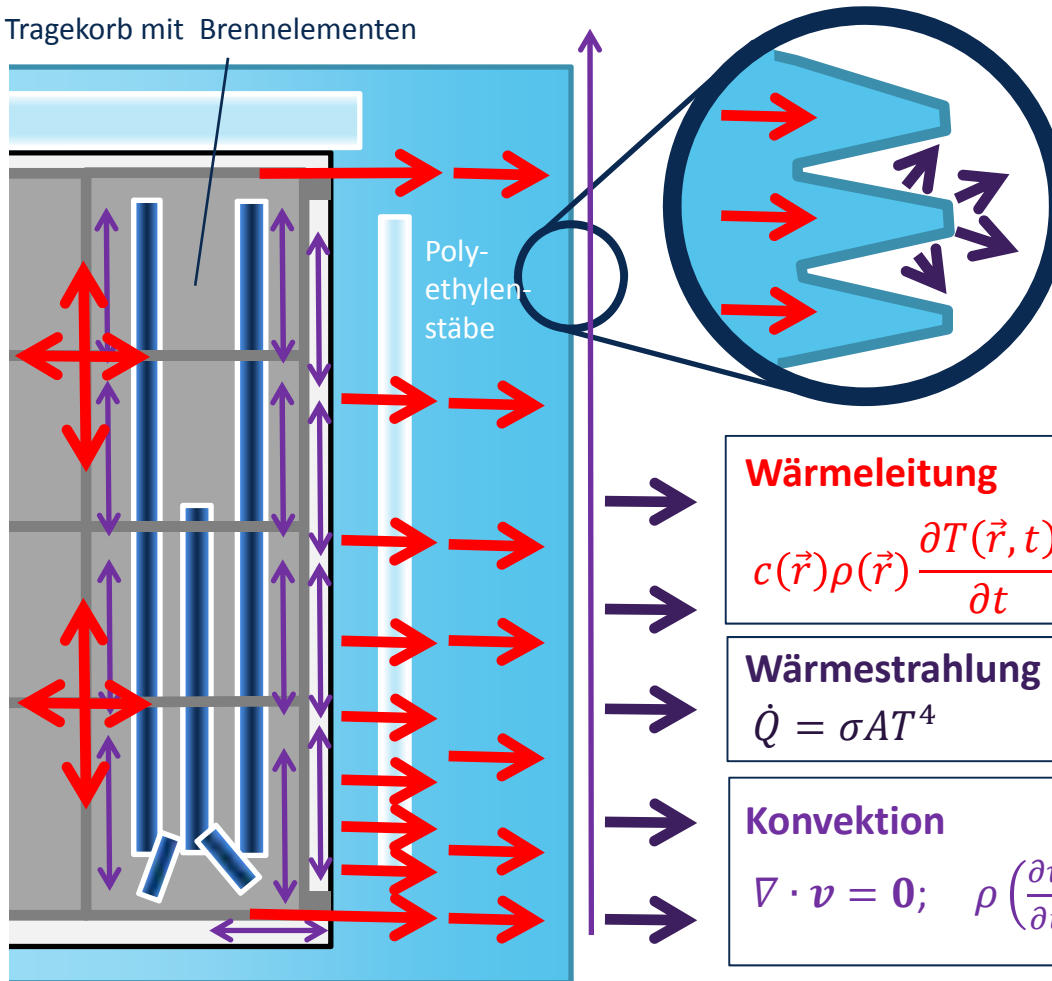


Bild: dpa

Thermographie

Tragekorb mit Brennelementen



Wärmeleitung

$$c(\vec{r})\rho(\vec{r}) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda(\vec{r})\nabla T(\vec{r}, t)] + \dot{q}(\vec{r})$$

Wärmestrahlung

$$\dot{Q} = \sigma AT^4$$

Konvektion

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \quad \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f}$$

Thermographie

Modellierung und Simulation

Wärmeleitung:

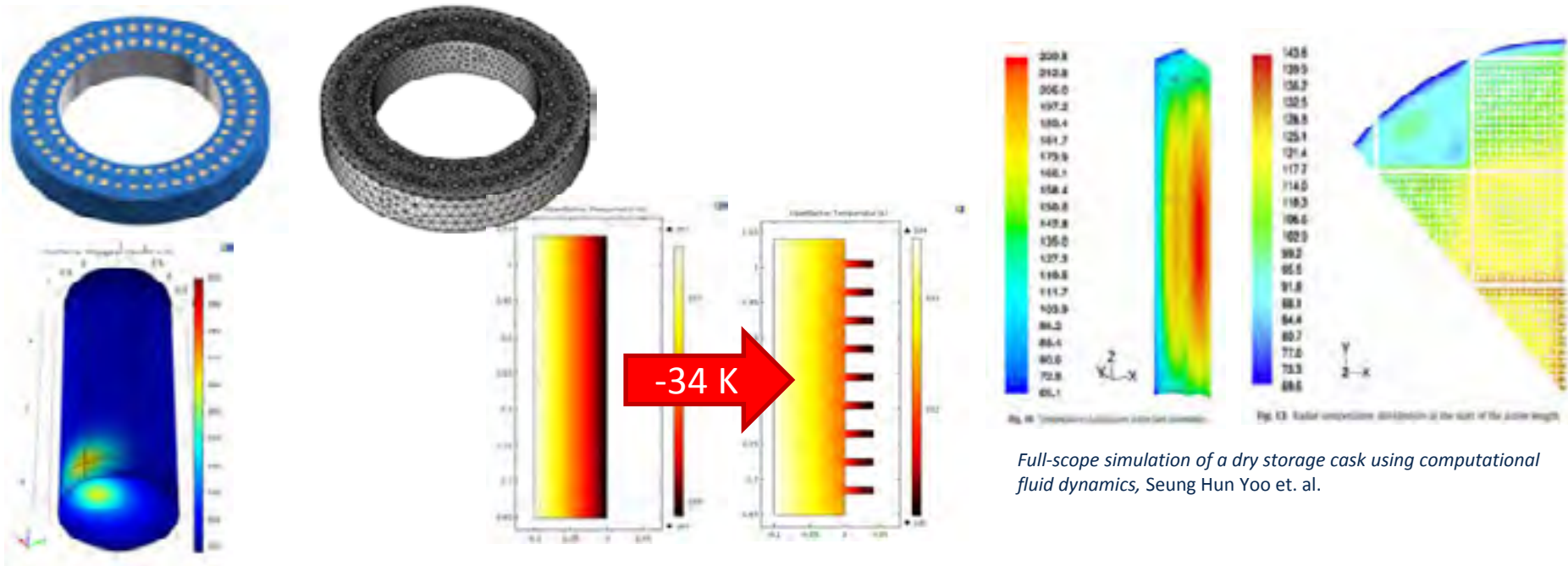
Simulation der diffusiven Wärmeausbreitung in Festkörpern mittels FEM

Wärmestrahlung:

Einstellung über Randbedingungen für den Wärmeübergang

Konvektion:

Wesentlicher Beitrag; Berechnung durch CFD-Simulation

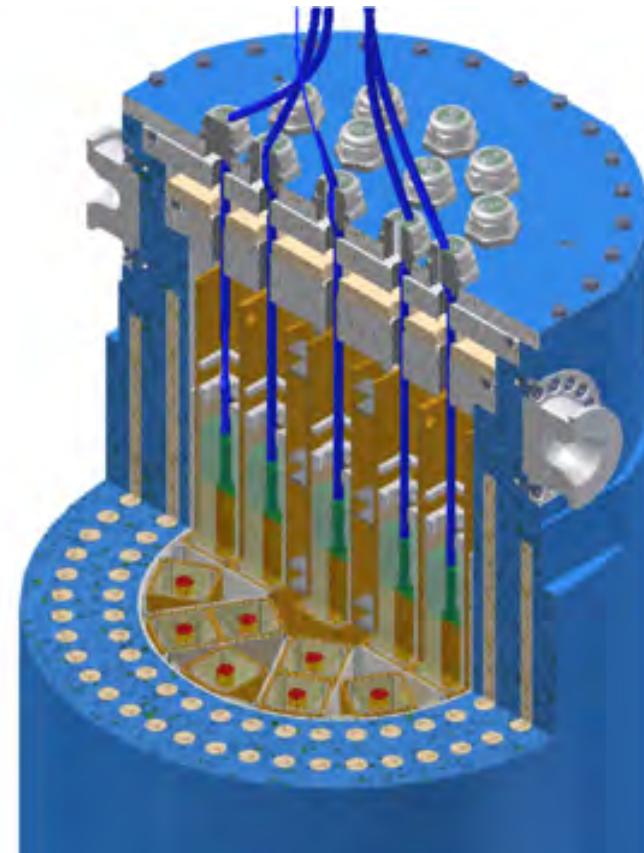
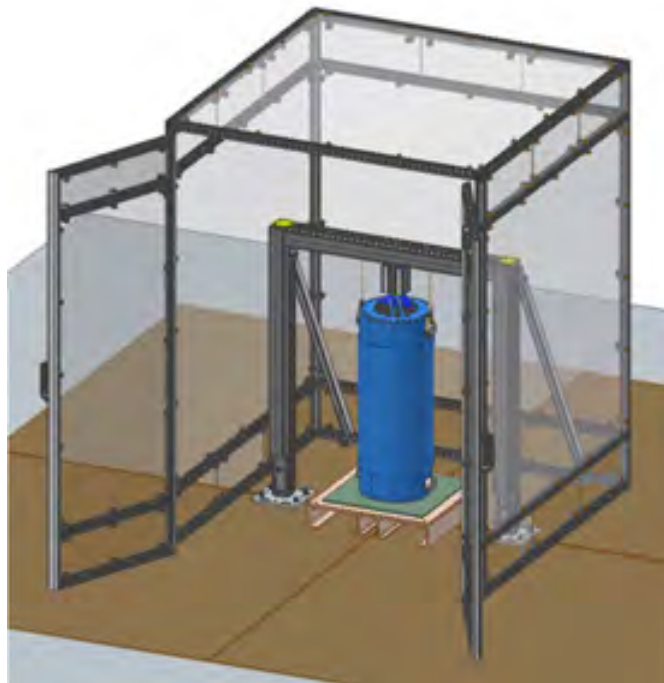


Full-scope simulation of a dry storage cask using computational fluid dynamics, Seung Hun Yoo et. al.

Thermographie

Experimentelle Studien

Skaliertes Behältermodell Maßstab 1:7,4
Individuell beheizte BE-Dummies



CAD-Modell

Myonenbildung

Was sind Myonen?

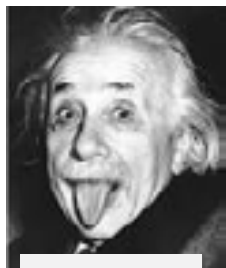
- Das Myon als Elementarteilchen = „schwerer Bruder“ des Elektrons ($m_{my} = 207 \times m_{el}$)
- Entsteht bei Hochenergie-Kernreaktionen (>106 MeV), zum Beispiel bei Kollision von Sonnenwind-Protonen mit Atomkernen in der oberen Atmosphäre (kosmische Myonen)
- Fluenz kosmischer Myonen ~ 1 Myon pro $\text{cm}^2 \text{sr}^{-1}$ und Minute

Wofür sind Myonen bekannt?

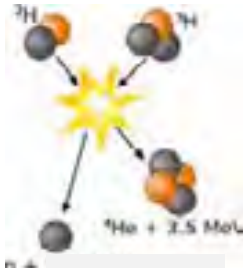
- Indiz für Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie
- Myonenkatalysierte (kalte) Kernfusion
- Bildgebung für große Objekte (z.B. Pyramiden, Vulkane, Reaktoren)



Tanaka
Magmakammern
2007



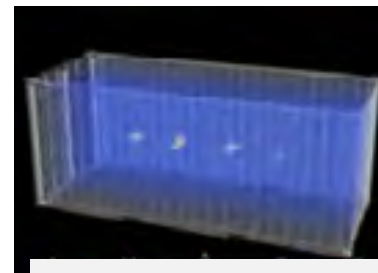
Einstein
Spezielle RT
1905



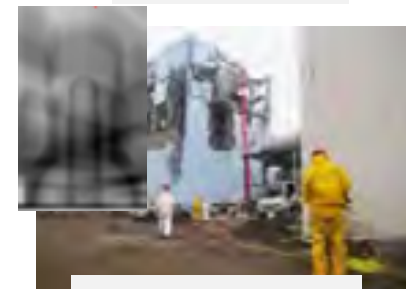
Sacharow
Kalte Fusion
1948



Alvarez
Chephren-Pyramide
1969



Borozdin
Nuclear Material Detection
2003



Mizokami
Fukushima-Reaktoren
2015

Myonenbildung



<http://scilog.spektrum.de>

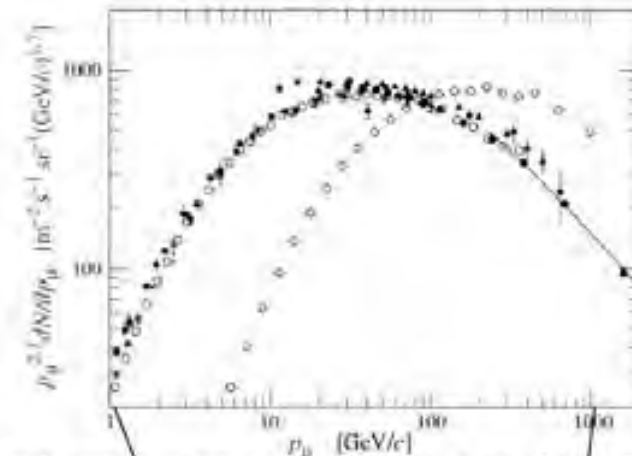
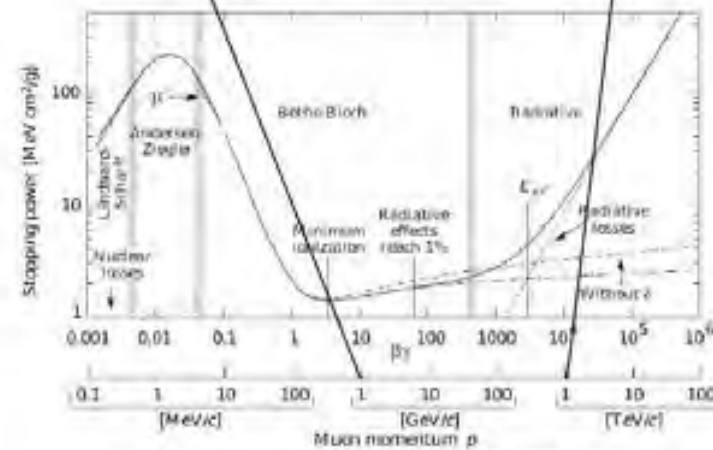


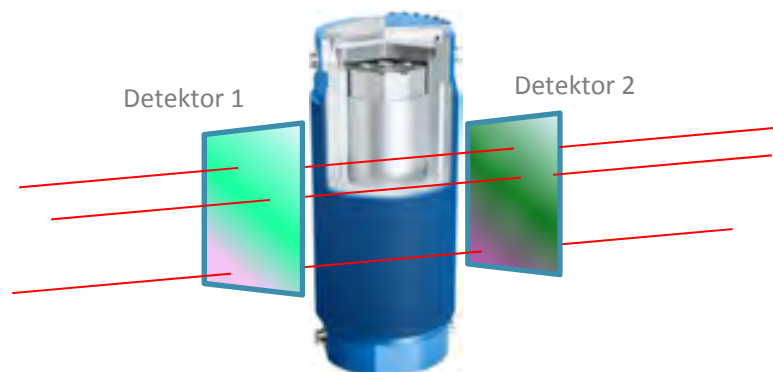
Figure 24.4: Spectrum of muons at $\theta = 0^\circ$ (\blacklozenge [43], \blacksquare [46], \blacktriangledown [47], \blacktriangle [48], \circ [43], \circ [44], and \bullet [45] and $\theta = 75^\circ$ \circ [49]).



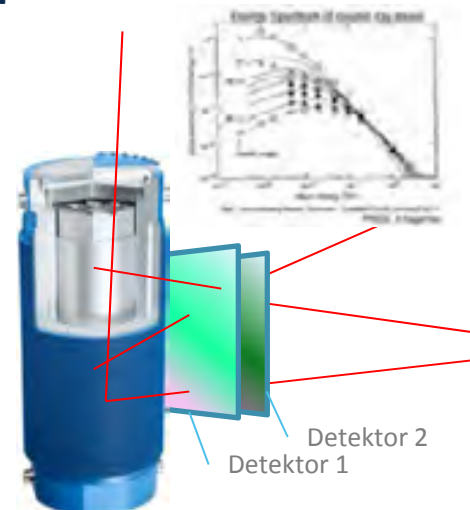
K. Nakamura et al. (PDG), JP G 37, 075021 (2010)

Myonenbildgebung

Prinzip 1: Koinzidenz-Transmissionsmessung



Prinzip 2: Koinzidenz-Streumessung



SWOT

- ☺ Bilder aus den Behältern!
- ☺ Keine künstliche Strahlenquelle erforderlich
- ☺ Keine Strahlenschutzmaßnahmen
- ☹ Längere Messzeiten (Myonen-Fluss)
- ☹ Komplexe Brennstoffverteilung

Akustische Spektroskopie

Prinzip 1: Akustische Berstriss-Spektroskopie

- Berstrisse an Hüllrohren führen zu charakteristischen Schallemissionen
- Akustische Aufzeichnung von „Geräuschen“ aus dem Behälter und Identifizierung von Berstereignissen
- Laufzeitmessung zur Lokalisierung

SWOT

- ☺ Hohe Sensitivität
- ☺ Einfache Umsetzung
- ☹ Aussagekraft bzgl.
Kernbrennstoffverlagerung?



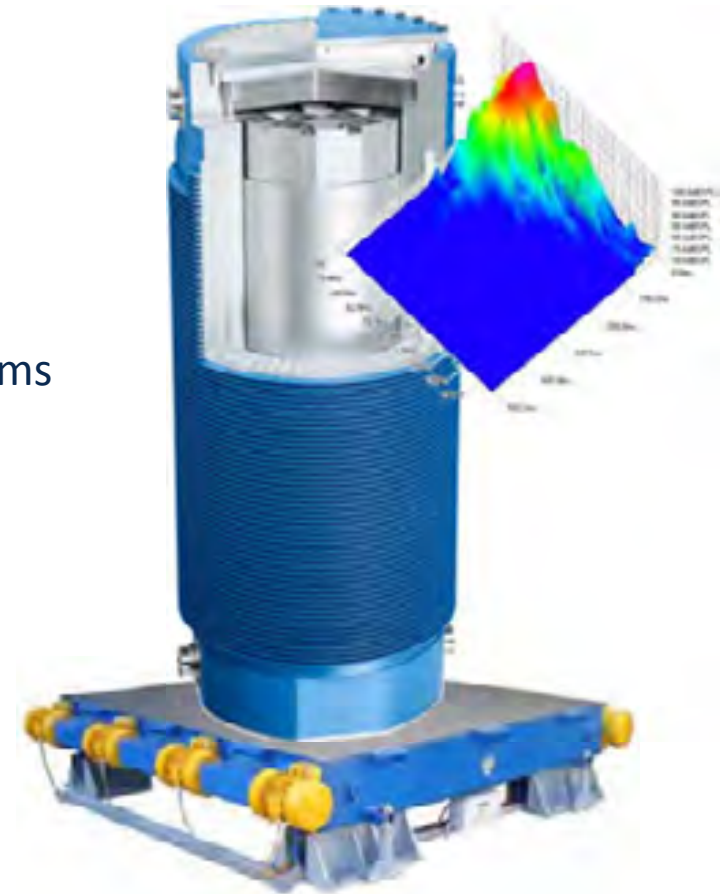
Akustische Spektroskopie

Prinzip 2: Mechanische Schwingungsspektroskopie

- Mechanische Anregung von Resonanzschwingungen der Brennelemente
- Akustische Aufzeichnung des Körperschalls
- Erkennung von Veränderungen des Schwingungsspektrums mittels Softcomputing-Methoden

SWOT

- 😊 Aussagen über mechanische Eigenschaften des Behälterinventars möglich
- 😊 Bereits zur Überwachung von Kernreaktoren im Betrieb genutzt
- ☹️ Handling, Akzeptanz?



Akustische Spektroskopie

Experimentelle Studien

Berstcontainer für Berstexperimente
mit Sicherheitsfilter, Sonderhalterung und Adaption
Kompressor mit Filteranlage (bis 400 bar)
Druckregler, Proportionalventil, Schnellschlussventil
Drucksensoren, Prüfmanometer, etc.



Testhüllrohr für Berstversuche

Körperschallsensor EA 30 Typ S



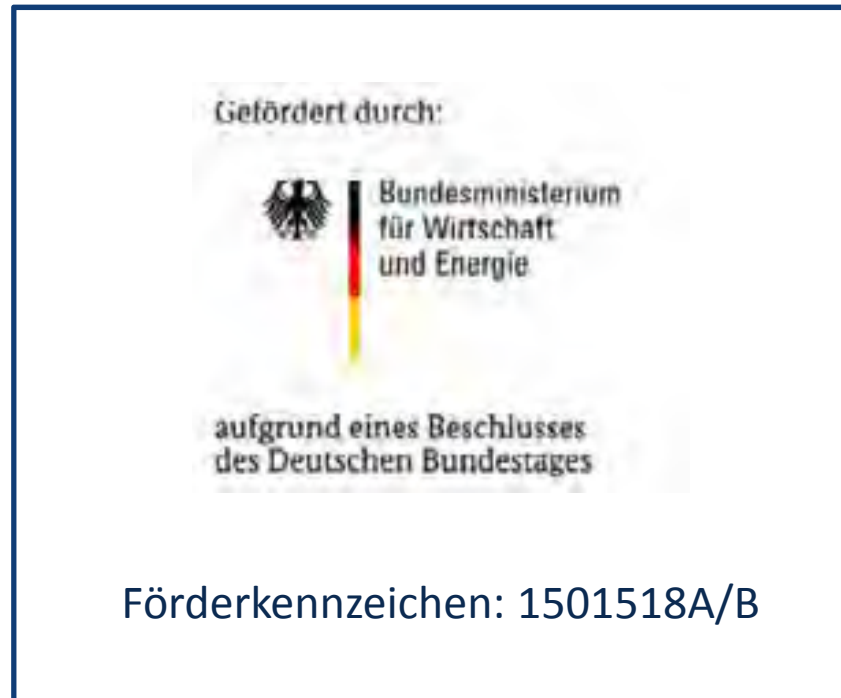
SCF-2 Serie Panel/Basic



Zusammenfassung

- Das Monitoring des Inventars von Transport- und Lagerbehältern im Trockenlager ist für die verlängerte Zwischenlagerung von hohem Interesse.
- Wegen der hohen Wandstärke der Behälter kommen nur wenige nichtinvasive Prüfverfahren in die engere Auswahl.
- Die Tolerierbarkeit längerer Messzeiten ist dabei vorteilhaft.
- Es handelt sich derzeit um Grundlagenforschung zur Analyse der MACHBARKEIT mit experimentellen und numerischen Methoden.
- Erste Ergebnisse in Kürze!

Vielen Dank!



Abstract: „Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle“ (EXPANDER)

Von Hanns-Maximilian Schmidt, Dr. rer. pol. Marcus Wiens und Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Die jahrzehntelange Nutzung der Nuklearenergie stellt Politik, Wirtschaft und Gesellschaft vor das bis heute ungelöste Problem der Endlagerung des radioaktiven Abfalls. Entscheider auf allen Ebenen sind angesichts des extremen Planungshorizonts, der Vielzahl der involvierten Gruppen und der technischen Planungsunsicherheit vor eine besondere Herausforderung gestellt. Das Ziel des Projekts EXPANDER ist es, die Herausforderungen der Allokation dauerhafter Gefahrgüter über wirtschaftswissenschaftliche Laborexperimente besser zu verstehen, Ansätze für eine Lösung dieses gesellschaftlichen Dilemmas zu identifizieren und (wirtschafts-)politische bzw. strategische Empfehlungen abzuleiten. Zu diesem Zweck wird ein gemischt-methodischer Ansatz verfolgt, in dem qualitative Stakeholder-Befragungen die Basis für eine spieltheoretische Modellierung und experimentellen Überprüfung bilden. Ausgewählte Gesprächsergebnisse sowie der Forschungsansatz wurden in der Präsentation auf dem 12. Projektstatusgespräch näher vorgestellt.

Das daraus abgeleitete Entscheidungsmodell basiert auf dem Grundprinzip des sogenannten Ultimatumspiels (Rubinstein 1982). Dieses wurde an Entscheidungen über die Verteilung risikobehafteter Stoffe in einer Gruppe angepasst. Drei Spieler mit einem Anfangsguthaben von jeweils 100 Geldeinheiten werden dabei jeweils einem fiktiven Lager zugeteilt. Diese werden über unterschiedliche Kosten für die Lagerung des riskanten Stoffes beschrieben. Ein zufällig ausgewählter Spieler muss dann den anderen Spielern einen Vorschlag unterbreiten, welcher Spieler den Stoff, der bei der Lagerung für den ausgewählten Spieler Kosten verursacht, aufnehmen soll. Die anderen Spieler können dieses Angebot annehmen, das heißt, der gewählte Spieler nimmt den Stoff auf und trägt sämtliche Kosten selbst, oder ablehnen. Lehnen sie ab, erfolgt die Lagerung an einem öffentlichen Lager, welches die höchsten Kosten verursacht, die von allen Spielern gleichzeitig getragen werden müssen. Es besteht also erheblicher Kostendruck hinsichtlich der Akzeptanz des Lagers. Dieser Druck lässt von rationalen Spielern erwarten, dass (1) jeder Vorschlaggeber den Stoff einem anderen Spieler zur Aufnahme vorschlagen wird – unabhängig davon, ob er selbst einen günstigen oder teuren Standort besetzt. Aus denselben Überlegungen kann erwartet werden, dass (2) jeder reagierende Spieler jedes Angebot annimmt.

In der experimentellen Umsetzung im November 2016 nahmen Studierende des KIT die Plätze der Spieler ein. Die Analyse zeigt, dass die Erwartungen an die Rationalität (im Sinne eines *Homo oeconomicus*) in diesem einfachen Szenario nicht immer erfüllt werden. Während die Akzeptanzrate der Angebote bei beinahe 95 Prozent liegt und die letztgenannte Hypothese unterstützt, zeigt sich, dass die Vorschlaggeber sehr wohl Unterschiede zwischen den Standorteignungen machen: so erfolgte eine Mehrheit der Angebote an Spieler an Standorten, die niedrigere Lagerkosten aufweisen – auch dann, wenn der Vorschlaggeber dabei selbst betroffen ist. Ohne Notwendigkeit nahmen die Hälfte aller Vorschlaggeber eigene Kosten in Kauf, um eine für die gesamte Gruppe effiziente Lösung zu ermöglichen. Dieses Phänomen wird in den weiteren Arbeiten genauer analysiert sowie weitere Variationen des Spiels (bspw. mit Kommunikation) modelliert und experimentell überprüft.

Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (EXPANDER)

Hanns-Maximilian Schmidt, Dr. rer. pol. Marcus Wiens, Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Forschungsgruppe Risikomanagement
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)



Inhalt

- 1. Motivation und Forschungsfragen**
2. Methodik und Vorgehen
3. Ausgewählte Ergebnisse der Interviews
4. Modellierung und experimentelle Überprüfung
5. Ausblick

Ultralanglebige Investitionen übersteigen den Planungshorizont des Entscheiders



Talsperre Weiterswiese, in Betrieb seit 1930

Entscheidungen für Projekte, deren Folgen über **mehrere Generationen** hinweg spürbar sind

Risikopräferenzen über die Zeit?
Rationalität?
Irreversibilität?
Robuste Entscheidungen? Art der Diskontierung?

Wie können **Langfristexternalitäten** internalisiert werden?

Marktmechanismen?
Eigennutz vs. Wohlfahrt?
Nachhaltigkeit?
Rechtliche Grundlagen?



New York Subway, eröffnet 1904

Ein ungelöstes Problem...

- Die Endlagerung als besonderes Problem **ultralanglebiger Investitionen**
 - Zahlreiche **Stakeholder** involviert
 - **Mehrere potentielle Standorte**
 - Deutscher Atomausstieg **in Europa einmalig**
 - **Besondere Gefährdung** im Falle eines Unfalls
 - **Stigmatisierung** durch Unfälle in anderen Industriestaaten (Fukushima etc.)



Kernkraftwerk Obrigheim, seit 2005 abgeschaltet

- **Wie kann das Koordinationsproblem beschrieben werden?**
- **Welche Anreize können gesetzt werden, um die Lösung zu unterstützen?**

Forschungsfragen

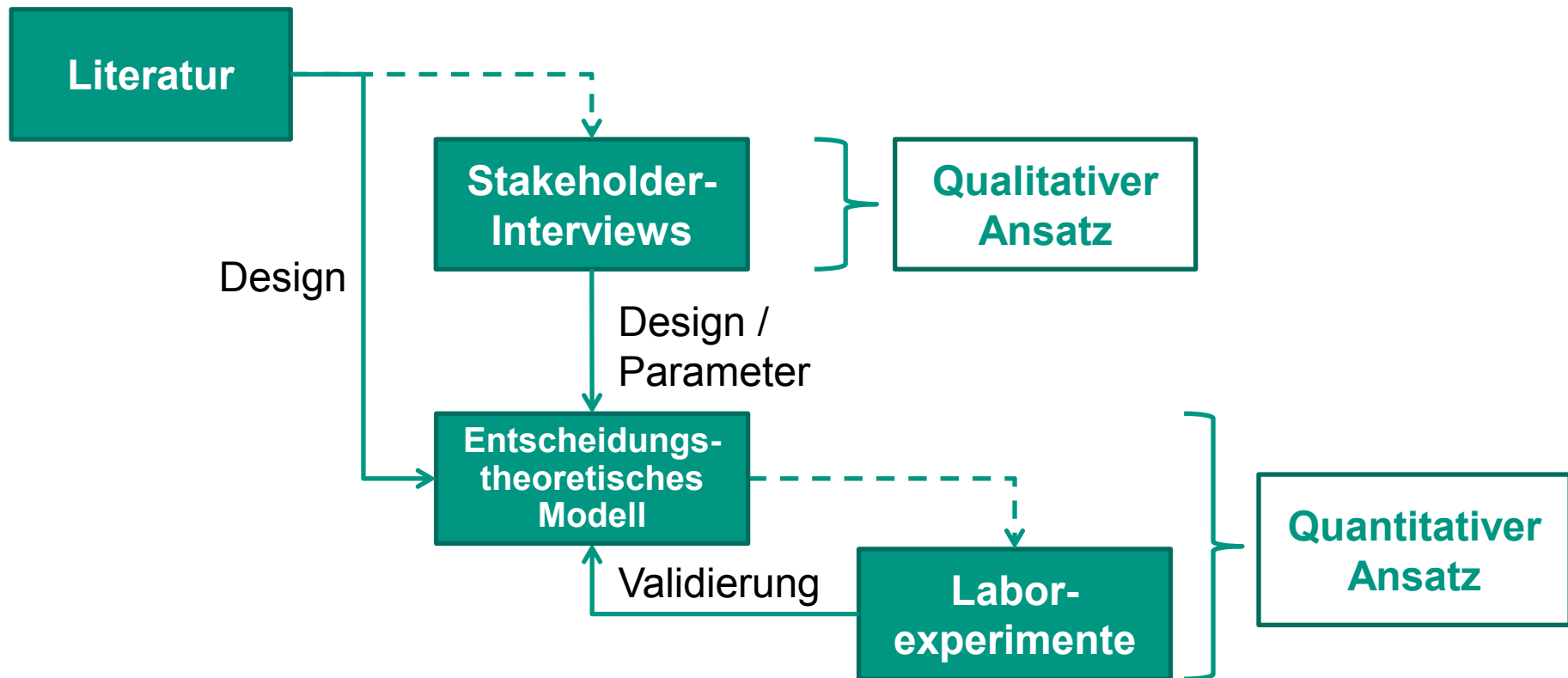
- Welche kontextspezifischen **Effekte** erschweren die Konsensfindung?

- Gibt es (**Markt-)Mechanismen**, die zur Lösung beitragen können?
 - Welche Rolle spielt die Verhandlungsform (bspw. Bürgerbeteiligung)?
 - Expertenurteile
 - Risikotransfer über den Markt
 - Größe der Gruppe beteiligter Akteure, Präferenzen über die Zeit

Inhalt

1. Motivation und Forschungsfragen
- 2. Methodik und Vorgehen**
3. Ausgewählte Ergebnisse der Interviews
4. Modellierung und experimentelle Überprüfung
5. Ausblick

Auf Basis semi-strukturierter Interviews wird ein entscheidungstheoretisches Modell entwickelt und überprüft



In der experimentellen Wirtschaftsforschung wird die „Rationalität“ eines Entscheiders auf die Probe gestellt

■ Vorgehen

- Bestimmung eines **Designs** (Mechanismus)
- Probanden (Studierende) **interagieren** am Computer
- **Leistungsabhängige Auszahlung**

■ Umsetzung im **KD2lab** des KIT

■ Breites Anwendungsfeld

- Öffentliche Güter
- Marktregeln (Preisabsprachen)
- Marktdesign (Auktionen, CO2-Börsen)
- Entscheidungstheorie, effiziente Mechanismen (Organspenden)



Inhalt

1. Motivation und Forschungsfragen
2. Methodik und Vorgehen
- 3. Ausgewählte Ergebnisse der Interviews**
4. Modellierung und experimentelle Überprüfung
5. Ausblick

Interviewkonzept und Durchführung

- Vorbefragung (schriftlich)

- Interviewleitfaden mit 5 Abschnitten
 - Offene Erzählung
 - **Eigenes Erleben**
 - Sichtweise der vertretenen **Institution**
 - Wünsche / Forderungen an **andere Stakeholder**
 - Offene Ergänzungen

- Auswertung mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach *Philipp Mayring*
 1. **Transkription** der Interviewaufnahmen
 2. Mehrmaliges **Lesen** der Texte
 3. Ausarbeitung eines **Kodierleitfadens**
 4. **Einordnung** der Textstellen
 5. Interpretation

Die Befragten

- **Phase 1: I/2016** – Stakeholdergruppen aus **Endlagerkommission**
 - EVU - 7 Befragte
 - (Ingenieurs-) Wissenschaft - 5 Befragte
 - Nichtregierungsorganisationen - läuft noch
 - Politische Parteien (ausgewählte Vertreter) - 5 Befragte
 - Gewerkschaften - 2 Befragte

- **Phase 2: II/2016** – Betroffene / organisierte **Bürgerinnen und Bürger**
 - Bürgerinitiativen - 4 Befragte

- **Phase 3: I/2017** – Diskussion der Ergebnisse in **Expertengesprächen**
 - Experten aus unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen, Ländern etc.

Die Gespräche wurden über einen Kodierleitfaden ausgewertet

Typische Kategorien:

- **Vergangene Entscheidungen** und Ereignisse
- **Einflussgefüge** (Verhältnis der Stakeholder zueinander)
- Wünsche und **Forderungen**

Kodierleitfaden

	Kategorienname	Beschreibung	Ankerbeispiel	Codierregel
OK 1	Vergangenheit	Alle Vorgänge und Aspekte der Endlagersuche welche bereits zur Gänze abgeschlossen sind.		Als Beispiel handelt sich beim AKEnd um ein abgeschlossenes Vorgehen. Die Endlager-suchkommission ist noch kein abgeschlossener Schritt.
UK 1.1	Problematik	Widerstände, Konflikte und Probleme die in der Vergangenheit aufgetaucht oder entstanden sind	„...das ist nach meinem Empfinden, der große Webfehler, sag ich mal im Atomgesetz seit vielen Jahrzehnten schon...“	
UK 1.2	Schlüsselmomente/ Wendepunkte	Ereignisse aus der Historie der Endlagersuche und der Kerntechnik, welche von den Befragten thematisiert wurden.	„...ja ein Schlüsselmoment war auch im Zusammenhang mit der Atomgesetzänderung, dass uns die Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle, wo wir auch ein zentrales Zwischenlager in Gorleben haben, dass uns das [...] auch einfach mal so weggenommen worden ist.“	

Exemplarische Antworten zu einzelnen Kategorien

Stigmatisierung:

- „Wir reden alle bisher immer noch so: ‚am Ende trifft es eine Region‘ und da glaube ich, muss ein anderes **Wording** rein, also das dürfen nicht die Verlierer sein, die es am Ende haben, sondern sie müssen hoch wertgeschätzt werden.“ (P5, 56-56)

Fairness:

- „Wir möchten endlich mal für das, wofür wir bezahlt haben, auch eine **Gegenleistung** bekommen.“ (EVU1, 46)

Partizipation:

- „Beteiligung ist das eine und das andere [ist,] wie sehr darf die **Öffentlichkeit** ein **Veto** einlegen. Darf die Region sagen, ‚nein, wir wollen das nicht‘ und dann wird’s nicht gebaut? Da gibt’s unterschiedliche Sichtweisen.“ (W4, IT-F4, 98-98)

Kommunikation:

- „Jetzt versuchen wir mit dem Verfahren eigentlich eine breite Öffentlichkeit herzustellen, [] damit es sozusagen eine neue Art von **Vertrauensbildung** gibt in dem Verfahren.“ (P2, 8-8)

Entscheidungskriterien:

- „Das Wirtschaftsministerium, das einfach völlig andere Grundsätze in der Politik zugrunde legt. Da geht es um Effizienz und Wirtschaftlichkeit. [] Das sind nicht die **richtigen Grundsätze** für eine Endlagersuche.“ (P5, 56-56)

Zusammenstellung exemplarischer Aussagen über den Auswahlprozess

	... über den Auswahlprozess
Politik	<ul style="list-style-type: none"> (1) Intransparenter Prozess bislang (unzureichende Kommunikation) (2) Politische Durchsetzbarkeit mitentscheidend (3) Protestierende Bürger zeigten Verantwortungsbewusstsein (4) Unsachgemäße Fixierung der EVU auf Gorleben
EVU	<ul style="list-style-type: none"> (1) Kein Vertrauen in Prozess und v.a. politische Entscheidungsträger (2) Ablehnung der Nuklearenergie überlagert Diskussion um potentielle Standorte (3) Frage nach der Gegenleistung für die Finanzierung (4) „berechtigte“ und „unberechtigte“ Blockadehaltung
Bürgerinitiativen	<ul style="list-style-type: none"> (1) Zu kurzer Betrachtungshorizont („künftige Generationen übergangen“) (2) Misstrauen ggü. Studie und Auftraggeber (BMWi) bzw. Politik (3) Befangenheit einzelner Medien
Wissenschaft	<ul style="list-style-type: none"> (1) Eingriffe der Politik in Forschungsfreiheit (2) Politische Ziele dominieren Auswahlprozess (3) Einzelne Stakeholder diskriminiert (4) EVU: Intransparenz bzgl. tatsächlichem Einfluss auf Entscheidung

Inhalt

1. Motivation und Forschungsfragen
2. Methodik und Vorgehen
3. Ausgewählte Ergebnisse der Interviews
- 4. Modellierung und experimentelle Überprüfung**
5. Ausblick

Das Ziel der Experimentserie ist es, das komplexe Problem in einer abstrakten Form darzustellen und überprüfbar zu machen

- Definition eines **grundlegenden Mechanismus**
 - **Reduktion der Komplexität**
 - **Überführung in eine kontrollierte Umgebung**

- Bestimmung sog. „**Treatments**“ – Variation der Spielparameter
 - Höhe der Auszahlung
 - Wahrscheinlichkeit eines Unfalls
 - Zahl der Spieler pro Spiel
 - Zeit pro Entscheidung
 - Komplexität
 - etc.

- Wahl des grundlegenden Modells: „**Multilateral Bargaining Game**“

Multilaterale Verhandlungsspiele sind seit einigen Jahren im Fokus experimenteller Analysen

■ Ariel Rubinstein (1982):

Two individuals have before them **several possible contractual agreements**. Both have interests in reaching **agreement** but their interests are **not entirely identical**. What “will” be the agreed contract, assuming that both parties behave rationally?

Konzeptionelle Anpassungen des Modells zur Bestimmung eines Basis-Designs

- Abstraktion und Vereinfachung der realen Entscheidungssituation

Modell	Reales Problem
Gewinnerzielung	Kostenvermeidung
Aufteilung einer Summe	Aufteilung riskanter Stoffe
Einfache Umwelt	Komplexe Umwelt
Starres Verhandlungsprotokoll	Organischer Prozess der Entscheidungsfindung
...	...

- **Anpassung** des grundlegenden Modells erforderlich
- Umgebung muss kontrolliert bleiben

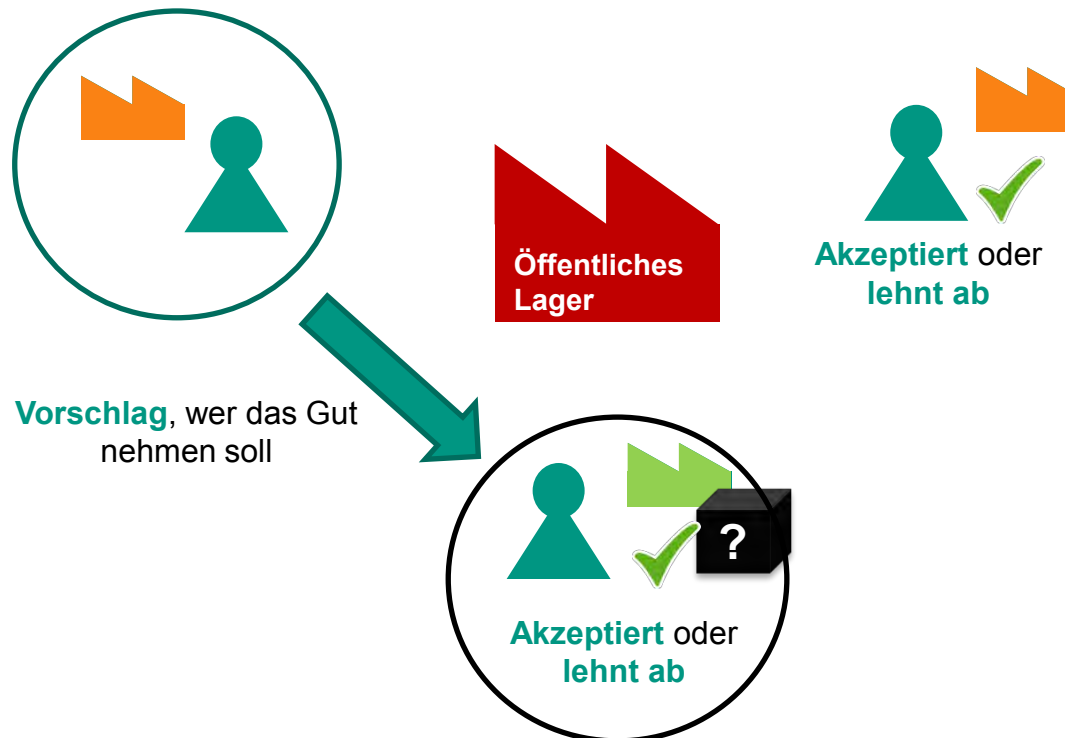
Im Basis-Setting müssen sich 3 Spieler über die Verteilung eines risikobehafteten Stoffes einig werden...



- Start: 100 Geldeinheiten (GE)



- Kosten für die Lagerung
- Zusatzkosten bei „Unfall“
- Unfallwahrscheinlichkeit: 50 %



... einigen sie sich nicht, steigen die Kosten für alle Spieler gleichermaßen



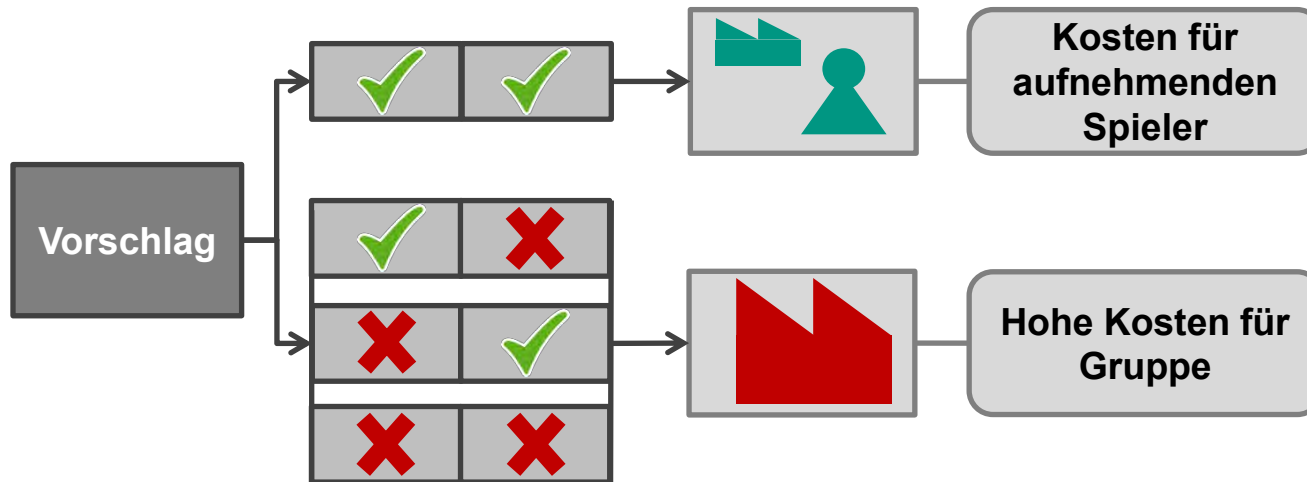
- Start: 100 Geldeinheiten (GE)



- Kosten für die Lagerung
- Zusatzkosten bei „Unfall“
- Unfallwahrscheinlichkeit: 50 %

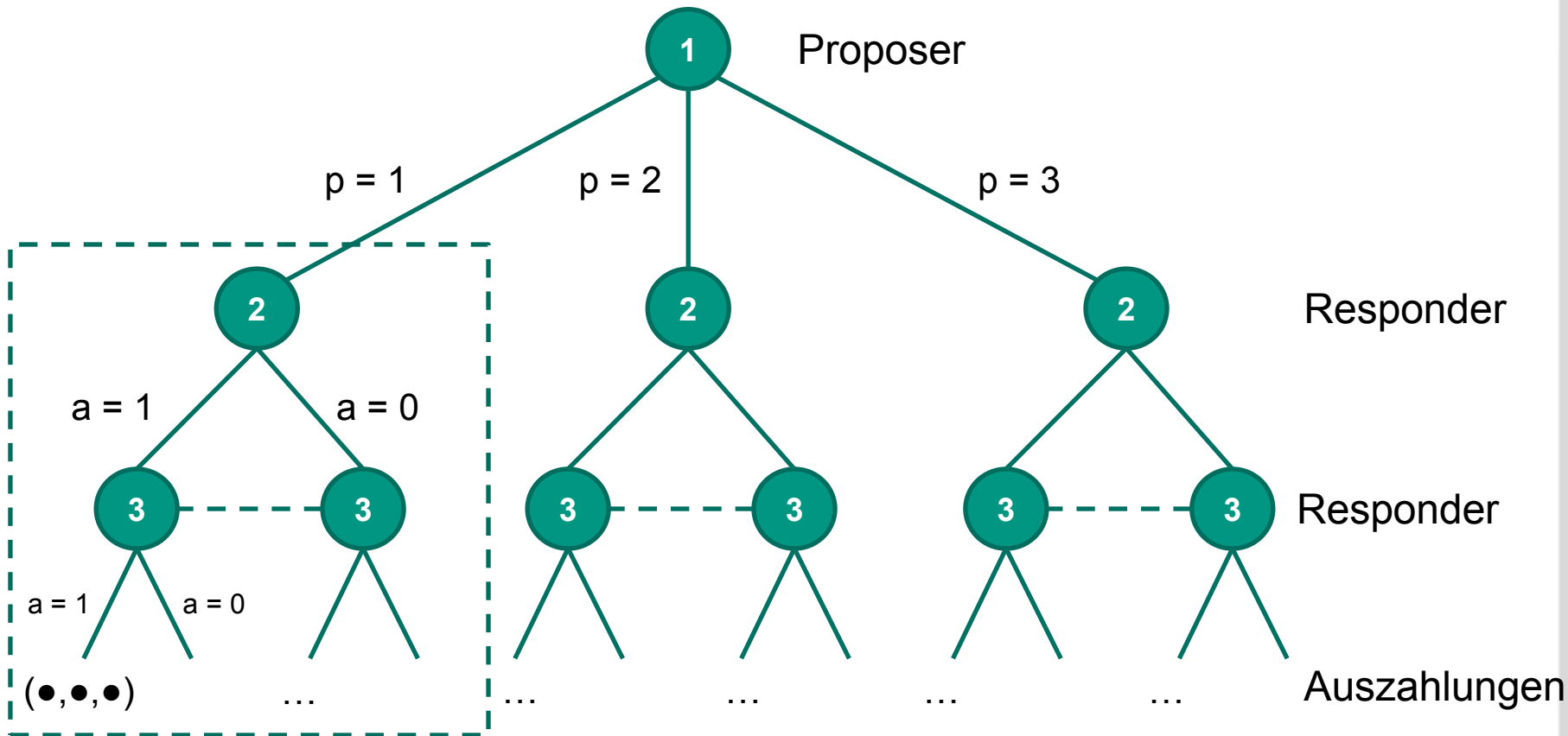


Anpassung des multilateralen Verhandlungsspiels: Anreize



Anfangsbestand: 100	Standorte 1 und 2	Standort 3	Öffentliches Lager
Lagerkosten	40	10	70
Zus. Kosten bei Unfall	20	20	20
Unfallwahrscheinlichkeit	50 %	50 %	50 %
Erwartungswert	50	80	20

Anpassung des multilateralen Verhandlungsspiels: Spielstruktur



■ Proposer (1): Strategiewahl

- Vorschlag der Zuteilung an Spieler p
- $p=1, p=2$ oder $p=3$

■ Responder (2) und (3): Strategiewahl

- „Annehmen“ ($a=1$) und „Ablehnen“ ($a=0$)
- Responder spielen simultan

Strategiewahl im Simultanspiel – Szenario 1: Bevorteilter Proposer

- Der Vorschlagende (Proposer) mit Standort geringster Kosten

Proposer wählt: Abgabe an Responder 2		Responder 2	
		Annehmen	Ablehnen
Responder 1	Annehmen	(100, 100, 50)	(20, 20, 20)
	Ablehnen	(20, 20, 20)	(20, 20, 20)

Proposer wählt: Eigene Aufnahme		Responder 2	
		Annehmen	Ablehnen
Responder 1	Annehmen	(80, 100, 100)	(20, 20, 20)
	Ablehnen	(...)	(...)

Strategiewahl im Simultanspiel – Szenario 2: Bevorteilter Responder

- Einer der Antwortenden (Responder*) mit Standort geringster Kosten

Proposer wählt: Abgabe an Responder*		Responder *	
		Annehmen	Ablehnen
Responder 1	Annehmen	(100, 100, 80)	(20, 20, 20)
	Ablehnen	(...)	(...)

Proposer wählt: Abgabe an Responder 1		Responder*	
		Annehmen	Ablehnen
Responder 1	Annehmen	(50, 100, 100)	(20, 20, 20)
	Ablehnen	(...)	(...)

Proposer wählt: Eigene Aufnahme		Responder *	
		Annehmen	Ablehnen
Responder 1	Annehmen	(50, 100, 100)	(20, 20, 20)
	Ablehnen	(...)	(...)

Im Experiment tritt ein Konflikt zwischen individueller Performance und der Performance der Gruppe auf

Proposer wählt:	Auszahlungen bei Annahme	Wohlfahrtsverlust ggü. effizienter Lösung	Wohlfahrtsverlust bei Ablehnung
	(Mittelwerte)		(20, 20, 20)
Abgabe an Responder	(100, 100, 50)	30	190
Abgabe an Responder*	(100, 100, 80)	0	220
Abgabe an Proposer	(50, 100, 100)	30	190
Abgabe an Proposer*	(80, 100, 100)	0	220

Sicht der Gruppe:

- Zuteilung an Spieler mit ungeeigneten Standort → Wohlfahrtverluste

Annahme über Rationalität:

- Rationale Proposer geben das Gut immer ab
- Rationale Responder nehmen jedes Angebot an



Gefahr des Scheiterns

Inhalt

1. Motivation und Forschungsfragen
2. Methodik und Vorgehen
3. Ausgewählte Ergebnisse der Interviews
4. Modellierung und experimentelle Überprüfung
- 5. Ausblick**

Aufbauend auf Gesprächsergebnissen werden die Einflüsse unterschiedlicher Verhandlungsparameter untersucht

■ Teilbare Einheiten

- Aktuell: Bestimmung eines Lagerortes
- Variation: Aufteilung **mehrerer Einheiten** eines Gutes

■ Framing

- Aktuell: neutrale Darstellung des Problems
- Variation 1: „**Wording**“ – Szenarioexperiment zur Endlagersuche
- (Variation 2: Bebilderung (emotionale Beeinflussung) denkbar)

■ Kommunikation

- Variation 1: **Geleitete** Kommunikation über das Senden vorausgewählter Aussagen
- Variation 2: **Offene** Kommunikation („Chat“)

■ Risikowahrnehmung

- Aktuell: Risiko durch Schadenssimulation unerheblich
- Variationen durch Anpassung der **Schiefe, Varianzen, Zeithorizonte** etc.

Aktueller Stand und Ausblick

- Aktueller Stand der **Interviews**:
 - Abschluss der ersten beiden Interviewphasen in 2016
 - **Auswertung** der Gespräche innerhalb der Gruppen

- Aktueller Stand der **Experimente**:
 - **Spieltheoretische** Beschreibung des Basis-Modells abgeschlossen
 - **Implementierung** für das Labor abgeschlossen
 - Definition der **Treatmentvariablen** auf Basis der Gesprächsergebnisse
 - **Durchführung ab November 2016**

- Ausblick:
 - **Abschließende Diskussion** der Ergebnisse mit Experten
 - **Durchführung der Experimente** bis Sommer 2017

**VIELEN DANK FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT!**

(Sicherheits-) technische Auswirkungen der Rückholbarkeit von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen auf die Endlagerauslegung in Salz- und Tongesteinsformationen

Philipp Herold, DBE TECHNOLOGY GmbH

Das Forschungsvorhaben "Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen" (ERNESTA) hat zum Ziel, die Auswirkungen der Implementierung der Auslegungsanforderung "Rückholbarkeit" in bestehende Endlagerkonzepte aufzuzeigen. Durch vertiefende Planungen der Rückholungsprozesse werden die betrieblichen und sicherheitstechnischen Auswirkungen auf die Endlagerauslegung konkretisiert, der technisch/organisatorische Aufwand aufgezeigt und die Grundlagen für eine genehmigungsreife, technische Lösung geschaffen. Für die Einlagerungsvarianten wird unter Beachtung der geltenden Sicherheitsanforderungen eine als "Re-Mining" bezeichnete allgemeine Rückholungsstrategie angewendet. Dies beinhaltet die Einlagerung der Behälter, den anschließenden Versatz der Einlagerungsbereiche und den zügigen Verschluss der Zugangsstrecken. Damit soll das passive Sicherheitssystem des Endlagers zügig aufgebaut werden. Zur Erleichterung der Rückholbarkeit oder zur Verbesserung der Bedingungen während der Rückholung können technische oder konzeptionelle Änderungen in die Einlagerungskonzepte einfließen. Wird ein Beschluss zur Rückholung gefasst, werden alle bereits verschlossenen Strecken neu aufgefahren, die Einlagerungsbereiche geöffnet, die Behälter mit geeigneter Technik zurück geholt und nach über Tage transportiert. Durch die Rückholung werden die Abfallbehälter aus dem passiven Sicherheitssystem des Endlagers zurück in die menschliche Obhut überführt.

Die Rückholung im Einlagerungskonzept der vertikalen Bohrlochlagerung entspricht im Wesentlichen einer Umkehrung des Einlagerungsvorganges. Sowohl im Salz, als auch im Tongestein können die Behälter mit der bereits im Demonstrationsversuch erprobten Einlagerungsvorrichtung aus dem Bohrloch gezogen werden. Die verbleibende technische Herausforderung stellt die Entnahme des Bohrlochversatzes (Sand) dar. Der Versatz ermöglicht die thermische Anbindung und die Einhaltung des geforderten Abstandes zwischen den Kokillen. Im Rahmen des Vorhabens ERNESTA wurde eine Machbarkeitsstudie für eine Saugkokille, kompatibel zur Einlagerungsvorrichtung erarbeitet. Das schrittweise Absaugen des Versatzes wird als technisch machbar eingeschätzt.

Bei den Einlagerungskonzepten der Streckenlagerung führt die Positionierung der Behälter direkt in den Strecken zu gesonderten technischen Herausforderungen. Im Salzgestein können die Behälter durch ein angepasstes Auffahrungsschema der Rückholungstrecken vollständig freigelegt werden. Die bisherige thermische Endlagerauslegung mit dem Ziel der dichtesten Lagerung führt aber zu teils ungünstigen Umgebungsbedingungen. Durch eine Optimierung dieser Auslegung kann der erwartete hohe technische Kühlaufwand, die zusätzlichen Kühlpausen, sowie die hohen Konvergenzen und hohen Spannungsgradienten um die Strecken reduziert und damit die Bedingungen während der Rückholung verbessert werden. Im Tongestein würde die Aufweitung des Streckenquerschnitts dagegen zu einer Überschreitung der Standfestigkeit in den Festen führen. Anstatt einer Vergrößerung der Streckenabstände und damit auch des gesamten Flächenbedarfs wird der Einsatz kleinbauender Technik zur Versatzentnahme und zum Freilegen der Behälter favorisiert. Damit ist ein Arbeiten im alten Querschnitt möglich.

Die vertiefenden Untersuchungen zeigen, dass die Auslegungsanforderung der Rückholbarkeit die Randbedingungen für die Endlagerauslegung beeinflussen. Die Rückholbarkeit steht aber nicht im Widerspruch zum Sicherheitskonzept eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Salz und Tongestein. Der vollständige Nachweis der technischen Machbarkeit und die Überführung in den Stand der Technik stehen für alle Einlagerungskonzepte noch aus.

**(Sicherheits-) technische Auswirkungen der
Rückholbarkeit von Endlagerbehältern mit
wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und
ausgedienten Brennelementen auf die
Endlagerauslegung in Salz- und
Tongesteinsformationen**

Philipp Herold

DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

philipp.herold@dbe.de

Inhalt



Übersicht zum Vorhaben ERNESTA



Vorgaben und Definitionen zur Rückholbarkeit



allgemeine Rückholungsstrategie



Technische Konzepte zur Rückholung

 horizontale Streckenlagerung im Salz

 vertikale Bohrlochlagerung im Salz

 horizontale Streckenlagerung im Tongestein

 vertikale Bohrlochlagerung im Tongestein



Rückschlüsse für neue Einlagerungskonzepte



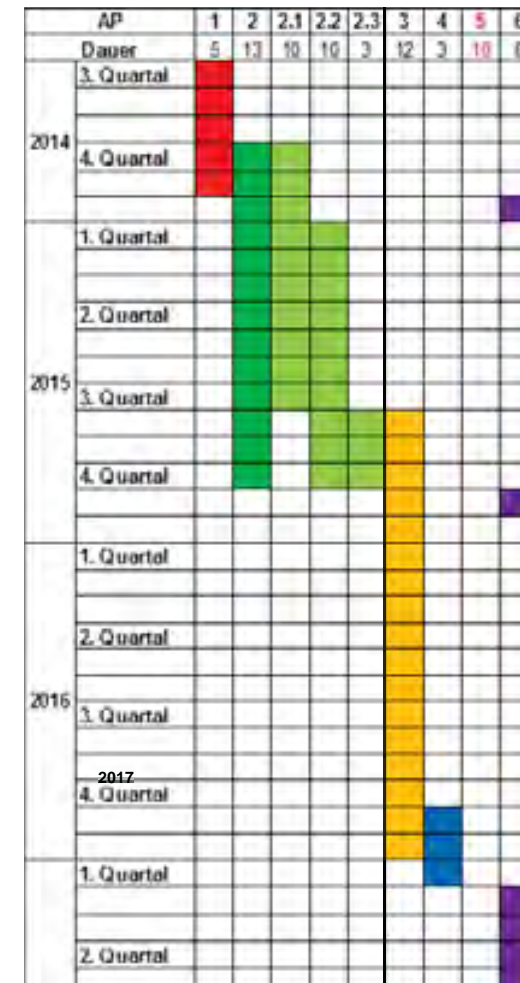
Auswirkungen der Rückholung Übertage



Zusammenfassung

Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen

- Laufzeit August 2015 bis April 2017
- Arbeitsprogramm:
 - AP1 - Konzeptübergreifende Fragestellungen
 - AP2 - Rückholung bei der Endlagerung im Salzgestein
 - AP3 - Rückholung bei der Endlagerung im Tongestein
 - AP4 - Umsetzungsplan Demonstrationsversuche
 - AP5 - Berichtswesen



== Vorgaben und Definitionen ==

- **Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe** definiert die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen mit der Option einer Rückholbarkeit der eingelagerten Behälter als Vorzugsvariante
- **“Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle”** des BMU legen Rückholbarkeit als Auslegungsanforderung und damit Genehmigungsvoraussetzung fest

Rückholbarkeit (retrievability):

„Als Rückholbarkeit wird die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet.“

(BMU 10)

Rückholung (retrieval):

„Der aktive Vorgang der Entnahme von Abfallbehältern aus dem Endlager während der Betriebszeit.“ (NEA 10)

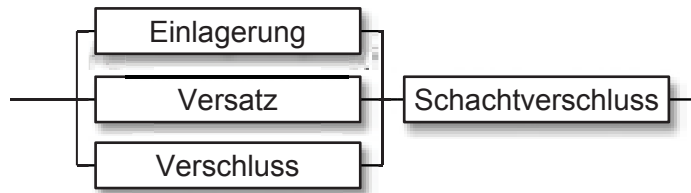
Vorgaben und Definitionen

Sicherheitsanforderungen des BMU:



Rückholbarkeit

Bergung



„In der Betriebsphase bis zum **Verschluss der Schächte** oder Rampen muss eine **Rückholung** der Abfallbehälter möglich sein.“

„Die Anzahl der offenen **Einlagerungsbereiche** ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.“

Kommissionsbericht:



Rückholbarkeit

Bergung



Etappe 3: Einlagerung und Versatz der Einlagerungsbereiche

Etappe 4: Beobachtung vor Verschluss
→ Hauptprozesse Einlagerung, Versatz und Verschluss der Strecken werden zeitlich getrennt

Etappe 5: Verschlussenes Endlager

== Rückholungsstrategie ==



- **Abfallbehälter werden aus dem passiven Sicherheitssystem des Endlagers zurück in die menschliche Obhut überführt**

“Re-mining”-Strategie:

- Einlagerung der Endlagerbehälter mit schrittweisem Versatz der Hohlräume und ggf. Verschluss der Strecken
- konzeptionelle/technische Anpassungen zur Erleichterung der Rückholung
- Gewährleistung günstiger Bedingungen im Rückholungszeitraum
- im Falle einer Entscheidung zur Rückholung:
 - Wiederauffahrung bereits verfüllter Strecken
 - Freilegen der Endlagerbehälter
 - Aufnahme mit vorhandener ggf. angepasster Einlagerungstechnik
 - Transport nach über Tage

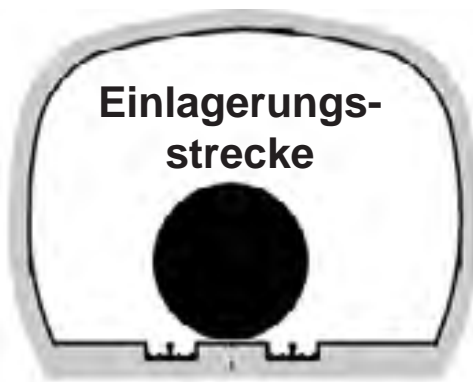
== Rückholungsstrategie ==



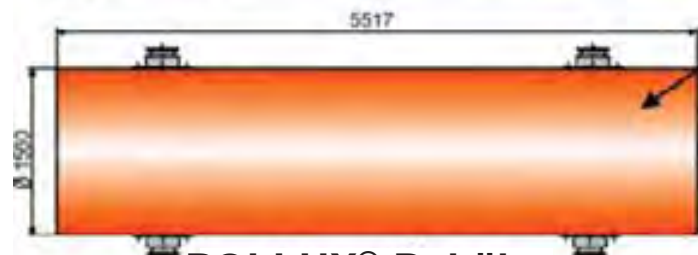
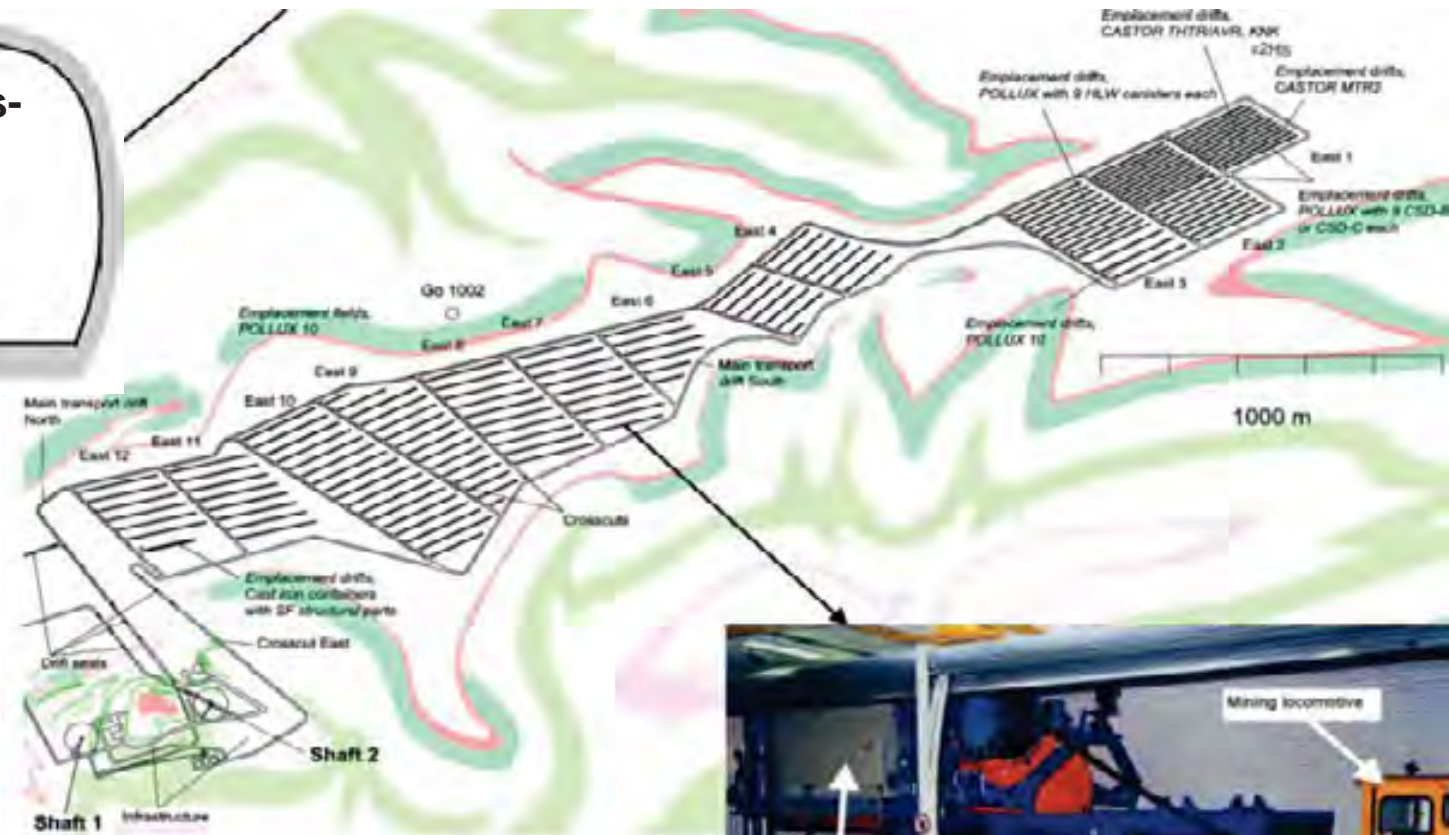
getroffene Annahmen:

- Begrenzung auf untertägige Arbeiten
- Beginn der Rückholung zum spätestmöglichen Zeitpunkt (alle Behälter sind eingelagert, versetzt und die Zugangstrecken verfüllt) → deckt Vielzahl möglicher Rückholungsszenarien ab
- Einbauten in den Einlagerungstrecken werden vor dem Versatz geraubt
- Entscheidung ob Strecken(teile) aus dem jeweiligen Strahlenschutzbereich entlassen werden wird erst in der Betriebsphase getroffen, heute keine Vorfestlegung
- Minimierungsgebot für Grubenbaue zielt auf Schutz des ewG ab und muss bei Rückholung nicht zwingend eingehalten werden (bergbauliche Sicherheitsabstände sind aber sehr wohl einzuhalten)

Streckenlagerung Salz



Behälter werden in 250 m lange Blindstrecken abgelegt

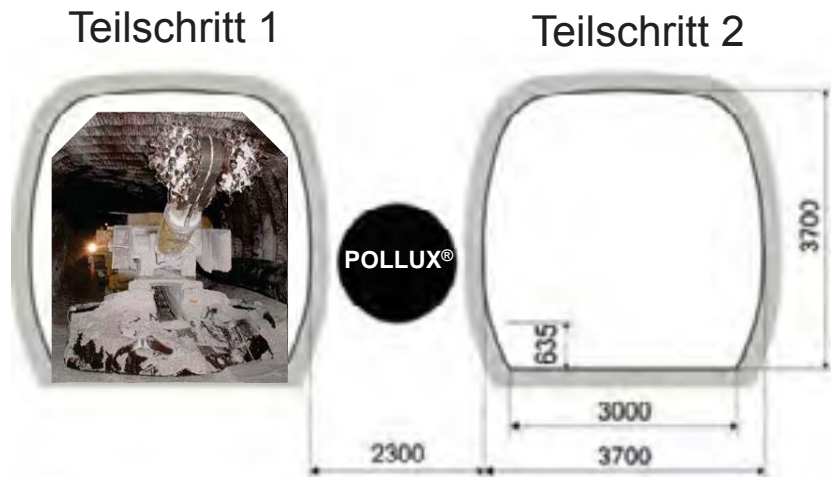


Einlagerungsvorrichtung

Streckenlagerung Salz

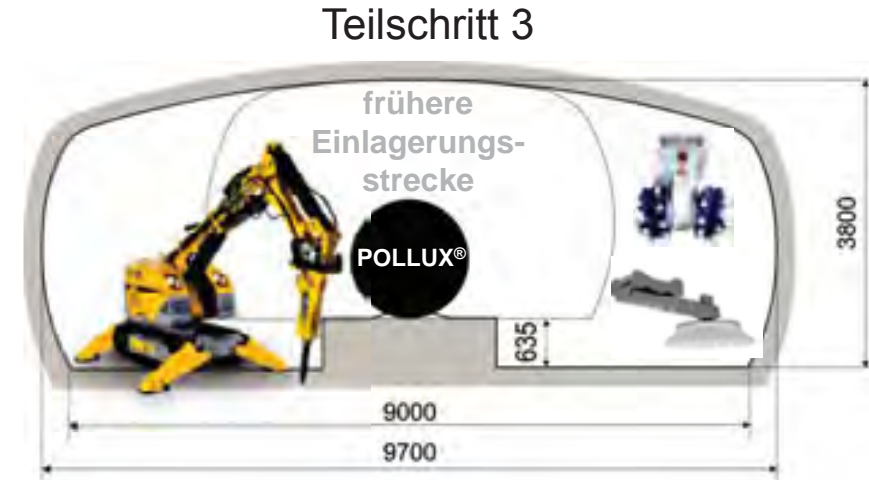


Beginn der Rückholung:



- schrittweise Auffahrung zweier Teilstrecken
- Teilstrecken parallel zu den eingelagerten POLLUX®-Behältern
- durchschlägig zwischen zwei Querschlägen

endgültige Rückholungsstrecke:



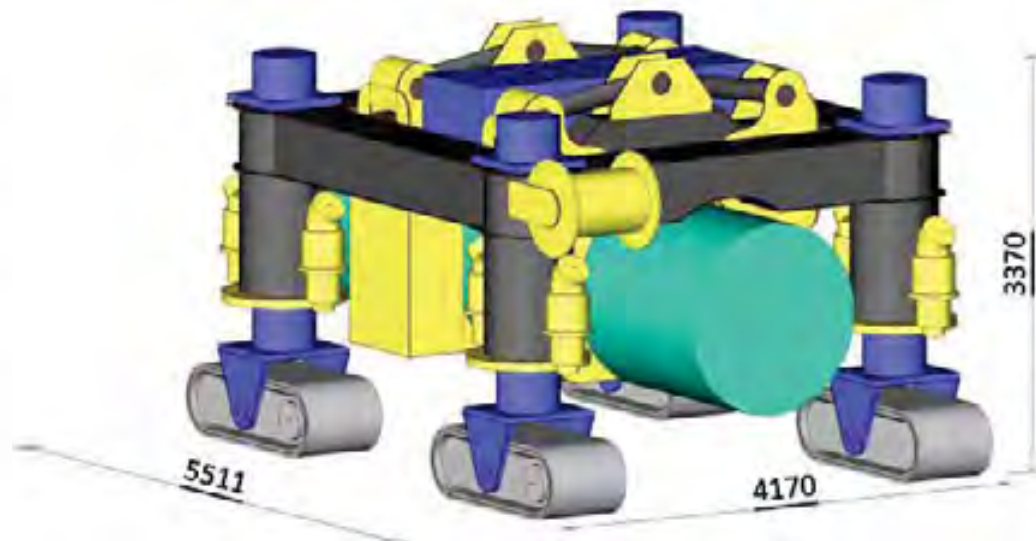
- Rückbau des verbleibenden Pfeilers und Freilegen sowie Abtransport der Behälter im Wechsel
- geräumte Strecken werden später wieder versetzt

Streckenlagerung Salz

- Rückholung ohne Neuerrichtung der Gleise in den Rückholungsstrecken
 - Selbstfahrende Vorrichtung nötig
- Nachweis zur Nutzung der Tragzapfen nach unbestimmter Einlagerungsdauer praktisch nicht führbar
 - Alternative Aufnahmevorrichtung
- POLLUX® Behälter liegt auf einem Salzsockel
 - Reduzierte Hubhöhe



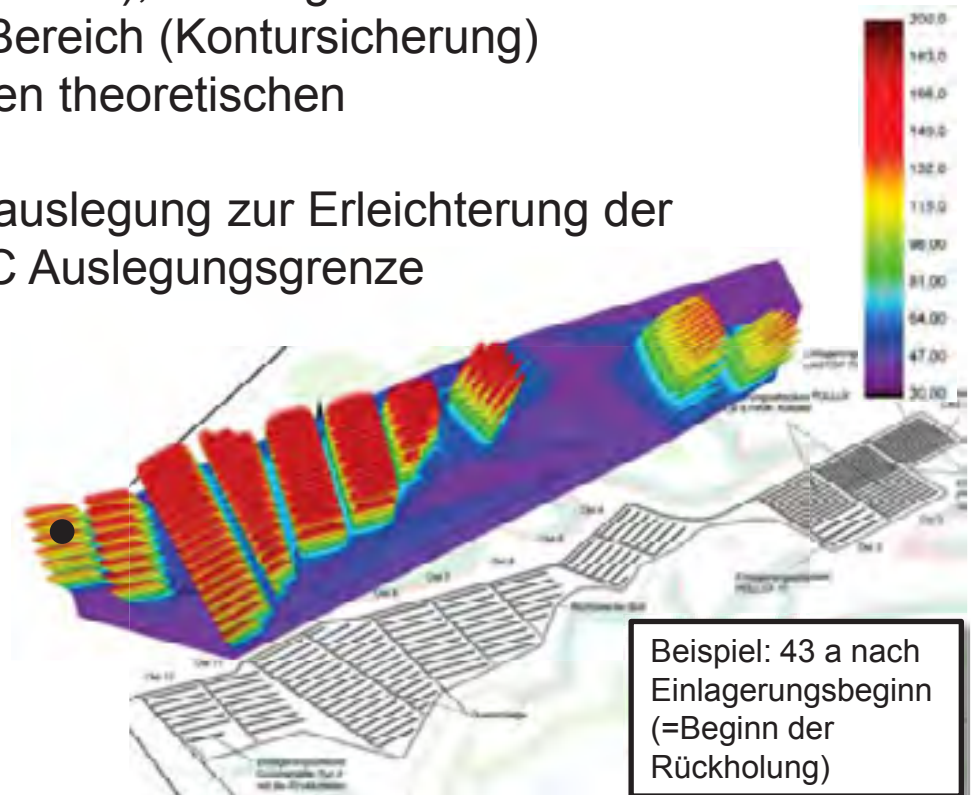
Prototyp der Einlagerungsvorrichtung im Versuchsstand



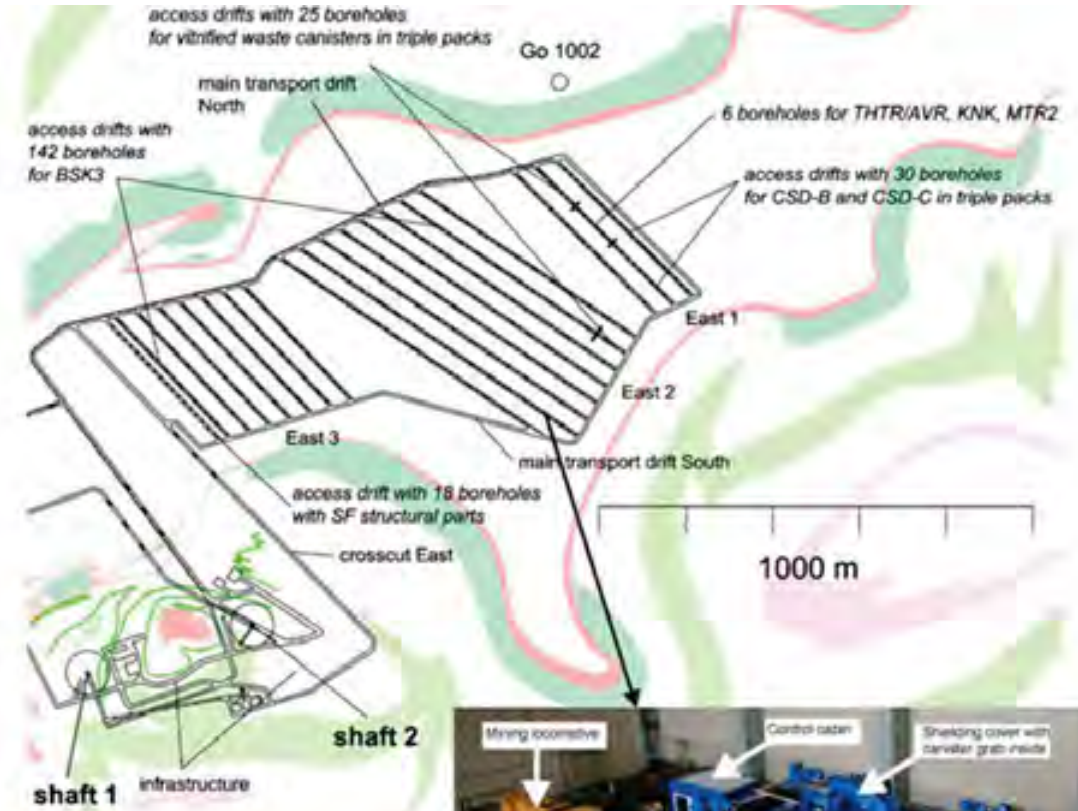
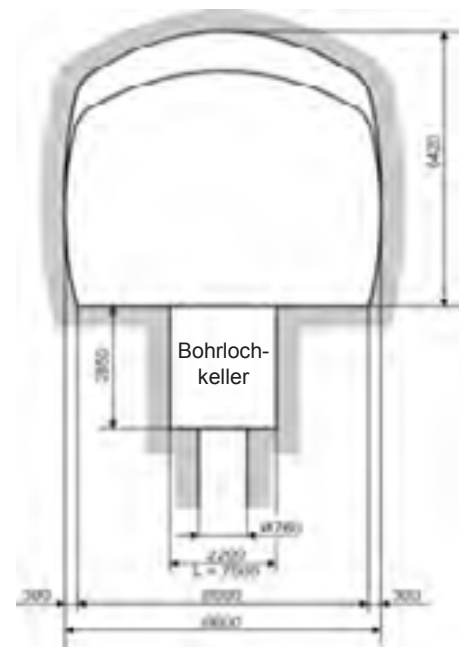
Machbarkeitsstudie zur modifizierten Einlagerungsvorrichtung

Streckenlagerung Salz

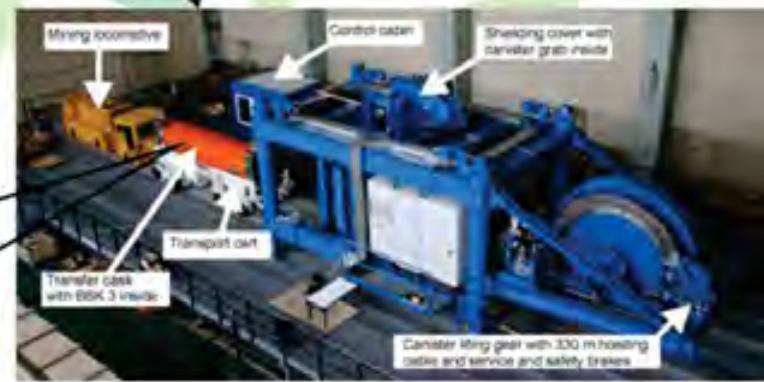
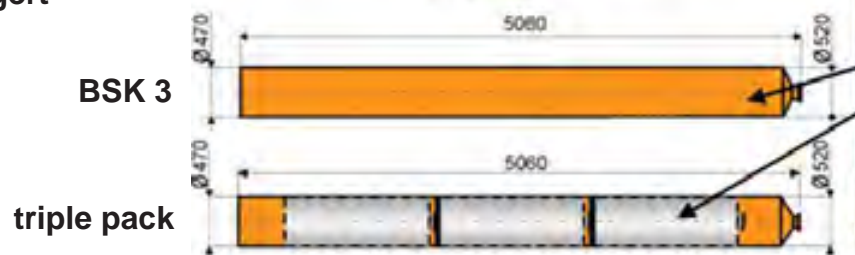
- bisherige Endlagerauslegung mit Optimierungsziel dichteste Lagerung
- potenzieller Rückholungszeitraum fällt in einigen Einlagerungsfeldern mit dem Temperaturmaximum zusammen
- Zusätzliche Kühlung, Begrenzung der Vortriebslänge und zusätzliche Kühlpausen unerlässlich
- außerdem höhere Konvergenz (Nachschnitt), Hebung der Streckensohle und höhere Spannungen im konturnahen Bereich (Kontursicherung)
- Summe der Effekte führt zu sehr kleinen theoretischen Vortriebsgeschwindigkeiten
- Anpassung der thermischen Endlagerauslegung zur Erleichterung der Rückholung bei Beibehaltung der 200°C Auslegungsgrenze



Bohrlochlagerung Salz



Abfälle werden von der Einlagerungssohle aus in bis zu 300 m tiefe Bohrlöcher eingelagert



Prototyp Einlagerungsvorrichtung (ELV) aus FuE-Vorhaben DENKMAL/ESDRED (auch zur Rückholung nutzbar)

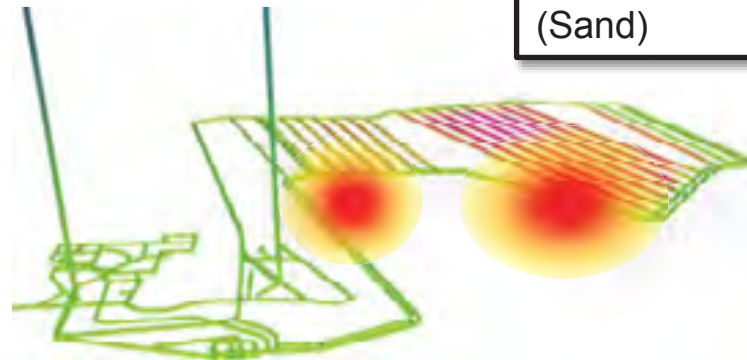
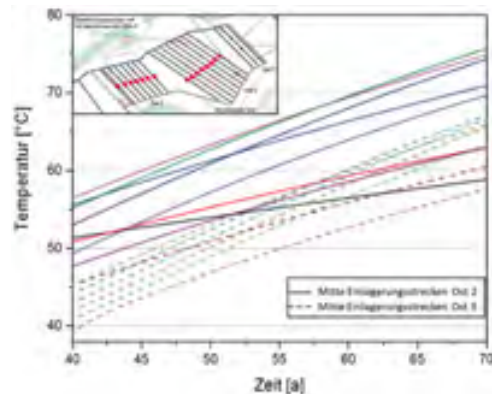
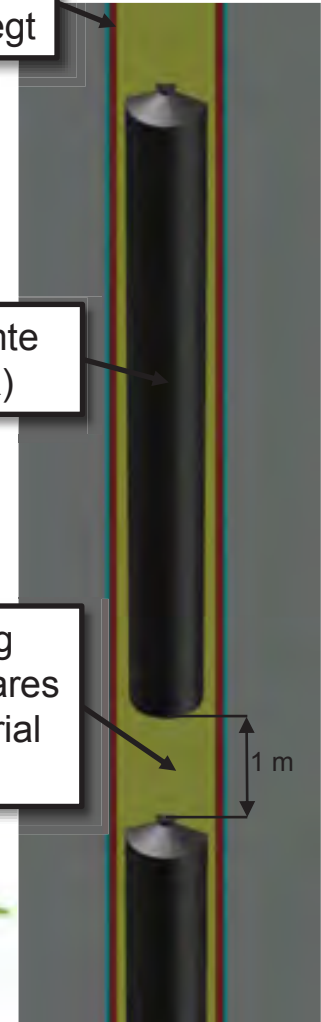
Bohrlochlagerung Salz

- Maßnahmen zu Erleichterung der Rückholung: zusätzliche Verrohrung des Bohrloches, Sandverfüllung im Inneren und konische Außenform der Kokille (BSK-R) während VSG entwickelt
- Rückholung entspricht im Wesentlichen einer Umkehrung der Einlagerung
- Verrohrung verbleibt im Gebirge
- Wärmequellen liegen unterhalb der Einlagerungssohle
- Temperaturmaxima liegen unter der Auslegungstemperatur und treten deutlich nach dem Rückholungszeitraum auf

Verrohrung, gegen Gebirgsdruck ausgelegt

konisch geformte Kokille (BSK-R)

inertes, wenig kompaktierbares Versatzmaterial (Sand)



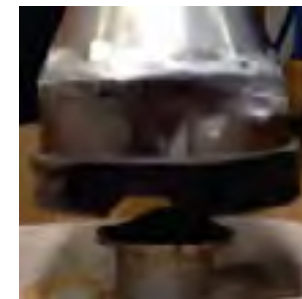
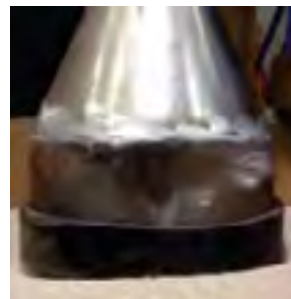
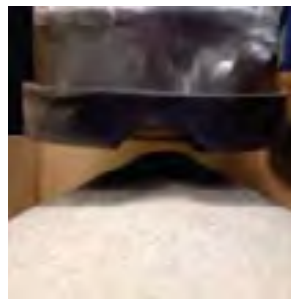
Bohrlochlagerung Salz



- Bohrlochinnerstes wird Sperrbereich zugeordnet
- innerhalb der Verrohrung Temperaturen nahe der Auslegungsgrenze
- Entnahme des Bohrlochversatzes als wesentliche technische Herausforderung während des Rückholungsvorgangs

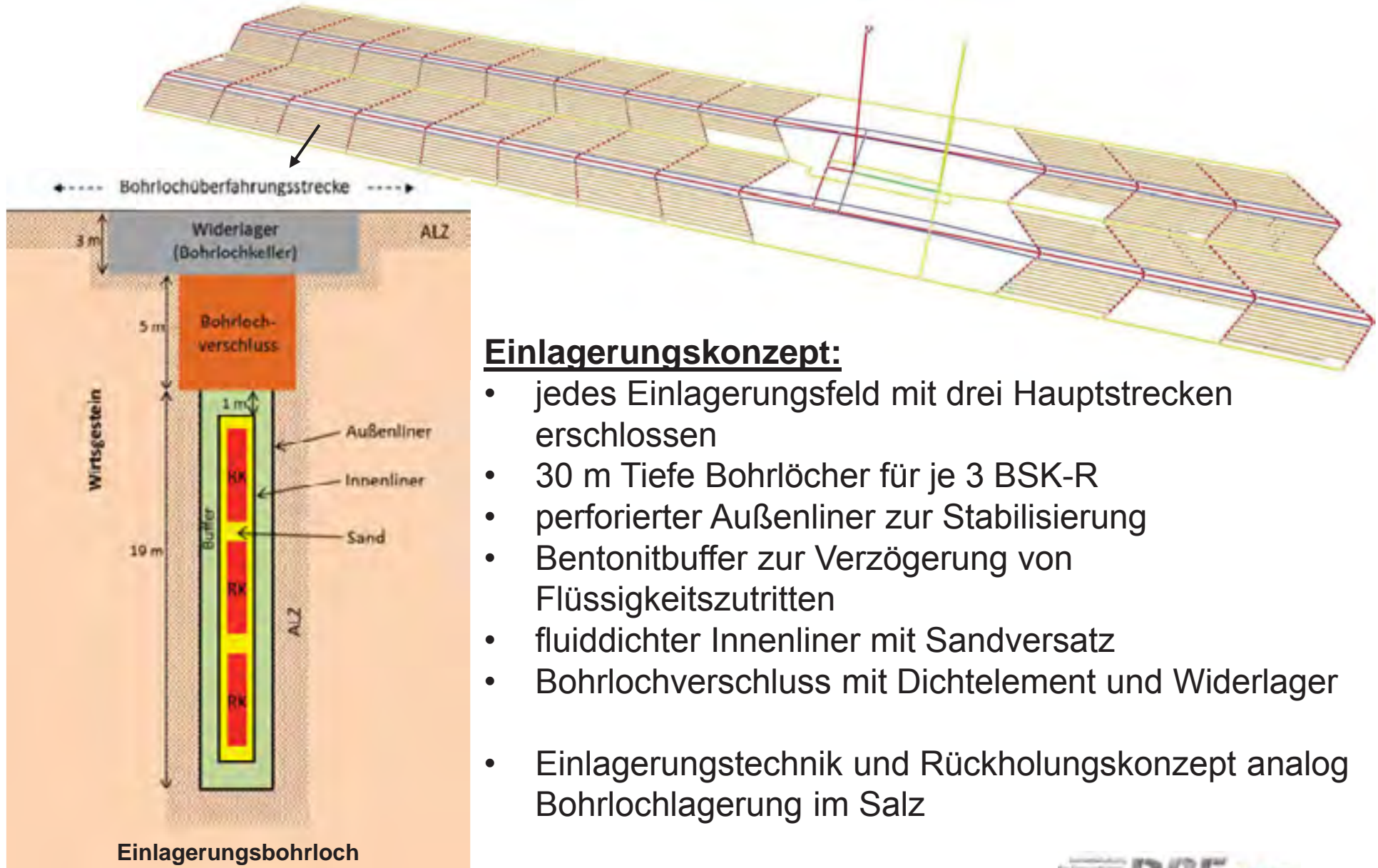
Neuentwicklung einer Saugkokille zur schrittweisen Entnahme des Sandversatzes:

- Gleiche Abmessung wie BSK-R
- Transport und Handhabung der Kokille mit eigenem Transferbehälter
- vorhandenes Luftvolumen wird für zirkulierenden Volumenstrom genutzt



Vorversuche Einlassöffnung

Bohrlochlagerung Tongestein



Einlagerungskonzept:

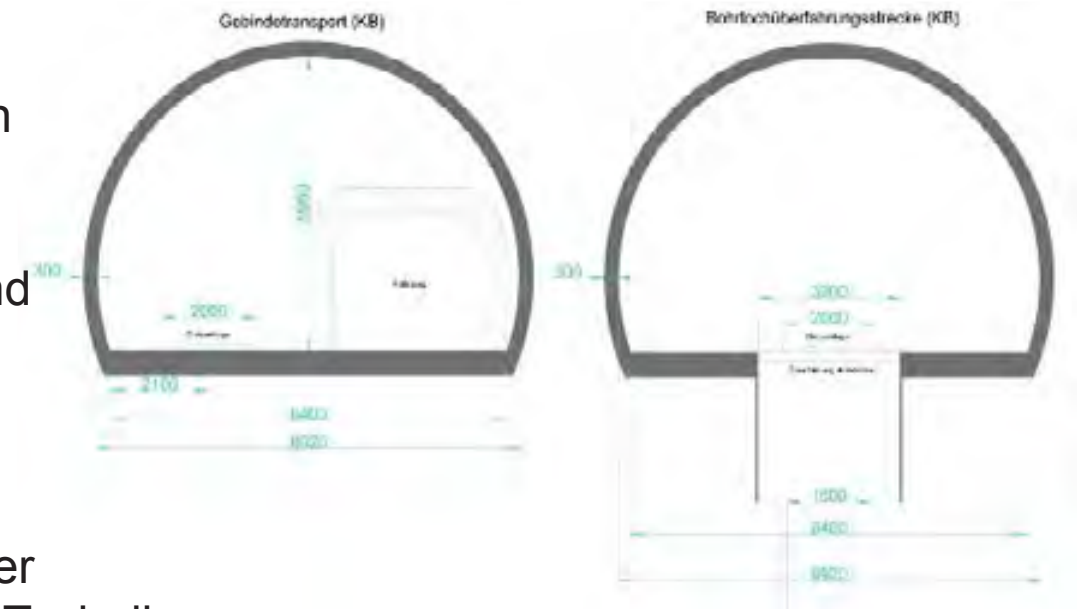
- jedes Einlagerungsfeld mit drei Hauptstrecken erschlossen
- 30 m Tiefe Bohrlöcher für je 3 BSK-R
- perforierter Außenliner zur Stabilisierung
- Bentonitbuffer zur Verzögerung von Flüssigkeitszutritten
- fluiddichter Innenliner mit Sandversatz
- Bohrlochverschluss mit Dichtelement und Widerlager
- Einlagerungstechnik und Rückholungskonzept analog Bohrlochlagerung im Salz

Einlagerungsbohrloch

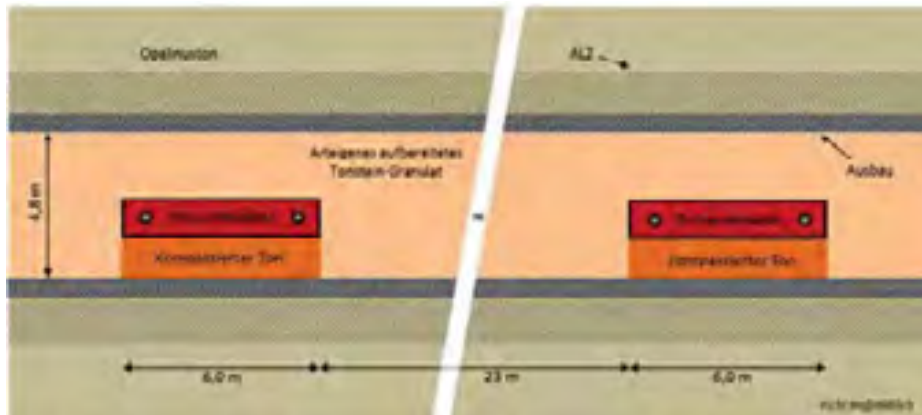
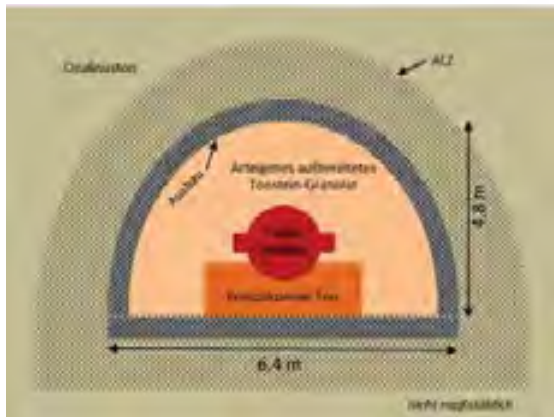
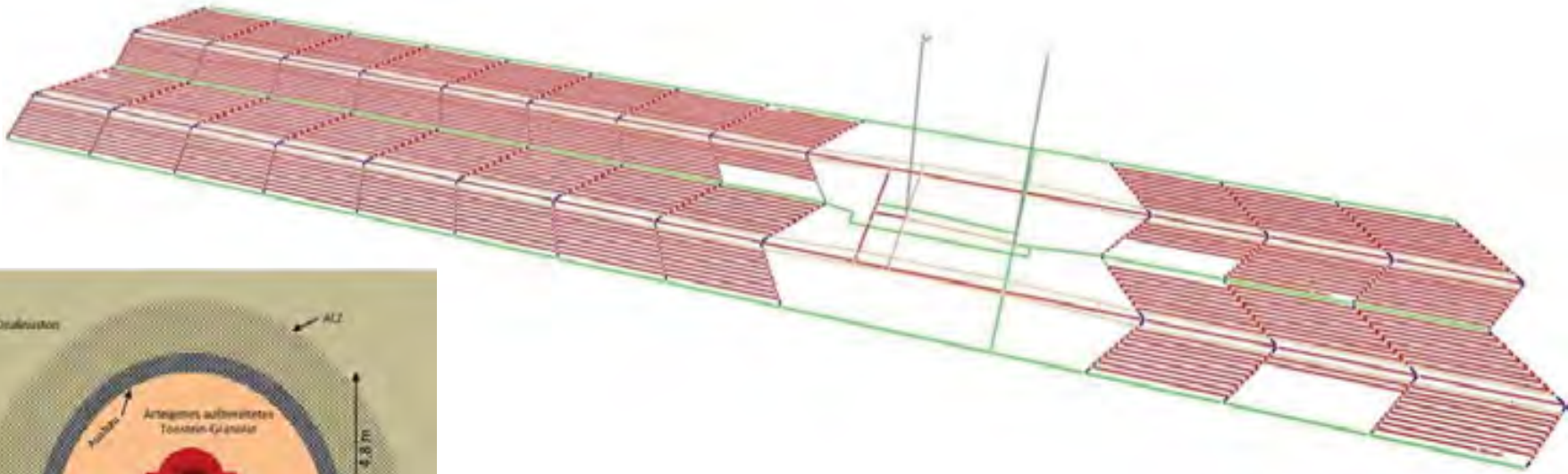
Bohrlochlagerung Tongestein



- Streckenausbau zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit unerlässlich
- Offenstandszeit und weitere Anforderungen definierten Art und Dimensionierung des Ausbaus
- Ausbau verbleibt stets im Endlager
- Wiederauffahrung bereits verfüllter Streckenteile mit konventioneller Technik
- Ertüchtigung des Ausbaus je nach Zustand und Anforderungen
- Minimierung des Stahlanteils im Ausbau zur Reduzierung der Gasbildung (Langzeitsicherheit)
- zusätzlich Einsatz überschneidbarer Materialien zur Erleichterung der Rückholung



Streckenlagerung Tongestein

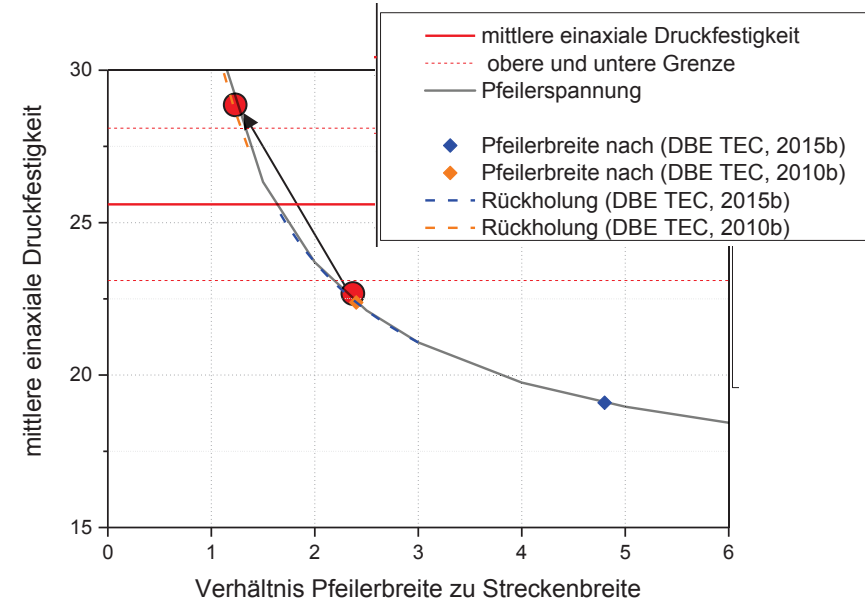


- Selbstabschirmender POLLUX-3 Behälter
- Aufbau des Grubengebäudes ähnlich Bohrlochlagerung
- Kurzlebige Einlagerungstrecken
- Bentonitsockel und Versatz aus Bentonit/Haufwerk
- Auslegung Feld zunächst thermisch

Streckenlagerung Tongestein



- Adaption des 3 teiligen Auffahrungsschemas (Salz) würde Stabilität der Festen beeinträchtigen
- Alternative Rückholungstechnik oder Optimierung der geomechanischen Auslegung
- Arbeiten im alten Querschnitt notwendig
- Einsatz kleinbauender Technik zur Versatzentnahme



Teilschritte des Rückholungsprozesses:

Neuauffahrung	Zwischensicherung	Freilegen Behälter	Zwischensicherung	Entnahme Behälter	Neuauffahrung

== Rückschlüsse für neue Einlagerungsvarianten ==



- Verschiedene Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholung bekannt (→ Tabelle)
- Anwendung je nach Endlagerkonzept
- Technische Herausforderungen hängen stark vom Einlagerungskonzept und dem Wirtsgestein ab

Endlagerphase	Maßnahmen
Endlagerauslegung und -planung	<ul style="list-style-type: none"> • Vergrößerte Abstände zwischen den Einlagerungsbecken, um gebirgsmechanische Stabilität zu verbessern und thermische Belastung zu verringern • Angepasstes Layout unter Berücksichtigung zukünftiger Rückholungstrecken, Ausweisung von Auffahrungskorridoren • Längere Zwischenlagerzeit oder kleinere thermische Leistung der Behälter zur Reduzierung der thermischen Belastung
Errichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Überschneidbarer Ausbau/Verzicht auf Ausbau/Rauben von Ausbau nach Einlagerung, sofern dies im Rahmen der betrieblichen Sicherheit möglich ist
Betriebsphase	<ul style="list-style-type: none"> • Rauben aller Einbauten vor dem Versatz • Einsatz überschneidbaren Ausbaus, soweit möglich
Rückholungsphase	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsfähige Kühl- und Wittertechnik zur Einhaltung der geltenden bergbehördlichen Anforderungen • Automatisierung und Fernsteuerung von Prozessen im „heißen“ Bereich zur Reduzierung der betrieblichen und radiologischen Risiken • Einlagerungstechnik sollte für Rückholung möglichst geeignet sein (Optimierung) • Gebirgsmechanisches und strahlenschutztechnisches Monitoring des Endlagers während der Wiederauffahrung • Strahlenschutzmaßnahmen/Vorkehrungen bei mangelnder Integrität der Behälter (Overpack für Transport etc.)
Verschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung (mechanisch) gut entfernbarer Dichtungsmaterialien (Nutzung konventioneller Bergbautechnik), evtl. Verzicht auf Bitumen/Asphalt und auch Bewehrungen, da diese schlecht zu entfernen sind

(Bollingerfehr et al., 2014)

== Folgen über Tage ==



- Rückholungsdauer entspricht Einlagerungsdauer (ggf. Verdopplung der Betriebszeit) → Bereitstellung entsprechender Infrastruktur
- Bereitstellung geeigneter Zwischenlagerkapazitäten nach erfolgter Rückholung
- ggf. Bereitstellung entsprechender Transportkapazitäten
- Bereitstellung geeigneter und ausreichender Behälter für Zwischenlagerung und/oder Transport
- Bereitstellung geeigneter kerntechnischer Anlagen zur Konditionierung der rückgeholten Abfälle
- Entwicklung und Bereitstellung alternativer Entsorgungsstrategien

== **Zusammenfassung** ==

- durch Rückholung werden Abfallbehälter aus dem passiven Sicherheitssystem des Endlagers zurück in die menschliche Obhut überführt
- Anforderung der Rückholbarkeit ändert die Randbedingungen für die Endlagerauslegung
- Rückholbarkeit nicht im Widerspruch zum Sicherheitskonzept eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Salz und Tongestein
- Vollständiger Nachweis der technischen Machbarkeit und Überführung in den Stand der Technik steht für alle Einlagerungskonzepte aus



**Vielen Dank
für ihre Aufmerksamkeit!**

DECOVALEX – International Benchmarking Project for Waste Isolation

Shao, Hua (BGR) & Kolditz, Olaf (UFZ/TU Dresden)

The DECOVALEX project (DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments: www.decovalex.org) that started in the early 1990s is such an initiative, focusing on the development and validation of mathematical models in order to understand and simulate the fully coupled THMC processes occurred in the construction, implementation and post-closure phase of a deep geological repository for radioactive waste. The models being developed make extensive use of experimental data from either laboratory experiments or large-scale in-situ experiments for their verification, calibration and validation. The understanding of the coupling between thermal, hydrogeological and mechanical processes and the ability to quantify their interaction are crucial for the assessment of the evolution of the geological and engineered barriers.

Six phases with a duration of three to four years for each have been performed until 2015. The task-specific modelling exercises and model comparison efforts have overall objectives:

- Increase the basic understanding of coupled THM and THMC processes in geological host rocks and geotechnical buffer materials,
- Exchange experimental data and improve the understanding of the constitutive behaviors,
- Develop, verify and validate computer codes against field experiments,
- Investigate the predictive capabilities.

In the past phase of the project, DECOVALEX2015, BGR and UFZ have jointly studied using numerical code OGS all five tasks covering wide spectrums of the current research topics in the field of repository for radioactive waste. This can be concluded e.g. saturation behavior of the bentonite MX80 and interaction between engineered barrier and clay rock (Task A), buffer material and clay rock under thermal load (Task B), and flow and transport behavior in the fractured rock (Task C):

- Task A: The SEALEX in-situ test at Tournemire URL site,
- Task B1: HE-E in-situ heater test at Mont Terri URL site,
- Task B2: EBS experiment at the Horonobe URL site,
- Task C1: Modelling coupled T-H-M-C processes of single rock fractures using existing test data and published results, and
- Task C2: Modelling the coupled hydro-mechanical and transport processes of the Bedrichov Tunnel in-situ experiment.

The finite element code, OpenGeoSys (OGS), is mainly developed by UFZ and OGS community, which includes more than ten organizations. The code is a free, multi-platform, scientific modelling package that enables numerical simulations of individual or coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in porous and fractured media. The code is widely applied in the groundwater management, CO₂-storage, geothermal application and waste repository.

With these efforts, a series of benchmark books and numerous peer-reviewed papers on this joint cooperative work have been published.

- DECOVALEX -
International Benchmarking Project
for Waste Isolation

Hua Shao (BGR)

In cooperation with

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

Olaf Kolditz (UFZ/TU Dresden)

Background

- DECOVALEX project - **DE**velopment of **CO**upled models and their **VAL**idation against **EX**periments
- **Initiation 1992**, Seven Phases (3 – 4 years) until 2019
- Definition of **Tasks** and **Benchmark Cases**
- Task-specific **modelling** exercises and model **comparison** efforts
- **Development** of numerical tools to support the design of radioactive waste repositories

Objectives

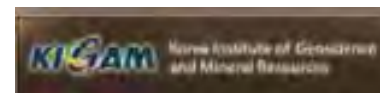
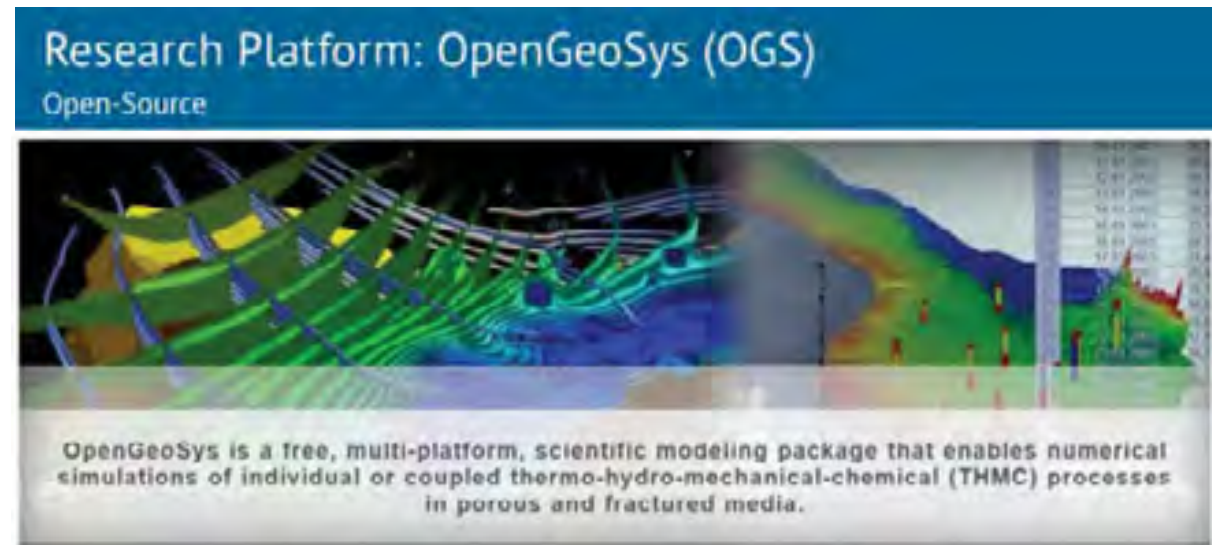
- Increase the basic **Understanding** of coupled THM and THMC processes in **geological** host rocks and **geotechnical** buffer materials
- Exchange experimental data and improve the understanding of the **constitutive behaviors**
- Develop, **verify** and **validate** computer codes against field experiments
- Investigate the **predictive capabilities**

6th Phase – DECOVALEX2015

- Project duration from April 2012 to December 2015
- 10 Funding Organizations, about 25 Research Teams from 9 countries
- Five Tasks
 - SEALEX (F)
 - HE-E heater test (CH)
 - EBS experiment (J)
 - THMC fracture
 - Bedrichov tunnel (CZ)
- German participating BGR/UFZ

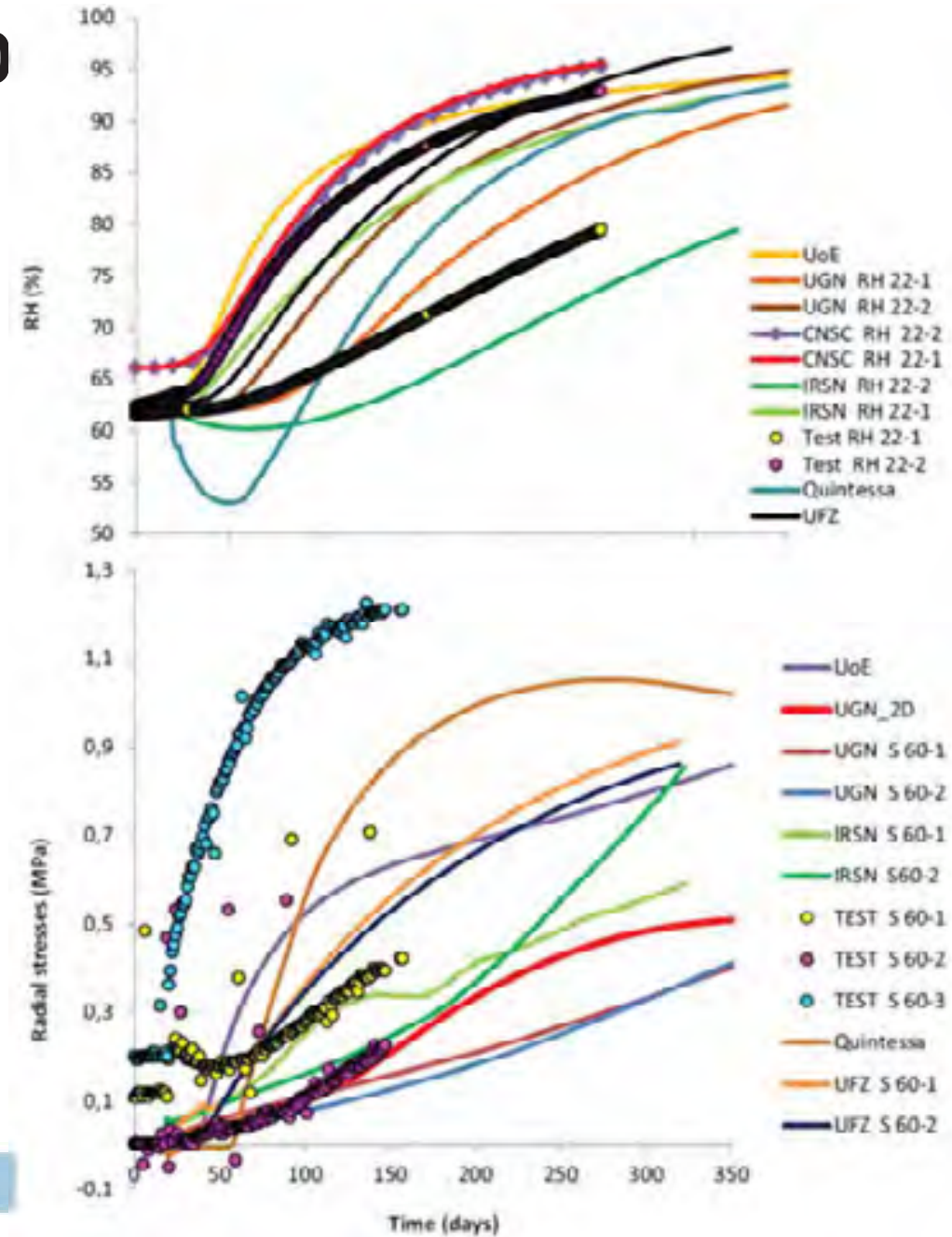
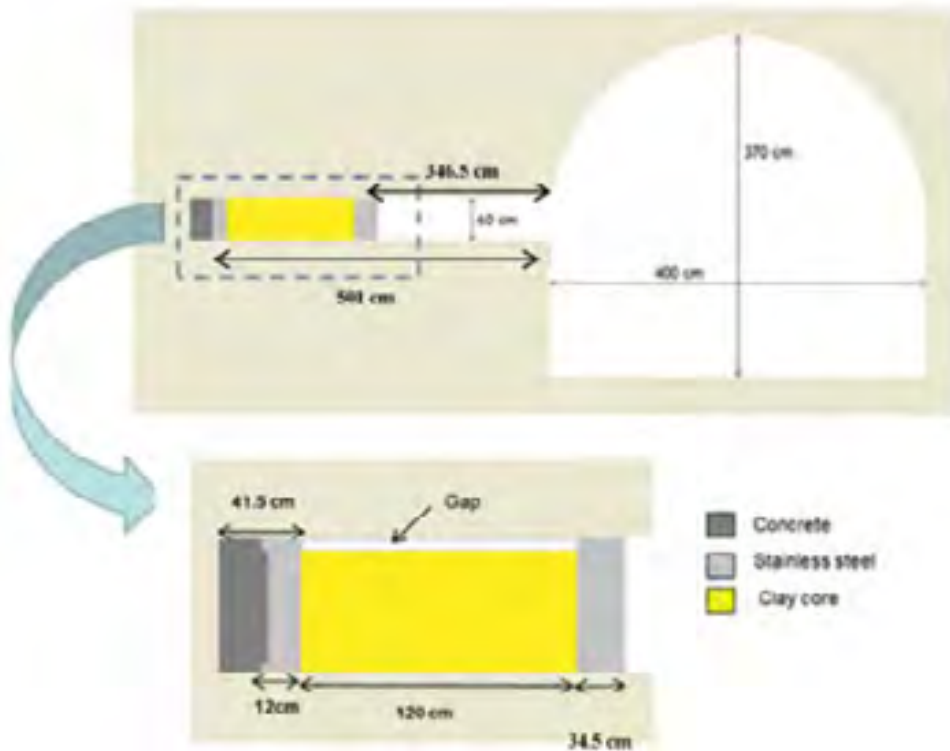
OpenGeoSys (<http://www.opengeosys.org>)

- Work flow concept
- Research code for THM/C
- High-Performance-Computing (HPC)
- Data integration and visualization
- In DECOVALEX2015
 - ENSI (CH)
 - Uni. Edinburgh (UK)



Task A: Sealing experiment in argillaceous

- Saturation behavior of MX80
- EBS-Rock interaction



(Final report 2015)

Task B1: Understanding of Thermo-Hydro-Mechanical (THM) processes in a bentonite buffer and an argillaceous host rock

➤ Work packages

- the HE-D heating test at Mont Terri (rock only),
- laboratory column tests on bentonite pellets (CIEMAT),
- the HE-E heating experiment at Mont Terri (integrating buffer materials and host rock)

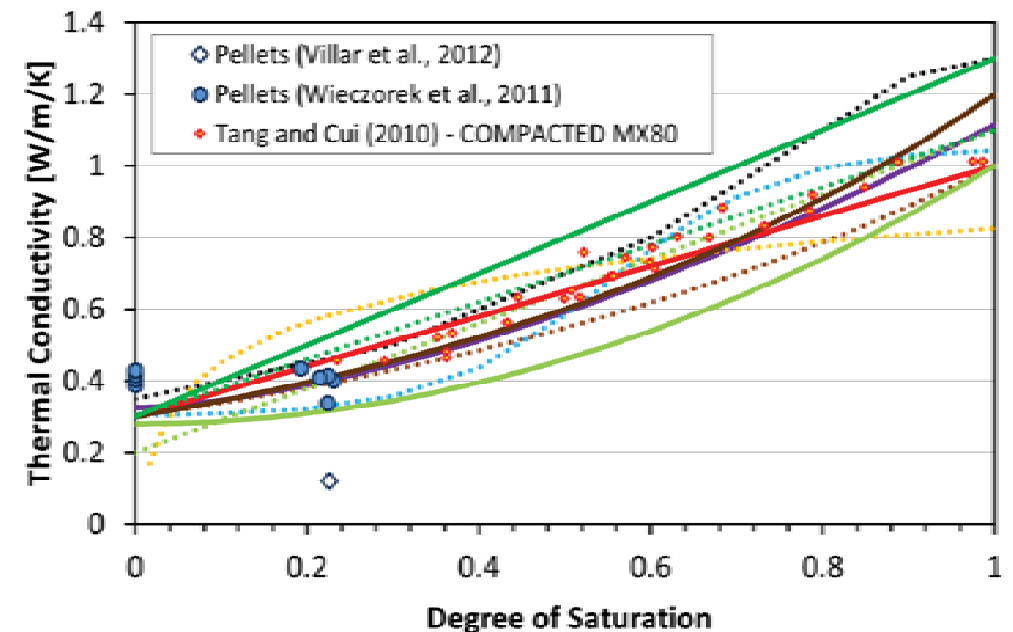
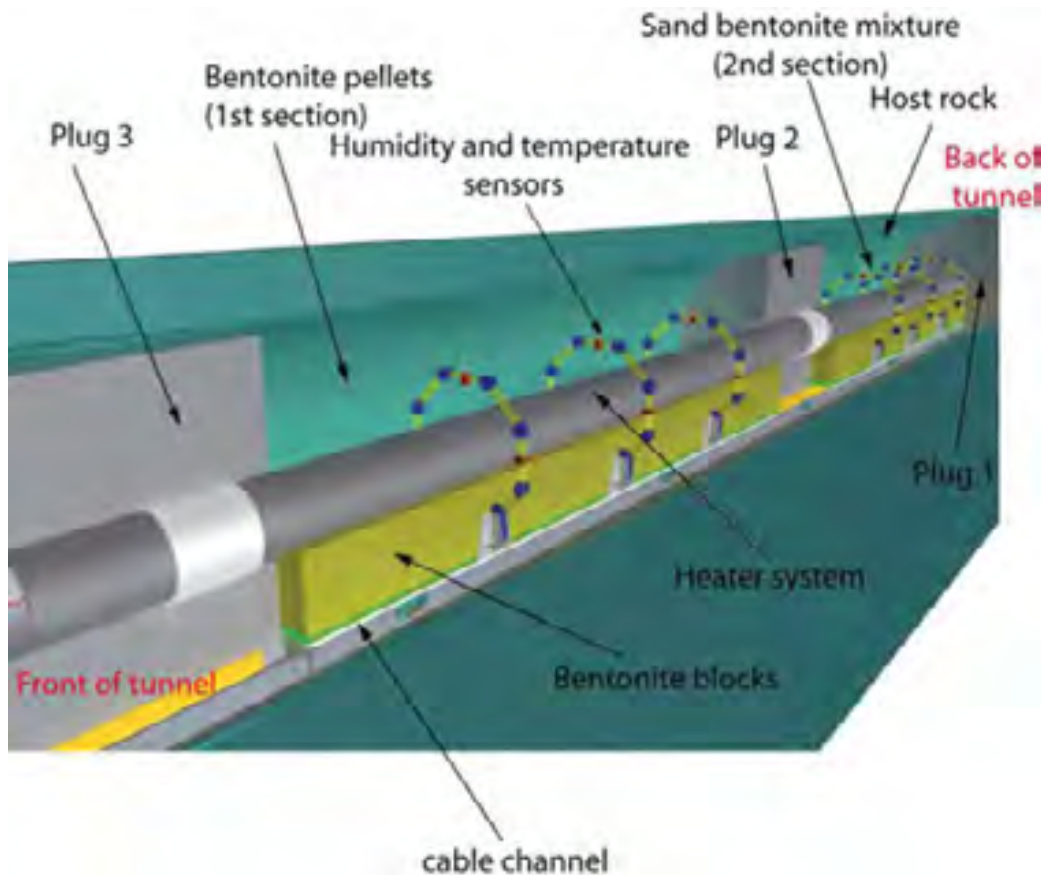
➤ 8 research teams

Team & Colour Code	Code	Numerical method
BGR/UFZ	OpenGeoSys	FEM
CAS	EPCA3D	EPCA
LBNL/DOE	TOUGH-FLAC	DFN/FDM
ENSI	OpenGeoSys	FEM
CNSC/IRSN	COMSOL	FEM
JAEA	THAMES	FEM
KAERI	FLAC	FDM
CNWRA/NRC	xFlo-FLAC	FDM

Task B1: HE-E heating experiment

➤ Processes & Properties

- Thermal conduction and convection
- Drying and desaturation → shrinkage
- Vapour diffuse and condense
- Change in saturation → thermal conductivity
- Thermal expansion → pore water pressure
- Hydraulic gradient that → effective stress state
- Thermally induced deformations



(Final report 2015)

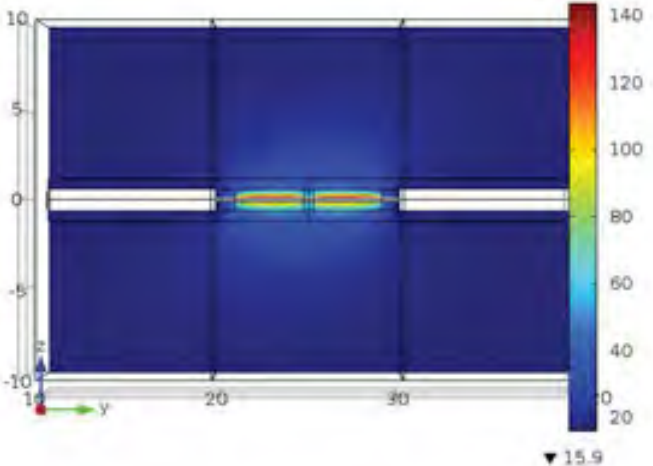
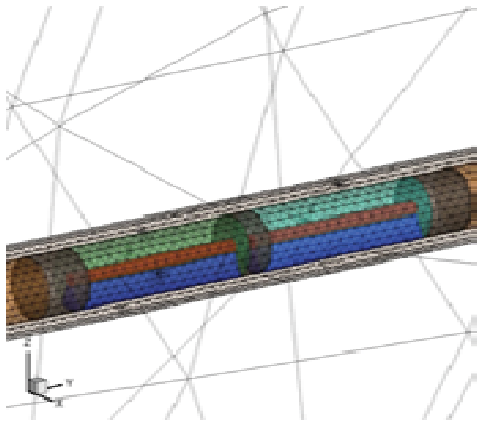
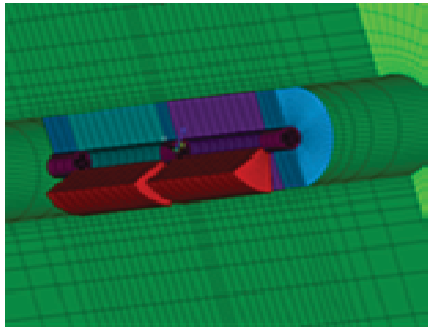
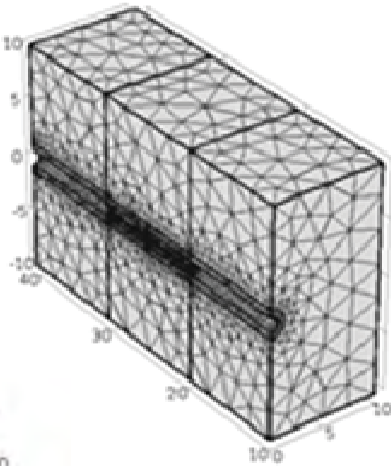
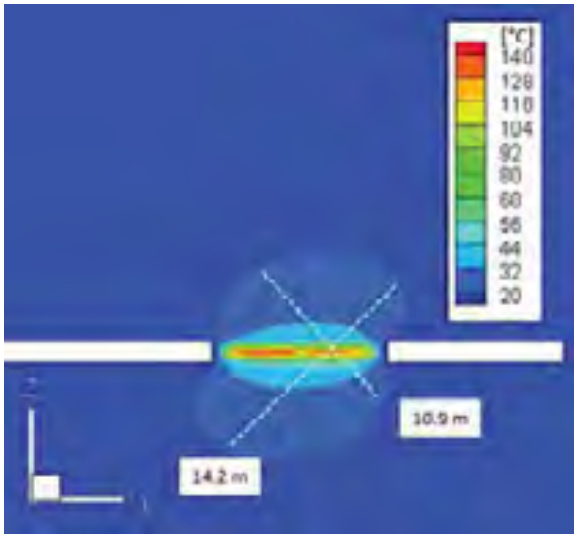
Task B1: HE-E heating experiment

➤ Models

CNSC

CAS

BGR/UFZ

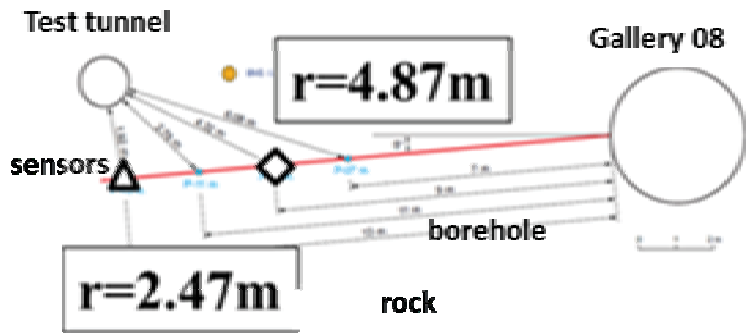


.2016

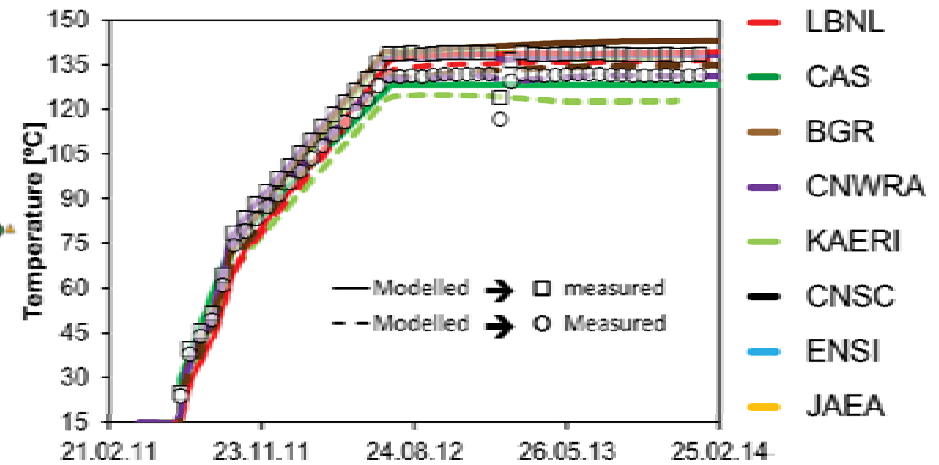
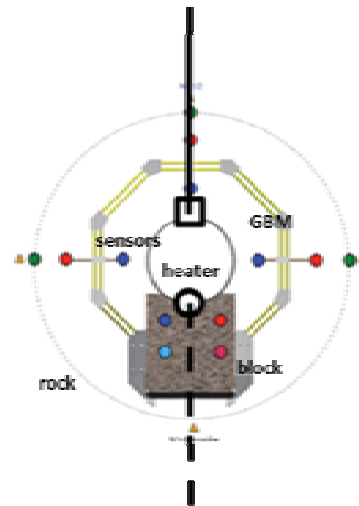
(Final report 2015)

Task B1: HE-E heating experiment

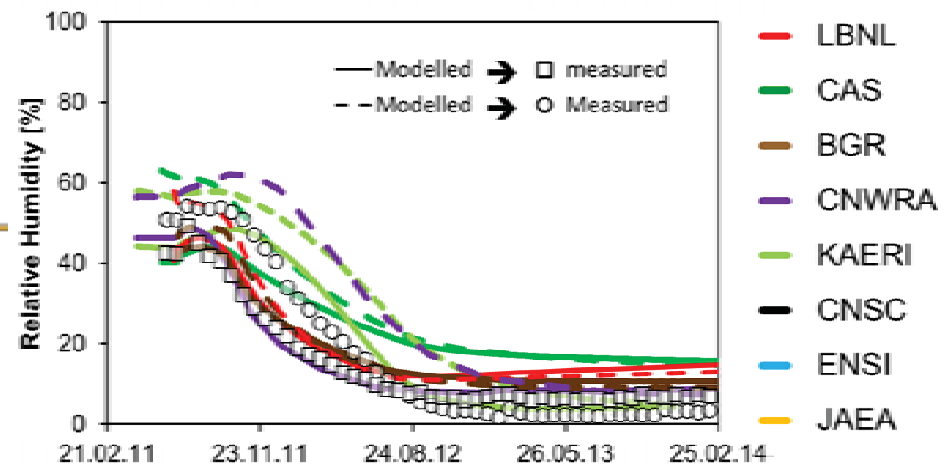
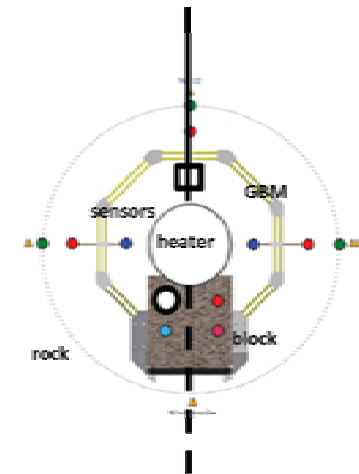
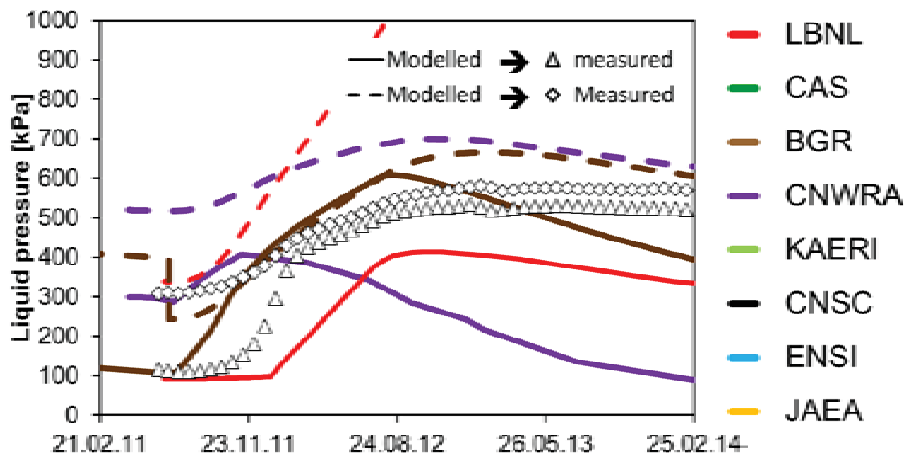
➤ Interpretation



Pressure in rock



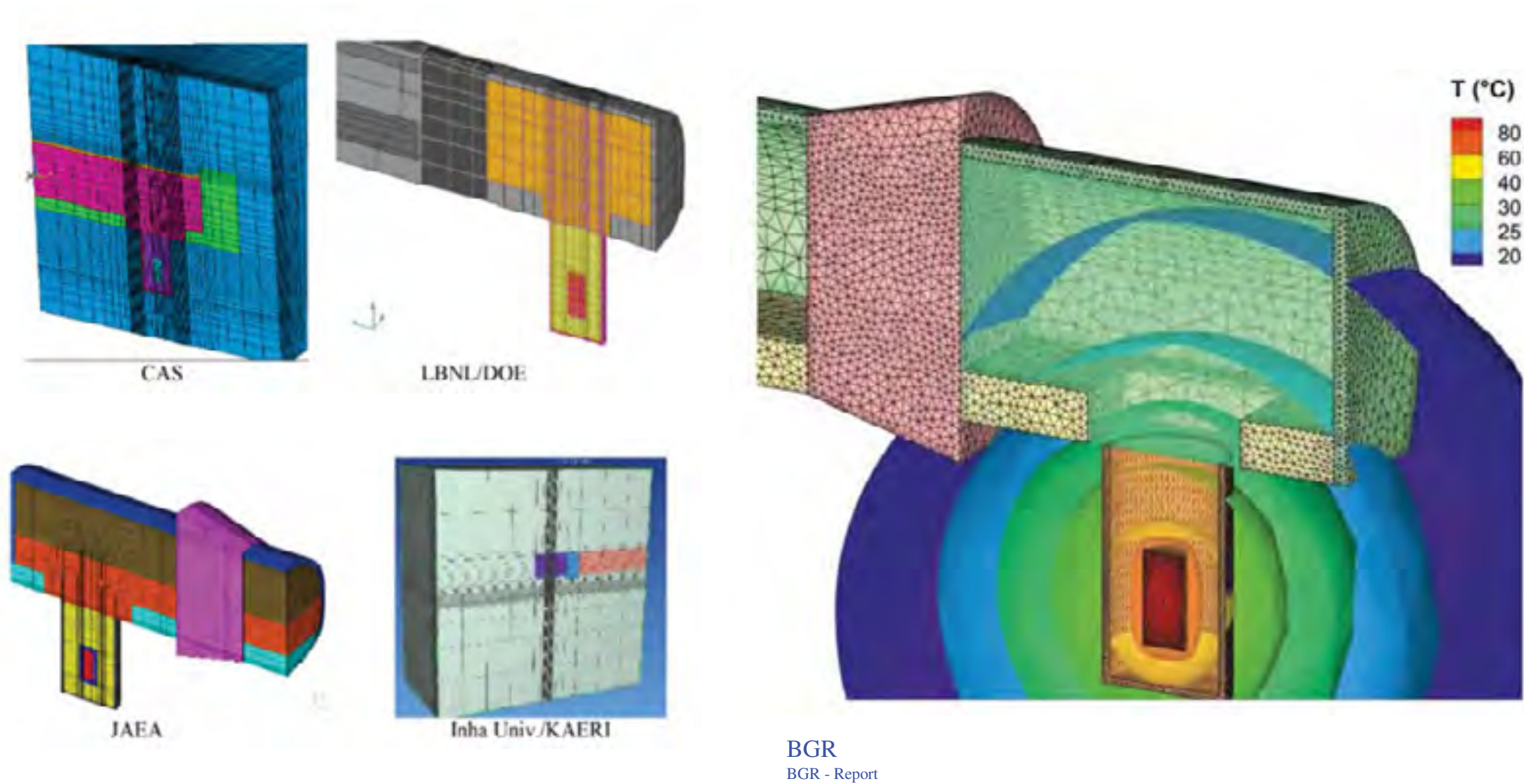
Temperature in buffer



Relative humidity in buffer

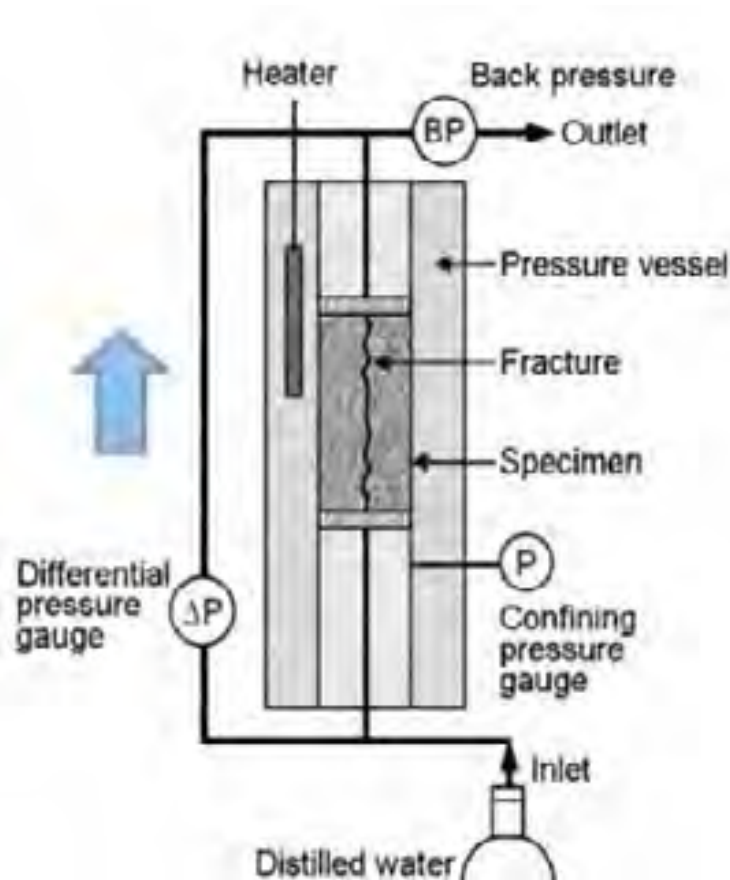
(Final report 2015)

Task B2: Japanese EBS (Horonobe Clay)



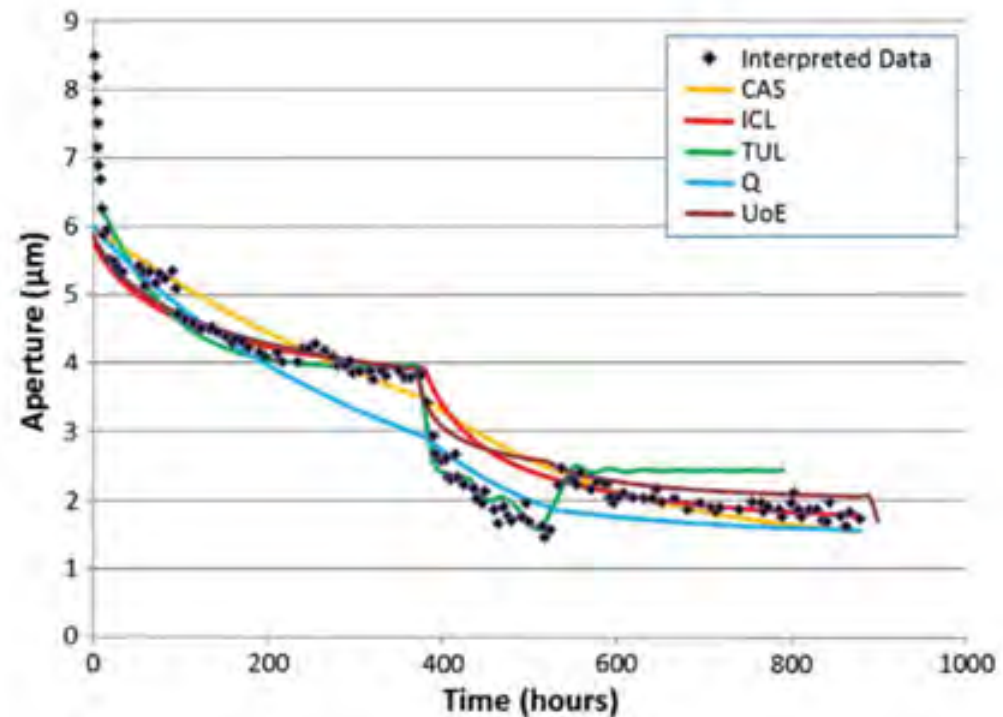
(Final report 2015)

Task C1: THMC processes in single fracture



Novaculite & Granite

- Hydraulic variable flow rate
- Mechanical confinement with different confining pressure
- Heating under different temperatures with time
- Measurement of major ion composition and pH
- Measurement of fracture apertures

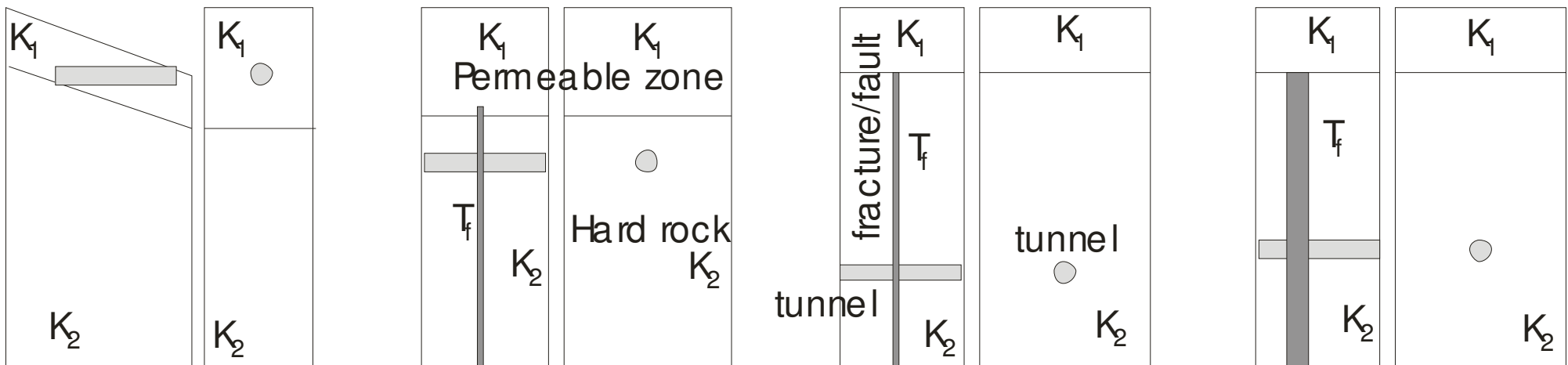
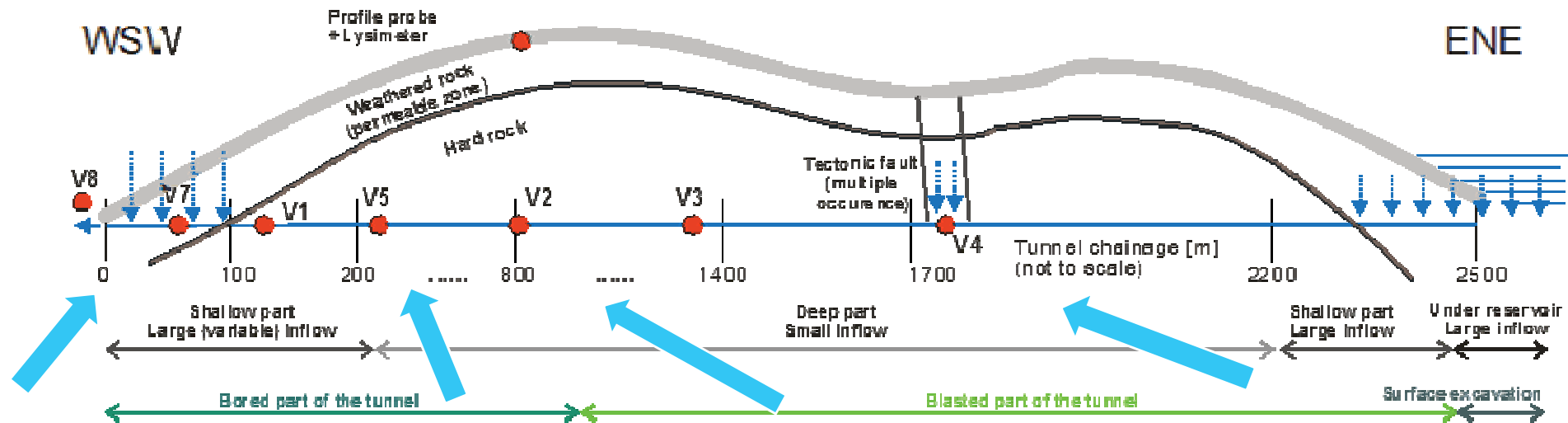


(Final report 2015)

KIT - 12. Projektstatusgespräch, 09.11.-10.11.2016

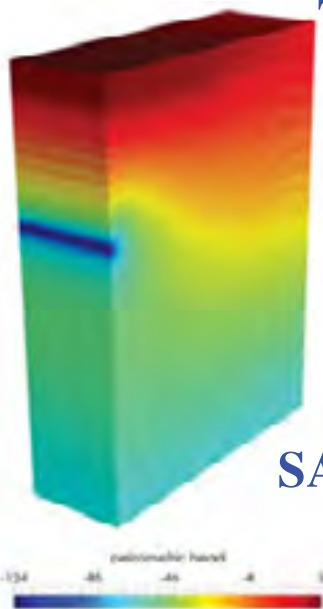
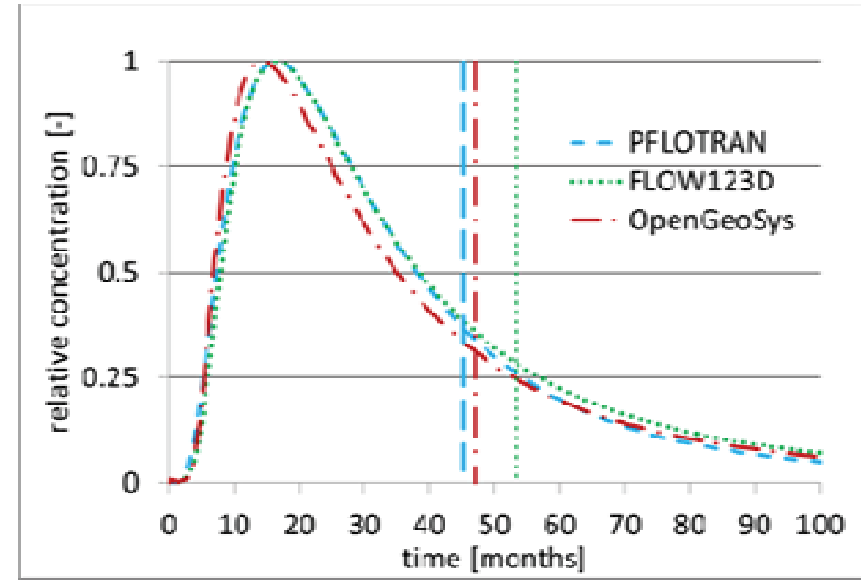
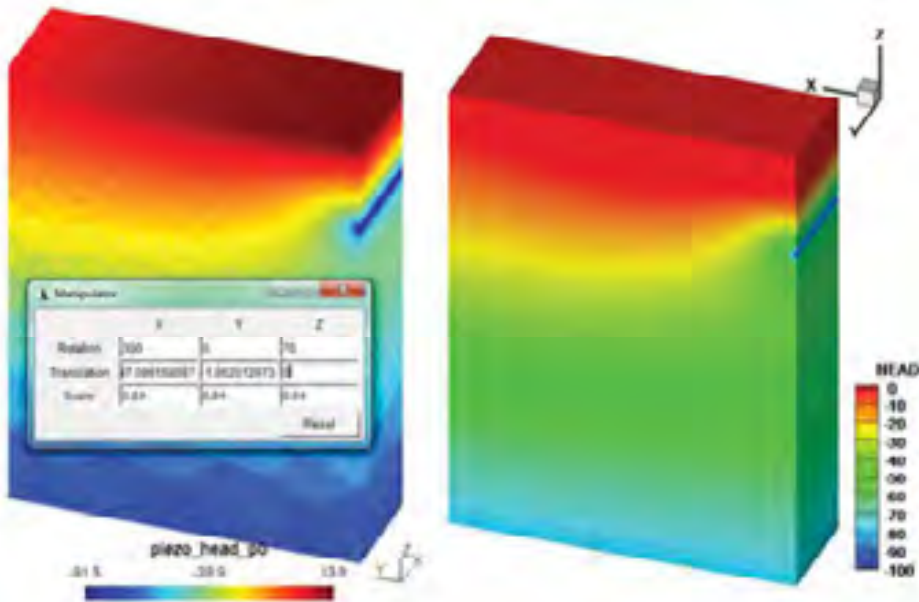
Task C2: Real-case benchmark for flow and tracer transport in the fractured rock

Bedrichov – Tunnel (CZ)



(Final report 2015)

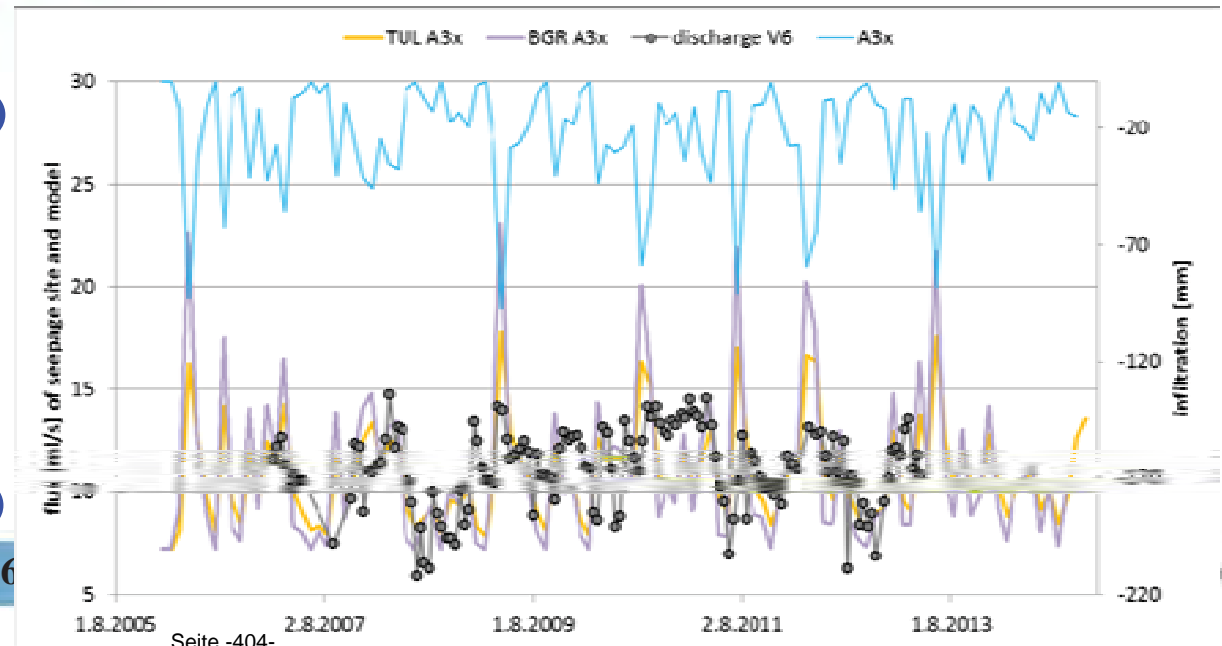
Task C2: Real-case benchmark for flow and tracer transport in the fractured rock



TUL (FLOW123)
BGR/UFZ (OGS)

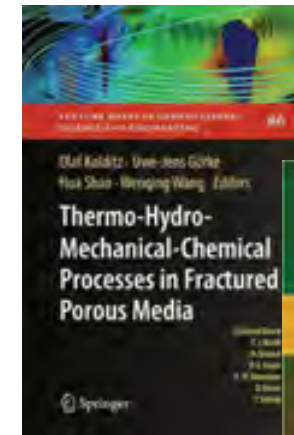
SANDIA (PFLOTRAN)

s-gespräch, 09.11.-10.11.2016



Scientific achievements

- Scientific community
- PhD Students
- Final reports
- Benchmarking-Books
- 19 submissions to EES
13 be published (TI) and
- Conference publications



Outlooks

- DECOVALEX2019: April 2016 – December 2019
- Five Tasks & Two Fundamental Study Cases
- 12 Funding Organizations, more than 30 Research Teams from 11 countries
- German participating: BGR/UFZ

Acknowledgements

For DECOVALEX2015

➤ BGR

- H. Kunz, J. Maßmann, T. Nowak, H. Shao, X.R. Wang, G. Ziefle

➤ UFZ/TU Dresden

- O. Kolditz, R.C. Lu, H.B. Shao, Y. Sun, H.Y. Yi, N. Watanabe, W.Q. Wang

➤ Other institutes for BGR/UFZ

- J. Taron (USGS), H.W. Zhou (China University of Mining and Technology)

➤ Task Lead

- Millard (CEA, F), Garitte (NAGRA, CH), Sugita (JAEA, J), Bond (Quintessa, UK),
Hokr (TUL, CZ)

Kurzfassung zum Vortrag:

Ergebnisse des FuE-Vorhabens ELSA II (Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle)

beim 12. Projektstatusgespräch des PTKA-WTE am 9./10.11.2016 in Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla, Dr.-Ing. Matthias Gruner - TU Bergakademie Freiberg
Dipl.-Ing. Philipp Herold - DBE Technology, Peine

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ELSA2 werden verschiedene Verschlusselemente für Schachtverschlüsse in Laborversuchen, halbtechnischen Versuchen im Technikum und in Feldversuchen getestet. Diese Verschlusselemente sind:

1) Verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch

Ein verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch wurde in einem Gesenk mit 3 m Durchmesser und 1,2 m Tiefe in einem Steinbruch erstmals mit einem Impuls-Verdichter der Firma TERRA-MIX verdichtet. Die Kornverteilung des Salzgrus-Ton-Gemisches wurde vorab in Laborversuchen optimiert und ein geringer Anteil Wasser hinzugegeben. Das Verdichtungsraaster wurde ebenfalls optimiert. Eine Vorverdichtung der Lagen erfolgte mit Rüttelplatten. Nach der Verdichtung mit dem Impuls-Verdichter wurden ungestörte Materialproben entnommen und die Dichte und Porosität bestimmt, sowie Dünnschliffe angefertigt, und diese unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die Porosität der unteren 0,3 m lag bei 8 % bis 10,5 % und der obersten 0,3 m bei 14 % bis 16,5 %. Dies sind extrem geringe Porositäten. Der Luft erfüllte Porenanteil lag im unteren Bereich bei 2 % bis 3,5 % und im oberen Bereich (ca. 0,3 m) bei etwa 5 % bis 6,5 %. Weitere Verdichtungsversuche sind notwendig, um den Verbund zwischen den Lagen zu verbessern. Zudem soll ein Impulsverdichtungsgerät entwickelt werden, das bergbautauglich ist und auch im Schacht eingesetzt werden kann.

2) Dichtelemente aus Bitumen und Asphalt

Dazu wurden vier Bohrlochversuche im Bergwerk in Sondershausen ausgeführt. Bei zwei Bohrlochversuchen (Durchmesser 0,3 m, Länge 1,0 m) wurde als Dichtmaterial Bitumen verwendet. Bei zwei weiteren Bohrlochversuchen (Durchmesser 0,5 m, Länge 1,0 m) wurden zwei Asphalt-Rezepturen eingesetzt. Bei einem Versuch kam eine mit Bitumen verfüllte Schottersäule (AS1) und beim anderen Versuch (AS2) ein neu entwickeltes Heißmischgut zu Einsatz. Dieses Heißgutgemisch besteht aus abgerundetem Schotter (Rundkorn 20/40 mm) mit Destillationsbitumen. Da der Schotter mit dem Bitumen erwärmt wird, ist die Temperatur am Stoß erheblich höher als bei einer Bitumen verfüllten Schottersäule. Durch die höhere Temperatur gelingt eine bessere Benetzung der Kontur. Der neu entwickelte „Asphalt mit Rundkorn“ soll weiter entwickelt werden. Vorteil des neu entwickelten Asphalttes ist es auch, dass von vorn herein ein tragendes Korngerüst entsteht und damit auch in einem Schacht ein Siloeffekt erreicht werden kann.

Bei den Bitumenversuchen drang das Bitumen ca. 5 mm in die Kontur/Saumzone ein (Ergebnis von Dünnschliffen). Alle Bohrlochversuche wurden mit Gasdruckbeaufschlagt und zwei versuche auch mit Salzlösung. Nach dem Rückbau der Bitumendichtelemente stellt sich heraus, dass Gas zwischen Kontur und Bitumen in den unteren Teil eingedrungen ist. Trotzdem wurde bei dem Bohrlochversuch eine sehr geringe Gaspermeabilität von kleiner 10-20 m² ermittelt. Die Eindringung von Gas war physikalisch zu erwarten, da mit einer Flüssigkeit (Bitumen), die zwar hochviskos ist, gegen einen Gasdruck von unten abgedichtet wird. Dies ist auch bei jedem Schachtverschluss zu erwarten, bei dem mit einer hochviskosen Flüssigkeit abgedichtet wird, und der von unten mit Gas beaufschlagt wird.

Über die oben genannten Punkte 1 und 2 wurde beim Projektgespräch berichtet. Weitere Arbeiten im Forschungsvorhaben ELSA II sind:

- a) Entwicklung von Schachtverschlusskonzepten für HAW-Endlager in Salz- und Tonstein,
- b) Großbohrlochversuch (Durchmesser 1,0 m, Länge 2,0 m) mit der langzeitstabilen MgO-Rezeptur C3,
- c) Laborversuche zur Optimierung der Äquipotentialsegmente,
- d) Halbtechnischer Versuch HTV-4 zum Test von Äquipotentialsegmenten in einem Bentonitdichtelement,
- e) Geomechanische und hydraulische Modellrechnungen zu Schottersäulen im Tonstein.

Weitere halbtechnische Versuche sind im Tonstein im Rahmen des Projektes ELSA III geplant.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765



Ergebnisse des FuE-Vorhabens ELSA II (Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle)

Wolfram Kudla, Matthias Gruner,
TU Bergakademie Freiberg

Philipp Herold
DBE-Tec, Peine

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

12. Projektstatusgespräch des PTKA-WTE am
09./10.11.2016 in Karlsruhe

Beteiligte:

Dipl.-Ing. **Glaubach**, Dr.-Ing. **Gruner**,
Dipl.-Ing. **Hofmann**, Prof. Dr.-Ing. **Kudla**
(TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau)

Dipl.-Geophys. **Jobmann**, Dipl.-Ing. **Herold**
(DBE Technology, Peine)

Dr. rer. nat. **Freyer**
(TU Bergakademie Freiberg, Institut für anorganische Chemie)

Dr. rer. nat. **Popp**, Dr. rer. nat. **Salzer**, Dipl.-Ing. **Rölke**
(Institut für Gebirgsmechanik Leipzig Leipzig)

Dr.-Ing. **Wilsnack**, Dr. rer. nat. **Grafe**
(IBEWA Ingenieurgesellschaft, Freiberg)

Dr.-Ing. **Schuhmann**, Dr. **Emmerich**, Dipl.-Ing. **Königer**
(KIT-Competenzzentrum für Materialfeuchte)

ELSA (= Endlagerschachtverschlüsse) =
Schachtverschlüsse für Endlager für hoch radioaktive
Teil 1: Grundlagenermittlung
Teil 2: Konzeptentwicklung von Schachtverschlüssen
und Test von Funktionselementen

Generelles Ziel:

Standortunabhängige Entwicklung und
Weiterentwicklung von Konzepten und Komponenten
für Schachtverschlüsse für ein Endlager für
hochradioaktive Abfälle (im Salinar und im Tonstein)

Projektlaufzeit:

ELSA2: 5/2013 bis 03/2016

ELSA2+ 4/2016-3/2017

- 1. Verschlusselement verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch**
- 2. Bohrlochversuche mit Verschlusselementen aus Bitumen / Asphalt**
3. Weitere Arbeiten in ELSA2
 - Schachtverschlusskonzepte für HAW-Endlager im Salz und Tonstein
 - MgO-Beton (C3) in-situ Versuch im Steinsalz
 - Halbtechnischer Versuch mit Äquipotentialsegmenten im Bentonit (HTV-4) mit vorgeschalteten Laborversuchen
 - Geomechanische und hydraulische Modellrechnungen zu Schottersäulen im Tonstein
4. Zusammenfassung

1. Verschlusselement verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch

1. Verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch

Ziel:

Verdichtung von Salzgrus im Schacht in der Weise, dass ein Dichtelement

- a) mit sehr geringer Permeabilität entsteht (und dass damit einen äußerst geringen Porenanteil besitzt),
- b) und relativ hohe Steifigkeit besitzt (und damit beim Auflaufen des Gebirges im Salz schnell die Permeabilität der Kontaktzone verringert wird)

1. Verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch

Fractionen der GSES Aufbereitung	Friedländer Ton (FCP)	Feinsalz (FS)	Band 8 (B8)	Band 6 (B6)	Überkorn (ÜK)
Verteilung $d_5 - d_{95}$ [mm]	0,001 – 0,04	0,04 – 0,3	0,1 – 1,2	0,4 - 4	3 - 10
d_{50} [mm]	0,009	0,14	0,49	1,90	6,03
Korndichte [g/cm ³]	2,655	2,198			

vert. im fraction 10/7

Verdichtung verschiedener **Salzgrusfraktionen und Friedländer Ton und Wasser**. Etwa **160 Verdichtungsversuche im Marshall-Prüfgerät** mit Variation

- der Verdichtungsenergie
- verschiedenen Salzgrusfraktionen
- des Tongehaltes (Friedländer Ton)
- des Wassergehaltes

Ergebnisse beim Statusgespräch 2014 vorgestellt.



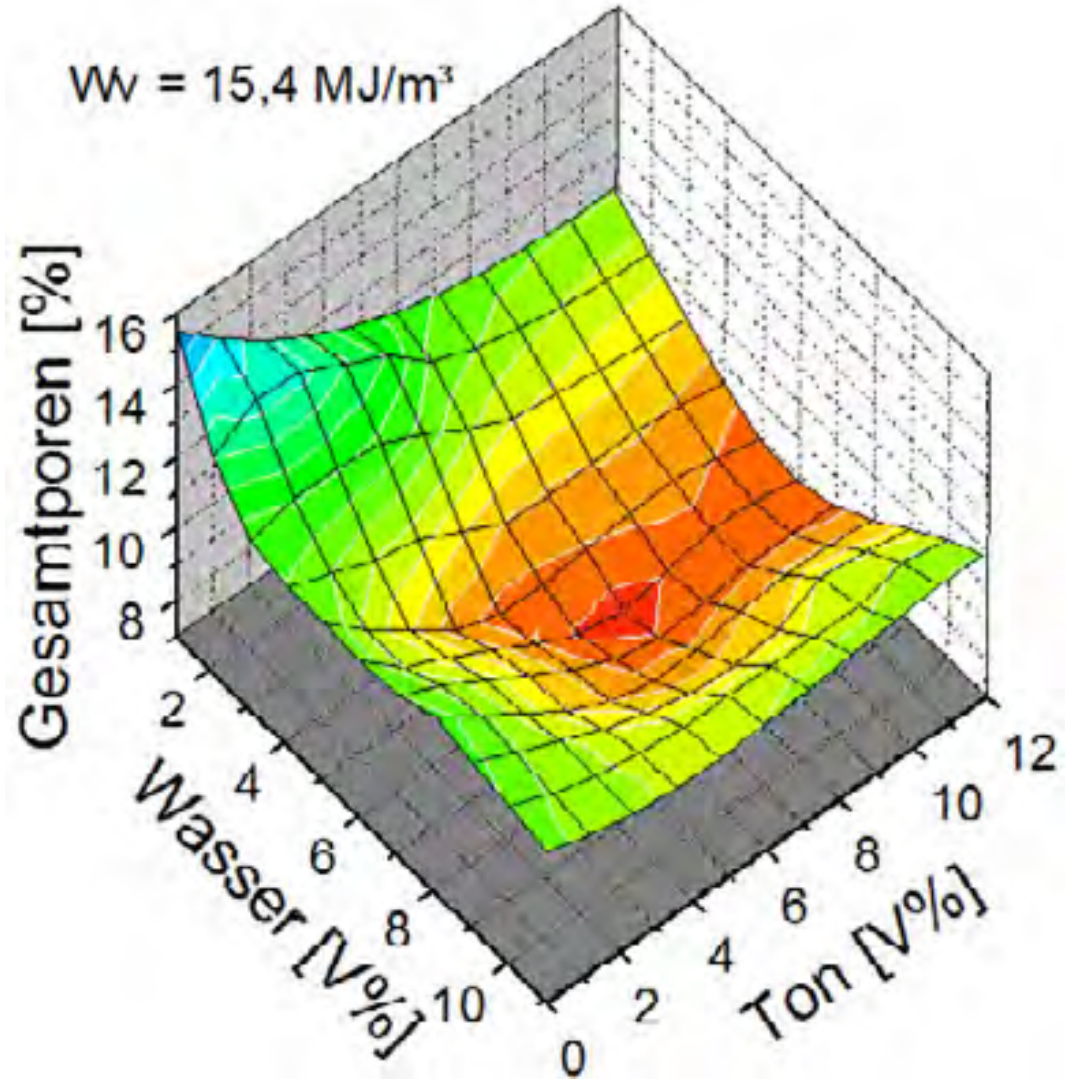
1. Verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch

Derzeit beste Rezeptur (OBSM):

Überkorn	46,7 M.-%
Band 6	19,2 M.-%
Band 8	10,6 M.-%
Feinsalz	13,0 M.-%
Friedländer Ton	7,8 M.-%
Wasser	2,7 M.-%

Gesamtporosität: 7,7 - 9 %

Gaspermeabilität der
Laborproben:
<10E-20 m²



Entscheidende Frage:

Sind die sehr guten Laborversuchsergebnisse hinsichtlich Porosität und Permeabilität auch großtechnisch umsetzbar (Upscaling-Effekt)?

1. **Feldversuch** 2013 in Österreich mittels Impulsverdichtung mit Terra-Mix-Verdichtungsstampfer (Stahlrohrversuch, schlagende Verdichtung)
2. **Feldversuch** 2014 im Bergwerk Sondershausen (Muldenversuche mit Rüttelverdichtung)
3. **Feldversuch 2015 in Steinbruch in Marxgrün (Nordbayern)**

2. Verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch

- Zwei Rezepturen eingesetzt:
 - Optimierte Rezeptur (OBSM) mit ca. 7,8 % Friedländer Ton
 - Klassische Mischung (EBSM) mit ca. 14,6 % Friedländer Ton

- Verringerung des Größtkorns des Salzgruses von 10 mm auf 4 mm verringert die Neigung zum Entmischung (beim Mischen und beim Einbau)

1. Gesenkversuch in Marxgrün

Herstellung und Vorbereitung des Gesenks - Ausgangssituation



Gesenk:
3,3 m Durchmesser
1,2 m Tiefe.



1. Gesenkversuch in Marxgrün

Versuchsdurchführung - Vorverdichtung



Leichte Vorverdichtung
mit Rüttelplatte (166 kg)

Schwere Vorverdichtung
mit Rüttelplatte (707kg)



Verdichtung spiralförmig in 2 Durchgängen von
Außen nach Innen.

Verdichtung mittels Terra-Mix Impulsverdichtung

Gesamtmasse 65 t

Fallhöhe bis 1,2 m

Fußdurchmesser 0,8 / **1,5** / 2 m

Fallmasse des Hammers 9t,

Fußgewicht 4 t

Zahl der Impulse 40 bis 60 pro min

Fallgewicht



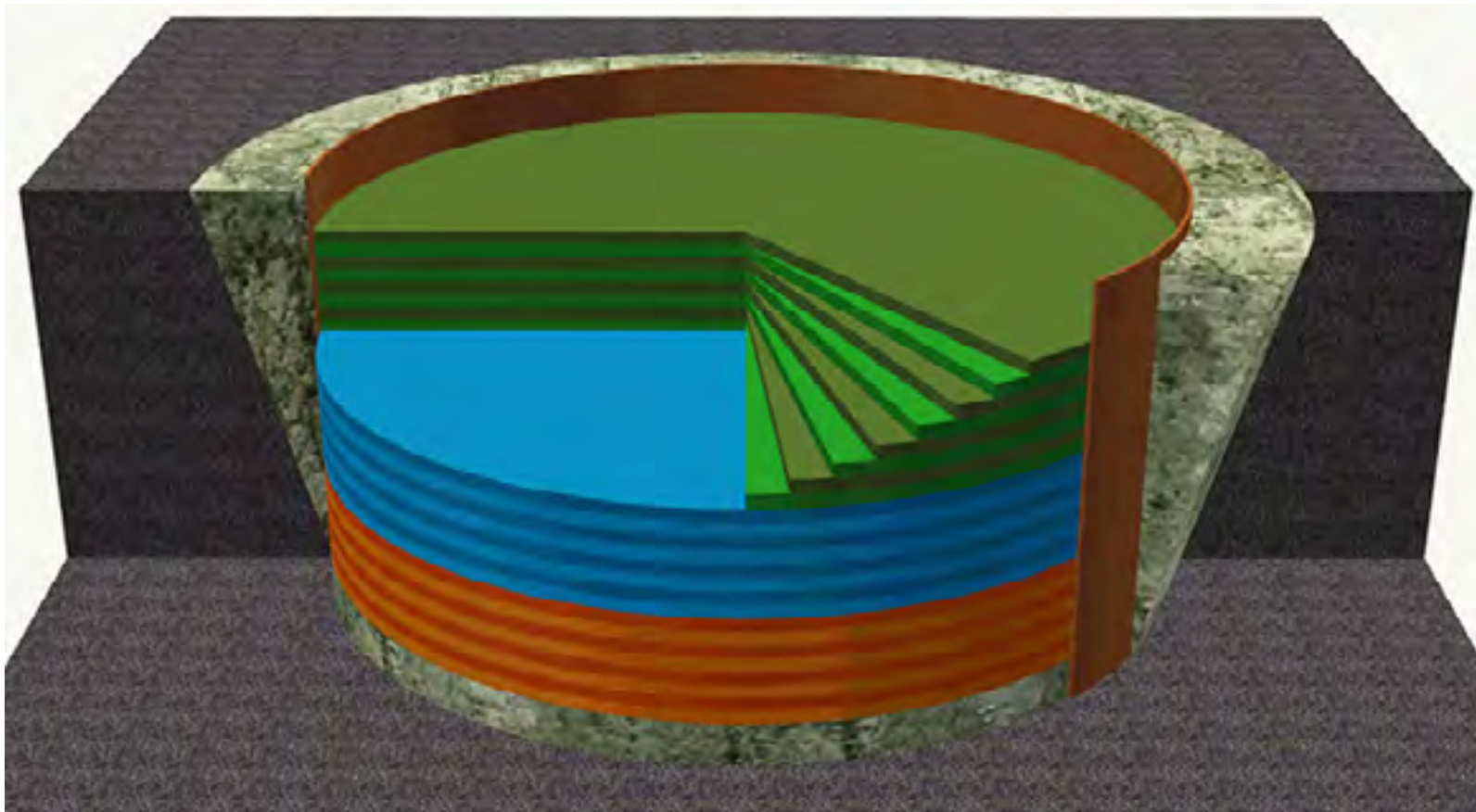
Schlaghaube



Verdichterfuß



Jede Schicht wurde mit der Impulsverdichtung mit ca. 15 MJ/m³ auf der jeweils 8. Lage endverdichtet.



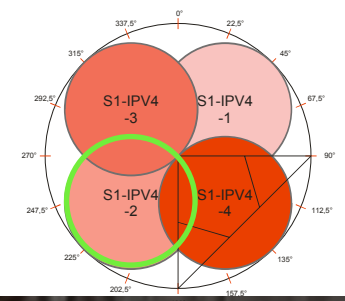
Die Impulsverdichtung erfolgte jeweils in 4 Durchgängen, wobei die Gesamtenergie von 15 MJ/m^3 aufgeteilt wurde.
 Durchmesser Verdichterfuß 150 cm

IPV1	IPV2	IPV3	IPV4
<p>9,1 % der Gesamtenergie</p>	<p>16,5 % der Gesamtenergie</p>	<p>24,8 % der Gesamtenergie</p>	<p>49,5 % der Gesamtenergie</p>
<p>28 Schläge mit 30 cm Fallhöhe</p>	<p>38 Schläge mit 40 cm Fallhöhe</p>	<p>38 Schläge mit 60 cm Fallhöhe</p>	<p>38 Schläge mit 120 cm Fallhöhe</p>

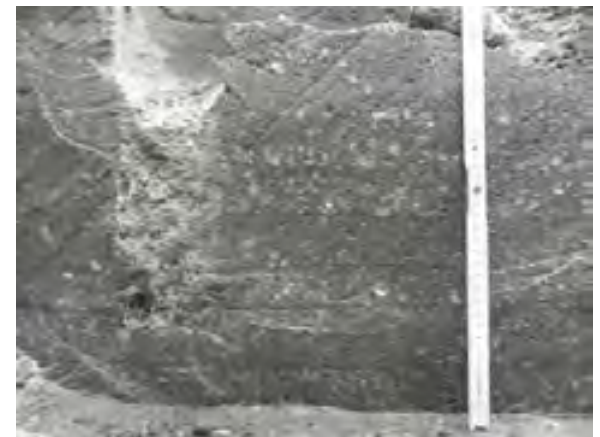
1. Gesenkversuch in Marxgrün

Versuchsdurchführung – Ablauf der Impulsverdichtung

Video von der Verdichtung IPV4 am 2. Ansatzpunkt auf der 1. Schicht



- Homogene Verdichtung erreicht
- Allerdings noch keine Verzahnung der einzelnen Lagen
- Ziel: keine oder nur geringe seitliche Auflockerungen erzeugen.



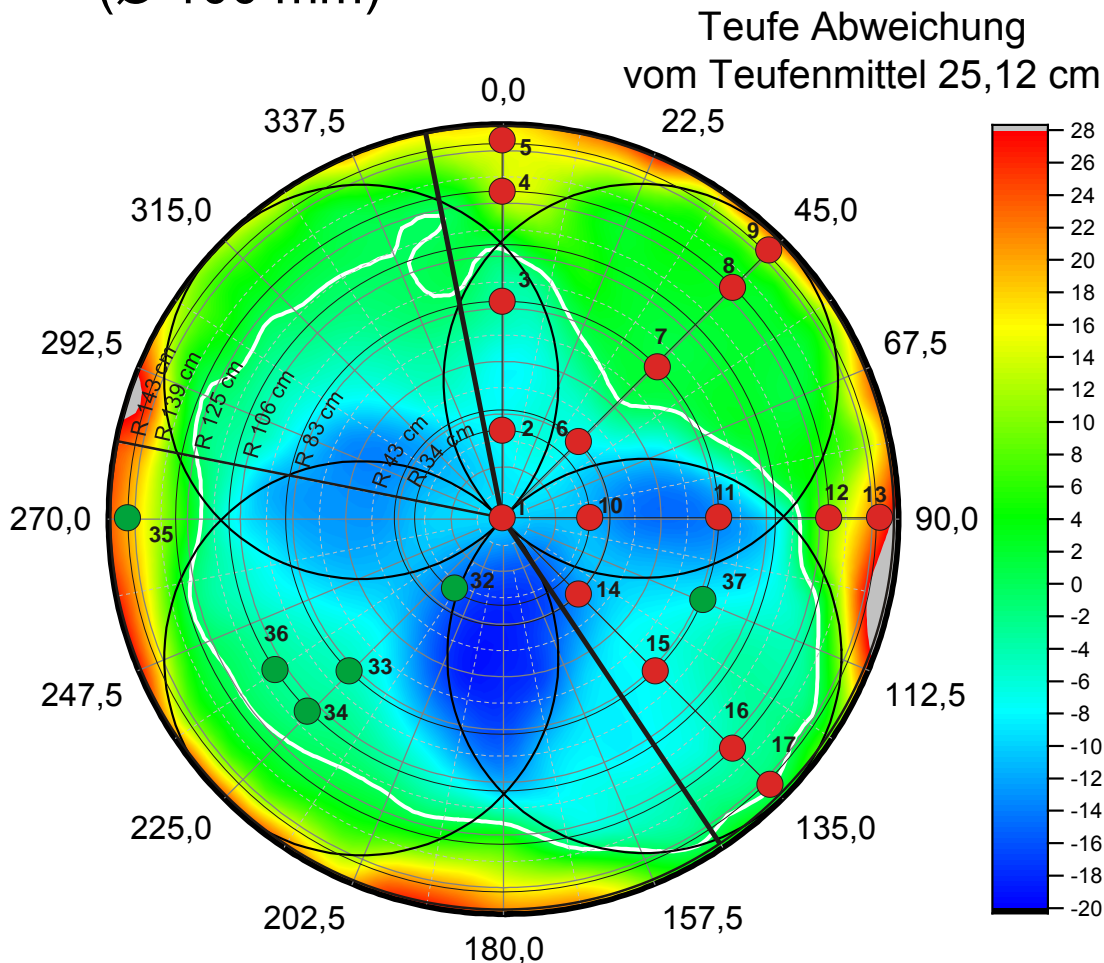
Insgesamt gelungen, aber trotzdem seitliche Verdrückungen.
Ab dem 2. Durchgang wurde das aufgelockerte Material händisch neu verteilt und mit der kleinen Rüttelplatte „angerüttelt“.



Umfangreiches **Bohrprogramm** mittels luftgespülter Trockenbohrungen (Ø 100 mm)



Umfangreiches **Bohrprogramm** mittels luftgespülter Trockenbohrungen (Ø 100 mm)



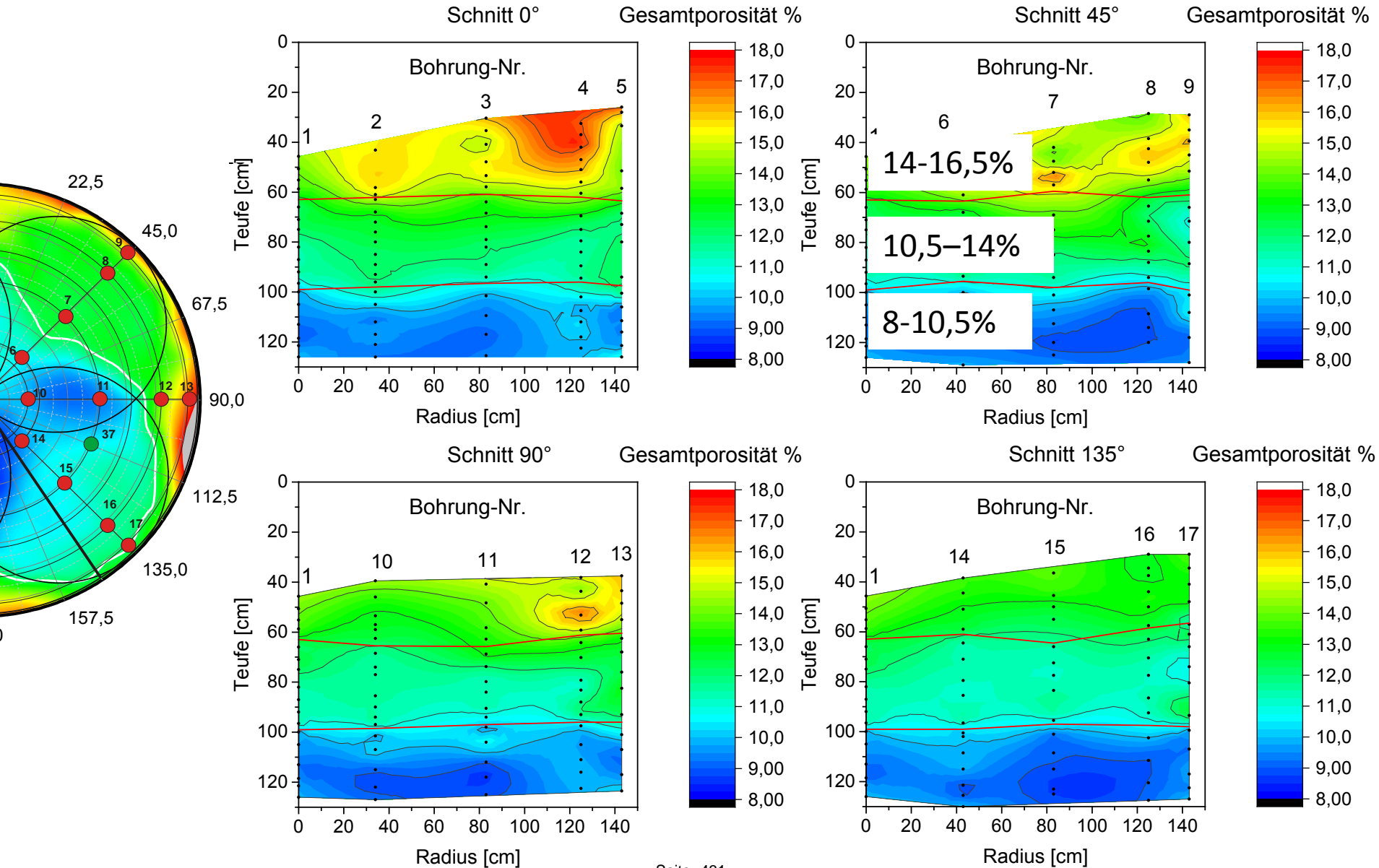
Untersuchungsprogramm:

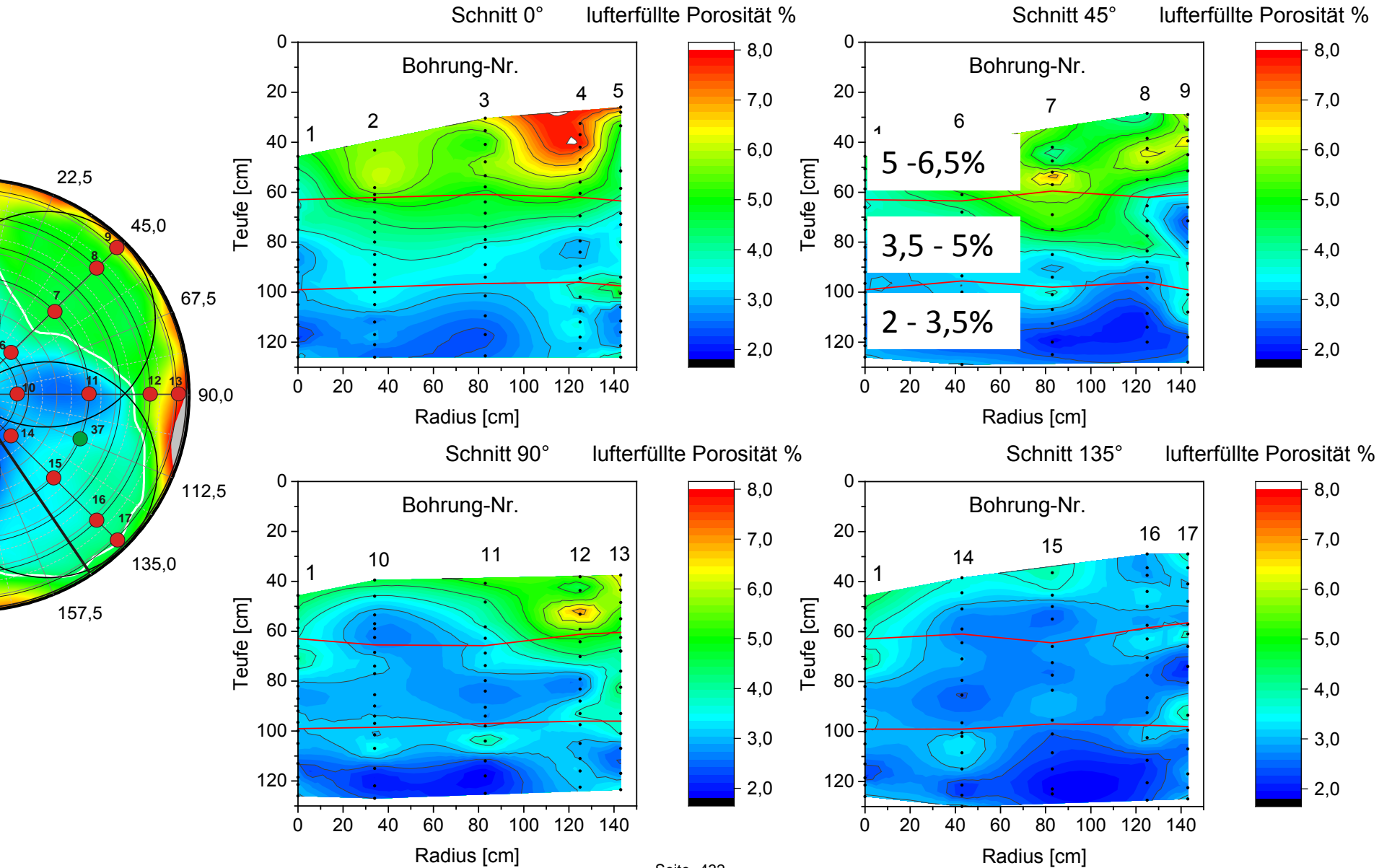
- Dichtemessungen (Tauchwägung)
- Dünnschliffe
- REM
- Permeabilitätsuntersuchungen noch ausstehend an Bohrkernen
- (an im Labor hergestellten Proben 10^{-19} m^2 bis $< 10^{-20} \text{ m}^2$)

Lagen und Schichten in Bohrkernen identifiziert und die Kerne in **262 Einzelproben** aufgeteilt .

Kennzeichnung der Lagen mittels Graphit, dadurch wurde zusätzlich die Spaltung der Kerne an den Lagen- bzw. Schichtgrenzen unterstützt.









1. Gesenkversuch in Marxgrün Ergebnisse



Ergebnisse:

- 1. Im unterer Bereich Gesamtporositäten von 8 bis 10 % erreicht (extrem niedrig!)**
- 2. Luftefüllte Porosität ca. 2 bis 3,5 % (extrem niedrig!)**
- 3. Permeabilitätsmessungen noch ausstehend**
- 4. Unterer Bereich auch auf Grund der überlagernden Schichten und des festen Auflagers so stark verdichtet**

Ausblick:

- Entwicklung eines im Schacht einsetzbaren Impulsverdichters (Zusammenarbeit TerraMix – BSP International Foundations – TS-Bau)
- Baukastenprinzip unter Verwendung vorhandener Baugruppen:
 - Fallgewicht: 1000 ... 5000 kg
 - Leichtbauweise, Bergbauzulassung

→ **Wiederholung des in situ Versuches in Marxgrün mit dem neuen Gerät im Sommer 2017**

→ **Ziel: Verdichtungsversuch im Schacht**


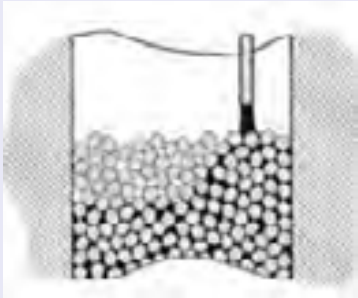
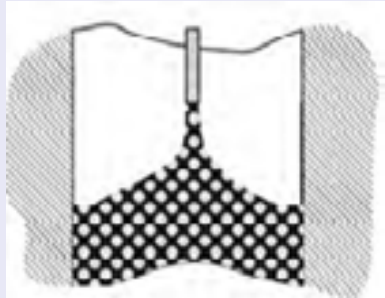




2. Dichtelemente aus Bitumen / Asphalt



2. Dichtelemente aus Bitumen und Asphalt

System	HSWK: Harte Schale - Weicher Kern	Bitumen verfüllte Schottersäule	Asphalt mit Rundkorn ("selbstverdichtend")
Funktion	Dichtung	Dichtung und Lastabtrag	Dichtung und Lastabtrag
Design			
Material	Destillations- und Oxidationsbitumen	Basaltschotter 32 / 63 mm + Destillationsbitumen	Abgerundeter Basaltschotter 20 / 40 mm + Bitumen
Status	In situ Bohrlochversuche im Steinsalz (ELSA)	<ul style="list-style-type: none"> • Großversuch im BISETO-Projekt, (Auftrag des BfS für das ERAM) • In situ Bohrlochversuch im Steinsalz (ELSA) • „Gesenkversuch“ im ERAM 	In situ Bohrlochversuch im Steinsalz (ELSA)

2. Dichtelemente aus Bitumen / Asphalt

Entscheidende Fragen:

- a) **Benetzung der Kontur und des Schotters**
- b) **Eindringung des Bitumens in die Kontur**

1. Die **Kontraktion des Bitumens/Asphalts** bei der Abkühlung darf nicht zu einem Abreißen des Bitumens /Asphalts von der Kontur führen.
2. Reicht die **Temperatur** des Bitumens/Asphalts beim Einbau für eine ausreichende **Benetzung**?
3. Ist der Stoß vom **Staub** und **Feuchtigkeit** so gereinigt, dass eine Benetzung von Bitumen /Asphalt überhaupt stattfindet?
4. Reicht die **Temperatur** des Bitumens/Asphalts beim Einbau für eine **Eindringung in Mikrorisse**?
5. **Voranstrich ja/nein** ? (Voranstrich verbessert die Benetzung der Kontur, verhindert aber später das Eindringen des heißen Bitumens in Mikrorisse)

Die genannten Fragen zu Staub, Feuchtigkeit und Temperatur gelten auch für die Benetzung der Gesteinskörnungen im Asphalt. Deshalb Entwicklung eines schüttfähigen „**Asphaltes mit Rundkorn**“ („selbstverdichtend“).

Laborversuche zu Bitumen / Asphalt

- Bitumenvoranstrich zur Haftungsverbesserung

U. Glaubach, M. Gruner, M. Hofmann:

Voranstrich Patentschrift DE 102008050211

(bestehend aus Hydroseal (Paraffinöl) und Bitumen)

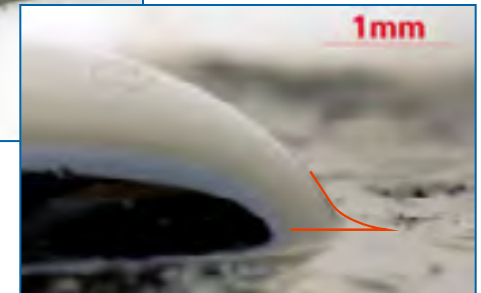
Ohne Voranstrich:



Mit Voranstrich: bessere Benetzung



Salzstücke
langsam
auseinander
gezogen,
 $\sigma = 10 \text{ Pa}$



Ziel: Verringerung des Benetzungswinkels

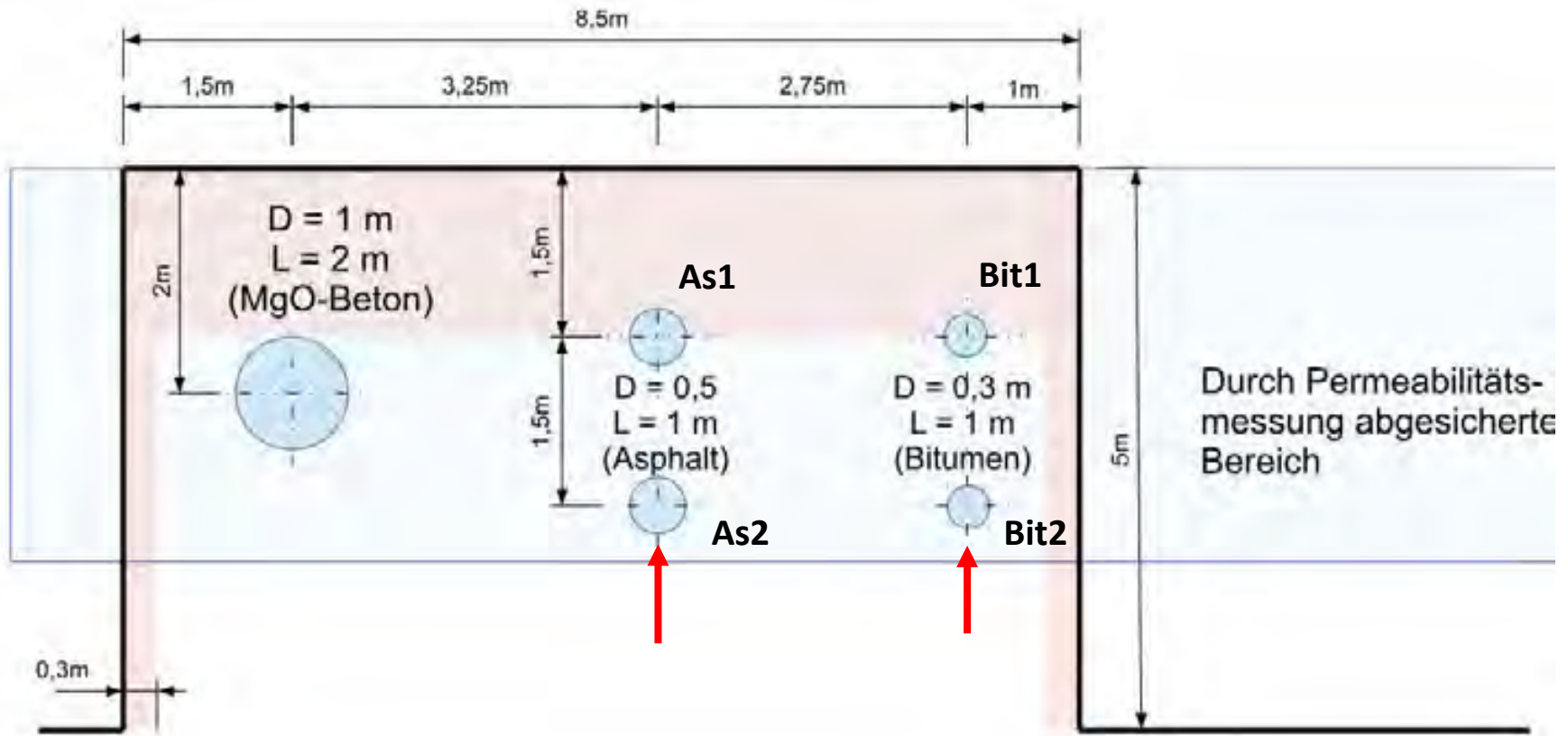
Modifizierung der bitumenverfüllten Schottersäule:

- Vergleich verschiedener Schottersorten
- Schüttversuche mit Schotter
- Optimierung des Bitumengehaltes
- Druck-Setzungs-Versuche (Schotter und beschichteter Schotter) (Rundkorn hat größere Steifigkeit als Brechkorn!)

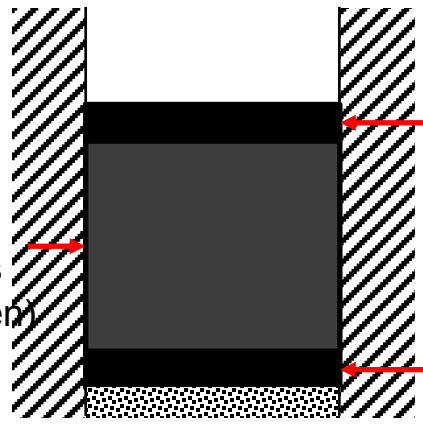
Neue Asphaltrezeptur mit Rundkorn (= Bitumen-Schotter-Gemisch)

- Im in situ Versuch erprobt





Bei den Versuchen Bit1, Bit2, As1, As2 initiale Permeabilitätsmessung mit Gas.
 Bei den Versuchen Bit1, Bit2, As1, As2 effektive Permeabilitätsmessung mit Gas nach Einbau Dichtelement.
 Bei den Versuchen As1 und As2 Permeabilitätsmessung teilweise noch ausstehend.



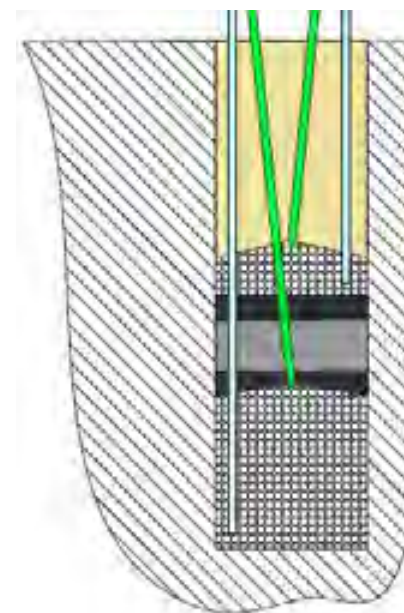
"Weicher Kern":

- Destillationsbitumen
- (oder Asphalt auf Basis von Destillationsbitumen)

"Harter Schale"

- Oxidationsbitumen
- (oder Asphalt auf Basis von Oxidationsbitumen)

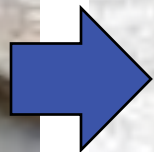
Bitumenanstrich auf der Kontur der Dichtung



In situ Test im ELSA-Projekt:

- Bohrlochversuche Bit1 und Bit 2 (D = 0.3 m)
- Initiale Permeabilität des Steinsalzes bei zwei Versuchen:
 - $6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ (Gas) und $5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ (Gas)
- Effektive Permeabilität des Gesamtsystems:
 - $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (Gas) und $6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (Gas)
 - $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (NaCl-Lösung)

Überbohrter Kern (D = 0,5 m)
nach Gasdruckbeaufschlagung



"Harte Schale"
(Oxidationsbitumen)

"Weicher Kern"
(Destillationsbitumen)



Versuch mit Voranstrich

Halbtechnische Versuche mit Bitumen

- Rückbau eines Bohrlochversuches HSWK – **Bit 1**

1,2 bar Überdruck über 80 Tage

10 bar Überdruck über 23 Tage

Permeabilität bei beiden Druckstufen $<10E-20 \text{ m}^2$



Oxidationsbitumen ca. 15
s 20 mm in Kontroll-
ammer eingedrungen

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

Gasblase in Größenordnung
100 cm³

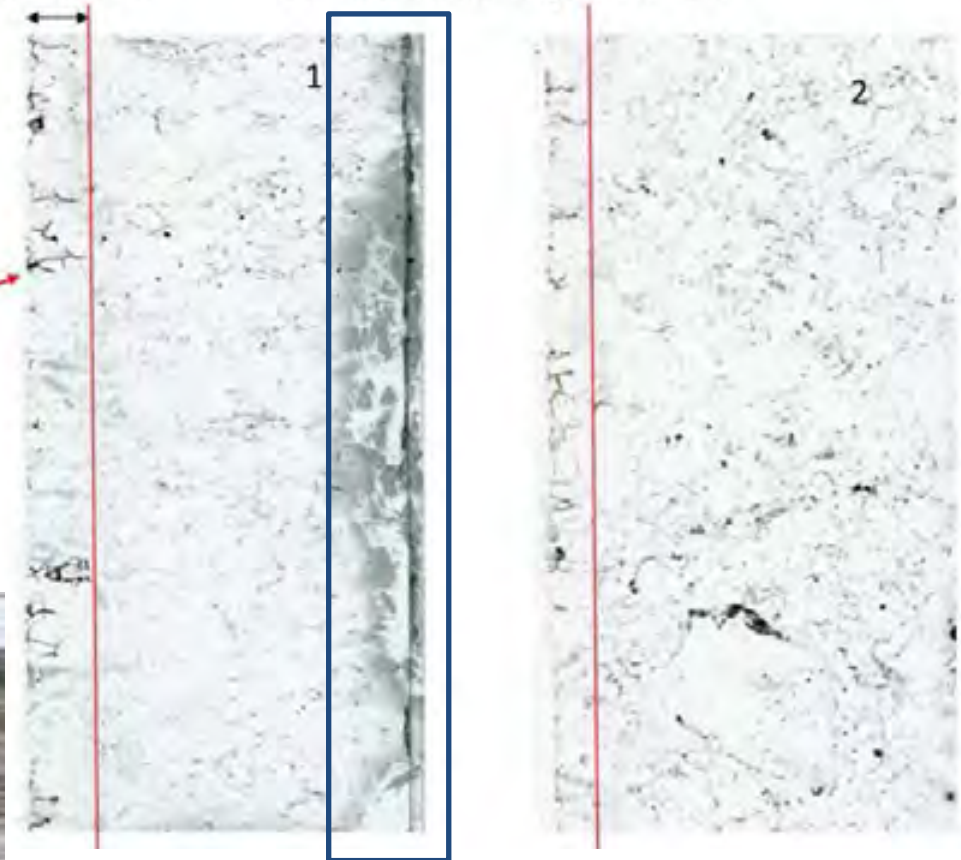
Das Oxidationsbitumen hat
sich während des Versuchs
von der Kontur gelöst
(Gaseinschlüsse)

Eindringen von Bitumen in der Kontaktzone und in der ALZ (im Steinsalz)

Bitumen (Dest.) in feine Risse eingedrungen

max. 0,5 cm

Bohrlochkontur ist jeweils links



Nicht relevant, Verfärbung durch Präparation



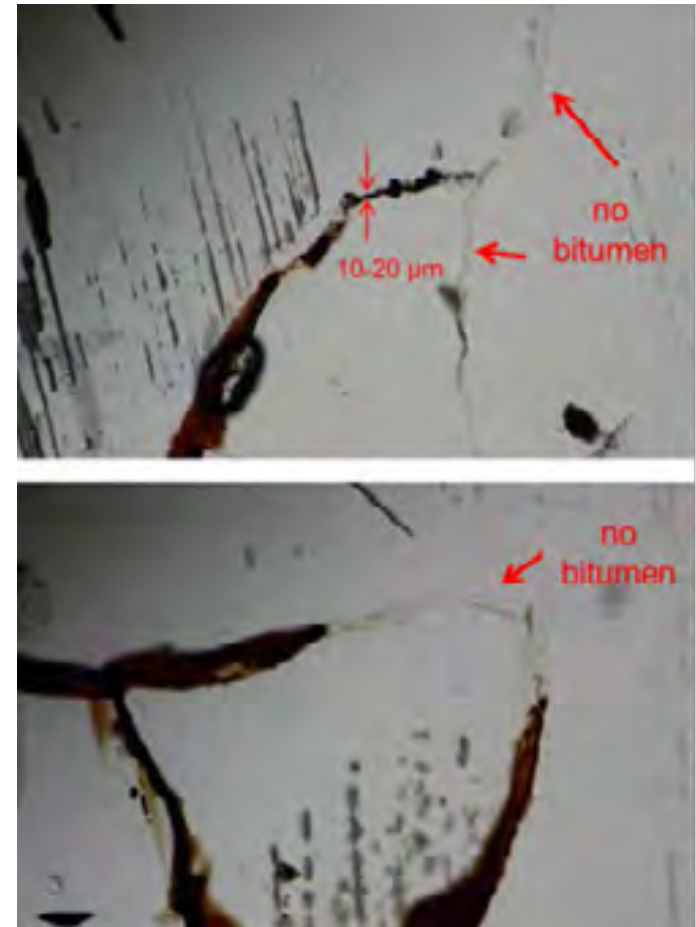
Halbtechnische Versuche

Eindringen von Destillationsbitumen in die Kontaktzone und in die ALZ (im Steinsalz)

Steinsalz-Konutur



- Eindringen unter Druck
- Alle Mikrorisse im Konturbereich sind ausgefüllt
- Rissenden luffterfüllt
- Mit Modellrechnungen kann Eindringung des Bitumens ermittelt werden. (Viskosität: 10^7 mPas bei bei 20°C)



Voranstrich oder Bitumen ??

Ergebnisse aus Dünnschliffen:

- Das Destillationsbitumen ist bis max. 5 mm in den etwas aufgelockerten Saumbereich des Steinsalzes eingedrungen. Viel größer scheint die ALZ am Versuchsort auch nicht zu sein.
- Feine Risse bis in den 10-ner μm -Bereich werden vom Bitumen (ev. vom Voranstrich) verfüllt.
- Kleine Resthohlräume am inneren Rand der ALZ verbleiben lokal. Vermutlich ist das Bitumen dort bereits zu kalt bzw. zu dickflüssig für eine vollständige Ausfüllung.



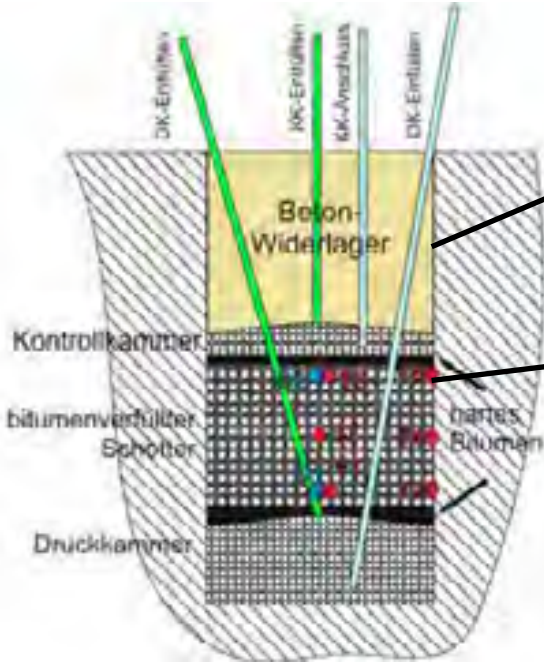
Ein höhere Temperatur erhöht die Eindringung in das Steinsalz

→ „**Schotter-Bitumen Gemisch aus Rundkorn**“

- Bohrlochversuch Bitumen verfüllter Schottersäule – AS1

- D = 0,5 m, H = 1,0 m
- Basaltschotter 32 / 63 mm
- Einbaudichte 1,708 g/cm³
- Einbau Destillationsbitumen AZALT 70/100 bei 170 °C
- Sperrschicht aus Oxidationsbitumen STELOX 85/25

Initiale Permeabilität des Steinsalz: $2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2 \text{ (Gas)}$
 Effektive Permeabilität des Systems: $4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ (Gas)}$

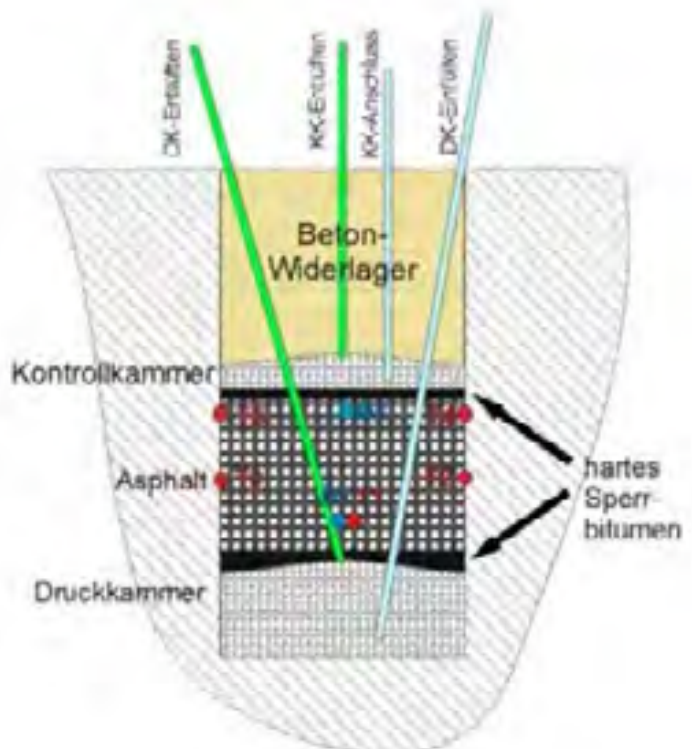


**Temperatur an Kontur
 nur 60° bis 70° C**

2. Halbtechnische Versuche mit Asphalt

- Bohrlochversuch mit **neuer Asphaltrezeptur (Rundkorn) – As2**

- D = 0,5 m, H = 1,0 m
- Saxorund 20/40 (abgerundet) + Destillationsbitumen AZALT 70/100
- Einbau bei 140 °C
- Sperrschichten aus Oxidationsbitumen STELOX 85/25
- Permeabilitätsmessungen begonnen



Temperatur zwischen 110°C und 130°C an der Kontur bei neuer Asphaltrezeptur !!

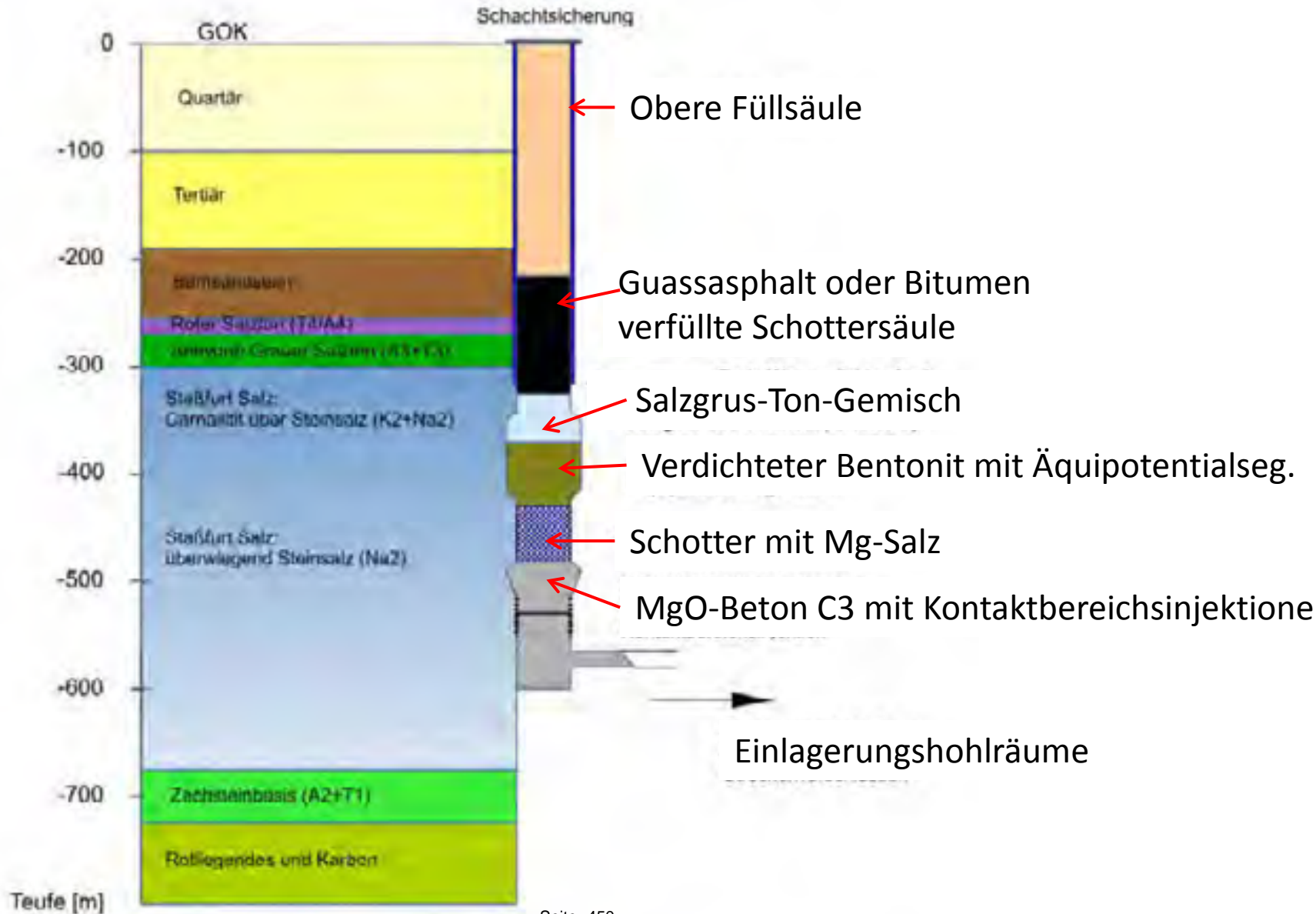


3. Weitere Arbeiten in ELSA 2

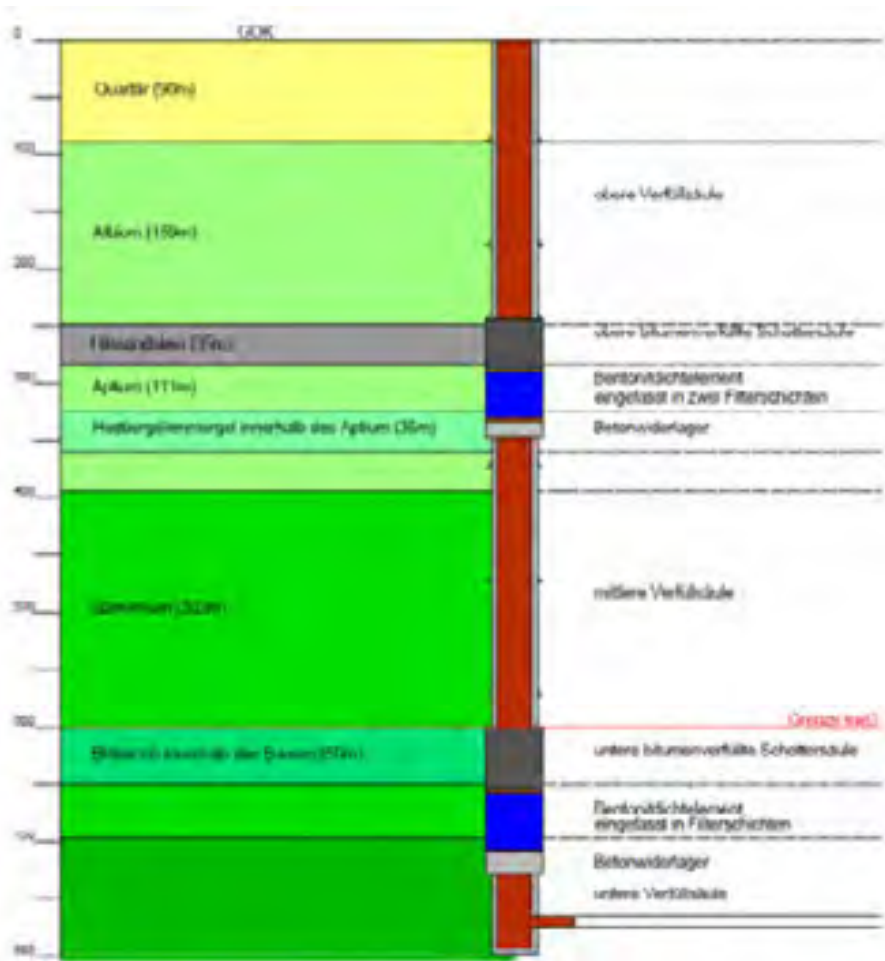


3. Weitere Arbeiten in ELSA 2

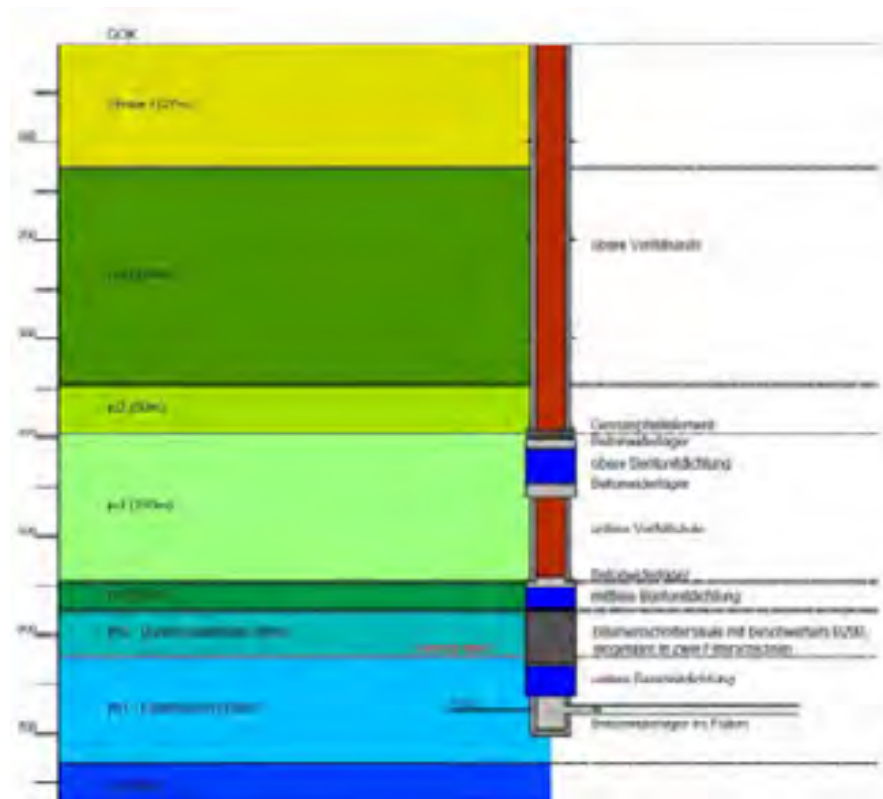
Schachtverschlusskonzept für HAW-EL im Steinsalz (Flache Lagerung)



Standortmodell Nord



Standortmodell Süd



MgO-Beton in situ Test im Steinsalz

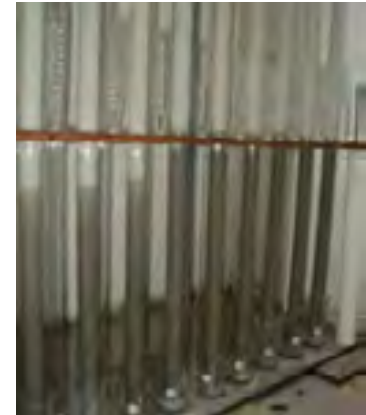
- D = 1 m, L = 2 m
- Von 6/2014 bis 1/2016
- Rückbau und Bohrkerngewinnung
- Untersuchungen noch nicht abgeschlossen
- Rezeptur:

Aktives MgO	6,75 %
MgCl ₂ -Lösung	15,83 %
Gesteinskörnung (incl. Quarzmehl)	77,42 %



3. Weitere Arbeiten in ELSA 2

Laborversuche zur Optimierung der Äquipotenzialsegmente



Halbtechnischer Versuche HTV-4 zum Test des Gesamtsystems



Geomechanische und hydraulische Modellrechnungen zu Schottersäulen im Tonstein

4. Zusammenfassung (1)

1. Für ein "**Verdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch**" wurde die technische Realisierbarkeit und die Übertragbarkeit der Laboruntersuchungen auf einen technischen Maßstab an der Geländeoberfläche gezeigt.

2. Ein **im Schacht einsetzbares Verdichtungsgerät** soll 2017 entwickelt werden, weitere Verdichtungsversuche sind geplant.

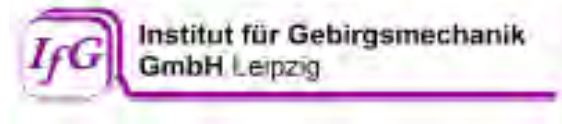
3. In situ **Bohrlochversuche im Steinsalz** mit
 - a) **Bitumen** und
 - b) „**Bitumen verfüllter Schottersäule**“ und
 - c) einer **neu entwickelten „Schotter-Bitumen-Gemisch“**Dichtheitsnachweis durch in situ Permeabilitätsmessungen erbracht; Gasblasen bedürfen weiterer Untersuchungen.

4. **Bitumen penetriert in die Wegsamkeiten** der ALZ im Salz und dichtet die Saumzone ab (im Versuch ca. 5 mm Eindringung), je höher die Temperatur, umso weiter die Eindringung, deshalb **neue Schotter-Bitumen-Rezeptur weiter untersuchenswert.**
5. Erste halbtechnische in situ Erprobung des neuen **MgO-Ortbetons C3**
6. Halbtechnische Versuche mit **Bentonitdichtsystemen mit Äquipotenzialsegmenten** (HTV 4) erfolgreich – Fortsetzung der Arbeiten im Felslabor Mont Terri vorgesehen
7. **Ausblick:** Weiter halbtechnische Versuche auch im Tonstein im Rahmen von ELSA3 geplant

Dank an den Projektträger PTKA und das BMWi



Projektpartner



Simulation dichtegetriebener Grundwasserströmungen

Gabriel Wittum, G-CSC, Universität Frankfurt

Das Grundwasser, das existierende oder geplante Endlager umgibt, ist das entscheidende Transportmedium für evtl. austretende Schadstoffe. Sobald Grundwasser mit dem eingelagerten Schadstoff in Berührung kommt, wird dieser gelöst und mit der Strömung transportiert. Auch wenn heute das Konzept des sicheren Einschlusses bei der Planung eines Endlagers für radioaktive Abfälle verfolgt wird, existieren bereits Lager im Salz, bei denen genau diese Problematik auftreten kann, wie etwa die WIPP-Anlage in den Vereinigten Staaten.

In Zusammenarbeit mit der GRS wird die Simulationssoftware d^3f++ weiterentwickelt, die die Berechnung dichtegetriebener Grundwasserströmung auch bei starker Dichteabhängigkeit ermöglicht. Der Entwicklung zu Grunde liegt das Modell:

$$\frac{\partial(n\rho(c))}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(c)\vec{v}) = Q_s(c),$$

$$\frac{\partial(n\rho(c)c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(c)(c\vec{v} - \mathbf{D}\nabla c)) = Q_c(c),$$

mit der Geschwindigkeit $\vec{v} = -K/\mu(c)(\nabla p - \rho(c)\vec{g})$, der Dichte $\frac{1}{\rho} := \left(1 - \frac{c}{c_{\max}}\right) \frac{1}{\rho_f} + \frac{c}{c_{\max}} \frac{1}{\rho_m}$, der Dispersi-

on $\mathbf{D}(\vec{v}) := D_m \mathbf{I} + \alpha_l |\vec{v}| \mathbf{I} + (\alpha_t - \alpha_l) \vec{v} \vec{v} / |\vec{v}|$, der Salzkonzentration c , der Porosität n , der Leitfähigkeit K , der Viskosität μ , der Gravitation g , der molekularen Diffusion D_m und den longitudinalen und transversalen Dispersivitäten α_l und α_t nach Scheidegger.

Die Software d^3f++ basiert auf dem Simulationssystem MIG^4 , das parallele adaptive Mehrgitterverfahren zur Lösung von Systemen partieller Differentialgleichungen zur Verfügung stellt. Adaptive parallele Mehrgittermethoden sind Verfahren optimaler Ordnung, die für sehr große Rechnungen mit sehr hoher Auflösung konkurrenzlos sind. Allerdings ist deren Umsetzung sehr schwierig. Bislang ist dies ein Alleinstellungsmerkmal des Simulationssystems MIG . Diese Methoden kommen in d^3f++ zum Einsatz. d^3f++ wurde in einer Reihe von Projekten in Zusammenarbeit mit der GRS, den Universitäten Jena und Freiburg und anderen entwickelt. Neben der Entwicklung der Software haben diese Projekte erheblich zur Förderung wissenschaftlichen Nachwuchses beigetragen. So sind inzwischen 6 Professoren, über 20 Promotionen und ungezählte Abschlußarbeiten aus den Projekten hervorgegangen.

Im Vortrag stellen wir Modell und numerische Methoden vor. Dann zeigen wir Vergleiche verschiedener Löseransätze für nichtlineare Systeme partieller Differentialgleichungen. Da ist zunächst einmal das voll gekoppelte Newton-Verfahren wie wir es schon lange einsetzen. Vereinfachungen sind das Block-Jacobi-Verfahren, das von FEFLOW verwendet wird und das Block-Gauß-Seidel-Verfahren, das in MODFLOW zum Einsatz kommt. Abb. 1 zeigt die deutliche Überlegenheit des vollen Newton-Ansatzes, [Nä 15].

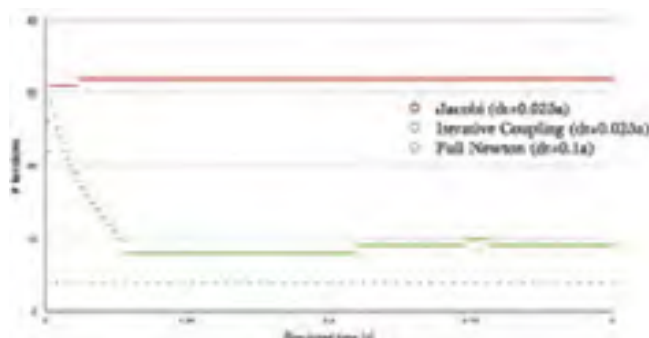


Abb. 1: Comparison of solvers for non-linear systems of partial differential equations.

Da ist einerseits das klassische implizite Vorgehen mit innerem Newton-Mehrgitter-Verfahren, andererseits das linear implizite Verfahren mit Extrapolation und adaptiver Zeitschrittweite (LIMEX) nach Deuffhard et al., [Dd 87]. Letzteres zeigt ein deutlich besseres Konvergenzverhalten gerade bei den kritischen Problemen der dichtegetriebenen Strömung. Abb. 2 zeigt die Zeitschrittweite und die Konvergenzrate für eine Rechnung über 10.000 Jahre. Das LIMEX-Verfahren zeigt ein sehr gutes und robustes Konvergenzverhalten.

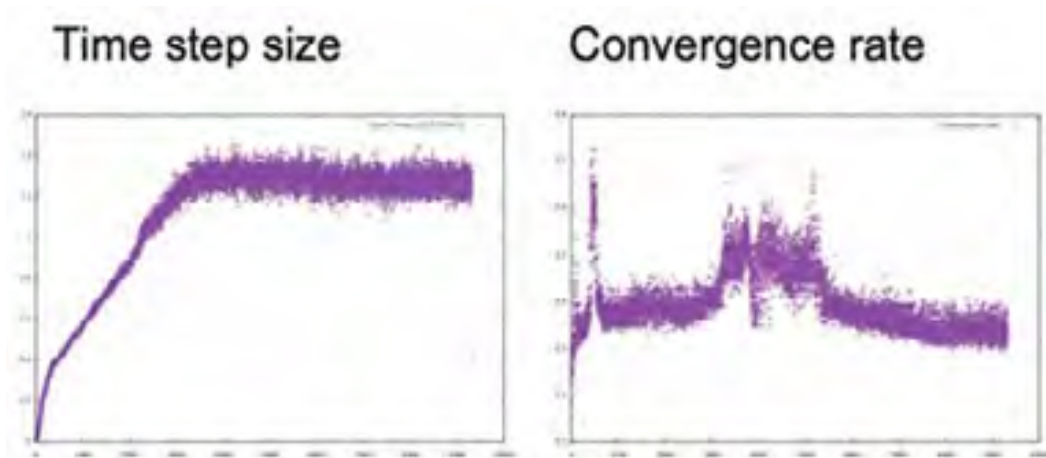


Abb 2: Zeitschrittweite und Konvergenzrate für eine Beispielrechnung über 10.000 Jahre.

Zudem stellen wir erste Ergebnisse einer Beispielrechnung für eine WIPP-Konfiguration vor. Nach der Entwicklung angepasster Rechengitter ist es nun möglich, die Strömung über 100.000 Jahre zu simulieren. Abb 3 zeigt Schichtstruktur, Gitter und den Verlauf der Konzentration nach 10.000 Jahren gerechneter Zeit.

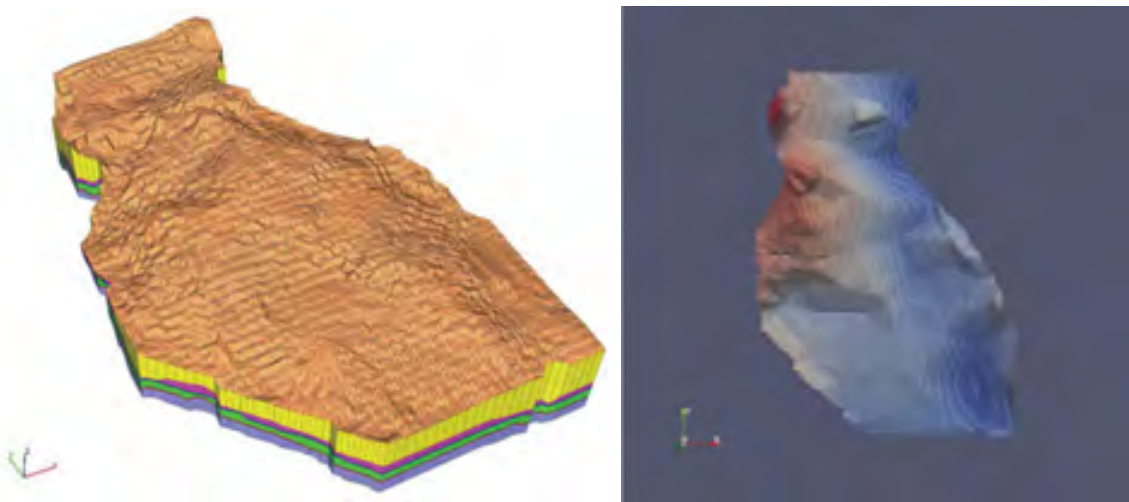


Abb 3: Schichtstruktur und Gitter (links) und Konzentrationsverlauf der WIPP-Konfiguration (vorläufige Rechnung)

Reference:

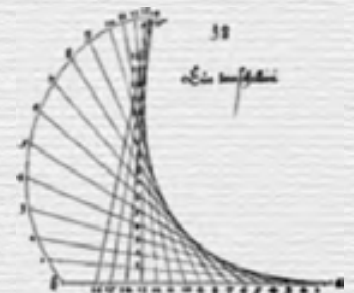
- [Dd 87] Deuffhard, P., Hairer, E., and Zugck, J., Numer. Math. 51, pp. 501-516 (1987).
- [Nä 15] Nägel, Arne; Vogel, Andreas; Wittum, Gabriel: Evaluating Linear and Nonlinear Solvers for Density Driven Flow. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015.

Simulation dichtegetriebener Grundwasserströmungen

Arne Nägel, Sebastian Reiter, Andreas Vogel, Gabriel Wittum
G-CSC, Univ. Frankfurt



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



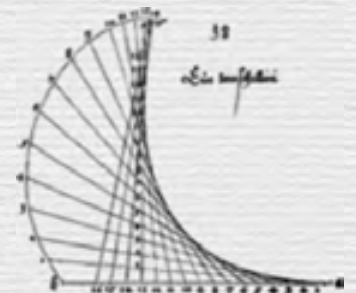
Modeling

The fundamental laws necessary for the mathematical treatment of a large part of physics and the whole of chemistry are thus completely known, and the difficulty lies only in the fact that application of these laws leads to equations that are too complex to be solved.

P.A.M. Dirac (1927)



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt

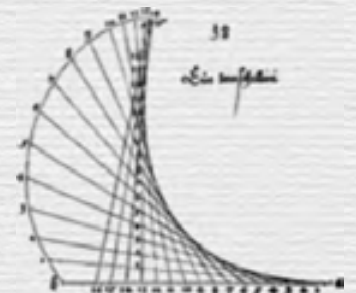


Modeling

- „Man soll die Dinge so einfach machen wie möglich, aber nicht einfacher.“ (Einstein)



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Modeling and Simulation

Mathematical Model

System of differential equations

Numerical approximation

Numerical methods
discretisation and solver

Software Tools

Hardware



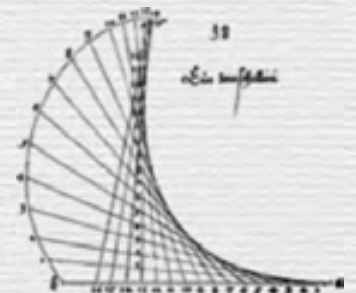
Applications, Mathematics

Numerics

Computer Science



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Modeling and Simulation

Mathematical Model

System of differential equations

Numerical approximation

Numerical methods
discretisation and solver

Software Tools

Hardware



Mapping Reality

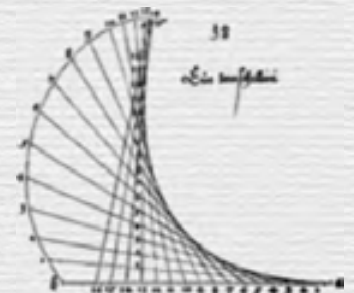
Errors,
Complexity

Complexity,
Flexibility, ...

Limiting Resource

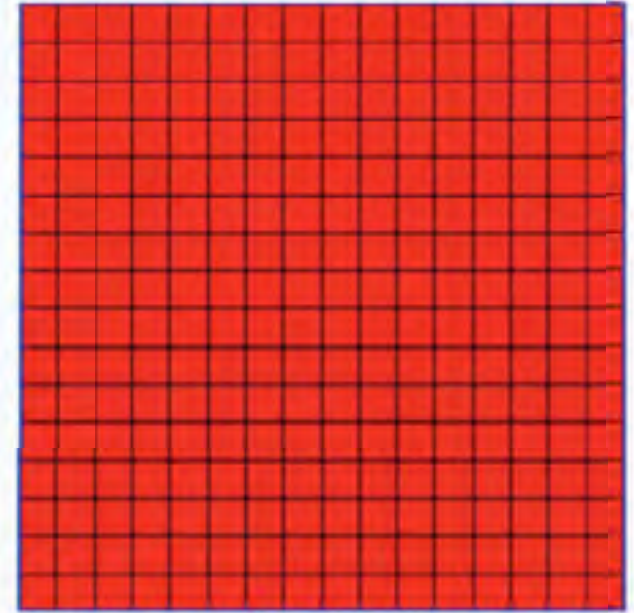
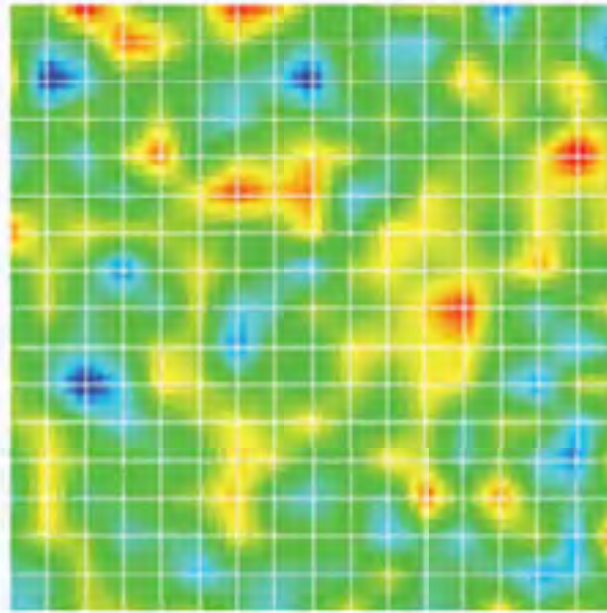


Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt

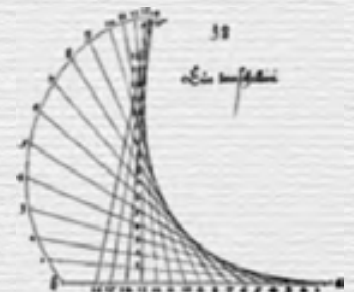


Adaptivity

- Refine grid where needed



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Complexity - HPC Paradoxon

Algorithm complexity: Execution time $E = O(n^q)$, $q > 1$

Buying a new computer: On a new i.e. larger and faster computer, larger problems will be computed. Assume the new computer is a factor $\alpha > 1$ faster and larger than the old one. To compute a problem of size $\alpha \cdot n$, the new computer needs

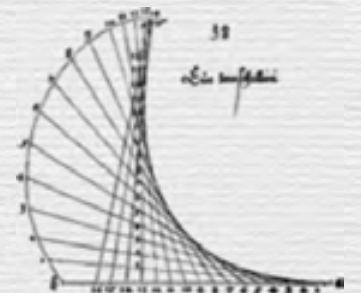
$$O(\alpha^q \cdot n^q) = \alpha^{(q-1)} \alpha E .$$

The larger and faster the computer becomes, the longer the execution time will be!

Large scale computing needs $q=1$ i.e. optimal algorithms!



Gabriel Wittum
G-CSC, Uni Frankfurt



LARGE SCALE SIMULATION

Adaptivity

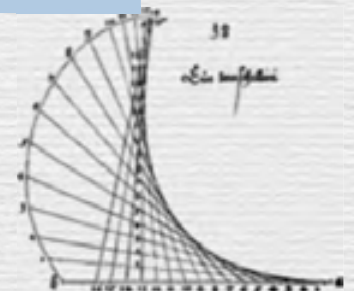
Parallelism



Robust Multigrid



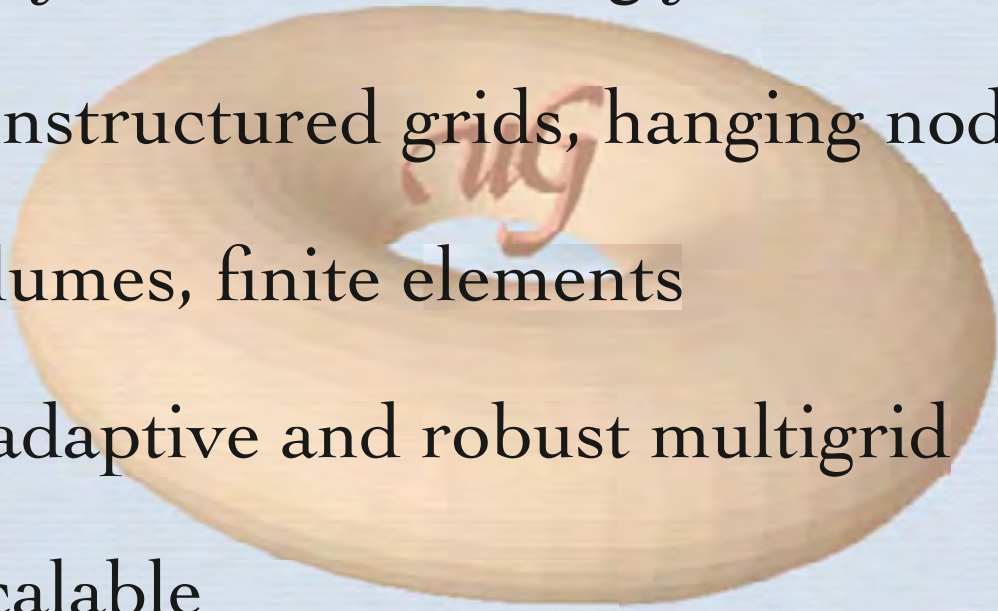
Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



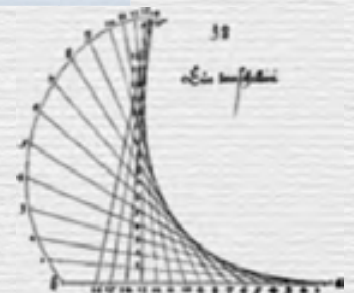
UG4

I. Heppner, A. Nägel, S. Reiter, M. Rupp, A. Vogel

- completely new code, strongly modularized
- hybrid unstructured grids, hanging nodes
- finite volumes, finite elements
- parallel adaptive and robust multigrid
- highly scalable
- GMG, FAMG as separate module

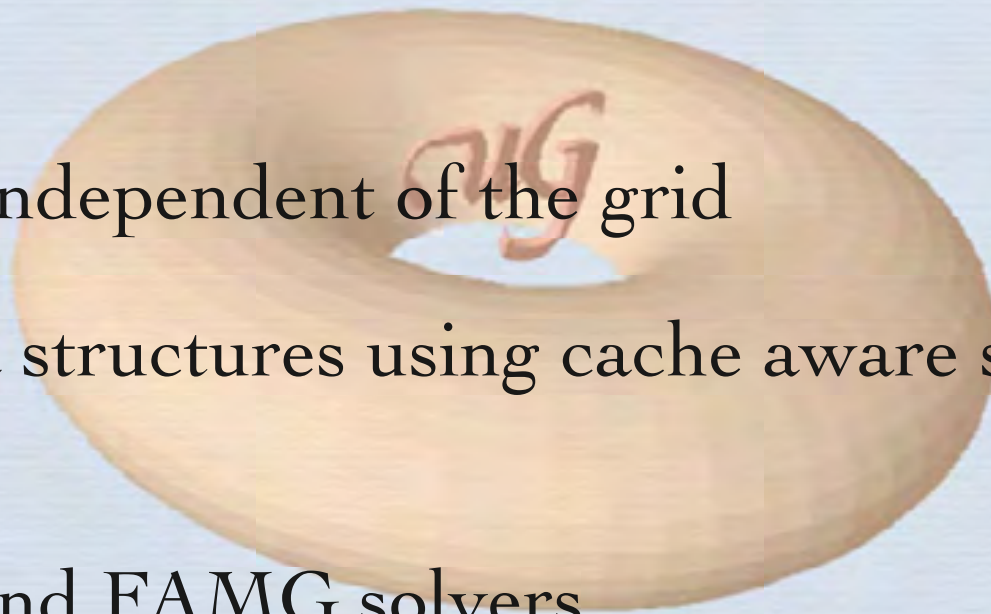


Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt

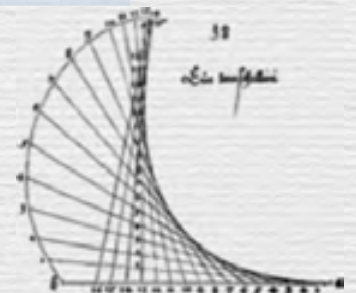


MG4 Solver

- Solver independent of the grid
- Algebra structures using cache aware storage (CRS)
- GMG and FAMG solvers



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



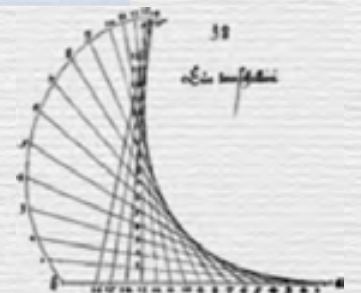
UG4

I. Heppner, M. Hoffer, A. Nägel, S. Reiter, M. Rupp, A. Vogel

- efficient parallel data migration via MPI-based Parallel Communication Layer (PCL) (Reiter, W. 2012)
- Tool for gridding: ProMesh (Reiter, W. 2013)
- GUI based on VRL (Hoffer, W. 2013)



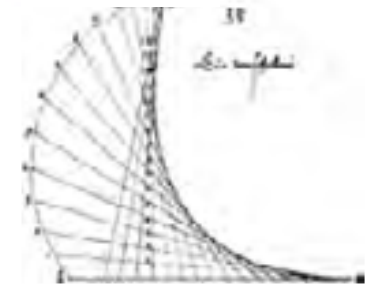
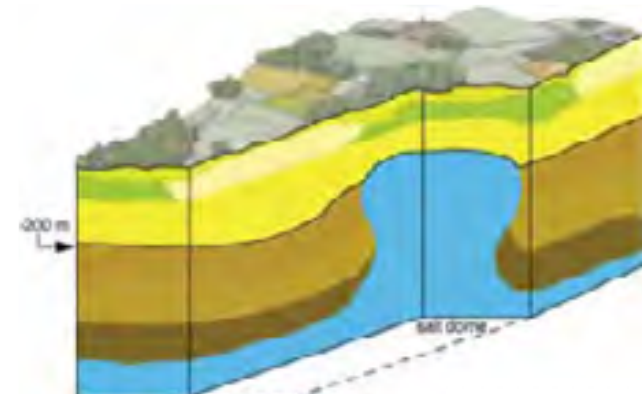
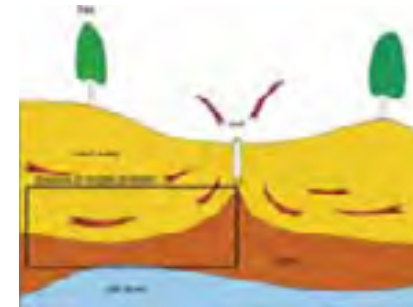
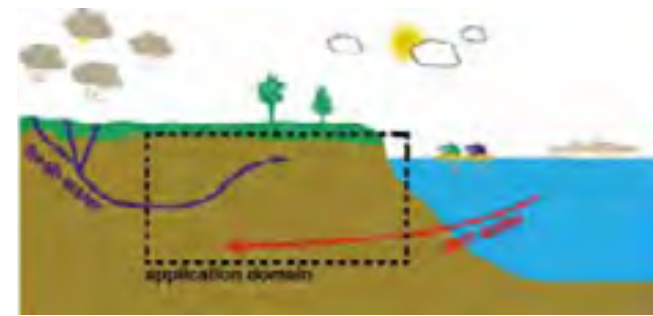
Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



DISTRIBUTED DENSITY DRIVEN FLOW

D³F

- Saltwater intrusion
- Upconing
- Flow around salt domes



D³F

- Distributed Density Driven Flow

$$\frac{\partial(n\rho(c))}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(c)\vec{v}) = Q_F(c);$$

$$\frac{\partial(n\rho(c)c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(c)(c\vec{v} - \mathbb{D}\nabla c)) = Q_c(c)$$

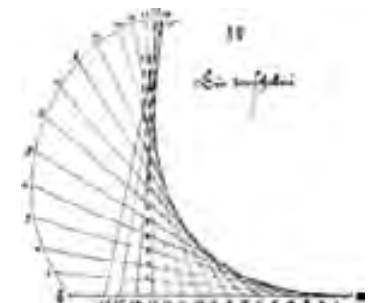
+ b.c.; with $\vec{v} = -K/\mu(c)(\nabla p - \rho(c)\vec{g})$;

$$\mathbb{D}(\vec{v}) := D_{in}\mathbb{1} + \alpha_t|\vec{v}|\mathbb{1} + (\alpha_t - \alpha_t)\vec{v}\vec{v}/|\vec{v}|,$$

$$\frac{1}{\mu} := \left(1 - \frac{c}{c_{max}}\right) \frac{1}{\mu_f} + \frac{c}{c_{max}} \frac{1}{\mu_s}$$

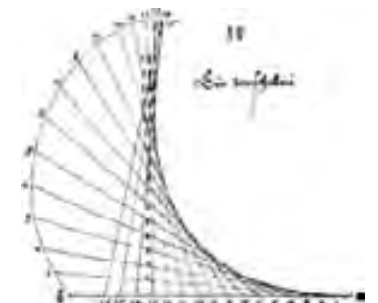


GABRIEL WITTUM
G-CSC, UNI FRANKFURT



D³F

- Distributed Density Driven Flow (**d³f**)
Solver for density driven flow based on *UG3*, 1999
- Radionuclides, Reaction, Retardation and transport (**r³t**), based on *UG3*, 2004
- Distributed Density Driven Flow ++, (**d³f++**)
Solver for density driven flow based on *UG4*, 2015

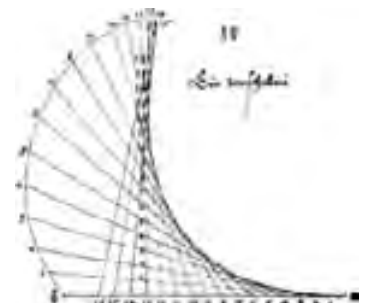


D³F

- Erweiterung auf Thermohaline Strömungen
- Erweiterung auf geklüftete Medien
- Anbindung an Geochemie
- ...



GABRIEL WITTUM
G-CSC
UNIVERSITY OF FRANKFURT



R³T

- RRRT: Package solving systems of up to 160 coupled convection–diffusion reaction equations (3d)

RRRT: Radionuclides

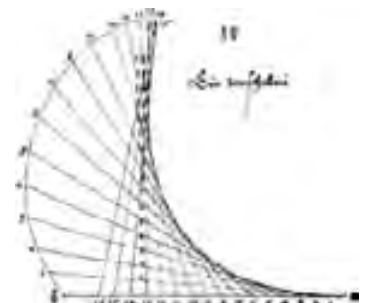
RRRT: Reactions

RRRT: Retardation

RRRT: Transport



GABRIEL WITTUM
G-CSC
UNIVERSITY OF FRANKFURT



VALIDATION

- Extensive validation

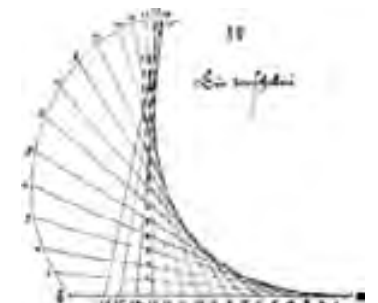
Especially designed experiments (saltpool)

Johannsen, K., Kinzelbach, W., Oswald, S., Wittum, G.: The saltpool benchmark problem – numerical simulation of saltwater upconing in a porous medium, *Advances in Water Resources*, 25 (3) (2002) pp. 335–348.

Field cases measured (Cape Cod, E. Fein, K.–
P. Kröhn)



GABRIEL WITTUM
G-CSC
UNIVERSITY OF FRANKFURT



NACHSWUCHSFÖRDERUNG

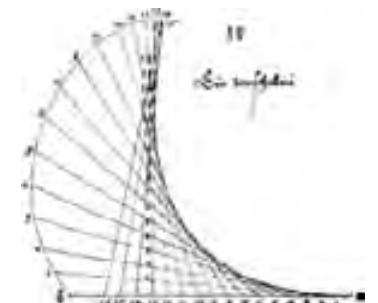
- 6 Professuren: S. Attinger (Potsdam), K. Johannsen (Bergen), P. Frolkovic (Bratislava), A. Grillo (Turin), S. Oswald (Potsdam), F. Radu (Bergen)
- 1 Habilitation: K. Johannsen
- 21 Promotionen:
P. Bastian, K. Birken, K. Johannsen, J. Eberhard, D. Feuchter, J. Geiser, M. Hoffer, D. Jungblut, M. Lampe, S. Lang, A. Nägel, S. Oswald, R. Prohl, H. Rentz-Reichert, S. Reiter, K. Roß, C. Schwarz, S. Stichel, A. Vogel, C. Wagner, C. Wrobel
- Abschlußarbeiten: ungezählt



GABRIEL WITTUM

G-CSC

UNIVERSITY OF FRANKFURT

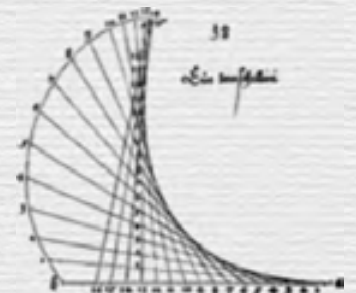


Discretization

- Finite volume element on hybrid grids (tetrahedra, pyramids, prisms, hexahedra)
- Several upwinding schemes
- consistent velocity approximation (Frolkovic,...)

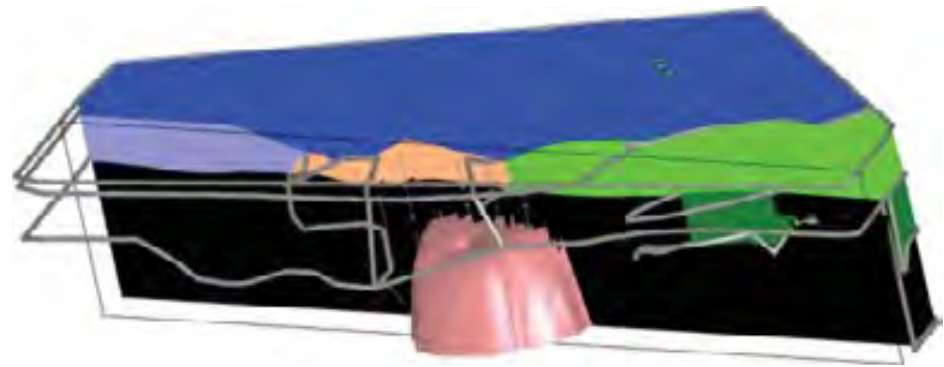


Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt

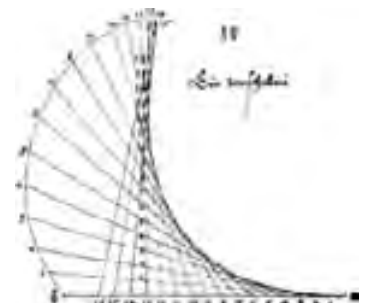


D³F

- complicated domains w. unstructured grids (\mathcal{UG})

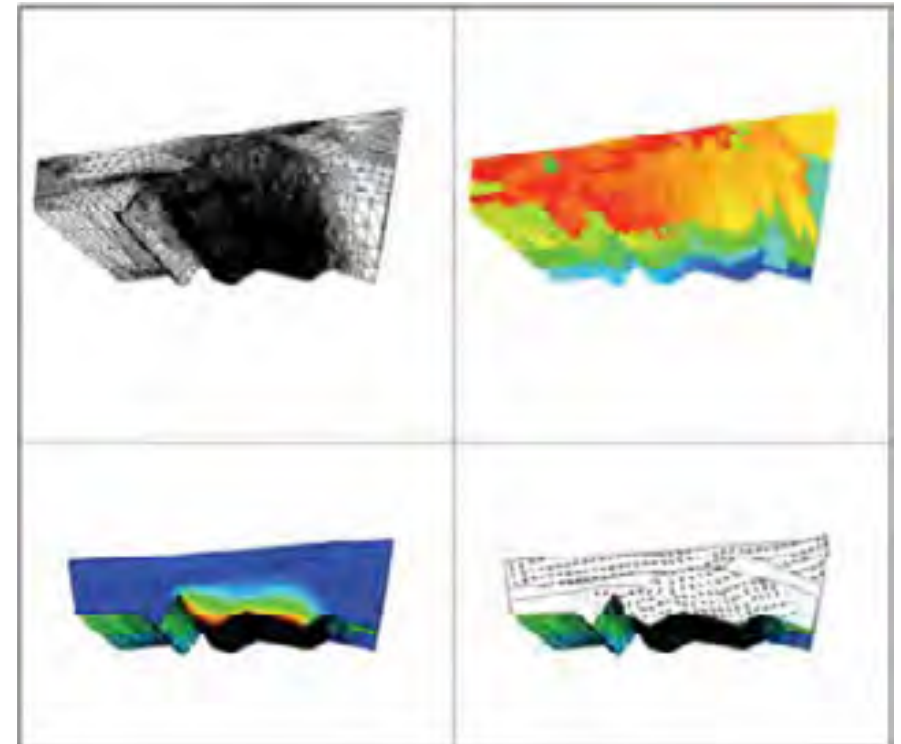
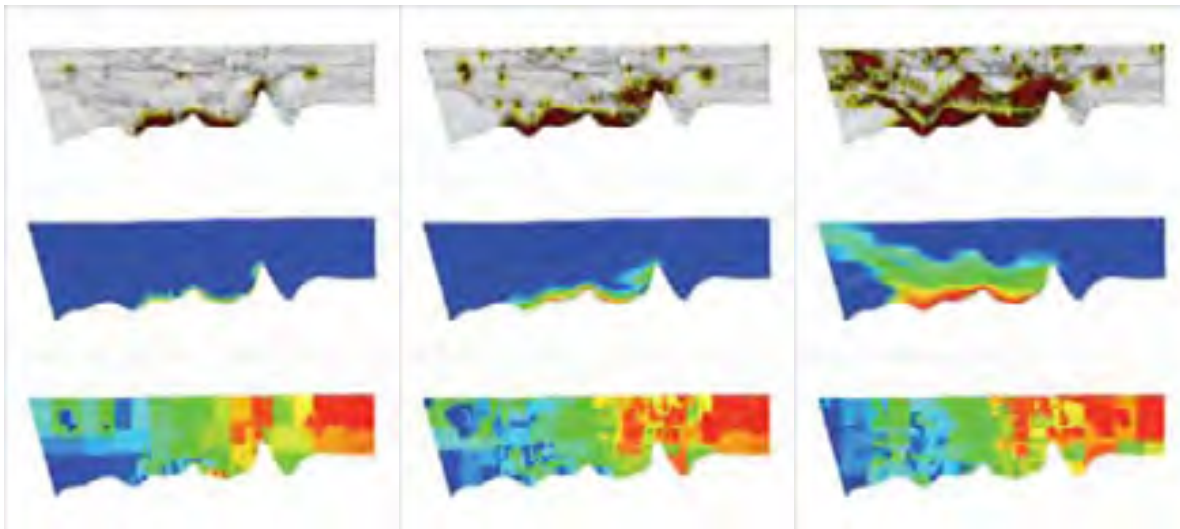


GABRIEL WITTUM
G-CSC
UNIVERSITY OF FRANKFURT

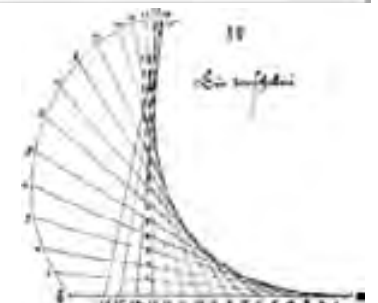


D³F

- Full density dependent non-linear dispersion
- fully parallel adaptive

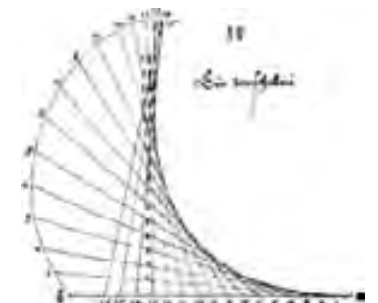


GABRIEL WITTUM
G-CSC
UNIVERSITY OF FRANKFURT

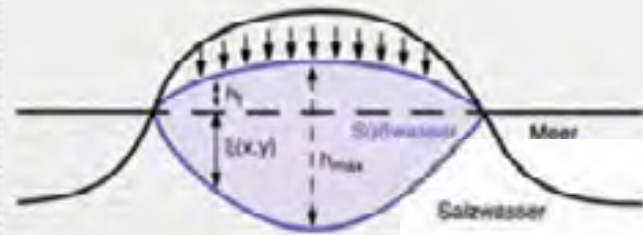
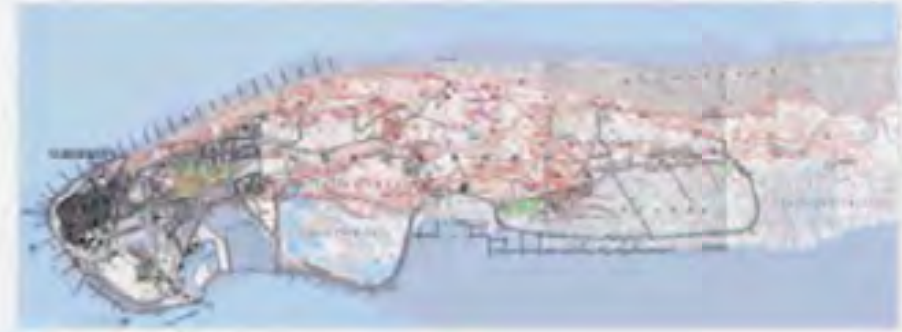


ADAPTIVITY AND PARALLELISM

- Parallel efficiency $> 1/2$, $p \leq 1024$
- Gain by adaptivity up to 10^4
- Lang, S., Wittum, G.: *Concurrency Computat.*, 17, 11, 1415 - 1440, 2005.
- Vogel, Andreas; Reiter, Sebastian; Rupp, Martin; Nägel, Arne; Wittum, Gabriel: UG 4..., *Comput Vis Sci*, 16 (4), pp 165-179, 2014.
- Reiter, S., Vogel, A., Heppner, I., Rupp, M., Wittum, G.: *Comput Vis Sci*, 16 (4), pp 151-164, 2014



Norderney



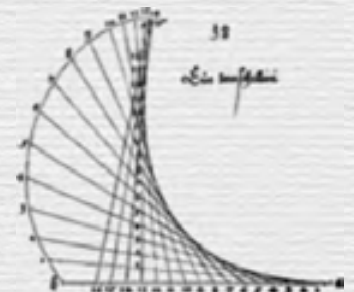
- Development of fresh water lenses under an island
- Semi-Structured grids (3d, 2×89087 dof)
- Geometric anisotropies



- 5 different conductivities w/ (isotropic) variation: 10^3



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Numerical results (Norderney)

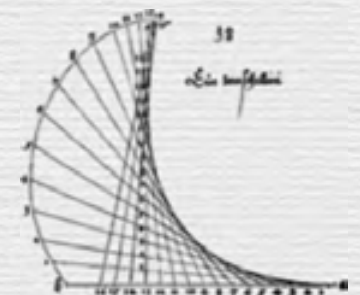
A. Nägel

Type	Method	Steps	#nl	#lin	#lin/#nl (max)
Full	GMG	88	178	10890	160
	FAMG	11	30	807	71
Boussinesq	GMG	85	171	7294	132
	FAMG	11	36	716	78

BGS does not converge



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt

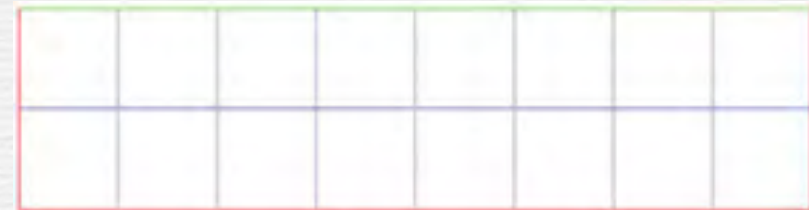


Elder's Problem

A. Vogel

- Boundary Conditions:


$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ (\omega \mathbf{q} - \mathbf{D} \nabla \omega) \cdot \mathbf{n} = 0$$



$$p=0, \quad (\omega \mathbf{q} - \mathbf{D} \nabla \omega) \cdot \mathbf{n} = 0$$

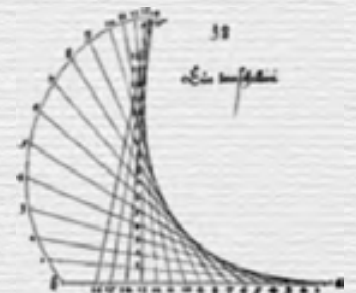
$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ (\omega \mathbf{q} - \mathbf{D} \nabla \omega) \cdot \mathbf{n} = 0$$

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (\omega \mathbf{q} - \mathbf{D} \nabla \omega) \cdot \mathbf{n} = 0$$

- Model: Boussinesq - Approximation
 - Discretization: vertex-centered finite volume
 - Upwinding: exponential
 - Time-stepping: fully implicit
- 
- Newton-Method with assembled Jacobian
 - Solver: BiCGStab with GMG Preconditioner with ILU Smoother



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Elder Scaling study (GMG) A. Vogel

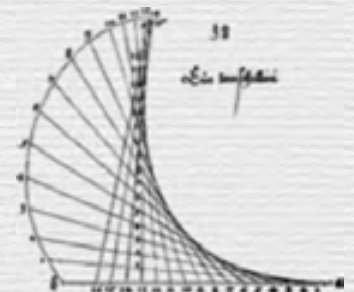
pe	L	$DoF's$	N_{iter}	T_{ass}	E_{ass}	T_{init}	E_{init}	T_{gmg}	E_{gmg}	T_{all}	E_{all}
32	8	2,102,274	11	6.15	-	4.93	-	8.62	-	37.96	-
128	9	8,398,850	11	6.16	99.8	4.86	101.4	8.70	99.1	38.15	99.5
512	10	33,574,914	11	6.11	100.7	4.97	99.2	9.31	92.6	39.37	96.4
2,048	11	134,258,690	11	6.18	99.5	5.09	96.9	9.45	91.2	40.18	94.5
8,192	12	536,952,834	11	6.13	100.3	5.03	98.0	9.96	86.6	41.11	92.3
32,768	13	2,147,647,490	10	6.17	99.6	6.22	79.3	10.84	79.6	48.45	78.3
131,072	14	8,590,262,274	10	6.10	100.7	5.99	82.3	10.66	80.9	53.37	71.1

Scaling study on JuQueen for the weak scaling of Elder's problem in 2d. Initial grid with 8×2 quadrilaterals and uniform refinement for each grid level. Solution of the non-linear problem using Newton-iteration. Linearized problems are solved using a BiCGStab solver with geometric multigrid preconditioner and ILU smoother.

(Abbreviations are: PE = Processing entities (cores), DoF = Degrees of Freedom; $T_{assemble}$ = time for assembling of system matrix and coarse grid matrices, $T_{linSolver}$ = time for linear solver within newton iteration)



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Numerisches Vorgehen

- AWP:

$$\frac{du}{dt} = F(u) \quad u(0) = u_0$$

- Übliches Vorgehen:

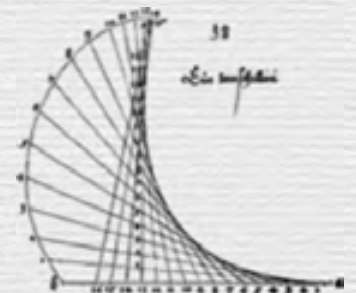
- Zeitschritt

- Linearisierung (Newton, vereinfachte Newton-Verf.)

- Linearer Gleichungslöser



Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



Transformation

- To cope with deteriorating diagonal blocks in the Jacobian J , we use a left transforming iteration with the transformation

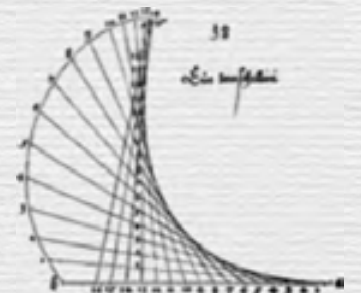
$$\bar{\bar{K}} = \text{blockdiag}(\bar{\bar{K}}_{ii})$$

and

$$(\bar{\bar{K}} J)_{ii} = \begin{pmatrix} j^{pp} & j^{p\omega} \\ 0 & j^{\omega\omega} - \frac{j^{\omega p}}{j^{pp}} j^{p\omega} \end{pmatrix}$$



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Nonlinear Solvers

A. Nägel

- Full Newton

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{\omega,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} J_h^{pp} & J_h^{pw} \\ J_h^{wp} & J_h^{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \mathbf{p}_h \\ \delta \boldsymbol{\omega}_h \end{pmatrix} = -\mathbf{F}_h(\mathbf{u}_{h,k})$$

- Partial Newton (non-linear Jacobi)

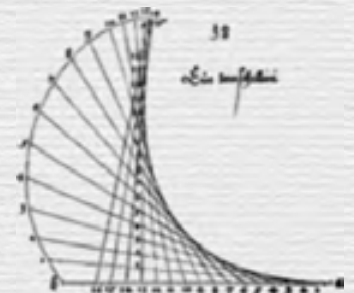
$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_k) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{\omega,h}(\mathbf{p}_k, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} J_h^{pp} & 0 \\ 0 & J_h^{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \mathbf{p}_h \\ \delta \boldsymbol{\omega}_h \end{pmatrix} = -\mathbf{F}_h(\mathbf{u}_{h,k})$$

- Iterative Coupling (non-linear Gauß-Seidel)

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_k) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{\omega,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} J_h^{pp} & 0 \\ J_h^{wp} & J_h^{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta p_h \\ \delta \omega_h \end{pmatrix} = -F_h(u_{h,k})$$



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Nonlinear Solvers

A. Nägel

- Full Newton (d³f)

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{\omega,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} J_h^{pp} & J_h^{pw} \\ J_h^{wp} & J_h^{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \mathbf{p}_h \\ \delta \boldsymbol{\omega}_h \end{pmatrix} = -\mathbf{F}_h(\mathbf{u}_{h,k})$$

- Partial Newton (non-linear Jacobi, FEFLOW)

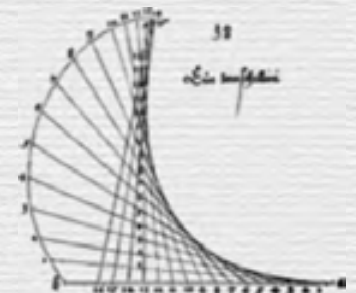
$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_k) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{\omega,h}(\mathbf{p}_k, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} J_h^{pp} & 0 \\ 0 & J_h^{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \mathbf{p}_h \\ \delta \boldsymbol{\omega}_h \end{pmatrix} = -\mathbf{F}_h(\mathbf{u}_{h,k})$$

- Iterative Coupling (non-linear Gauß-Seidel, MODFLOW)

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_k) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_{\omega,h}(\mathbf{p}_{k+1}, \boldsymbol{\omega}_{k+1}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} J_h^{pp} & 0 \\ J_h^{wp} & J_h^{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta p_h \\ \delta \omega_h \end{pmatrix} = -F_h(u_{h,k})$$



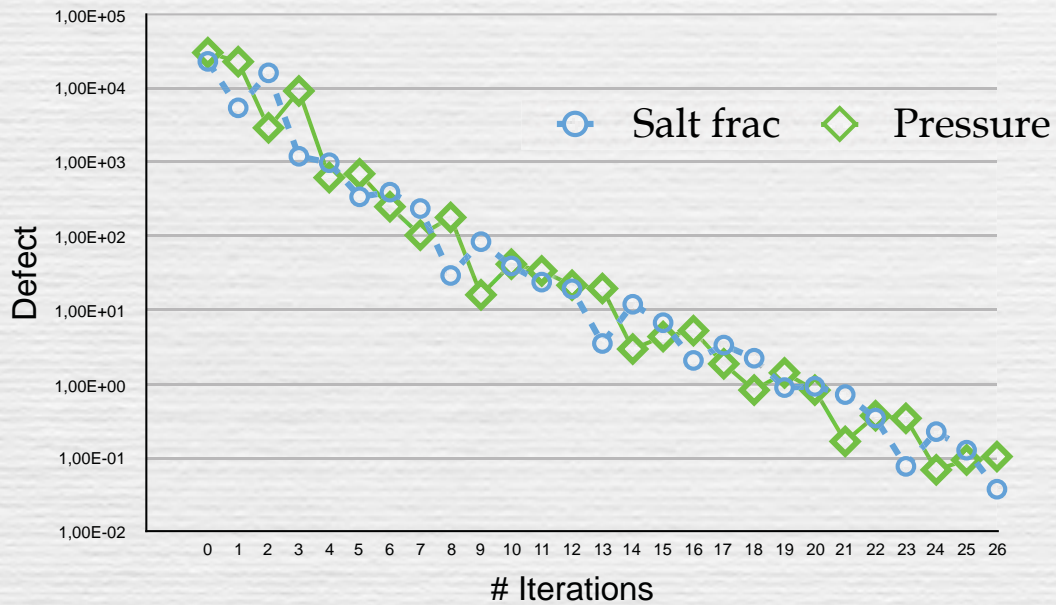
Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



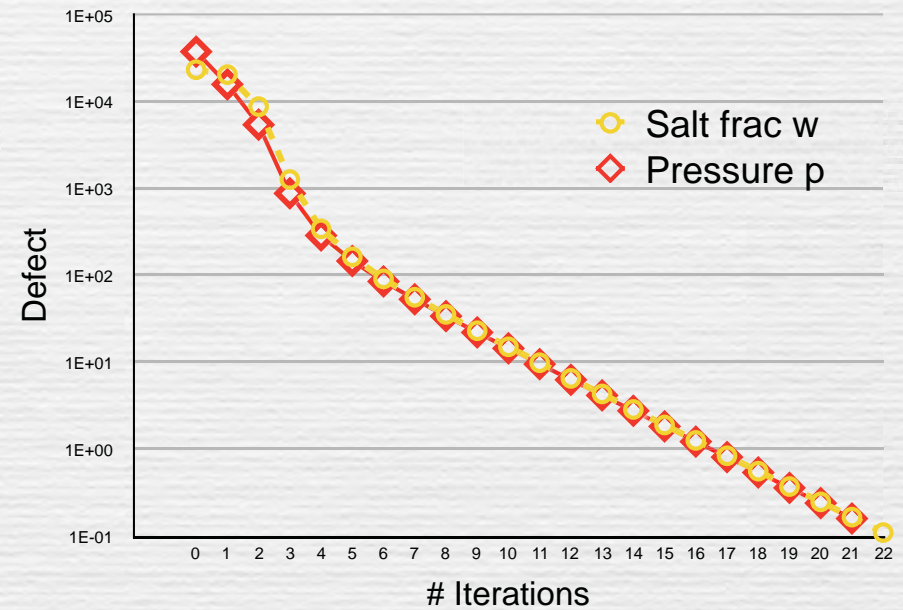
Nonlinear Solvers

A. Nägel

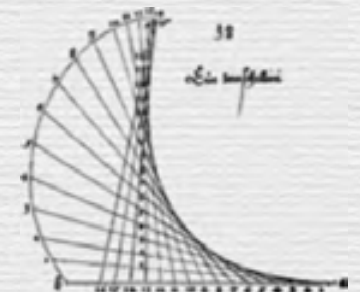
Partial Newton (non-linear Jacobi)



Iterative Coupling (non-linear Gauß-Seidel)

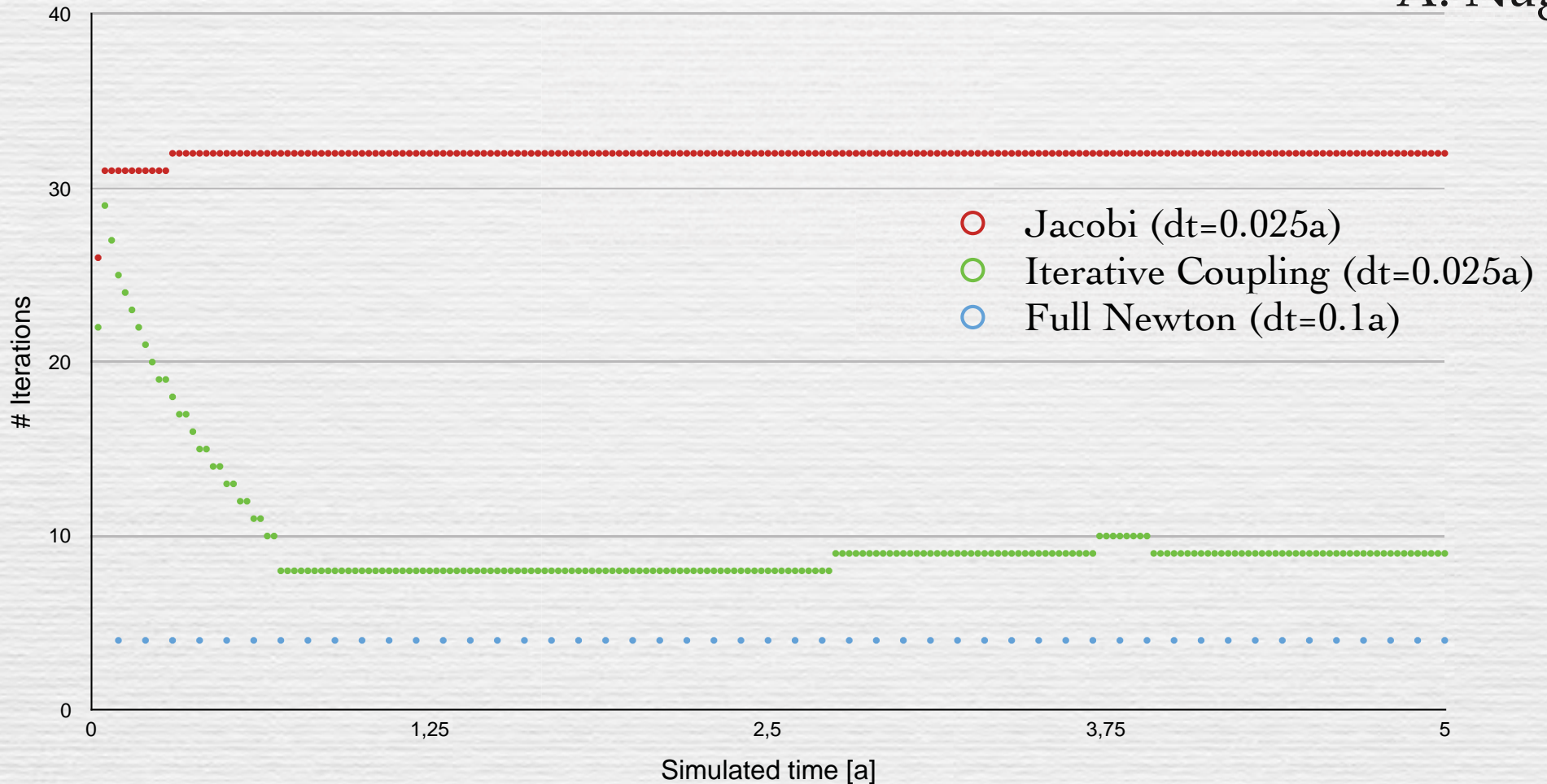


Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt

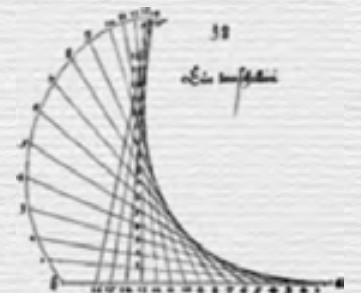


Comparing Nonlinear Solvers

A. Nägel



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



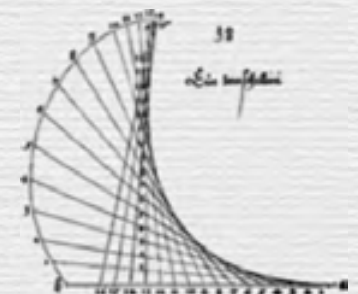
Nonlinear Solvers

A. Nägel

	Pros	Cons	
Newton	✓ Potential for quadratic convergence	◆ Linear solvers often considered difficult	+ +
Iterative Coupling (Gauß-Seidel)	✓ Simple Implementation ✓ Choice of linear solvers	◆ Limited time step ◆ Linear Convergence	+ -
Partial Newton (Jacobi)	✓ Simple Implementation ✓ Choice of linear solvers	◆ Limited time step ◆ Newton updates are not synchronized	- -



Gabriel Wittum
G-CSC
University of Frankfurt



Numerik

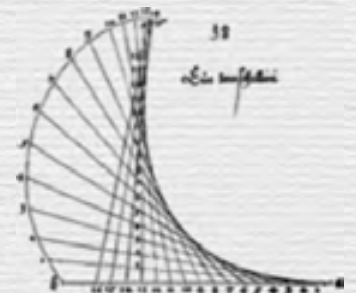
- AWP:

$$\frac{du}{dt} = F(u) \quad u(0) = u_0$$

- LIMEX (Linear implicit method with extrapolation)
(Deuflhard et al, 1987)
 - Trenne steife Komponenten ab.
 - Koppeln von Zeitschritt und nichtlinearer Iteration
(beschränkt den Zeitschritt)
 - Extrapolation erhöht die Zeitgenauigkeit und ermöglicht
größere Zeitschritte.



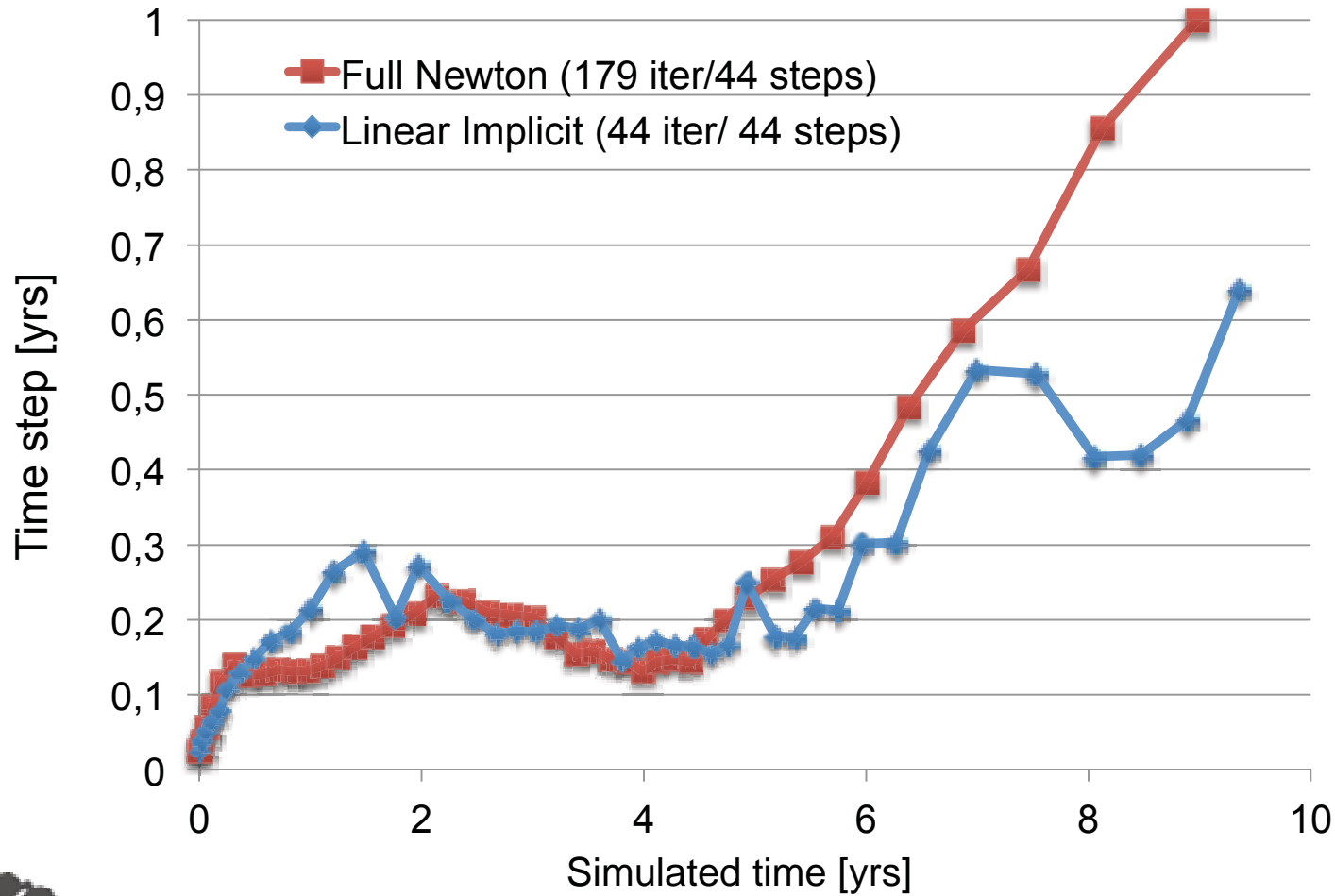
Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



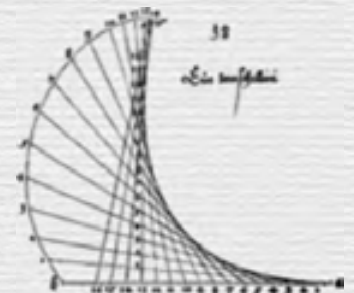
LIMEX

Results: LIMEX can compete with Full Newton
(Elder Problem, w/ exact solver)

A. Nägel



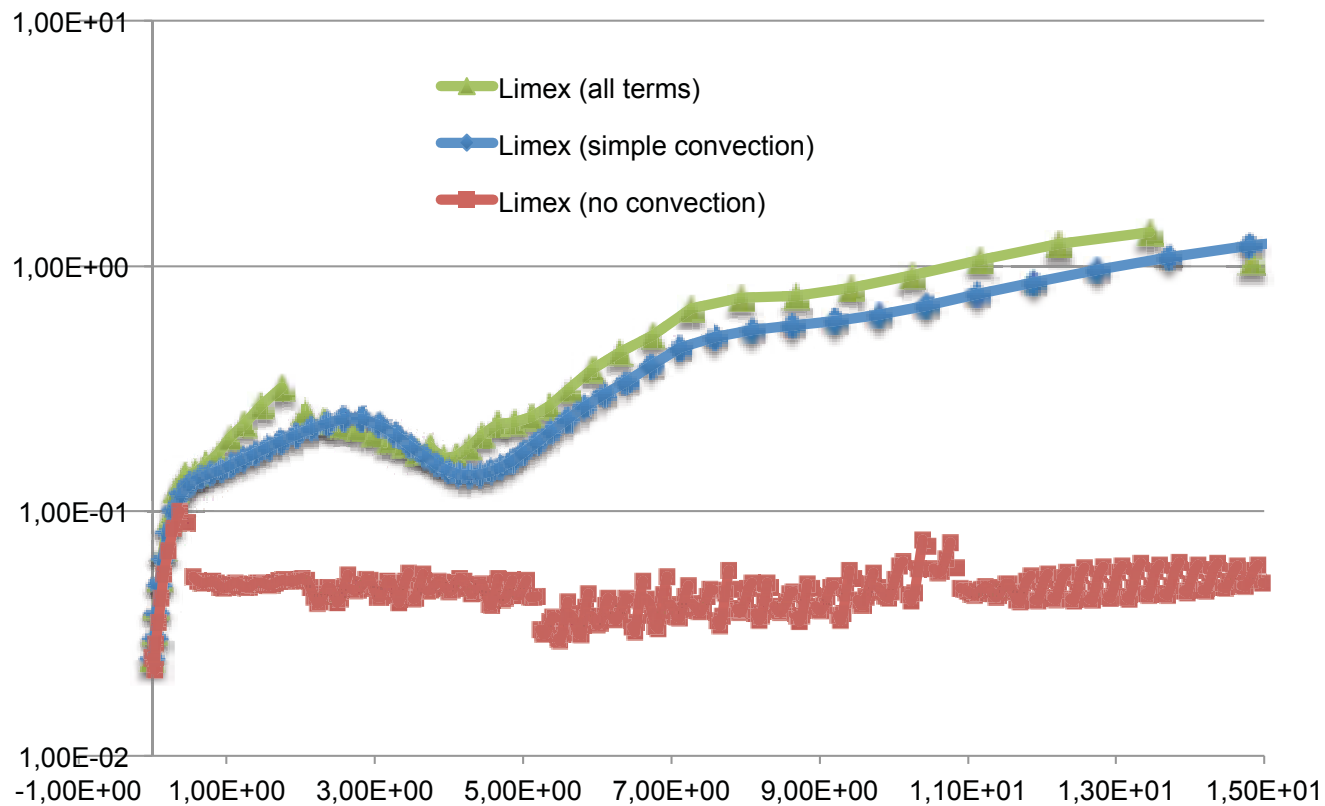
Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



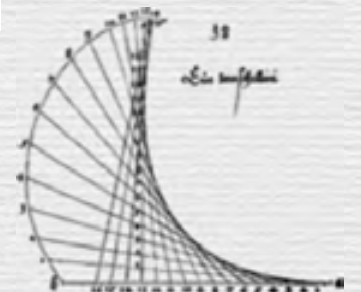
LIMEX

Results: LIMEX for Density Driven Flow (w/ inexact solver)

A. Nägel

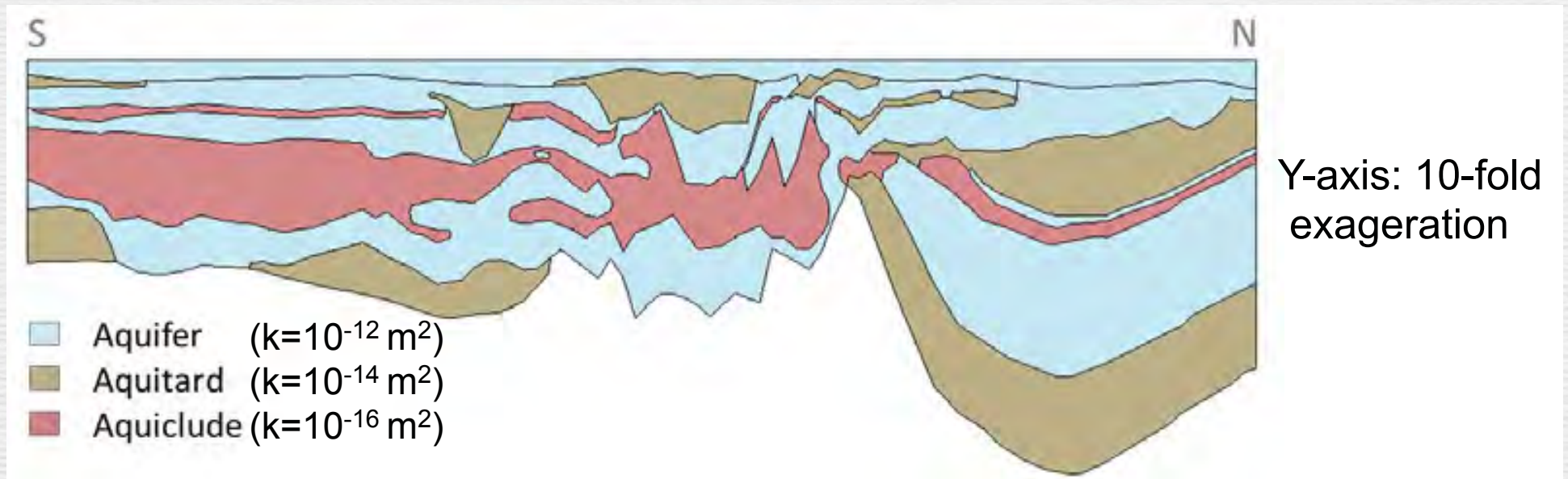


Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



Testfall für Löser

A. Nägel



Fully non-linear problem

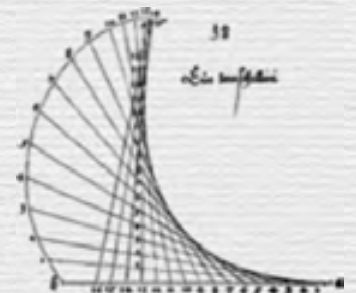
- Based on Gorleben Saltdome
- Large anisotropy
- High contrast
- High dispersion
- Coarse mesh,
large grid Peclet number

Solver Setup:

- LIMEX (TOL=0.1 for concentration; absolute!)
- Exact Jacobian, but: w/o Dispersion
- MG V(2,2)-cycle with element GS

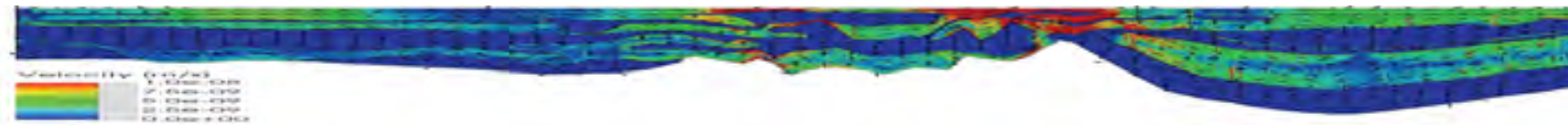
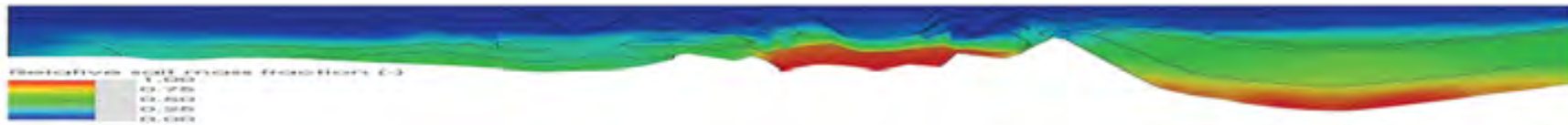


Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt

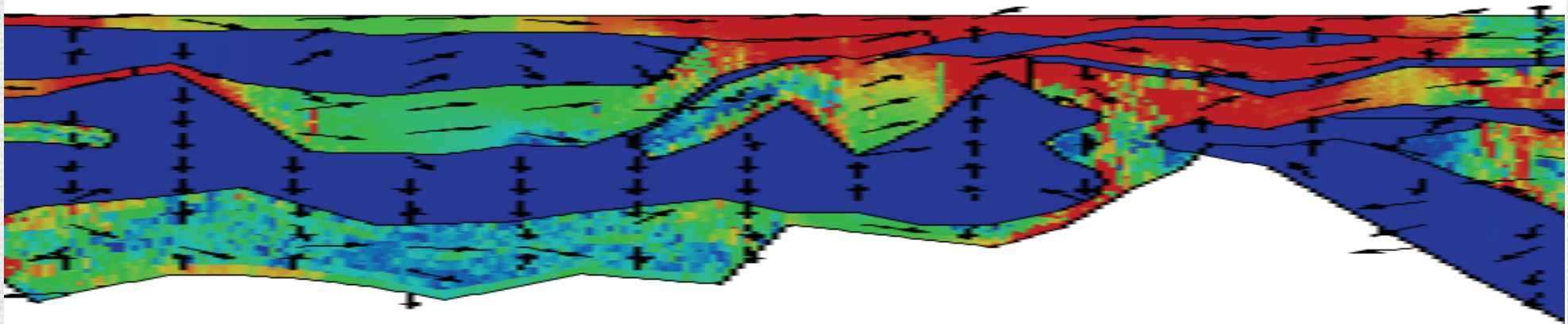


Testfall für Löser

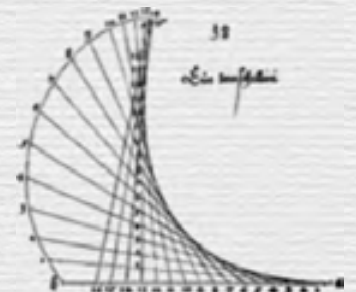
A. Nägel



Y-Achse: 2-fache Vergrößerung



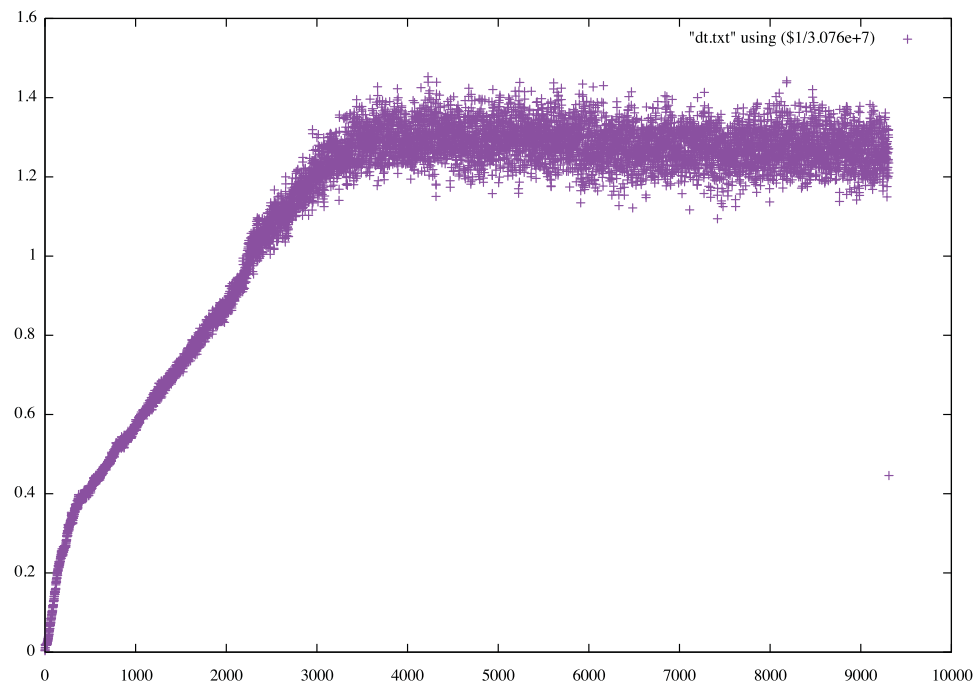
Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



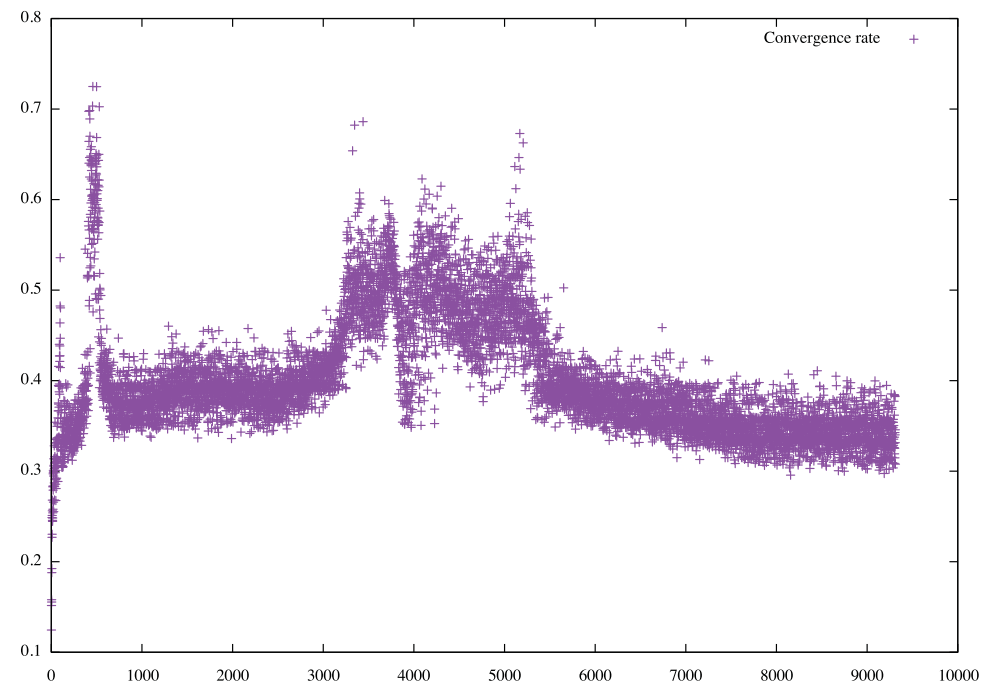
Testfall für Löser

A. Nägel

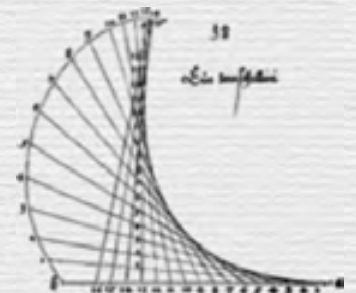
Time step size



Convergence rate



Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



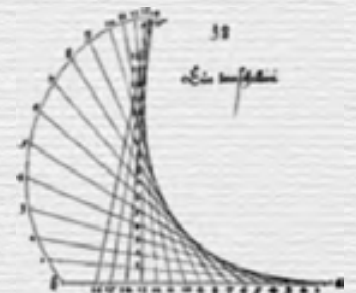
WIPP

S. Reiter

- Ziel: Langzeitrechnung für WIPP
detaillierte Beschreibung von Strömung und Transport
- derzeit 100.000 Jahre
- in Arbeit

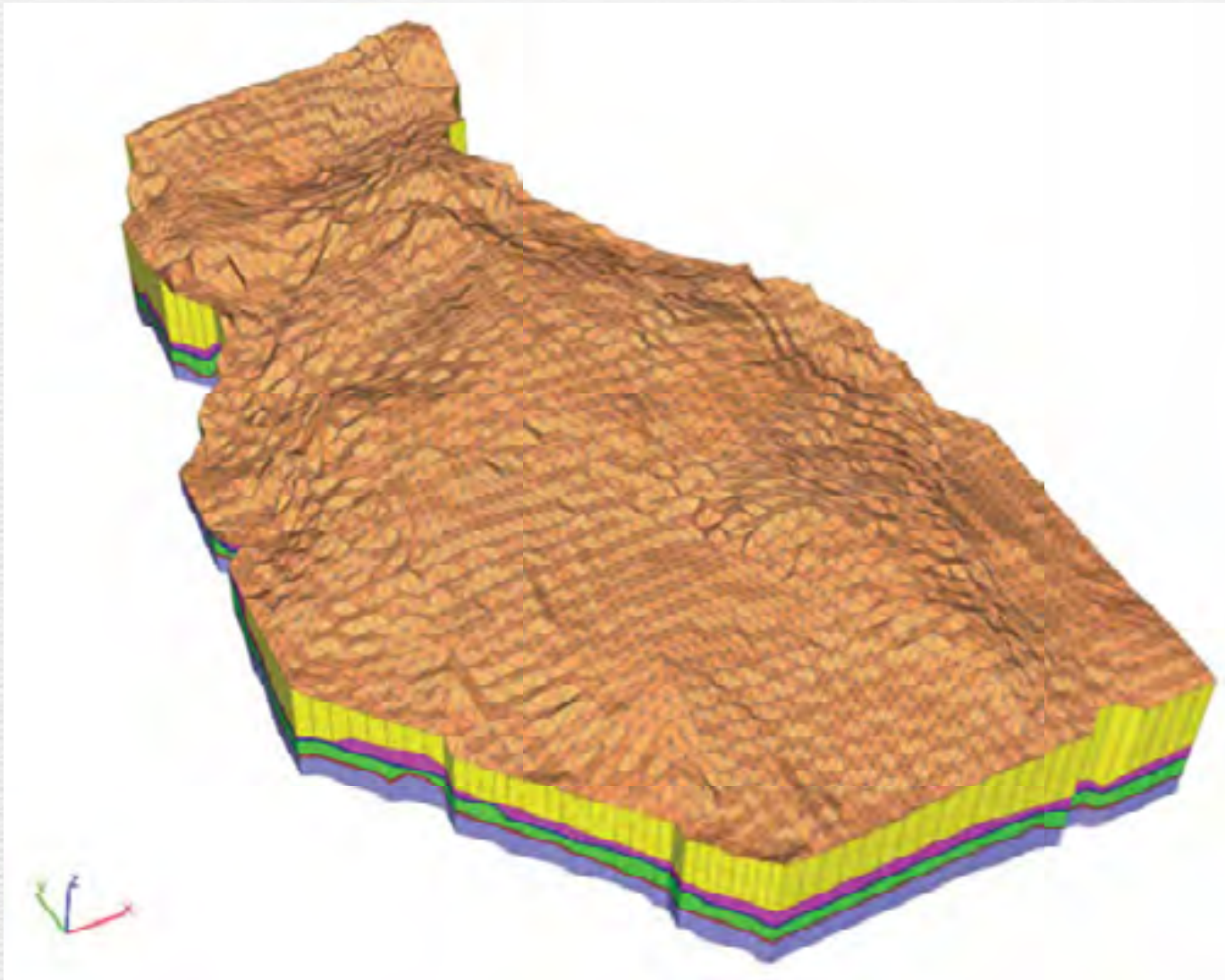


Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt

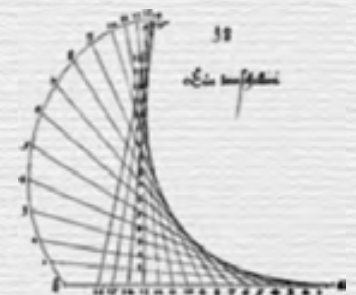


WIPP - Geometrie

S. Reiter

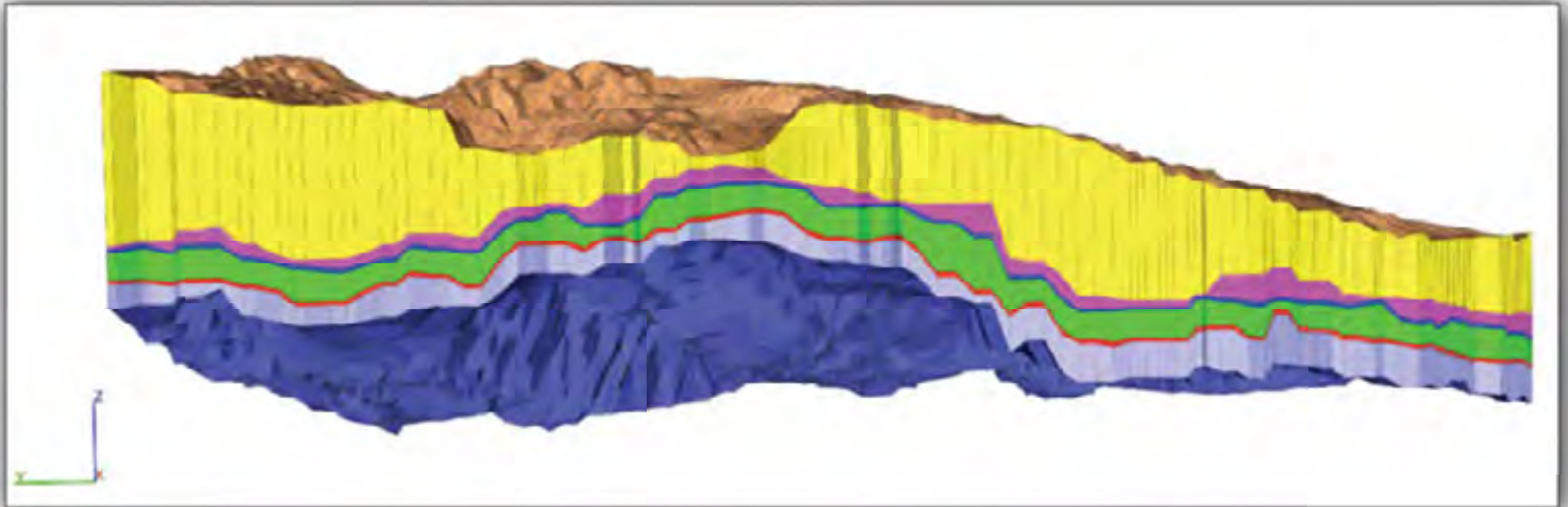


Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt

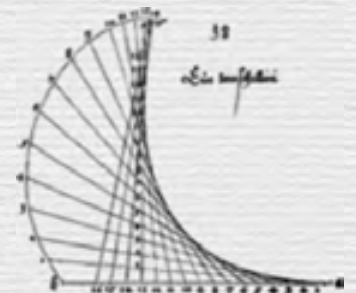


WIPP - Geometrie und Gitter

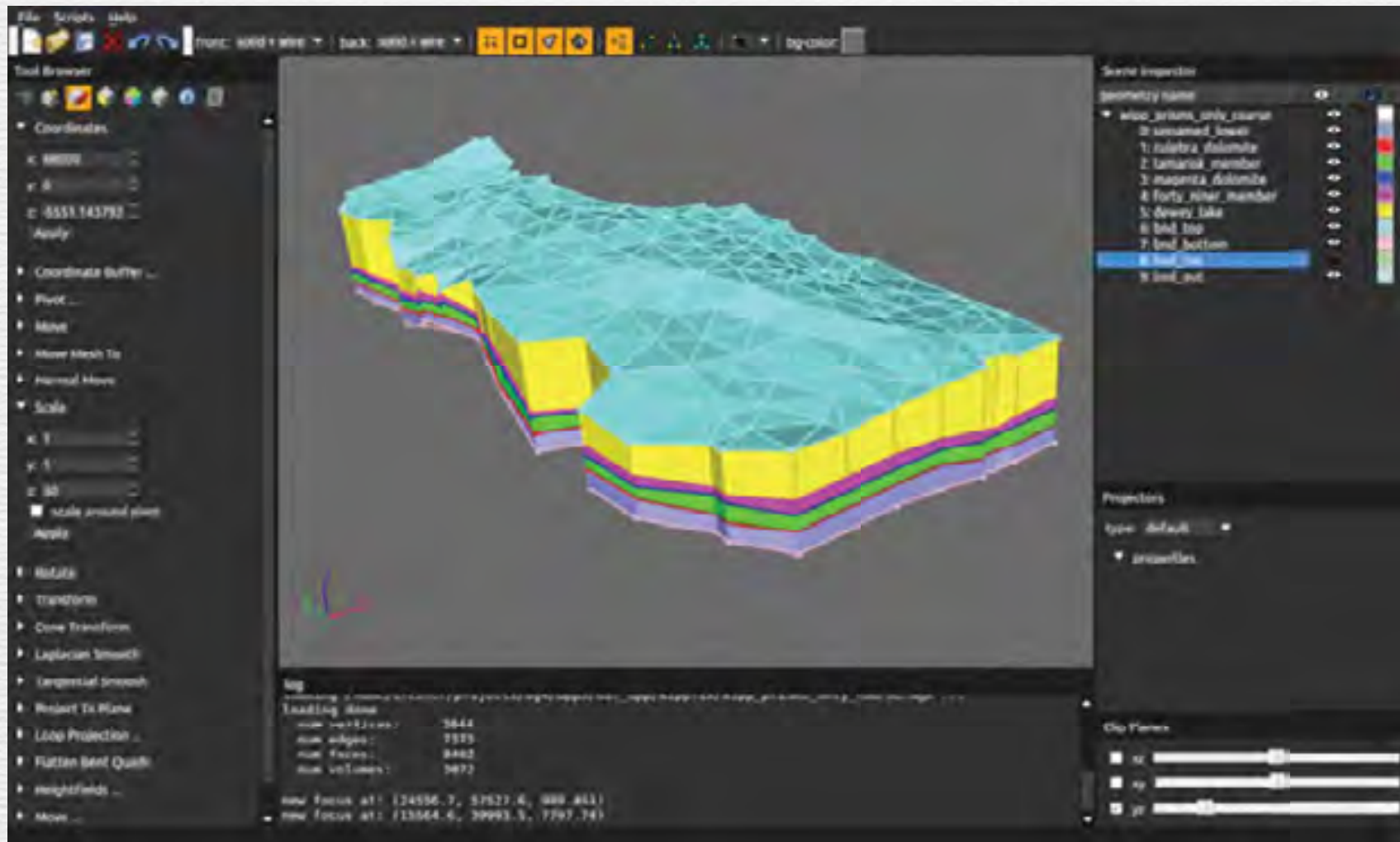
S. Reiter



Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



WIPP Geometrie und Gitter S. Reiter



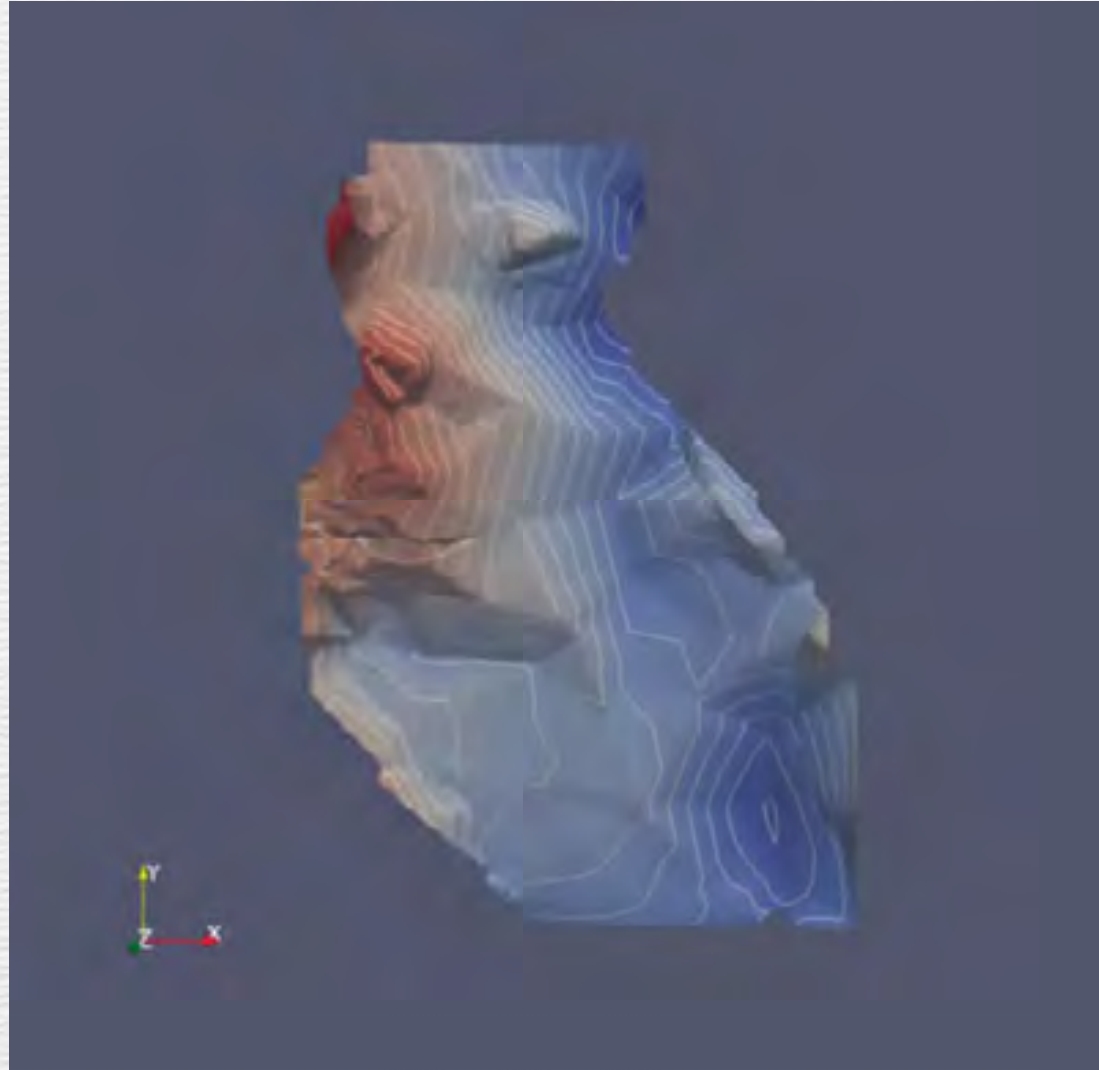
ProMesh

Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt

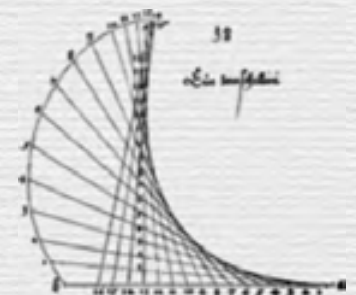


WIPP Salzkonzentration

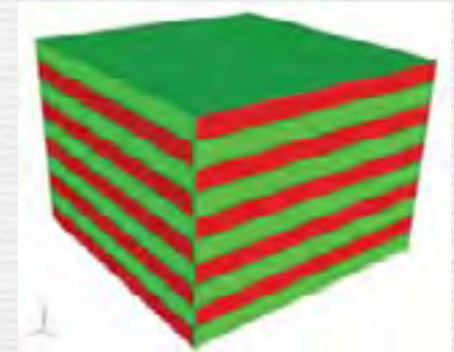
S. Reiter



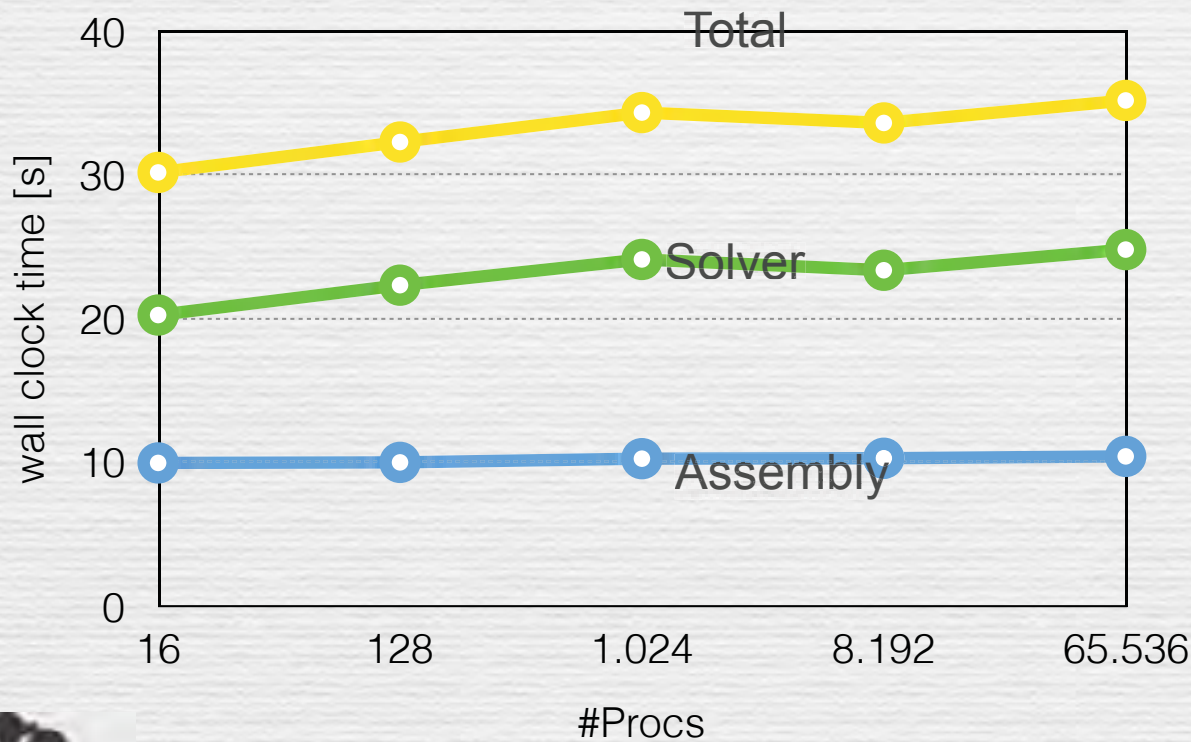
Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



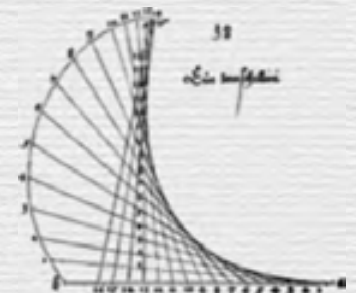
Weak Scaling UG4 A. Nägel



- Robust GMG solver for transdermal drug delivery problem (JuQueen)
> 10^9 unknowns



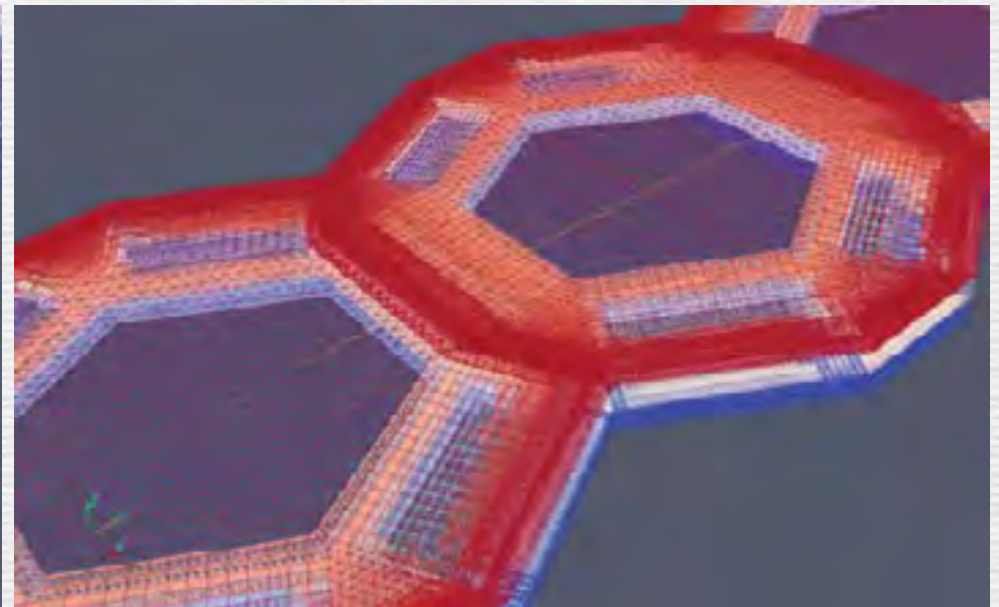
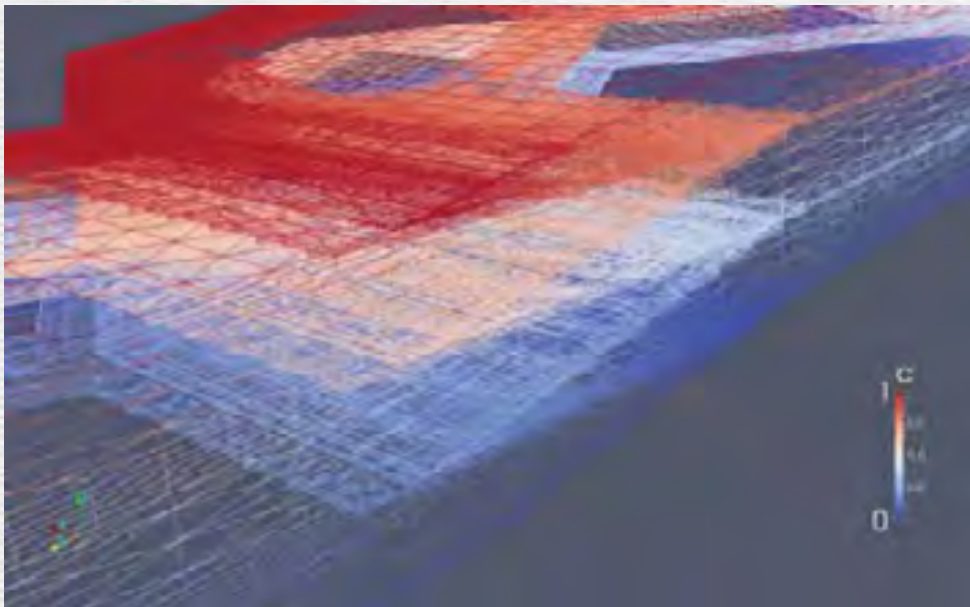
Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



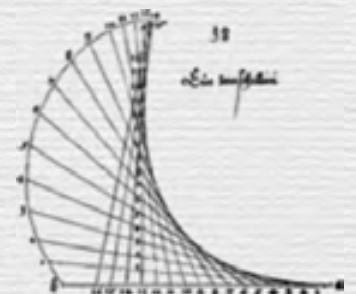
Skin Problem: TKD

Sebastian Reiter

- Base solver UG4: Parallel adaptive multigrid
- acceleration from 10^2 to 10^6 by adaptivity



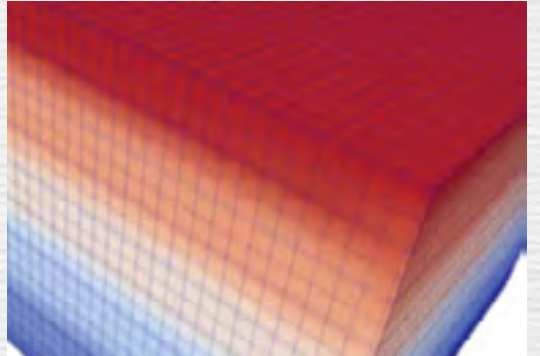
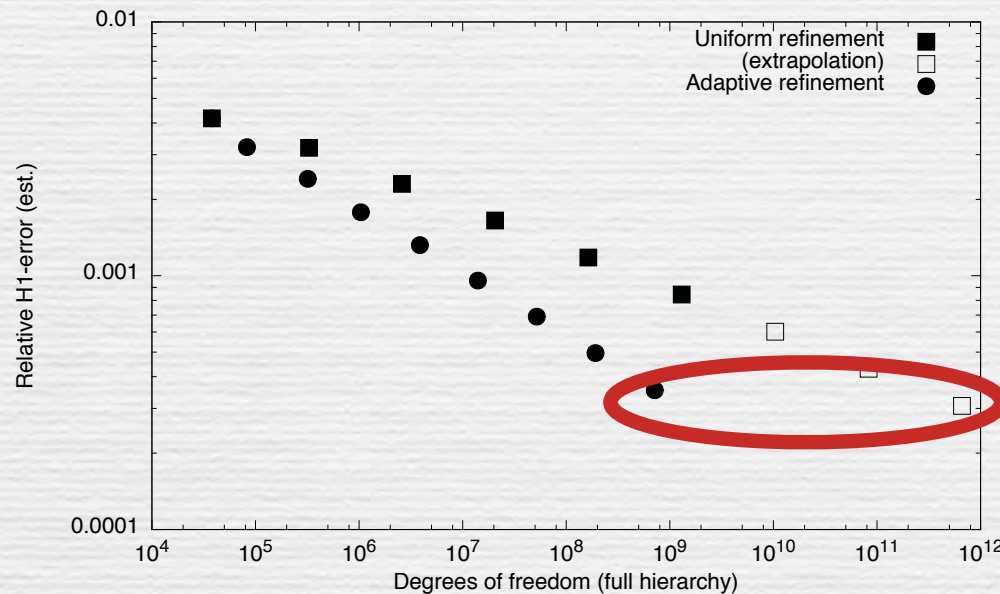
Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



Parallel Adaptivity

A. Nägel, S. Reiter, A. Vogel

- Base solver UG4: Parallel adaptive mg - acceleration by 512 by adaptivity

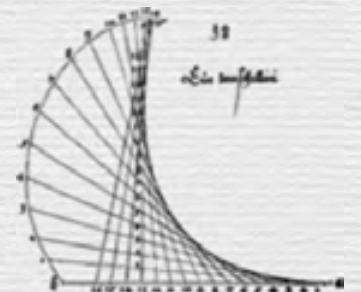


uniform L13: 33,554,432 cores
adaptive L13: 65536 cores
factor 512 (99.5%) in CPU
time and in power consumpt.

- Importance of adaptivity increases with problem size!



Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt

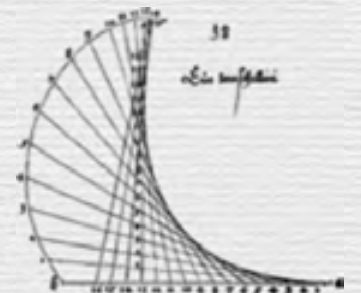


Parallel Adaptivity

- Key strategy for
 - saving CPU time (99.5%),
 - saving power (99.5%),
 - improving accuracy
(uniform needs 3 more levels to reach same error)
- Higher order effect without additional smoothness
- Importance of adaptivity increases with problem size!
- Multi-scale modeling necessary.



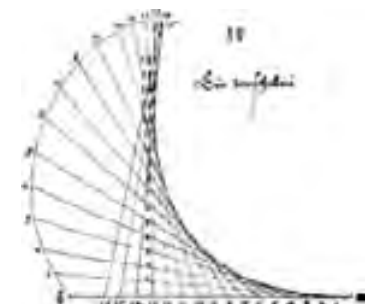
Gabriel Wittum
G-CSC Uni Frankfurt



DANKE!



GABRIEL WITTUM
G-CSC
UNIVERSITY OF FRANKFURT





BMWi – Forschungsförderung

- Projektförderung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle -

Holger Wirth
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Referat II A 6

Ziele der BMWi-Projektförderung

- Bereitstellung der **wissenschaftlich-technischen** Grundlagen zur Realisierung eines Endlagers für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle
- Ständige **Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik**
- Substantieller Beitrag zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen **Kompetenz** und **Nachwuchsförderung** im Bereich der nuklearen Entsorgung in Deutschland



Rahmenbedingungen BMW_i- Forschungsförderung

- Atomgesetz (AtG)
- Standortauswahlgesetz (StandAG)
- EU-Richtlinie 2011/70/EURATOM
- Nationale Entsorgungsprogramm (NaPro)
- Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung
- Gesetzentwurf zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung
- 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Die projektgeförderte FuE zur Entsorgung radioaktiver Abfälle orientiert sich an diesen Rahmenbedingungen.

In dem jeweiligen **Förderkonzept** legt BMW_i die Schwerpunkte seiner Förderpolitik und förderpolitischen Inhalte für jeweils vier Jahre fest.



Förderkonzepte / Forschungsprogramme zur Entsorgung radioaktiver Abfälle des BMWi



1997 bis 2001

- BMBWF-Forschungsförderung (bis 1998)
- Ziel: untertägige Entsorgung radioaktiver und chemotoxischer Abfälle



Förderkonzepte / Forschungsprogramme zur Entsorgung radioaktiver Abfälle des BMWi



2002 bis 2006, 2007 bis 2010, 2011 bis 2014

- BReg-Entscheidung: neben Salz sind andere Wirtsgesteine zu untersuchen
- FuE-Förderung zu alternativen Wirtsgesteinen, insbesondere Ton wurde verstärkt, Endlagerforschung stand im Vordergrund der FuE
- Verstärkte Mitarbeit in europäischen URL (insbesondere Ton, Kristallin)



Förderkonzepte / Forschungsprogramme zur Entsorgung radioaktiver Abfälle des BMWi

2015 bis 2018

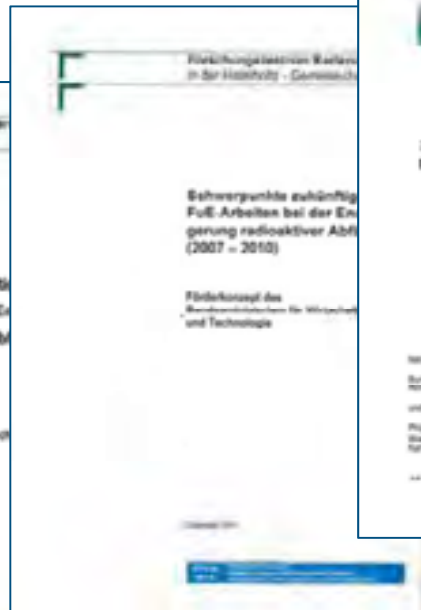
- Ausweitung auf Entsorgung und damit Betrachtung spezifischer Maßnahmen vor der Endlagerung (**“Pre-Disposal“-Maßnahmen**)
- Betrachtung der Auswirkungen **verlängerter Zwischenlagerzeiten**
- Betrachtung **alternativer Entsorgungsmethoden** statt direkter Endlagerung in einem Bergwerk
- Verstärkte **wirtsgesteinsübergreifende** Forschungstätigkeit und Betrachtung von Fragestellungen zu **allen drei Wirtsgesteinen**
- Stärkere Einbeziehung **sozio-technischer Fragestellungen**



Förderkonzepte / Forschungsprogramme zur Entsorgung radioaktiver Abfälle des BMWi

Kontinuität in der Projektförderung

Förderkonzept: Festlegung der jeweiligen Schwerpunkte der Förderpolitik und förderpolitischer Inhalte



- FuE basiert auf 30-jähriger Forschungsförderung
- Vierjährige Förderperioden – 5 Förderkonzepte in Folge
- Förderkonzepte werden im Allgemeinen in Zusammenarbeit von PTKA mit BMWi und unabhängigen Sachverständigenkreis erarbeitet und in Fachgremien diskutiert



Forschungsausrichtung nach Wirtsgesteinen 2015 bis 2018

Wirtsgestein: **Steinsalz**

Bearbeitung des identifizierten FuE-Bedarfs (Endlagerung in Salzstöcken)

Konzeptionelle Fragen zur Endlagerung in flacher Lagerung

Wirtsgestein: **Tongestein**

FuE ausbauen und verstärken

Instrumente für Systemanalysen vervollständigen

Wirtsgestein: **Kristallingestein**

Klärung grundsätzlicher, wissenschaftlicher Fragestellungen



Hinzugekommene Forschungsschwerpunkte mit dem Förderkonzept 2015 bis 2018

- Verstärkte **wirtsgesteinsübergreifende** Forschungstätigkeit und Betrachtung von Fragestellungen zu **allen drei Wirtsgesteinen** (Salz, Ton, Kristallingestein)
- Betrachtung der Auswirkungen **verlängerter Zwischenlagerzeiten** insbesondere im Hinblick auf Sicherheit von Abfällen und Behältern
- Betrachtung **alternativer Entsorgungsmethoden** statt direkter Endlagerung in einem Bergwerk
- Stärkere Einbeziehung **sozio-technischer Fragestellungen**

Auswahl: Wirtsgesteinsübergreifende Forschungstätigkeit,

Fragestellungen zu allen **drei Wirtsgesteinen** (Salz, Ton, Kristallingestein) (I)

- Verbundprojekt **H-Dur** Modellierung von Datenungewissheiten auf hybriden Rechnern mit d^3f und r^3t (Beendet, Laufzeit bis 31.10.2015, GRS, JWGU Frankfurt, FSU Jena)
- **RepoTREND+** Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im ewG (Laufzeit 01.04.2016 bis 31.03.2019, GRS)
- Verbundprojekt **GRUSS** Grundwassertransport und Stofftransport in komplexen realen Systemen (Laufzeit 01.04.2016 bis 30.06.2019, GRS, JWGU Frankfurt)
- Verbundprojekt **BASEL** Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (Laufzeit 01.04.2016 bis 31.03.2018, DBETEC, GRS)
- **SULa** Sicherheitstechnische Untersuchungen zum Schachttransport schwerer Lasten bis zu 175 Tonnen Nutzlast (Laufzeit bis 30.11.2016, DBETEC)
- Verbundprojekt **ELSA-II** Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (Laufzeit bis 30.03.2017, TUBA Freiberg, DBETEC) – insbesondere zu Salz und Ton
- **BIGBEN** Bentonitaufsättigungen in geotechnischen Barrieren im Endlagernahfeld (Laufzeit bis 30.06.2017, GRS) – Ton und Kristallin
- Verbundprojekt **UMB** Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren (Laufzeit 01.01.2015 bis 31.12.2017, GRS, HZDR, ENAU Greifswald, TU München)

Auswahl: **Wirtsgesteinsübergreifende** Forschungstätigkeit,

Fragestellungen zu allen **drei Wirtsgesteinen** (Salz, Ton, Kristallingestein) (II)

Tongestein

- Verbundprojekt **ANSICHT** Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheitskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tongestein (Laufzeit bis 28.2.2017, GRS, DBETEC, BGR)

Kristallingestein

- Verbundprojekt **CHRISTA** Machbarkeitsuntersuchungen zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallinformation in Deutschland (Beendet, Laufzeit 01.07.2015 bis 30.6.2016, DBETEC, GRS, BGR)
 - Anschlussprojekt CHRISTA-II geplant
- **KONEKD** Entwicklung eines technischen Konzepts für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente in Kristallingestein in Deutschland (Laufzeit bis 01.08.2016 bis 30.09.2017, DBETEC)

Flach lagerndes Salz

- Verbundprojekt **KOSINA** Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Anfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (Laufzeit 01.07.2015 bis 28.02.2018, DBETEC, GRS, IfG, BGR)



Auswahl: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten

- **DCS-Monitor** Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerten Zwischenlagerzeiten (Laufzeit 01.02.2016 bis 31.01.2019 TU Dresden, 2 Teilprojekte)
- **LaMEP** Langzeitverhalten von Metall- und Elastomerdichtungen sowie Polyethylen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Abfälle (Laufzeit 01.10.2015 bis 30.09.2018, BAM)
- **StrukElast** Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (Laufzeit 01.10.2015 bis 30.09.2018, TU Dresden)

Alternative Entsorgungsmethoden statt direkter Endlagerung im Bergwerk

- Verbundprojekt **CREATIEF** Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen Bohrlöchern (geplanter Beginn 01.12.2016, TUBA Freiberg, DBETEC)



Sozio-technischer Fragestellungen

- **Expander** Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Laufzeit 01.03.2015 bis 31.08.2017, KIT)
- Verbundprojekt zu **soziotechnischen Fragestellungen** (geplant, Start voraussichtlich Anfang 2017, drei Verbundpartner)



Beispiele internationaler Zusammenarbeit

WTZ mit Russland (seit 2001)

- Verbundprojekt **URSEL** Untersuchungen zur Robustheit der Sicherheitsaussage zu HAW-Endlagersystemen in magmatischen Wirtsgesteinen (beendet am 31.03.2016, GRS, DBETEC, BGR) – Kristallingestein
 - Folgeprojekt **SuSe** geplant
- Verbundprojekt **SANTOS** Sicherheitsanalytische Untersuchungen für ein Endlager radioaktiver Abfälle in einer diagenetisch überprägten Tonformation in der Nachbetriebsphase (Laufzeit bis 28.02.2017, DBETEC, GRS, BGR) - Tongestein

Kooperation USA (seit 70iger Jahren, intensive Zusammenarbeit seit 2010)

- Zusammenarbeit erfolgt in diversen Projekten, insbesondere zum Wirtsgestein Steinsalz

Kooperation im Felslabor Mt. Terri, CH (seit 1997 BGR, seit 1998 GRS)

- Projekt **Tonforschung im Felslabor Mt. Terri** - Tongestein
- Geplantes Projekt: Verbundprojekt Sandwich – Tongestein

Weitere Kooperationen in europäische URL

- Kooperationen bestehen mit URL Bure (Frankreich, Tongestein), Äspö (Schweden, Kristallingestein), Grimsel (Schweiz, Kristallingestein)

Mitarbeit in der IGD-TP und Gremien der OECD/NEA



Beispiele Kompetenzerhalt und Nachwuchsförderung durch die BMWi-Forschungsförderung

- Verbundprojekt **GRaZ** Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (Laufzeit 01.09.2015 bis 31.08.2018, Tongestein)
 - Beteiligte Institutionen.
 - JGU Mainz, UdS Saarbrücken, TU München, Uni Potsdam, TU Dresden, RKU Heidelberg
 - HZDR, KIT
- Verbundprojekt **WEIMOS** Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (Laufzeit 01.04.2016 bis 30.06.2019, Steinsalz)
 - Beteiligte Institutionen
 - LUH Hannover, TU Braunschweig, TU Clausthal
 - Dr. A. Hampel, IfG



Nachwuchswissenschaftlerförderung, Publikationen in den Jahren 2015/2016

Einbindung von Nachwuchswissenschaftlern in FuE-Projekte

2015: 60 (ca. 53 % Universitäten, ca. 30 % HGF, ca. 16 % sonstige FE)

2016: 66 (ca. 75 % Universitäten, ca. 25 % HGF)

Publikationen in begutachteten Journalen (Berichte, Doktor-, Master-, Bachelor- und Studienarbeiten)

2015: 44 (ca. 52 % Universitäten, ca. 27 % HGF, ca. 21 % sonstige FE)

2016: 45 (ca. 30 % Universitäten, ca. 40 % HGF, ca. 30 % sonstige FE)

Präsentationen auf Konferenzen (Vorträge, Poster)

2015: 99 (ca. 43 % Universitäten, ca. 24 % HGF, ca. 33 % sonstige FE)

2016: 76 (ca. 30 % Universitäten, ca. 25 % HGF, ca. 45 % sonstige FE)



Fazit

- Mit 30-jähriger BMWi-Projektförderung zur Entsorgungsforschung verfügt Deutschland über **breit gefächerte Erkenntnisse** und **hoch qualifizierte Fachkräfte**.
- BMWi steht bereit, die **politischen Vorgaben** bei der Forschungsförderung weiter **umzusetzen**.
- **Wissenserhalt, Sicherung von Fachkräften** und **Nachwuchsförderung** sind notwendig, um das hohe Niveau zur Endlagerforschung in Deutschland weiterhin zu gewährleisten.
- **Internationale Kooperationen** werden genutzt und bei Bedarf weiter ausgebaut.
- Projektförderung kann nur im Rahmen der **zur Verfügung stehenden Finanzmittel** realisiert werden.





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit
und
einen guten Heimweg