

**Wissenschaftliche Berichte
FZKA-PTE Nr. 13**

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen

**Abschlussveranstaltung des BMBF-
Förderschwerpunktes**

14. und 15. Februar 2012 am KIT Campus Nord

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

BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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

Juli 2012



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Vorwort

Die sichere Entsorgung und Endlagerung gefährlicher Abfälle ist eine der zentralen Aufgaben für eine nachhaltige gesellschaftliche Entwicklung. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die dafür nötigen wissenschaftlich-technischen Grundlagen, die technischen Anlagen und Verfahren.

Zum Schutz der Umwelt und zur Sicherheit jetziger und zukünftiger Generationen förderte der Bund seit 1988 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Ziel war es, jenseits der Gesetzgebungskompetenz des Bundes auf dem Gebiet der Abfallentsorgung, über wegweisende Forschungsergebnisse und innovative Technik langfristig sichere Lösungen zu ermöglichen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) förderte bis zur Beendigung des Förderschwerpunkts im Dezember 2011 insgesamt 165 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit einem Gesamtfördervolumen von ca. 90 Mio. Euro.

Im Jahr 1988 wurde die Forschungsförderung im Rahmen des Förderkonzepts „Abfallwirtschaft und Altlastensanierung“ mit Arbeiten zur Ablagerung von Abfällen in Salzkavernen aufgenommen. Die folgenden, seit 1991 vom Projektträger Karlsruhe betreuten, Forschungsaktivitäten zur Ablagerung gefährlicher Abfälle unter Tage umfassten Vorhaben zu den Schwerpunktthemen Geochemie und geochemische Modellierung (45 Vorhaben mit 27,8 Mio. Euro Förderung), Geophysik und geologischen Modellierung (33 Vorhaben mit 16,7 Mio. Euro), Geomechanik und Salzmechanik (31 Vorhaben mit 10,6 Mio. Euro) sowie Strecken- und Schachtverschlussysteme (26 Vorhaben mit 23,1 Mio. Euro).

Weitere Vorhaben behandelten übergeordnete Fragestellungen oder befassten sich mit speziellen, wissenschaftlich ähnlichen Fragestellungen aus dem Gebiet der Sicherheitsforschung für Bergbauregionen. Hier sind die Verbünde "Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Beispiel der Stadt Staßfurt" (6 Vorhaben) und "Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerkes" (10 Vorhaben) von besonderer Bedeutung gewesen.

Die Forschungsarbeiten waren auf das in Deutschland für die Untertagedeponierung präferierte Wirtsgestein Steinsalz ausgerichtet. Hierdurch ergab sich ein enger Bezug zur bundesfinanzierten, anwendungsorientierten Grundlagenforschung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. In diesem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten und ebenfalls vom Projektträger Karlsruhe betreuten Fördergebiet werden zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten aktuell noch fortgeführt.

Mit dem Ende des Jahres 2011 wurde der Förderschwerpunkt zur Ablagerung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen beendet. Die Schlussveranstaltung „Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ zieht nun, nach Abschluss aller geförderten FuE-Vorhaben, ein Resümee zum aktuellen Forschungs- und Wissensstand. Der vorliegende Materialienband beinhaltet hierzu die Vorträge, in denen Ergebnisse ausgewählter Vorhaben zu den oben genannten Schwerpunktthemen dargestellt sind, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit der durchgeführten Forschungsarbeiten erheben zu wollen. Interessierte seien deshalb auf die über die Technische Informationsbibliothek (TIB) öffentlich zugänglichen Schlussberichte sämtlicher geförderter Vorhaben verwiesen.

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

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

Diese Zusammenstellung der Vortragsunterlagen und anderer Materialien ist zur Information der Teilnehmer der Abschlussveranstaltung bestimmt. Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Eine auszugsweise oder vollständige Vervielfältigung ist erlaubt, wenn die Zustimmung der betroffenen Autoren vorliegt.

Inhaltsverzeichnis

Veranstaltungsprogramm	1
Ollig, R.....	3
<i>Grußwort (gehalten von Dr. Kautt, M.)</i>	
Dr. Pitterich, H.....	15
<i>Über 20 Jahre FuE zur untertägigen Ablagerung – Lessons learnt</i>	
Martin, J.....	33
<i>Rechtlicher Rahmen und Sicherheitsanforderungen</i>	
Dr. Wuttke, J.....	63
<i>Abfallaufkommen und geeignete Abfallströme für die UTD in Deutschland</i>	
Dr. Brassler, T.....	89
<i>Abfallanalytik, Reaktivität, Toxizität – Inventar von UTD</i>	
Dr. Hagemann, S. & <u>Dr. Herbert, H.-J.</u>	127
<i>Geochemische Forschung der GRS zu chemotoxischen Abfällen</i>	
Dr. Moog, H.....	155
<i>Thermodynamische Referenzdatenbasis THEREDA als Grundlage geochemischer Modellierung</i>	
<u>Dr. Just, A.</u> et. al.....	185
<i>Geophysikalische Erkundung und Charakterisierung für UTD</i>	
<u>Dr. Hammer, J.</u> et al.	219
<i>Geologische 3D-Modelle für UTD-Standorte – Generierung, Visualisierung und Nutzung</i>	
Dr. Minkley, W.....	275
<i>Nachweis der Integrität der geologischen Barriere von UTD</i>	
Prof. Dr. Lux, K.-H. & <u>Dr. Düsterloh, U.</u>	329
<i>Mechanisches Verhalten von Steinsalz – Laborversuche und Modellierung</i>	
Prof. Dr. Kudla, W.	385
<i>Streckenverschlusssysteme – am Beispiel von CARLA</i>	
Rumphorst, K.	431
<i>Schachtverschlusssysteme – am Beispiel Salzdetfurth</i>	

Hintergrund

Förderschwerpunkt:

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen

Die sichere Entsorgung und Endlagerung gefährlicher Abfälle gehört zu den zentralen Aufgaben für eine nachhaltige gesellschaftliche Entwicklung. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die dafür nötigen technischen Anlagen und Verfahren.

Zum Schutz der Umwelt und zur Sicherheit der Bürger fördert der Bund seit 1991 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Ziel ist es, jenseits der Gesetzgebungskompetenz, über wegweisende Forschungsergebnisse und innovative Technik langfristig sichere Lösungen zu gewährleisten.

Die in diesem Zusammenhang vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben fokussieren zwei Bereiche: Die Endlagerforschung und die Ablagerung gefährlicher Abfälle unter Tage (Untertagedeponieforschung, UTD-FuE). Im Bereich UTD lag der Förderschwerpunkt seit 2004 auf Vorhaben zu Verchlusssystemen, Sicherheitsbewertung, geochemischen Effekten, geophysikalischen Methoden und hydraulisch-mechanisch-chemischen Prozessen (HMC-Prozesse). Ausgerichtet waren diese jeweils auf das in der deutschen Untertagedeponieforschung präferierte Wirtsgestein Steinsalz.

Im Jahr 2011 läuft der Förderschwerpunkt zur Ablagerung gefährlicher Abfälle aus. Die Veranstaltung „Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ zieht nun, nach Abschluss aller geförderten FuE-Vorhaben, ein Resümee zum aktuellen Forschungs- und Wissensstand.

Information

Organisation:

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

Ansprechpartner:

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

Anmeldung:

Anmeldeformular: <http://www.ptka.kit.edu/wte/f46.php>
Anmeldungen werden bis zum 31.01.2012 erbeten.
Die Teilnahme ist kostenlos.

Veranstaltungsort:

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

Anfahrtsbeschreibung: www.kit.edu/besuchen/anfahrt.php

Dieser Flyer ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit des Bundesministeriums für Bildung und Forschung; er wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Ressourcen und Nachhaltigkeit
Redaktion und Gestaltung: akzentue kommunikation und beratung gmbh
Druck: BluePrint AG
Bonn, Berlin: Dezember 2011
Bildnachweis: Visual News sa

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen

Abschlussveranstaltung
14./15. Februar 2012



Programm

Dienstag, 14. Februar 2012

Begrüßung und Einführung

- 13:00 Grußwort
Ollig, R.; Bundesministerium für
Bildung und Forschung (BMBF)
- 13:20 Über 20 Jahre FuE zur untertägigen Ablagerung –
Lessons learnt
Dr. Pitterich, H.; Projektträger Karlsruhe (PTKA)

Untertagedeponie (UTD) Genehmigung, Abfälle

- 13:40 Rechtlicher Rahmen und
Sicherheitsanforderungen
Martin, J.; Thüringer Landesbergamt, Gera
- 14:10 Abfallaufkommen und geeignete Abfallströme
für die UTD in Deutschland
Dr. Wuttke, J., Umweltbundesamt Dessau-Rosslau
- 14:40 Diskussion

15:00 Kaffeepause

Geochemie und geochemische Modellierung

- 15:30 Abfallanalytik, Reaktivität, Toxizität -
Inventar von UTD
Dr. Brasser, T.; Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig
- 16:00 Geochemische Forschung der GRS
zu chemotoxischen Abfällen
Dr. Herbert, H.-J., Dr. Hagemann, S.;
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig

16:30 Thermodynamische Referenzdatenbasis

- THEREDA als Grundlage geochemischer
Modellierung
Dr. Moog, H., Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig

17:00 Diskussion

18:00 Empfang mit Abendessen

Geomechanik und Salzmechanik

- 10:20 Nachweis der Integrität der geologischen
Barriere von UTD
Dr. Minkley, W.; Institut für Gebirgsmechanik
GmbH (IfG), Leipzig
- 10:50 Mechanisches Verhalten von Steinsalz –
Laborversuche und Modellierung
Prof. Dr. Lux, K.-H.; TU Clausthal
- 11:20 Diskussion

Mittwoch, 15. Februar 2012

Geophysik und geologische Modellierung

- 08:30 Geophysikalische Erkundung und
Charakterisierung für UTD
Dr. Just, A.; Universität Leipzig
Dr. Schütze, C.; Helmholtz-Zentrum für
Umweltforschung (UFZ), Leipzig
- 09:00 Geologische 3D-Modelle für UTD-Standorte –
Generierung, Visualisierung und Nutzung
Dr. Hammer, J.; Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR),
Hannover
- 09:30 Diskussion
- 09:50 Kaffeepause

Strecken- und Schachtverschlusssysteme

- 11:40 Streckenverschlusssysteme –
am Beispiel CARLA
Prof. Dr. Kudla, W.; TU BA Freiberg
- 12:10 Schachtverschlusssysteme –
am Beispiel Salzdetfurth
Rumphorst, K.; Inaktive Werke K+S AG

12:40 Diskussion

13:00 Mittags-Imbiss vom Buffet

14:00 Veranstaltungsende

Grußwort

Ollig, R.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

(Der Vortrag wurde in Vertretung gehalten von Herrn Dr. M. Kautt, Projektträger Karlsruhe (PTKA))

„Zukunftsaufgaben im Bereich Ressourcen und Nachhaltigkeit“

Vortrag aus Anlass der Abschlussveranstaltung
„Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen“

Reinhold Ollig
Leiter des Referats 724
Ressourcen und Nachhaltigkeit

14./15.02.2012
Karlsruher Institut für Technologie

Politischer Rahmen I

Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung

- Definition von Zukunftsfeldern für eine gemeinsame Innovationspolitik
- Impulse für eine schnellere Umsetzung von Forschung in Produkte
- Bündelung der Kräfte aus Wissenschaft und Wirtschaft
- Verbesserte Bedingungen für Hightech-Gründungen und Mittelstand

**IDEEN
INNOVATION
WACHSTUM**
Die Hightech-Strategie für Deutschland



Hightech-Strategie
Innovationen sind der
Motor für Wachstum und
Wohlstand.

BMBF-Rahmenprogramm Forschung für Nachhaltige Entwicklungen (FONA)



Zentrale Aktionsfelder

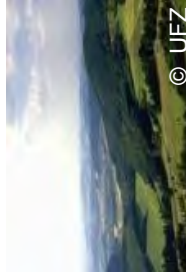
- Globale Verantwortung – Internationale Vernetzung
- Erdsystem und Geotechnologien
- Klima und Energie
- Gesellschaftliche Entwicklungen
- Nachhaltiges Wirtschaften und Ressourcen

Querschnittsthemen

- Nachhaltiges Landmanagement
- Ökonomie und Nachhaltigkeit
- Großgeräte und Forschungsinfrastrukturen

Forschungsprioritäten des Referats

- Rohstoffeffiziente Technologien
- Nachhaltiges Landmanagement
- Nachhaltiges Wassermanagement



© UFZ



© Dr. Mirtsch GmbH

➤ Internationale Partnerschaften

➤ KMU-innovativ

Querschnitts-
aufgaben

Rohstoffeffizienztechnologien

■ Hintergrund

- Nationale Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung (2002) – Verdopplung der Rohstoffproduktivität
- Rahmenprogramm Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft, WING (2004)
- Rohstoffstrategie der Bundesregierung (2010)



■ Maßnahmen

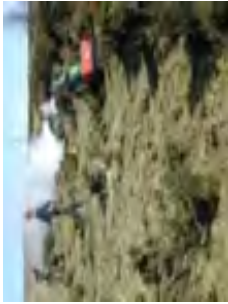
- r² – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Rohstoffintensive Produktionsprozesse
- r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien
- **Forschungsschwerpunkt 1:** Nachhaltige Nutzungsstrategien für strategische Metalle und Mineralien (Recycling, Substitution)
- **Forschungsschwerpunkt 2:** „Urban Mining“ – Rückgewinnung von Wertstoffen aus anthropogenen Lagern (Infrastruktur, Altdeponien, Hüttenhalden)



Nachhaltiges Landmanagement

■ Forschungsschwerpunkt A: Wechselwirkung zwischen Landmanagement, Klimawandel und Ökosystemdienstleistungen

- Landmanagement Strategien zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen
- Anpassung an Klimawandel
- Sozio-ökonomische Aspekte und Konsequenzen integrierter Klimaschutzziele



■ Forschungsschwerpunkt B: Innovative System- lösungen für ein nachhaltiges Landmanagement

- Methoden zur Evaluation von Ökosystemdienstleistungen
- Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Ökosystemdienstleistungen, Biodiversität, Klimawandel und Landmanagement
- Entwicklung sozio-ökonomischer Werkzeuge

www.sustainable-landmanagement.net

Nachhaltiges Wassermanagement



- **Wasser und Gesundheit**
 - Spurenstoffe / Krankheitserreger



- **Wasser und Energie**
 - Energieeffiziente Wasserver- und -abwasserentsorgung



- **Wasser und Ernährung**
 - Wasserverfügbarkeit / Nachhaltige Bewirtschaftung



- **Wasser und Umwelt**
 - Grundwasserbewirtschaftung / IWRM



- **Wasser in urbanen Räumen**
 - Intelligente Infrastrukturen / Re-use / Urban Mining



Internationale Partnerschaften

■ Förderrichtlinie: „Internationale Partnerschaften für nachhaltige Klimaschutz- und Umwelttechnologien sowie -dienstleistungen (CLIENT)“



- Ziel: modellhafte Projekte, Umwelt- und Klimaschutztechnologien und -dienstleistungen
- Zielländer: Brasilien, Russland, Indien, China, Südafrika, Vietnam
- Themen: I) Klimaschutz, II) Ressourcennutzung, III) Landmanagement, IV) Wassermanagement
- veröffentlicht 06/2010; drei Stichtage
- Nächster Stichtag: 31.08.2012

www.fona.de/client

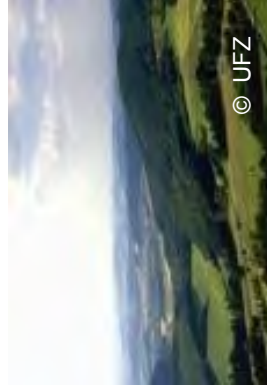
KMU innovativ - Ressourcen- und Energieeffizienz

- **Initiative des BMBF in 7 Technologiefeldern**
- **Zielstellung:** „Vorfahrt für Spitzenforschung im Mittelstand“
- **Zugang zur Förderung für KMUs erleichtern:**
 - Themenoffen und branchenübergreifend
 - Verfahrensvereinfachung, beschleunigte Bewilligung
- **Ressourceneffizienz:**
Rohstoffintensive Produktionsprozesse, Rohstoffproduktivität, Recycling- und Verwertungsverfahren
- **Nachhaltiges Wassermanagement:**
Trinkwassergewinnung, Wassereinsparung, Bewässerung, Energieeffizienz, Kopplung von Stoffströmen, Exportfähigkeit



www.kmu-innovativ.de

Eine Erfolgreiche Veranstaltung & Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



© UFZ



© Dr. Mirtsch GmbH







Über 20 Jahre FuE zur untertägigen Ablagerung – Lessons learnt

Dr. Pitterich, H.

Projekträger Karlsruhe (PTKA)

FuE zur untertägigen Ablagerung - Lessons learnt

Abschlussveranstaltung 14./15. Februar 2012

-  **Projektträger Karlsruhe - WTE-E**
-  **Historie der UTD-Forschung**
-  **Forschungsschwerpunkte**
-  **Statistik zur UTD-FuE**
-  **Ergebnisse und Umsetzung**
-  **Erkenntnisse**

Projektträger Karlsruhe - PTKA-WTE - E

■ Projektförderung (adm.-wiss. Projektbetreuung)

- Nukleare Sicherheitsforschung (BMBF-722)

● Untertägige Ablagerung von Abfällen (BMBF-724)

(Fr. Baumann, Fr. Ernst, Fr. Geyer, Fr. Köhler, Fr. Martin, Hr. Baumann, Hr. Brückner, Hr. Bittendorf, Hr. Bühler, Hr. Knobel - unterstützt durch viele Kolleginnen und Kollegen aus dem PTKA-WTE-Stab)

- Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen (BMBF-726)

- Endlagerung radioaktiver Abfälle (BMWi-III B3)

■ Querschnittsaktivitäten und Gremien

- Arbeitsgruppe Optionen (BMU-RSIII2)
- NKS-EURATOM und Internationale Gremien
- Kompetenzverbände Kerntechnik und Strahlenforschung
- Entsorgungskommission ESK und Ausschüsse EL, ST



Historie der UTD-Forschung

- ... zuerst Untertagedeponierung
- 1972 UTD Herfa-Neurode geht in Betrieb (... Heilbronn ... Zielitz ... SDH)
- ... dann bundesseitig geförderte FuE
- 1988 Erste Projektförderung zu Deponiekaverne
- 1990 PT AWAS - Förderkonzept „Abfallwirtschaft und Altlasten“
- 1990 Veröffentlichung TA Abfall („TA Sonderabfall“)
- 1991 BMBF beauftragt PTE im KfK mit Betreuung der UTD-FuE
- 1998 BMBF-Förderkonzept „Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geol. Formationen“ (Endlager- *UND* Untertagedeponie-Forschung)
- 1998 Energieforschung (Endlagerforschung) von BMBF zu BMWi
- 2003 Evaluierung der UTD-FuE (Fokussierung + neue Schwerpunkte)
- 2011 Abschluss des Förderschwerpunkts

Forschungsschwerpunkte I

BMFT-Förderkonzept „Abfallwirtschaft“ (BMFT und PT-AWAS, August 1990), ausgerichtet auf die „Sonderbauform“ Kaverne zur Untertagedeponierung

3.6.2 Förderaktivitäten: Untertägige Ablagerung

Langfristige Wirksamkeit natürlicher Barrieren

Fragen zur Standortwahl und -bewertung

Technologien zur Vorbehandlung der Abfälle

Technologien zum Einbringen der Abfälle

Methoden zur Erfolgskontrolle und Überwachung

Forschungsschwerpunkte II

BMBF-Förderkonzept „Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ (BMBF-414 und PTE, April 1998)

- A Weiterentwicklung von ELA- und UTD-Konzepten unter Sicherheitsgesichtspunkten**
 - A1 Abfallcharakterisierung und -klassifizierung**
 - A2 Wissenschaftliche Grundlagen für Sicherheitsanforderungen**
 - A3 Weiterentw. von Einlagerungs-, Handhabungs- und Überwachungstechniken**
 - A4 Charakterisierung und Eigenschaften potentieller Wirtsgesteinsformationen**
 - A5 Geotechnische Barrieren**

- B Verbesserte Instrumente für die Sicherheitsbewertung von ELA und UTD**
 - B1 Szenarientwicklung**
 - B2 Verhalten der Wirtsgesteinsformation**
 - B3 Chemische und physikalische Effekte im Nahfeld**
 - B4 Verhalten von geotechnischen Barrieren**
 - B5 Verhalten von geologischen Barrieren**
 - B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen**
 - B7 Validierung von Modellen, Unsicherheitsanalyse**

Forschungsschwerpunkte III (ab 2003/2004)

Schwerpunkte nach Evaluierung der FuE zum BMBF-Förderkonzept „Forschungsförderung zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ (Okt. 2003)

- I Geotechnische Barrieren (A5+B4) - insbes. Dammbauwerke**
- II Methoden + Codes für die Sicherheitsbewertung (B1+B6)**
- III Chemische + physikalische Effekte im Nahfeld von UTD / UTV (B3) - Gas / TDB**
- IV Charakterisierung + Eigenschaften des Wirtsgesteins (A4) - Geophysik**
- V Verhalten der Wirtsgesteinsformation (B2) - THM(C)-Modellierung**

Statistik zur UTD-FuE I

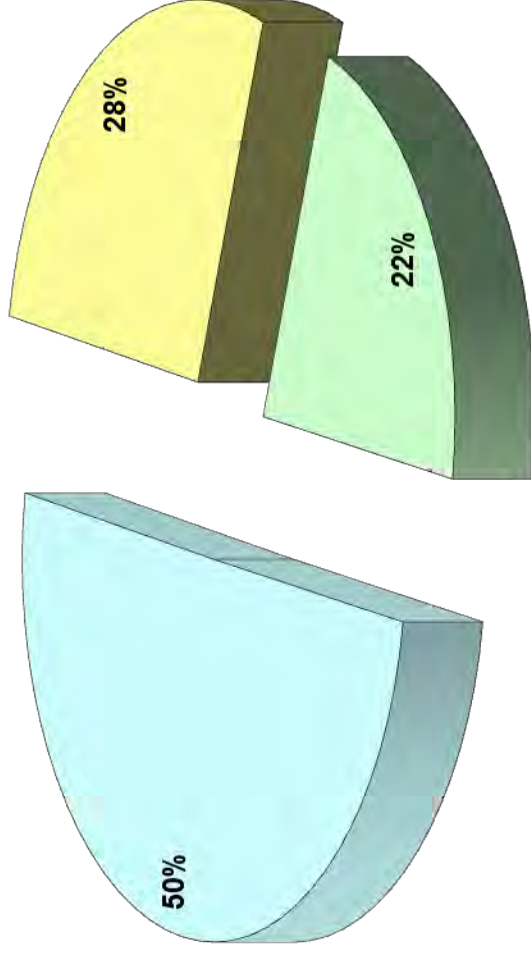
- **FuE-Vorhaben zum Schwerpunkt UTD** **149 Vorhaben**
- **Fördervolumen** **rd. 90 Mio. €**
- **Förderschwerpunkte**

Geochemie und geochem. Modellierung	45 Vorhaben - 27,8 Mio €
Geophysik und geol. Modellierung	33 Vorhaben - 16,7 Mio €
Geomechanik und Salzmechanik	31 Vorhaben - 10,6 Mio €
Strecken- und Schachtverschlüsse	26 Vorhaben - 23,1 Mio €
- **Besonderheit: Förderung von FuE zur „Sicherheitsforschung für Bergbauregionen“ aus Mitteln des Disporahmens (16 Vorhaben der Verbände Staßfurt I und II)**

Statistik zur UTD-FuE II

Verteilung der Fördermittel auf Forschungsstellen

(Bundesbehörden oder -ämter unter „Fraunhofer, Leibniz, Helmholtz“)



■ Hochschulen ■ Fraunhofer, Leibniz, Helmholtz ■ Unternehmen

BEAUFTRAGT VOM

 Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



PTKA

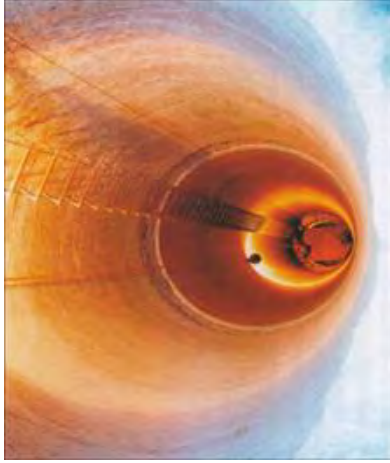
Projekträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Ergebnisse I

Starke Relation zur projektgeförderten Endlagerforschung des Bundes, BMWi-Förderkonzept „Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011 – 2014)“, dort Nutzung von Ergebnissen und Fortsetzung wiss. Schwerpunkte

Datenbanken - SODA, ISDA, THEREDA
Ressortübergreifende Finanzierung durch BMBF, BMWi
und BMU (BfS)



Schachtverschlüsse - Umsetzung
von FuE-Ergebnissen im Bergbau
(vgl. Vortrag Hr. Rumphorst)



PTKA

Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

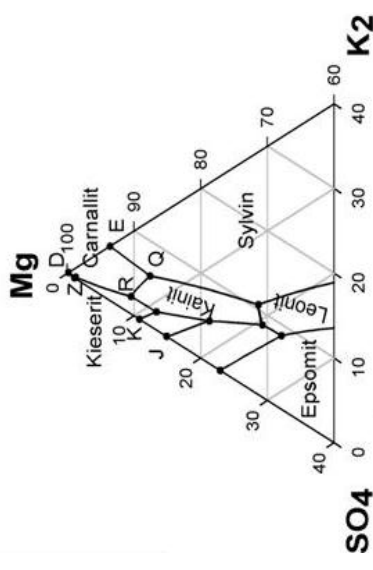
Ergebnisse II

Veranstaltung bietet ausgewählte Ergebnisse der FuE zu den Schwerpunkten **Geochemie, Geophysik + Geologische Modellierung, Geomechanik + Salzmechanik und Verschlusssysteme**

Ergebnisdarstellung im Detail (Konzepte, Geräte, Werkstoffe, Verfahren, Datenbanken, Rechenprogramme ...) sprengte Rahmen, alle FuE-Ergebnisse sind dokumentiert und öffentlich zugänglich (TIB)

Seite -26-

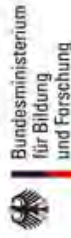
Rund 2-3 Dutzend Patentanmeldungen !



Geochemie:

- **Bedeutende Fortschritte bei Modellierung hoch salinärer Lösungen und dem Lösungs- / Sorptionsverhalten von Metallen / Schwermetallen**

BEAUFTRAGT VON



PTKA

Projekträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

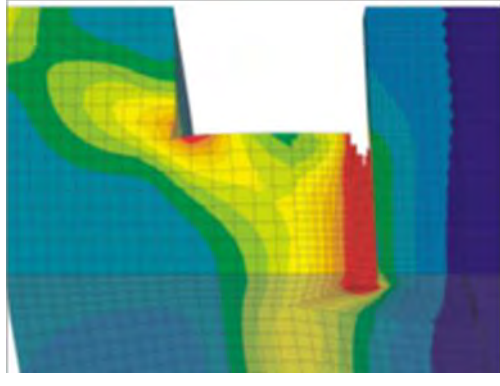
Ergebnisse III

Geophysik / geologische Modelle

- Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und -geräte (Seismik, Georadar, Geosonar und Geoelektrik)
- Verbesserung der großräumigen und zerstörungsfreien geologischen Erkundung des Wirtsgesteins Salz

Geomechanik/Salzmechanik (FuE-Verbundvorhaben)

- Stoffesentwicklung und -vergleich (benchmark) für numerische Simulationsmodelle (Pfeilermodell ->)
- Formulierung von Spannungs- und Dilatanzkriterien
- Schädigungs- und Verheilungsprozesse berücksichtigt
- Thermisch, hydraulisch, mechanisch und chemisch gekoppelte Codes

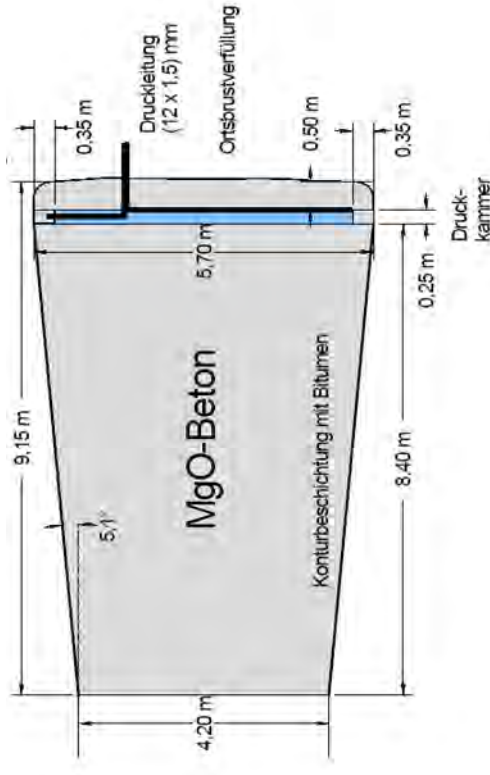


Ergebnisse IV

Verschlusssysteme:

- Entwicklung von Konzepten für Strecken- und Schachtverschlüsse (mit diversitär und redundant konzipierten Funktionselementen)
- Für Funktionselemente von Strecken- und Schachtverschlüssen (z.B. für Bentonitdichtelemente (Äquipotenzialsegmente) und die Dammbaustoffe Salzbeton und Sorelbeton (Rezepturenentwicklungen)) sind wesentliche Entwicklungsleistungen erbracht

- Demonstration der Machbarkeit anhand der zur Erprobung ausgeführten Bauwerke für Strecken- und Schachtverschlüsse in den Bergwerken Sondershausen, Salzdettfurth und Teutschenthal



Erkenntnisse (Lessons learnt I)

Thematisch als “end-of-the-pipe”-Gebiet gesehenes Forschungsgebiet kann durchaus “High-Tech”-Ergebnisse und weltweit beachtete wissenschaftliche Resultate erzielen (aber man braucht eine gewisse Kontinuität und Zeit)

Erfolgreicher “deutscher Sonderweg” UTD in der Abfallentsorgung (vgl. Konzepte in USA, GB, etc. - Projekt “Stocamine” in F gescheitert) wiss. abgesichert

Ressortübergreifende Zusammenarbeit (BMBF - BMWi - BMU) ermöglichte die Bündelung der Mittel und Kräfte (bei Koordinierung durch einen PT)

Das Ziel der Entwicklung des Instrumentariums für den Sicherheitsnachweis von Untertagedeponien kann als (nahezu) erreicht angesehen werden

Erkenntnisse (Lessons learnt II)

Wissenschaftliche Ergebnisse der BMBF-geförderten FuE von (hoher) Bedeutung für weitere Themenfelder: Altlasten, Bergbau, CO₂-Verpressung, Deponietechnik, Endlagerung ... Ressourcen (Seltene Erden), Umwelttechnik

Deutschland verfügt/e über eine kleine aber vitale Forschungslandschaft auf geo-wissenschaftlichen Gebieten (s. a. "Sonderprogramm Geotechnologien")

... aber ...

Einsatz des Instrumentariums in Genehmigungsverfahren für UTD nicht absehbar (kein weiterer Bedarf an UTD-Kapazität)

Einsatz in Sicherheitsanalysen zu planfestgestellten Anlagen nicht verlangt bzw. hoffentlich (Havariefälle) nicht erforderlich

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen / Info: www.ptka.kit.edu - Projektträger Karlsruhe



PTKA

Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Rechtlicher Rahmen und Sicherheitsanforderungen

Martin, J.

Thüringer Landesbergamt, Gera

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen - Rechtlicher Rahmen und Sicherheitsanforderungen

Jörg Martin

Thüringer Landesbergamt, Gera

Abfallbegriff und gesetzliche Grundlagen

Der Begriff „Abfall“ ist, wenn er umgangssprachlich verwendet wird, in unterschiedlichsten Bereichen in unserer Industriegesellschaft anzutreffen. Mit der bunten Grafik (Abb.1), dem wohl eher grauen Bildes vom Abfall entgegenstehend, soll der Vielfältigkeit, der Komplexität, der Verknüpfung und der Abhängigkeit mit dem Umgang des Themas „Abfall“ Ausdruck verliehen werden. Ebenso verschiedenartig, untereinander abhängig und sicherlich auch miteinander kompliziert sind die gesetzlichen Regelungen bezogen auf den Abfallbegriff. Dies soll durch die angeführten Gesetze verdeutlicht werden, wobei bei jedem von Ihnen in irgendeiner Form eine Beziehung zum Abfallbegriff hergestellt werden kann. Zu denken ist dabei an den Bodenaushub (BBodSchG), an Klärschlamm aus Abwasserreinigung (WHG), an radioaktive Abfälle (AtomG), an bergbauliche Abfälle bzw. an die Regelungen zur Abfallbeseitigung als Zulassungsvoraussetzung gemäß § 55 BBergG sowie an Siedlungs- und Industrieabfälle (KrW-AbfG), um nur einige Beispiele zu nennen.

Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, kurz KrW-AbfG, ist das zentrale Bundesgesetz des deutschen Abfallrechts und bildet die gesetzliche Basis der Abfallbewirtschaftung. Hierin findet sich auch in § 3 die Legaldefinition des Begriffes „Abfall“, nämlich dass Abfälle im Sinne dieses Gesetzes alle beweglichen Sachen sind, die unter bestimmte Abfallgruppen zugeordnet werden können (siehe Anhang I des Gesetzes) und deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.

Bei der Abfallentsorgung im Bergbau kann eine Unterscheidung grundsätzlich in radioaktive und nicht radioaktive Stoffe vorgenommen werden (Abb. 2). Die Sonderstellung der radioaktiven Abfälle wird in der Darstellung aufgeführt (rosa hinterlegt), ist für Thüringen jedoch nicht bedeutsam. Bei nicht radioaktiven Stoffen geht es darum Abfälle zu beseitigen, sich derer vollständig zu entledigen, oder diese zu verwerten - d.h. nutzbringend je nach Erfordernis einzusetzen.

Das grundsätzliche Regelwerk sowie die Zuordnung der Abfälle erklären sich aus dem/der:

- AtomG vom 17.07.1985 zuletzt geändert durch Gesetz vom 31.07.2011 (aber ein sogenanntes „Endlagergesetz“ in der Gesetzgebungsphase),
- Krw/AbfG vom 27.09.1994 zuletzt geändert durch Gesetz vom 11.08.2010,
- BBergG vom 13.08.1980 zuletzt geändert durch Gesetz vom 31.07.2009,
- DepV vom 27.04.2009 zuletzt geändert durch Gesetz vom 17.10.2011,

- Versatzverordnung (VersatzV) vom 24.07.2002 zuletzt geändert durch Gesetz vom 15.07.2006 (Verordnung des Abfallrechts und gilt für Betriebe die der Bergaufsicht unterliegen und Abfälle als Versatz verwerten).

Das sichere und ordnungsgemäße Führen eines Betriebes sowie der Arbeitnehmerschutz werden im Weiteren durch die Allgemeine Bundesbergverordnung (ABBergV) und die Gesundheitsschutz-Bergverordnung (GesBergV) sowie zusätzlich der Gefahrstoff-Verordnung (gilt für Belange des Bergwesens solange nicht in der GesBergV gleichwertige Regelungen getroffen worden sind.) geregelt.

Gesetzesentwicklung in der Abfalldponierung

Unter besonderer Berücksichtigung der untertägigen Entsorgung von Abfällen entwickelten sich die einschlägigen Gesetzlichkeiten im Abfallrecht (Abb. 3).

Mit dem Abfallgesetz aus dem Jahre 1986 gewann der Verwertungsgedanken zunehmenden Einfluss und wurde mit der Einführung des KrW-AbfG (Verabschiedung 1994) auch in Gesetzesform gebracht. Ergänzend sind in diesem Zusammenhang 3 Verwaltungsvorschriften aus den Jahren 1990 bis 1993 zu erwähnen, die das AbfallG später das KrW-AbfG unteretzten. Eine davon war die TA Sonderabfall oder auch TA Abfall mit integriertem Langzeitsicherheitsnachweis.

Die novellierte Deponieverordnung aus dem Jahr 2009, welche als Fortschreibung der Verordnung aus 2002 anzusehen ist, fasst die 3 alten Verwaltungsvorschriften und drei weitere Verordnungen aus den Jahren 2001 bis 2005 (Abfallablagerungsverordnung, Deponieverordnung, Deponieverwertungsverordnung) zusammen. Mit der Deponieverordnung wird die Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises im Rahmen des Zulassungsverfahrens inhaltlich verbindlich festgelegt. Damals in der TA Abfall wurde der Langzeitsicherheitsnachweis unter Punkt 10.3.3 bereits gefordert, ohne aber detailliert auf den Inhalt einzugehen.

Gesetzesentwicklung Abfallverwertung

Eine etwas andere Entwicklung gab es bei der Verwertung von Abfällen. Durch die intensiv durchgeführten Diskussionen um die Begriffe Abfallstoff und Reststoff leitete sich der Verwertungsgrundsatz für den Versatz ab. Ein Aspekt war dabei u.a. aus der Notwendigkeit heraus in den Anfang der 1990er-Jahre stillgelegten Kalibergwerke (in den neuen Bundesländern) geschaffene Hohlräume sicher, schnell und wirtschaftlich vertretbar, stabilisieren zu müssen. Hierfür wurde das Regelwerk für den Einsatz von Abfällen als Versatz aus der TA Abfall heraus über die Technischen Regeln „Verwertung von bergbaufremden Abfällen“ hin zur VersatzV und den dann auch novellierten Technischen Regeln „Versatz“ entwickelt (Abb. 4). Thüringen zählt sicherlich hierbei zu den Mitbereitern der Grundlagen und hat auch im weiteren Entwicklungsprozess einen nicht unbedeutenden Beitrag geleistet.

Entwicklung der Einsatzregeln von Abfallstoffen

Wie erwähnt, mussten die Probleme der Verwahrung der Kaligruben angegangen werden. Dazu zählten insbesondere die sich abzeichnenden Schädigungsprozesse durch relativ zügig umzusetzende Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen zu minimieren. Es galt zu klären, wo sich die versatzpflichtigen Grubenfelder befinden und welche Materialien als Versatzmaterial zur Verfügung stehen. Der ausschließliche Versatz mit Bergemühen und der vieldiskutierte Haldenrückbau zur Versatzmaterialgewinnung waren aus technischen und Kostengründen nur begrenzt oder gar nicht möglich. Deshalb wurden Überlegungen angestellt, hierzu geeignete bergbaufremde Abfälle als Versatzmaterial einzusetzen. Anfang der 1990er Jahre gab es diesbezüglich noch keine gesetzlichen Vorgaben oder Richtlinien. Vom Länderausschuss Bergbau wurde der ad-hoc Arbeitskreis „Bergbauliche Hohlräume und Abfallentsorgung“ ins Leben gerufen (Abb. 5). In Zusammenarbeit mit weiteren Institutionen wurden erste Anforderungen formuliert, die dann 1996 in den Technischen Regeln zunächst für den Einsatz von bergbaufremden Abfällen als Versatz aufgenommen und später im Jahr 2006 als Technische Regeln „Versatz“ novelliert wurden.

Technische Regeln „Versatz“

Die Technischen Regeln „Versatz“ umfassen verschiedene Sachthemen und ihren Bezug untereinander (siehe Abb. 6). Die rechtlichen Grundlagen wurden bereits mit den Beziehungen zwischen KrW-AbfallG und BBergG in den vorangegangenen Darstellungen erläutert. Der Versatz erfolgt aus bergtechnischen und bergsicherheitlichen Gründen. Zu dessen Aufgaben zählen:

- a) Schutz der Tagesoberfläche sowie Verhinderung gemeinschädlicher Einflüsse (wie Gebirgsschläge) durch:
 - Verbesserung der Standsicherheit des Gebirges
 - Minderung von Bodenbewegungen und Bergschäden
 - Verringerung der Abbauverluste der Lagerstätte durch Stützwirkung
- b) Vorsorge gegen Gefahren für Leben und Gesundheit sowie zum Schutz von Sachgütern durch:
 - Verhütung von Grubenbränden
 - Verhinderung des Entstehens gefährlicher Gas- und Staubgemische
 - Verbesserung der Bewetterung und des Grubenklimas
 - Verringerung und Verhinderung von Zuflüssen

Für das Einbringen von Abfall stehen verschiedene Versatzverfahren zur Verfügung, wie z.B. auf mechanischer, pneumatischer oder auch auf hydraulischer Art und Weise, wobei noch weiter nach Einbringtechnologie und Abbindeverhalten differenziert werden kann.

Anforderungen und Eignung von Abfällen

Bei den Anforderungen ist die stoffliche Zusammensetzung, der Arbeits- und Gesundheitsschutz sowie der Brand- und Explosionsschutz von besonderer Bedeutung (siehe Abb. 7).

Bezüglich der Abfallzusammensetzung ist die bauphysikalische Eignung eine der grundlegendsten Anforderungen an das Versatzmaterial. Die Beurteilungsmaßstäbe sind von Bergwerk zu Bergwerk verschieden und sind deshalb in den jeweiligen Betriebsplanzulassungen festzulegen. Sie hängen von den spezifischen Gegebenheiten im Bergwerk, der Zielstellung der Versatzmaßnahme, dem Versatzverfahren und der Versatztechnologie ab.

Bezüglich der Umweltauswirkungen sind unterschiedliche Grenzwerte der Versatzverordnung einzuhalten. Außerhalb des Salzbergbaus erfolgt dies entsprechend von Einzelfallbetrachtungen unter Beachtung und Würdigung des geogenen Hintergrundes, d.h. dass die geogenen Grundgehalte nicht überschritten werden dürfen. Dagegen sind im Salzgestein die Grenzwerte weniger restriktiv, wenn durch einen Langzeitsicherheitsnachweis der dauerhafte Abschluss der Abfälle von der Biosphäre gewährleistet ist. Bezüglich des Arbeits- und Gesundheitsschutzes spielt in diesem Zusammenhang insbesondere der § 4 der GesBergV eine zentrale Rolle. Dieser schreibt vor, dass im Betrieb ein offener Umgang mit kennzeichnungspflichtigen Gefahrstoffen nicht zulässig ist. Als Letztes muss ausgeschlossen werden, dass sich unter Tage keine explosiblen Gasgemische entzünden bzw. Brände entstehen können. Dies wird z.B. durch die Begrenzung des Organikanteils und des Gasbildungspotentials erreicht.

Abgrenzung Untertagedeponie (UTD) zu Untertageversatz (UTV)

Was ist unter genehmigungsrechtlicher Sicht für die Einrichtung einer UTD bzw. einer UTV-Anlage (Abb. 8) erforderlich? Für die UTD ist neben der Umweltverträglichkeitsprüfung die Führung eines Langzeitsicherheitsnachweis (obligatorischer Rahmenbetriebsplan = Planfeststellungsverfahren) erforderlich. Beim dem UTV kann der Langzeitsicherheitsnachweis entfallen, wenn die zur Verwertung eingesetzten Abfälle die Grenzwerte der Anlage 2 zur Versatzverordnung einhalten und keine Verunreinigung des Grundwassers zu besorgen ist. Darüber hinaus hat die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises unter Berücksichtigung der Vorgaben der Anlage 4 der Versatz-Verordnung zu erfolgen. Auch hier sind, wie bei der Einrichtung einer UTD, die Ausschlusskriterien bezüglich Organik, Toxizität, Gasbildung usw. von ähnlicher Natur. Die Genehmigung für den UTV erfolgt über bergrechtliche Entscheidungen unter Beteiligung der Fachbehörden / Kommunen sowie im Einvernehmen mit der zuständigen Abfallbehörde.

In Deutschland sind 5 UTD genehmigt (Abb. 9). In der Abb. 10 sind die Bergwerke, welche Abfälle als Versatz verwerten, aufgeführt.

Sicherheitsanforderungen

Ausgehend vom Gesamtsystem „Abfall/Untertagebauwerk/Gebirge“ stellt die Standortbezogene Sicherheitsbeurteilung den Rahmen der durchzuführenden Nachweise für die sichere und ordnungsgemäße Errichtung, Betrieb und Nachbetriebsphase einer Anlage zur untertägigen Abfallentsorgung dar (Abb. 11). Eine Analyse der sich ergebenden Gefährdungsmöglichkeiten bildet hierfür die Grundlage. Das Hauptelement der Beurteilung stellt der Langzeitsicherheitsnachweis dar. Aber auch die notwendigen weiteren Einzelbewertungen zur Betriebssicherheit, zum Schutz der Beschäftigten, zu Fragen der Standsicherheit und letztlich zu den Festlegungen zur Stilllegung sind von Bedeutung. All dies ist miteinander verknüpft und muss in der gesamtheitlichen Bewertung in sich schlüssig sein.

Langzeitsicherheitsnachweis

Durch den Langzeitsicherheitsnachweis ist zu belegen, dass die Errichtung, der Betrieb und die Nachbetriebsphase einer untertägigen Abfallentsorgung zu keiner Beeinträchtigung der Biosphäre führen können, d.h., dass prinzipiell die Abfälle durch geeignete Maßnahmen vollständig und dauerhaft eingeschlossen werden (Abb. 12). Die Führung des Nachweises zur Langzeitsicherheit in den Versatzbergwerken ist kein statischer Prozess. Die Änderung der Gesetzeslage, der fortgeschrittene Stand von Wissenschaft und Technik aber auch die Tatsache, dass die Erfüllung der Versatzpflicht die Voraussetzung für den Erhalt der Langzeitsicherheit darstellt, machten es erforderlich, die erstellten Nachweise immer wieder auf den Prüfstand zu stellen und zu aktualisieren.

In Thüringen wurden deshalb in den Ergänzungszulassungen zu den Abschlussbetriebsplänen zur Bestätigung der Langzeitsicherheit bzw. in den Zulassungen der zugehörigen Betriebspläne „Versatz“ jeweils Nebenbestimmungen erhoben. Diese sollen sicherstellen, dass die Gültigkeit der Nachweise von der planmäßigen Versatzdurchführung sowie von der Errichtung technischer Barrieren nach Abschluss der Betriebsphase nach dem jeweiligen Stand der Technik abhängig gemacht wird.

Mit dem Führen des Langzeitsicherheitsnachweises geht eine Bewertung verschiedener Zustände und Szenarien einher. Die aufgestellte Matrix soll dies schematisch darstellen (Abb. 13).

Bewertung natürlicher Barrieren

Die Bewertung der Salinargesteine bezüglich ihrer Eignung als geologische Barriere erfolgt grundsätzlich anhand des duktilen Materialverhaltens. Es wird dadurch charakterisiert, dass auf mechanische Beanspruchungen bei wirkenden ausreichend hohen Druckeinspannungen

durch relaxationsartige Spannungsumlagerungen in Verbindung mit plastisch viskosen Deformationen und nicht durch Spannungsakkumulation mit Rissbildungen reagiert wird.

Für die Bewertung der natürlichen Barrieren ist es wichtig das Vorhandensein der Schutzschichten im Hangenden und Liegenden der Lagerstätte zu bewerten, die Integrität des den Abfall umgebenden Gebirges nachzuweisen und natürlich auch auftretende Schwachstellen zu analysieren (Abb. 15).

Die Funktionstauglichkeit einer Salzbarriere gilt als rechnerisch nachgewiesen, wenn eine Entstehung von Wegsamkeiten aus gebirgsmechanischer Sicht ausgeschlossen werden kann:

- **Minimalspannungskriterium**
Integrität ist gewährleistet, wenn die herrschende Druckeinspannung (die kleinste Komponente des Gebirgsspannungstensors) den Wert des hydrostatischen Teufendruckes überschreitet.
- **Deformationskriterium**
Integrität ist dann gegeben, wenn die ausgewiesene Deformation deutlich kleiner als die maximal ertragbare Deformation bleibt. Für eine salinare Schutzschicht wird als Grenzwert eine horizontale Zerrung $< 1\%$ angesetzt (Aversin-Kriterium).
- **Dilatanzkriterium:**
Integrität ist dann gewährleistet, wenn die ausgewiesenen Beanspruchungszustände unterhalb der Dilatanzgrenze bleiben (30-40% der Festigkeit).

Bewertung technischer Barrieren

Wie dargestellt, soll der Abfall neben natürlichen Barrieren (z.B. durch Ton- und Salzhorizonte) auch durch technische Barrieren von der Biosphäre getrennt gehalten werden. Dies wird durch die Integration in ein System von verschiedenartigen technischen Barrieren (Big-Bag, Fässer, Bergeversatz, Streckendämme /-verschlüsse, Schachtverschlüsse) gewährleistet. Hierzu ist in der Abb. 15 schematisch ein den Abfall einhüllendes Barrierensystem dargestellt. Die einzelnen Funktionsmerkmale einer technischen Barriere, sei es dessen Material, Dichtheit oder Permeabilität, Stabilität und Konstruktion, bauen aufeinander auf und stehen somit in gegenseitiger Abhängigkeit, wobei der jeweilige Anteil am Gesamtkonzept sehr unterschiedlich sein kann.

Schema der Abfallstoffzulassung

Gegenüber der Beseitigung von Abfällen in einer UTD, welche mit dem Planfeststellungsbeschluss, im engeren Sinn abschließend geregelt wird, ist die Abfallverwertung ein dynamischer Vorgang. In Abb. 16 soll schematisch erläutert werden, wie ein Abfallstoff als Versatzmaterial (z.B. als Stapelversatz in Big-Bag oder als Spül- oder Dickstoffversatz) zum

Einsatz kommt. Voraussetzung dafür im Salzbergbau ist, dass prinzipiell ein Erfordernis aus bergbausicherheitlicher oder bergbautechnischer Sicht besteht. Weiterhin muss für den Verwertungsbereich die entsprechende Standortbezogene Sicherheitsbeurteilung durchgeführt und die für den jeweiligen Abfall entsprechende Technologie des Einbringens festgelegt worden sein. Eingebettet ist dies in einem zugehörigen bergrechtlichen Zulassungsverfahren, welches in den meisten Fällen mit der Genehmigung des „Versatzbetriebsplanes“ und mit der Bestätigung des Langzeitsicherheitsnachweises durch die zuständige Bergbehörde umgesetzt wird.

Am Anfang des Verwertungsprozesses steht die Bewertung des Abfalls durch den Erzeuger und die Einstufung durch die zuständige Abfallbehörde. Bei ausländischen Abfallstoffen kommt die Notifizierung (sozusagen die Genehmigung der Einfuhr) hinzu.

Der Entsorger prüft den Abfall (Grundlage: Deklarationsanalyse + Labortest) und klärt, ob dieser in sein Verwertungsregime hineinpasst – u.a. auch unter dem Focus des Arbeits- und Gesundheitsschutzes. Dies erfolgt i.d.R. begleitend durch einen Gutachter, welcher dann auch die Einschätzung als Vorlage für die Genehmigung eines großmaßstäblichen Versuches mit begrenzter Menge vornimmt. Auf Grundlage dessen stellt danach der Entsorger bei der zuständigen Behörde den Antrag für die Versuchsdurchführung. Hierfür hat sich der Begriff der „Bergerprobung“ eingebürgert. Größenordnungsmäßig werden in diesem Rahmen ca. 500 t bis 2500 t Abfälle verarbeitet.

Unter Beteiligung der zuständigen Abfallbehörde ergeht bei positiver Entscheidung die Genehmigung aus bergrechtlich und abfallrechtlicher Sicht mit der Auflage der Erarbeitung eines „Bergbautauglichkeitsgutachtens“ (enthält wesentliche Aspekte wie Bauphysik, Gefahrstoffe, Gasbildung, Verträglichkeit innerhalb Rezeptur etc.) und der bergbauhygienischen Bewertung durch das Hygiene-Institut des Ruhrgebietes.

Im Anschluss daran wird der Versuchsbetrieb in Verbindung mit weiteren begleitenden Untersuchungen durchgeführt. Wenn dieser ebenfalls erfolgreich verlaufen ist, wird durch den Entsorger der Antrag auf Verwertung einer bestimmten Jahrestonnage gestellt. Am Schluss steht dann die bergrechtliche und abfallrechtliche Entscheidung einschließlich der Erteilung einer „Allgemeinen Zulassung“ nach § 4 Abs.1 GesBergV mit Einschränkungen hinsichtlich der Gültigkeit und des Abfallerzeuger/-verwerter, der Versatzart und der Abfallmenge.

Schlusswort

Die Darstellung vom Regelwerk zur untertägigen Abfallentsorgung und deren Anforderungen an die Sicherheit und Rechtmäßigkeit ist das Ergebnis eines Entwicklungsprozesses beginnend mit den Überlegungen, dass Abfall auch ein Wertstoff ist und Rohstoffe nach Möglichkeit schon von Beginn an weitestgehend genutzt werden sollten. Hierbei kamen unterschiedlichste Aufgabengebiete miteinander in Berührung.

Die Notwendigkeit, die Vielschichtigkeit und damit einhergehende Verknüpfungen in der Bearbeitung führten zu einem umfassenden Regelwerk, welches sich, unbenommen des weiteren Entwicklungspotentials, auf hohem Niveau befindet und vielleicht auch seines Gleichen sucht. Gerade diese Vernetzung, die interdisziplinäre Zusammenarbeit nicht nur einzelner Wissenszweige, sondern die generelle Verbindung zwischen Wissenschaft, Praxis und Gesetzgebung brachten dieses Regelwerk hervor (Abb. 17). Sicherlich auch ein Grund mal eine positive Bilanz zu ziehen. Es soll aber auch zugleich Ansporn sein, dieses Thema weiterhin auf einer breiten Basis weiterzubearbeiten, zu diskutieren und nicht einzuengen. Es bleibt demzufolge festzustellen, dass eine solche Plattform der Zusammenarbeit, egal in welcher Form, weiterhin aufrechterhalten werden sollte. Sie ist wichtig und fördert den Dialog zwischen unterschiedlichen Fachbereichen, gerade im Umgang mit diesem sensiblen Thema.



Abschlussveranstaltung zum Förderschwerpunkt „Untertägige Ablagerung“

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen

RECHTLICHER RAHMEN UND SICHERHEITSANFORDERUNGEN

Jörg Martin

Rangordnung Vorschriften



THÜRINGER
LANDESBERGAMT

FREISTAAT
THÜRINGEN

GRUNDGESETZ

Gesetze

BBergG, KrW-/AbfG, BlmschG,
NatSchG, WaldG, BBodSchG, WHG,
SprengG, zugehör. Ländergesetze

Rechtsverordnungen

ABBergV, GesBergV, VersatzV, DepV,
BBodSchV, **GefahrstoffV,**
BG-Vorschriften (UVV) ...

Technische Regeln

LAGA, TR Versatz, RAB, SprengLR,
TRGS ...

Anerkannte Regeln
der Technik

DIN, VDE, DVGW, BG-Regeln,
Hinweise des TLBA...

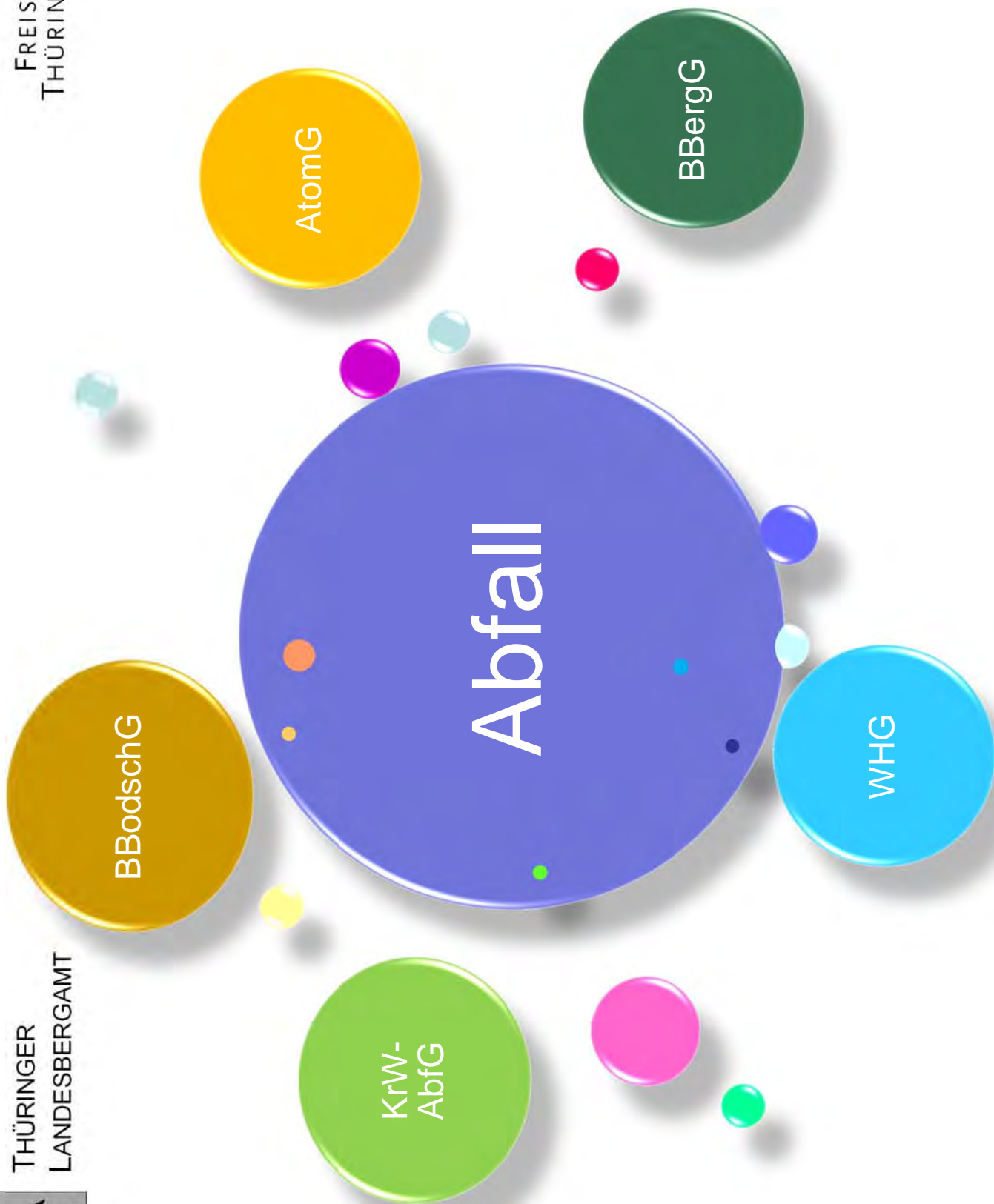
Verwendung Abfallbegriff



THÜRINGER
LANDESBERGAMT



FREISTAAT
THÜRINGEN



Fremdabfälle im untertägigen Bergbau



THÜRINGER
LANDESBERGAMT

FREISTAAT
THÜRINGEN

Abfallentsorgung

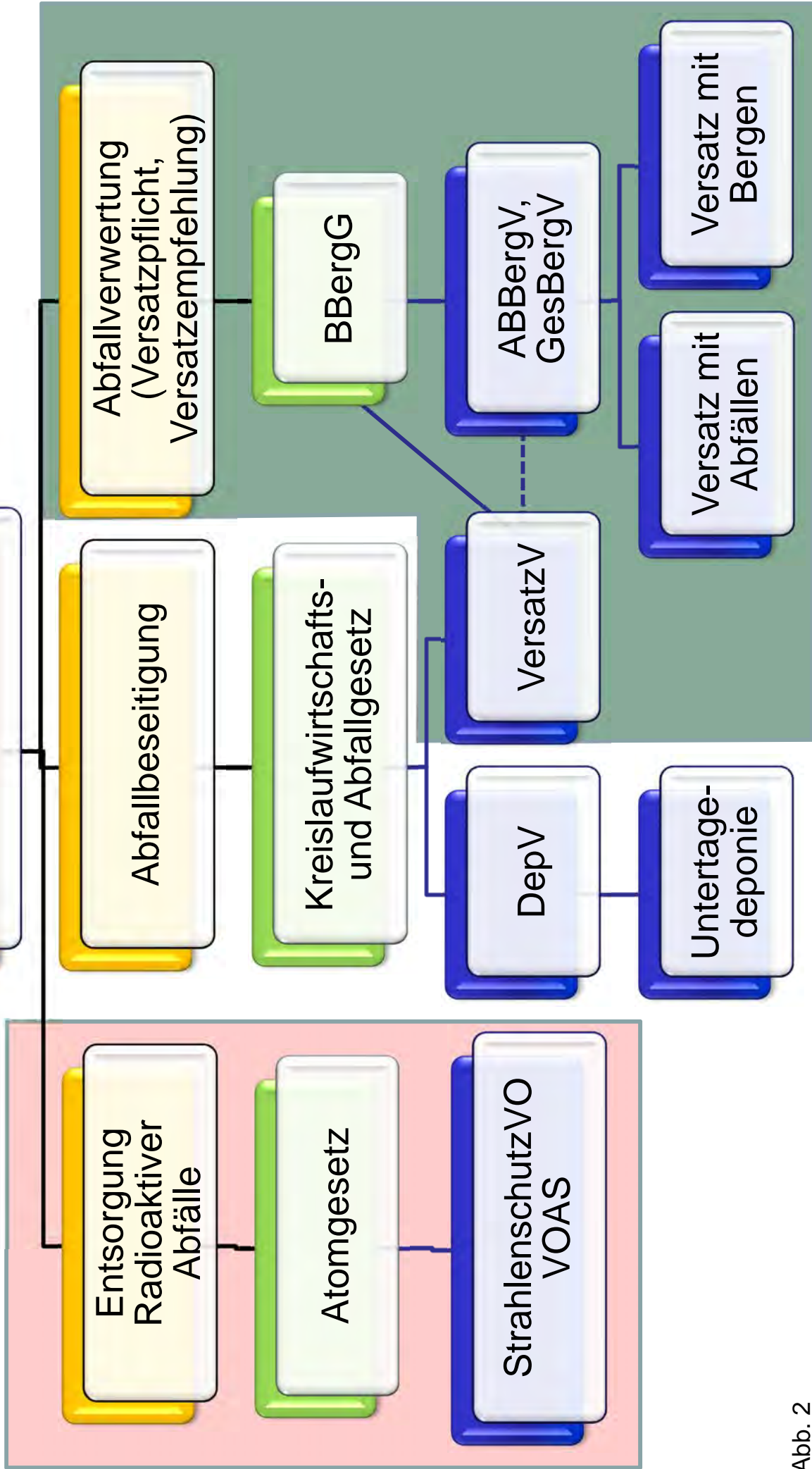


Abb. 2

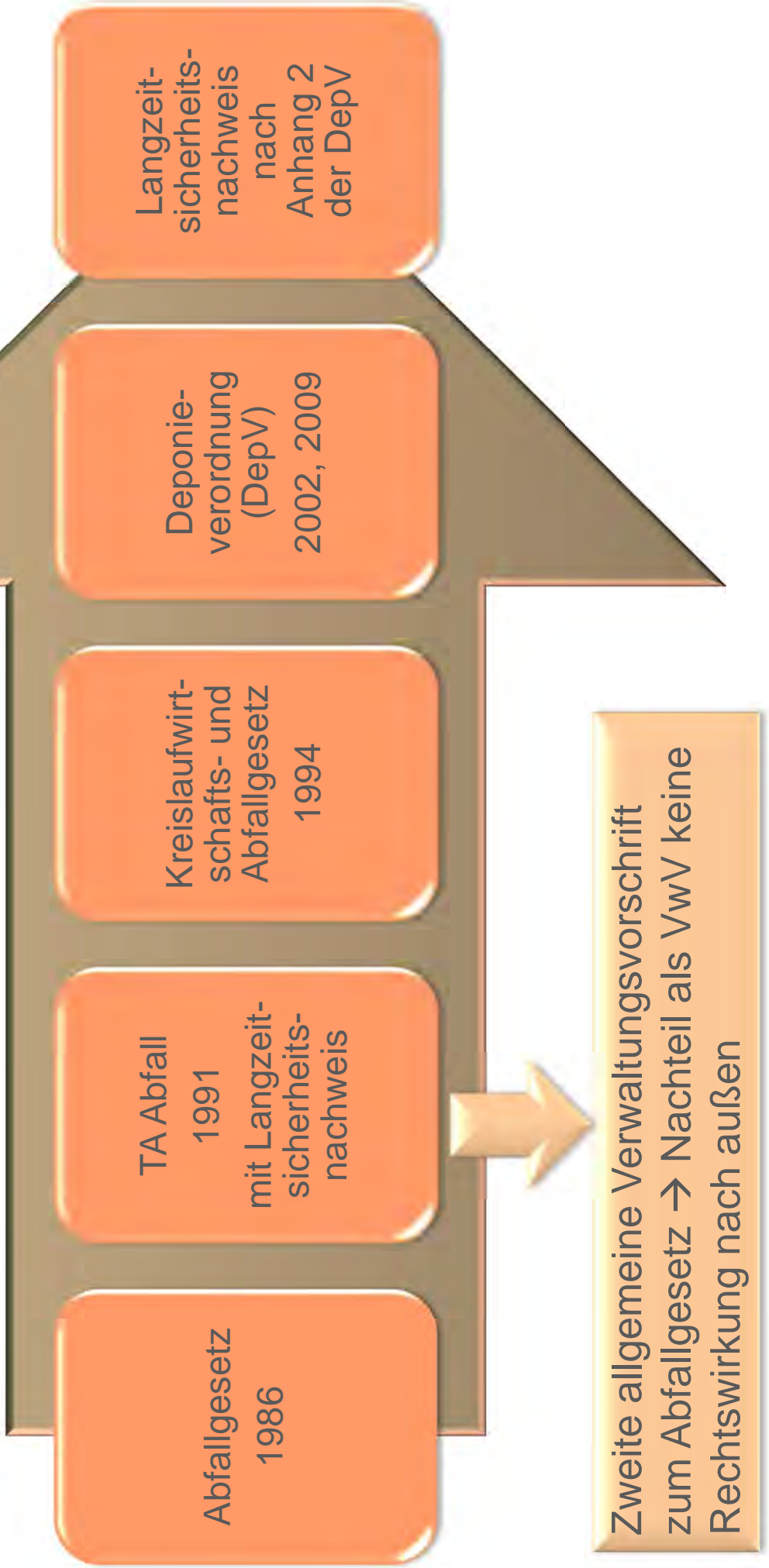
Gesetzesentwicklung Abfalldeponierung

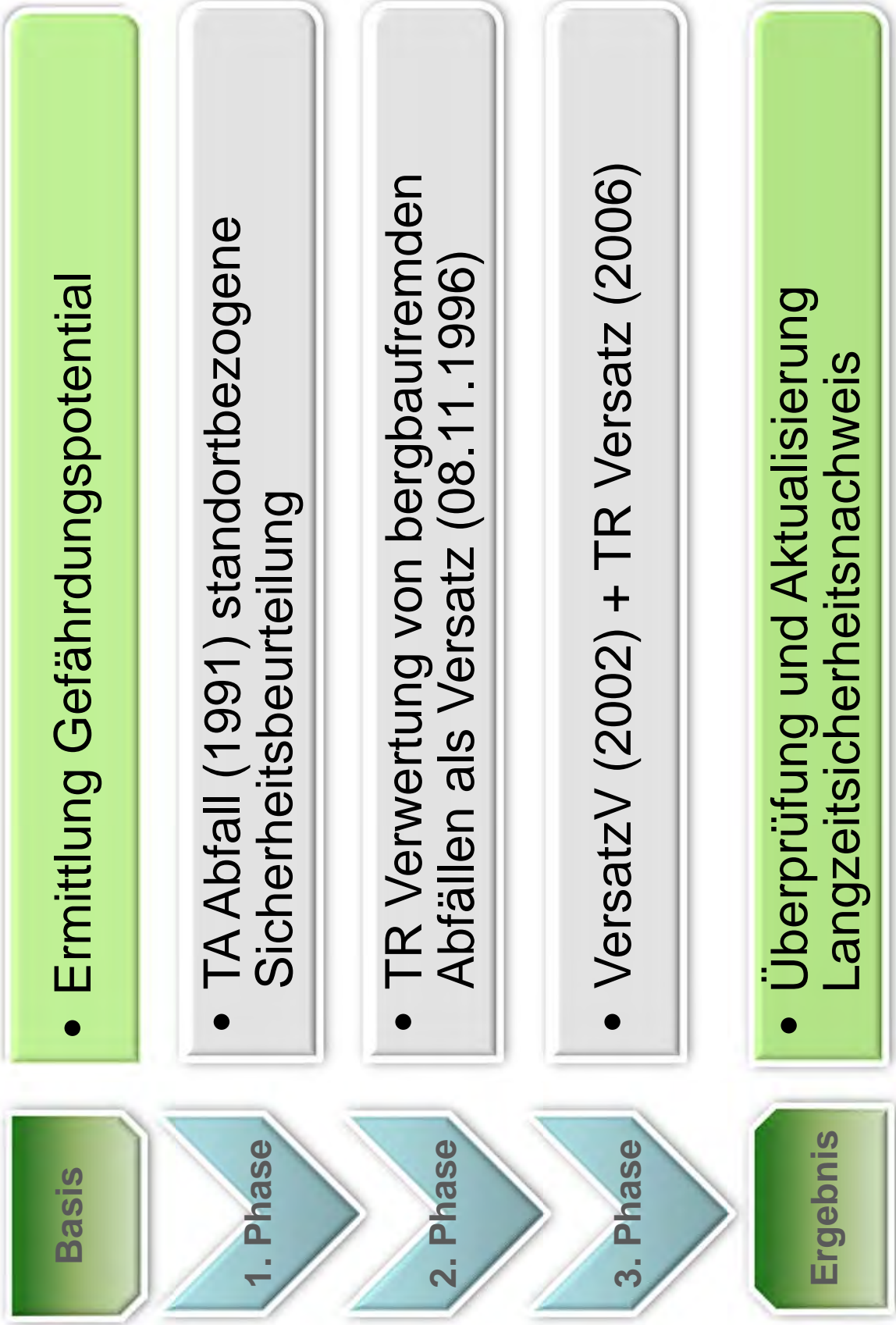


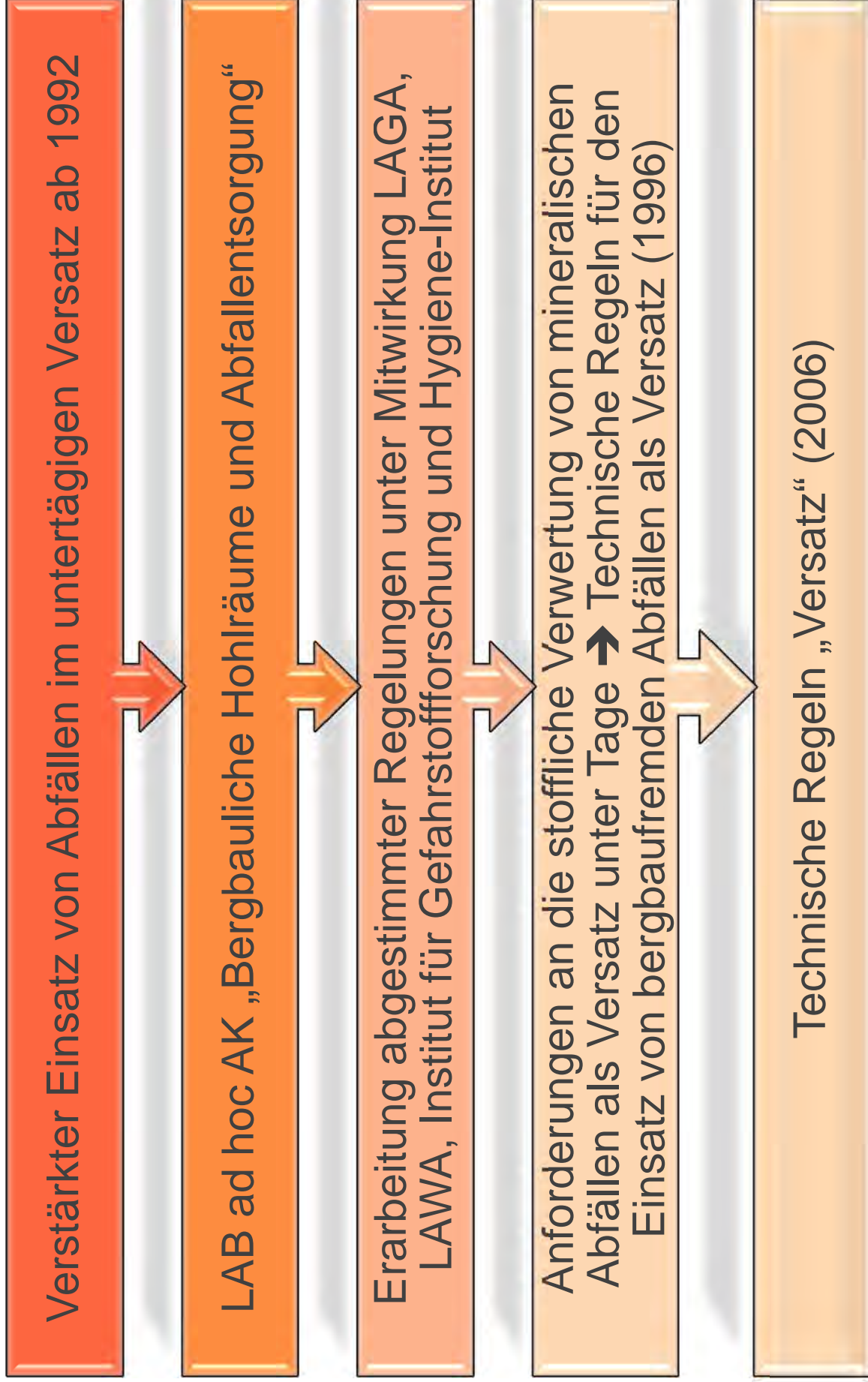
THÜRINGER
LANDESBERGAMT



FREISTAAT
THÜRINGEN











Anforderungen an die Verwendung von Abfällen als Versatzmaterial

Stoffliche Zusammen-
setzung des
Versatzmaterials

Bauphysikalische Eignung
und keine schädlichen
Umweltauswirkungen

Arbeits- und
Gesundheits-
schutz

Verbote und
Einschränkungen
des § 4 GesBergV für
kennzeichnungspflichtige
Gefahrstoffe
(allgemeine Zulassung)

Brand- und
Explosionsschutz

keine Erhöhung der
Brandlast und Bildung
explosibler Wetter durch
Gasbildung

Abgrenzung UTD zu UTV



THÜRINGER
LANDESBERGAMT

FREISTAAT
THÜRINGEN

UTD

UVP und LSN erforderlich

zur Deponierung vorgesehene
Abfälle dürfen nicht unter
Ausschlusskriterien des § 7
Absatz 2 DepV fallen

Abfallrechtliche Planfeststellung
nach § 31 KrW/AbfG mit UVP,
ggf. vorher ROV

UTV

LSN teilweise erforderlich

Versatzpflicht bzw. Versatz-
empfehlung nötig

Abfälle müssen bestimmte
Grenzwerte einhalten
(GesBergV)

Bauphysikalische Eignung
erforderlich (Druckfestigkeit)

Bergrechtliche Zulassung

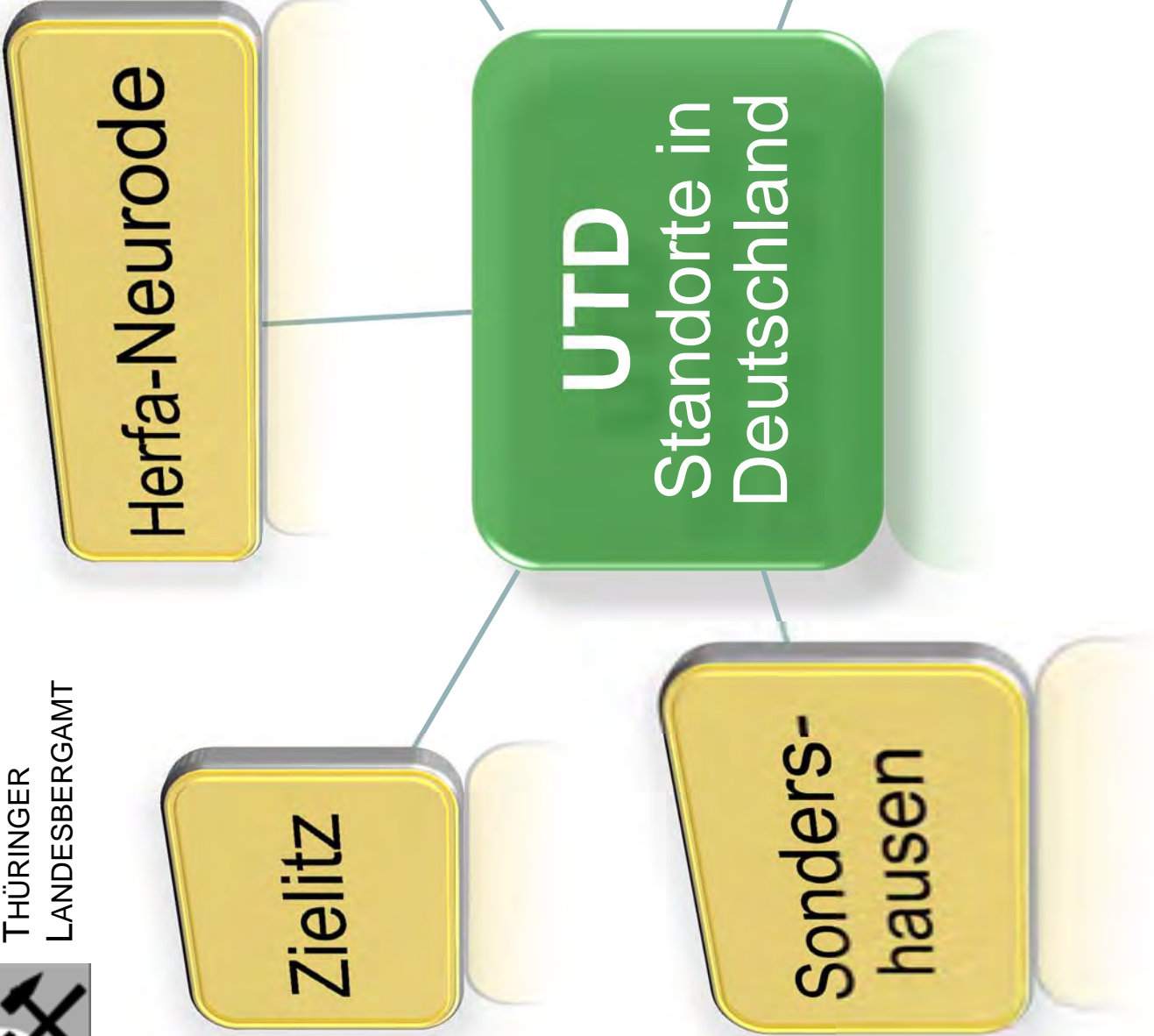
UTD-Standorte



THÜRINGER
LANDESBERGAMT



FREISTAAT
THÜRINGEN





Nutzung von Abfällen im UTV Standorte in Deutschland

Salzgstein

- Bernburg
- Bleicherode
- Hattorf
- Kochendorf
- Sollstedt
- Sondershausen
- Stetten
- Teusenththal
- Unterbreizbach
- Wintershall

Anderes Wirtsgestein

- Grube Clara / Oberwolfach
- Grube Wohlverwahrt-Nammen / Meggen
- Grube Dreislar



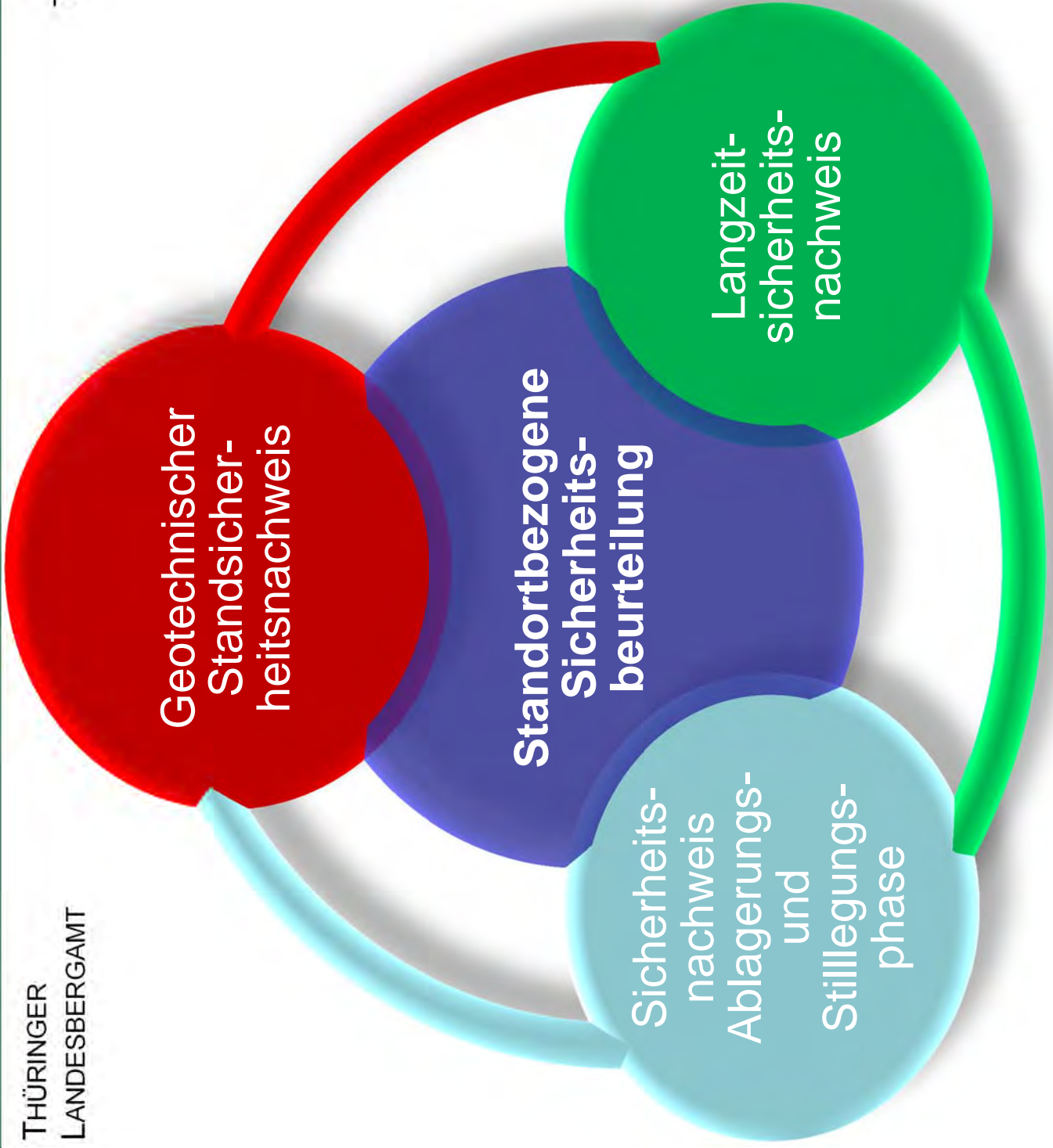
ohne Nachweis
Langzeitsicherheit

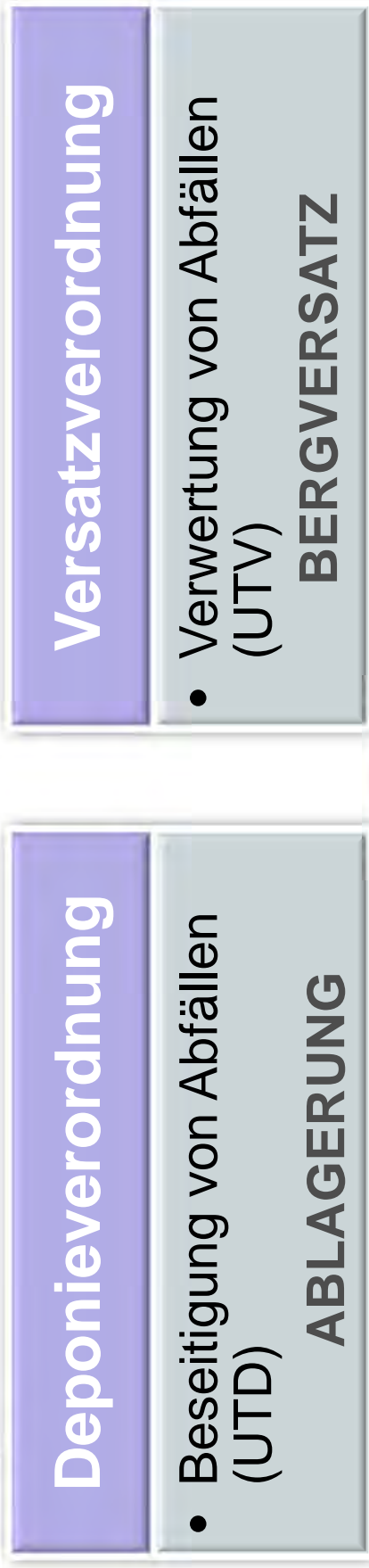
Sicherheitsanforderungen



THÜRINGER
LANDESBERGAMT

FREISTAAT
THÜRINGEN





Langzeitsicherheit

Nachweis im Rahmen der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung für Bergwerke im Salzgestein, die gefährliche – besonders überwachungsbedürftige - Abfälle
verwerten oder beseitigen)



PRINZIP
„Vollständiger Einschluss“

Langzeitsicherheitsnachweis



THÜNINGER
LANDESBERGAMT

FREISTAAT
THÜRINGEN

Bewertung technischer
Barrieren und Eingriffe
*Abfallbeschaffenheit, Einbring-
verfahren, Streckendämme und
Schachtverschlüsse sowie
Schächte, Grubenbaue,
Bohrungen etc.*

Bewertung der natürlichen
Barrieren
*Wirtsgestein, Nebengestein,
Deckgebirge*

Mehrbarriersystem

Langzeitsicher- heitsnachweis

Bewertung natürlich bedingter
Ereignisse
*Subrosion, Diapirismus,
seismische Ereignisse*

Bewertung von Auswirkungen
technisch bedingter
Ereignisse und Prozesse,
sofern diese den vollständigen
Einschluss gefährden
*Bergbaubedingte Gebirgs-
auflockerungen, undichte
Bohrungen, Laugeneinbrüche etc*

Bewertung natürlicher Barrieren



THÜRINGER
LANDESBERGAMT

FREISTAAT
THÜRINGEN

Salinargebirge

Schutzschicht- bewertung

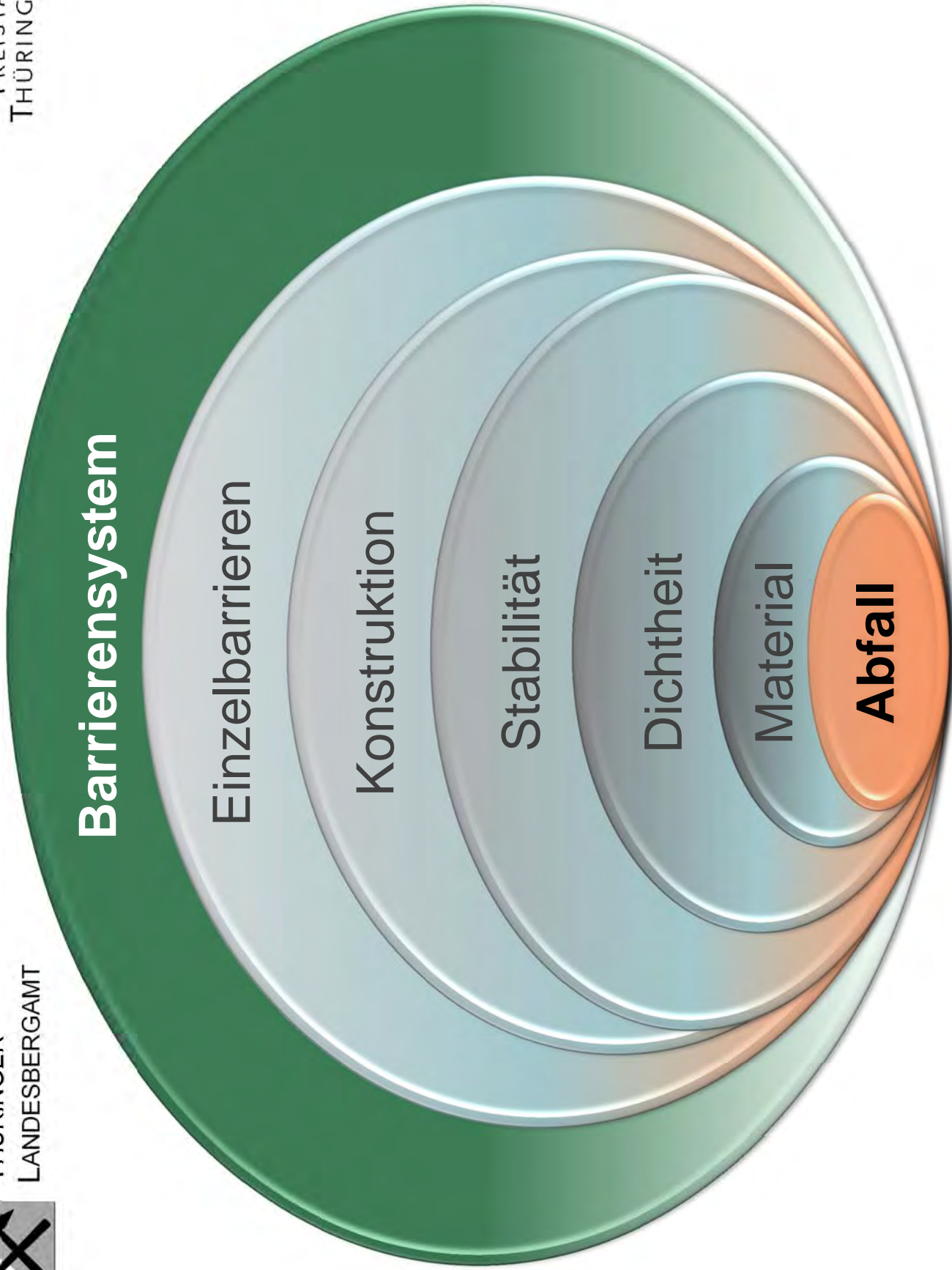
- Mächtigkeit
- Ausbildung

Integritätskriterien

- Deformationskriterium
- Minimalspannungskriterium
- Dilatanzkriterium

Schwachstellenanalyse

- Fehlstellen / Ausdünnungen
- Störungen
- Gaszutritte / Zuflüsse





Basis

Zugelassener „Versatzbetriebsplan“ mit Bestätigung
des Langzeitsicherheitsnachweises

VORAUSSETZUNG

- Versatzerfordernis
- Nachweis Langzeitsicherheit
- Einbringverfahren

„BERGERPROBUNG“

- Abfalleinstufung / Prüfung der Eignung
- Gutachterliche Einschätzung
- Mengenmäßige und zeitliche Beschränkung

VERWERTUNG

- „Bergbautauglichkeitsgutachten“
- Bergbauhygienische Bewertung
- Festsetzung Verwertungsmenge

Befristete abfall- und bergrechtliche Genehmigung

Abfall- und bergrechtliche Genehmigung + eingeschränkte allgemeine Zulassung (§ 4 GesBergV)

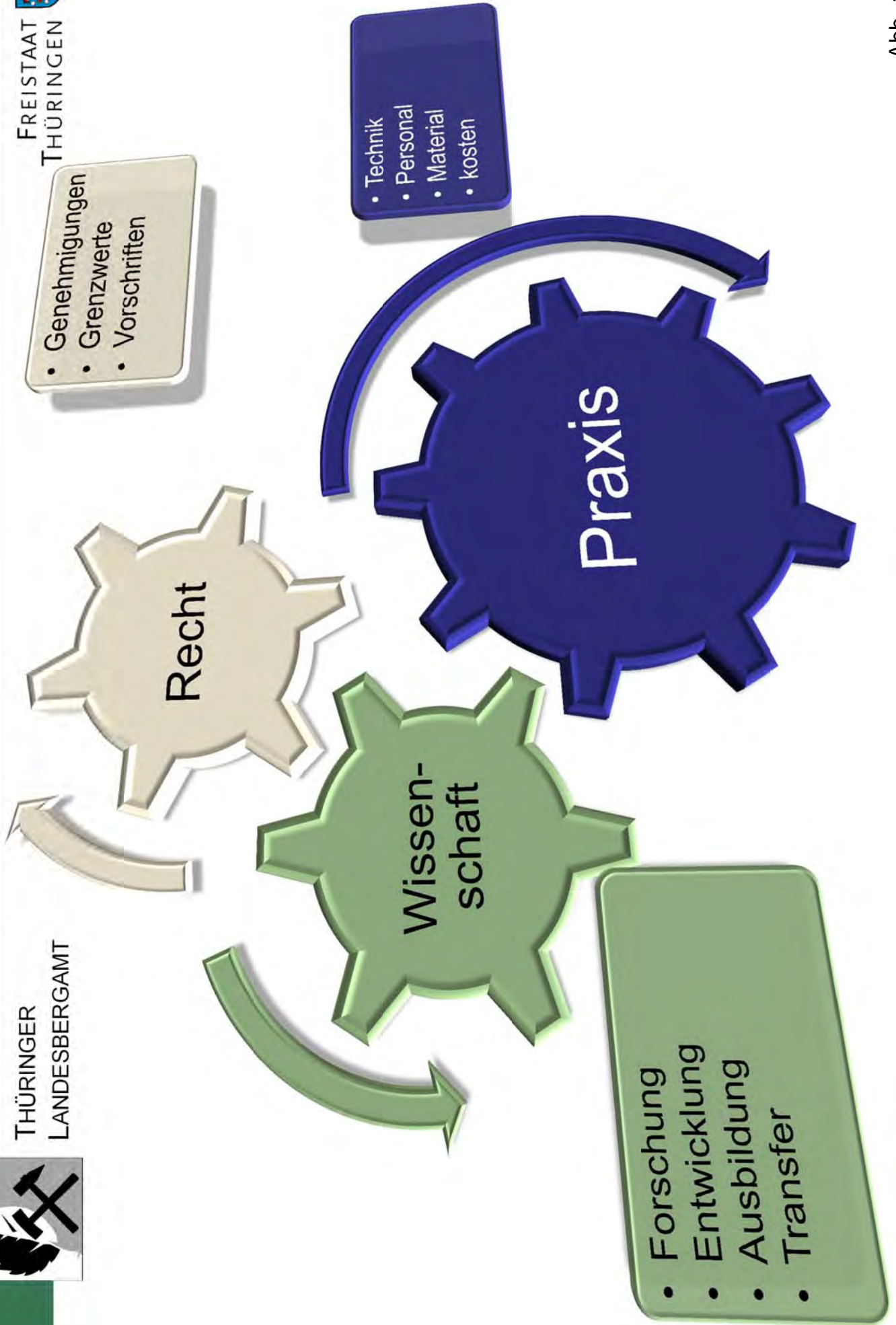
Zusammenwirken



THÜRINGER
LANDESBERGAMT



FREISTAAT
THÜRINGEN





THÜRINGER
LANDESBERGAMT

**...und immer auf
der sicheren
Seite!**

**Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit**



Glück auf !

Miner by
HSB-Cartoon

FREISTAAT
THÜRINGEN



Abfallaufkommen und geeignete Abfallströme für die UTD in Deutschland

Dr. Wuttke, J.

Umweltbundesamt Dessau-Rosslau

Abfallaufkommen und Abfallströme für die UTD in Deutschland

Dr. Joachim Wuttke

Umweltbundesamt

Leiter des Fachgebiets III 1.5

"Kommunale Abfallwirtschaft, Gefährliche Abfälle, Anlaufstelle Basler
Übereinkommen"

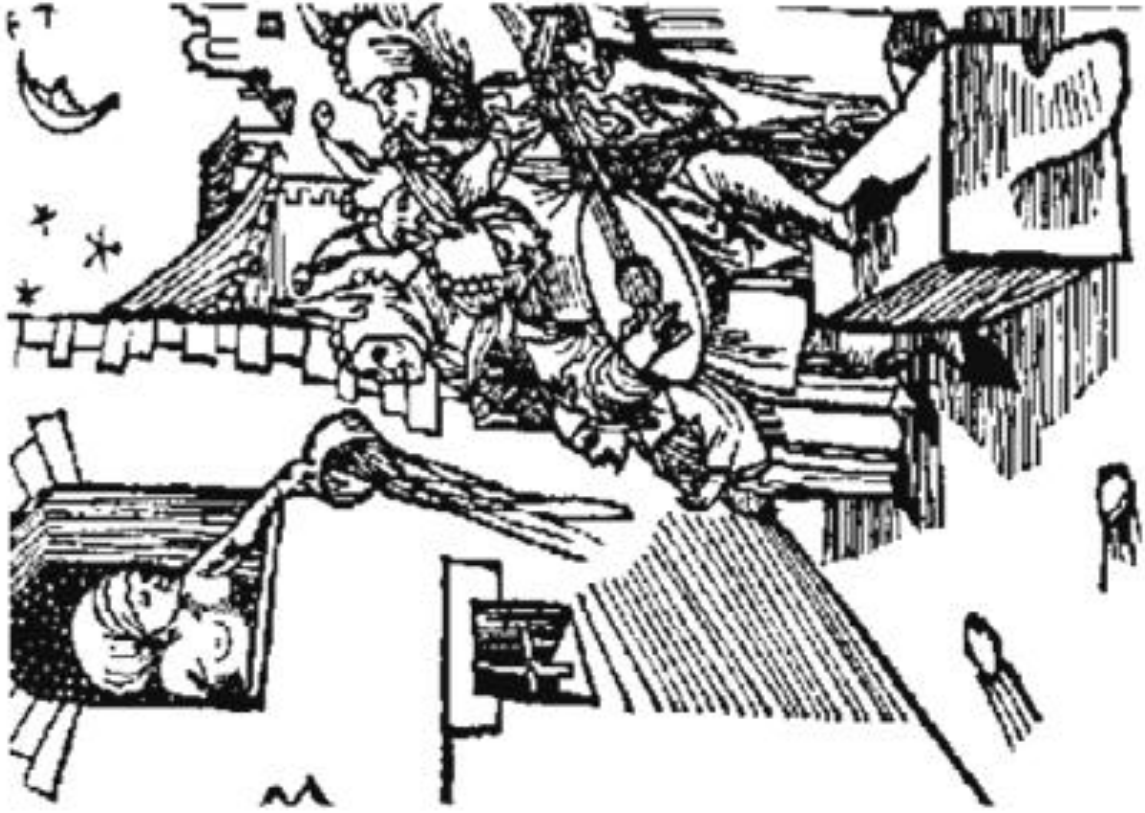
Rückblick und Überblick

- Ungeordnete und gesundheits- und umweltgefährdenden Abfallentsorgung
- "Vergraben und Vergessen"
- umwelt- und gesundheitsgefährdende Verbrennung
- illegale Entsorgung im In- und Ausland
- Entwicklung einer Entsorgungskonzeption Ende des vorigen Jahrhunderts
 - Erlass rechtlicher Regelungen
 - Aufbau einer Entsorgungsinfrastruktur

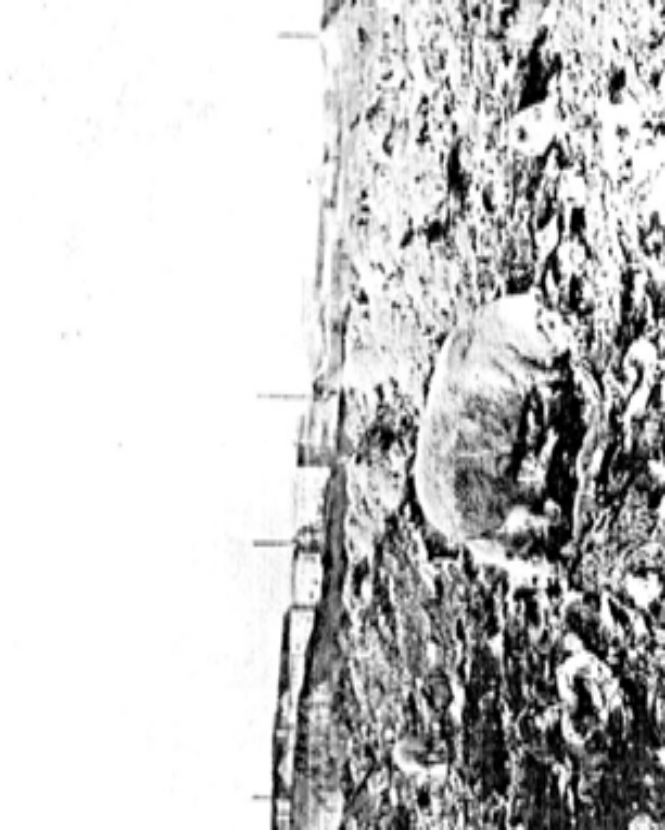
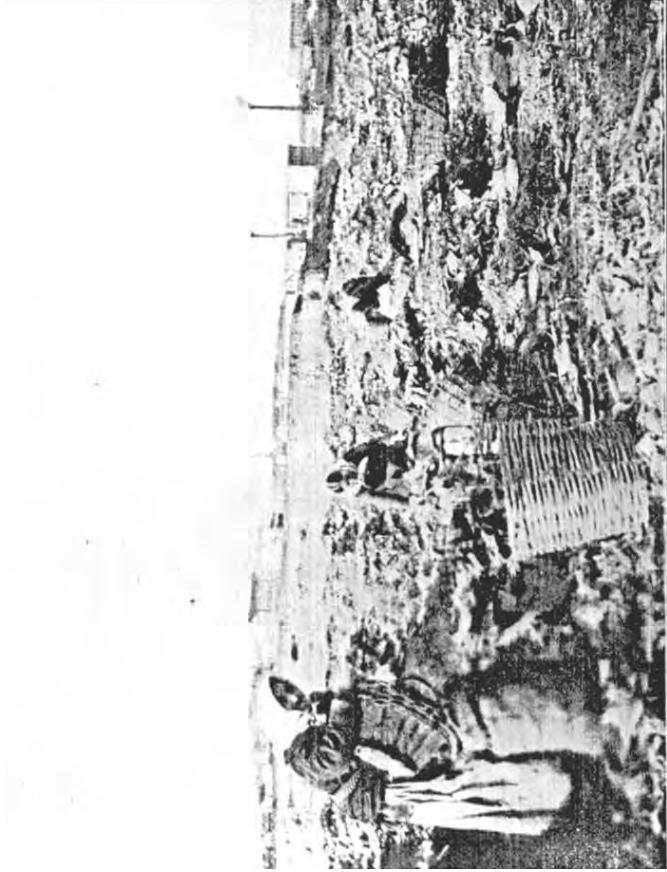
Abfallsorgung in der Frühzeit



Abfallentsorgung im Mittelalter (ca. 1350)



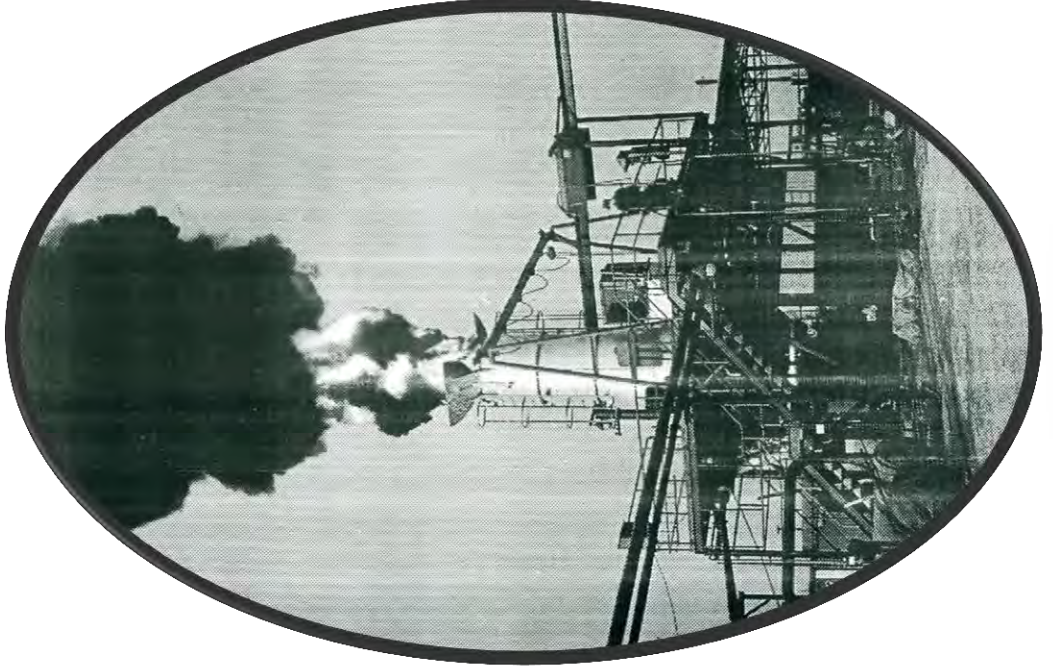
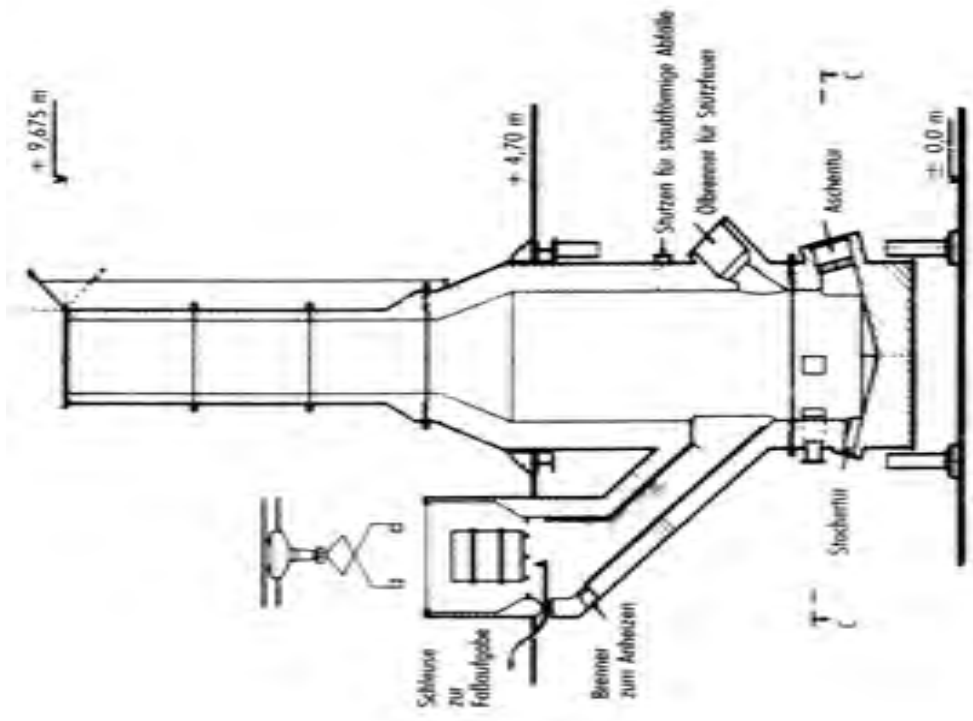
Sortierung und Verwertung auf einer Müllkippe (Wien 1910)



Ungeordnete Sonderabfalldeponie



Verbrennungsanlage für Fässer



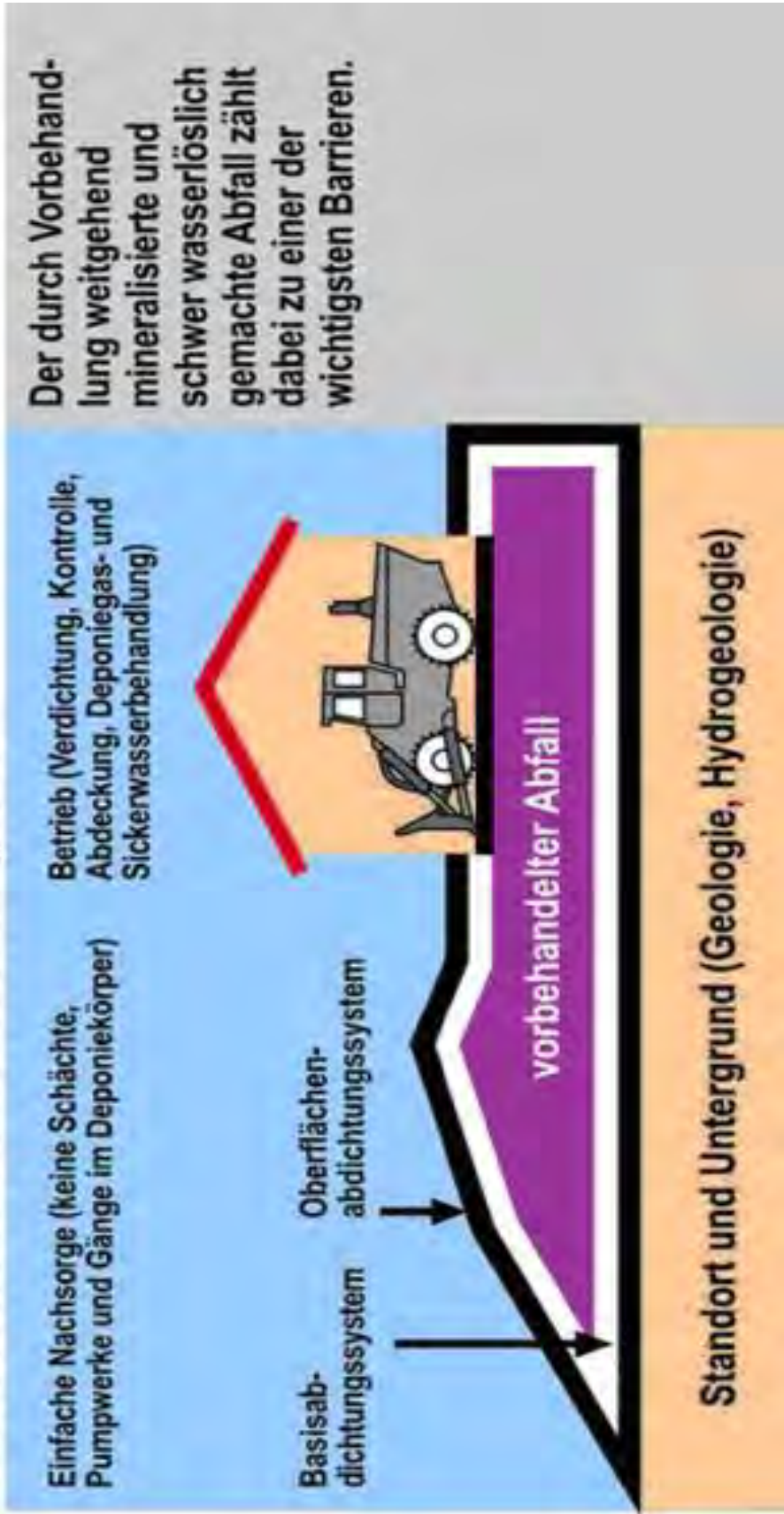
Entwicklung einer deutschen Entsorgungskonzeption

- Keine "Reaktordeponie"
- Vorbehandlungskapazitäten schaffen
- Entwicklung des Multibarrierenkonzepts für Deponien
- Schaffung von Behandlungs- und Endlagerkapazitäten
 - UTD ist unverzichtbarer Bestandteil des Entsorgungskonzept

Deponierungsstrategie

- Multibarriekenkonzept
 - der Standort (Geologie und Hydrogeologie)
 - die Basisabdichtung und Sickerwasserbehandlung
 - der Deponiekörper (Abfallvorbehandlung)
 - die Oberflächenabdichtung
 - Überwachung des Deponieverhaltens
 - Nachsorge und Reparaturmöglichkeiten

Aufbau und Funktionsweise des Multibarrierenkonzeptes



Abfallaufkommen und –entsorgung in Deutschland

Quelle: Destatis, Abfallbilanz 2009

- Gesamtabfallanfall (Netto) ca. 322 Mio. t/a
 - Anfall gefährlicher Abfälle ca. 17,3 Mio. t/a
 - untertägige Lagerung bergbaufremder Abfälle ca. 2,5 Mio. t/a
 - untertägige Ablagerung in der UTD ca. 0,1 Mio. t/a
- Anlagen zur Entsorgung gefährlicher Abfälle
 - 19 öffentlich zugängliche Sonderabfalldeponien
 - 33 Sonderabfallverbrennungsanlagen
 - 4 Untertagedeponien

Ablagerung in Deponien der Klasse IV in 1000 t

	2006	2007	2008	2009
Anzahl der Anlagen	5	5	5	4
Input	118,3	112,9	106,7	107,1
aus Produktion im gleichen Betrieb entstanden	0,3	0,4	0,7	0,1
angeliefert aus dem Inland	44,9	39,2	34,3	34,1
dem Ausland	73,1	73,3	71,7	72,8

Quelle: Fachserie 19, Reihe 1 Abfallentsorgung, Jahrgänge 2006 - 2009

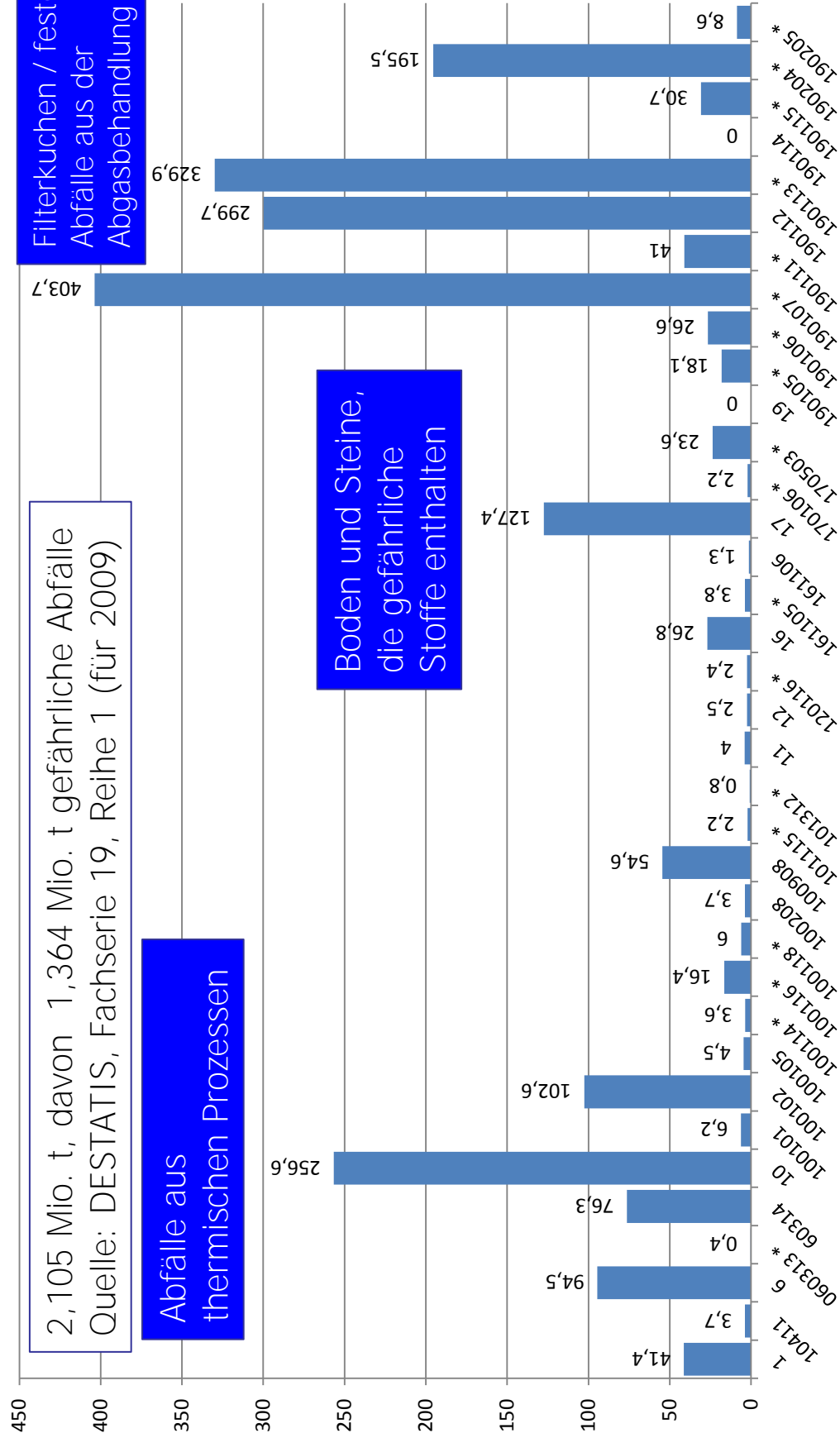
Ablagerung bergbaufremder Abfälle in untertägigen Abbaustätten in 2009

2,105 Mio. t, davon 1,364 Mio. t gefährliche Abfälle
Quelle: DESTATIS, Fachserie 19, Reihe 1 (für 2009)

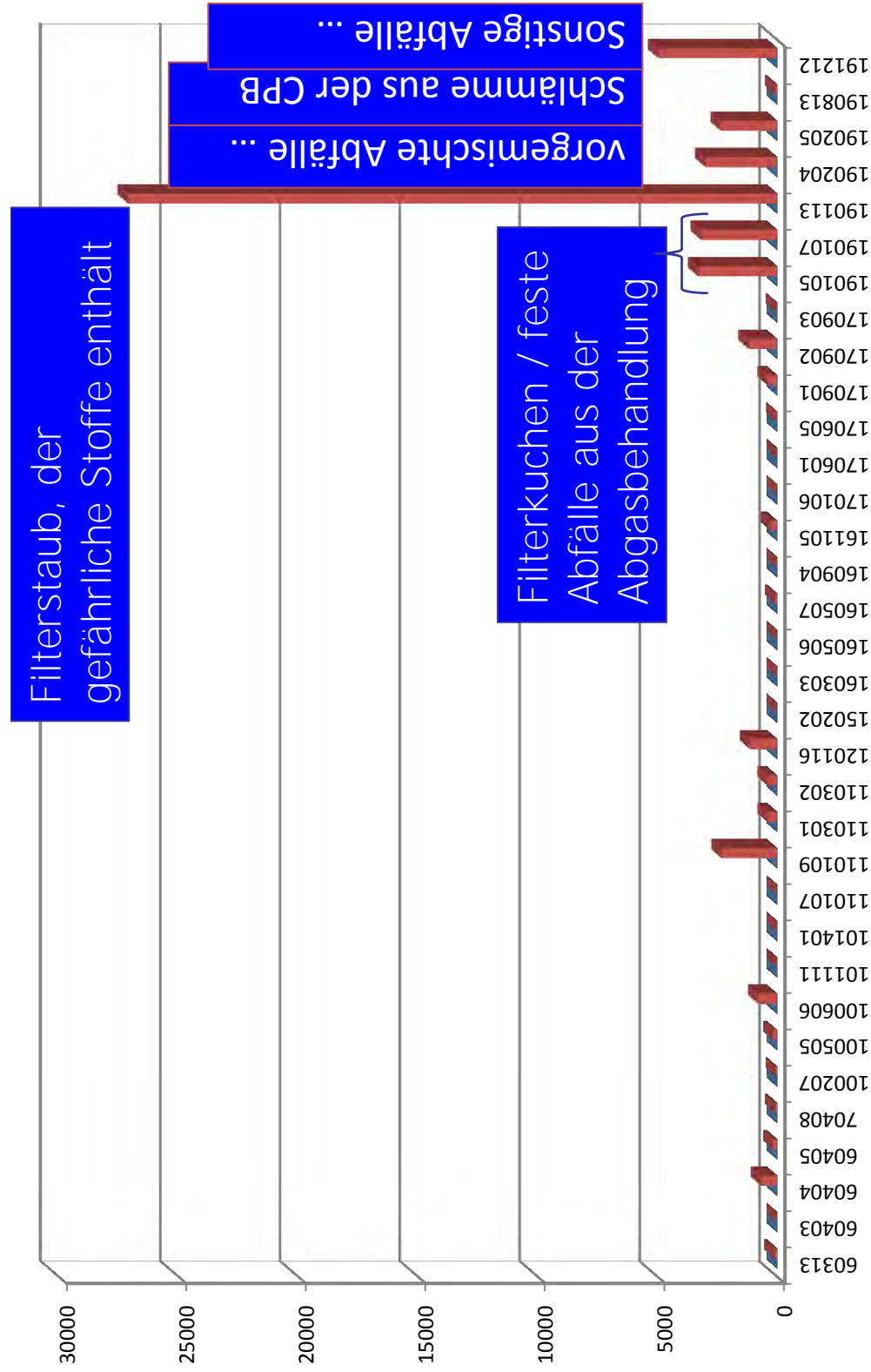
Abfälle aus
thermischen Prozessen

Filterkuchen / feste
Abfälle aus der
Abgasbehandlung

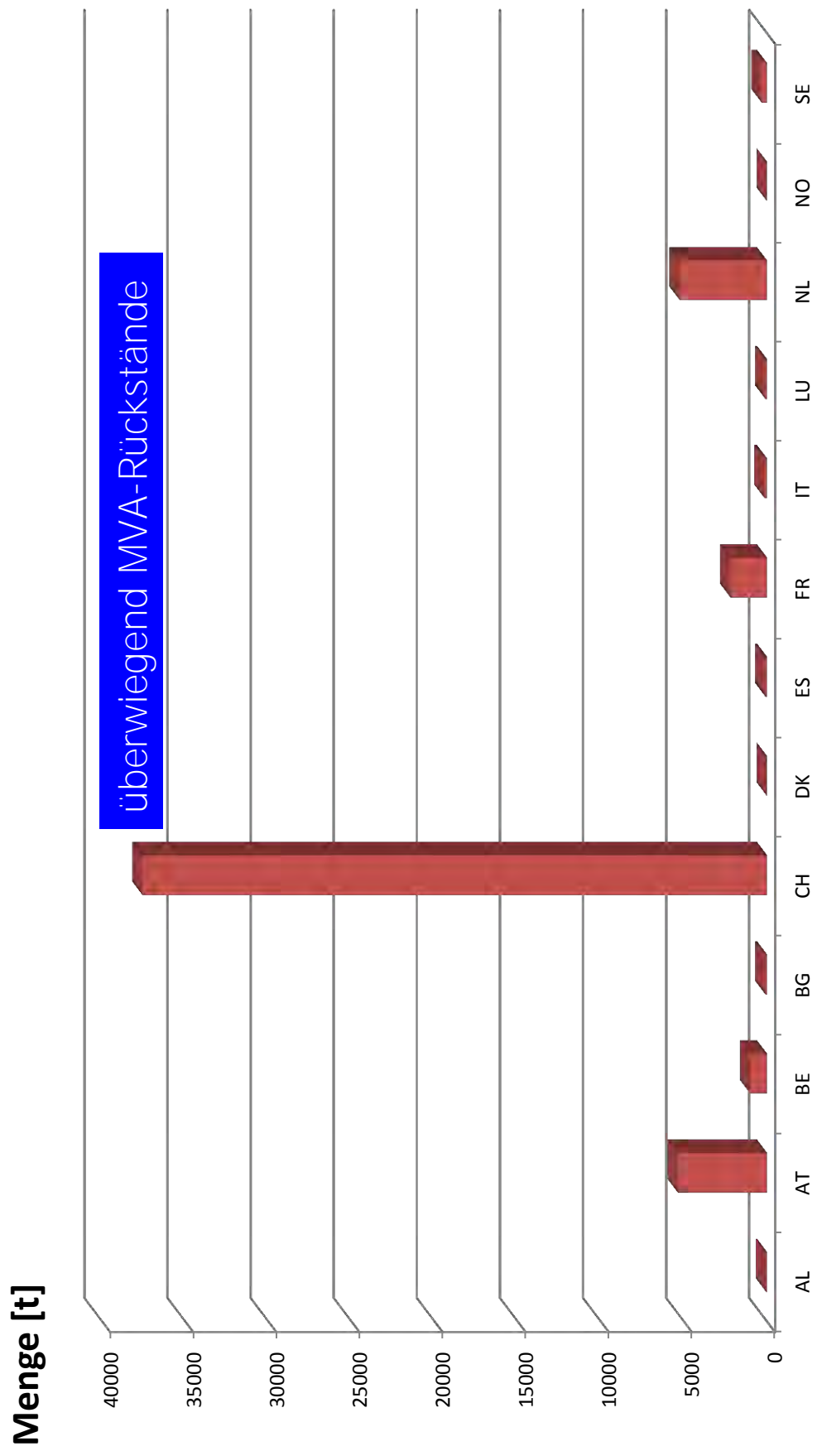
Boden und Steine,
die gefährliche
Stoffe enthalten



Import zur Ablagerung in der UTD in t nach Abfallarten des Europäischen Abfallverzeichnis in Jahre 2010



Import zur Ablagerung in der UTD in t nach Exportstaaten im Jahre 2010



Von der Deponierung ausgeschlossene Abfälle

- flüssige Abfälle
- infektiöse Abfälle, Körperteile, Organe
- **nicht identifizierte oder neue chemische Abfälle,**
deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nicht bekannt sind
- ganze oder zerteilte Altreifen
- Abfälle, die zu erheblichen Geruchsbelästigungen führen
- *explosionsgefährlich, ätzend, brandfördernd, hoch oder leicht entzündlich gemäß Gefahrstoffverordnung*
- *POP-haltige Abfälle mit Gehalten > Anhang IV der POP-V sowie andere "umweltgefährliche" Abfälle*

Von der Deponierung ausgeschlossene Abfälle

- zusätzlich zu 1 bis 5 noch für die UTD
 - biologisch abbaubare Abfälle
 - Abfälle mit einem Brennwert (Ho) von mehr als 6 000 Kilojoule pro Kilogramm Trockenmasse (TM), es sei denn, die zuständige Behörde hat einem höheren **Brennwert zugestimmt, weil...**
 - a. **nachgewiesen wird, dass keine anderweitige Behandlung** technisch möglich oder wirtschaftlich zumutbar ist,
 - b. es sich um schwermetallbelastete Ionenaustauscherharze aus der Trinkwasserbehandlung oder um quecksilberhaltige Abfälle handelt oder
 - c. die Ablagerung in einer Deponie der Klasse IV die umweltverträglichste Lösung ist

Von der Deponierung ausgeschlossene Abfälle

- zusätzlich zu 1 bis 5 noch für die UTD
 - Abfälle die untereinander und mit dem Gestein reagieren
 - Volumenvergrößerung
 - Bildung selbstentzündlicher, toxischer, oder explosiver Stoffe oder Gase
 - Andere gefährliche Reaktionen (Betriebsicherheit; Integrität der Barrieren ist gefährdet)
 - Abfälle die unter Ablagerungsbedingungen
 - explosions-gefährlich, hoch oder leicht entzündlich sind,
 - einen stechenden Geruch aufweisen oder
 - keine ausreichende Stabilität gegenüber geomechanischen Bedingungen aufweisen

Lagerung von metallischem Hg

- zeitweilige Lagerung von metallischem (flüssigem) Quecksilber gemäß § 23 Deponiev
– in einem ausdrücklich zugelassenen Langzeitlager der Klasse III
– in einem für Beseitigung zugelassenen Langzeitlager der Klasse IV
 - Sicherheitsbeurteilung erforderlich
 - kein metallisches Hg
- Anforderungen der RL 2011/97/EU vom 5.12.12 sollen durch Änderung von § 23 und einem Anhang 6 umgesetzt werden

F + E Vorhaben des Umweltbundesamtes

- Verhalten von Quecksilber (Hg) und Quecksilberverbindungen bei der untertägigen Ablagerung in Salzformationen, insbesondere der möglichen Mobilisierung von Hg durch saline Lösungen
 - Wie verhält sich metallisches Quecksilber –Hg(l) in Kontakt mit der Grubenluft und mit Salzlösungen?
 - Welchen Einfluss haben Verunreinigungen in metallischem Quecksilber auf das Lösungsverhalten?
 - Was bringt die Umsetzung von Quecksilber in Quecksilbersulfid?
 -

Potenzielle Abfallströme für die UTD

- Abfälle die folgende Stoffe enthalten
 - Quecksilberhaltige Abfälle
 - Arsenhaltige Abfälle
 - Cyanide
 - Abfälle die chlorierte Kohlenwasserstoffe wie HCH, PCB, PCDD/PCCF enthalten
- Pestizide
- Abfälle aus der chemischen Industrie oder der Metallindustrie
- Abwasserreinigungsschlämme

Potenzielle Abfallströme für die UTD

- Kontaminierter Boden
- Kontaminierter Bauschutt
- Abgasreinigungsrückstände
 - Hausmüllverbrennung
 - Sonderabfallverbrennung
 - anderen thermischen Prozessen
- sonstige mineralische Abfälle
 - Laborabfälle, Chemikalienreste,
 - Katalysatoren
 - ...

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit !**

**Dr. Joachim Wuttke
joachim.wuttke@uba.de**

www.umweltbundesamt.de

Abfallanalytik, Reaktivität, Toxizität – Inventar von UTD

Dr. Brassler, T.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig

Abfallanalytik, Reaktivität, Toxizität - Inventar von UTD

Dr. Thomas Brassler, GRS

14. Februar 2012

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen

Gefährliche Abfälle – Was tun ? – Wohin ?



Entsorgungsmöglichkeit UTD - Untertägige Ablagerung im Salzgestein



Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Karlsruhe, 14. + 15.2.2012

Nutzbare Hohlraumvolumina in Salzbergwerken: > 100.000.000 m³

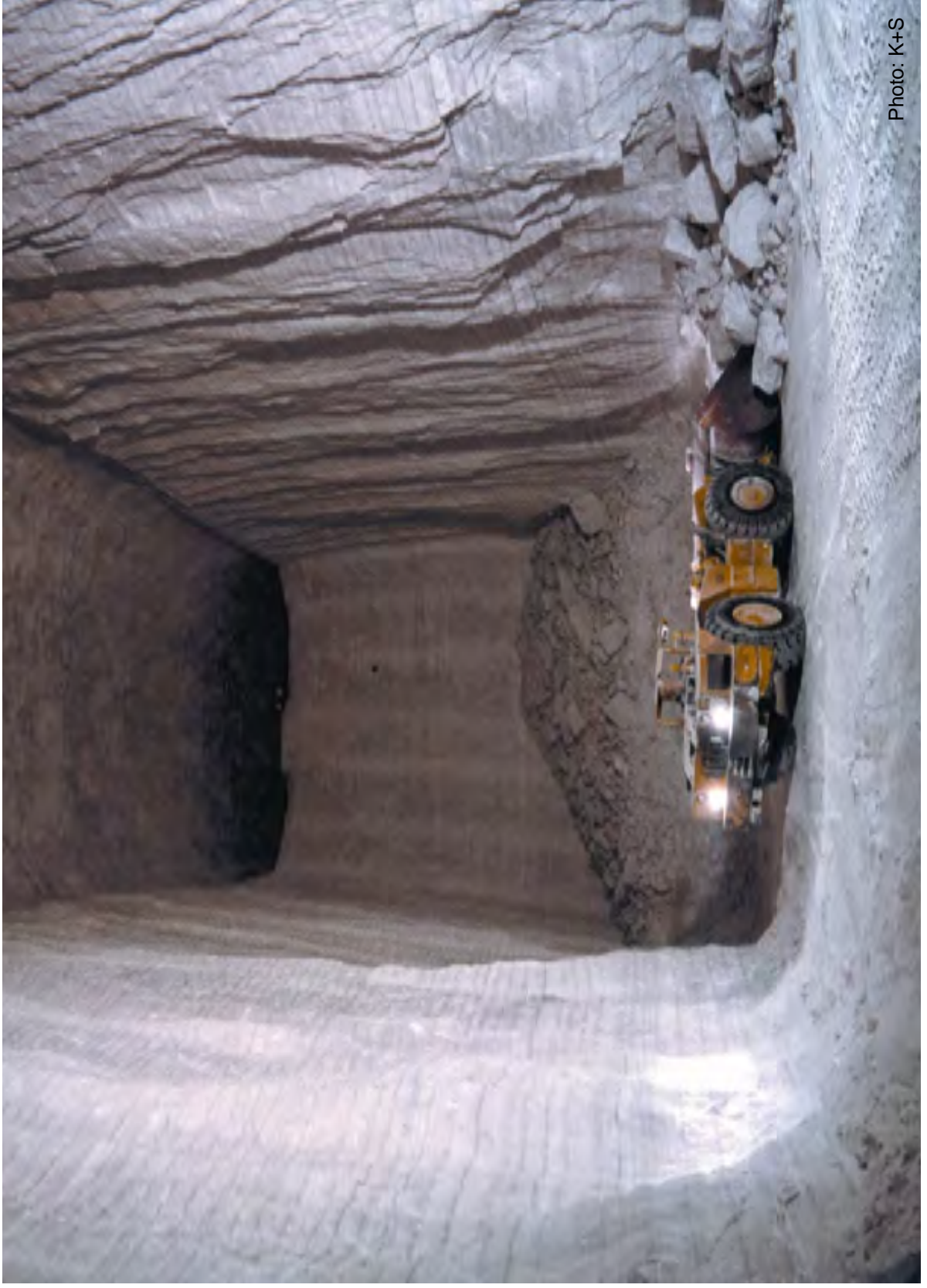


Photo: K+S

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Karlsruhe, 14.+15.2.2012

Sicherer Einschluss durch das Wirtsgestein Salz (1) - Strecke



Photo: GSF

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Karlsruhe, 14. + 15.2.2012

Sicherer Einschluss durch das Wirtsgestein Salz (2) - Schiene



Photo: Th. Brasser

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Karlsruhe, 14. + 15.2.2012

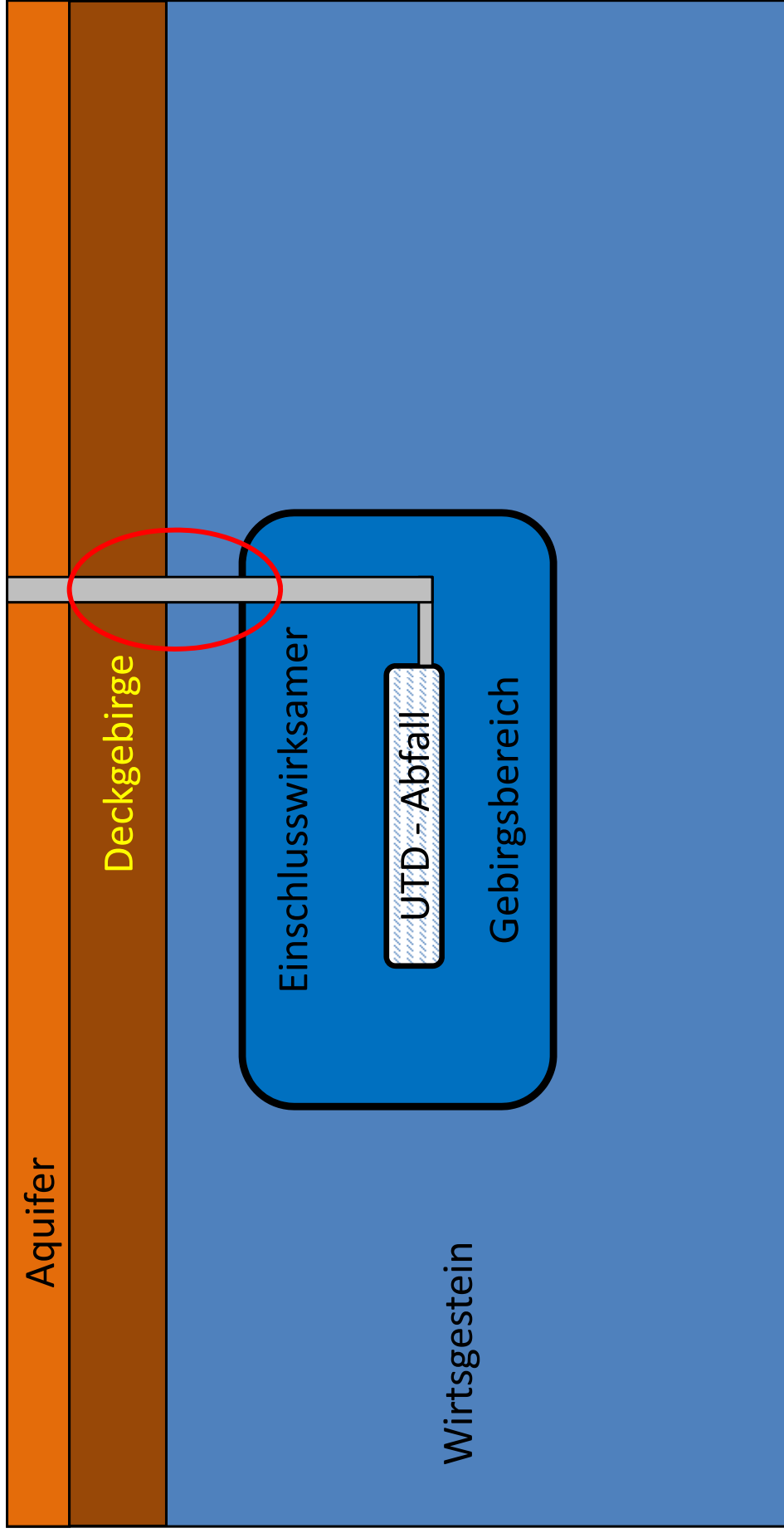
Sicherer Einschluss durch das Wirtsgestein Salz (3) - Basaltgang



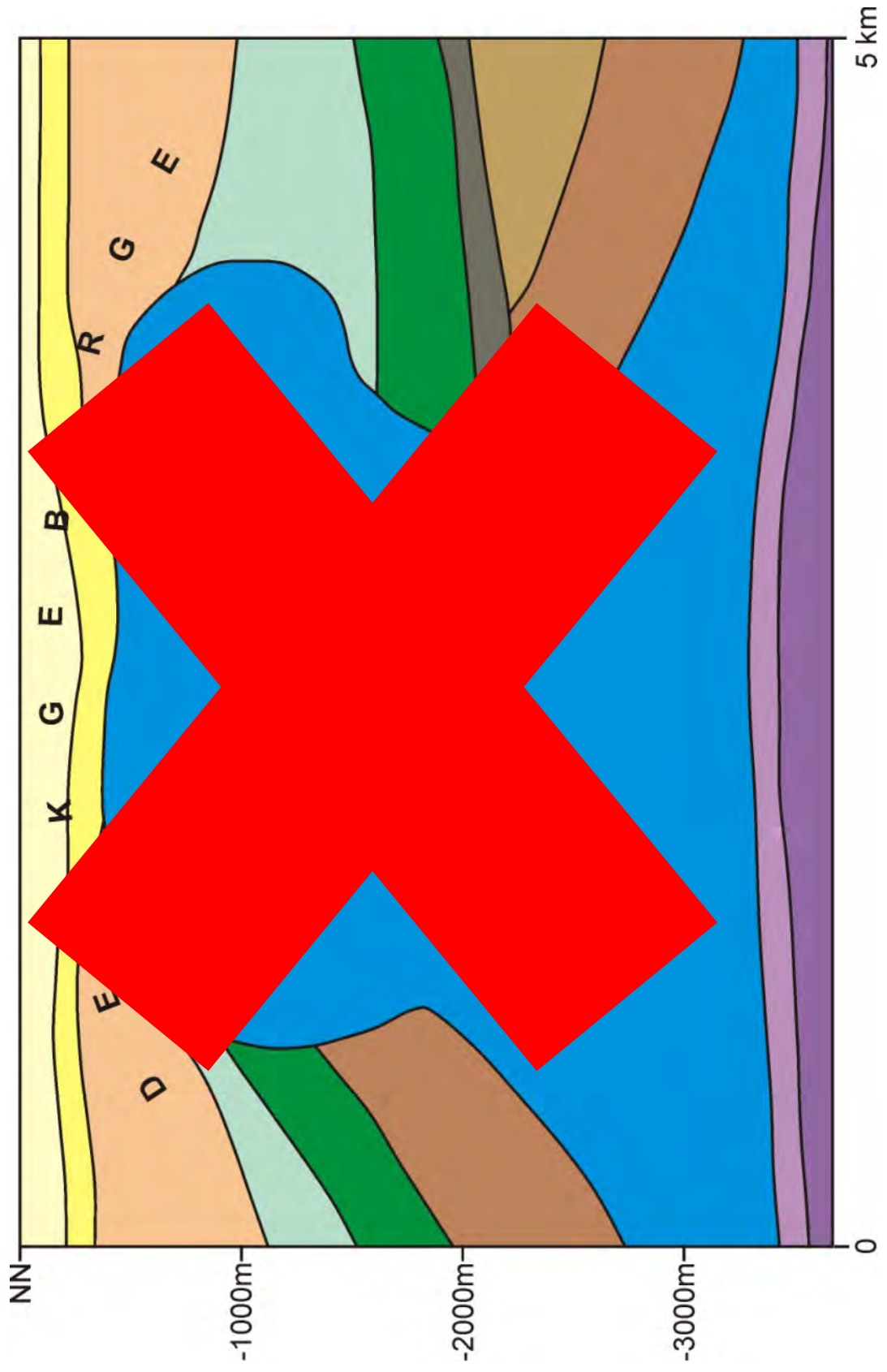
Photo: Th. Brasser

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Karlsruhe, 14. + 15.2.2012

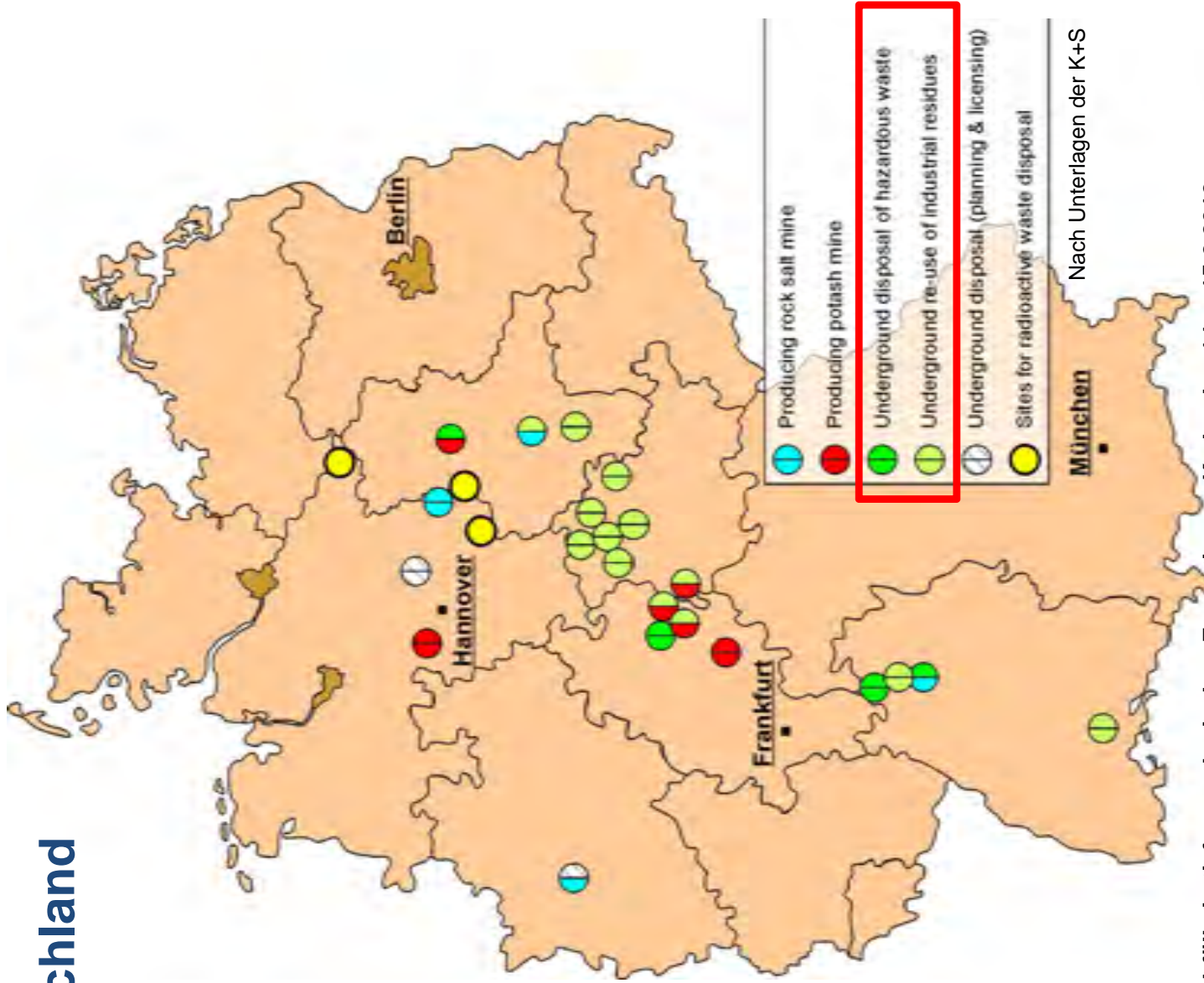
Sicherer Einschluss - Einschlusswirksamer Gebirgsbereich



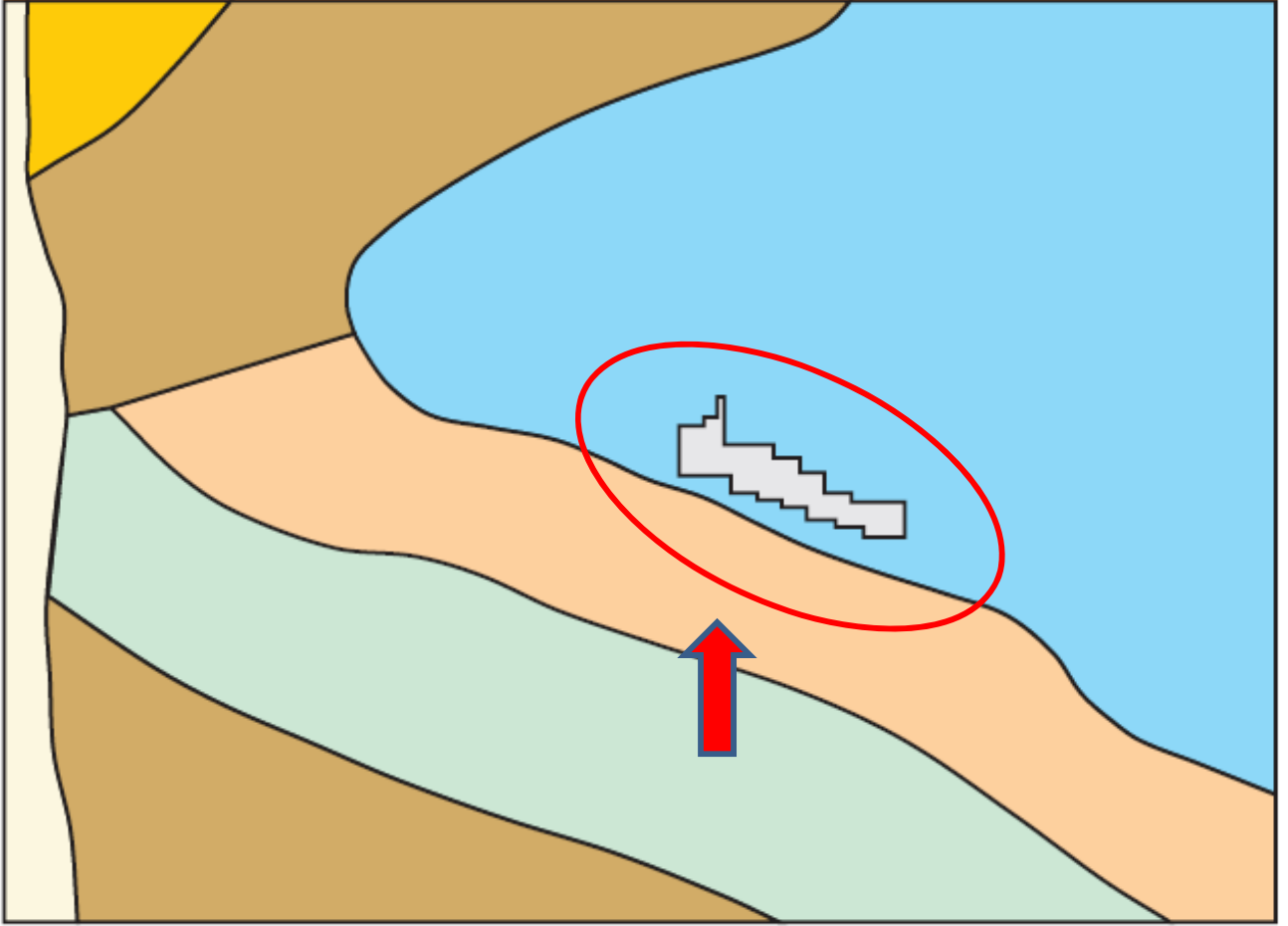
Sicherer Einschluss - Idealfall einer UTD



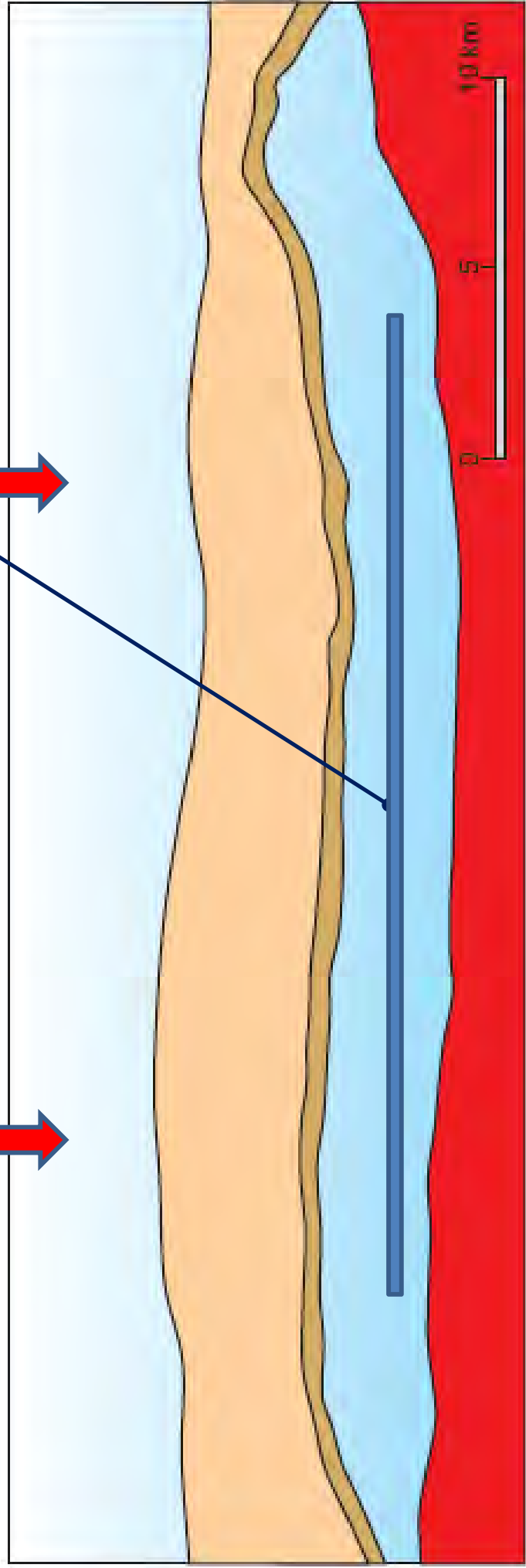
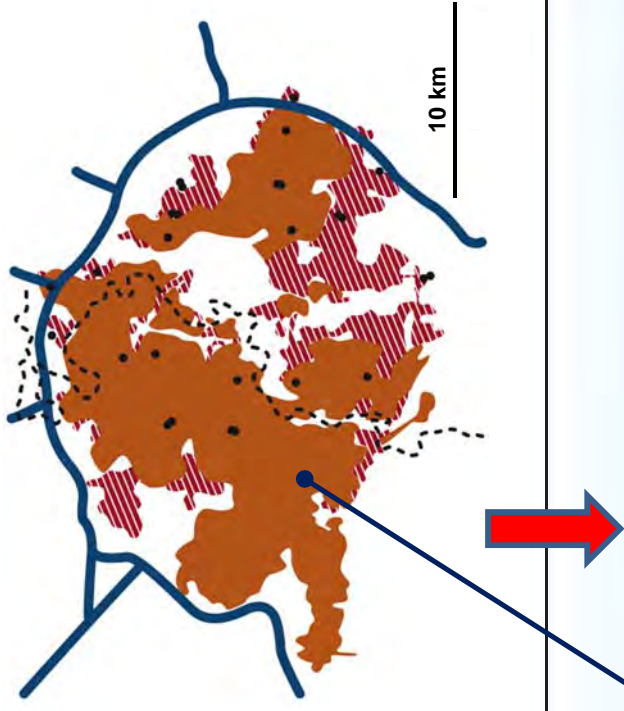
„Salz-Standorte“ in Deutschland



Realität: z. B. teilweise fehlender EWG

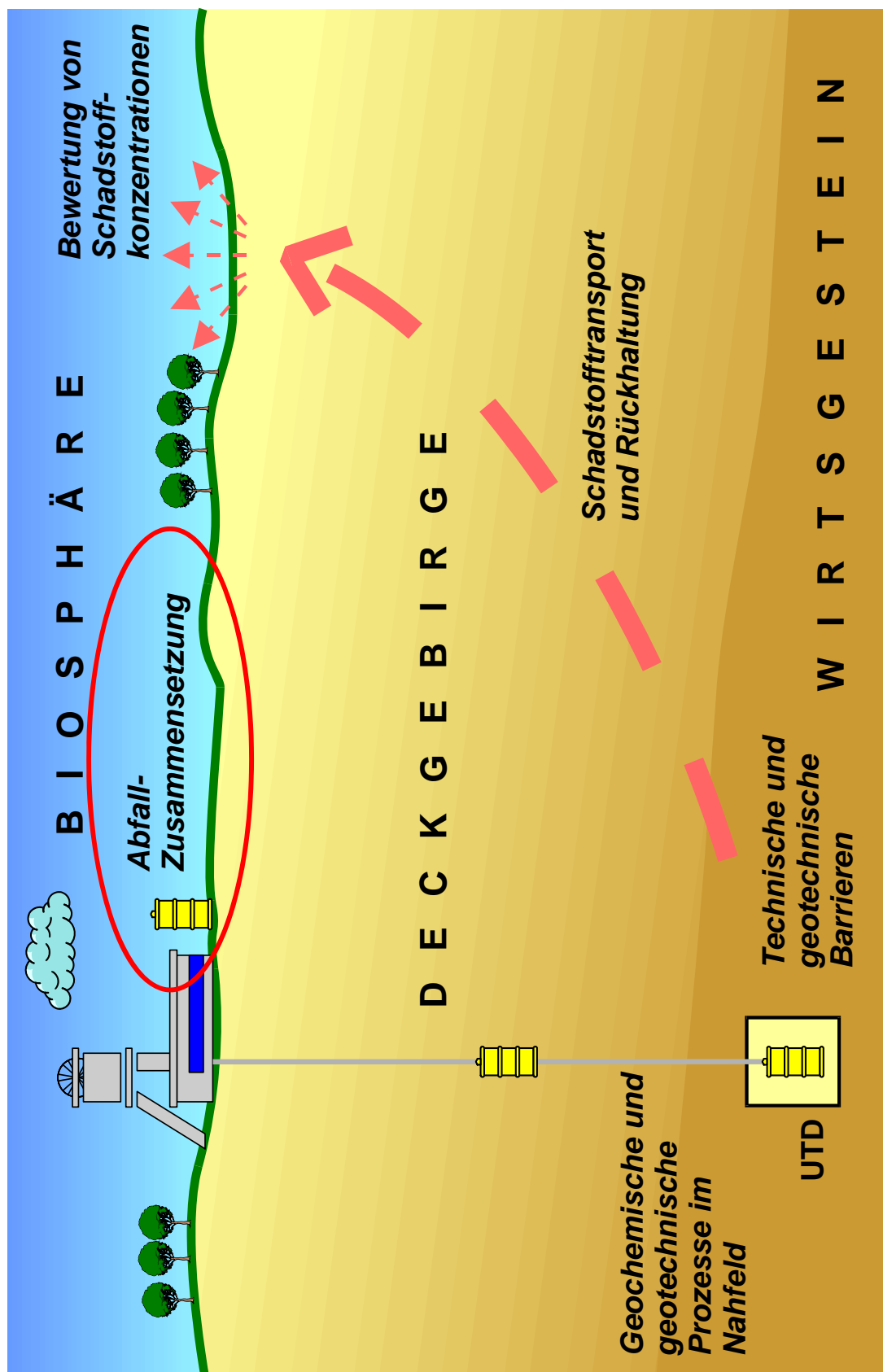


Realität: z.B. weiträumige Grubenfelder

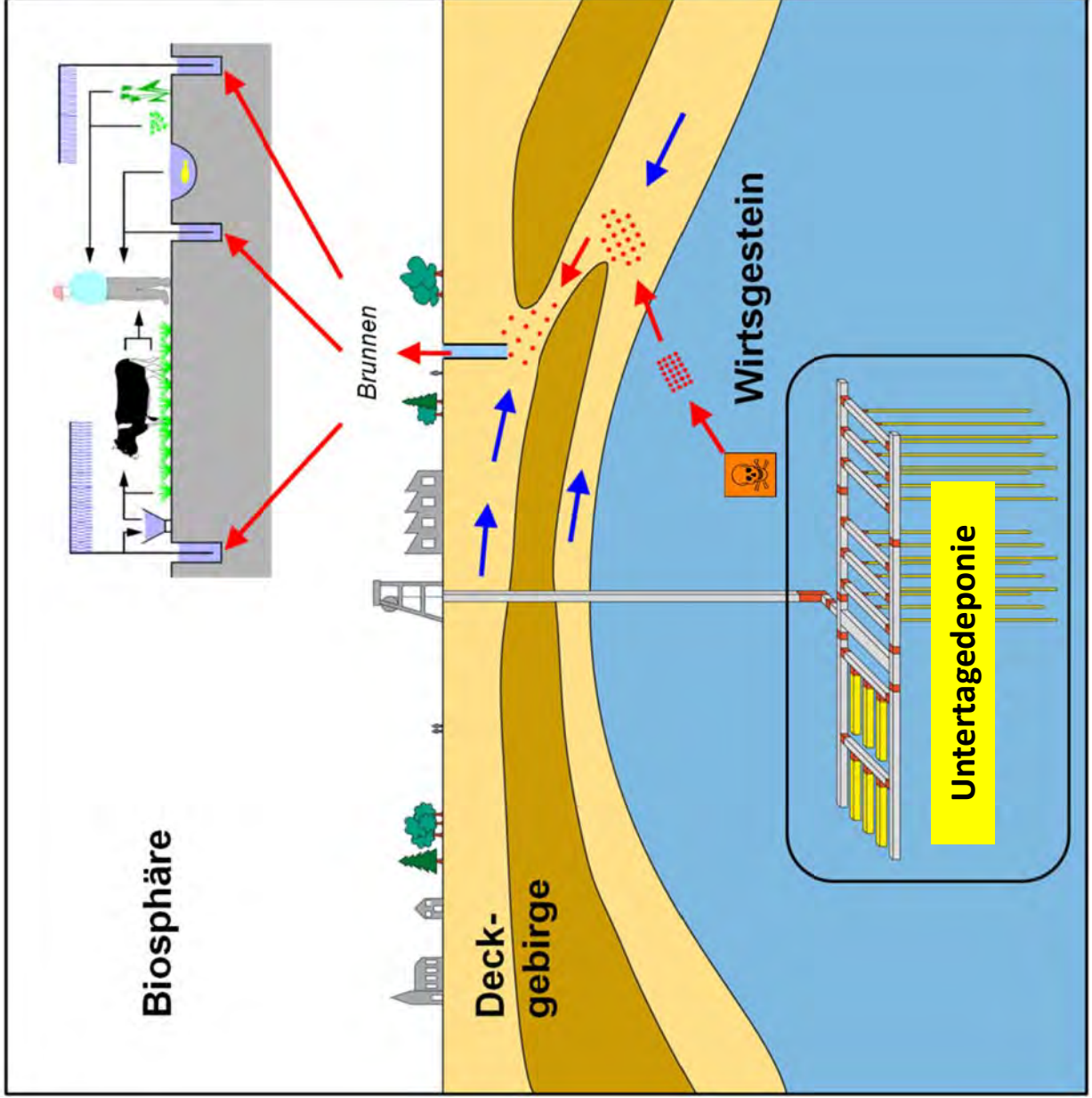


Nach Unterlagen der K+S

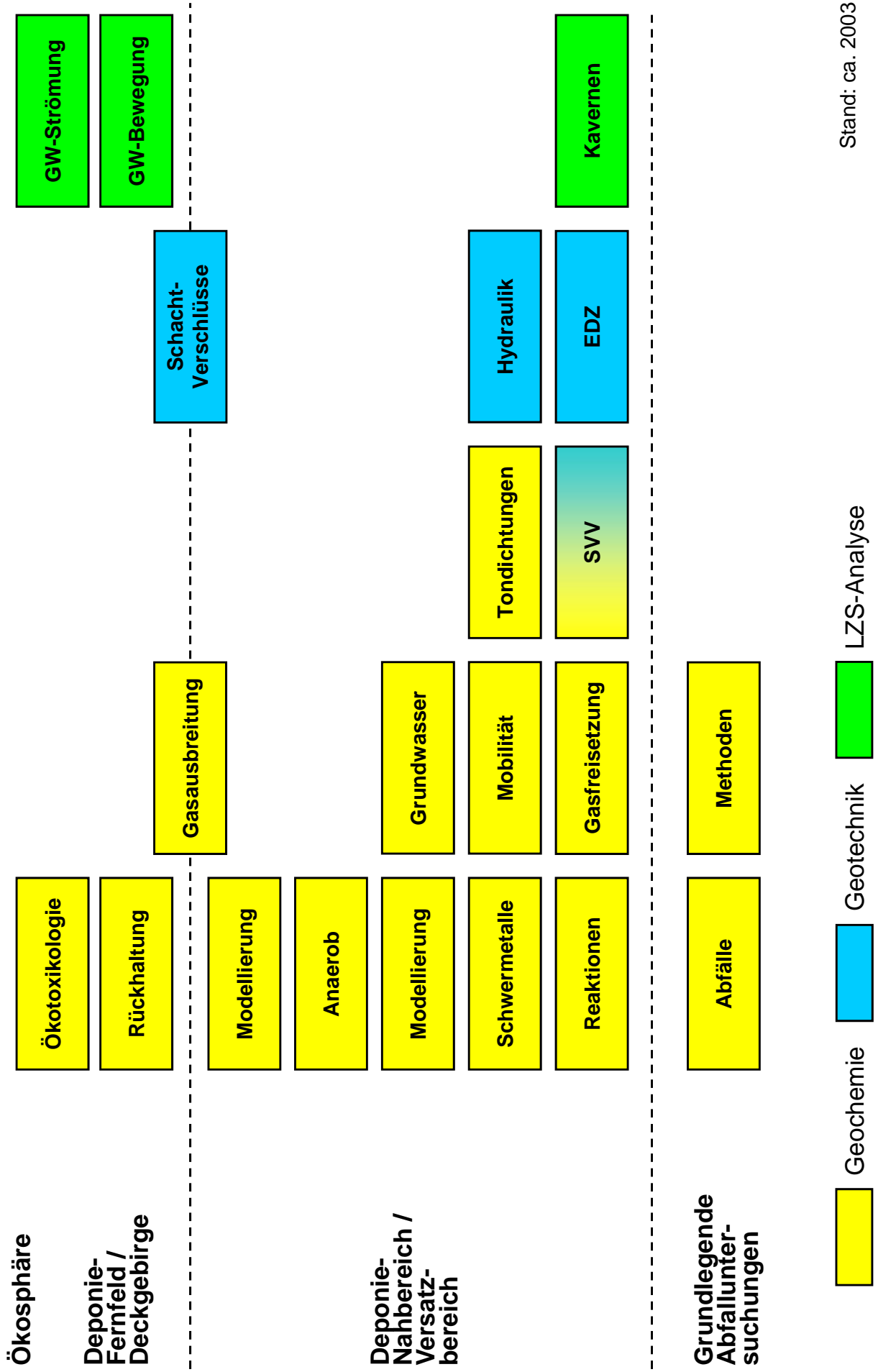
Notwendige Betrachtung: Gesamtsystem einer UTD



Was kann passieren ? - Freisetzungsszenario

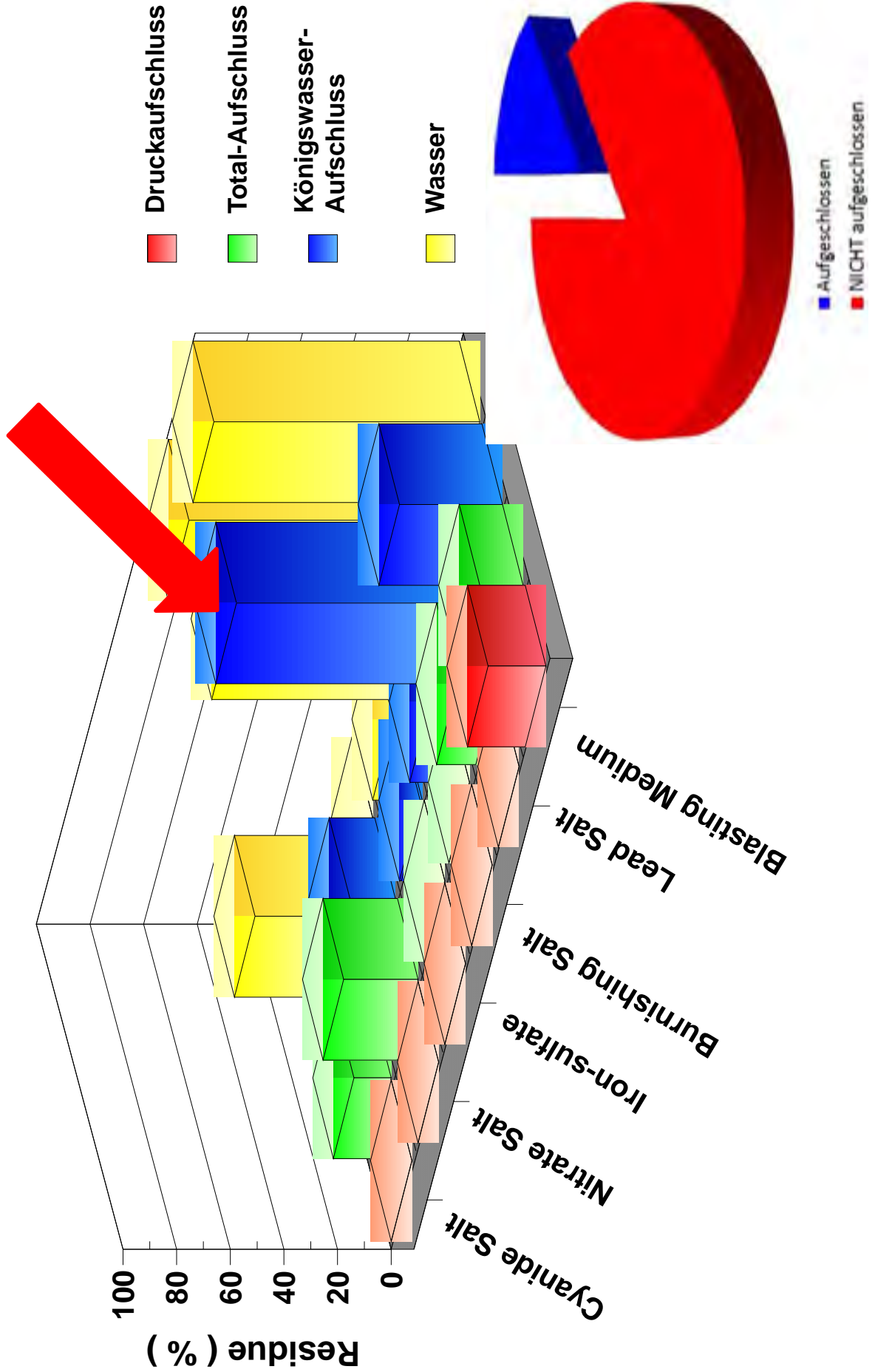


Verknüpfung von „C“-Vorhaben bei GRS

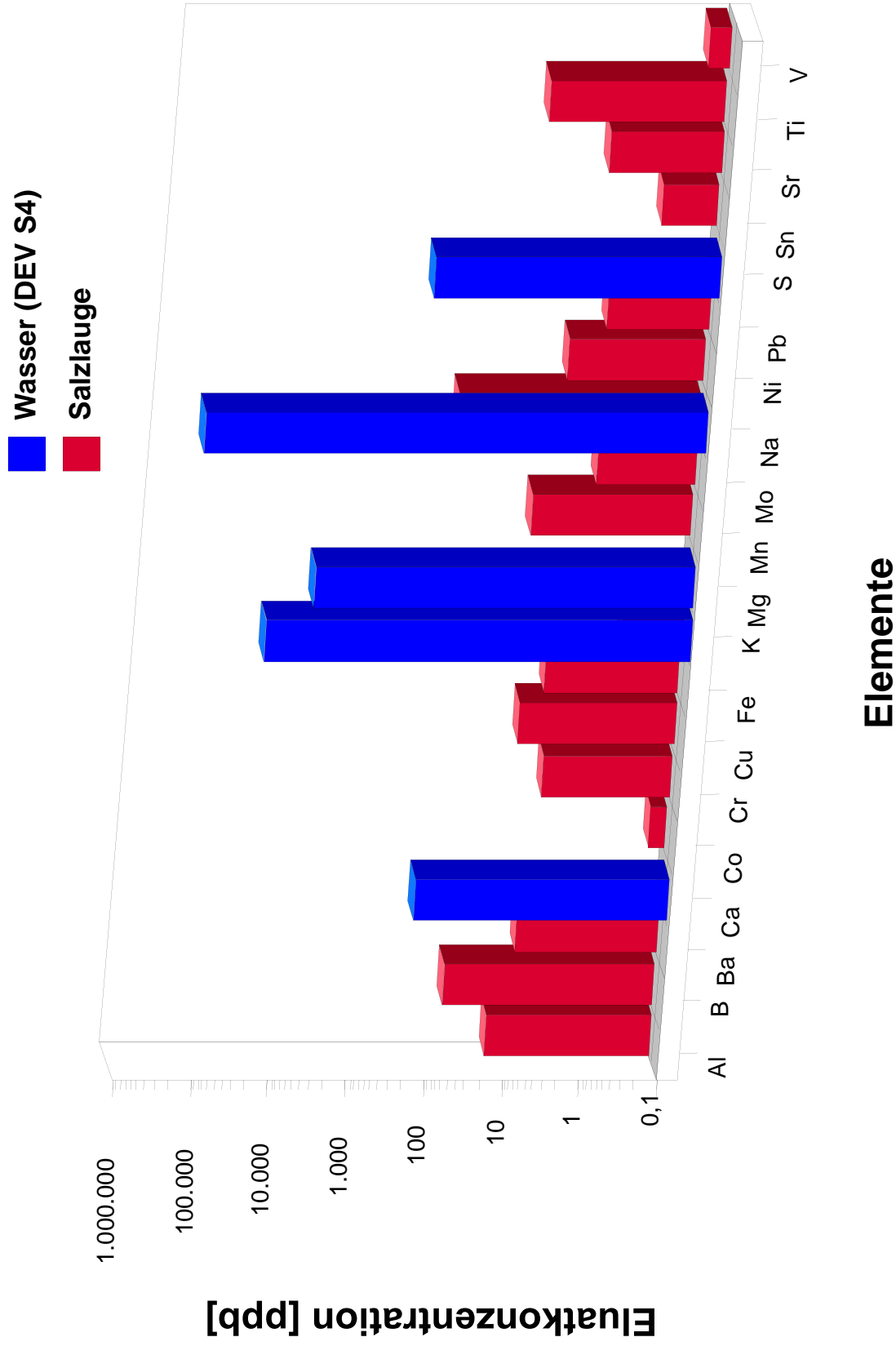


Stand: ca. 2003

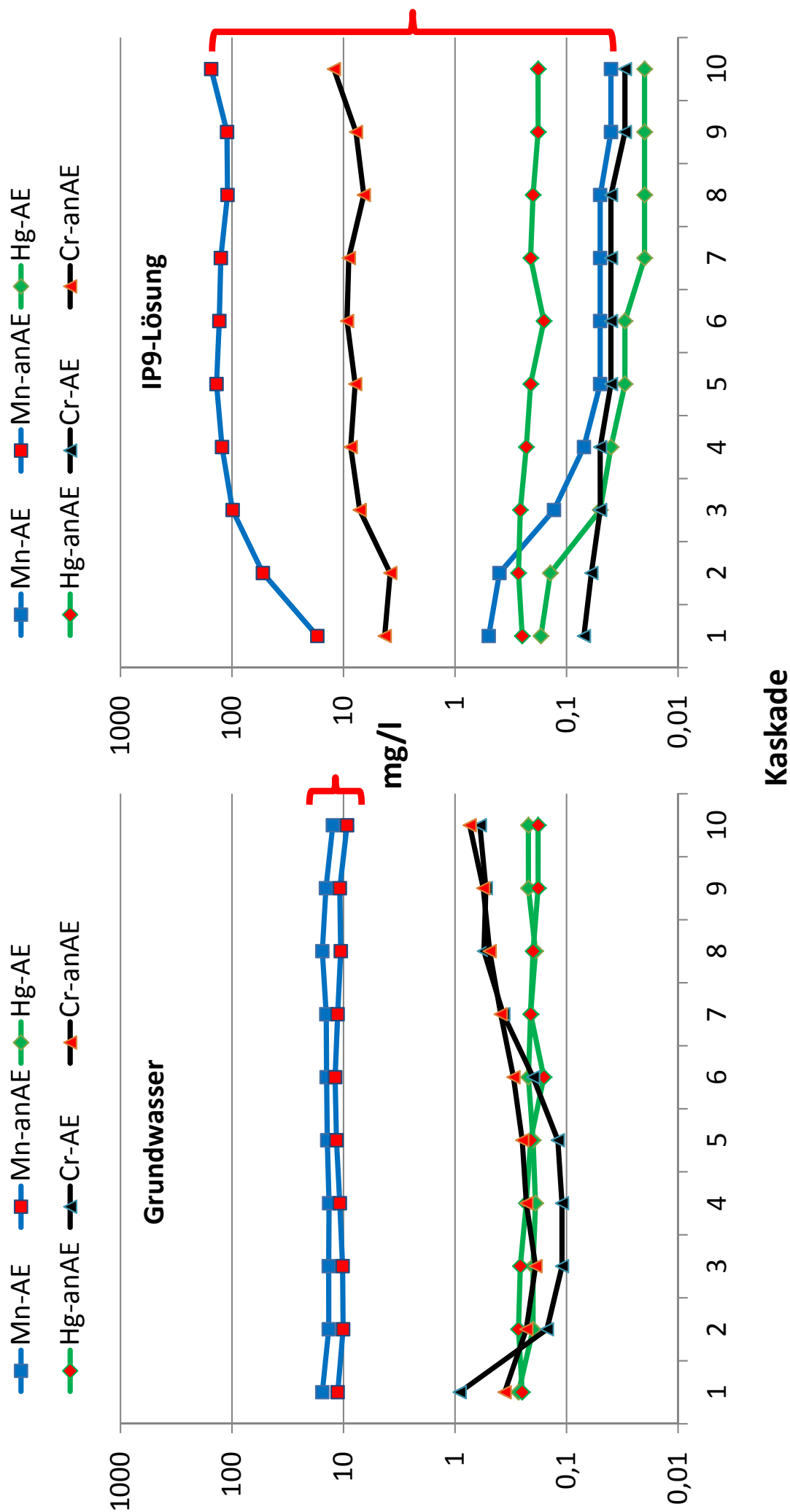
Einfluss unterschiedlicher Aufschlussmittel



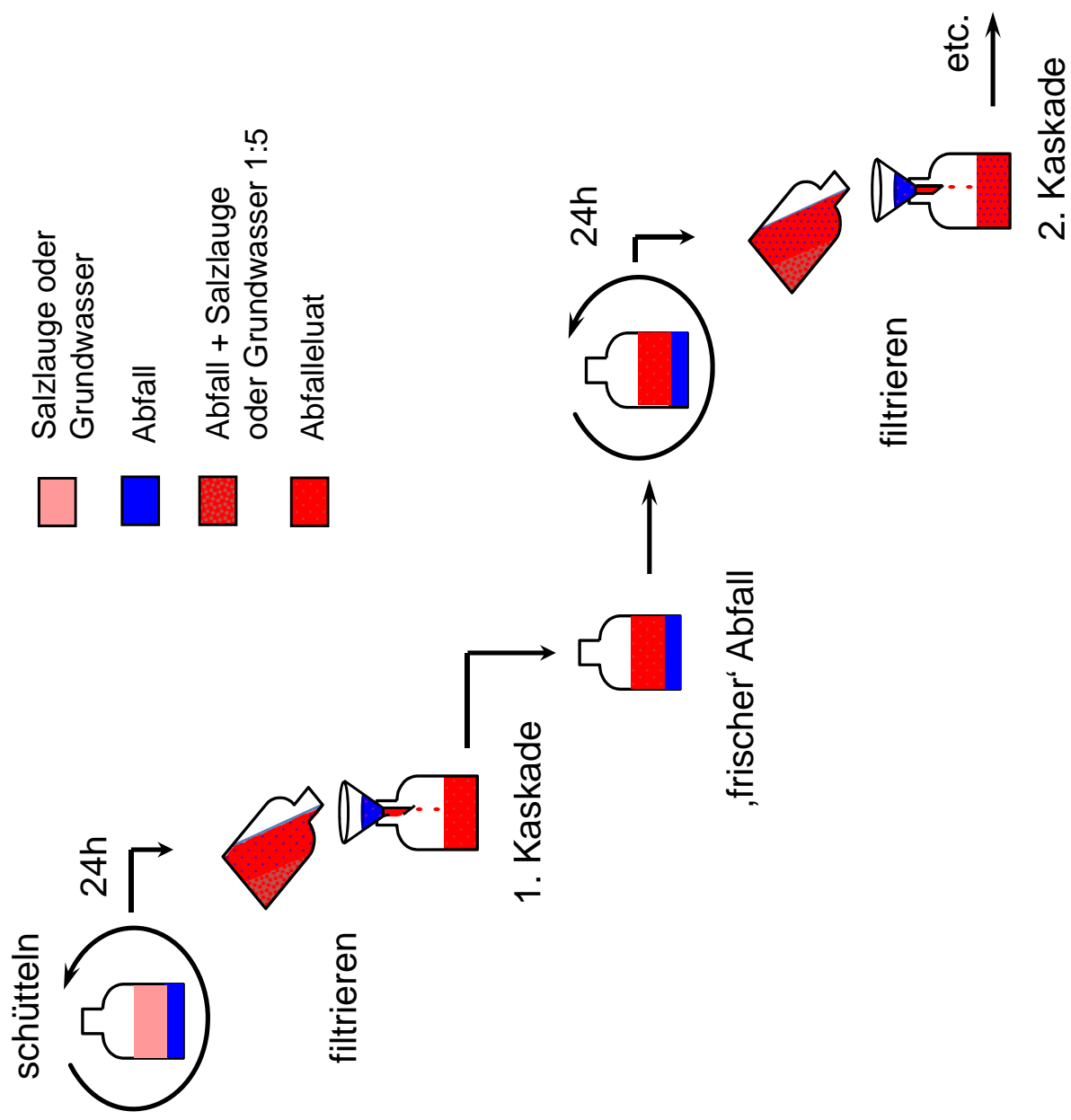
Einfluss unterschiedlicher Lösungsmittel



Mn-, Cr- und Hg - Konzentrationen in einem Auslaugversuch unter aeroben bzw. anaeroben Bedingungen – GW bzw. IP9-Lösung



Wie ermittle ich Gefährlichkeit ? - Elutionstest

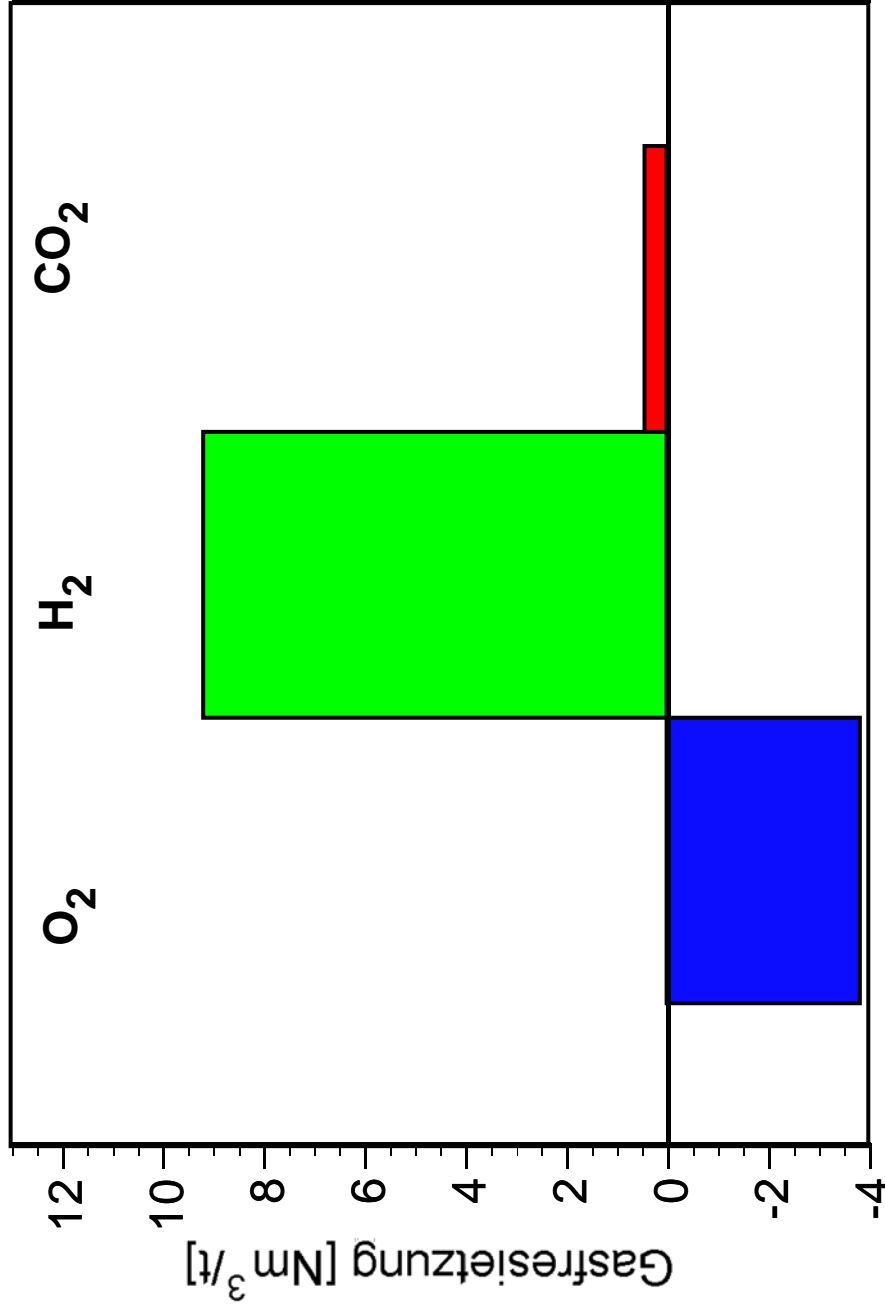


- Salzlauge oder Grundwasser
- Abfall
- Abfall + Salzlauge oder Grundwasser 1:5
- Abfalleluat

Parameter mit Einfluss auf das Ergebnis von Auslaugverfahren

Einflussgrößen Feststoff	Einflussgrößen Auslaugverfahren
Korngröße	Probenvorbehandlung
Korngrößenspektrum	Zusammensetzung Auslauglösung
Sorptionskapazität	Kontaktart Feststoff – Lösung
Ionenaustauschkapazität	Feststoff-/Lösungsverhältnis
Chemisch-mineral. Zusammensetzung	Auslaugdauer / Durchflussrate
Anwesenheit Komplexbildner	Redox-Bedingungen
Säure-/Basenneutralisierungskapazität	pH-Wert
	Temperatur
	Atmosphärenkontakt
	Phasentrennung Feststoff / Eluat
	Analysemethoden

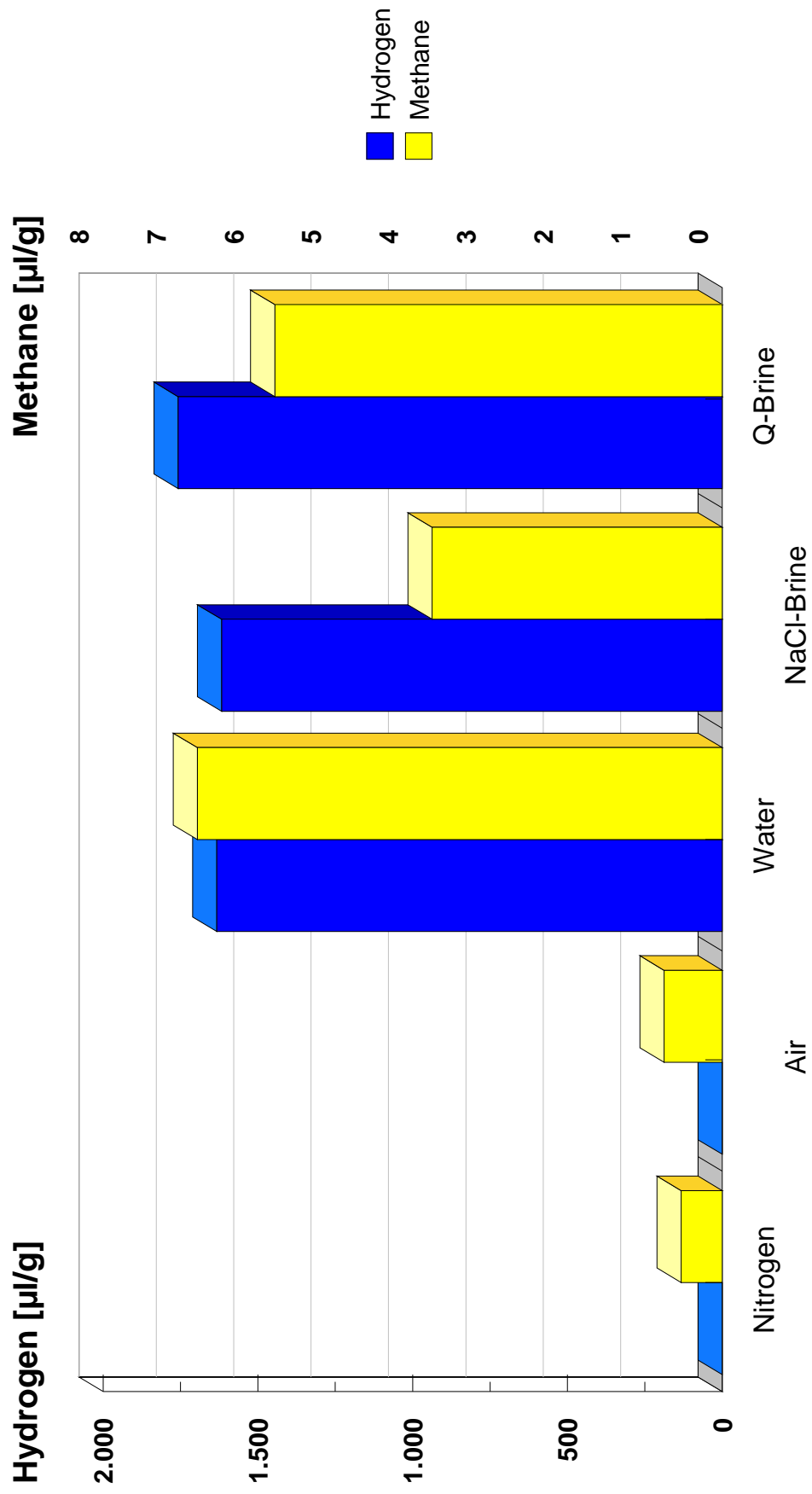
Gasfreisetzung bei Einwirkung von Salzlösung auf Müllverbrennungsschlacke



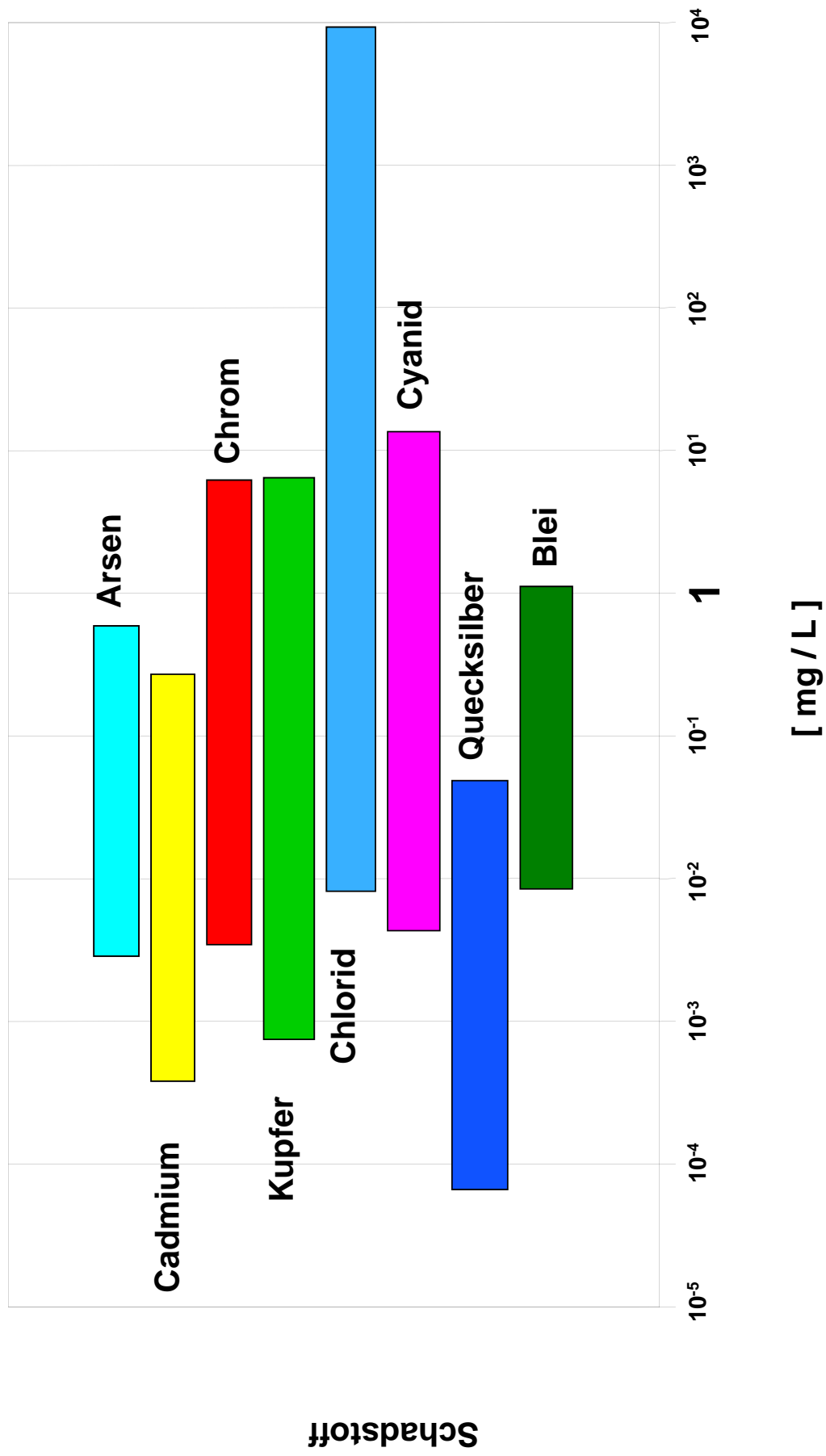
- Massive H₂-Produktion, evtl. noch höher unter anaeroben Bedingungen
- H₂-Produktion nach 30 d ruhendem Kontakt nur zu einem Bruchteil abgeschlossen
- Mikrobielle Aktivität nicht auszuschließen

zusätzlich Spuren an Methan (etwa 0,005m³/t)

Gasfreisetzung aus einer Flugasche



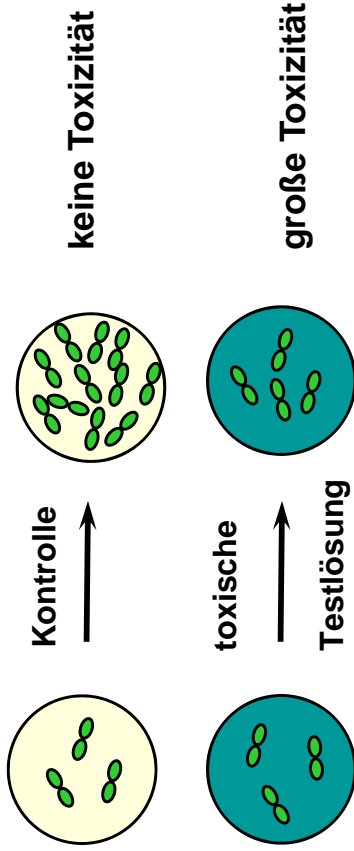
Was ist gefährlich ? - "Grenzwert-Problematik"



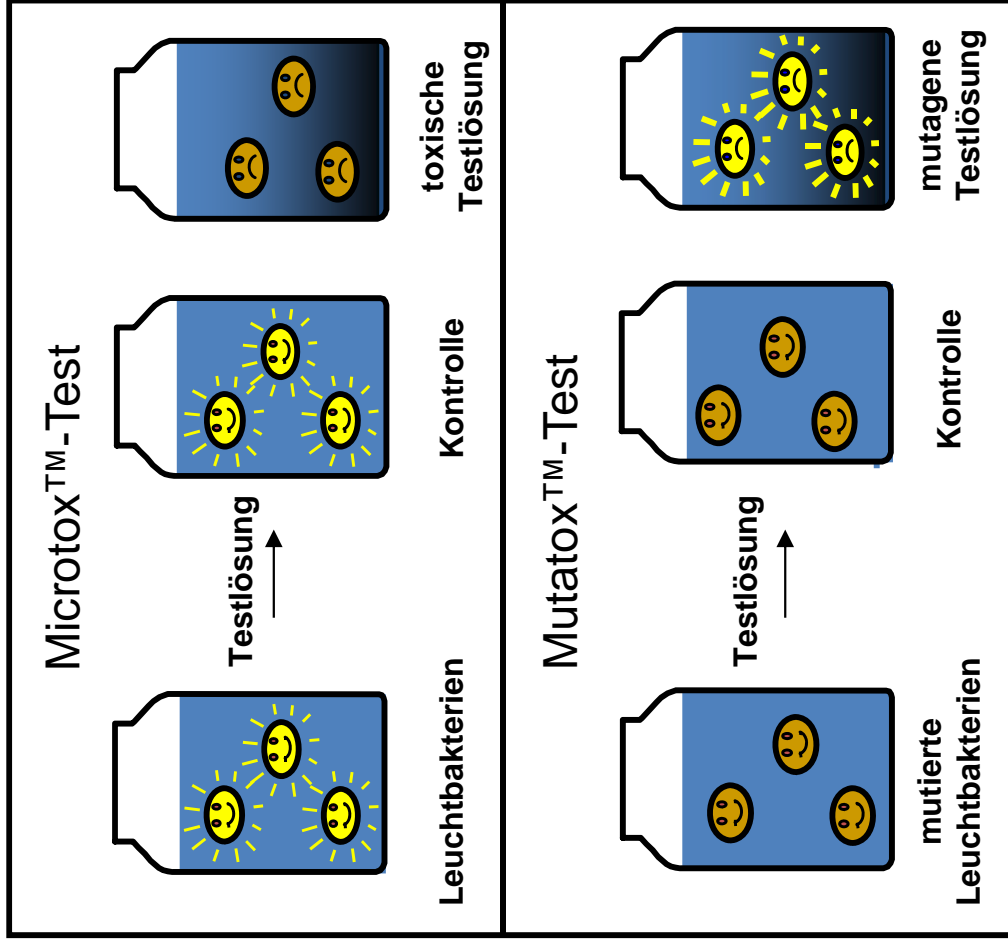
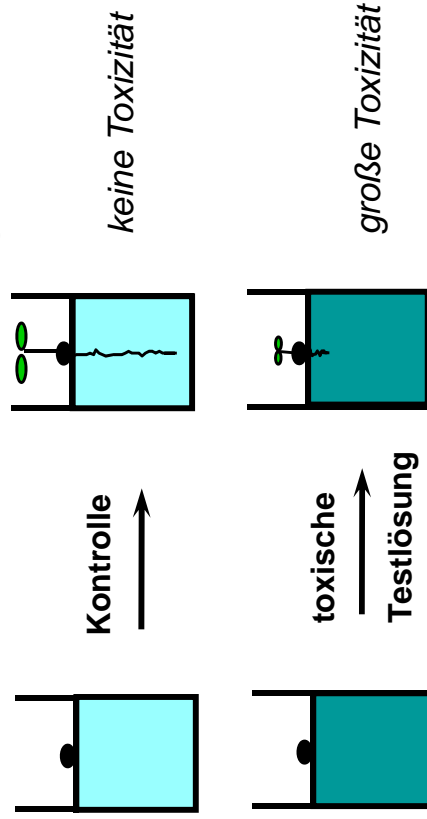


Wie ermittle ich Gefährlichkeit ? - Ökotoxtests

Lemna minor Blattwachstumstest

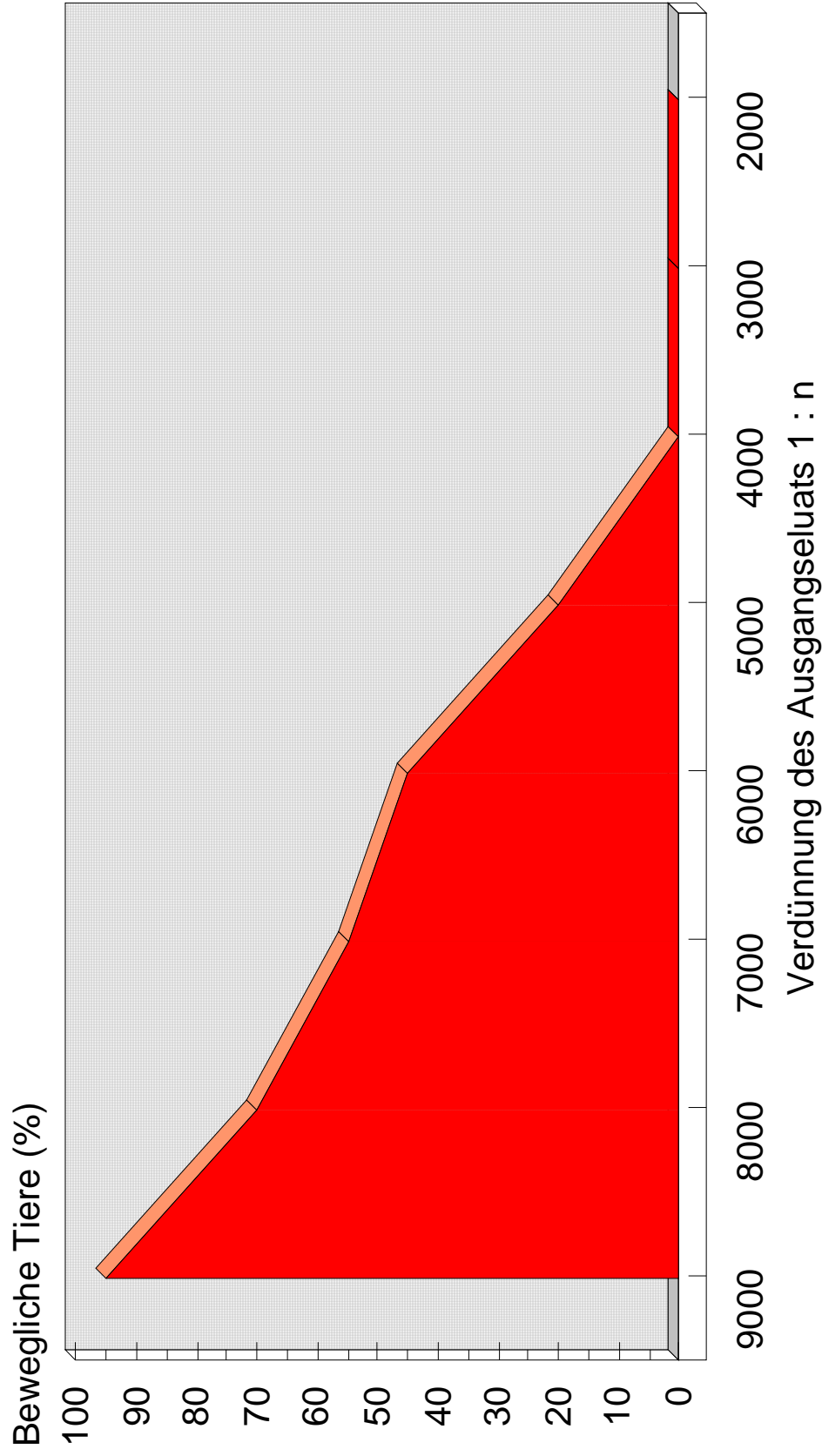


Lepidium sativum Wurzellängentest





Schwimmhemmung bei *Daphnia magna*



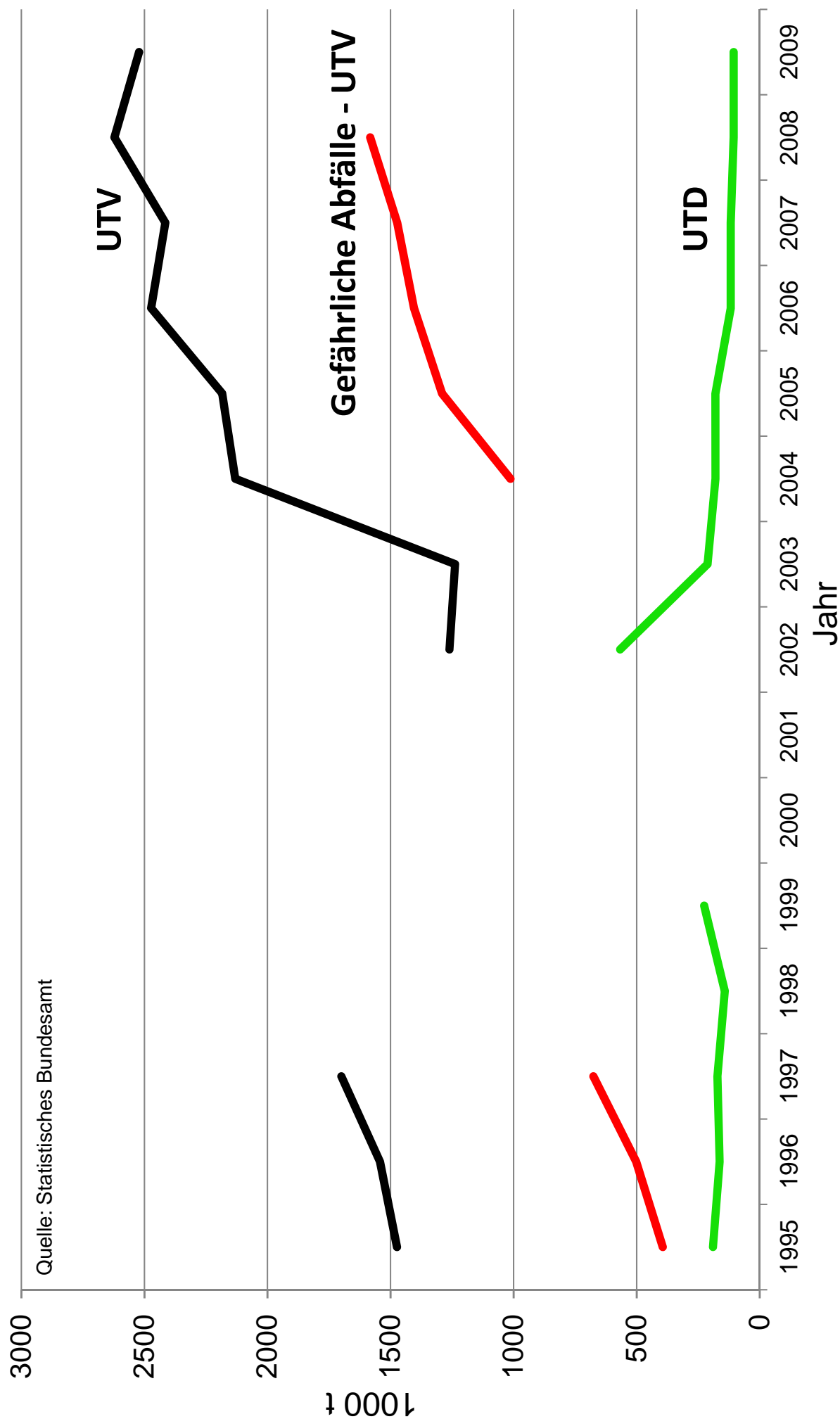
Eluat eines Filterstaubs mit Einzelement-Konzentrationen unterhalb zulässiger Grenzwerte (Synergie-Effekt)

Stoffgruppen in den UTD Herfa-Neurode (H) und Zielitz (Z)

- Cyanidhaltige Abfälle (H, Z)
- Hochhalogenierte Kohlenwasserstoffe (H, Z)
- Arsenhaltige Abfälle (H, Z)
- Quecksilberhaltige Abfälle (H, Z)
- Galvanikrückstände (H, Z)
- Chemierückstände (H, Z)
- Trockenstoffe (H, Z)
- Laborchemikalien (H, Z)
- Verbrennungsrückstände (H, Z)
- Kondensatoren (H)
- Transformatoren (H)
- Sonstige (H)

Quelle: Müllhandbuch 8193, 8193.1

Untertägige Verbringung von Abfällen - Mengen



Untertagedeponien in der öffentlichen Wahrnehmung



29.12.2010

Herfa-Neurode

Der giftigste Ort der Welt ist in Nordhessen

Wer den giftigsten Ort der Welt sucht muss nicht weit reisen: Er liegt in Nordhessen. In der Untertagedeponie Herfa-Neurode.

Deutschlandfunk

24.05.2010

Im Fegefeuer der Konsumgesellschaft

600 Meter unter der Erde lagert in einer alten Kaligrube genug Arsen, um alles Leben auf der Erde auszulöschen. Und Arsen ist nur eines der Gifte

Frankfurter Rundschau

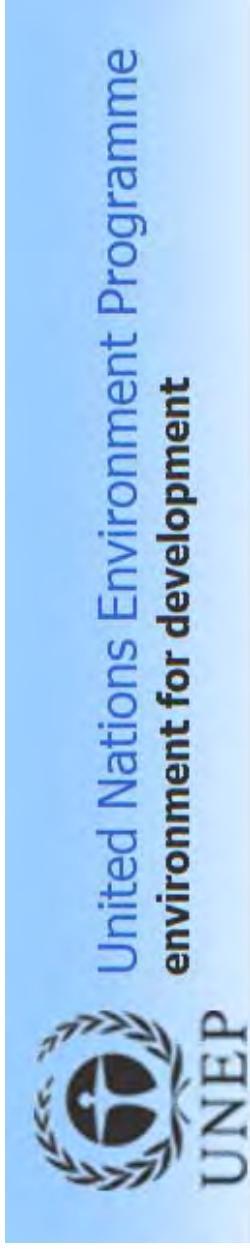
05.08.2011

Giftmüll in Hessen

Der giftigste Ort der Welt

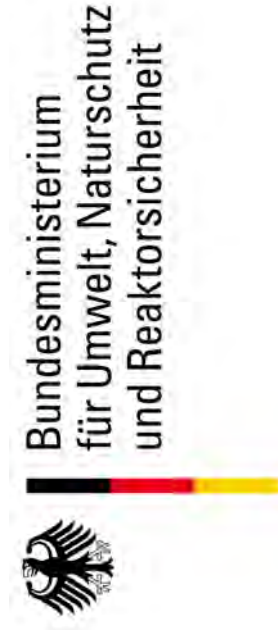
Ein stillgelegtes Salzbergwerk in Nordhessen schluckt alljährlich 40.000 Tonnen Giftmüll. Es ist die größte Untertagedeponie der Welt.

Konzepte zur Entsorgung von Hg-Abfällen - weltweit



A priority for action: Mercury supply & storage

- Asia Mercury Storage Project
- LAC Mercury Storage Project



Bei Inkrafttreten des Verbots der Hg-Ausfuhr müssen die Mitgliedstaaten eine sichere Lagerung sicherstellen

Aktuelle UTD-Themen / Schlussfolgerungen (1)

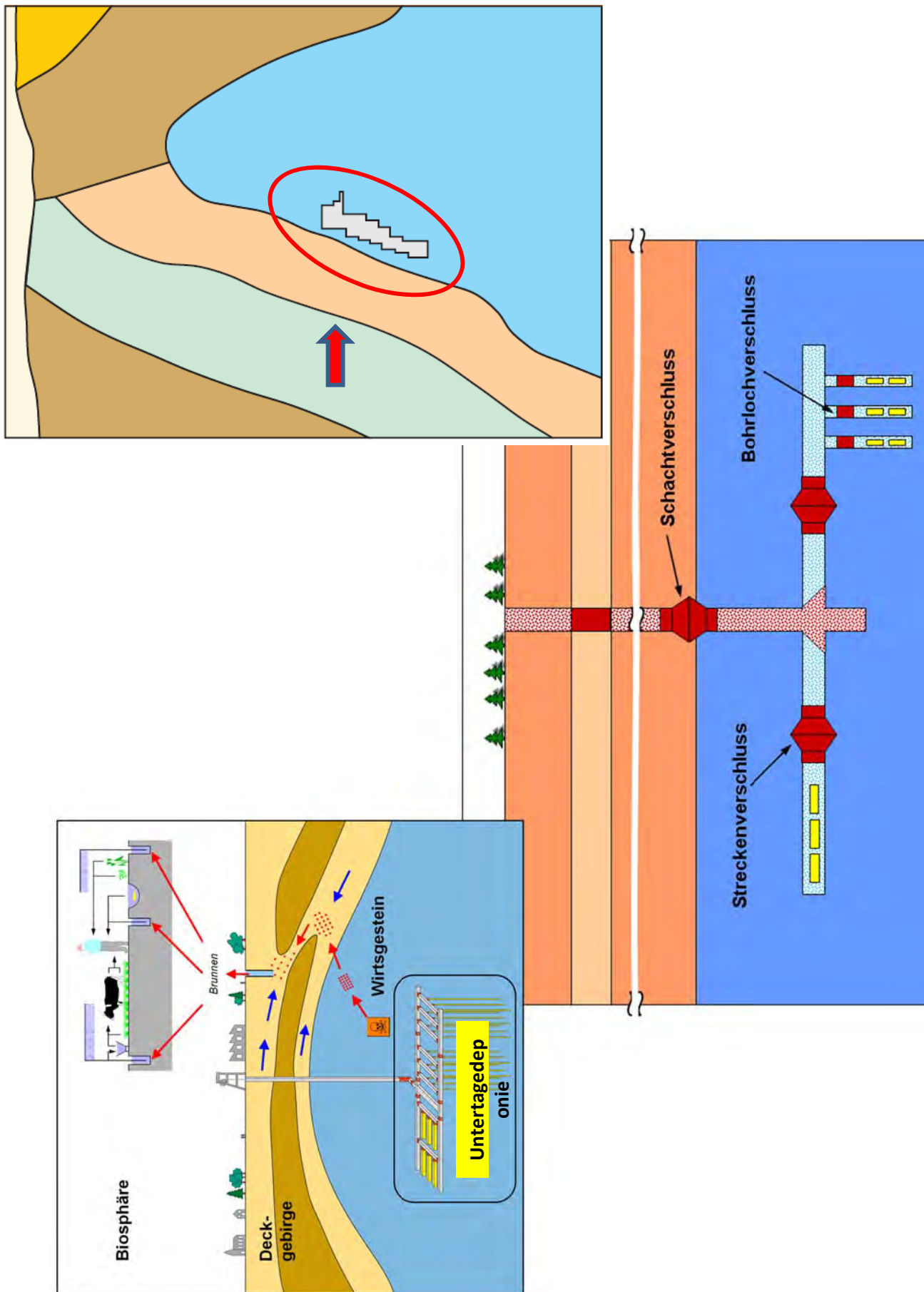
- **Beispiel UTD-Konzept**
 - Unvorhergesehene Laugenzuflüsse wie in der Asse können nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden
 - Im Störfall resultieren Wechselwirkungen, deren Einfluss auf die Langzeitsicherheit einer UTD noch nicht in aller Konsequenz erforscht ist
 - Inkohärenz bei Regelwerken und Sicherheitsverständnis
 - Notwendige Grundlagen: Abfallanalytik, Reaktivität, Toxizität, Mengen
- **Beispiel Barrieren**
 - Forderung: Trockene Verwahrung der Abfälle muss gewährleistet sein
 - Forderung: Laufende Anpassung technischer Konzepte an Stand von WuT
 - Sachverhalt: Wirkung großer Mengen nicht-toxischer Matrixstoffe auf Schadstofffreisetzung und Barriereeigenschaften ist noch unklar
 - Lösungsansatz: Spezifischer Versatzstoffe (z.B. „SVV“) + großtechnische Demonstration

Aktuelle UTD-Themen / Schlussfolgerungen (2)

- **Beispiel Gasfreisetzung**
 - Forderung: Verbot bestimmter Abfälle mit Gasfreisetzung
 - Sachverhalt: Teilweise erhebliche Gasfreisetzungen aus Abfällen (GRS-Untersuchungen)
 - Sachverhalt: Schwere Störfälle im Zusammenhang mit Gasentwicklung (z.B. Stocamine)
 - Lösungsansatz: Abfallkonditionierung, Konzeptanpassung

- **Internationale Perspektive**
 - Problemstellung: Hoher Bedarf an sicheren Entsorgungsmöglichkeiten für gefährliche Abfälle in SE-Asien und S-Amerika
 - Lösungsansatz: Vermittlung und Adaption des UTD-Konzeptes
 - Effekt: Ausstrahlung auf internationale Regelwerke
 - Nachhaltiger Schutz der Umwelt

Aktuelle UTD-Themen / Schlussfolgerungen (3)

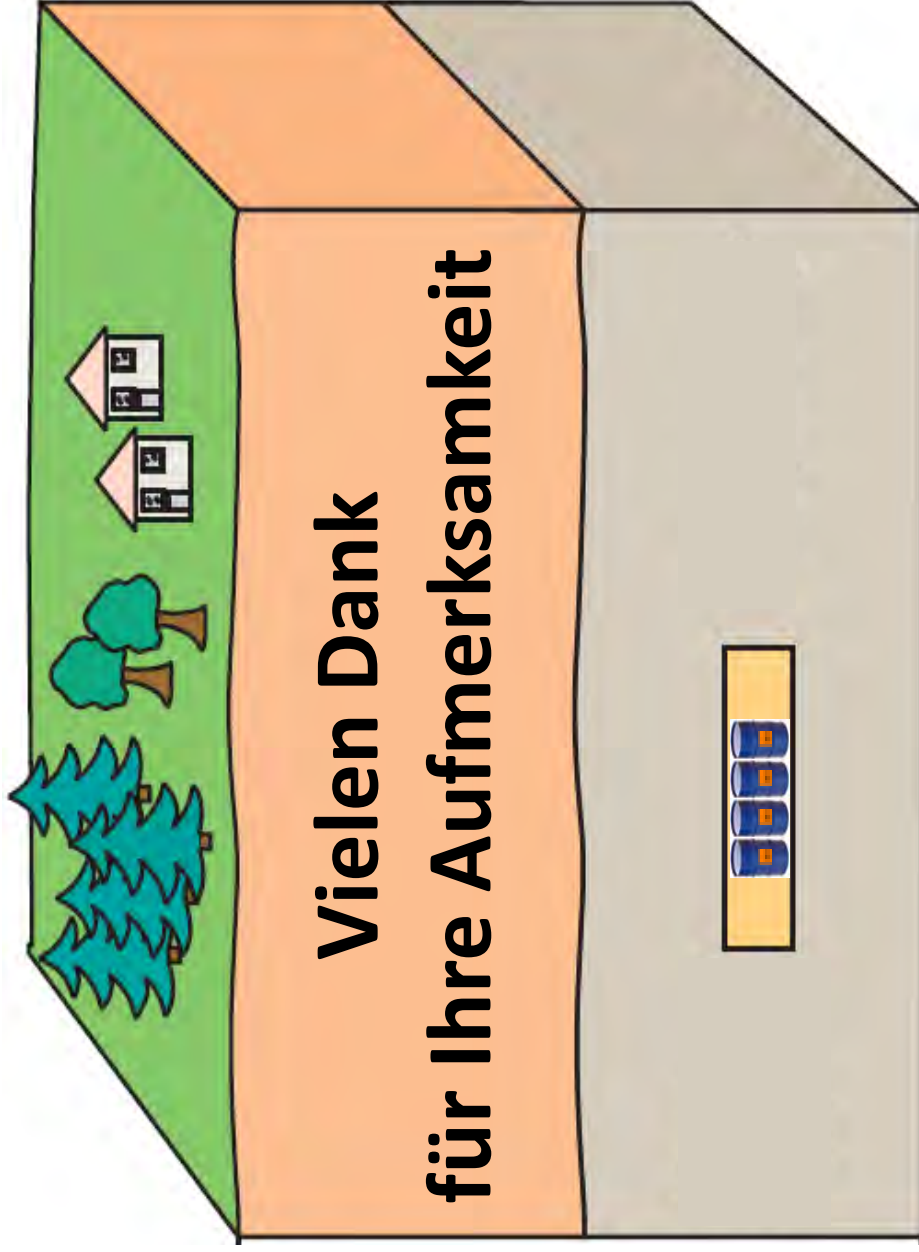


Rückstellproben in der UTD Herfa-Neurode



Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Karlsruhe, 14. + 15.2.2012

Schutzziel: Sicherer Einschluss im Wirtsgestein und Isolation von der Biosphäre



Kontakt

- Dr. Thomas Brassler
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Bereich Endlagersicherheitsforschung
Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Tel. +49-531-8012-238
Fax +49-531-8012-10238
Mail thomas.brasser@grs.de
- Hinweis: Diese Präsentation greift auf die Ergebnisse zahlreicher FuE-Vorhaben zurück, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert worden sind. Zu nennen sind u.a. die Förderkennzeichen (FKZ) 02 C 0051, 02 C 0608, 02 C 0163, 02 C 0284, 02 C 0475, 02 C 0072, 02 C 0173, 02 C 0689, 02 C 0659.

Geochemische Forschung der GRS zu chemotoxischen Abfällen

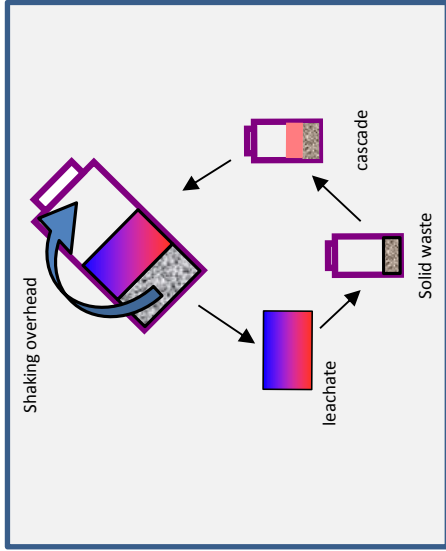
Dr. Hagemann, S. & Dr. Herbert, H.-J.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig

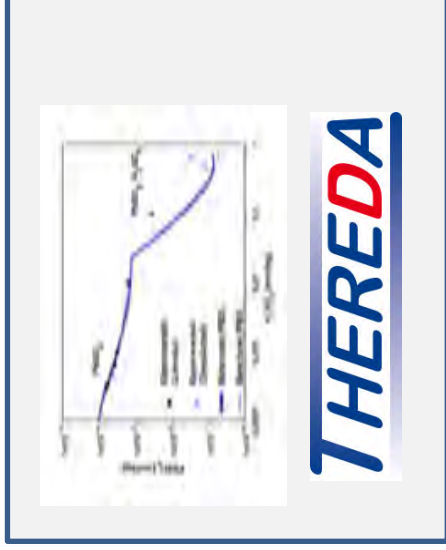
Geochemische Forschung der GRS zu chemotoxischen Abfällen

**Sven Hagemann und Horst-Jürgen Herbert
GRS Braunschweig**

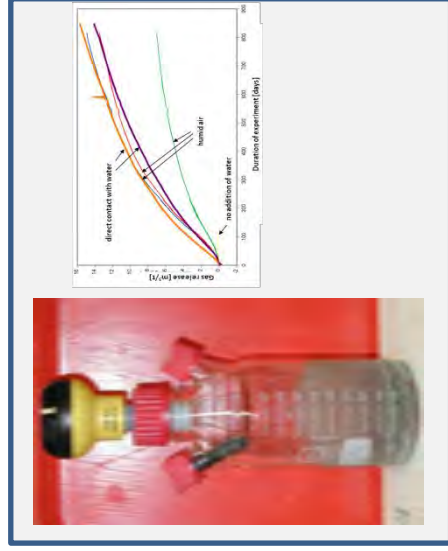
Schwerpunkte der GRS-Forschung



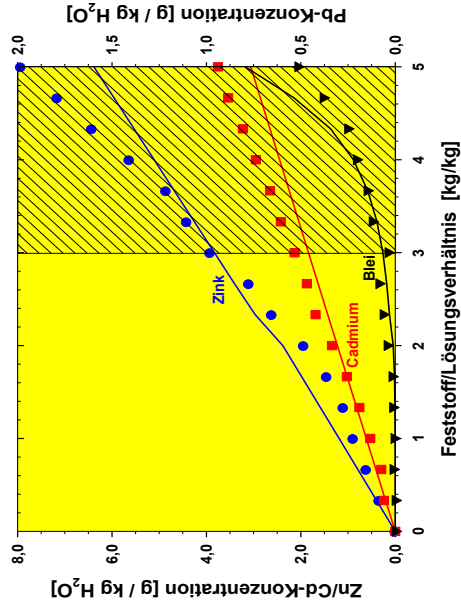
Untersuchung der Wechselwirkung von Abfällen und Barrieren mit Salzlösungen



Entwicklung thermodynamischer Datenbasen

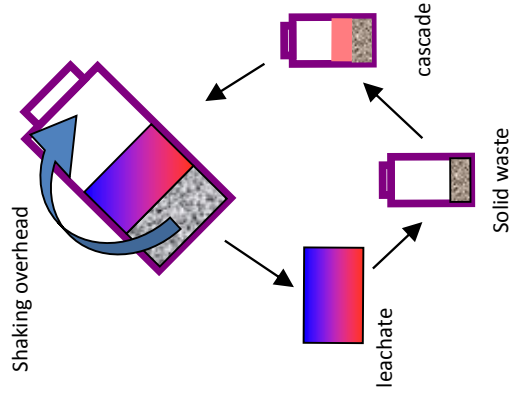


Gasfreisetzung durch Abfälle



Modellierung der Schadstofffreisetzung

Untersuchung der Wechselwirkung von Abfällen und Barrieren mit Salzlösungen

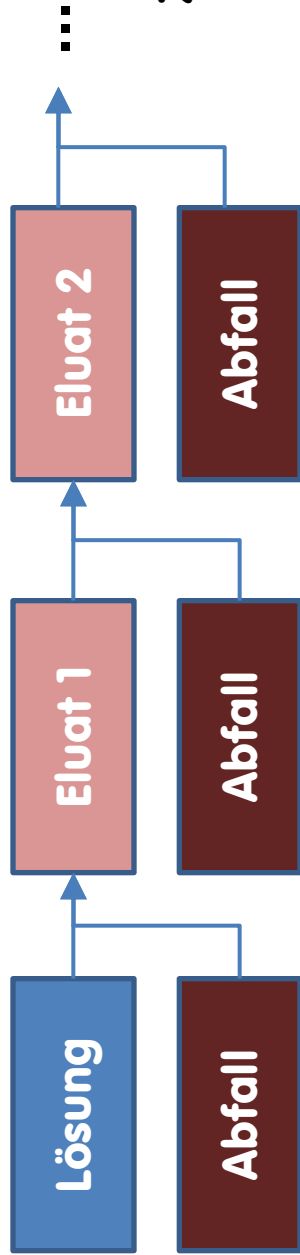


Ziele:

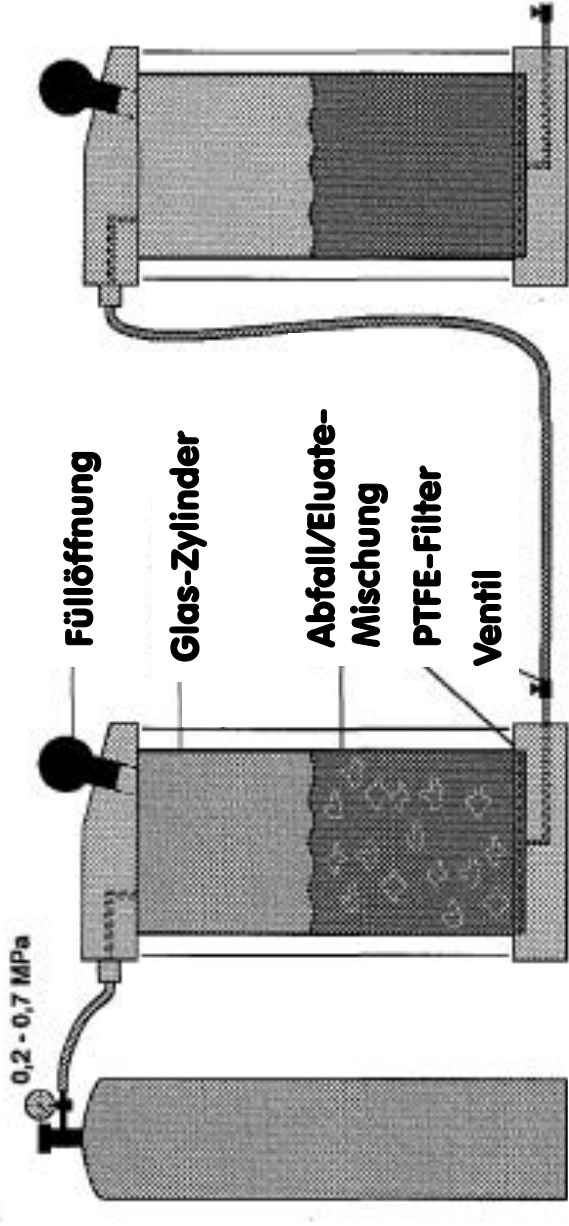
- A) Verständnis des Langzeitverhaltens von Abfällen**
- Entwicklung szenariennaher experimenteller Methoden (z.B. GRS Kaskaden-Auslaugversuch)
 - Bestimmung maximaler Schadstoffkonzentrationen in der Lösung
- B) Entwicklung neuartiger Barrierematerialien**
- Selbstverheilender Salzversatz (SV) Prüfung
- C) Prüfung des Langzeitverhaltens von Barrierematerialien (Salzbeton, Magnesiabinder, Bentonite)**
- Korrosion und Korrosionsprodukte
 - Permeabilität



Kaskadenauslaugverfahren

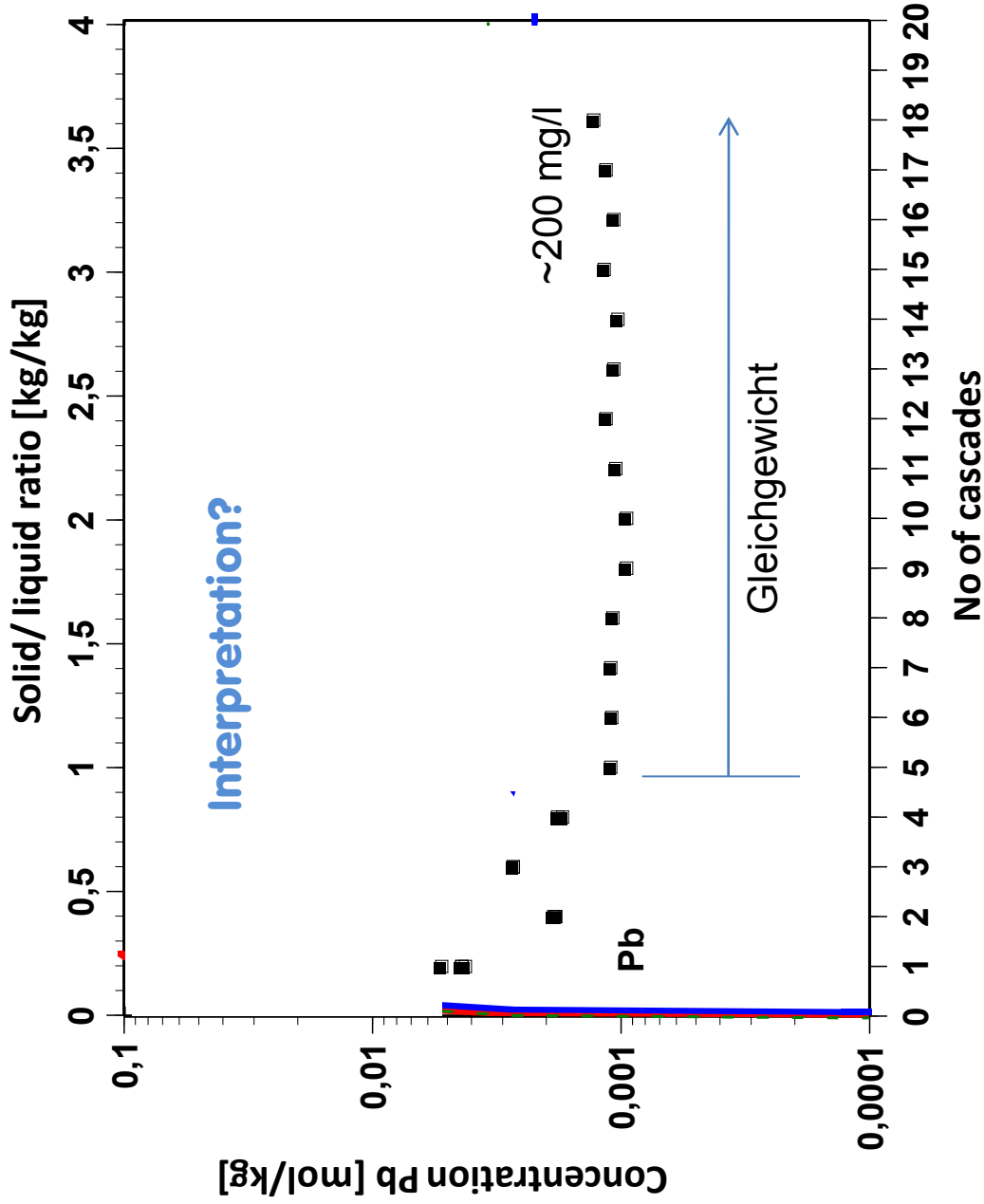


Ziel: Schrittweise Erhöhung Abfall/Lösungsverhältnis, Erreichen Sättigungsgrenze Schadstoff



- Elution unter Schutzgas
- Gemahlener Abfall
- Überkopfschütteln
- Eluation mit Wirtgesteinslösungen statt Wasser

Kaskadenauslaugverfahren:



Pb-Konzentration > 100 x höher als in Standard-Auslaugverfahren (DIN 38414-S4)

Auslaugung eines Gasreinigungsrückstandes mit IP21-Lösung

Gasfreisetzung durch gefährliche Abfälle



- Risiko für Betriebsphase durch Bildung brennbarer oder toxischer Gase
- Risiko für Langzeitsicherheit durch Druckaufbau und Beeinträchtigung der Barrieren

- Welche Prozesse sind möglich?
- Welche Abfalltypen sind betroffen?

Wichtigste Gasquelle: Metallkorrosion



Quelle

- Metallpartikel in Abfällen (Al, Zn, Fe, Si, Cu ...)
- Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+}



Abfalltypen

- Metallproduktion, -verarbeitung, -recycling
- Batterien
- Abfallverbrennungsrückstände (Flugstäube; Schlacken)



Reaktion

- Anaerobe Korrosion: Bildung von Wasserstoff



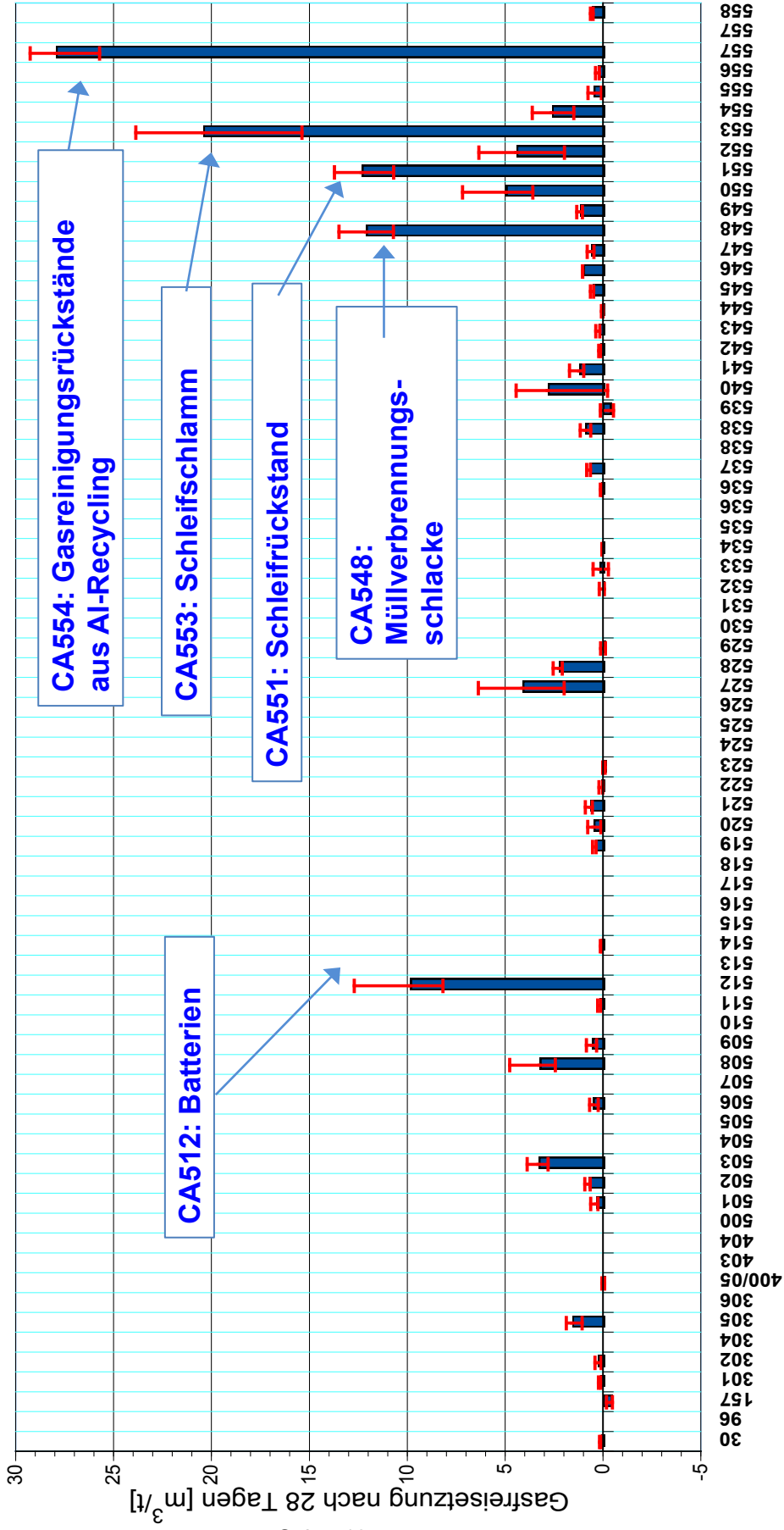
Experimentelle Untersuchung der Gasfreisetzung

- 50-100 g Abfall, nicht gemahlen
- Zugabe von Lösung (oder ohne Lösungszugabe) bis Porenraum gefüllt
- Inerte Atmosphäre (N_2)
- Kontinuierliche Druckmessung
- Gasprobenahme durch Septum
- Thermostatisierung im Klimachrank
- Dauer: 1-900 + Tage



WTW OxiTop System

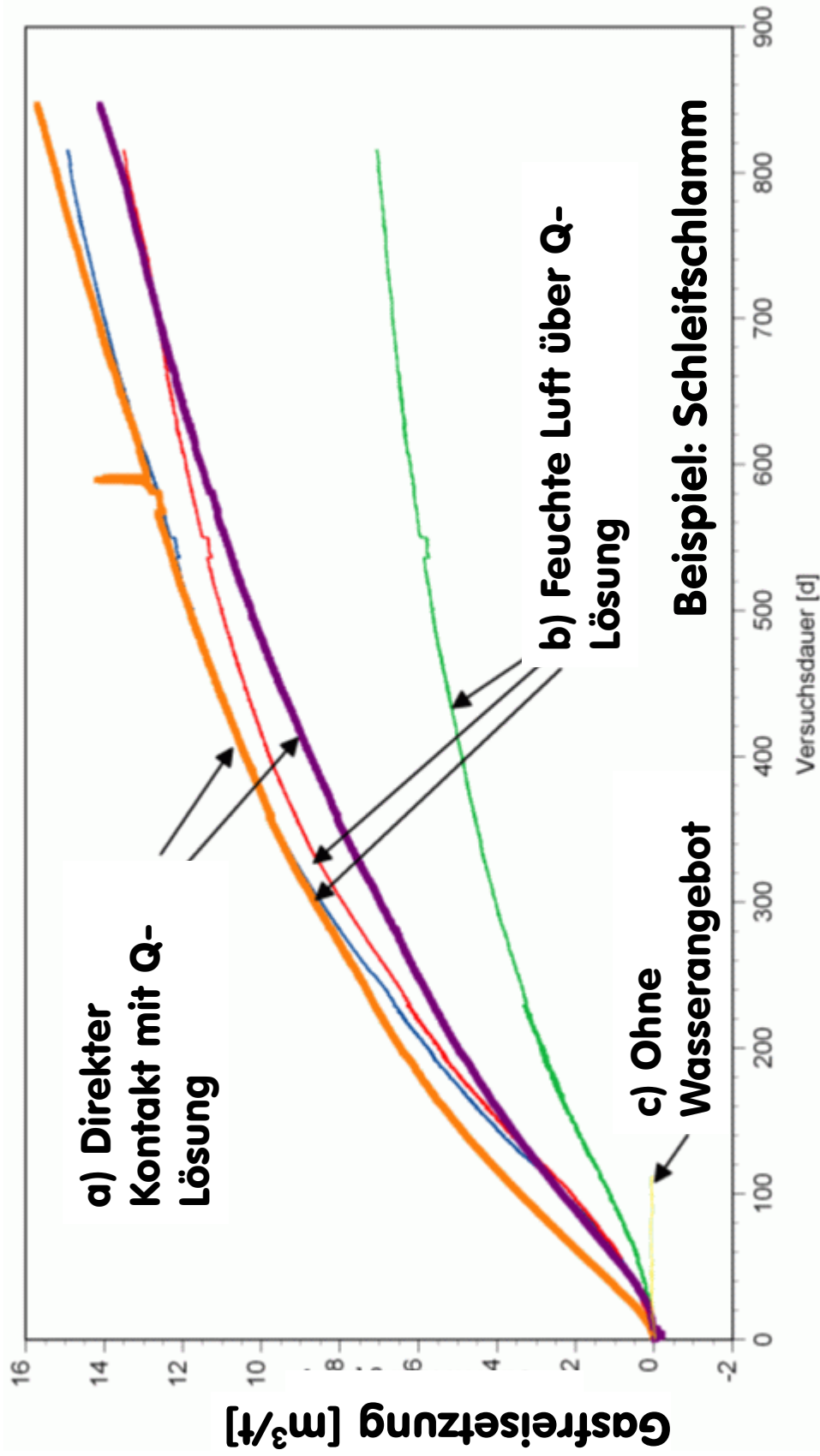
Maximale Gasfreisetzung verschiedener Abfalltypen (Szenario: Lösungszufluss in der Nachbetriebphase)



Abfall

Gasfreisetzung: Szenarienvergleich

- a) Direkter Lösungskontakt
- a) Kontakt mit feuchter Luft
- b) ohne Wasserzutritt



Gasfreisetzungsprozesse: Schlussfolgerungen

- **Gasfreisetzungspotential ist bei einigen Abfallarten erheblich (bis zu 28 m³/t)**
- **Gasbildende Prozesse können bereits bei normaler Luftfeuchte einsetzen**
- **Bei bestimmten Abfalltypen: Empfehlung zur Prüfung auf Gasfreisetzungspotential für jede Abfallcharge**
- **Gasbildung kann/sollte durch Vorbehandlung einzelner Abfälle reduziert werden**
- **Monitoring der Gasbildung (H₂, CH₄)**

Entwicklung thermodynamischer Datenbasen



Experimentelle Untersuchung
von Lösungsgleichgewichten



Pb^{2+} , PbCl^+ , PbCl_2^0
 PbSO_4 , PbClOH

Chemisches Modell
Spezies
Festphasen

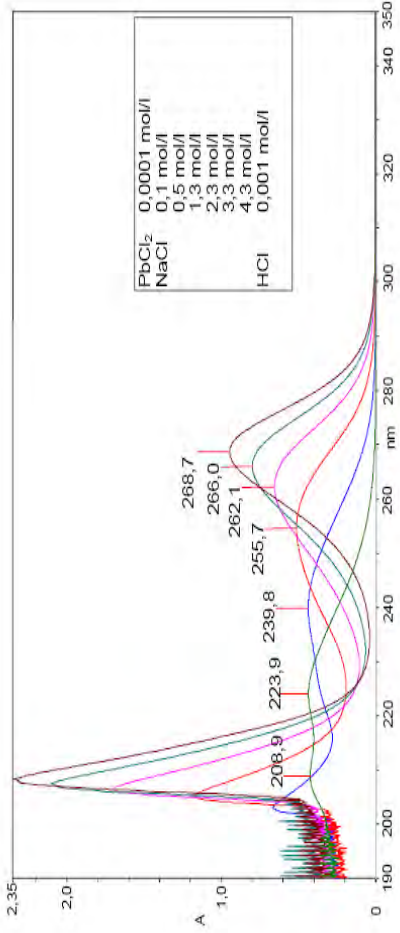


$\text{Log } K_s$
 $\text{log } b_1$
 $b^{(0)}$, $b^{(1)}$, $b^{(2)}$, C , γ , q

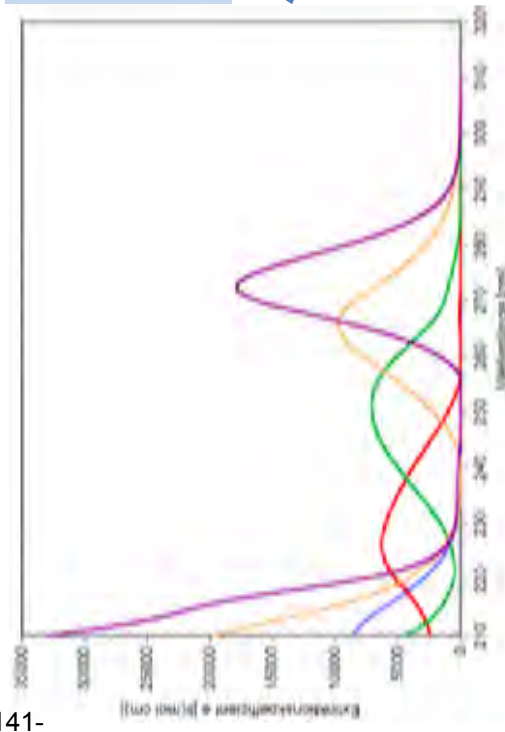
Thermodynamische Datenmbasis
Löslichkeitskonstanten,
Komplexbildungskonstanten,
Ionenwechselwirkungskoeffizienten

Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

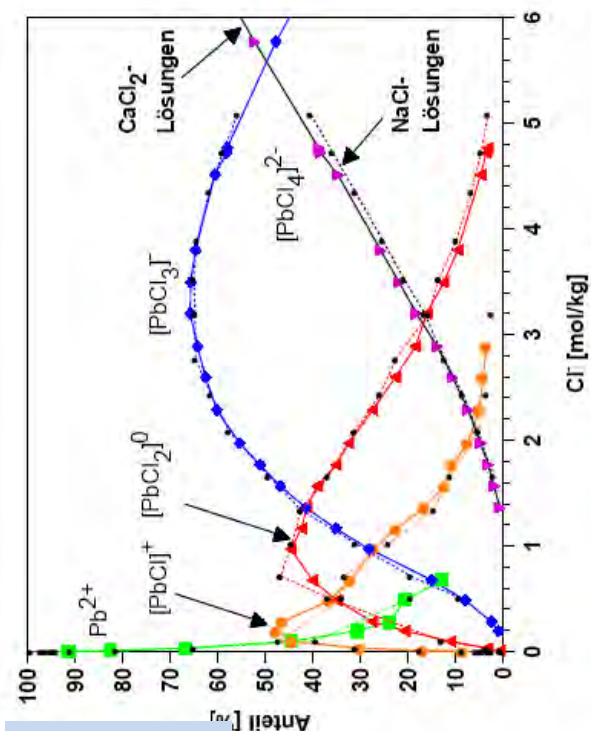
Beispiel Blei : Chemisches Modell



**Beobachtung
Chloro-
Komplexbildung
mit UV-VIS**



**Spektr-
Trennung mit
modellfreier
Faktoranalyse**

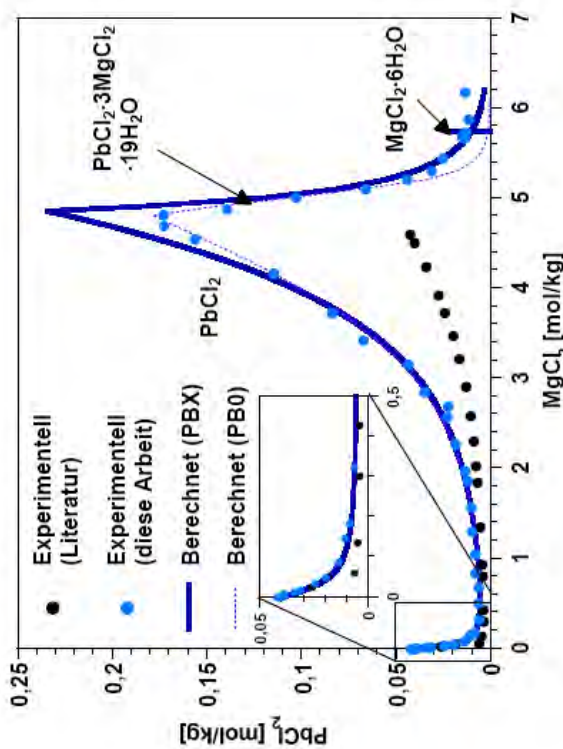
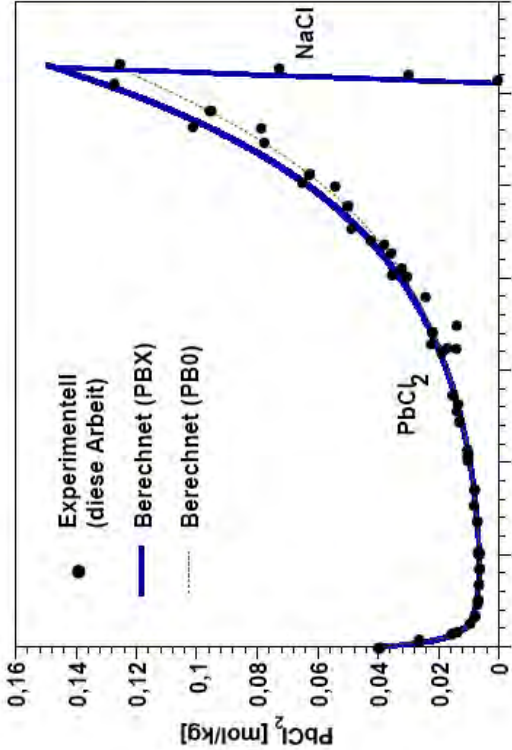


- Einzelspezies-Spektren
- Chemisches Modell: Pb^{2+} und vier Chlorokomplexe $[PbCl_n]^{2-n}$ ($n=1-4$)

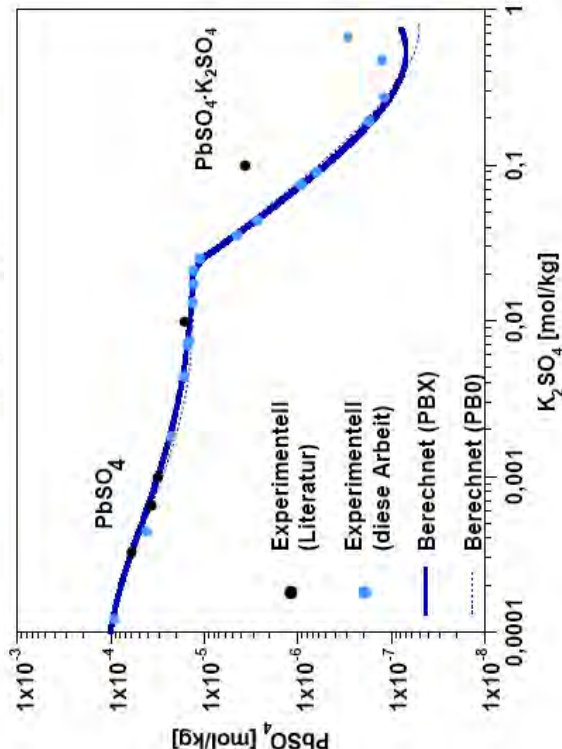
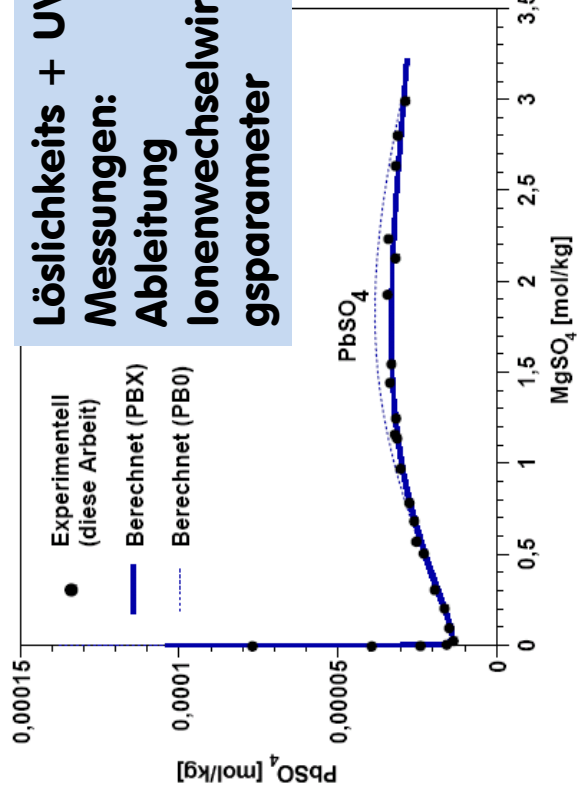
→ Spezieskonzentrationen

Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

Beispiel Blei : saure Lösungen

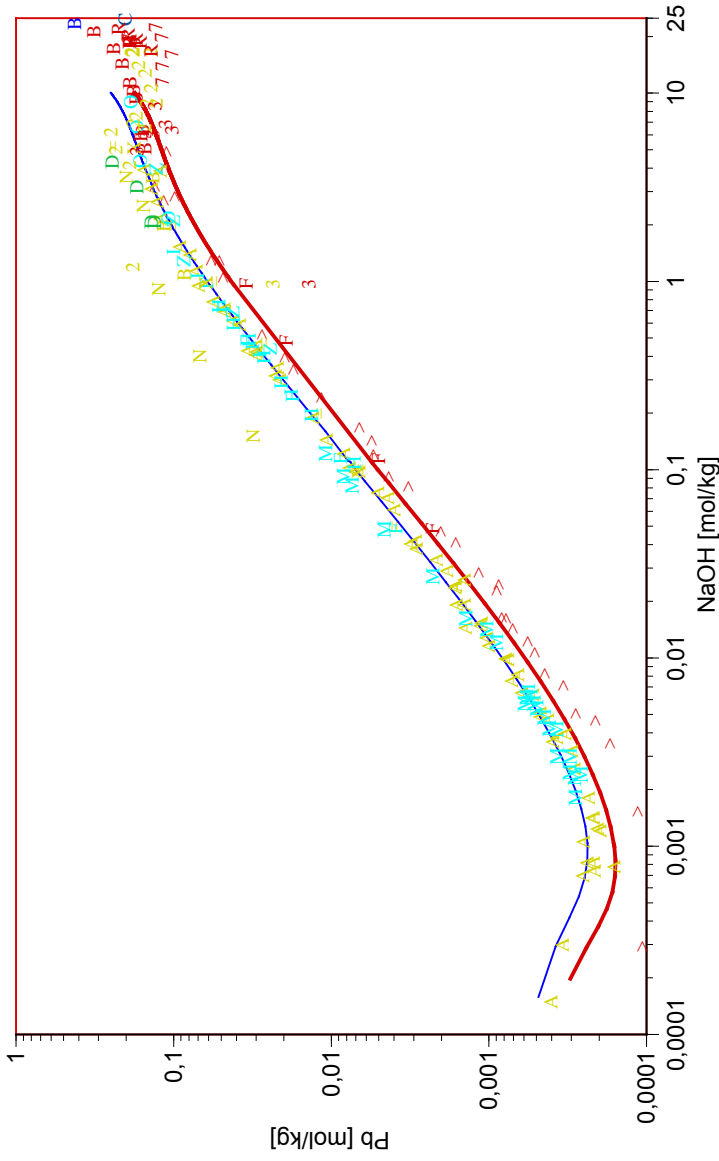


Löslichkeits + UV-Messungen: Ableitung Ionenwechselwirkungsparameter



Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

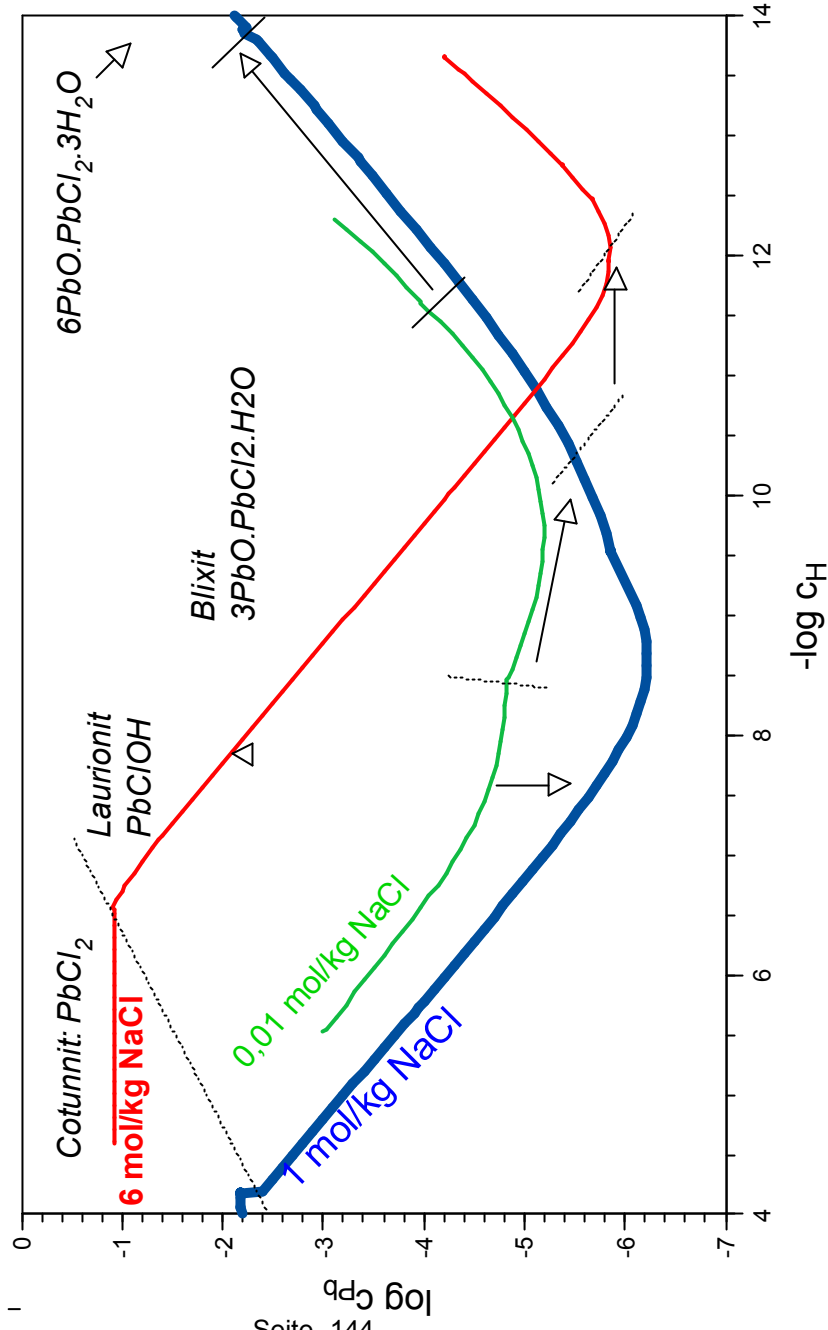
Beispiel Blei : basische Systeme



- Hydroxo-Komplexe
- Carbonato-Komplexe
- Wechselwirkungskoeffizienten für Hydroxokomplexe (unvollst.)
- Art und Löslichkeit von Hydroxiden, Carbonaten, basische Chloriden, Sulfaten

Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

Beispiel Blei : Anwendung



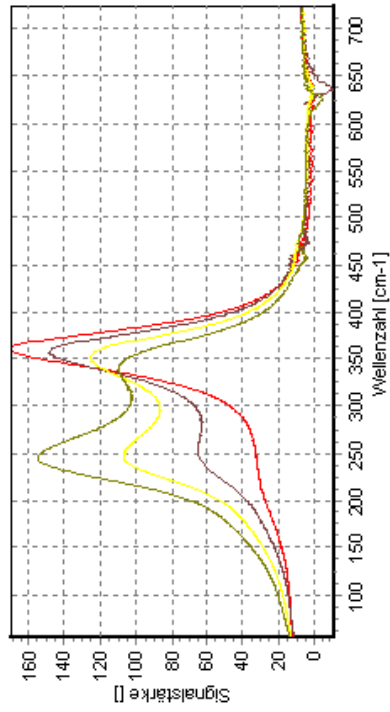
• Löslichkeit Pb in NaCl-Lösungen in Abh. von pH und NaCl-Konzentration

Datenbasistentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

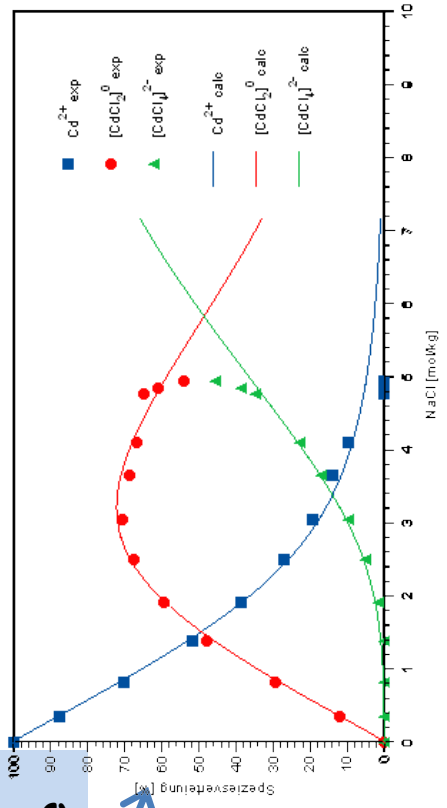
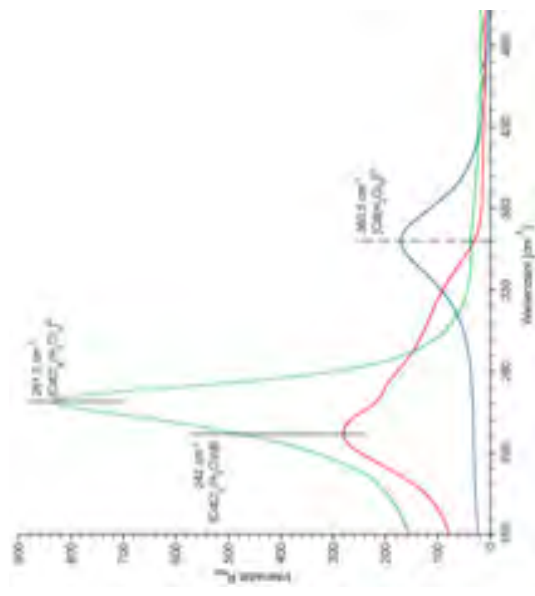
Beispiel Cadmium : Chemisches Modell

Beobachtung
Chloro-
Komplexbildung
mit Raman-
Spektroskopie

cdnat12.dat.dat
cdnat1.dat.dat
cdnat2.dat.dat
cdnat3.dat.dat



Spektralen-
Trennung mit
modellfreier
Faktoranalyse

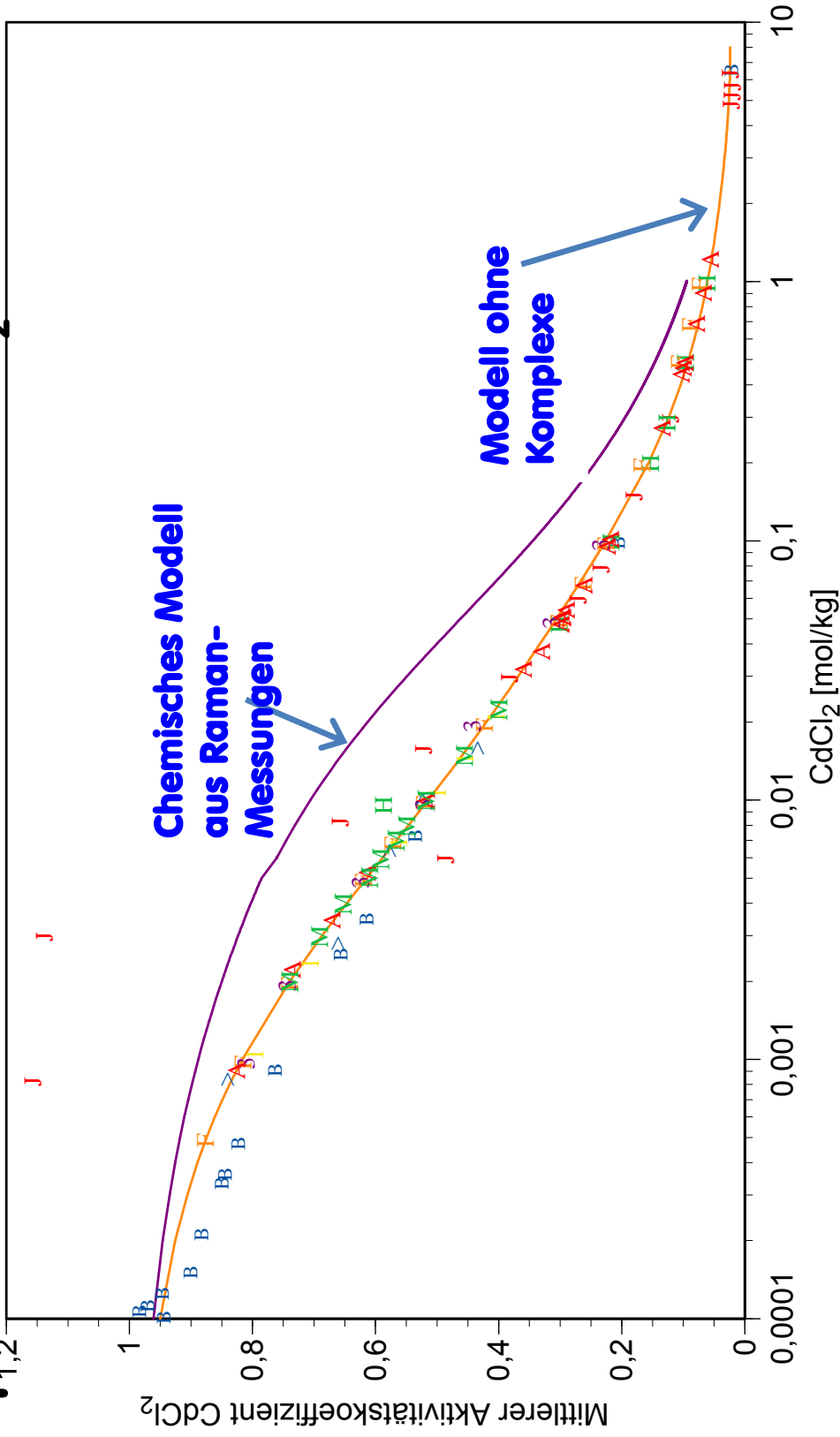


- Einzelspezies-Spektren
- Chemisches Modell: Cd^{2+} und zwei Chlorokomplexe $[CdCl_n]^{2-n}$ ($n=2,4$)

→ Spezieskonzentrationen

Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

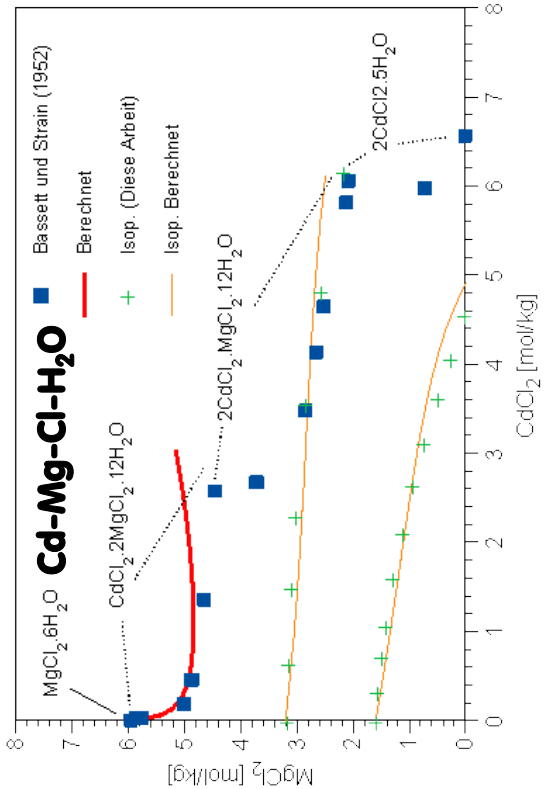
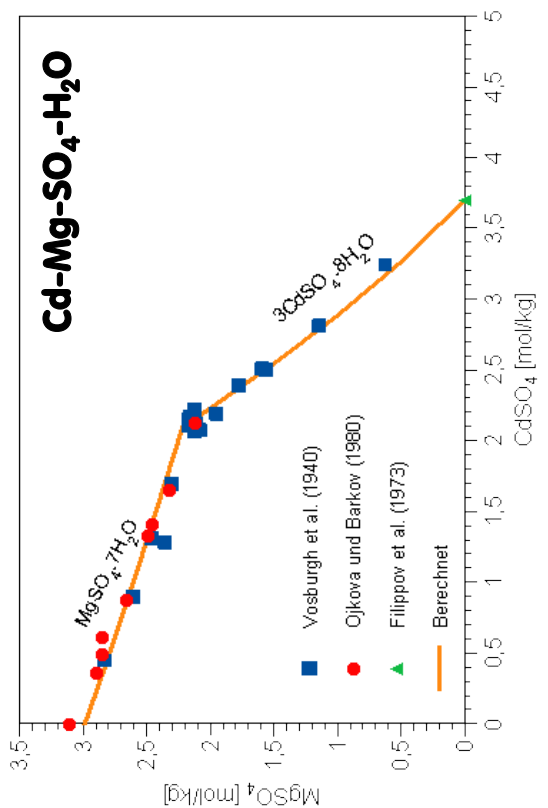
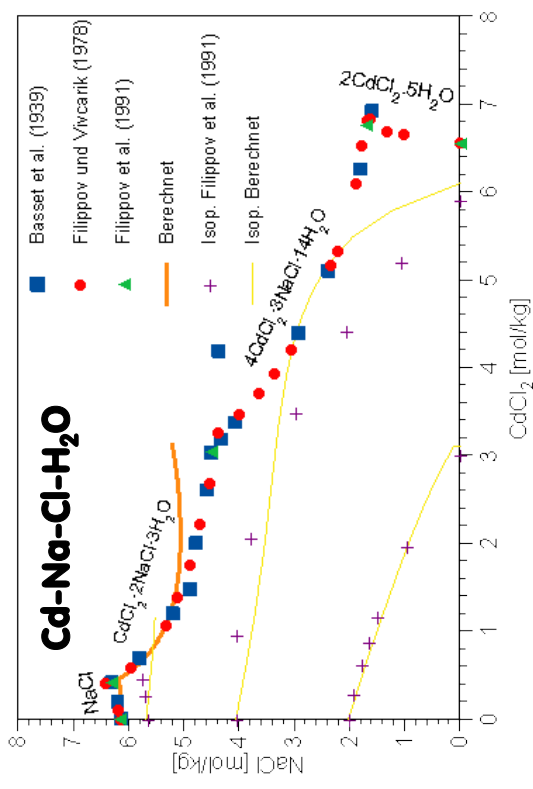
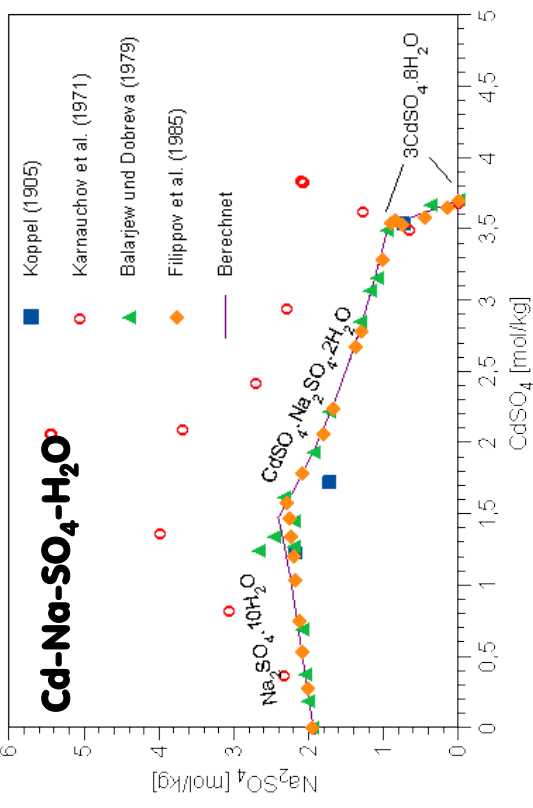
Beispiel Cadmium : Aktivitätskoeffizient CdCl_2



- Aus Raman-Messungen abgeleitetes chemisches Modell nicht kompatibel mit unabhängigen Aktivitätsmessungen
- Anwendung eines komplexfreien Modells

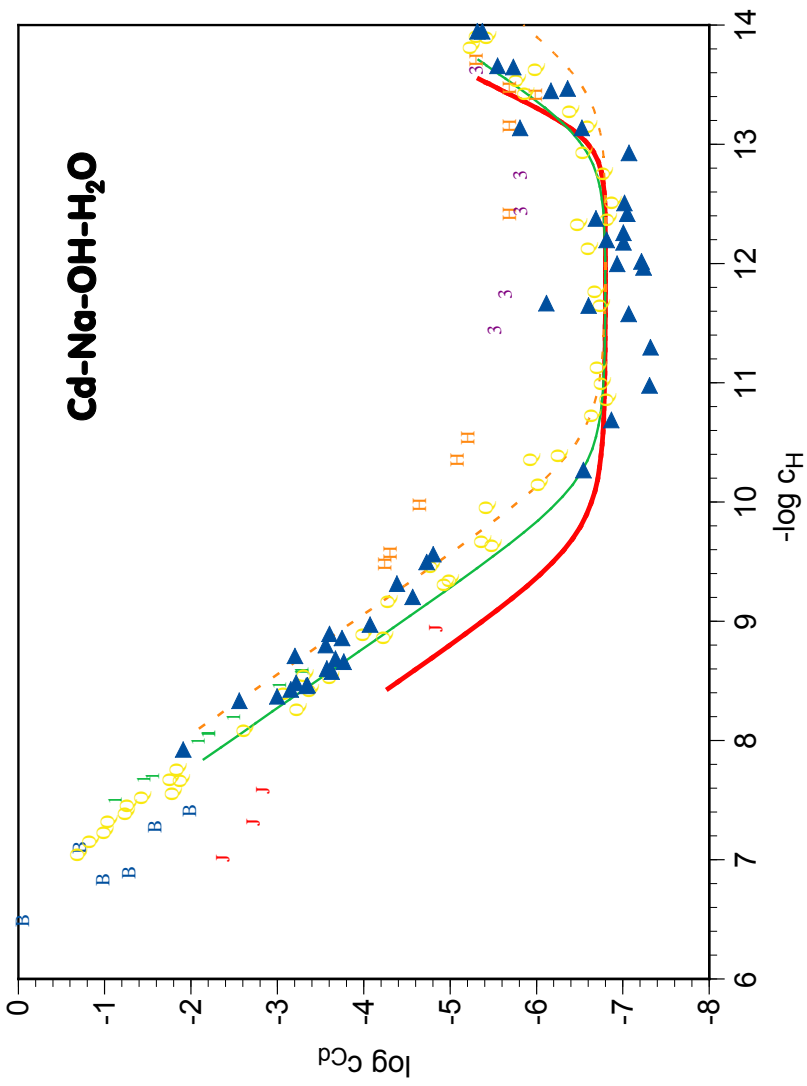
Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

Beispiel Cadmium : saure Systeme



Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

Beispiel Cadmium : basische Systeme



- B Marcus (1957) 3M (Na)ClO₄ Q Gübeli und Taillon (1971) 1M NaClO₄
- J Gayer und Wootner (1957) ▲ Rai et al. (1991) 0,01 M NaClO₄
- I Schindler (1959) 3M NaClO₄ — Berechnet
- H Ryan et al. (1965) 1M NaClO₄ — Berechnet (1M NaClO₄)
- 3 Ryan et al. (1965) 7M NaClO₄ - - - Berechnet (3M NaClO₄)

Drei Hydroxo-Komplexe:
 $Cd(OH)_2$, $Cd(OH)_2^+$, $Cd(OH)_4^{2-}$

→ Konsistent mit Ergebnissen aus Raman/Potentiometrie für Cd-Cl-Komplexe

Schwerpunkte zurückliegender Forschungsprojekte

	sauer	basisch
Al		
AsO4		
Cd		
Co		
Cr(III), Cr(VI)		
Cu(I), Cu(II)		
Cu(II)		
Fe(II), Fe(III)		
Hg(II)		
Mn(II)		
Ni		
Pb		
SiO4		
Zn		

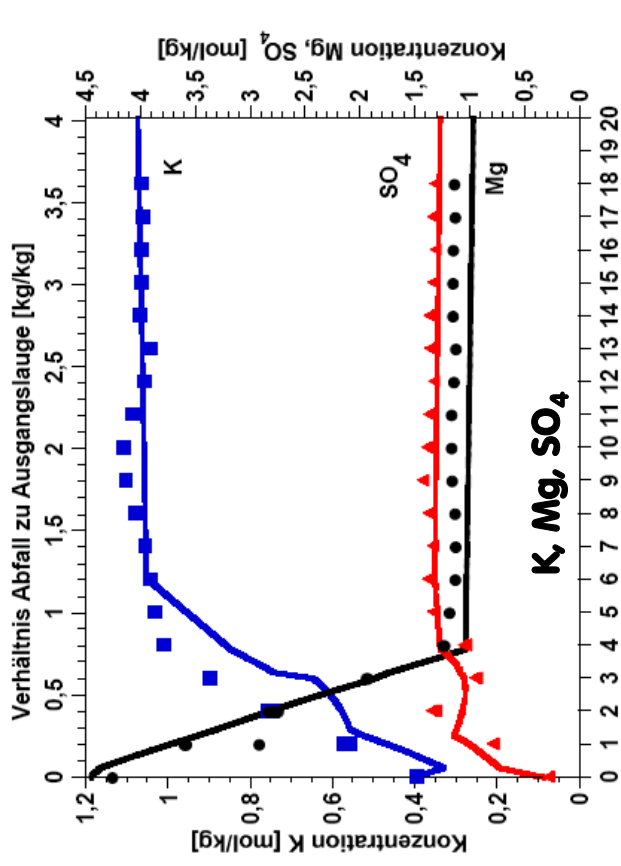
Datenbasisentwicklung: Erfolge und Herausforderungen

- **Chloro- und Sulfatokomplexe für viele Metallionen relevant**
- **In sauren Lösung nicht zwingend zu berücksichtigen**
- **In basischen Lösungen unverzichtbar**

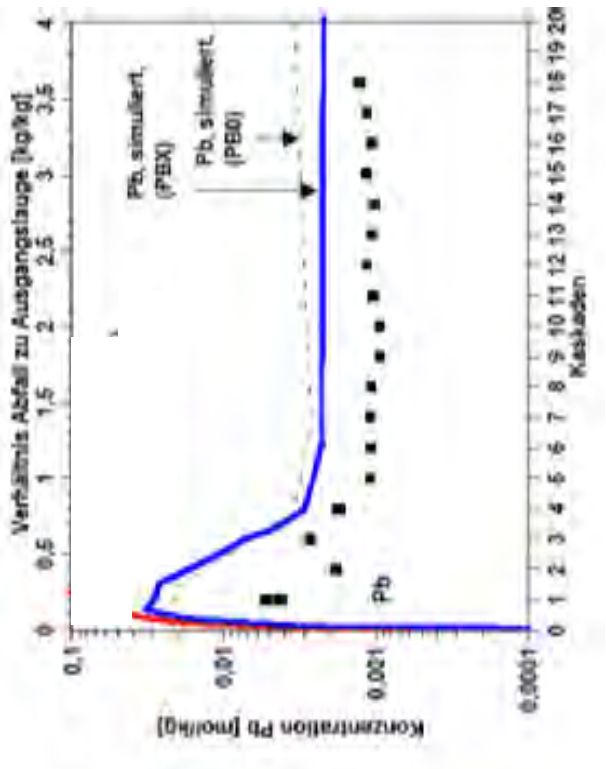
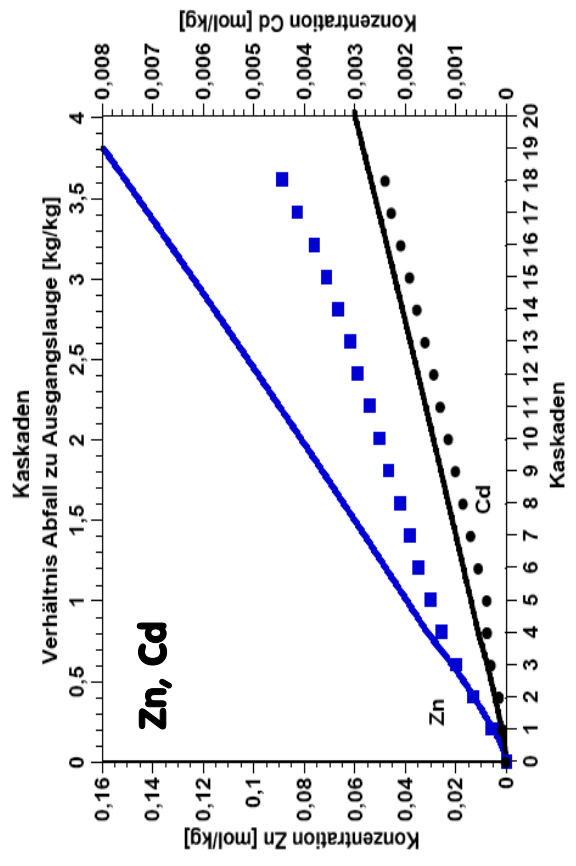
**Daten für basische Festphasen weiterhin lückenhaft
Ionenwechselwirkungskoeffizienten für Komplexspezies schwer zugänglich**

- **Verstärkte Nutzung von Schätzmethoden, besonders für Wechselwirkungskoeffizienten**
- **Nutzung von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Identifizierung besonders relevanter Datenlücken**

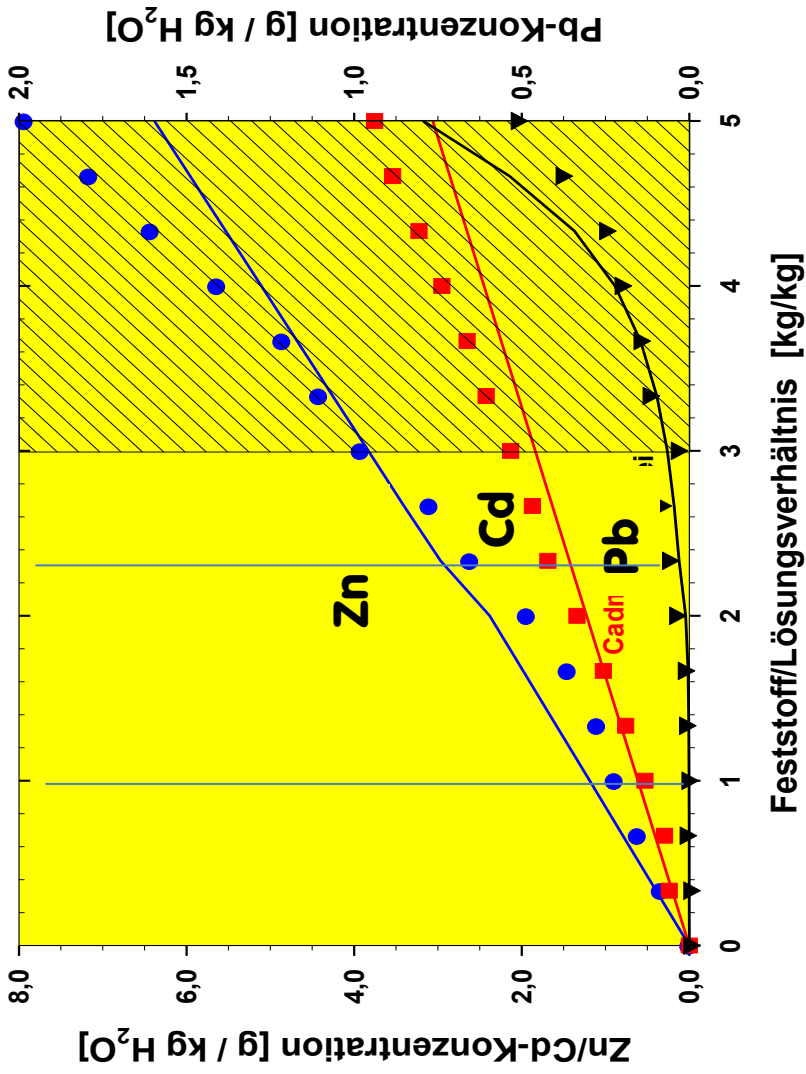
Geochemische Modellierung von Abfall-Lösungs-Reaktionen



- Kaskadenweise Elution eines Rauchgasreinigungsrückstandes mit IP21-Lösung
- Modellierung mit Hilfe eines Elutionsfaktors: effektiv eluierbare Stoffmenge unter Versuchsbedingungen



Geochemische Modellierung von Abfall-Lösungs-Reaktionen



Kaskadenweise Elution einer Flugasche aus der Abfallverbrennung

- ↑ Gute Modellierung der Hauptelemente
- ↑ Gute Modellierbarkeit von Zn, Cd und Pb
- ↑ Weniger befriedigende Modellierung anderer Metalle

Möglichkeiten und Grenzen der geochemischen Modellierung von Abfall-Lösungs-Reaktionen

Verbesserte Datenbasis für Schadstoffe

- erlaubt Prognose der Konzentrationsentwicklung von Schadstoffen in vielen Abfall-Lösungssystemen
- Ist aufgrund fehlender Daten nur eingeschränkt nutzbar für basische Systeme
- Wird derzeit ausgebaut für Anwendung in Geothermie

Herausforderungen

- Richtige Wahl tatsächlich auftretender Phasen → Expertensystem für Modellierer?
- Verbleib von Spurenelementen, die keine eigenen Festphasen bilden
- Stabilität chemisch flexibler Wirkphasen (z.B. Hydrotalcite, Jarosite, “green rust”)

Fazit und Aussicht

BMBF-Forschungsprogramm hat entscheidend beigetragen zur

- **Grundsätzlichem Verständnis von Abfall-Lösungsreaktionen**
- **Weiterentwicklung der thermodynamischen Datenbasis**
- **Der Praxis der geochemischen Modellierung**
- **Bewertung gasfreisetzender Prozesse**
- **Synergieeffekte zur Endlagerforschung (Daten, Tools)**

Offene Punkte:

- **Datenbasis für basische Systeme**
- **Schätzverfahren**
- **Verhalten von Spurenelementen**
- **Methoden zur Identifizierung von Abfällen, die im Falle eines Notfalls prioritär zurückgeholt werden sollten**

Thermodynamische Referenzdatenbasis THEREDA als Grundlage geochemischer Modellierung

Dr. Moog, H.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig

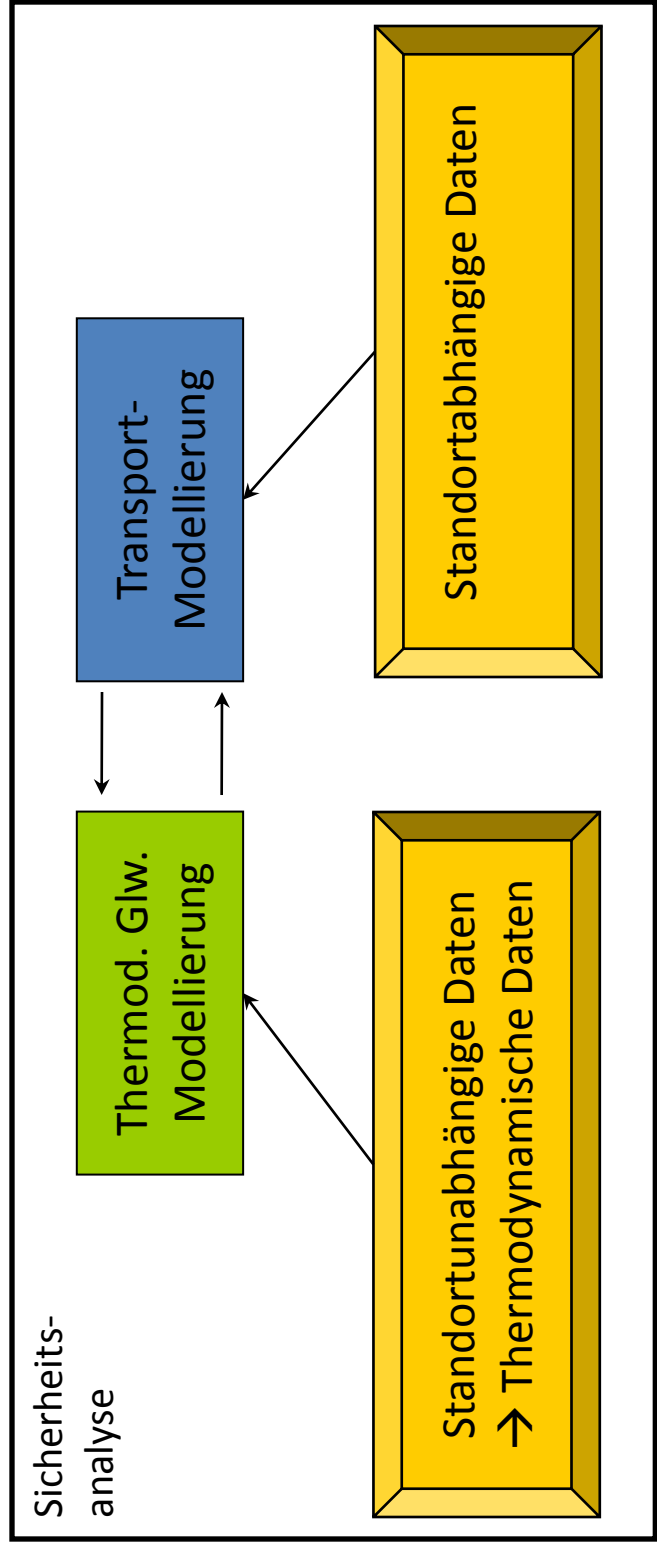
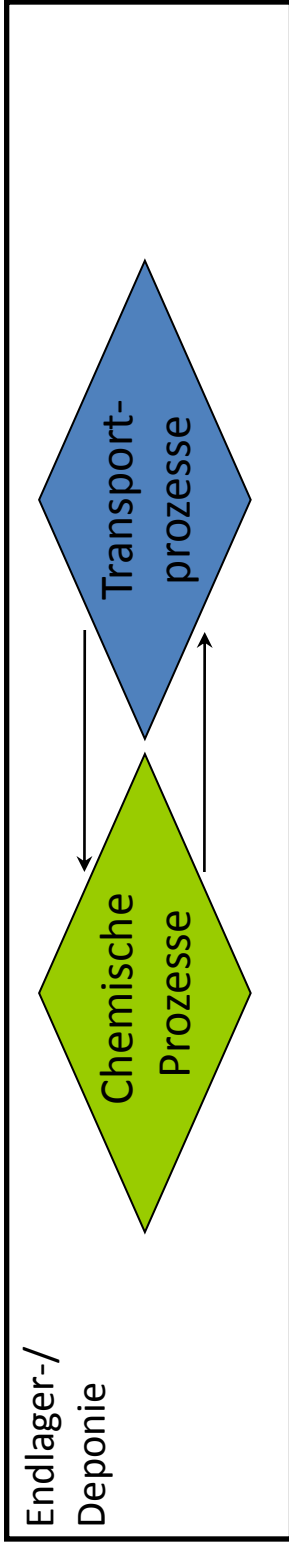
THEREDA

Verbundprojekt THEREDA

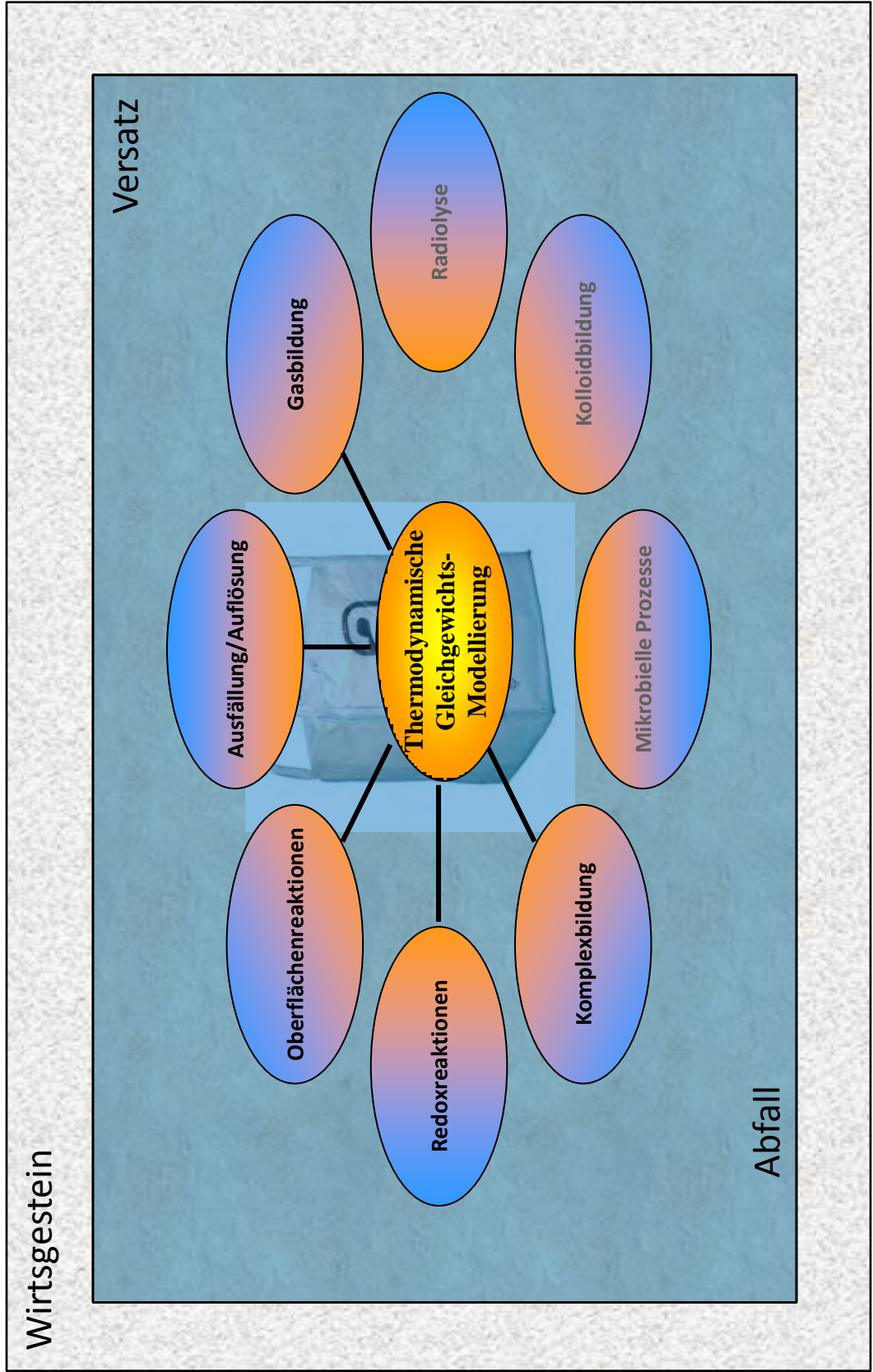
Entwicklung einer thermodynamischen
Referenzdatenbasis zur Beschreibung von
geochemischen Prozessen in Untertagedeponien und
Endlagern für radioaktive Abfälle

Helge C. Moog

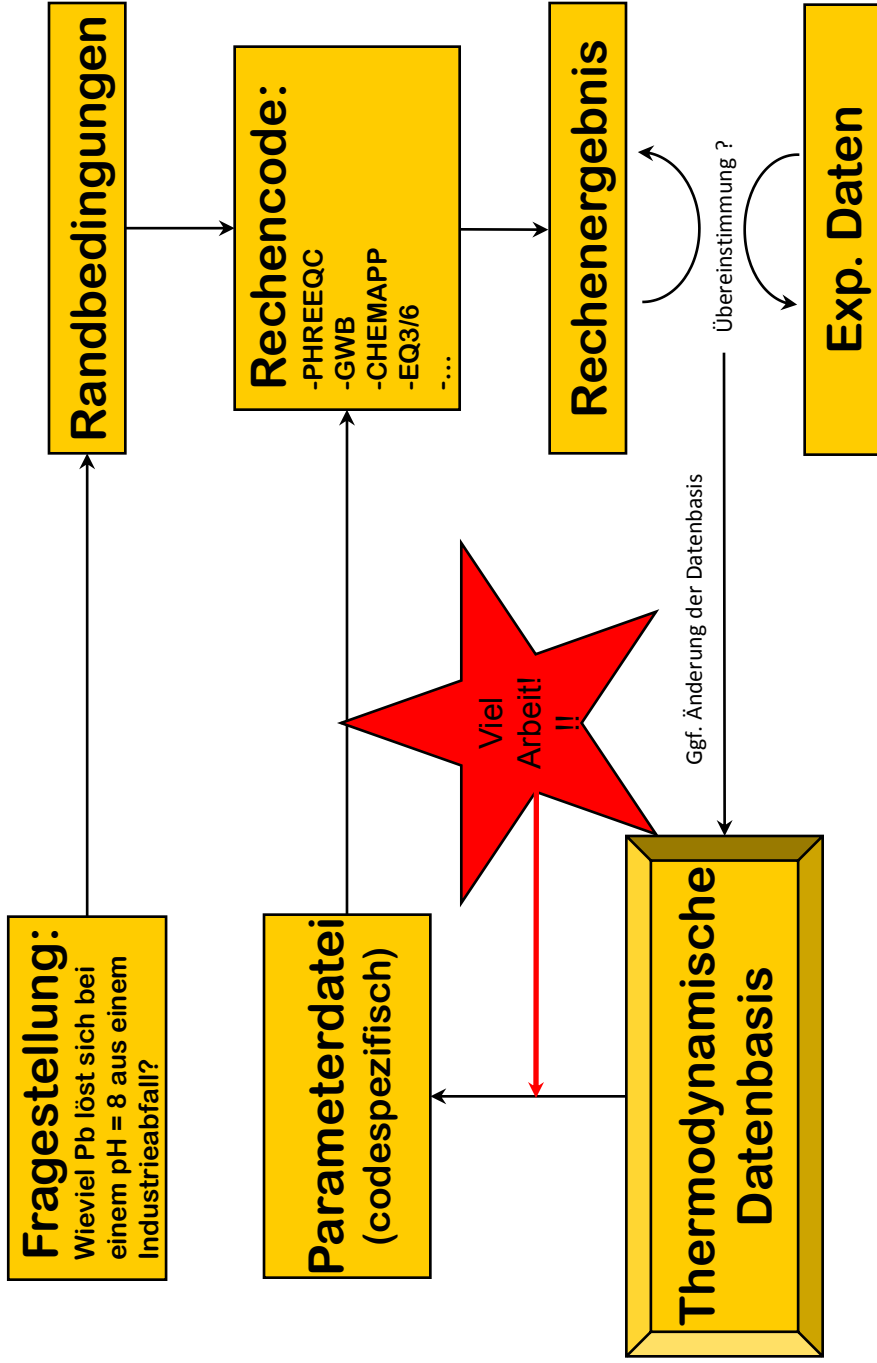
Wofür brauchen wir thermodynamische Gleichgewichtsmodellierung?



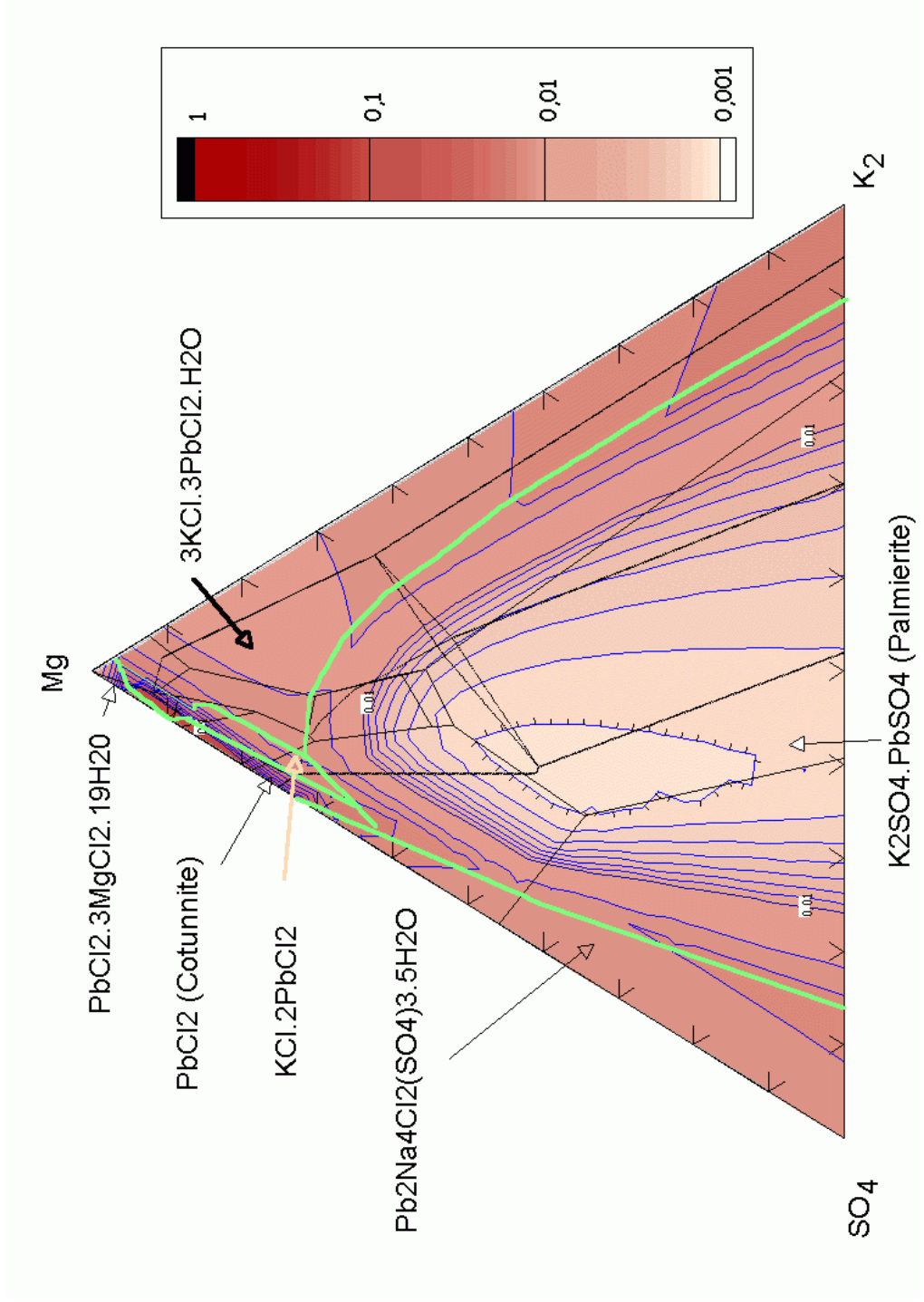
Was verstehen wir unter „chemischen Prozessen“?



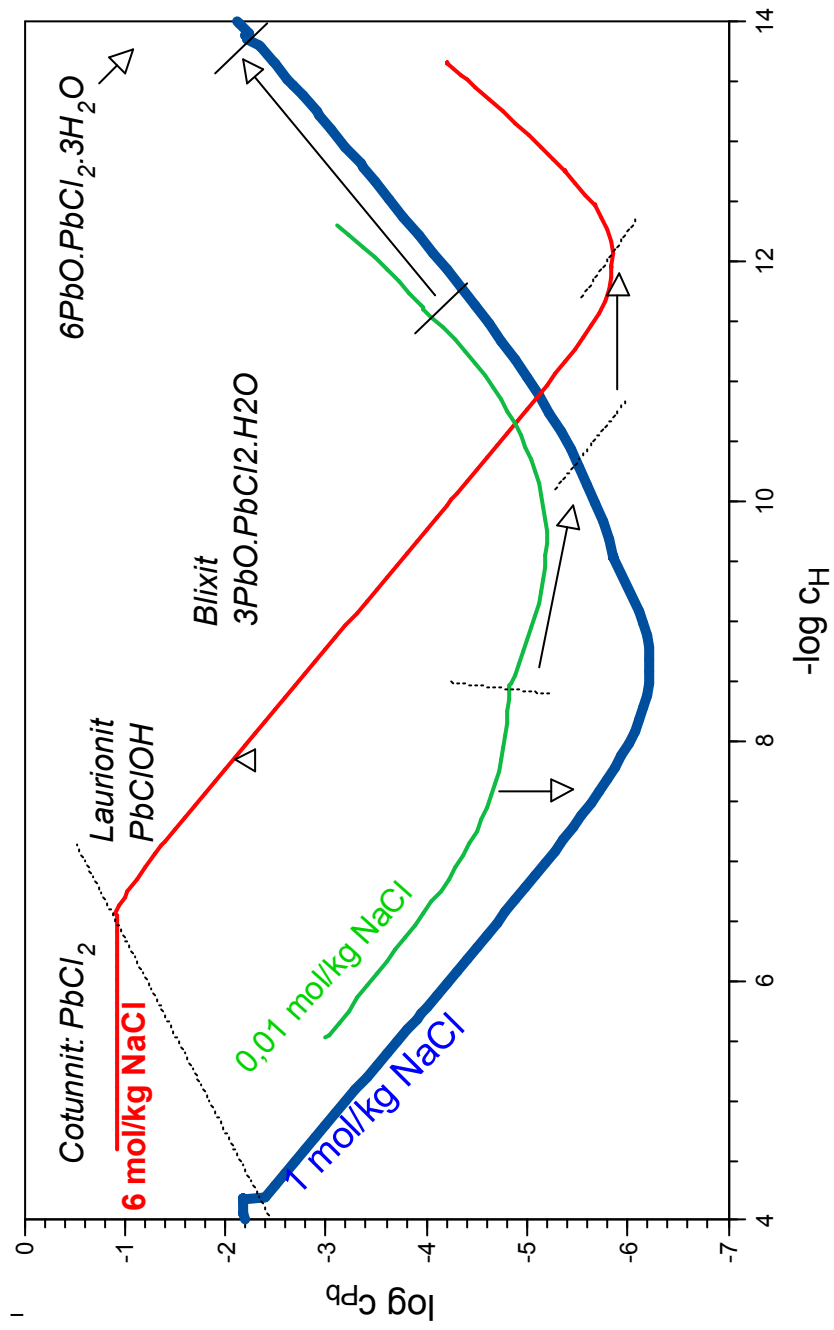
Was brauchen wir, um eine thermodynamische Gleichgewichtsmodellierung durchführen zu können?



Blei-Löslichkeit in gesättigten Lösungen des Systems Na-K-Mg-Cl-SO₄-H₂O (stets NaCl-gesättigt)

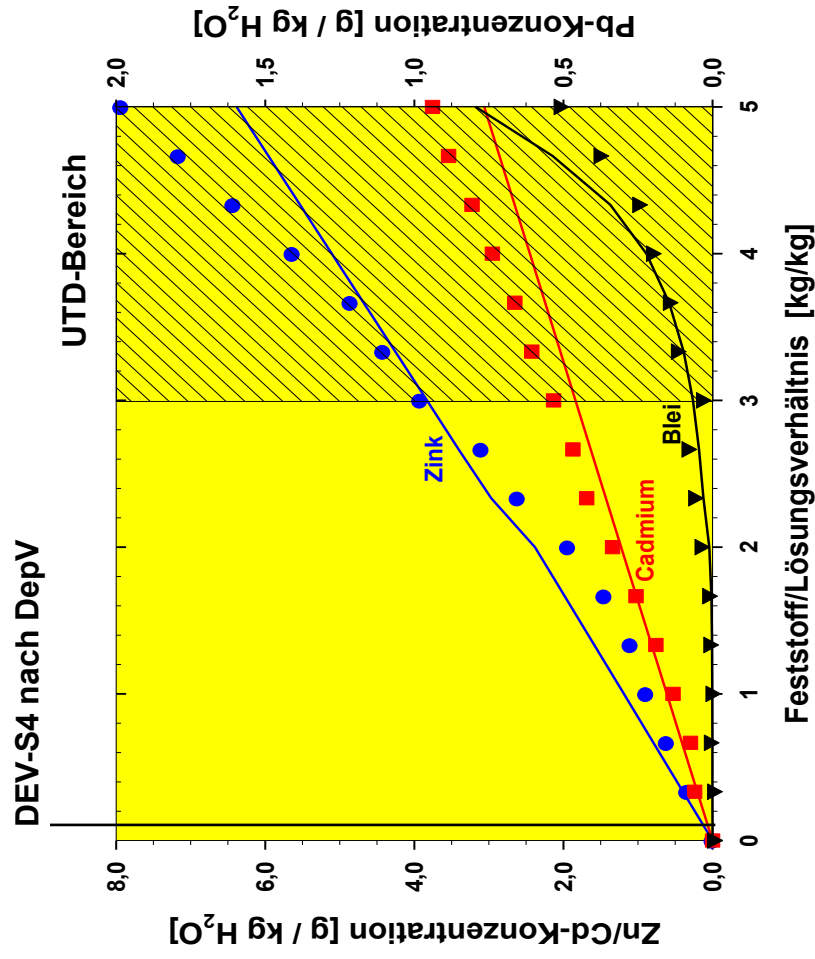


Blei-Löslichkeit in wässrigen Lösungen mit unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen

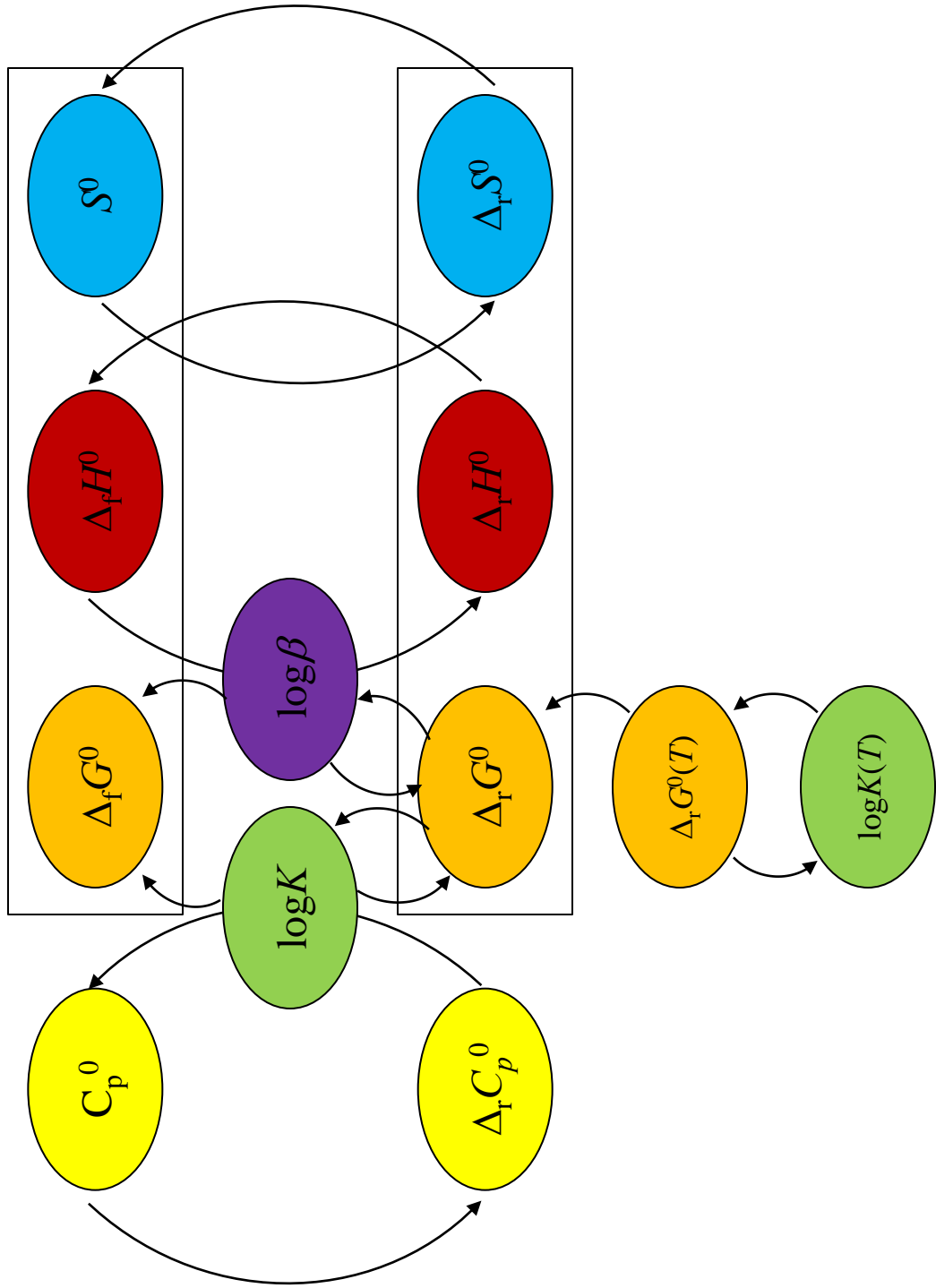


Auslaugung von Schwermetallen aus Braunkohleflugaschen

- DEV-S4 Standard Prozedur (destilliertes Wasser) führt zu falschen Ergebnissen
- Modellierung bis hin zu realistischen Feststoff-Lösungs-Verhältnissen
- Modellierung für Zn, Cd und Pb möglich in neutralem und saurem Milieu)



Was ist eine „thermodynamische Datenbank“?



Was ist eine „thermodynamische Datenbasis“?

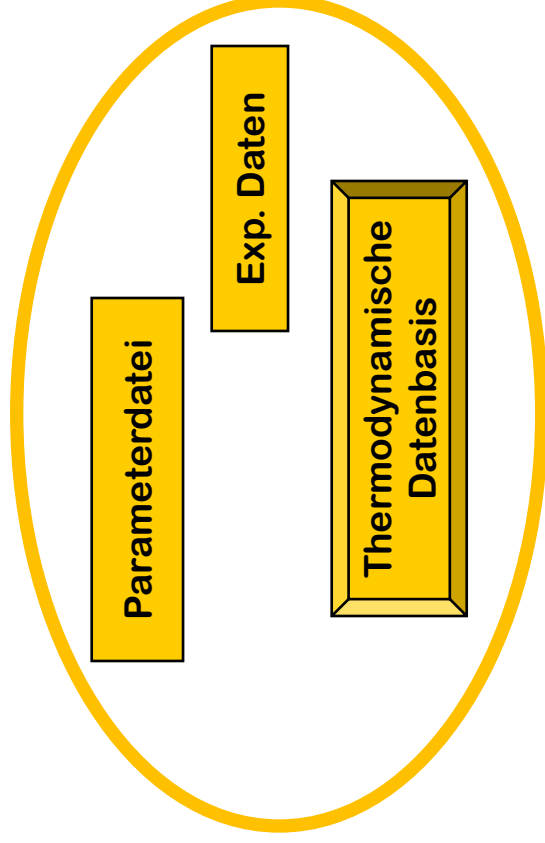
Eine Datenbasis ist ein computer-gestützter Speicher, in dem abhängige und unabhängige Daten so abgelegt werden, dass die interne Konsistenz gewahrt bleibt, wenn unabhängige Daten geändert werden.

Weitergehende Anforderungen

- Rückverfolgbarkeit
- Öffentliche Verfügbarkeit
 - Einzeldaten
 - Vollständige Parameterdateien für die wichtigsten geochemischen Codes
- Langfristige Verfügbarkeit
- Umfassender Datenbestand
- Zuordnung von Qualitätskriterien
- Spezifisch für Deutschland
 - Wechselwirkungsparameter für hochsalinare Lösungen
 - Konsistenz thermodynamischer Daten mit diesen Wechselwirkungsparametern

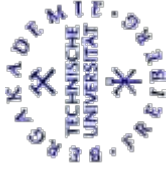
Unser Weg in die Zukunft der thermodynamischen Gleichgewichtsmodellierung

- Schaffung einer einheitlichen, qualitätsgesicherten Datenbank für thermodynamische Daten
- Bündelung von Kompetenzen
- Leichte Verfügbarkeit über das Internet



Unser Weg in die Zukunft der thermodynamischen Gleichgewichtsmodellierung

- Schaffung einer einheitlichen, qualitätsgesicherten Datenbank für thermodynamische Daten
- Bündelung von Kompetenzen
- Leichte Verfügbarkeit über das Internet



THEREDA

HZDR

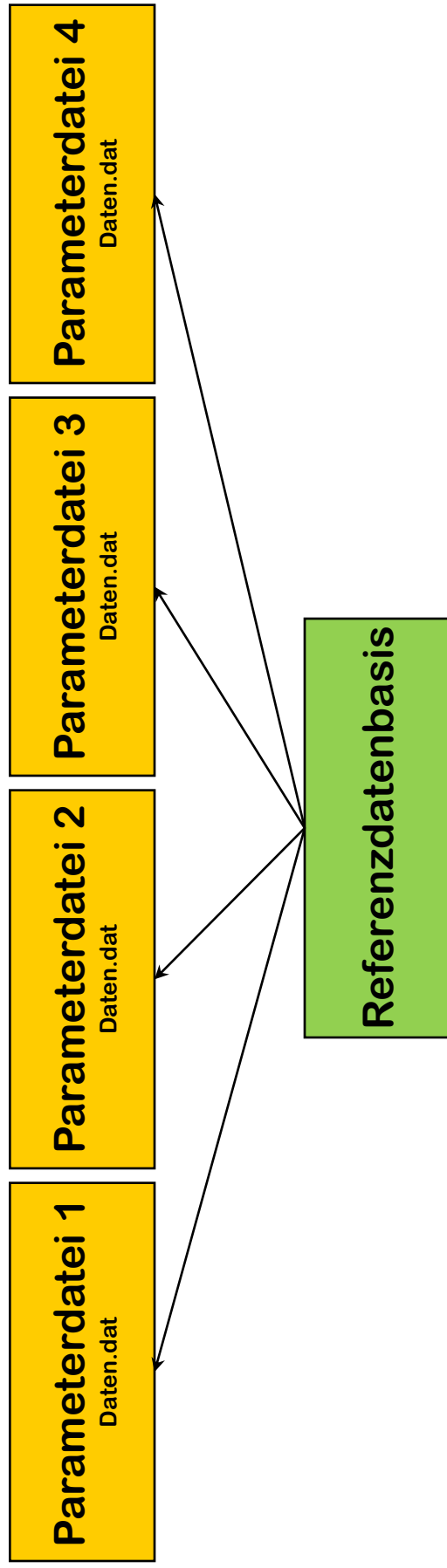
GRS

Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH



Grundidee

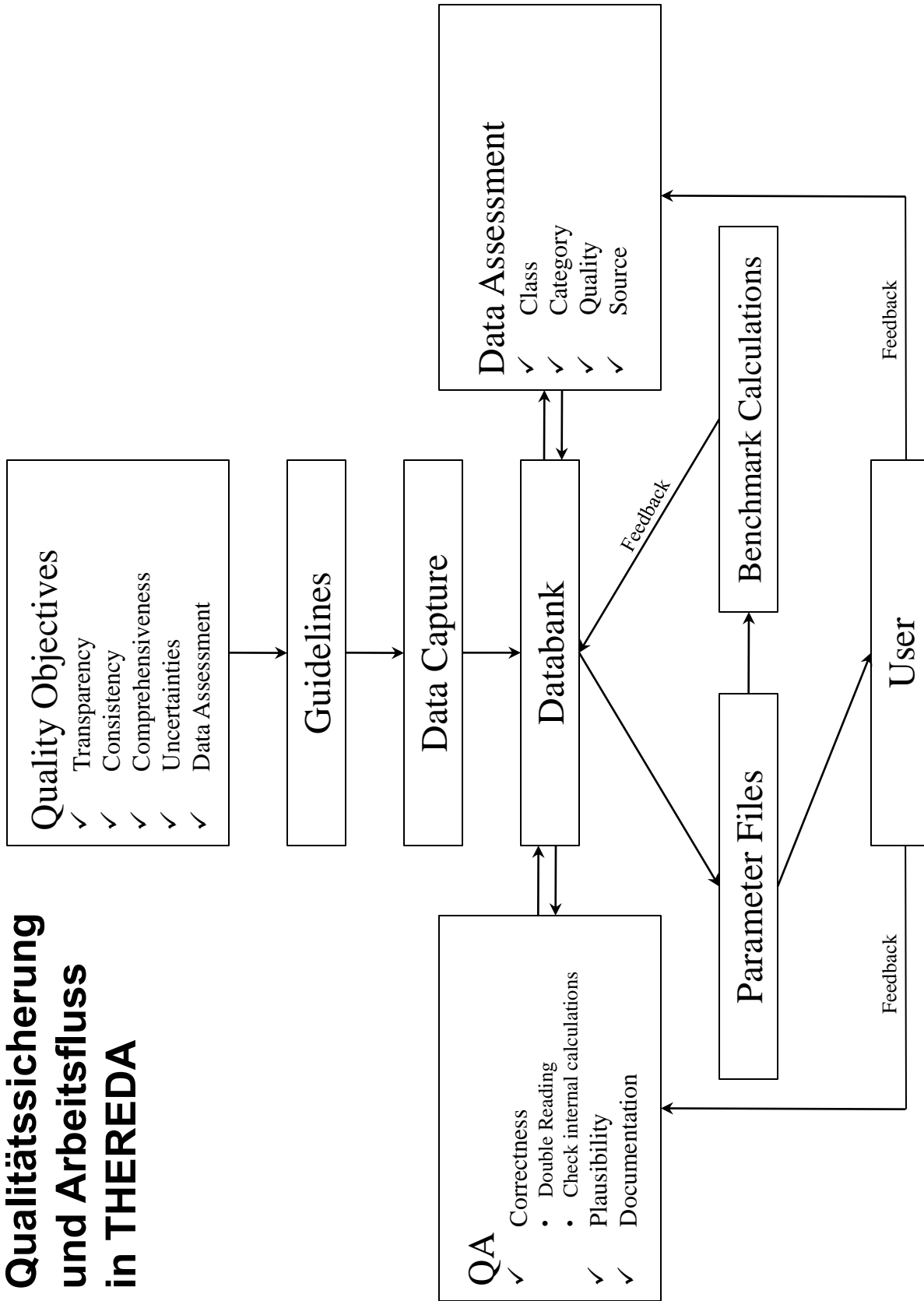
Geochemische Rechnungen unterschiedlicher Institutionen werden dadurch vergleichbar, dass Parameterdateien aus einer gemeinsam erstellten Referenzdatenbasis generiert werden.



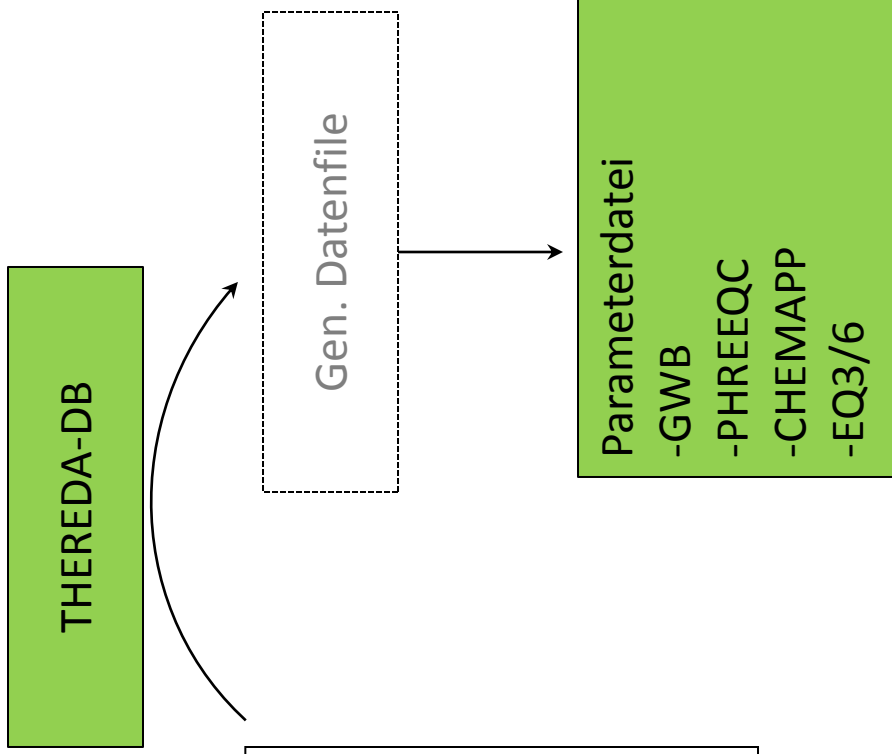
Weitere Projektdaten

- Projektlaufzeit Phase I: 2006-07 bis 2010-03
- Projektlaufzeit Phase II: 2009-10 bis 2013-03
- Finanziert durch drei Ministerien: BMWi , BMBF (bis 31.12.2011), und BMU/BfS

Qualitätssicherung und Arbeitsfluss in THEREDA



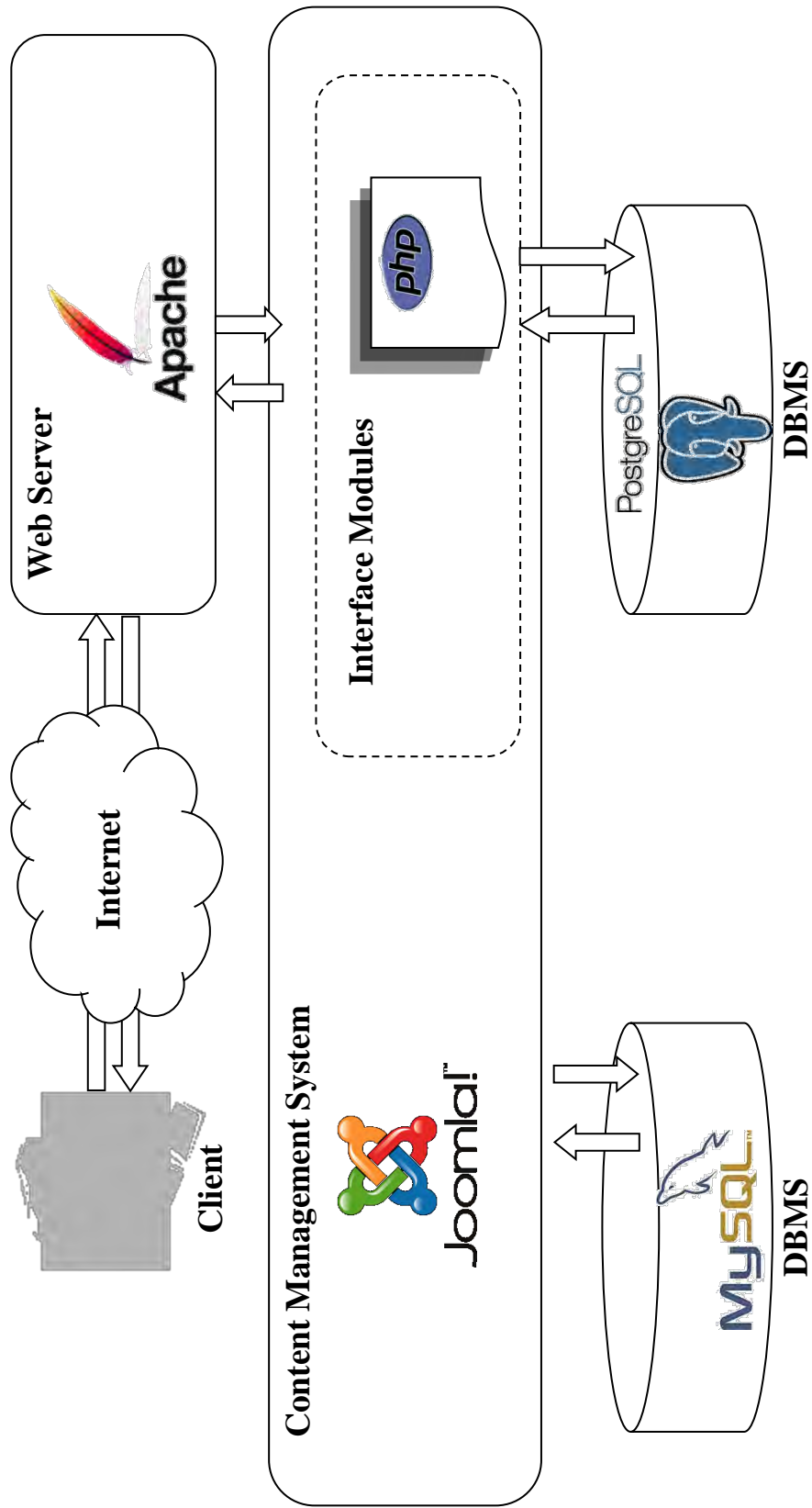
Verwendung durch den Anwender



Der Nutzer spezifiziert:

- Elemente
- Wechselwirkungsmodell
- Verwendetes Programm für die thermodynamische Gleichgewichtsmodellierung

Technische Grundlagen



Zugriff über das Internet www.thereda.de



Zugriff über das Internet

- Spezies nach Phasenzugehörigkeit und Oxidationszahl des Zentralelements

Thermodynamische Daten der reinen Elemente
 Mit [Show Data] Anzeige von Detailtabellen

SINGLE DATA QUERY

Temperature: Standard 298.15 K, Interactions model: PITZER

Element-specific data:

Name: Uranium (U)
 Atomic Number: 92
 Molar mass: 238.02891 g/mol
 Energy: 50.3 ± 0.3 J/(moleU)
 Heat capacity: 27.65 ± 0.05 J/(moleU)

There are 9 species with datasets available for your selection.

[Back](#) [Show data](#)

<input type="checkbox"/> gas (G)	<input type="checkbox"/> liquid (L)	<input type="checkbox"/> solid (S)	Species	Phase	Oxidation number	Number of datasets
<input checked="" type="checkbox"/>			CaUO2(2)S(0)O4(2)S(0)O(2)	Uranate(aq)	6	6
<input checked="" type="checkbox"/>			Ca2(UO2)2S(0)O4(2)S(0)O(2)	Compegnacite	6	6
<input checked="" type="checkbox"/>			Ca2(UO2)2S(0)O4(2)S(0)O(2)	Bullseyeite	6	6
<input checked="" type="checkbox"/>			Ca2(UO2)2S(0)O4(2)S(0)O(2)	Ala-Hewesite	6	6
<input checked="" type="checkbox"/>			UO2(UO2)4S(0)O(2)	UUP(0)U2 4H2O(m)	6	6
<input checked="" type="checkbox"/>			UO2(UO2)4S(0)O(2)4H2O(m)	UO2(UO2)4H2O(m)	7	7
<input checked="" type="checkbox"/>			UO2(UO2)4S(0)O(2)3H2O(m)	UO2(UO2)3H2O(m)	7	7
<input checked="" type="checkbox"/>			UO2(UO2)3S(0)O(2)	Schoepite	6	6
<input checked="" type="checkbox"/>			UO2(UO2)3S(0)O(2)	UO2(UO2)3H2O(m)	6	6

[Show data](#) [Back](#)

Derzeitiger Umfang (Auszug)

- Umfang
- 196 Phasen
 - 312 aq. Spezies (davon 34 Primary Master)
 - 336 Bildungsreaktionen
 - 789 Standard Datensätze (Pitzer)
 - 717 Wechselwirkungen (Pitzer und SIT)

Bisherige Datenfreigaben

- System der ozeanischen Salze (für einige Subsysteme bis 300°C)
- Am, Cm, Nd

Aktivitäten in naher Zukunft

- Freigabe für System Na, K, Ca – Cl, SO₄ – CO₂(g), HCO₃ – H₂O (25°C) (TUBAF)
- Freigabe der Daten für Np und Pu (KIT-INE)
- Freigabe der Daten für U(+IV, +VI) (HZDR-IRC)
- Freigabe der Daten für Cs und Phosphat (GRS)

Langfristige Nutzbarkeit

- Nutzung quelloffener Programme
- Geringer Abstraktionsgrad des Datenmodells
- Dokumentation der Datenbankstruktur
- Flexible Datenbankstruktur
- Verbund aus fünf Forschungsinstitutionen



Zusammenfassung

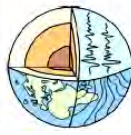
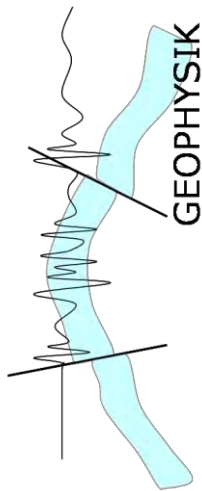
- Mit THEREDA steht eine webbasierte, den Stand von Wissenschaft und Technik repräsentierende thermodynamische Referenzdatenbank für die Belange der Endlagerung nuklearer und chemotoxischer Abfälle in Deutschland zur Verfügung. Geringer Abstraktionsgrad des Datenmodells
- Bündelung von Kompetenzen
- Umfassender Datenbestand
- Codespezifische Parameterdateien verfügbar
- Instrument zur Forschungssteuerung und Qualitätssicherung für Behörden, Dienstleister und Forschungsinstitutionen
- Zukünftige Erweiterungen der thermodynamischen Datenbasis im Verbund mit THEREDA

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Geophysikalische Erkundung und Charakterisierung für UTD

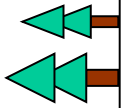
Dr. Just, A. et al.

Universität Leipzig



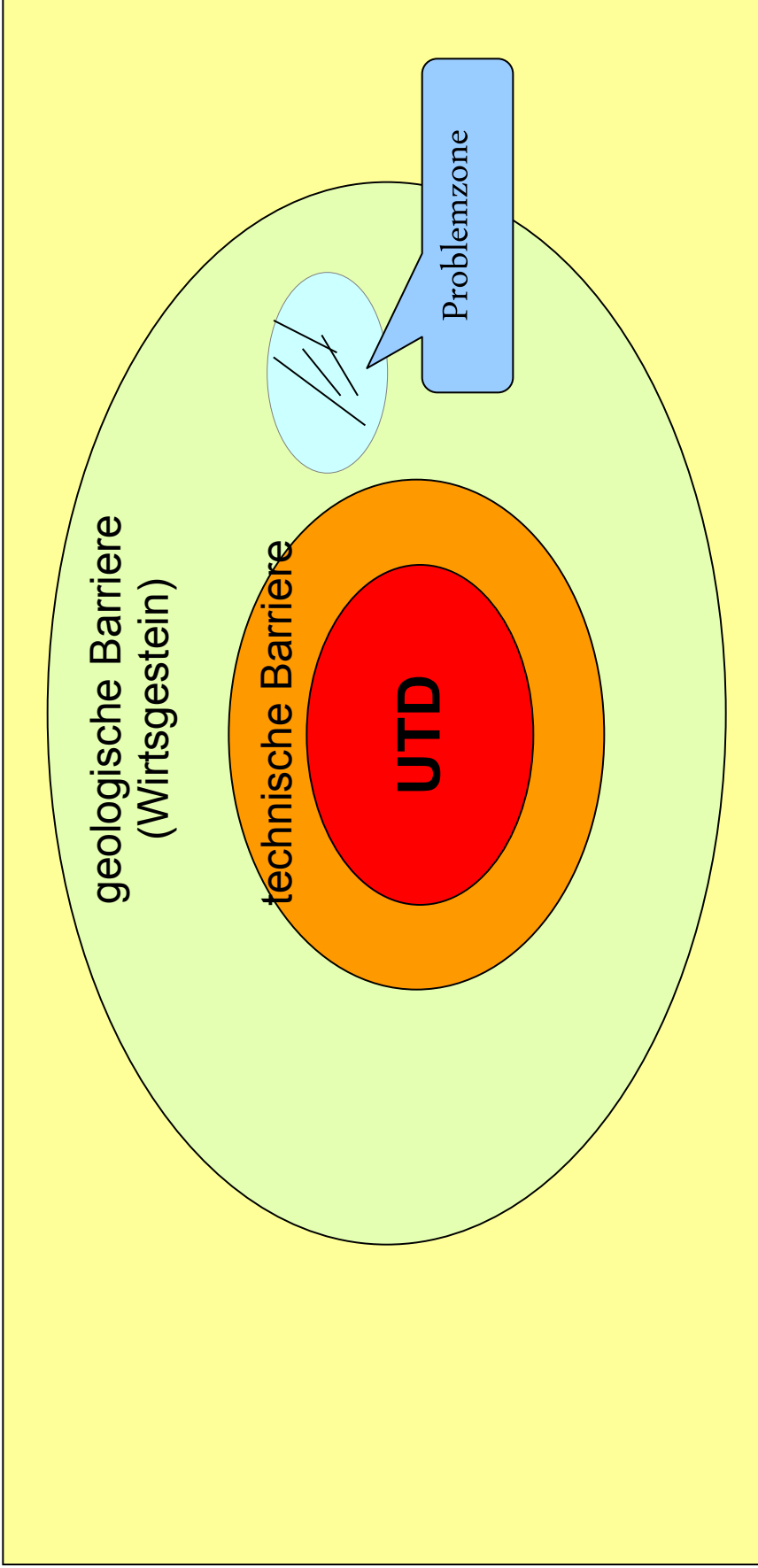
Geophysikalische Erkundung und Charakterisierung für UTD

A. Just, C. Schütze* (Universität Leipzig)
T. Schicht (K-UTEC Sondershausen)

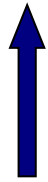


Problemfeld Untertagedeponie (UTD)

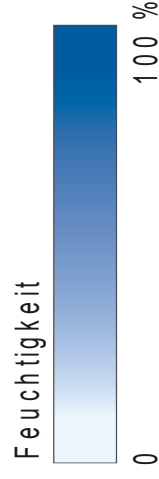
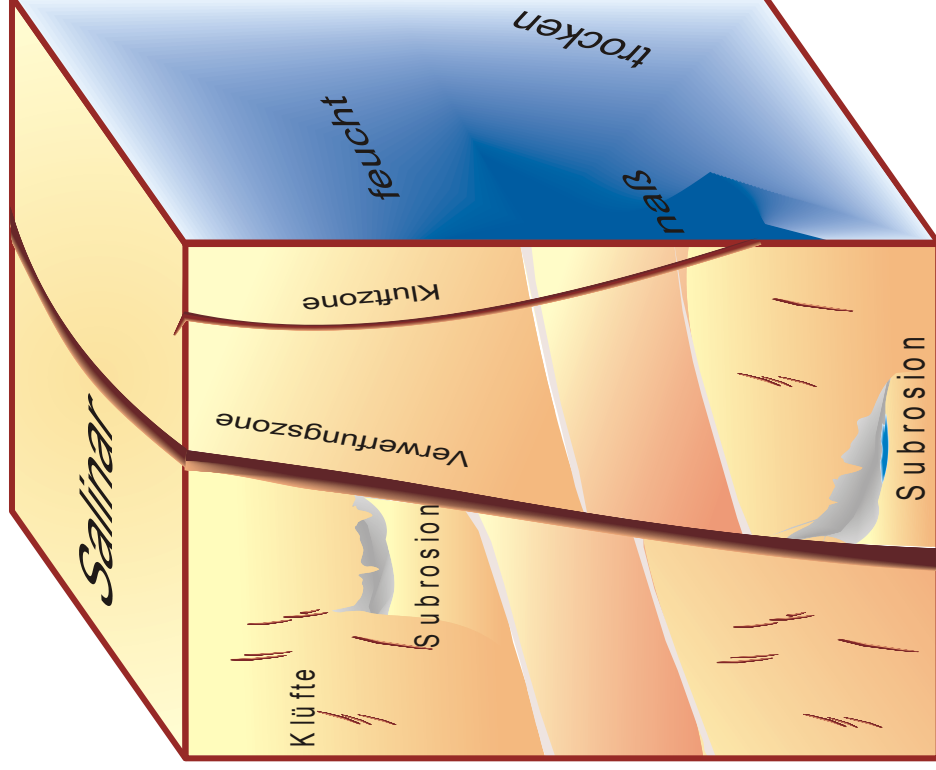
Erdoberfläche



Zwingend erforderlich: zerstörungsfreie Erkundung und Charakterisierung der geologischen Barriere



Problemzonen im Salinar



- Tektonische Störungszonen
- Lithologisch vorgeprägte Schwächezonen
- Kluftzonen
- Laugentaschen
- Feuchtezonen mit Salzlösungsvorkommen
- Schichtgrenzen
- Bergbaulich bedingte Auflockerungszonen

Aufgaben der Geophysik

- Erkundung, Charakterisierung und Überwachung -

Übersichts- und Standorterkundung

Abgrenzung Salzstock,
grobe geologische
Strukturen:
Seismik,
Gravimetrie,
Aero-EM

Betriebsicherheit und Barriereintegrität

Langzeitsicherheit und Barriereintegrität

Vor und während Auffahrung und Betriebsphase:

- Schichtgrenzen: *Radar, Seismik, Bohrloch-Radar, EM*
- Feuchtezonen mit Salzlösungsvorkommen: *Geoelektrik, TDR*
- Auflockerungszonen: *Sonar, Radar, Geoelektrik*
- Spannungszustände im Gebirge: *Passive Seismik*

Überwachung der Barriereintegrität:

- Spannungszustände im Gebirge: *Passive Seismik*
- Lösungswege/ Lösungszutritte: *Geoelektrik, TDR*

vor

**während
der Betriebsphase**

nach

Rückblick: (Untertägige) Geophysik im Salzbergbau

Klassische Aufgaben und Anwendung

- Lagerstättenabgrenzung, Erkundung Kalilager
 - Gravimetrie, Seismik
- Vorfelderkundung
 - Seismik, Radar
- Auffinden von Gas oder Lauge in Abbaubereichen
 - Seismik, Geoelektrik, Radar
- seismisch-seismoakustische Gebirgsüberwachung

Probleme (im Vergleich zur obertägigen Geophysik)

- Richtungszuordnung von Anomalien im Vollraum
- Messanordnungen sind auf den Verlauf von Strecken oder Bohrungen beschränkt
- Schwierige Umgebungsbedingungen
- große Parameterkontraste im Salinalgestein

(Stand zu Beginn des Förderschwerpunktes 1991)

Geophysik zur Erkundung und Charakterisierung für UTD

Ziele der Projektförderung im Schwerpunkt “Untertägige Ablagerung”

Anpassung, Verbesserung und Optimierung der geophysikalischen Verfahren für die Erkundung und Charakterisierung

→ Entwicklung, Verbesserung und Optimierung von Einzelverfahren, z.B.

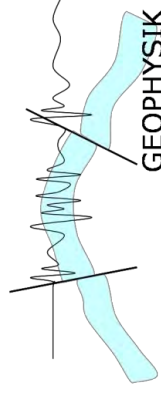
- Radar
 - EM
 - Geoelektrik
 - Seismik
 - Sonar
- } Verbundprojekt „Salinargeophysik“
- richtungsabhängiges Bohrlochradar (BGR, DMT, Uni Wuppertal)
 - Nahbereichssonar (Fraunhofer IZFP)
 - TDR-Verfahren (MFPA Weimar)

→ Optimierung durch kombinierte Anwendung mehrerer Verfahren

- Test an Referenzstandorten in Salzbergwerken

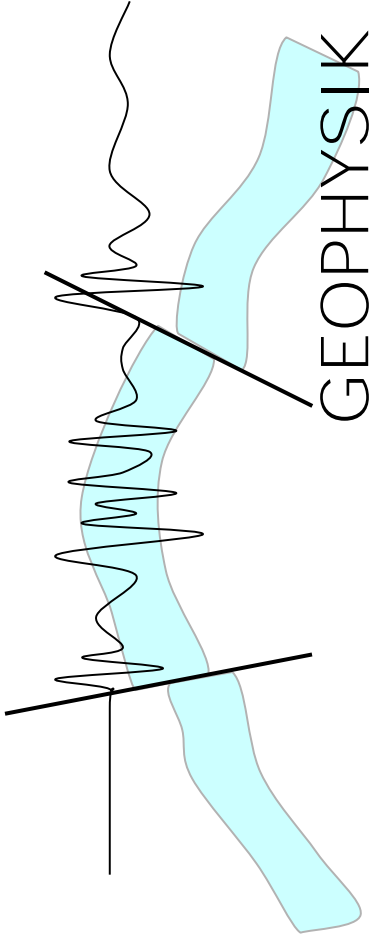
} Verbundprojekt „Salinargeophysik“

S A L I N R



BMBF-Verbund-Projekt SALINARGEOPHYSIK (1998-2008)

SALINAR



Forschungsvorhaben

02C0558, 02C0568, 02C0578 (1998-2001)
02C0558, 02C0568, 02C0578 (2001-2003)
02C1305, 02C1315, 02C1325 (2005-2008)



Projektträger
Forschungszentrum
Karlsruhe (PTKA)



AS



K-UTECH
SONDERSHAUSEN

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

- Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) Hannover
- Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Dresden
- K-UTECH AG, Sondershausen
- Büro Dr. Schwandt, Erfurt

Projektphasen - Referenzstandorte

SALINAR I: 1998 – 2001

- ehemaliges Kali-Bergwerk Südharz
- flache Lagerung
- Problemzone im Hangenden einer Abbaustrecke

SALINAR II: 2001 - 2003

- in Betrieb befindliches Bergwerk Niedersachsen
- Salzstock
- Problemzone in 50 m horizontaler Entfernung von der Strecke

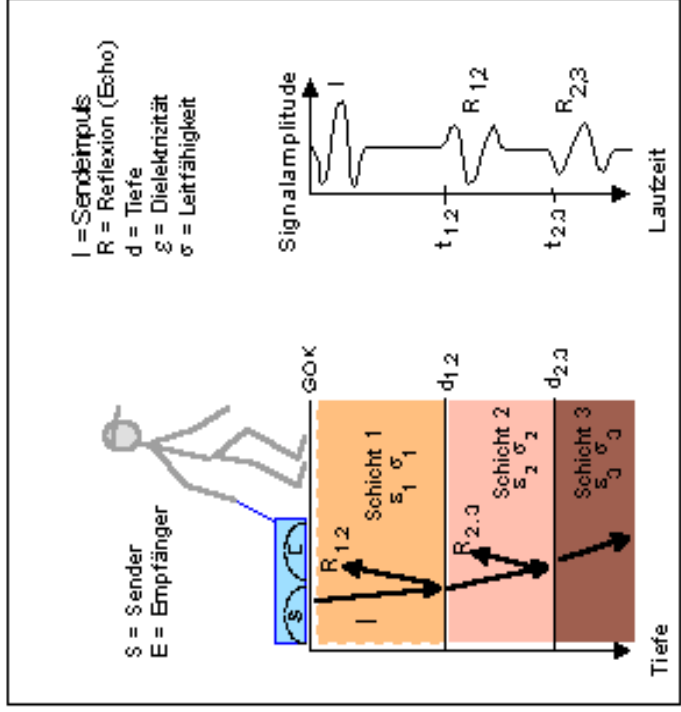
SALINAR III: 2005 - 2008

- 2 ehemalige Kali-Bergwerke Sachsen-Anhalt
- beide in flacher Lagerung,
- Problemzonen im Liegenden



Prinzip GEORADAR (Ground Penetrating Radar - GPR)

Reflexion elektromagnetischer Wellen
 Frequenzbereich: 25 MHz - 1,5 GHz



Parameter
 ϵ = Dielektrizitätszahl
 σ = elektrische Leitfähigkeit

- Erkundungstiefe im trockenen Salz >100m
- Auflösung: 5 m bis 10 cm



Kalialz

Steinsalz

**Steuer-
einheit**

**Empfangs-
antenne**

Steinsalz

Anhydrit

**Weg-
messrad**

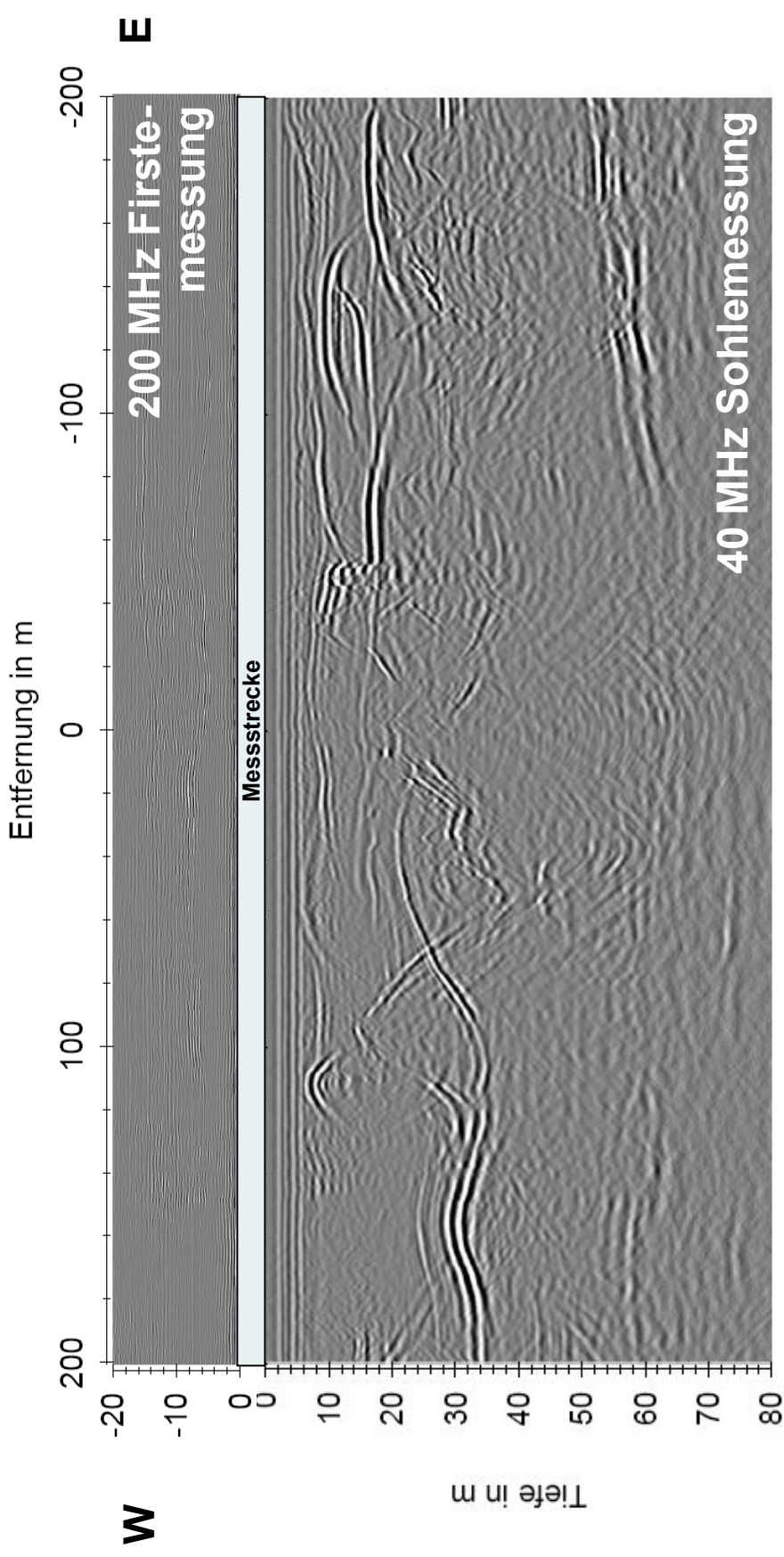
**Sende-
antenne**

Untertägige Georadarmessungen

- Reflexionen an Grenzen mit Änderung der EM-Eigenschaften
 - Im Vollraum untertage: zusätzlich gerichtete Messungen notwendig
- ↓
- Kartierungen: Sohle- und Firstmessungen
 - Rundum- und Peilmessungen
 - CMPs
 - Multioffset-Messungen
- **Neuentwicklung der BGR: Richtungssensitives Bohrlochradar**

Messbeispiel Radar:

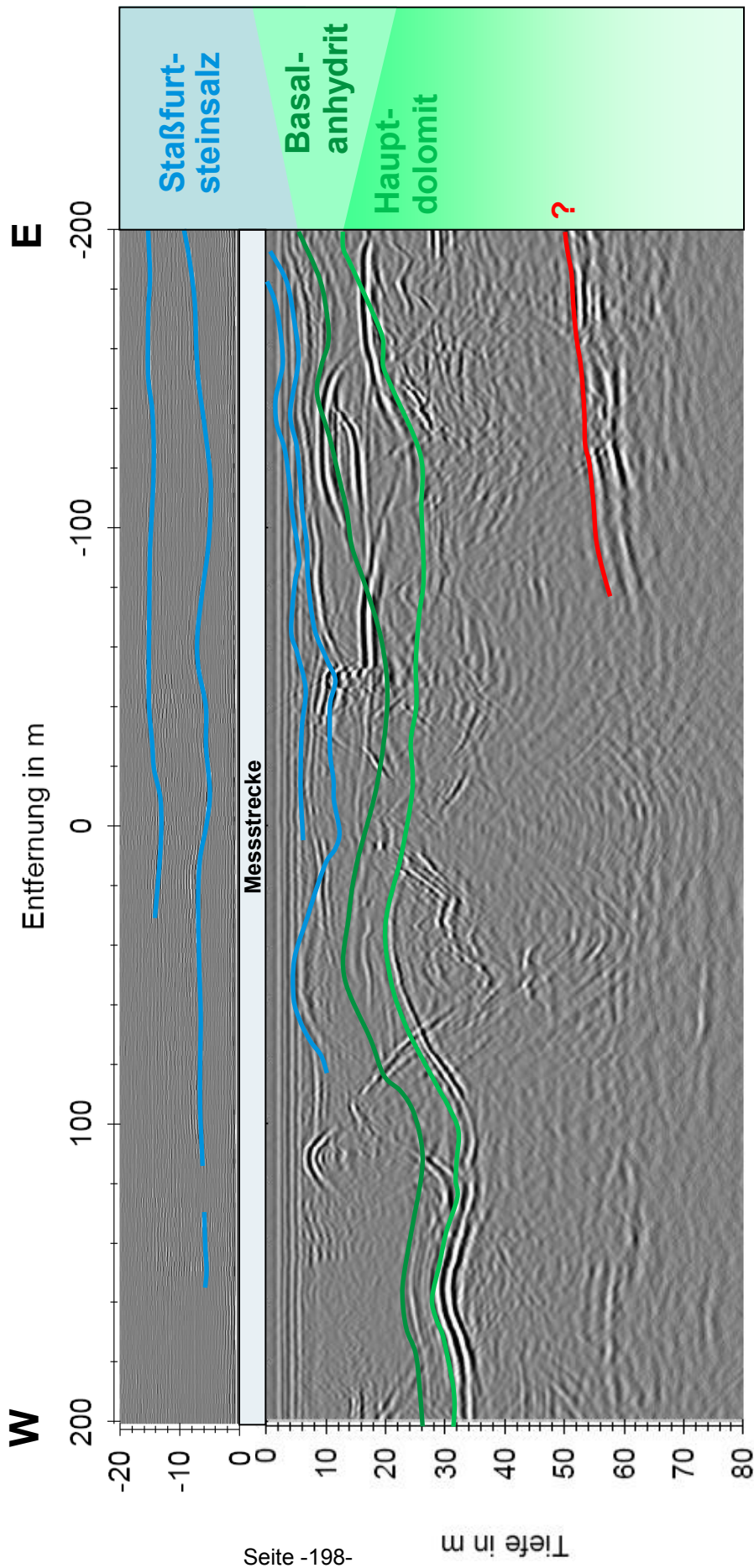
Basalanhydrit-Aufsattelung mit möglichem Salzlösungs-vorkommen im darunter liegenden Hauptdolomit



Messbeispiel Radar:

Basalanhydrit-Aufsattelung mit möglichem Salzlösungs-vorkommen im darunter liegenden Hauptdolomit

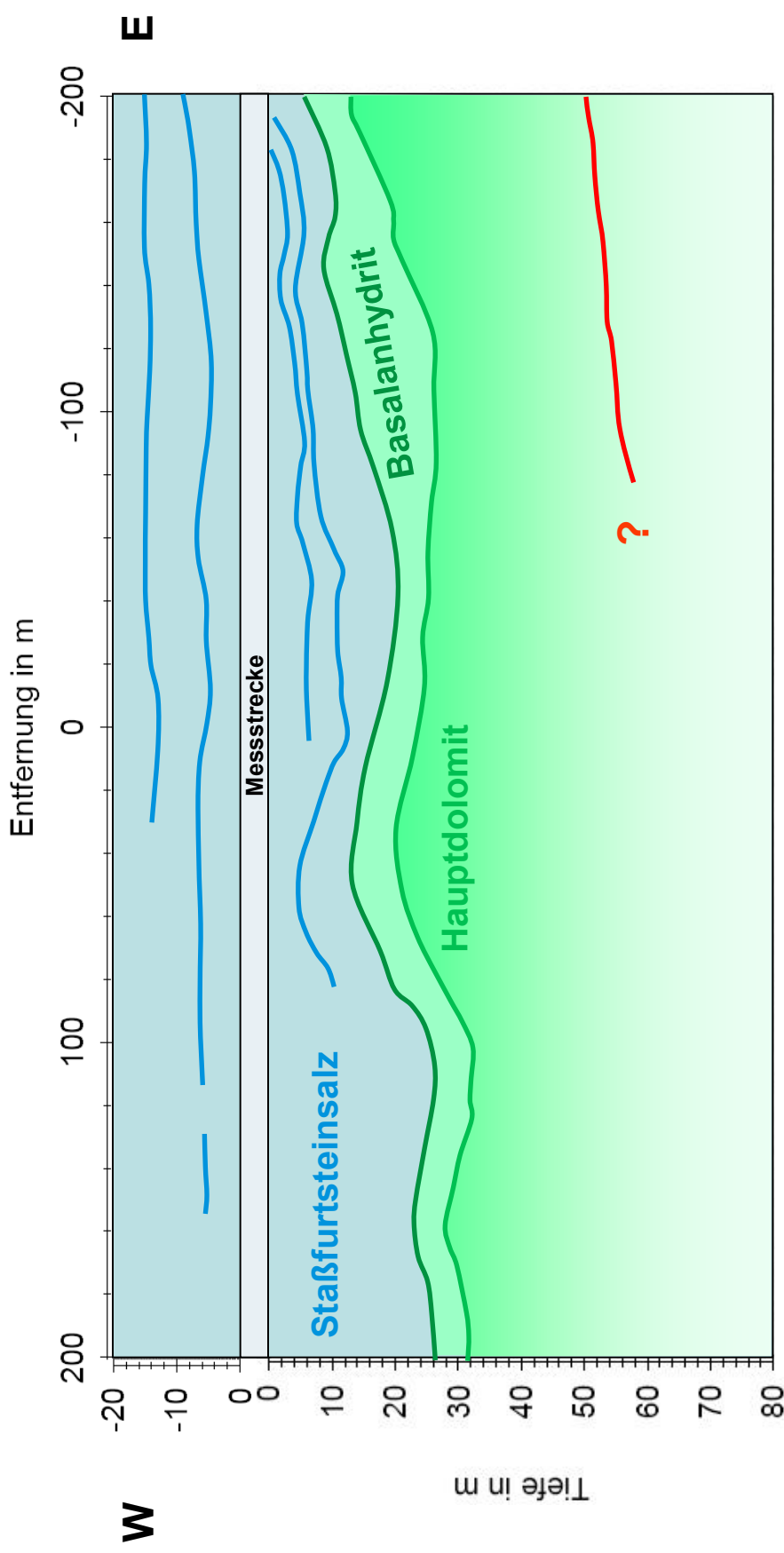
Geologisch bedingte Reflexionen



Messbeispiel Radar:

Basalanhydrit-Aufsattelung mit möglichem Salzlösungsvorkommen im darunter liegenden Hauptdolomit

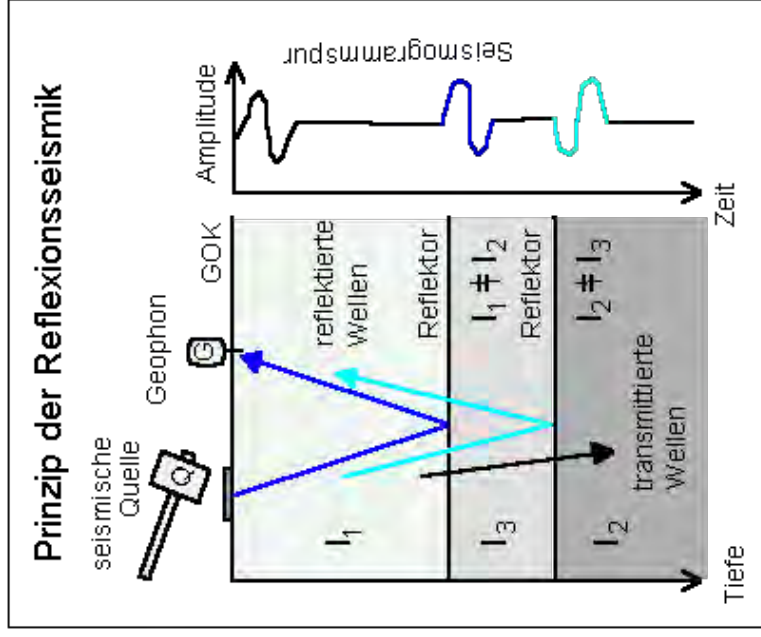
Georadar – Geologische Interpretation



Aktive Seismik

Anregung elastischer Wellen

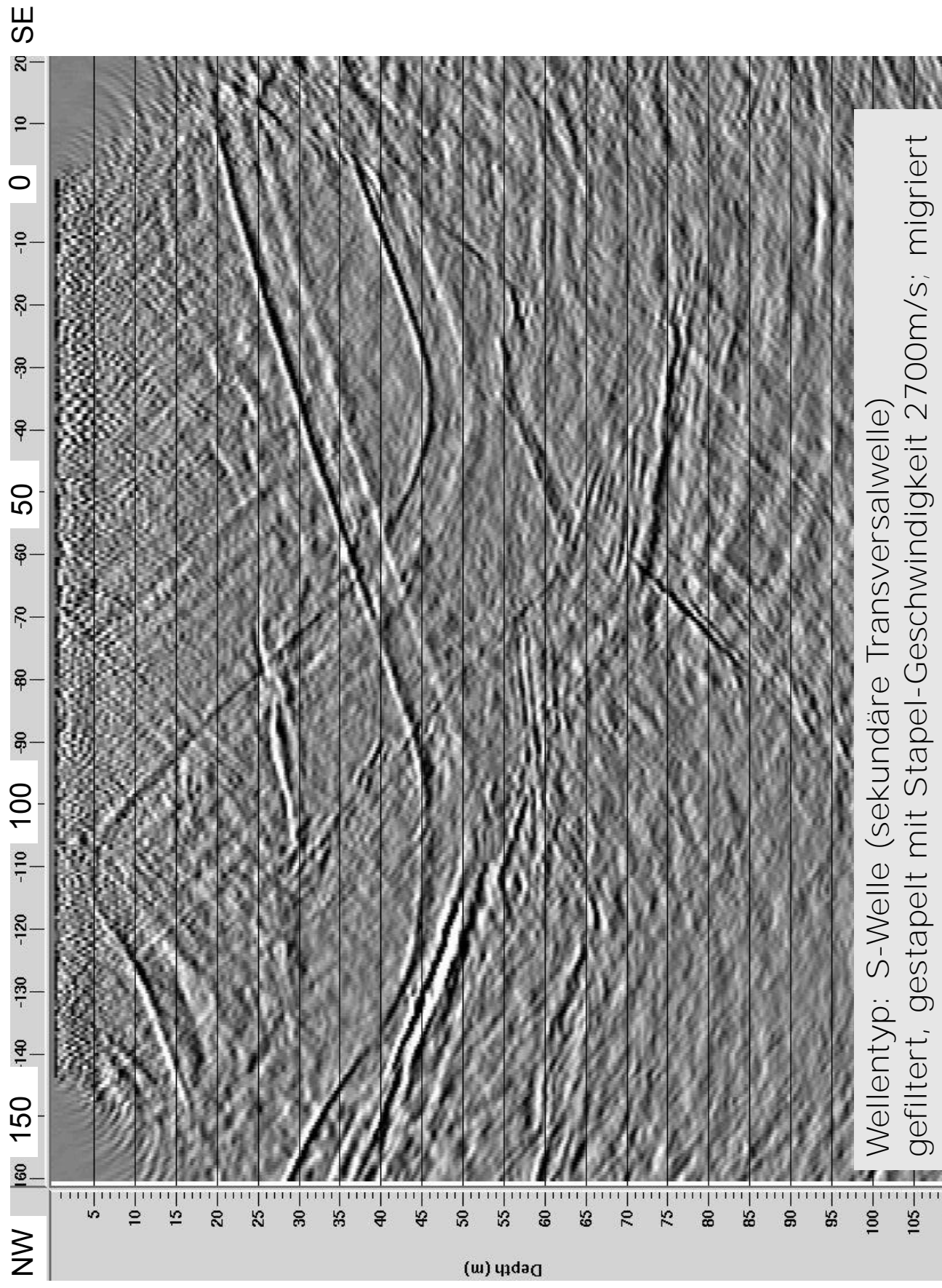
Hammerschlag: Frequenzband: 10 Hz ... einige 100 Hz

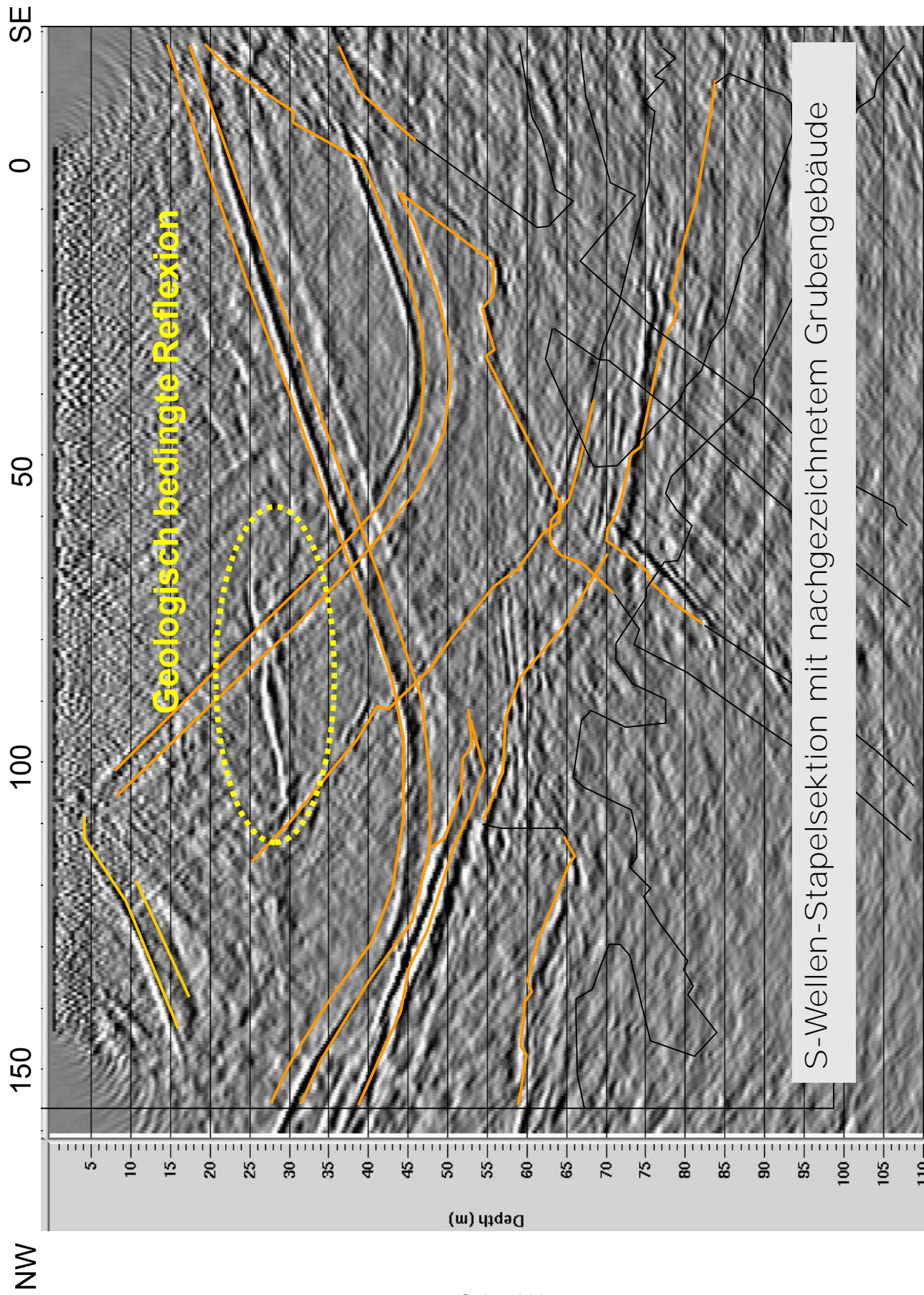


Parameter:
Geschwindigkeit elastischer Wellen,
Absorption

- Erkundungstiefe > 100m
- Auflösung im Meter-Bereich

Messbeispiel Seismik: Basalanhydrit-Aufsattelung





→ Detektion auch von kleinräumigen Strukturen in Entfernungen bis 80 m möglich!

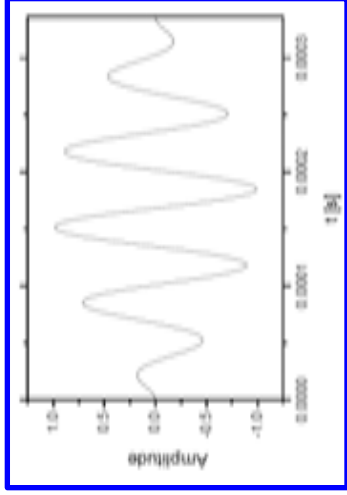
Geosonar – Niederfrequenter Ultraschall Akustische Emission

Frequenz: ca. 15 kHz

Anregungssignal:

Impuls

10 Sinus-Zyklen in
Hanning-Fenster,
 $f_c = 14,88$ kHz



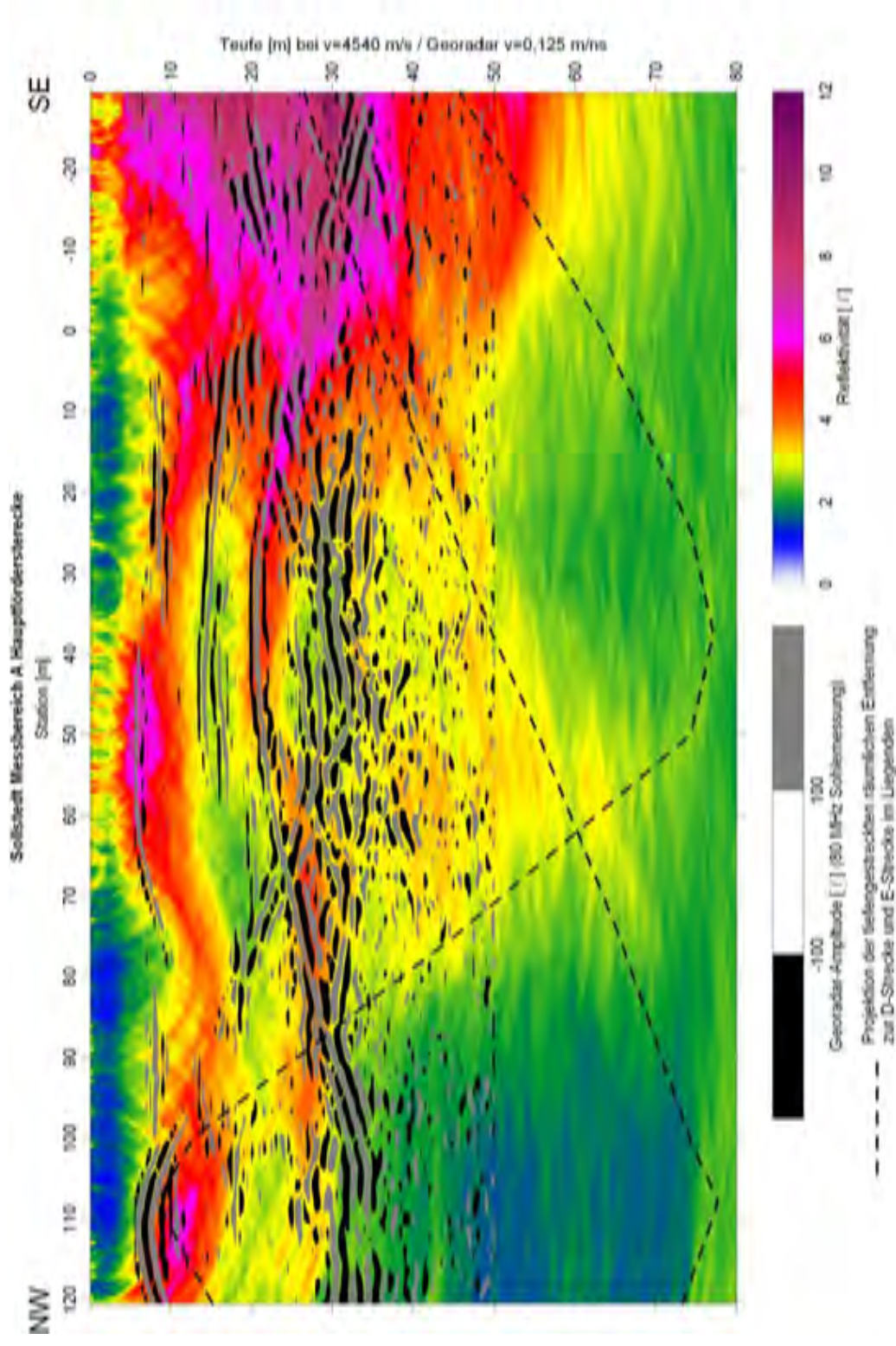
am Fraunhofer IZFP Dresden entwickelte
Aktor-Sensor-Kombinationen für Sonar-
Messungen am Stoß und in Bohrungen



Prototyp des vielkanaligen, dezentral
aufgebauten Sonar-Messsystems »AE.net«

Messbeispiel Sonar:

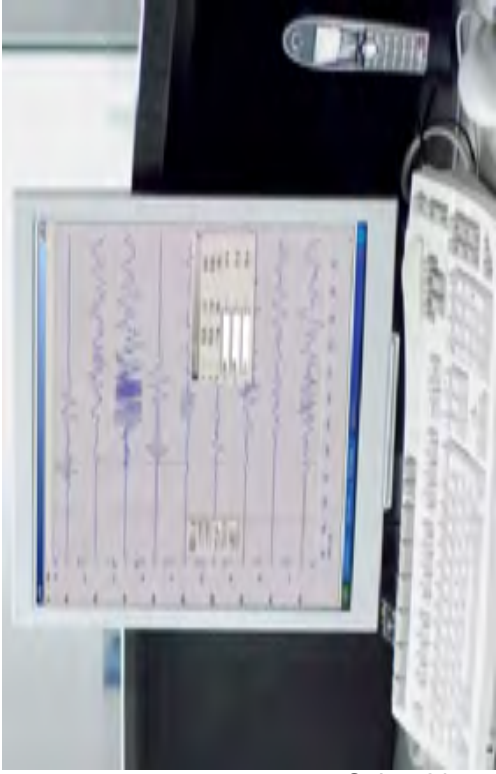
Basalanhydrit-Aufsattelung mit möglichem Salzlösungs-vorkommen im darunter liegenden Hauptdolomit



SAFT-migrierter Tiefenschnitt der Sonar-Reflektivität mit Georadarreflektoren

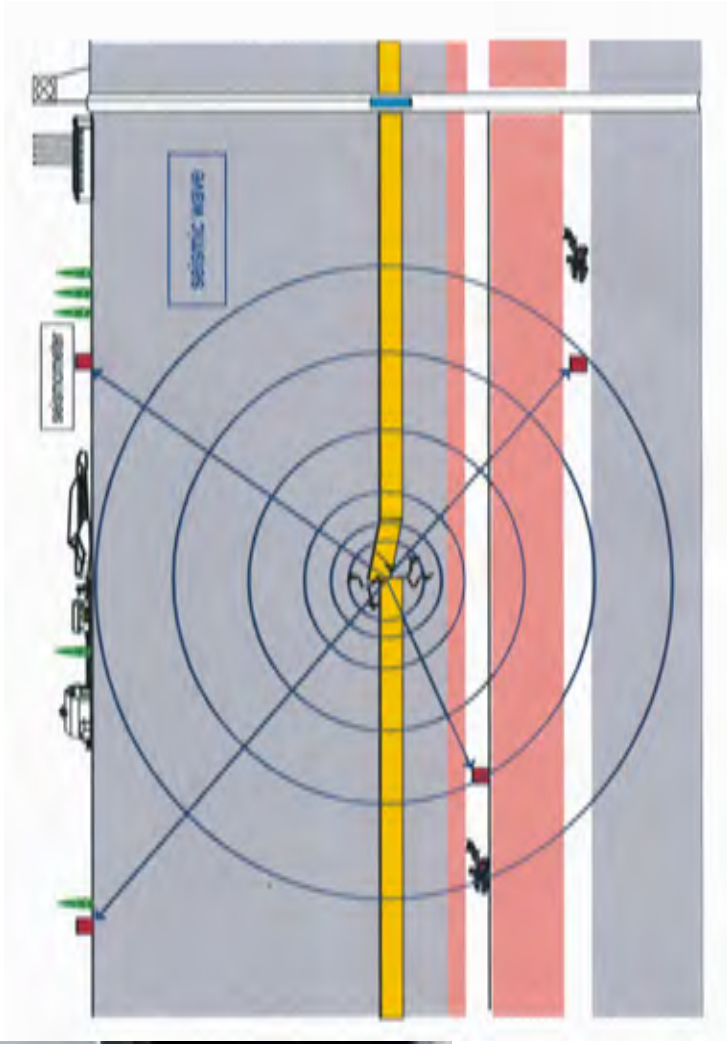
Passive Seismik (Akustische Emission)

→ Registrierung von elastischen Wellen, die durch Bruchvorgänge im Gebirge ausgelöst werden



Seite -205-

Prinzip eines seismischen Monitoringsystems



Mögliche Positionen für Seismometer:

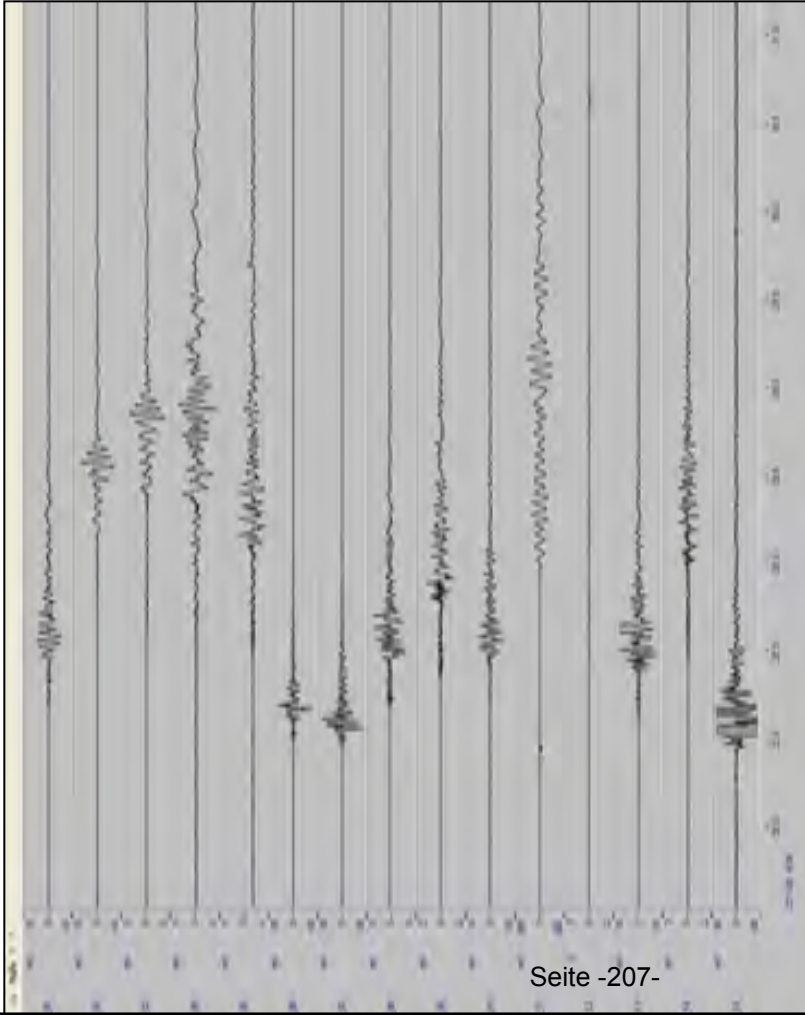
- Übertage
- Bohrloch
- innerhalb der Grube

Zur Ortung seismischer Ereignisse muss das Überwachungsgebiet durch mehrere Seismometer räumlich umschlossen werden, einschließlich verschiedener Tiefenniveaus

Seismometer im Bergwerk und an der Oberfläche



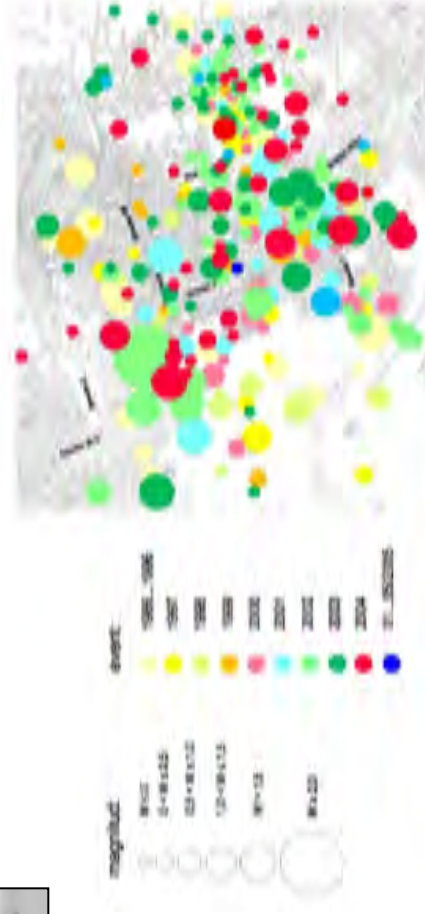
Anwendungsbeispiel Passive Seismik



Registrierbeispiel

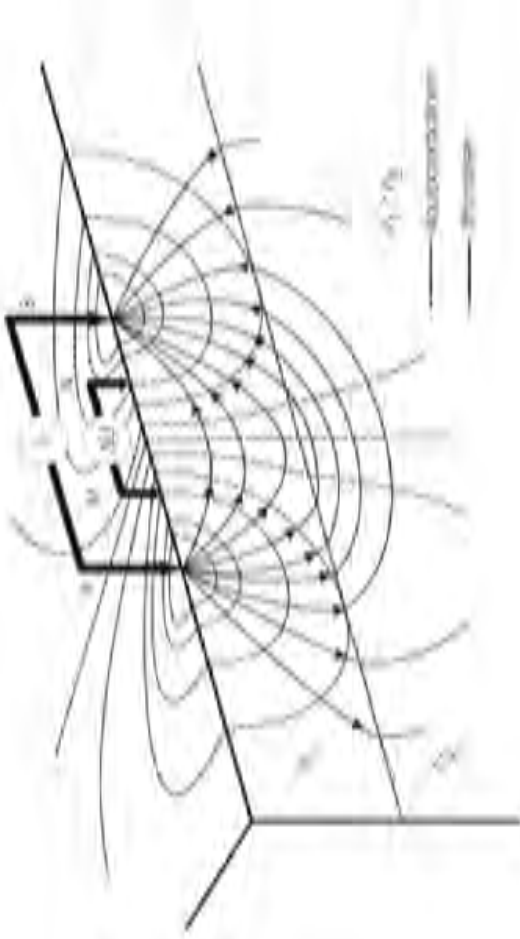


Ortung



Geoelektrik (DC)

Stromeinspeisung an der Oberfläche
Registrierung der Potentialdifferenzen



Seite -26-

Parameter:

spezifischer elektrischer Widerstand

Salz (Halit, trocken): $10^{13} \Omega\text{m}$
gesättigte Salzlösung: $5 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$



geringer Widerstand ↔

Feuchtezonen

hoher Widerstand ↔

geringe Wassersättigung, Poren
und Klüfte gasgefüllt

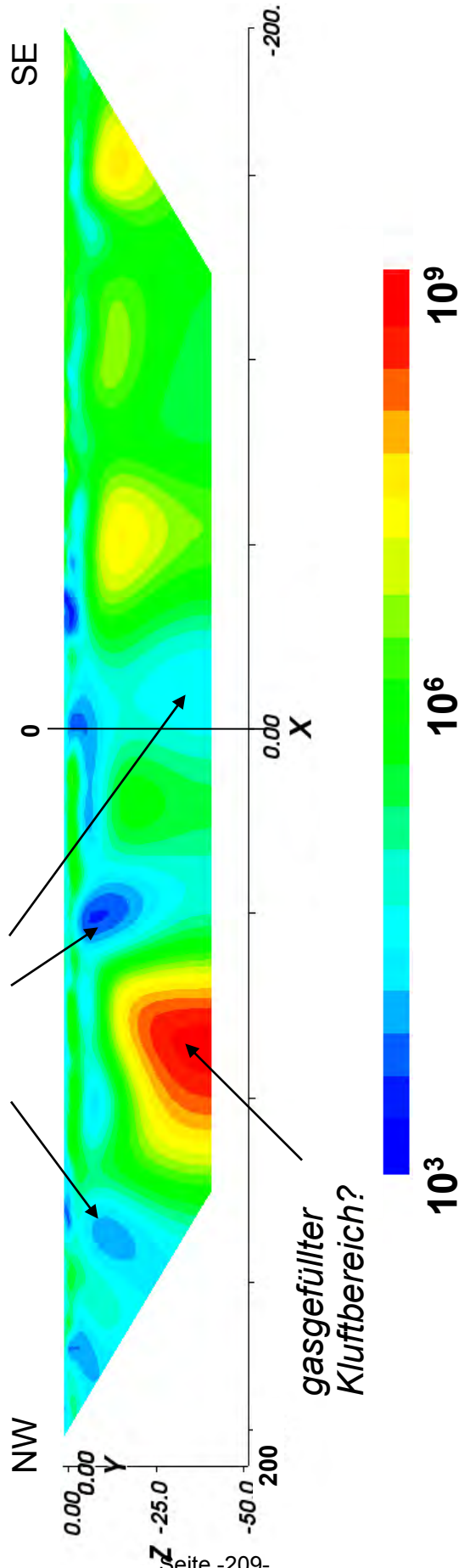
Erkundungstiefe untertage: 30-50 m



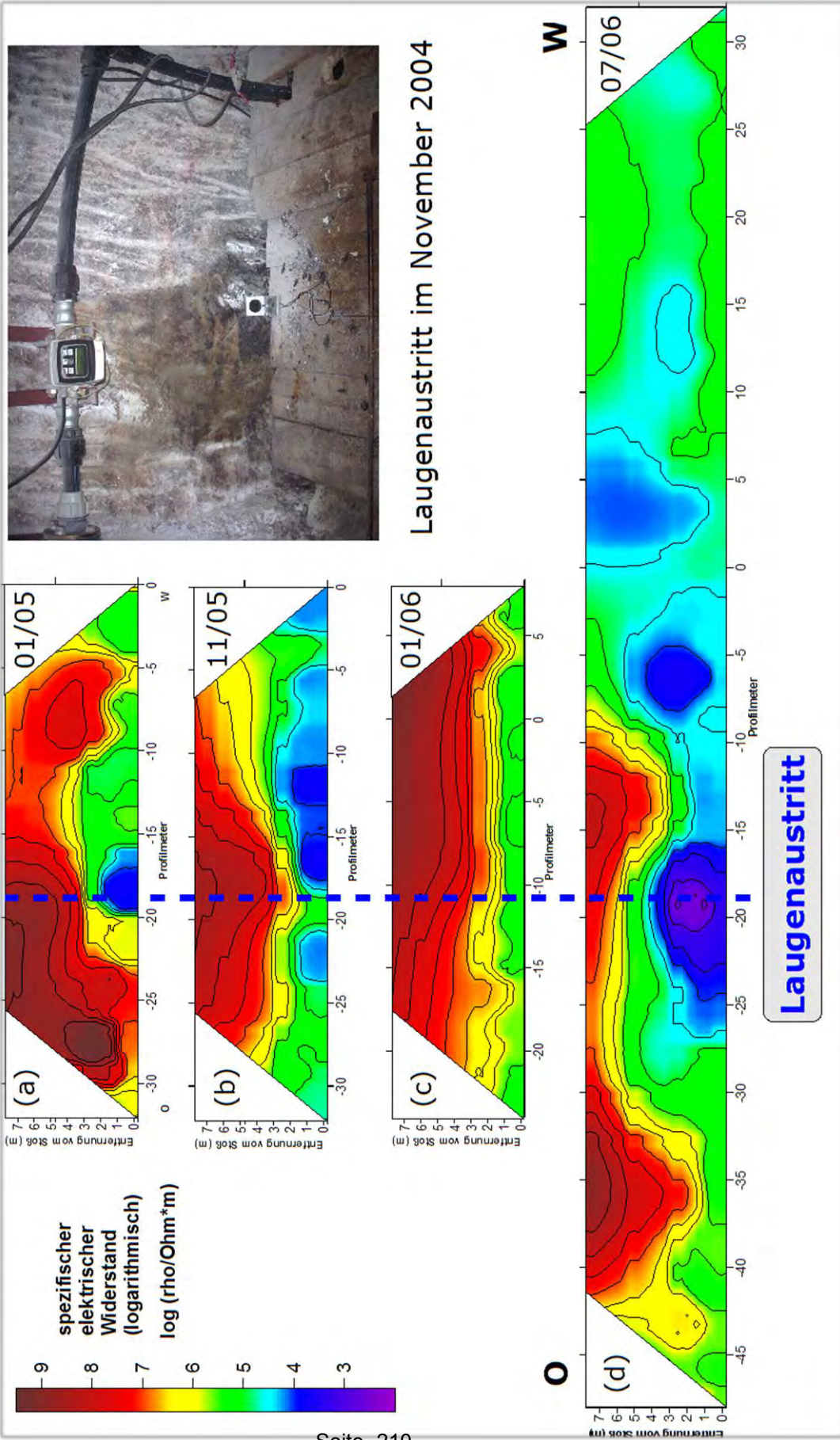
Messbeispiel Geoelektrik:

Basalanhydrit-Aufsattelung mit möglichem Salzlösungsvorkommen im darunter liegenden Hauptdolomit

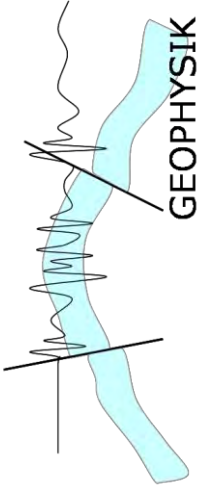
Indikation für Salzlösungsvorkommen oder Feuchtezone



Geoelektrik – Monitoring eines Laugenaustrittes



Laugenaustritt im November 2004



Komplexauswertung

Wissenschaftliches Ziel

Integrierte Auswertung der Ergebnisse der verschiedenen geophysikalischer Messverfahren zur Erfassung der Problemzonen

Ansätze

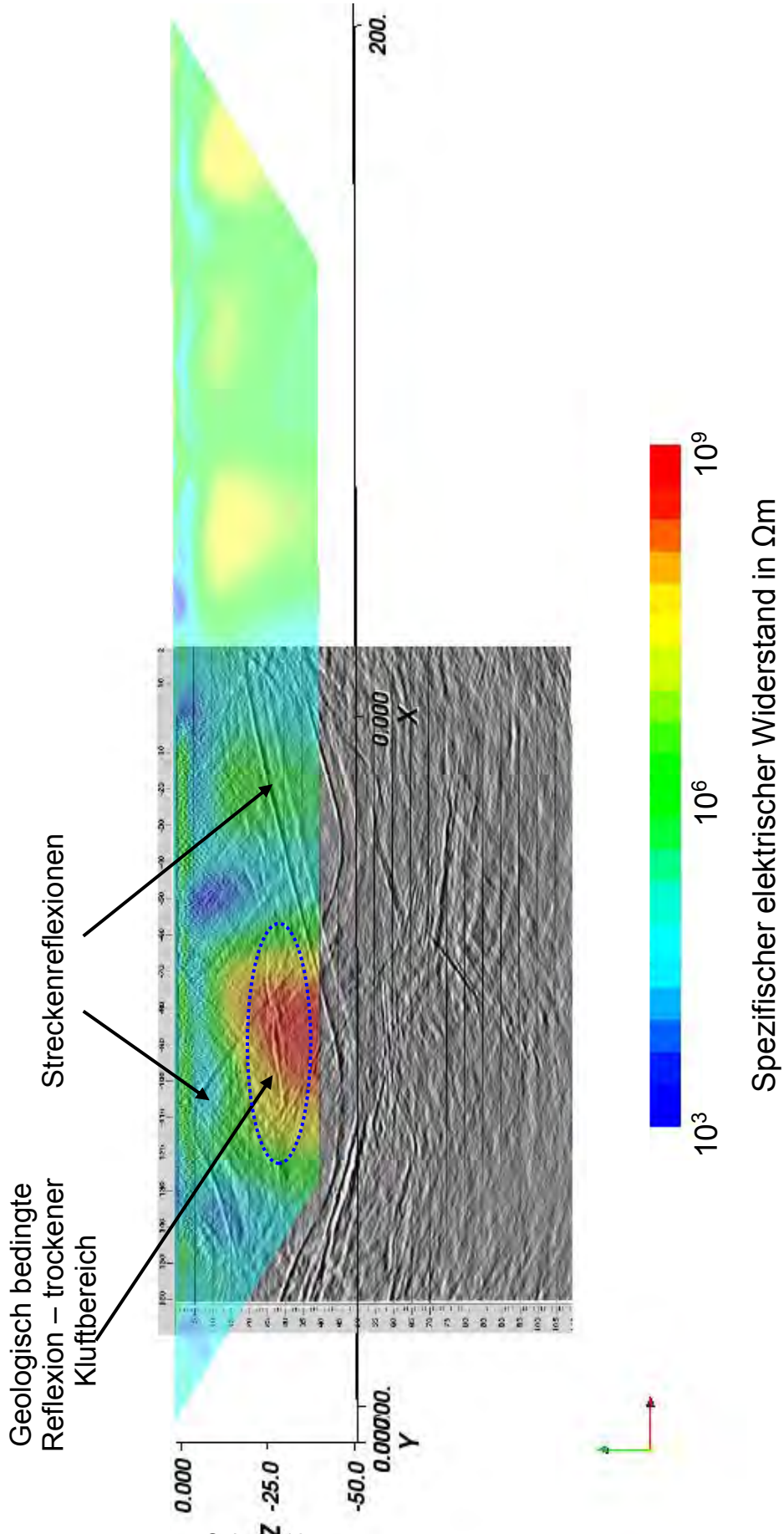
- (1) getrennte Betrachtung der **Messergebnisse der Einzelverfahren** und **Summation der Anomaliekriterien** zu einem „**Problemindex**“ (*univariate statistische Methode*)
- (2) **quantitative Analyse von Anomalienmustern** der Problemzonen im Salinar mittels Mustererkennungsmethoden unter gleichzeitiger Verwendung aller gemessenen geophysikalischen Daten (*multivariate statistische Methode*)

Komplexauswertung – Ansatz 1:

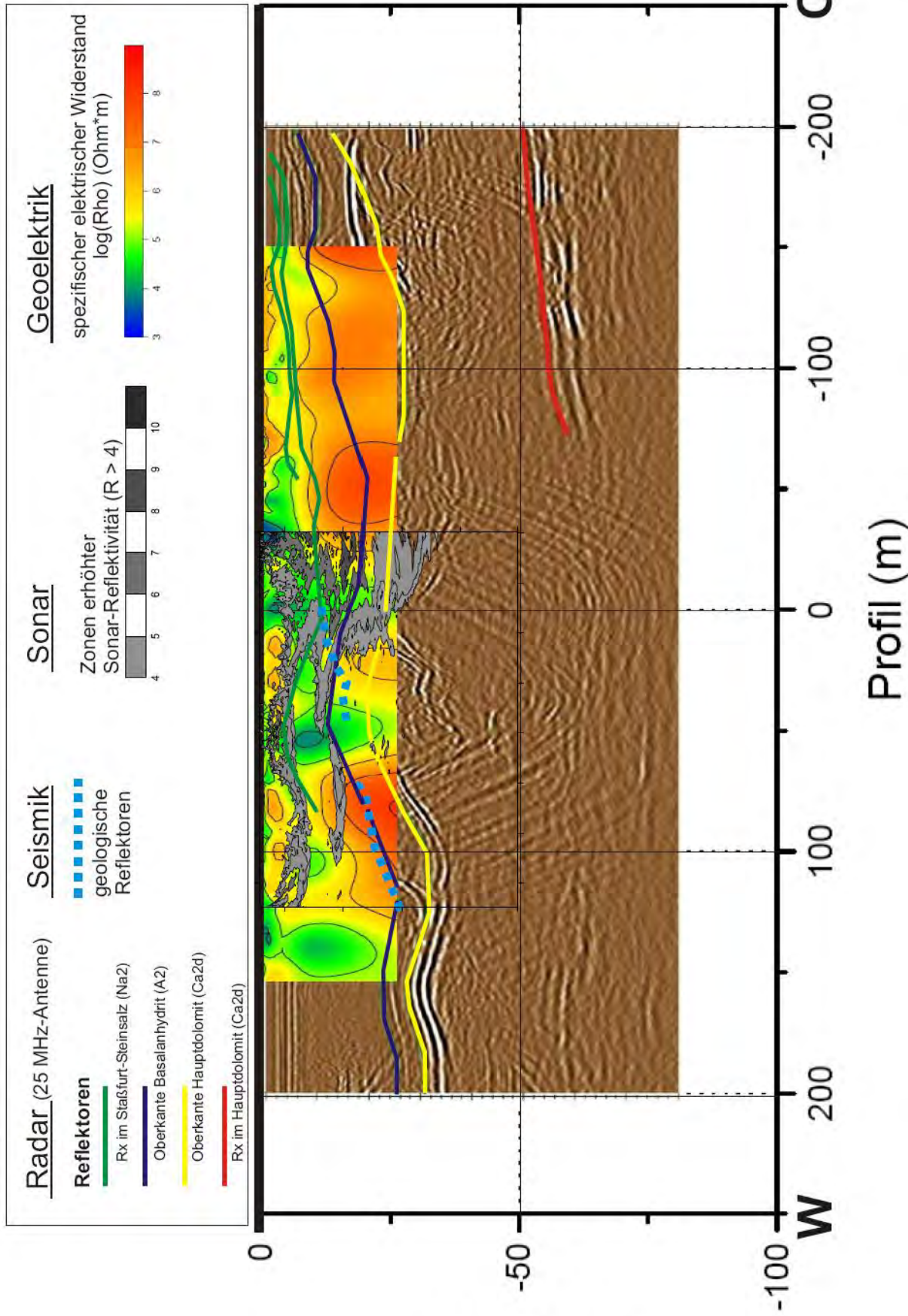
Erste komplexe Interpretation durch Vergleich der Einzelergebnisse, jedes Verfahren „antwortet“ auf anomale Bereiche

Geoelektrik und Seismik (migriert, S-Welle)

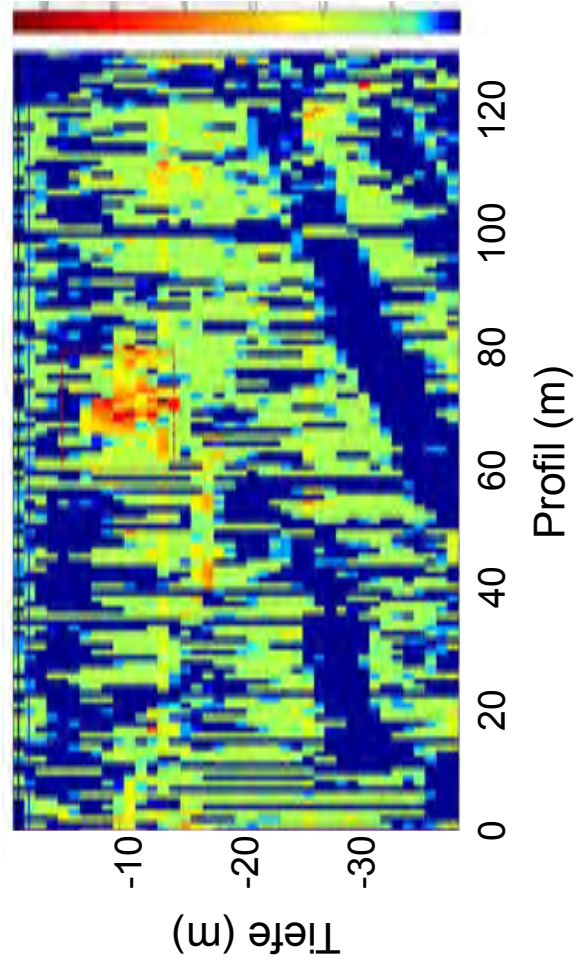
Basalanhydrit-Aufsattelung mit möglichem Salzlösungsvorkommen im darunter liegenden Hauptdolomit



Geophysikalisches Modell (Vertikalschnitt) im Liegenden der Strecke



Problemindex – Anzeige anomaler Bereiche



Erhöhte Wahrscheinlichkeit für Salzlösungsvorkommen

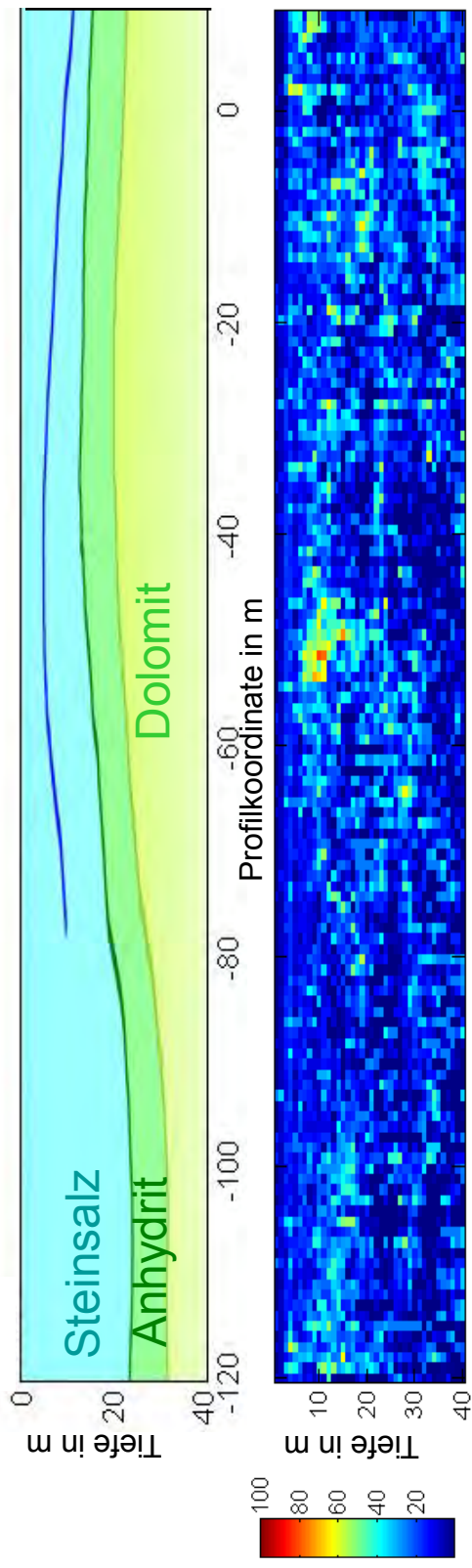
Geringe Wahrscheinlichkeit für Salzlösungsvorkommen

*Anomaliekriterium – Lösungsvorkommen
nach statistischer Analyse aller geophysikalischen Daten*

Geologie

univariat

Problem-index [%]

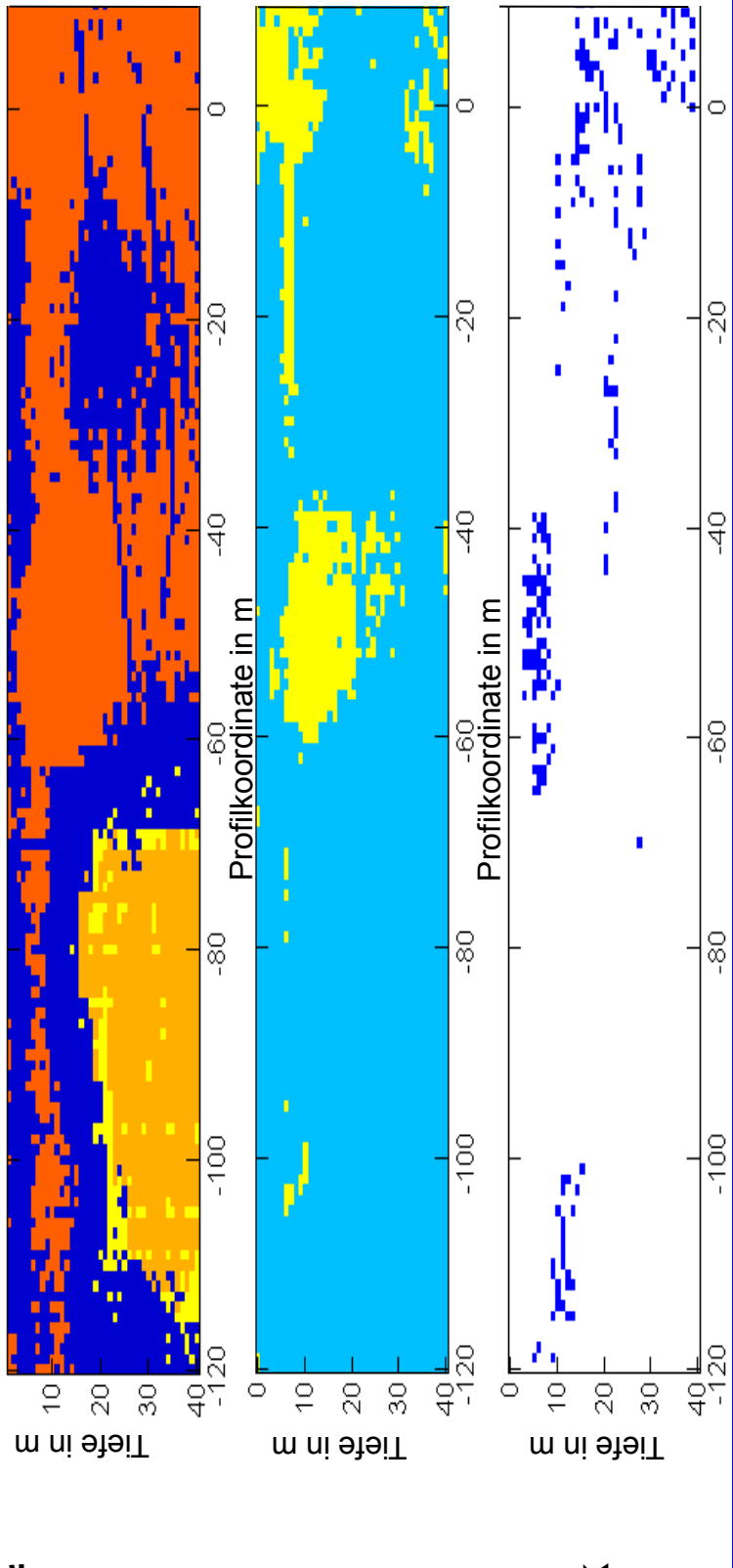


multivariat

Künstliche Neuronale Netze

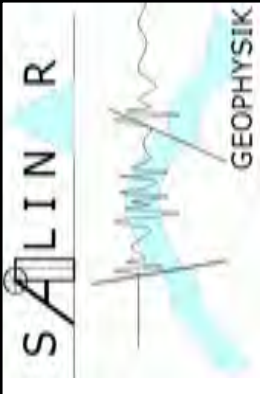
Support Vector Machines

SVM ohne Geoelektrik



Durch die geförderten Projekte konnten beachtliche Fortschritte erzielt werden, insbesondere in Hinblick auf:

- Richtungszuordnung im Vollraum
- Eindringtiefe
- Auflösungsvermögen
- Erkennung anomaler Bereiche durch Kombination der Verfahren



Problemzonen im Salinargestein	SYSTEM				Detektionsfähigkeit <i>schwach stark</i>
	Georadar	Seismik	Geosonar	Geoelektrik	
Feuchtezonen	●●		●●●●	●●●●	●●●●
Salzlösungs-vorkommen			●●●●	●●●●	●●●●
Kluffzonen	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Tektonische Störungszonen	●●	●●	●●	●●	●●●●
Schichtgrenzen	●●	●●	●●	●●	●●●●

- vorhanden bei Beginn der Arbeiten
- entwickelt im Projektverlauf
- weiteres Potential vorhanden

Um die Anschlussfähigkeit, auch im internationalen Vergleich, zu gewährleisten, müssen aktuelle Entwicklungen verfolgt werden. Potential für Verbesserungen der komplexen Auswertung bieten z. B. die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der Inversionstechniken (gemeinsame Inversion mehrerer geophysikalischer Parameter, Clusteranalyse).

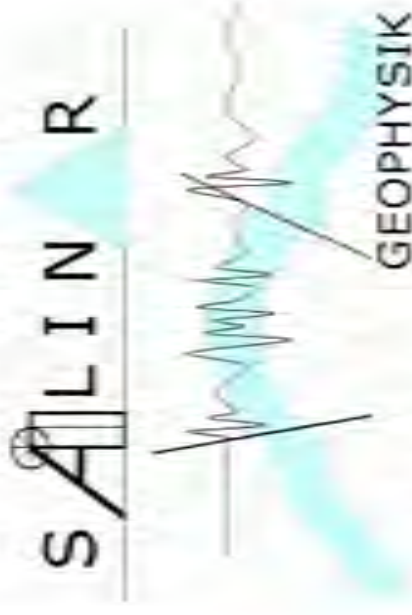
Dokumentation von Ergebnissen (bis 2008)

5 Fachgespräche
„Geophysik und Barriersysteme“
im Zeitraum 2003 -2008

Seite -217-

5. Fachgespräch

„Geophysik und
Barriersysteme“



1. / 2. Oktober 2008
Leipzig



Projektträger
Forschungszentrum
Karlsruhe (PTKA)

UNIVERSITÄT LEIPZIG

Institut für Geophysik und Geologie

<http://www.uni-leipzig.de/~geo/pde/projekte/salinar.html>

Geologische 3D-Modelle für UTD-Standorte – Generierung, Visualisierung und Nutzung

Dr. Hammer, J. et al.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover

Geologische 3D-Modelle für UTD-Standorte - Generierung, Visualisierung, Nutzung

J. Hammer, C. Dresbach, J. Behlau, G. Mingerzahn, S. Fleig, T. Kühnlenz, M. Pusch, S. Heusermann, S. Fahland, P. Vogel, R. Eickemeier

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Die BGR wurde im Förderprogramm „FONA – Forschung für die Nachhaltigkeit“ im Rahmen des Forschungsverbundvorhabens „Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks“ (Förderkennzeichen: 02C1476) durch die Bereitstellung von Personal- und Sachmitteln unterstützt. Das gemeinsam mit der Brandenburgischen Universität Cottbus, der Technischen Universität Clausthal, IHU Stendal, K-UTEC Sondershausen, der Universität Mainz, dem Helmholtz Forschungszentrum Leipzig/Dresden, dem LIAG Hannover und der DHI-WASY Berlin durchgeführte Forschungsvorhaben lief im Zeitraum vom 01.09.2006 bis 31.12.2010. Im Rahmen des Verbundvorhabens erarbeitete der BGR-Arbeitsbereich „Geologie der Barrieren und Wirtsgesteine“ für die am Standort Staßfurt/Sachsen-Anhalt seit Mitte des 19. Jahrhunderts errichteten Salzbergwerke (Berlepsch-Maybach, von der Heydt – von Manteuffel, Achenbach, Leopoldshall I und II, Neustaßfurt I bis III, Friedrichshall I und II sowie Ludwig I bis III) raumlagerichtig und in Echtkoordinaten die Grubenhohlraummodelle. Als Grundlage dienten die vom Landesamt für Geologie und Bergbau Sachsen-Anhalt (LAGB) aus dem „Informationssystem Altbergbau – Kali- und Steinsalz (ISA-KS)“ zur Verfügung gestellten digitalisierten und georeferenzierten Risswerk-Unterlagen. Die Grubenhohlraummodelle lieferten neben einer im Vorhaben neu entwickelten Access-Bohrdatenbank (basierend auf den, für den Standort Staßfurt relevanten Daten aus der Landesbohrdatenbank des LAGB und auf einer von IHU Stendal zur Verfügung gestellten Bohrdatenbank) die wichtigsten Ausgangsdaten für die Erarbeitung des geologischen 3D-Modells für den Staßfurter Salzsattel. Für das im Modell erfasste Gebiet mit den Ausmaßen von ca. 8 km x 7 km wurden durchdringungsfreie Modellkörper für neun, aus z. T. mehreren stratigraphischen Schichten zusammengefasste geologische Einheiten erstellt. Die 3D-Modelle wurden von den Projektpartnern für hydrogeologische (Universität Cottbus, DHI-WASY Berlin) und geomechanische Modellberechnungen (Universität Clausthal) genutzt (JAHNKE et al. 2010, DÜSTERLOH & TEDEEVA 2010, DIERSCH et al. 2010).

Das im Forschungsprojekt erarbeitete geologische 3D-Modell weist intensive Ablaugungsbildungen (Hutgesteine) im Hangendbereich dieses oberflächennahen Salzsattels mit daran gebundenen Einsturzbildungen im darüber liegenden Deckgebirge aus. Zusammen mit den Grubenhohlraummodellen bildet das geologische 3D-Modell die Basis für Prognosen von Senkungs- und Bruchprozessen im Deckgebirge des Staßfurter Salzsattels. In diese Betrachtungen fließen auch die im Forschungsvorhaben erzielten neuen Erkenntnisse zur Verbreitung und räumlichen Ausdehnung von Quartärrinnen im Untersuchungsgebiet ein.

Ergänzend zur Darstellung der Vorgehensweise und einiger Resultate der Untersuchungen im Staßfurt-Projekt werden die Ergebnisse umfangreicher langjähriger Arbeiten der BGR auf dem Gebiet der geologischen 3D-Modellierung von Salzstrukturen vorgestellt. Die BGR hat im Zeitraum 2001 bis 2008 im Auftrag der Kavernenindustrie geologische 3D-Modelle für die Standorte Etzel, Rüstringen, Krummhörn, Lesum, Benthe, Rüdersdorf, Möckow und Jemgum erarbeitet. Die dabei vorgenommenen Methoden- bzw. Programm-Weiterentwicklungen sowie die in diesen Fallbeispielen erzielten Erkenntniszuwächse und gewonnenen Erfahrungen fließen in die aktuellen Arbeiten der BGR zur Erstellung der geologischen 3D-Modelle für die Endlagerstandorte Gorleben und Konrad ein. Dabei dienen die geologischen

3D-Modelle nicht nur als unverzichtbare Grundlage für Langzeitsicherheitsanalysen (numerische Modellberechnungen), sondern auch zur Überprüfung der Datenkonsistenz, zur geowissenschaftlichen Qualitätssicherung der Standortuntersuchungen, zur Planung der weiteren Erkundungsarbeiten, zur raumbezogenen Auswertung der Erkundungsergebnisse und als 3D-Datenspeicher. Die geologischen 3D-Modelle sind außerdem ein wichtiges Hilfsmittel zur allgemeinverständlichen Präsentation von Erkundungsergebnissen, Kenntnisständen und Modellvorstellungen, d. h. sie stellen ein wichtiges Element in der Öffentlichkeitsarbeit und im Rahmen von Planfeststellungs- bzw. Genehmigungsverfahren dar.

Ausführlich wird auf die in der BGR derzeit laufenden Arbeiten am geologischen 3D-Modell für den Standort Gorleben eingegangen. Für das weitere Umfeld des Salzstocks Gorleben wurde für eine Fläche von 45 x 37 km² unter Einbeziehung der benachbarten Salzstrukturen (Aulosen, Wittenberge, Dömitz, Große Heide-Siemen, Conow, Werle und Rambow) ein regionalgeologisches Modell bis in eine Tiefe von ca. 4 km erarbeitet. In das Modell sind die Ergebnisse früherer Explorationsarbeiten der Rohstoffindustrie sowie aus mehr als 30 Jahren geologischer Standorterkundung eingeflossen, d. h. Daten aus über 700 Bohrungen und ca. 100 seismischen Profilen. Anhand dieses regionalgeologischen 3D-Modells werden der zeitliche Ablauf der Salzstock-Bildung (Diapirismus) und die Entwicklung der Randsenken anschaulich demonstriert. Parallel zu diesen Arbeiten erfolgt auf der Grundlage der vorhandenen Informationen aus seismischen Messungen und aus Bohrungen die Erarbeitung eines präzisen Außenhüllen-Modells für den Salzstock Gorleben. Dieses Modell wird zusätzlich durch die geologisch-geophysikalischen Befunde aus Tiefbohrungen und aus untertägig durchgeführten Radar-Messungen (richtungssensitive EMR-Messungen) gestützt. Die Ergebnisse der untertägigen geologischen Erkundung bilden die Basis für das in der BGR zur Zeit erarbeitete geologische 3D-Modell des Internbaus des Salzstocks. Mit Wiederaufnahme der Erkundungsarbeiten im November 2010 setzt die BGR die vor dem Erkundungsmoratorium begonnenen Modellierungsarbeiten fort und ergänzt bzw. modifiziert das geologische 3D-Modell unter Nutzung der neuen Erkundungsergebnisse fortlaufend.

Für die Erarbeitung der stationären geologisch-tektonischen 3D-Modelle nutzt die BGR das in ihrem Auftrag von der Fa. BicaD, Hannover weiterentwickelte Programm openGEO. Da die BGR der Hauptnutzer des Programms ist, hat sie wesentlichen Einfluss auf die laufende Weiterentwicklung des Programms und kann damit sehr kurzfristig auf Probleme oder Änderungen in den zur Verfügung stehenden Daten bzw. Datenformaten reagieren. Durch vertraglich geregelte Rechte der BGR am Source Code von openGEO ist die für Endlagerprojekte erforderliche Nachhaltigkeit gesichert. Für die Erarbeitung der 3D-Modelle werden horizontale und vertikale Konstruktionsebenen sowie eine liniengeführte Triangulation genutzt. Durch den Einsatz von openGEO ist es möglich, sehr kompliziert aufgebaute geologische Strukturen, wie z. B. polyphase überkippte Fließfaltungen auf engstem Raum aufschlussreu darzustellen.

Die praktische Nutzung des geologischen 3D-Modells der Außenhülle und des Internbaus des Salzstocks Gorleben wird am Beispiel von Darstellungen der im Ergebnis der Erkundungsarbeiten nachgewiesenen Zerblockung des Hauptanhydrits und zur räumlichen Verteilung der Lösungsvorkommen im Salzstock illustriert. Das für die letztgenannte Aufgabenstellung in der jüngsten Vergangenheit entwickelte Programm GEOravis (KÜHNLENZ et al. 2010) ermöglicht es, in externen Datenbanken abgespeicherte raumbezogene Erkundungsergebnisse gezielt abzufragen und in den mit openGEO konstruierten geologischen 3D-Modellen darzustellen. Weitere Beispiele für die Auswertung

des Lösungskatasters Gorleben (BfS 2002) mittels GORAVIS werden in SCHRAMM et al. (2009) demonstriert.

Aus den geologischen 3D-Modellen werden mit dem ebenfalls im Auftrag der BGR weiterentwickelten Finite-Elemente-Programm JIFE numerische Simulationsmodelle erarbeitet, die zur Analyse der thermomechanischen Beanspruchung von geologischen Strukturen und des langfristigen Verhaltens von Wirtsgesteinen dienen. Präsentiert werden die Ergebnisse einer dreidimensionalen Modellierung des möglichen Einflusses glazialer Prozesse im Verlaufe einer Inlandvereisung an der Erdoberfläche auf die Langzeitintegrität der Salzbarriere des Salzstocks Gorleben. Außerdem werden die Ergebnisse von 2D-Modellierungen zum Einfluss erhöhter, durch die Abfalleinlagerung bedingter Temperaturen auf die mechanische Integrität der Salzbarriere des Salzstocks Gorleben vorgestellt. Die Bewertung der Salzintegrität erfolgt für einen Zeitraum von ca. 150 Jahren nach Abfalleinlagerung unter Nutzung des Frac- sowie des Dilatanzkriteriums. Unter Zugrundelegung des Ende der 1990iger Jahre aktualisierten Endlagerkonzeptes Gorleben (FILBERT & ENGELMANN 1998) wurde keine Verletzung des Dilatanzkriteriums festgestellt. Frac-gefährdete Bereiche reichen zum Zeitpunkt ihrer maximalen Ausbreitung (etwa 20 Jahre nach der Abfalleinlagerung) nur maximal 60 bis 110 m unterhalb des Salzspiegels.

Literatur:

BfS (2002): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung: Datenerfassung bis 30.09.2000. unveröff. Bericht, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 1183 S., 47 Abb., 16 Tab., 4 Anl.

DIERSCH, H.-J., LUO, J. & RÜHAAK, W. (2010): Numerische Strömungs- und Massentransportmodellierung im Bereich des ehemaligen Kalibergbaus Staßfurt. Exkursionsführer und Veröffentl. Dtsch. Gesell. Geowiss., H.244, S. 179-188

DÜSTERLOH, U. & TEDEEVA, S. (2010): Geomechanische Berechnungen zur Interpretation von Tagesbrüchen und Oberflächenabsenkungen im Bergschadensgebiet Staßfurt. Exkursionsführer und Veröffentl. Dtsch. Gesell. Geowiss., H.244, S. 189-199

FILBERT, W. & ENGELMANN, H.-J. (1998): Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben. Abschlussbericht, DBE, Peine

JAHNKE, C., BOHN, A., WALTER, N. & VOIGT, H.-J. (2010): Hydrogeologische und hydrochemische Verhältnisse der ehemaligen Staßfurter Kalisalzgruben an der Westflanke des Staßfurter Sattels und des Deckgebirges. Exkursionsführer und Veröffentl. Dtsch. Gesell. Geowiss., H.244, S. 144-154

KÜHNLENZ, T., HAMMER, J., SCHRAMM, M., MINGERZAHN, G. & SCHLÜTER, D. (2010): 3D-GIS-basierte Auswertung von geologischen Erkundungsdaten am Beispiel des Lösungskatasters Gorleben. Kali und Steinsalz, 3, S. 32-43

SCHRAMM, M., KÜHNLENZ, T., MINGERZAHN, G. & HAMMER, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben : eine Dokumentation und genetische Interpretation. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 145 S., 12 Abb., 19 Tab.

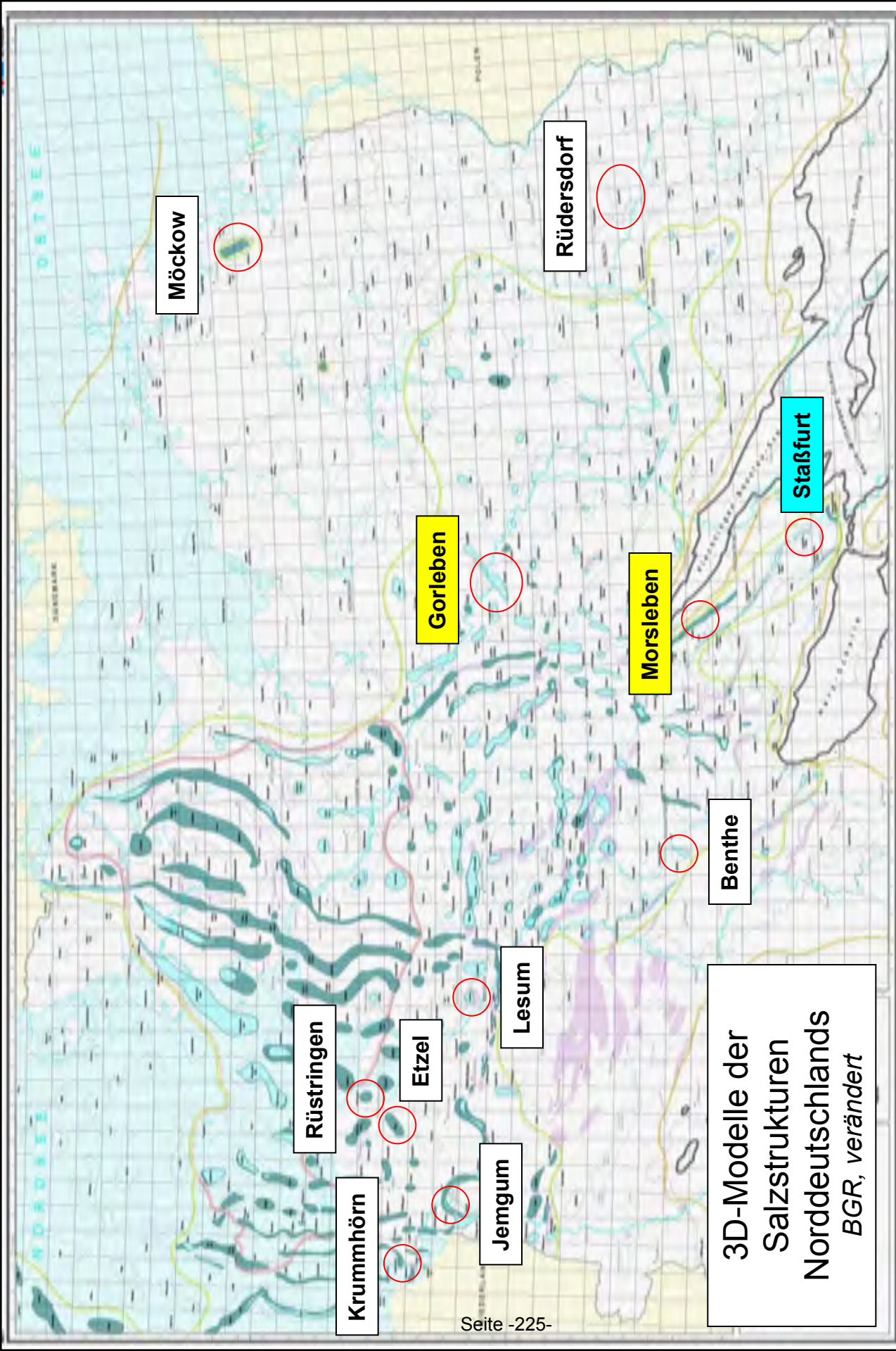
Geologische 3D-Modelle für UTD-Standorte

Generierung, Visualisierung, Nutzung

**J. Hammer, C. Dresbach, J. Behlau, G. Mingerzahn,
S. Fleig, T. Kühnlenz, M. Pusch,
S. Heusermann, S. Fahland, P. Vogel, R. Eickemeier**

Seite -224-

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover



Mückow

Rüdersdorf

Gorleben

Morsleben

Staßfurt

Benthé

Lesum

Etzel

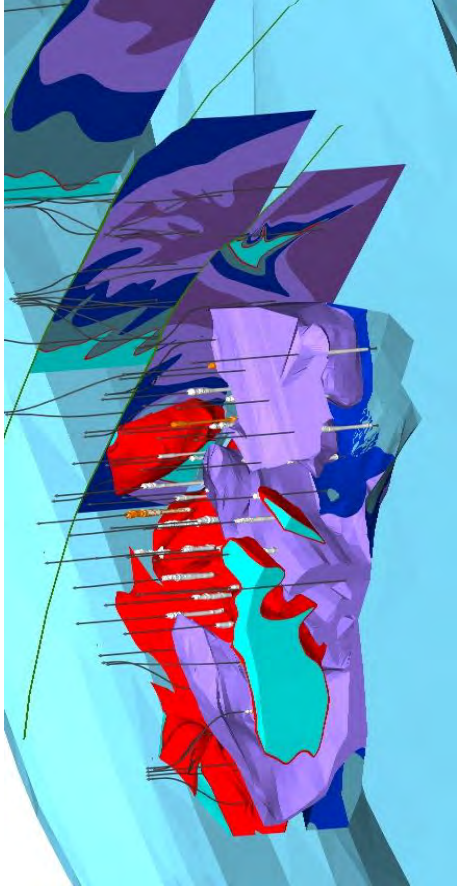
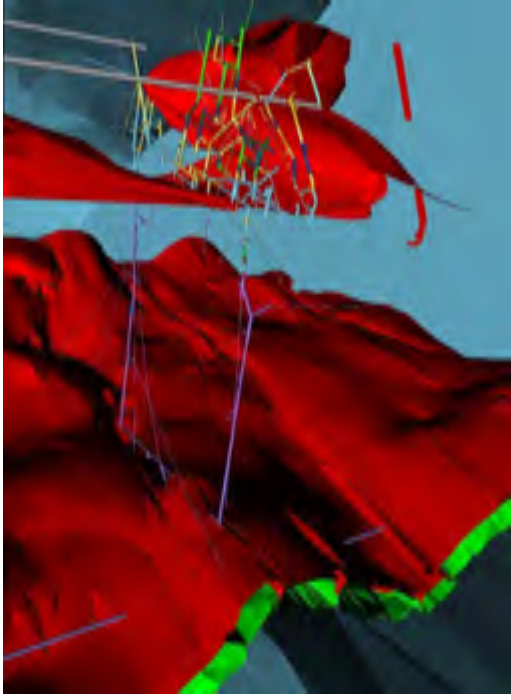
Rüstringen

Krummhörn

Jemgum

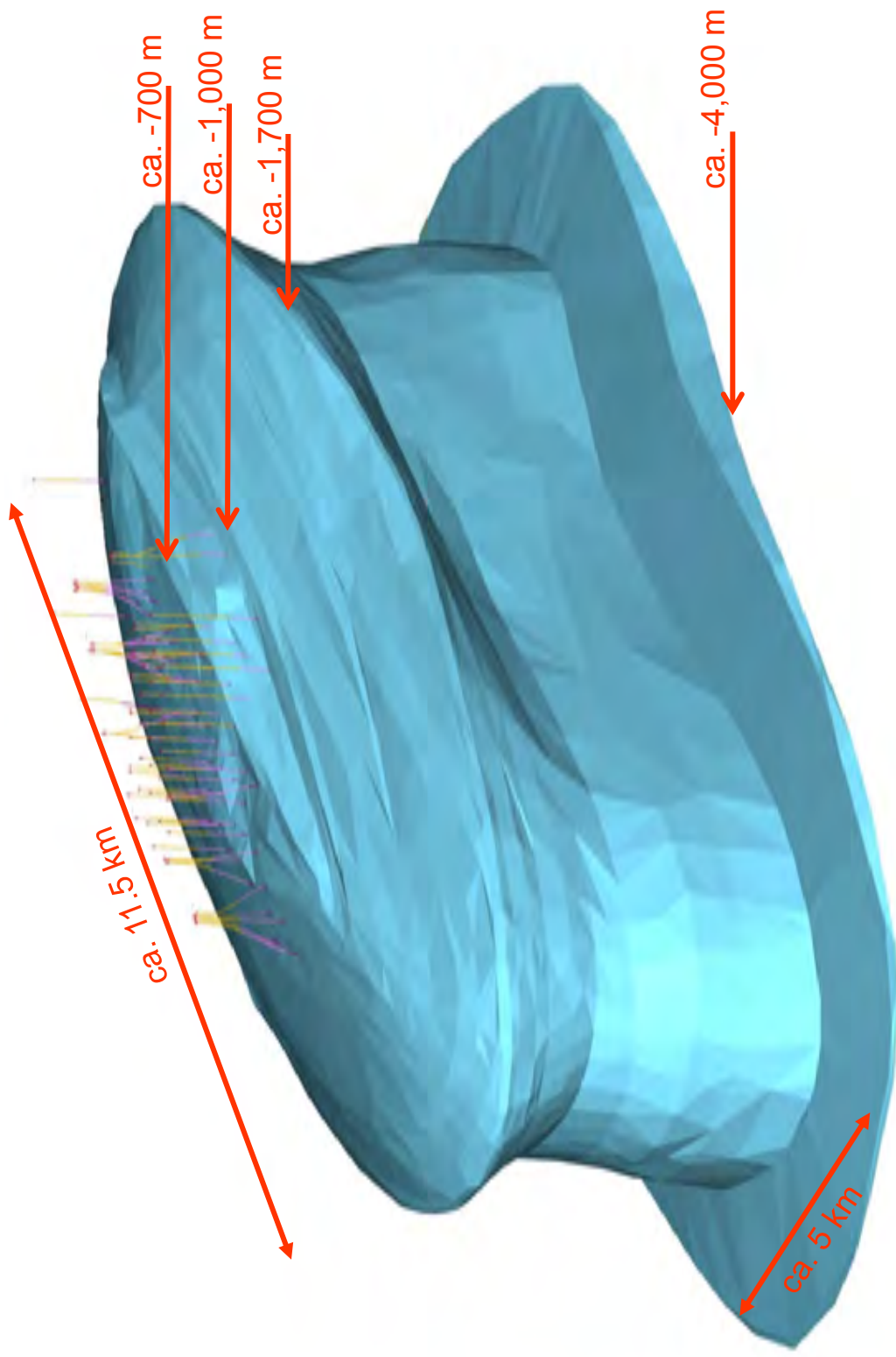
3D-Modelle der Salzstrukturen Norddeutschlands
BGR, verändert

Synergien Kavernenprojekte – Erkundung Endlagerstandorte

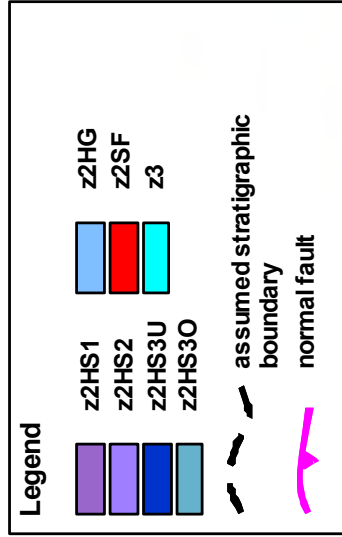
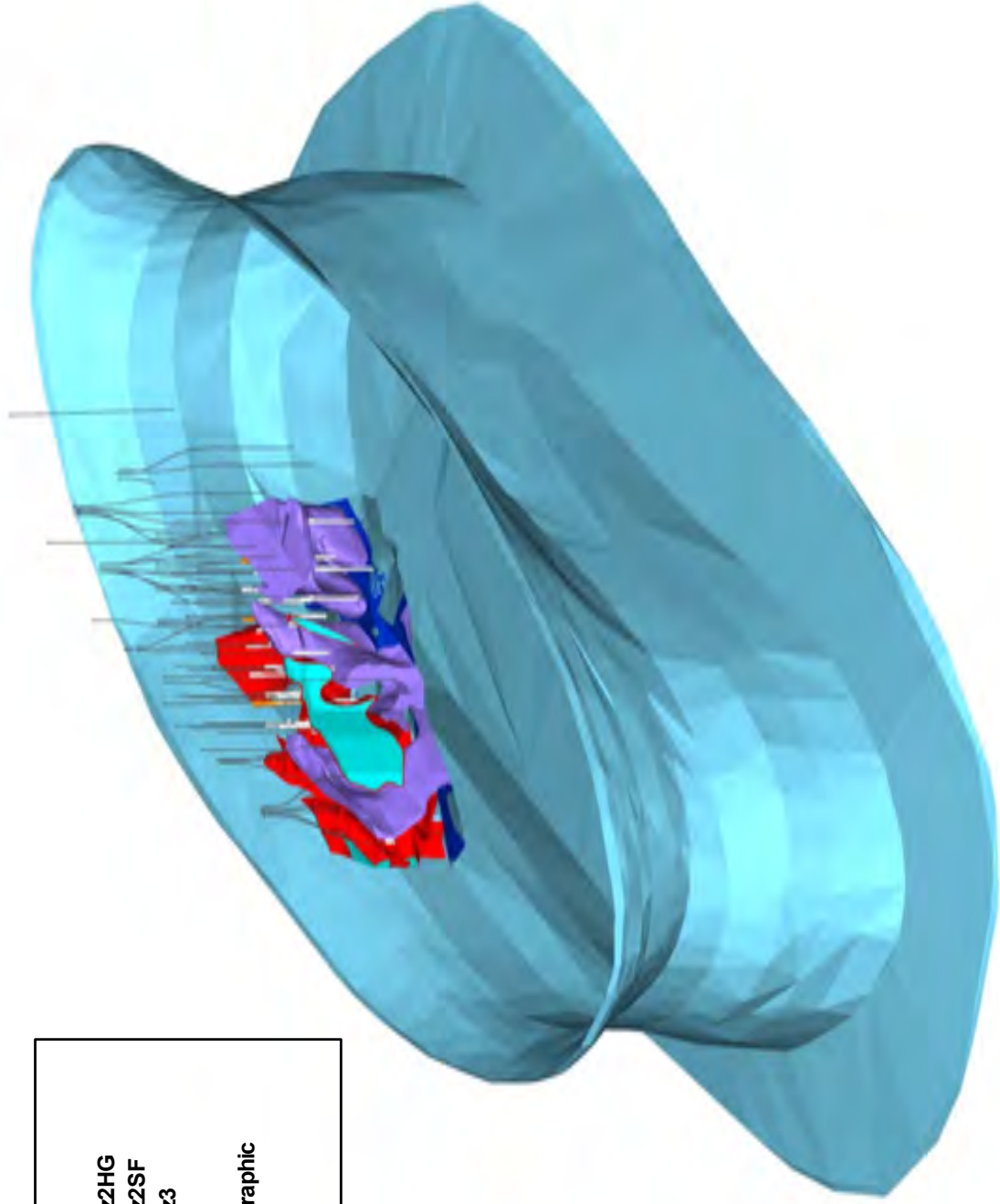


- BGR ist in Endlagerprojekten für die Planung und Auswertung von Erkundungsmaßnahmen sowie für die Qualitätskontrolle geologischer Arbeiten zuständig.
- Endlagerung und Kavernenindustrie haben den gleichen Zielhorizont: das Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS).
- Ziel: Optimierung Erkundung durch realitätsnahe Vorfeldprojektion und „just in time support“ während Erkundung

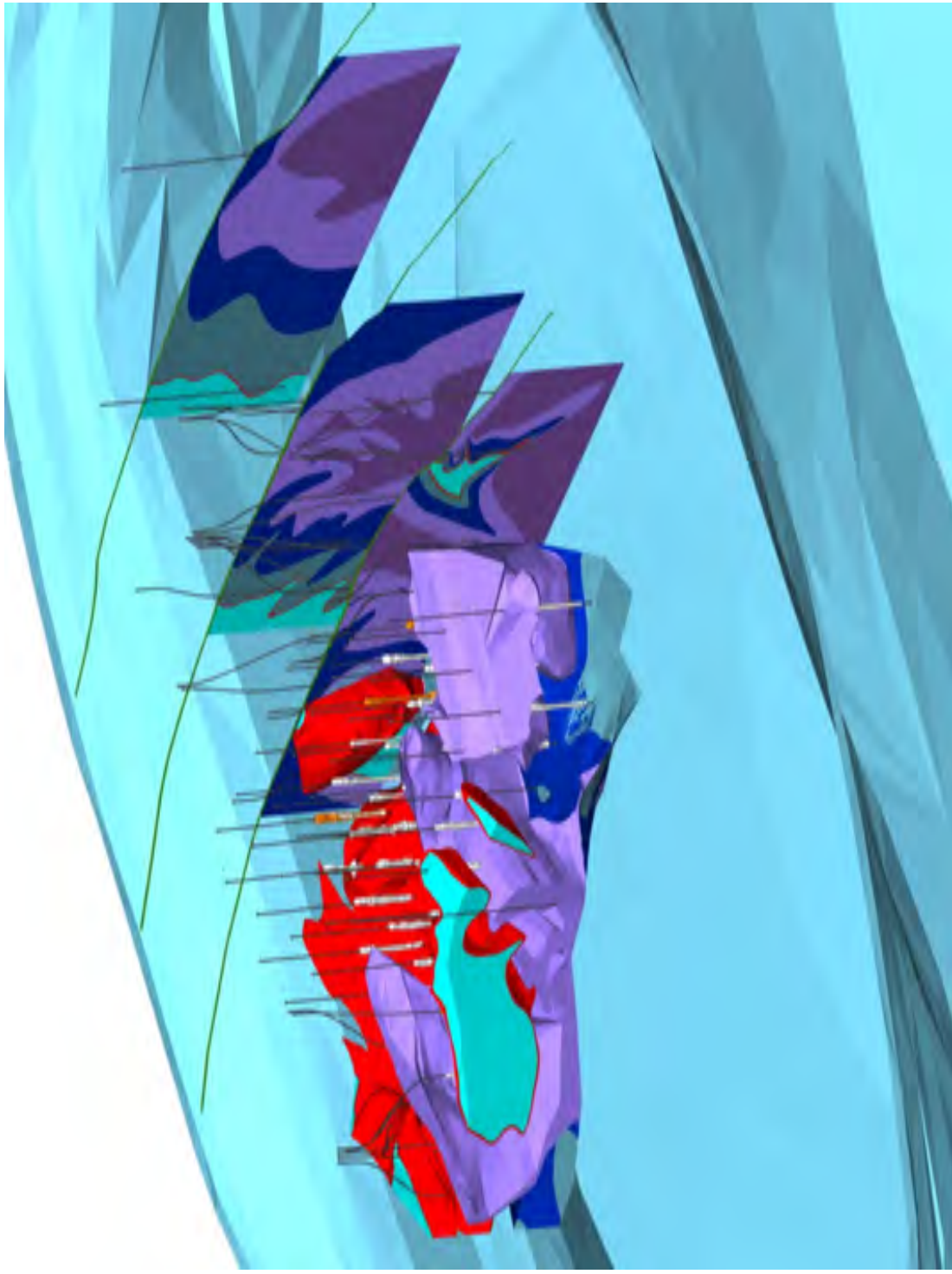
Geologisches 3D-Modell des Salzstocks Etzel



Internbau Salzstock Etzel



Weiterführung des 3D-Modells



Gliederung des Vortrages

- **Ausgangsdaten; Programm openGEO**
- **Vorgehensweise bei der 3D-Modellierung**
- **Beispiele für Nutzung der 3D-Modelle**
 - Gorleben
 - Staßfurt
- **Präsentation geologisches 3D-Modell Gorleben**

Ziele der 3D-Modell-Erarbeitung

- **3D-Modelle – Grundlage für Langzeitsicherheitsanalysen (numerische Simulationen)**
- **Überprüfung Datenkonsistenz**
- **Auswertung von Erkundungsergebnissen**
- **geowissenschaftliche Begleitung / Qualitätssicherung der Standortarbeiten**
- **Planung von (Weiter-) Erkundung**
- **3D-Datenspeicherung**

-
- **wichtiges Hilfsmittel zur Präsentation von Erkundungsergebnissen, Kenntnisständen und Modellvorstellungen**

Geologisches 3D-Lagerstättenmodell

In sich konsistentes 3D-Modell, das auf der Basis aller vorhandenen Daten erstellt wurde



Planungstool für

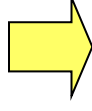
- Anlage von Grubenbauen
- Gezielte Planung der weiteren Erkundung



Auswertetool für

- Integrale Bewertung von Erkundungsergebnissen
- Datengrundlage für Modellrechnungen

Kein konsistentes 3D-Modell auf der Basis aller bisherigen Erkundungsdaten konstruierbar



Bereiche mit Inkonsistenzen werden im Modell ausgewiesen



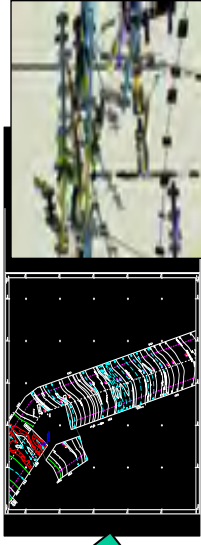
Planungstool für gezielte Nach- oder Neuerkundung

Grunddaten der Modellierung I

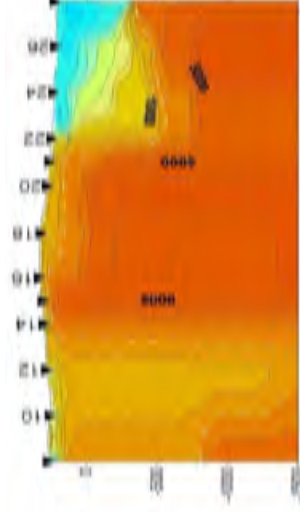
Digitale Geländemodelle



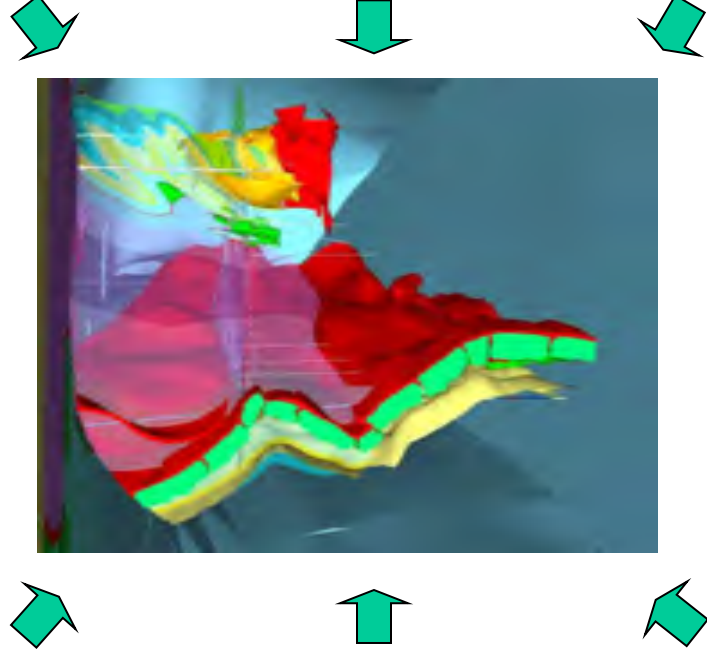
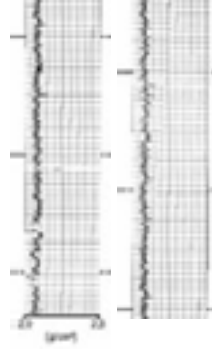
Streckenkartierungen



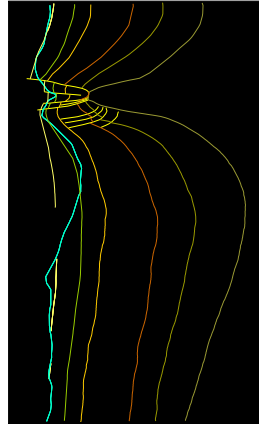
Geophysikalische Daten



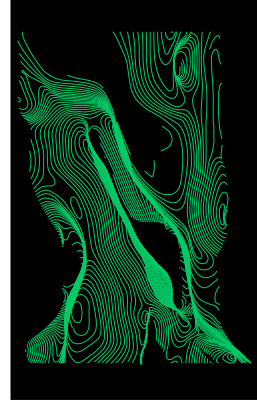
Bohrlochdaten



Interpretierte Seismik

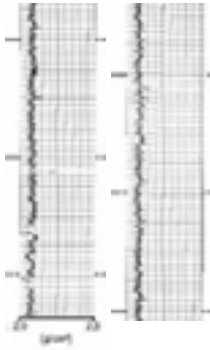


Tiefenlinienpläne



Grunddaten der Modellierung II: Bohrlochdaten

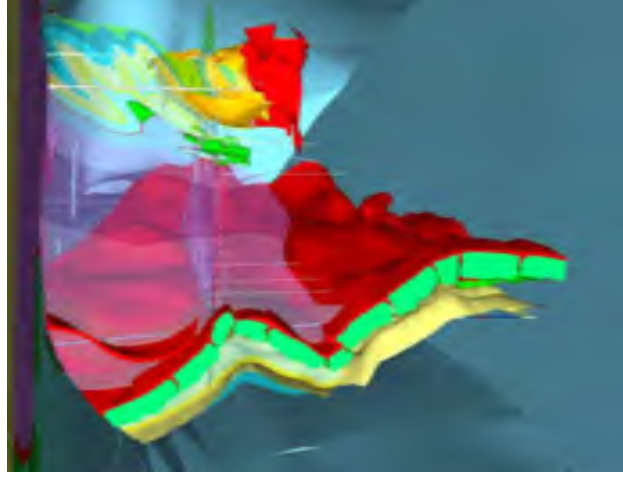
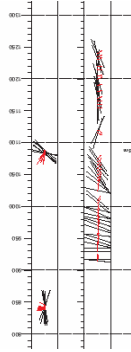
Logdateien



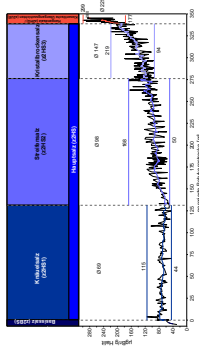
Bohrkerne



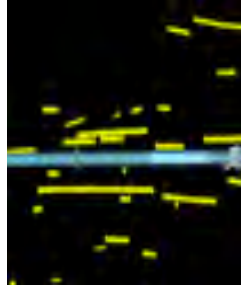
Orientierungs-
messungen



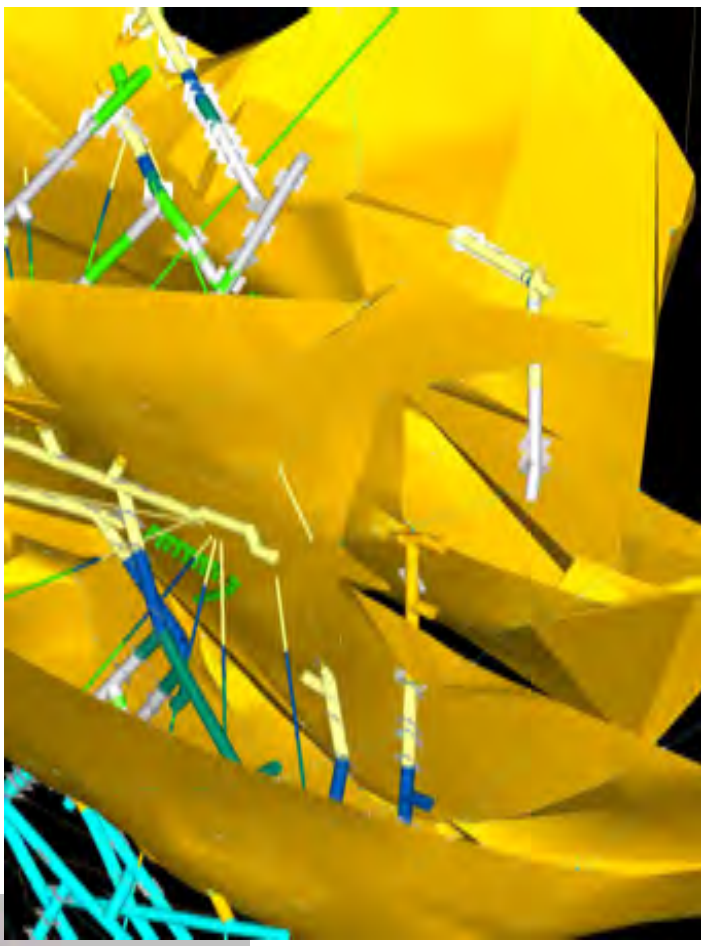
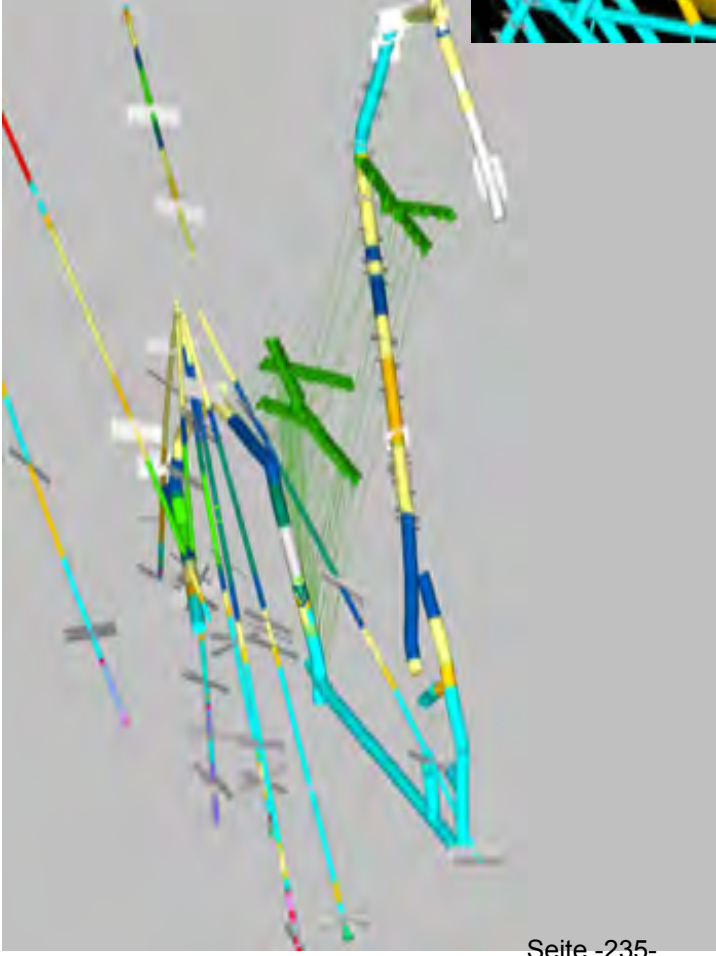
Bromidanalysen



Georadar



Grunddaten der Modellierung III: EMR-Daten



Salzstock Gorleben

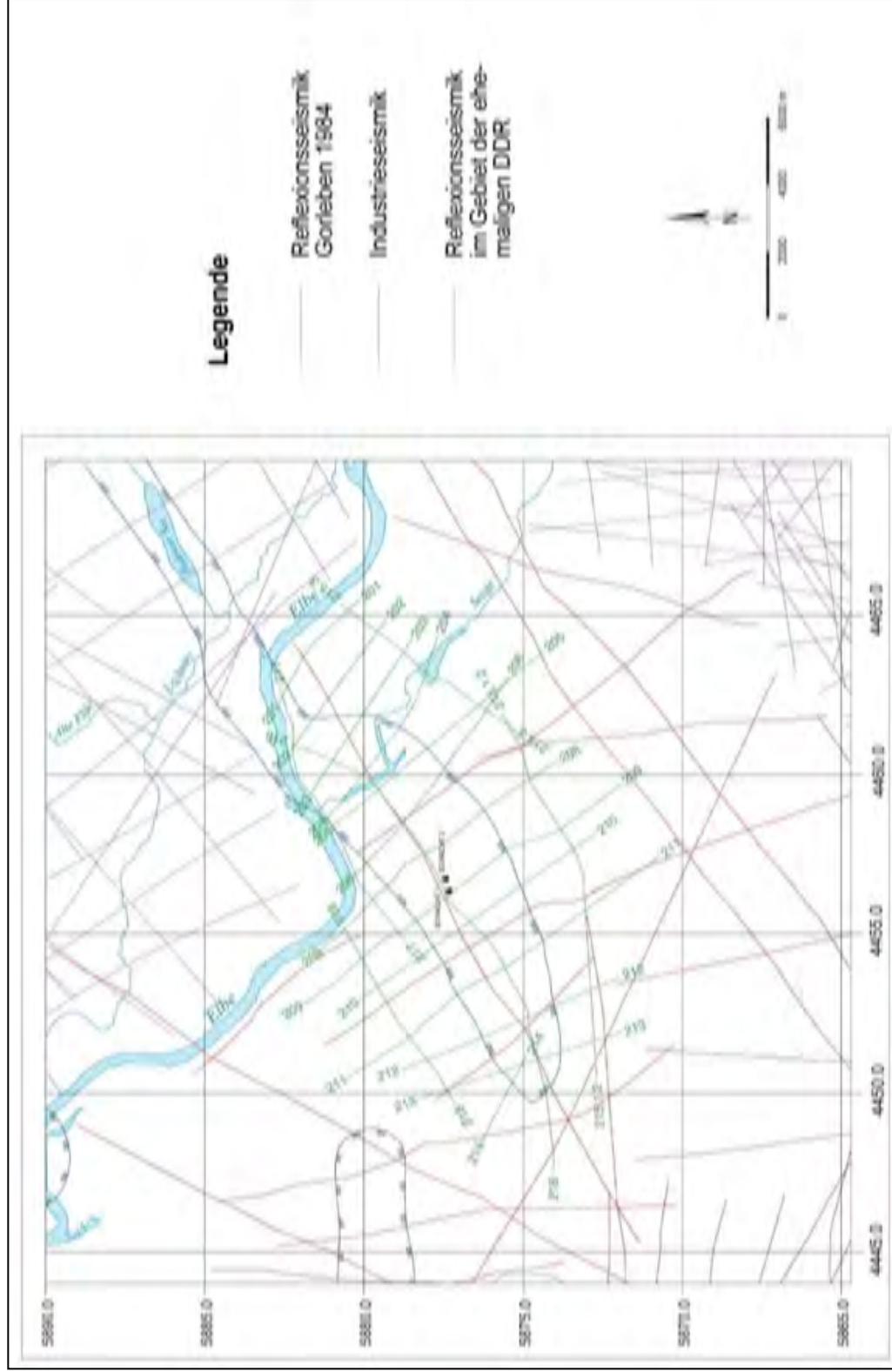
Methoden der Standorterkundung

- Seismische Oberflächenmessungen
- Erkundungsbohrungen
- detaillierte geologische Aufnahme und Untersuchung der Bohrkerne
- Geophysikalische Bohrlochmessungen
(unbedingt notwendig: Gamma-Ray, Density-Log, Sonic-Log, Deviation-Log)
- Messungen des Schichteinfallens in den Kernen (alle 50 bis 100 m; orientierte Kerne, wenn möglich Dip-Log)
- richtungssensitive Radarmessungen
- geochemisch-mineralogische Untersuchungen (Mineralbestand, Br, Rb, Sr, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$; thermodynamic modelling of brine-rock interaction, hydrocarbon analyses and genetic interpretation)

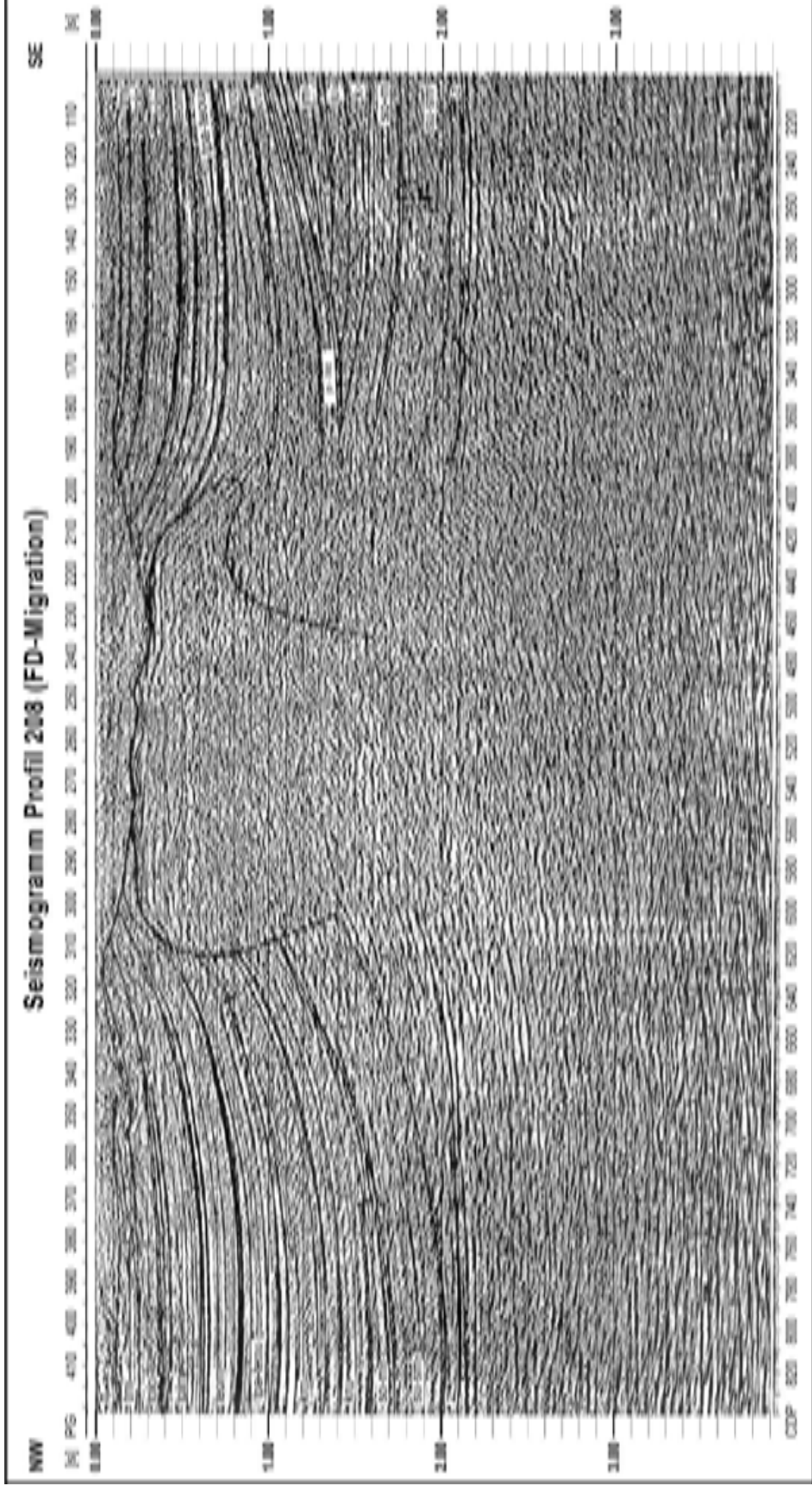
Untersuchungen der Auswirkungen der Subrosion auf die Salzstruktur:

- Salzspiegelbohrungen im Top der Salzstruktur
(gekernt im Hutgestein und im Übergangsbereich zum nicht abgelaugten Teil)

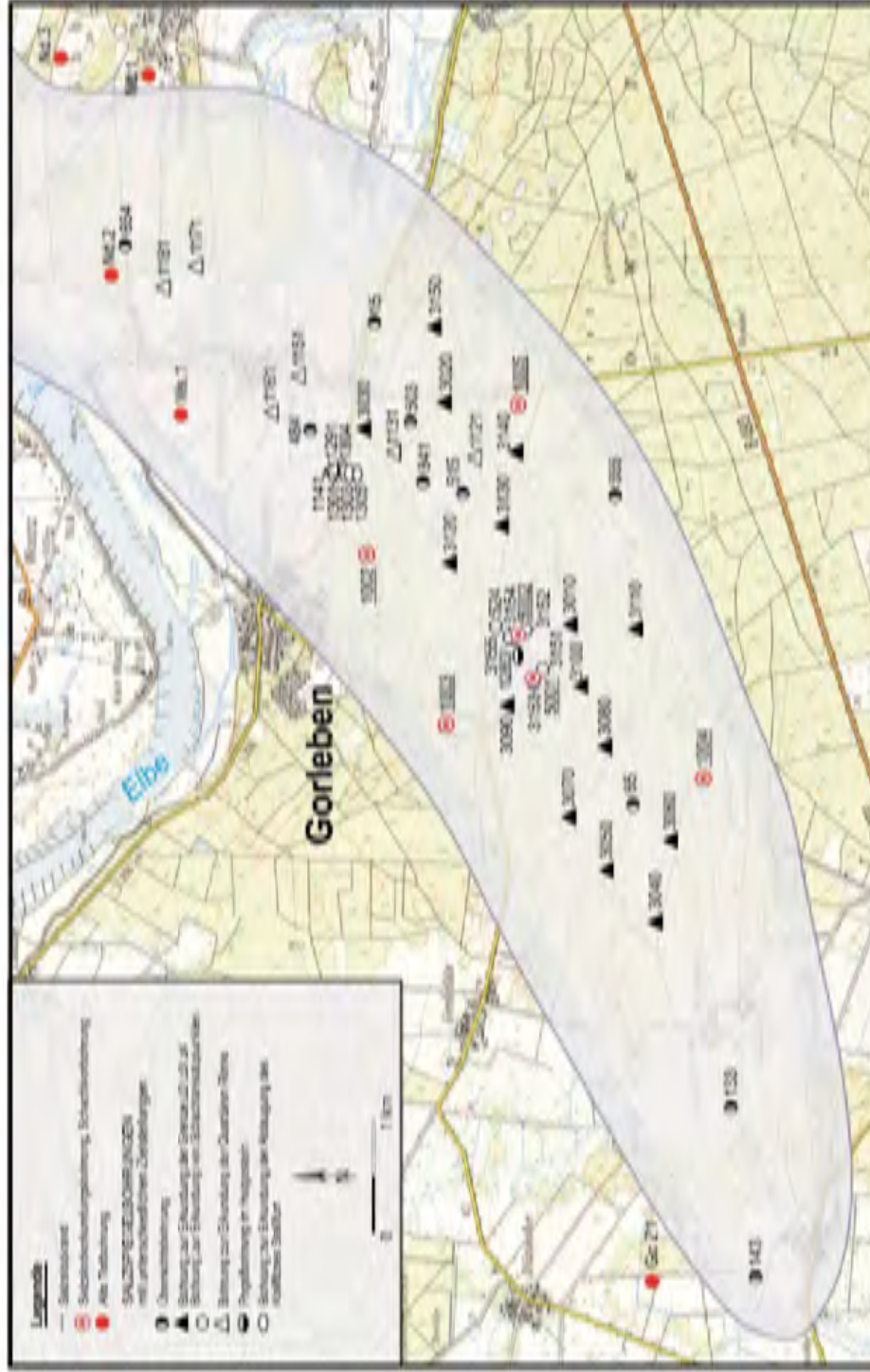
übertägige Standorterkundung



übertägige Standorterkundung



übertägige Standorterkundung



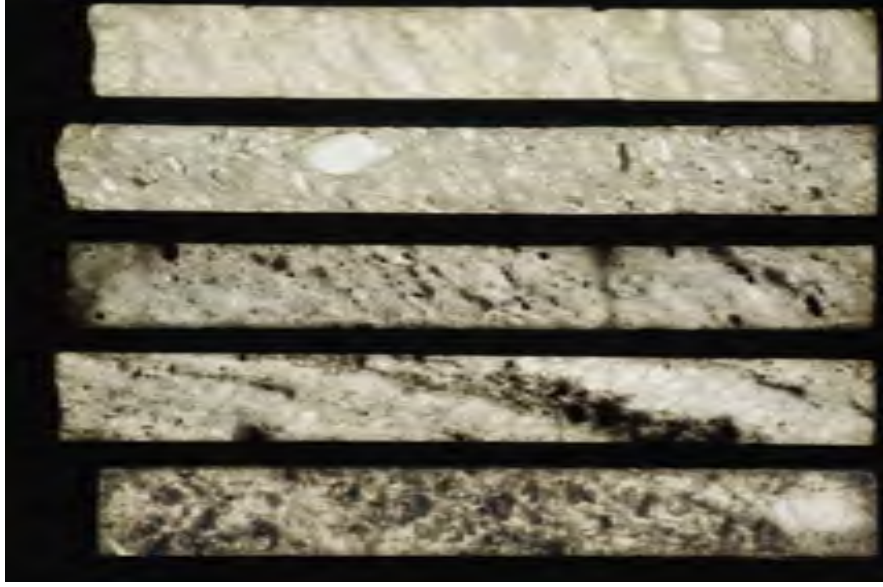
übertägige Standorterkundung

Zechstein 7 (Mölln-Folge)	z7
Zechstein 6 (Friesland-Folge)	z6
Zechstein 5 (Ohre-Folge)	z5
Zechstein 4 (Aller-Folge)	z4
Zechstein 3 (Leine-Folge)	z3
Zechstein 2 (Staßfurt-Folge)	z2
Zechstein 1 (Werra-Folge)	z1

Oberer Staßfurt-Ton	z2STO
Gebänderter Deckanhydrit	z2DA
Decksteinsalz	z2DS
Kaliflöz Staßfurt	z2SF
Kieseritische Übergangsschichten	z2UE
Tonliensalz	z2TS
Polyhaitbänkchensalz	z2PS
Speisesalz	z2SP
Hangendsalz	z2HG
Hauptsalz	z2HS
Basissalz	z2BS
Basalanhydrit	z2BA
Staßfurt-Karbonat	z2SK
Staßfurt-Ton	z2ST

Lithology of the halite beds (Gorleben)

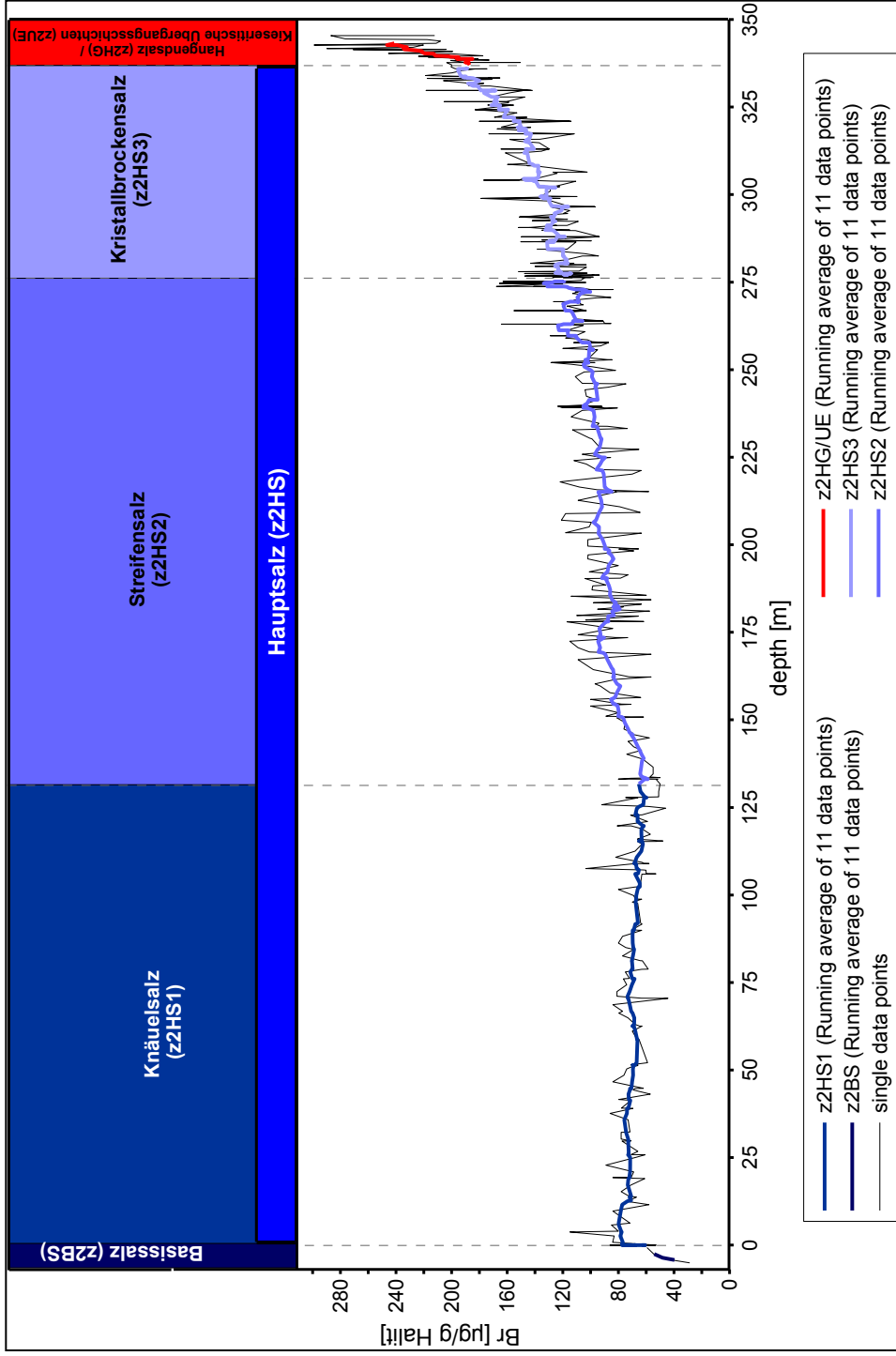
Staßfurt-Folge (z2)



Leine-Folge (z3)



untertägige Standorterkundung



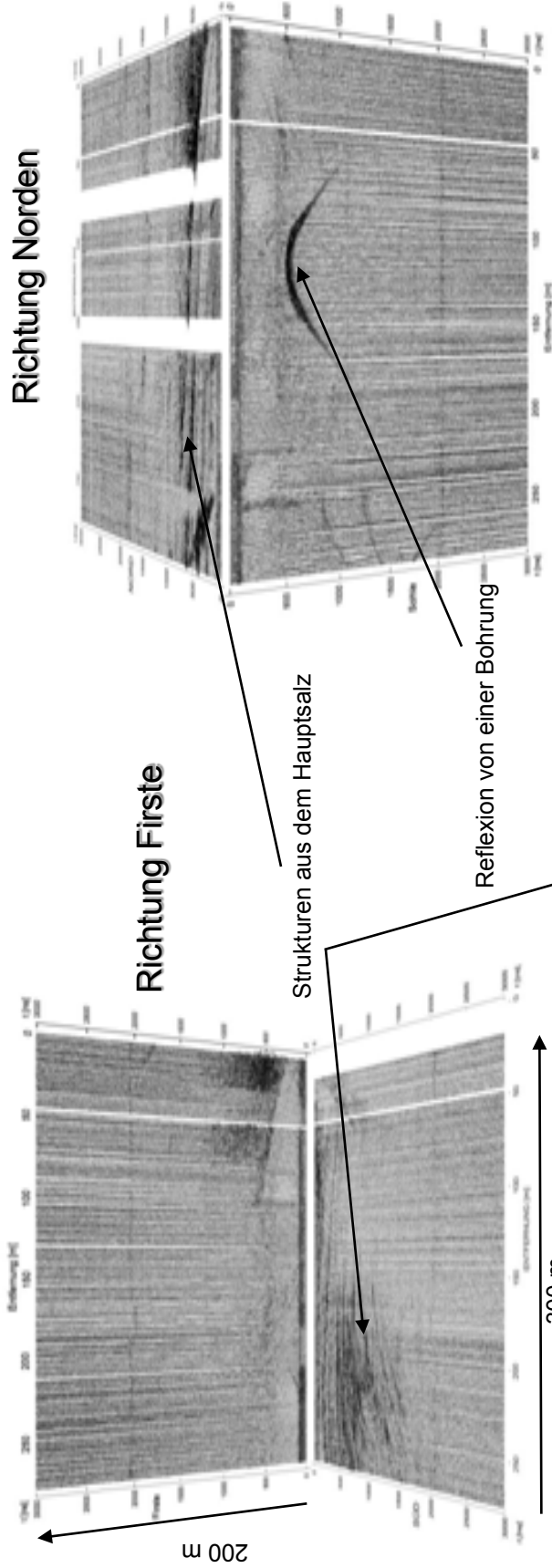
Bromine standard curve of Zechstein 2

Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen

14./15. Februar 2012, PTKA-WTE, Karlsruhe

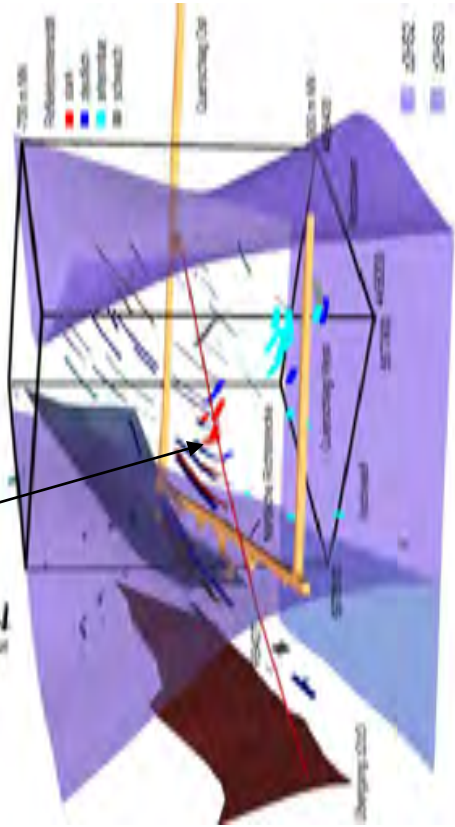
Georadar zur Strukturerkundung im Salzstock Gorleben

50 MHz Radargramme in der nördlichen Richtstrecke



Richtung Süden

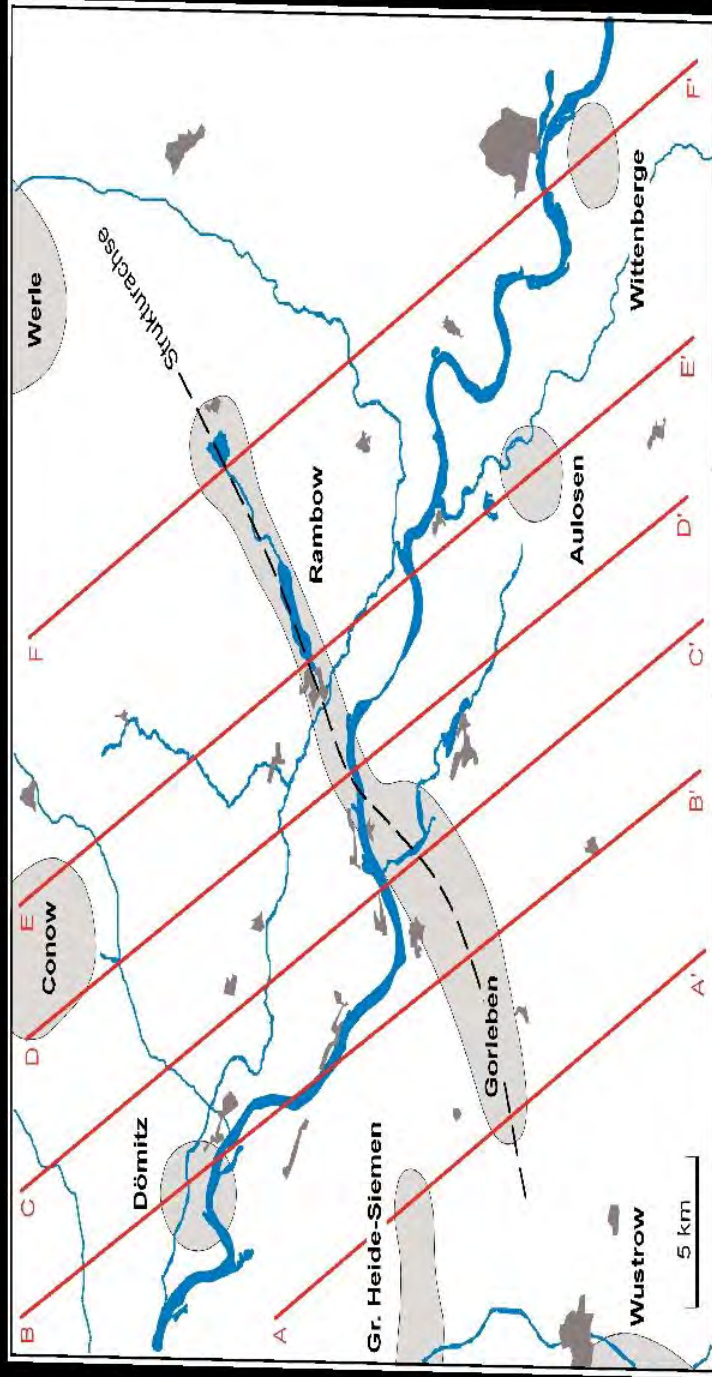
Richtung Sohle



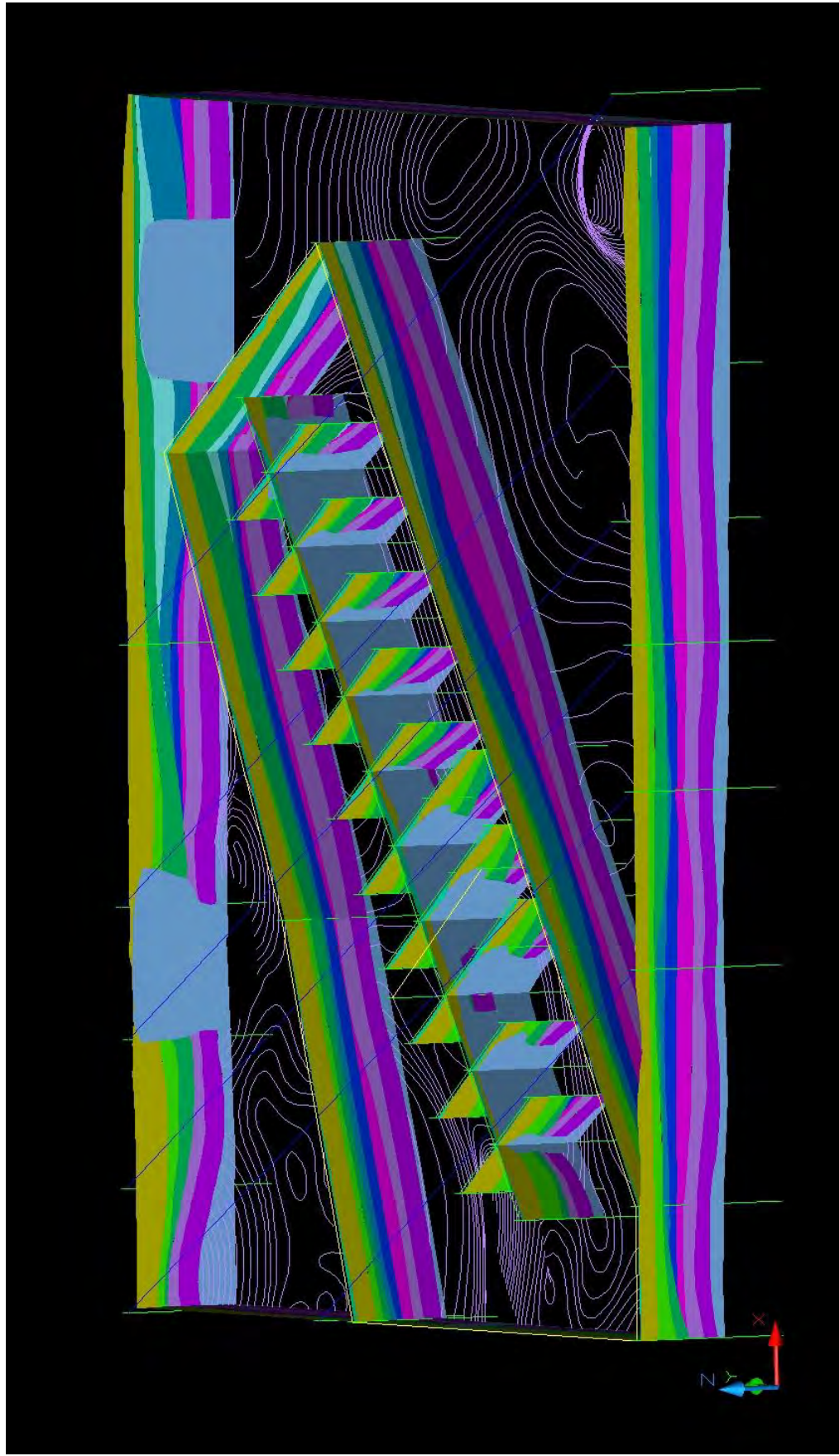
Perspektivdarstellung der Reflektoren aus der Streckenmessung mit Geologie

Insgesamt wurden in Gorleben über 30 km Radarprofile gemessen. Dazu kommen Peilmessungen und Bohrlochmessungen.

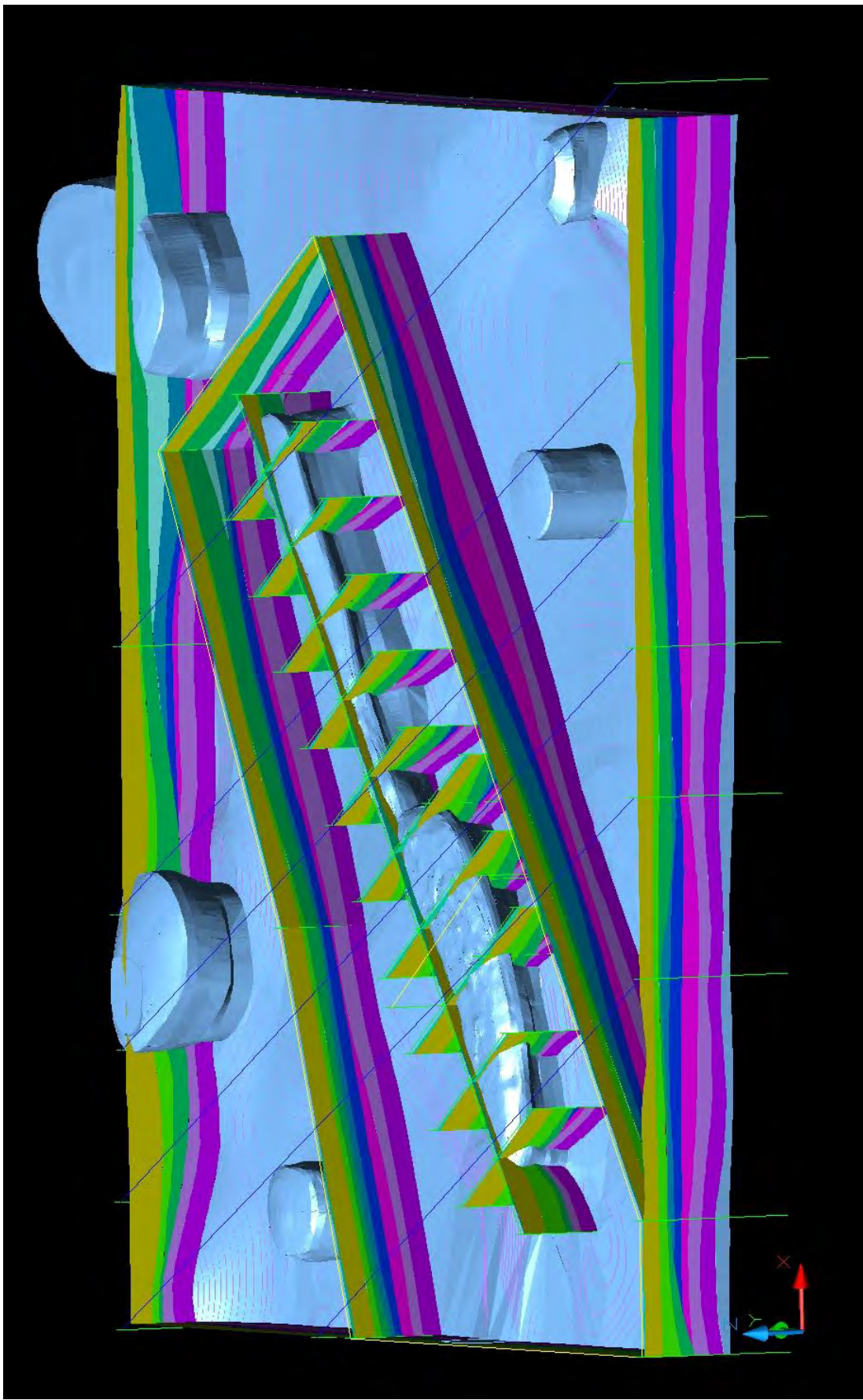
geologisches 3D-Umfeldmodell Gorleben (Salzstock-Genese, Randsenken-Ausbildung, Aufstieg)



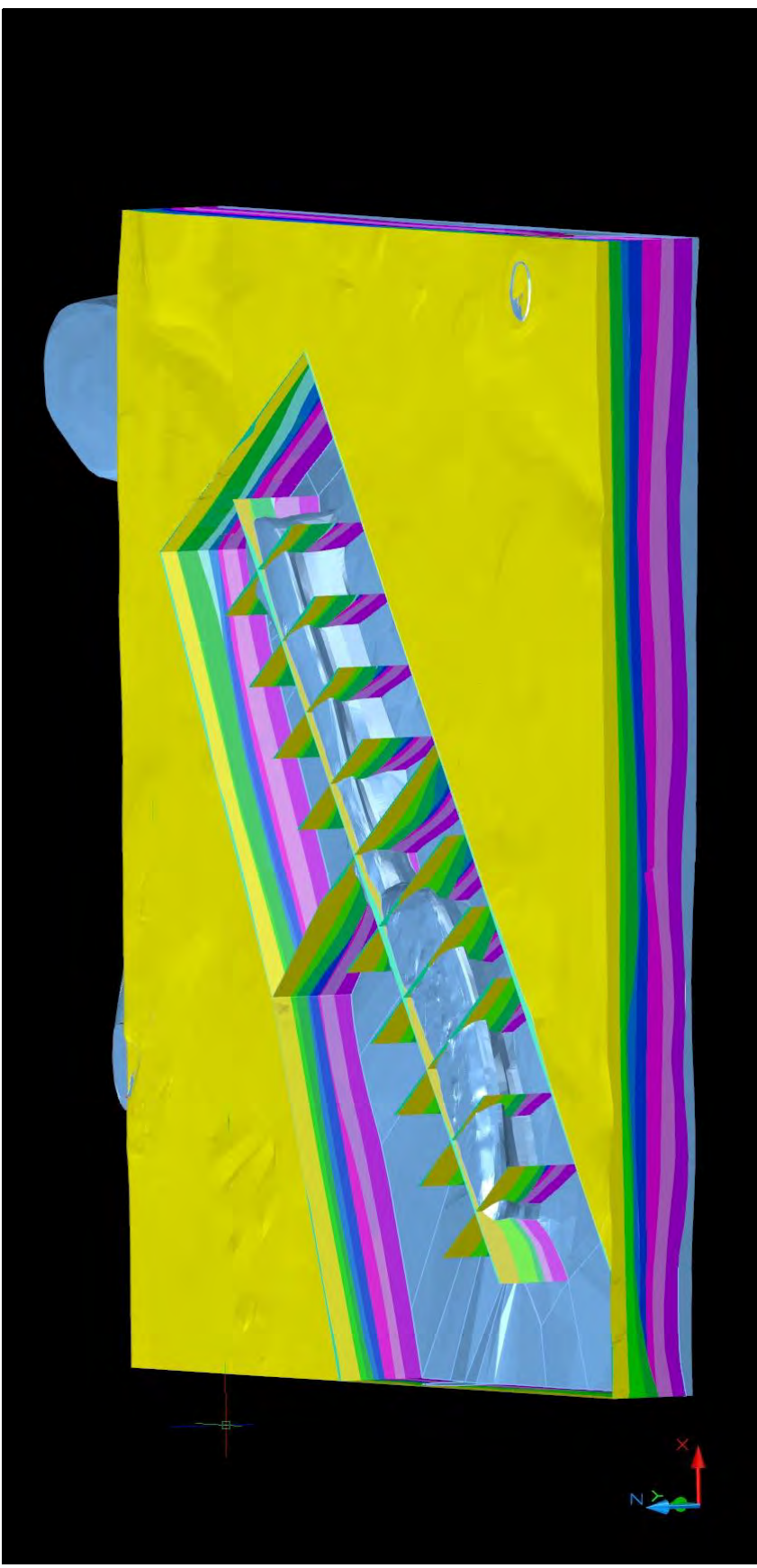
geologisches 3D-Umfeldmodell Gorleben



geologisches 3D-Umfeldmodell Gorleben



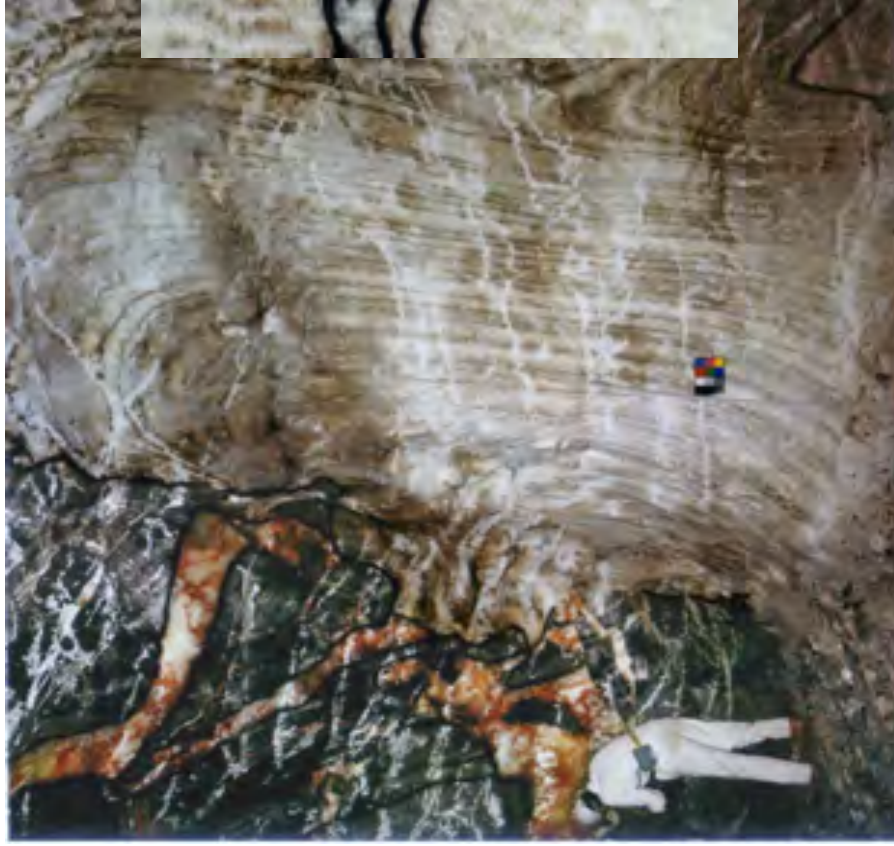
geologisches 3D-Umfeldmodell Gorleben



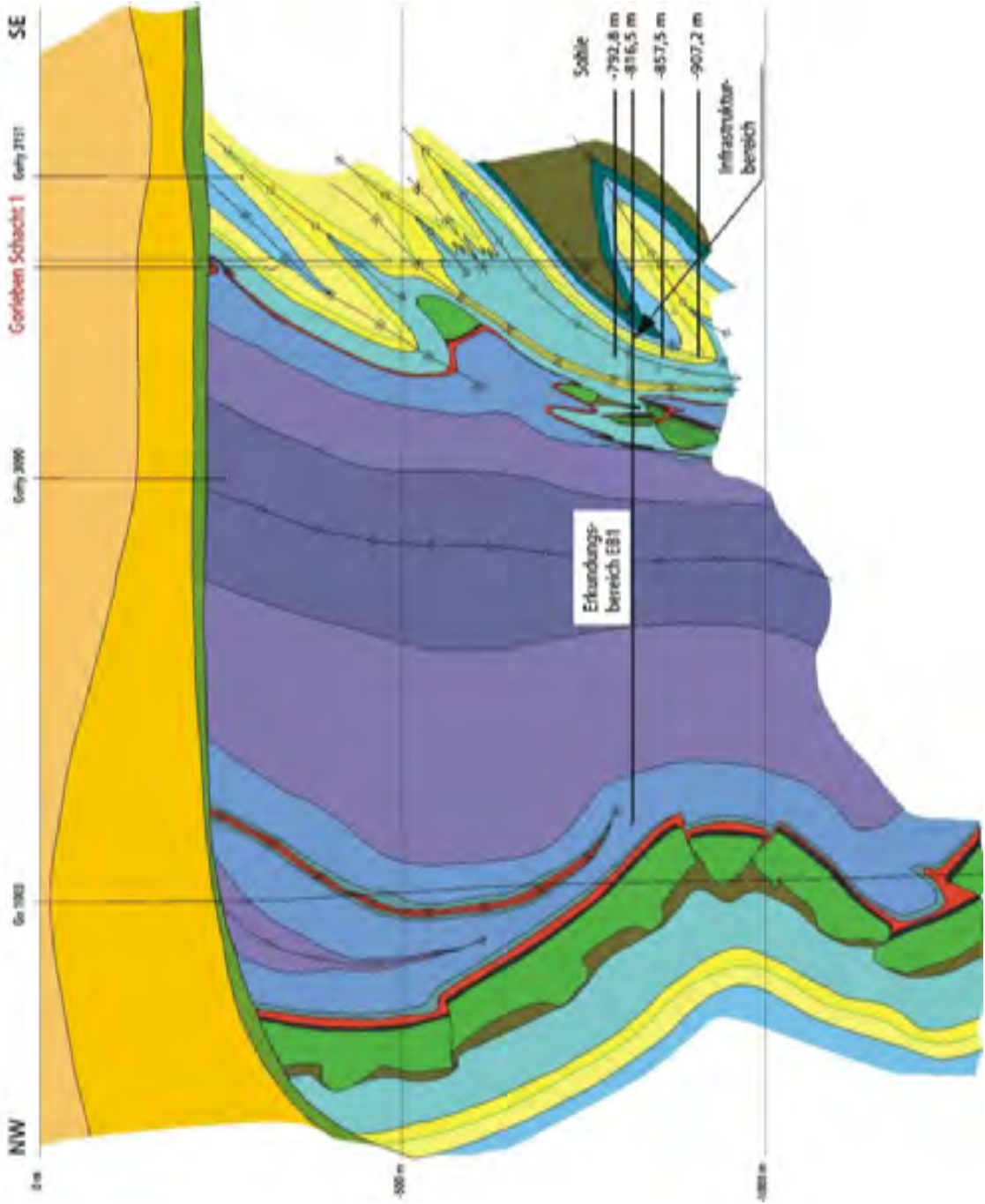
Beispiele für geologische 3D-Modelle und ihre Nutzung (1)

- **Gorleben: Zerblockung
Hauptanhydrit**
- Gorleben: Verteilung/Gehalte
Lösungsvorkommen

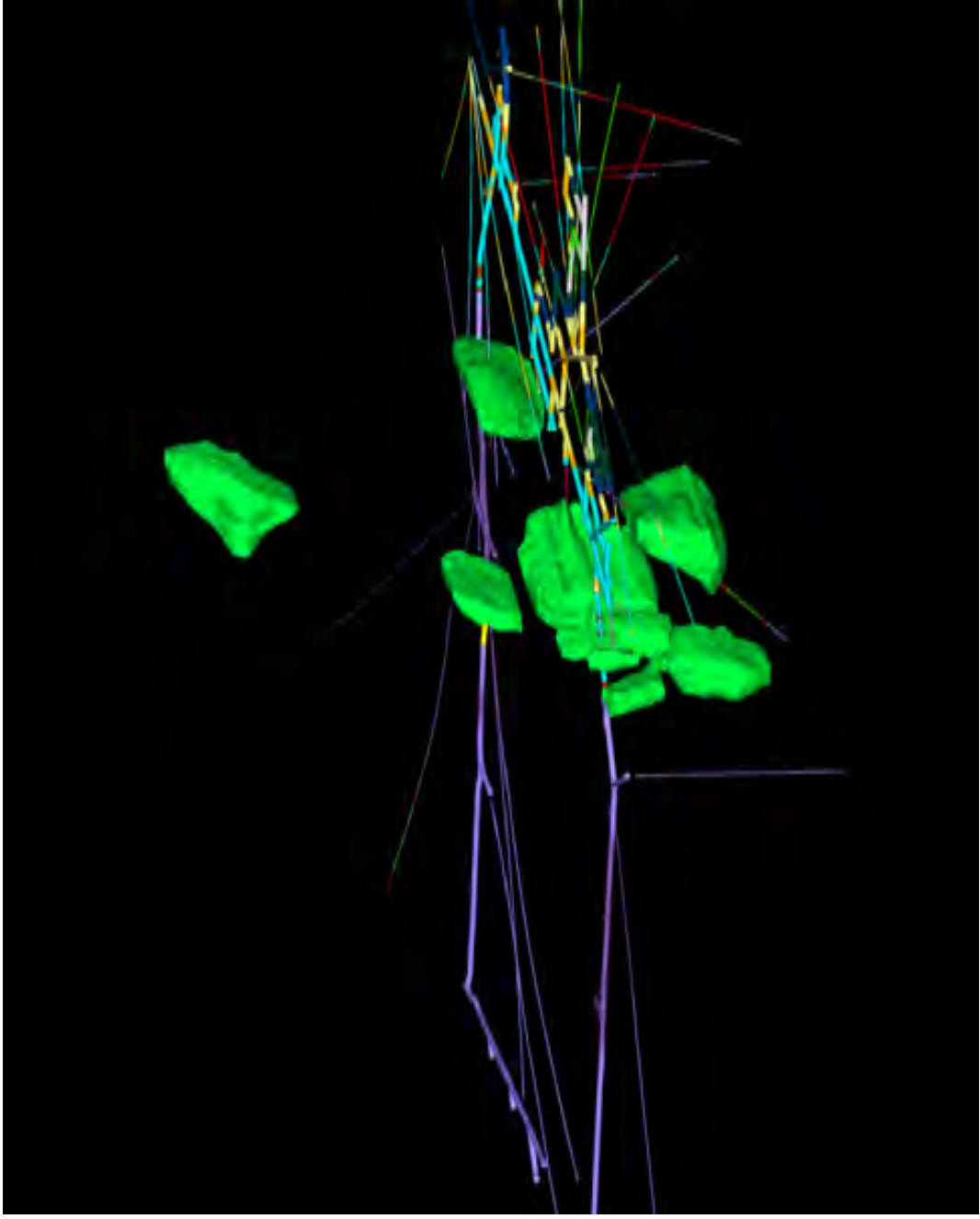
Zerblockung Hauptanhydrit/Anhydritmittel Salzstock Gorleben



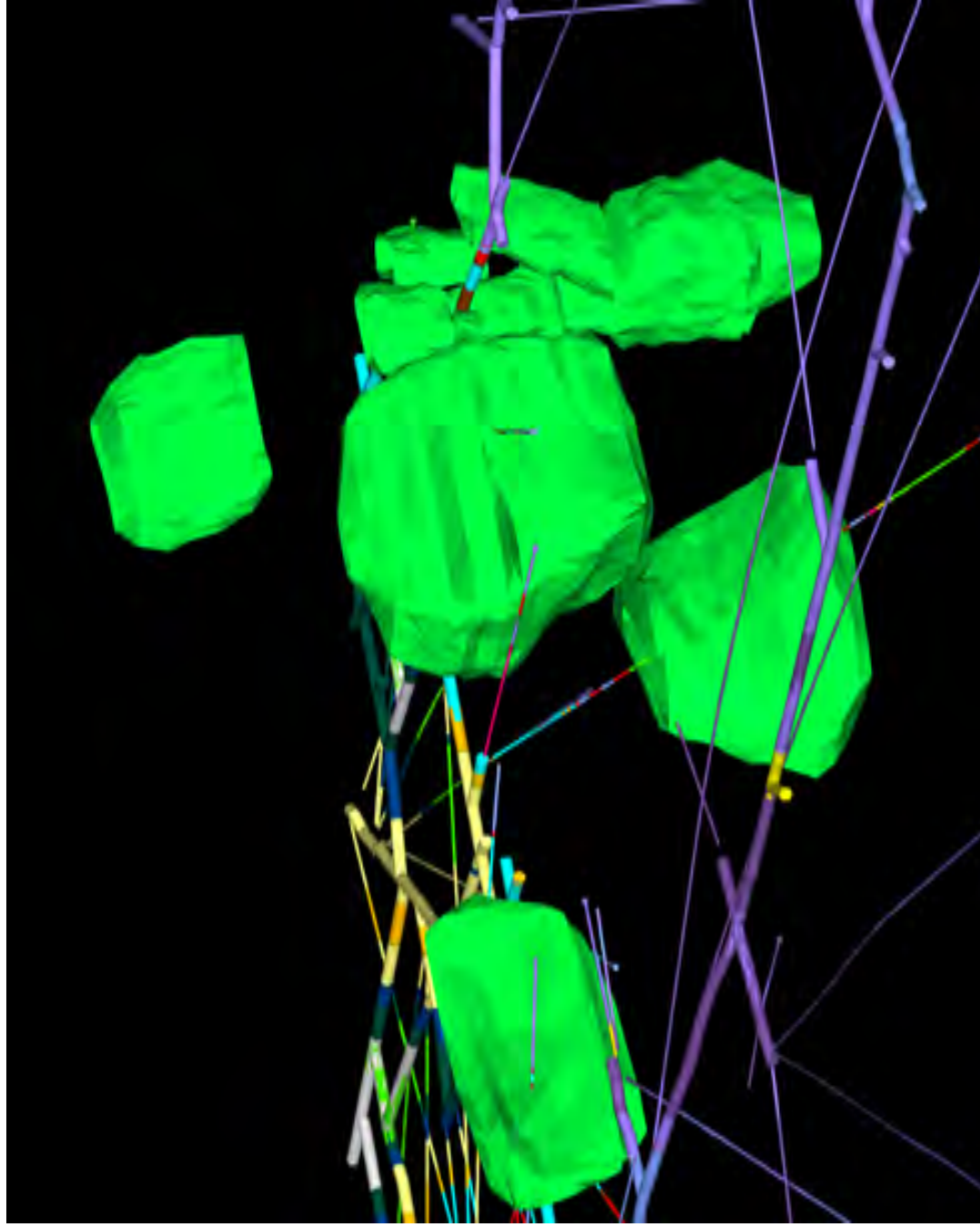
Erkundungsbereich 1 - Vertikalschnitt



Zerblockung Hauptanhydrit Salzstock Gorleben



Zerblockung Hauptanhydrit Salzstock Gorleben



Beispiele für geologische 3D-Modelle und ihre "geologische" Nutzung (2)

➤ Gorleben: Zerblockung
Hauptanhydrit

➤ **Gorleben: Verteilung / Gehalte**
Lösungsvorkommen

Lösungsvorkommen im Salzstock Gorleben



Atomkraftgegner vor dem Salzstock Gorleben (Tagesschau-Archiv)

Aggressive Lauge
Im Salzstock gibt es Wasserflüsse, so genannte Leupenwasser. Diese enthalten extrem aggressive Lauge, die die Abfallmüllbehälter zerschmelzen kann. Die Folge: Radioaktivität könnte ausströmen.

Bohrbohrschächte
Der Salzstock ist ein weiches Stoffen stark zerklüftet und von gleichartigen Schichten und Massen durchzogen. Durch diese Risse können Radioaktivität nach oben in Richtung Grundwasser strömen.

Mangelnde Absicherung
Der Salzstock Gorleben ist nur teilweise durch eine Tondecke vom Grundwasser getrennt. Die so genannte Gorlebener Fliese besteht aus markttauglichem Sand und Kieselsteinen, die an manchen Stellen drückt an den Salzstock stoßen. Dort können giftige, strahlende Radioaktivität aus dem Abfallmüll ins Grundwasser gelangen.

Goldähnliche Fliese
Der Salzstock ist an vielen Stellen stark zerklüftet und von gleichartigen Schichten und Massen durchzogen. Durch diese Risse können Radioaktivität nach oben in Richtung Grundwasser strömen.

LAGE DES SALZSTOCKS
Das Diagramm zeigt die geologischen Schichten: ERKLÜFTUNGSBENGEWÄRK, BRUNNEN, SAND-GRÜBEL-AREAL, WASSER, UMWELT, ALTES STEINSALZ, DEUTSCHER WÜSTEN, ERKLÜFTUNGSSCHICHT, BOHRBOHRSCHÄCHTE, GOLDÄHNLICHE FLIESE, ERKLÜFTUNGSBENGEWÄRK, ERKLÜFTUNGSPROBLEME.

GREENPEACE

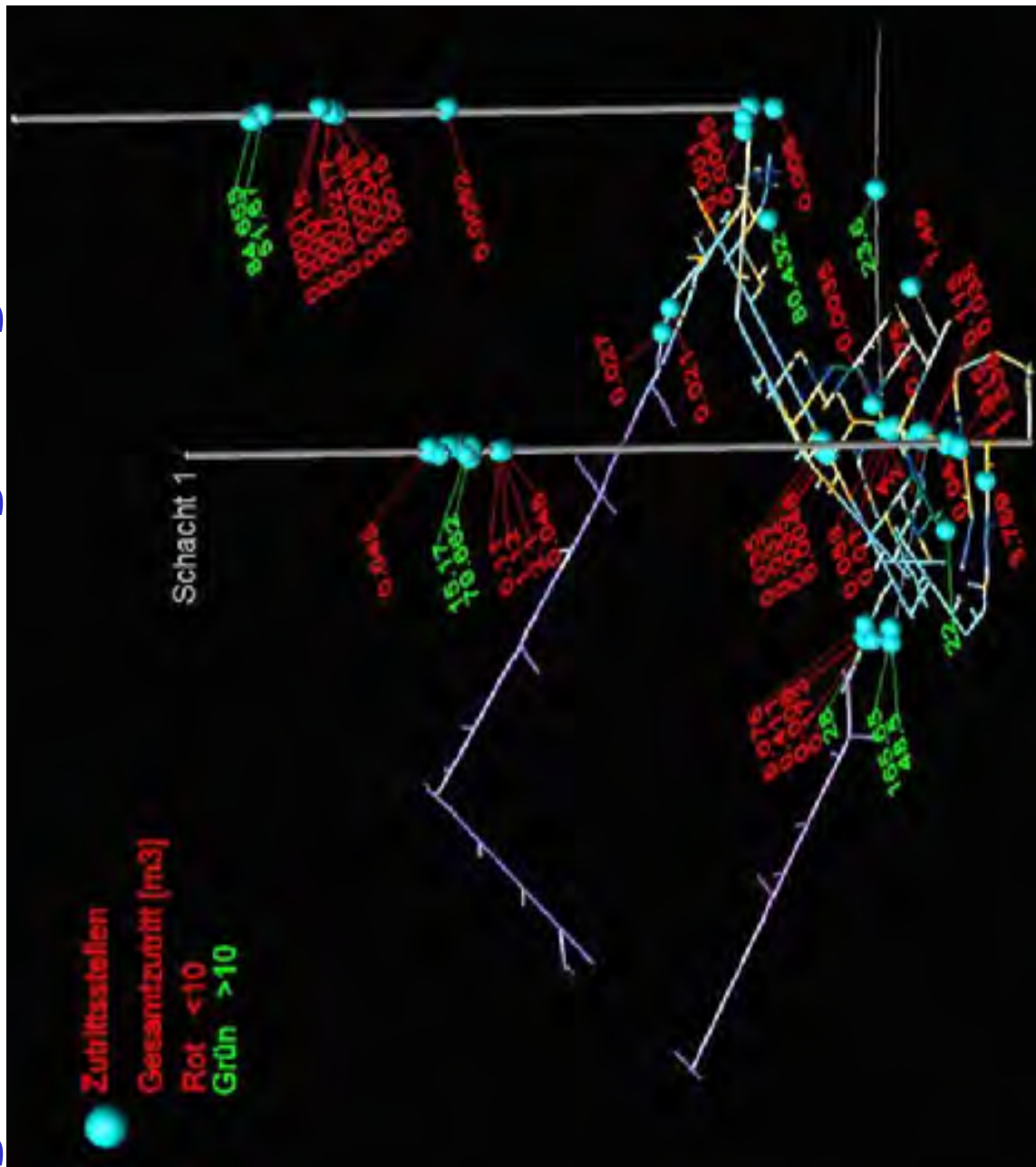
Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen

14./15. Februar 2012, PTKA-WTE, Karlsruhe

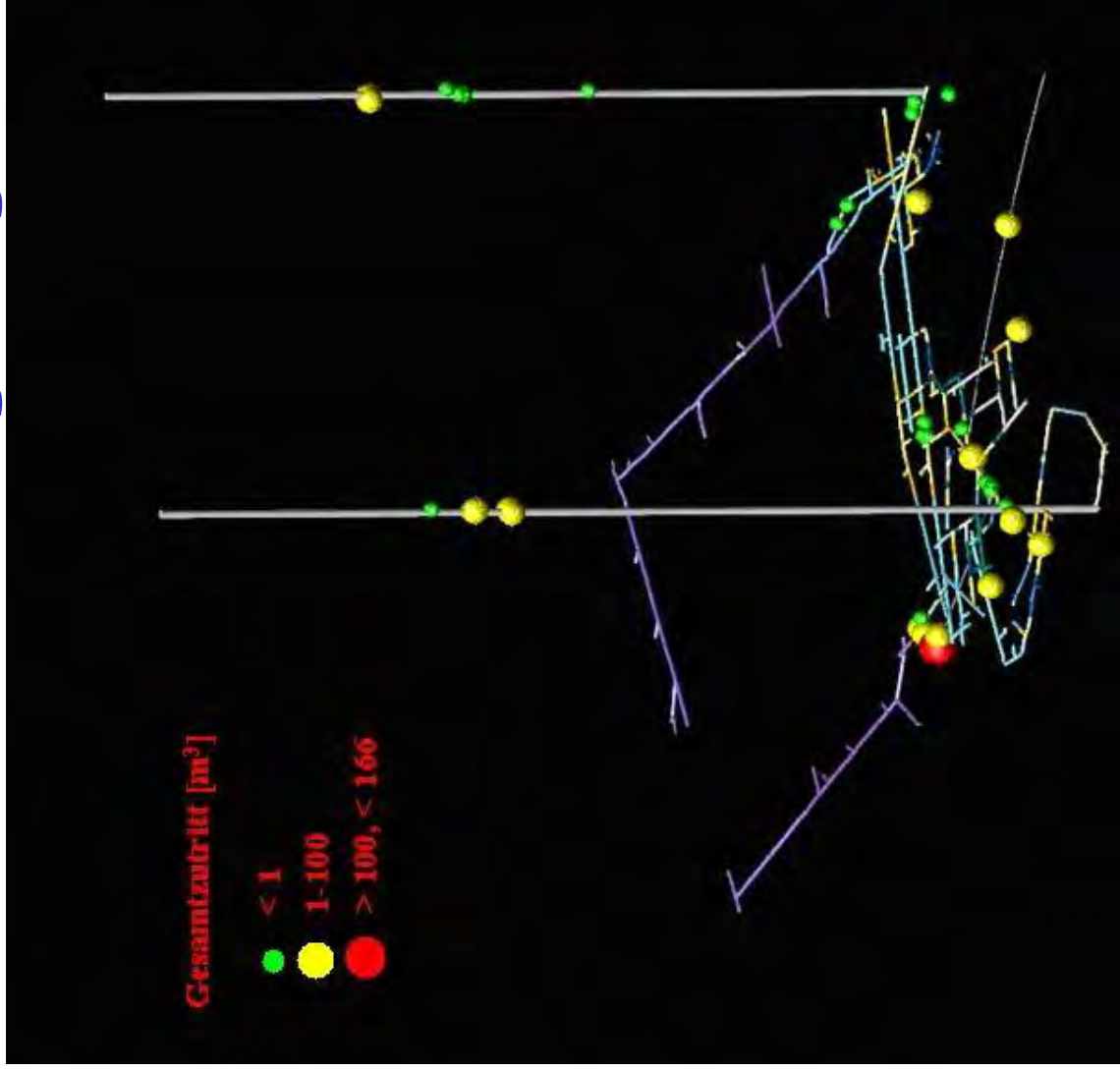
BGR
Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Lösungszutritte Erkundungsbergwerk Gorleben



Lösungszutritte Erkundungsbergwerk Gorleben



Komplexe Abfragen in Datenbanken

```
AND (AlleChemie.Li_NB_ppm > 20)  
AND (AlleChemie.Al_NB_ppm > 0.1)  
AND (AlleChemie.Fe_NB_ppm > 0.2)  
AND (AlleDaten.ArtDerBohrung NOT LIKE '%Anker%')
```

letzte Abfrage entfernen

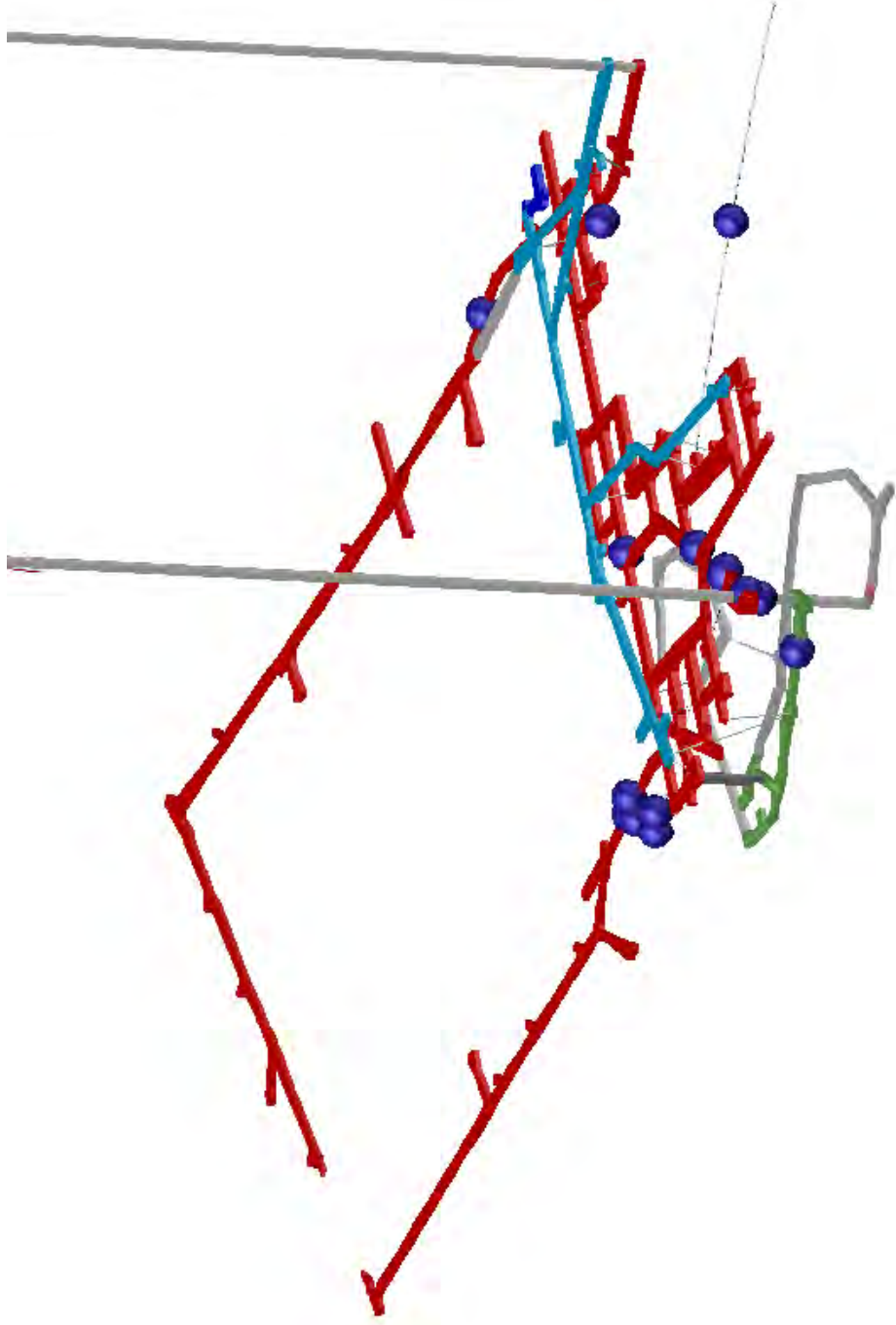
Abfragesatz entfernen

Name

Li>20;Al>0.1;Fe>0.2;NOTAnker_1

Abfragesatz speichern

Abfrageergebnis im 3D-Modell der Gesamtgrube



Beispiele für geologische 3D-Modelle und ihre Nutzung (2)

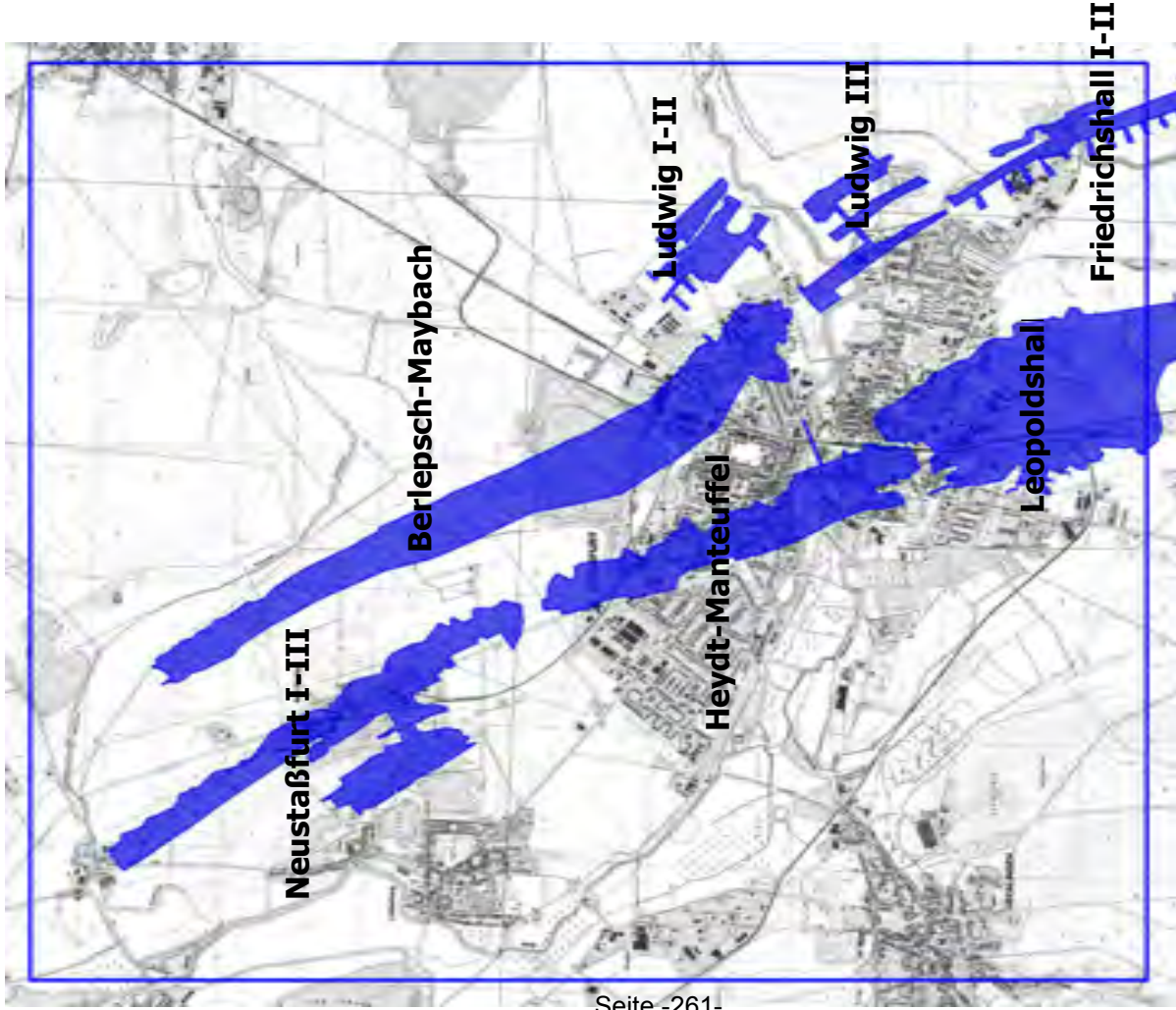
➤ **Staßfurt: Prognose Senkungen**

➤ Gorleben: 3D-numerische Modelle



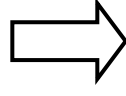
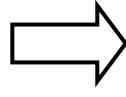
- FONA – „Forschung für Nachhaltigkeit“
- Prognose von Senkungs- und Bruchvorgängen an Tagesoberfläche
- Erstellung eines geologischen 3D Modells vom Staßfurter Sattel mit allen bergmännisch aufgefahrenen Hohlräumen
- Schaffung der Grundlagen für hydrogeologische und geomechanische Modellierungen sowie Zukunftsprognosen des weiteren Senkungs- geschehens

Lage der zu modellierenden Schachtanlagen im Modellgebiet am Staßfurter Sattel



3D-Grubengebäudemodell

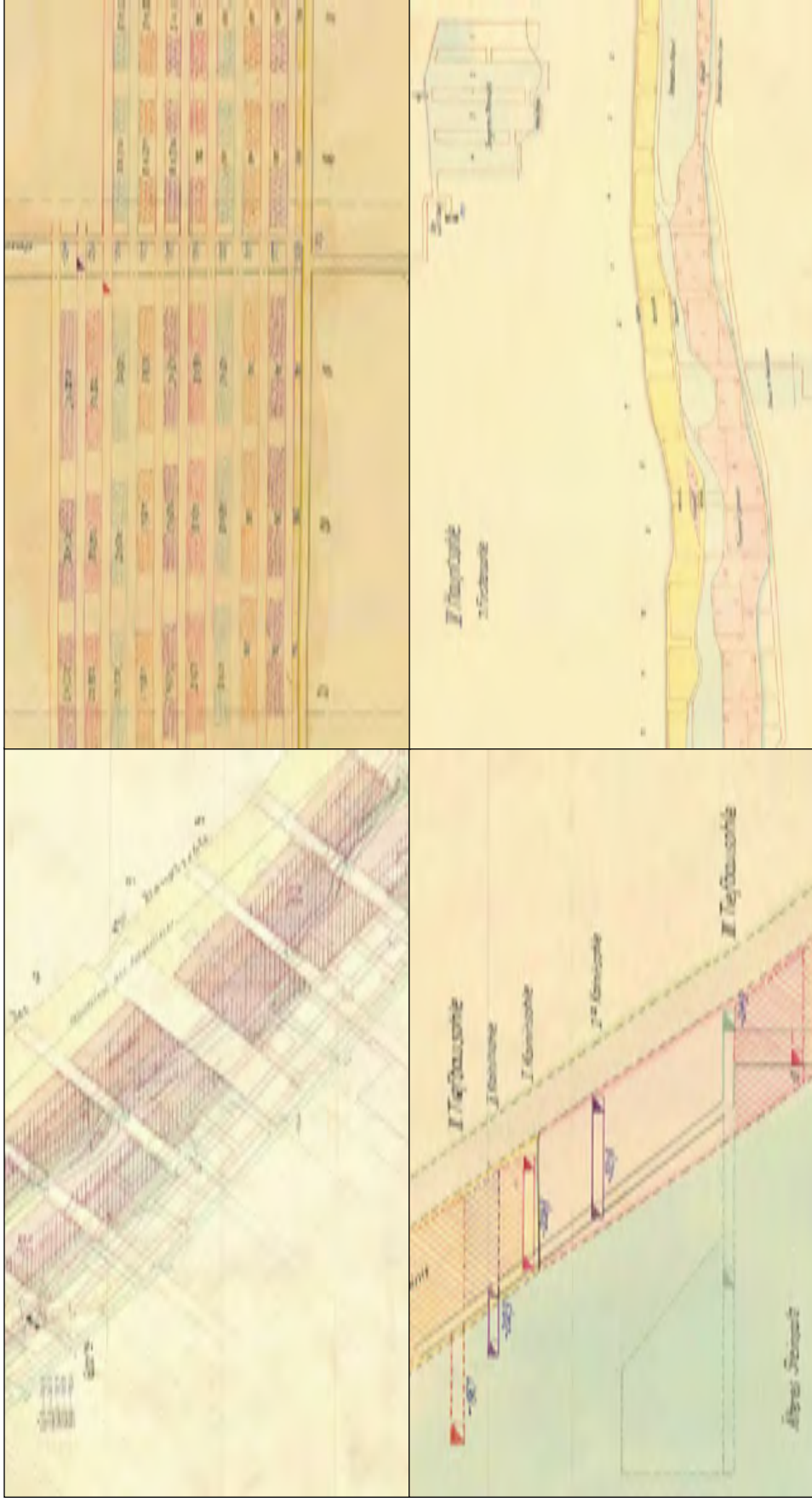
- Zur Erstellung des Grubengebäudemodells werden die ISA-KS-Daten des LAGB genutzt.
- Es handelt sich dabei um digitalisierte und georeferenzierte Originalrissplatten.
- Die Höhenlagen und Abbauhöhen werden dem Risswerk und begleitender Literatur entnommen.



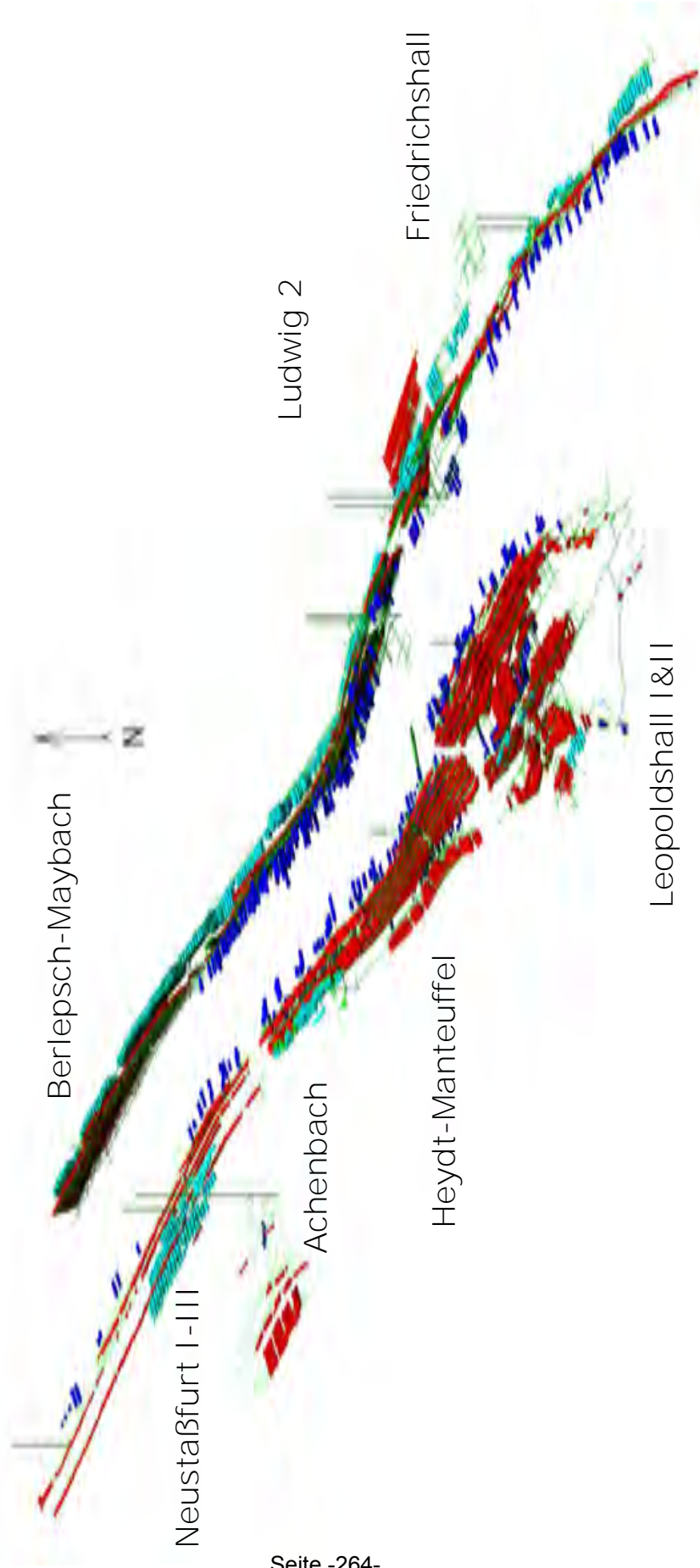
Das Grubengebäudemodell ist Grundlage des geologischen 3D-Modells und der tiefen Strömungsmodellierung (WASY).

Stammdaten (Risswerk)

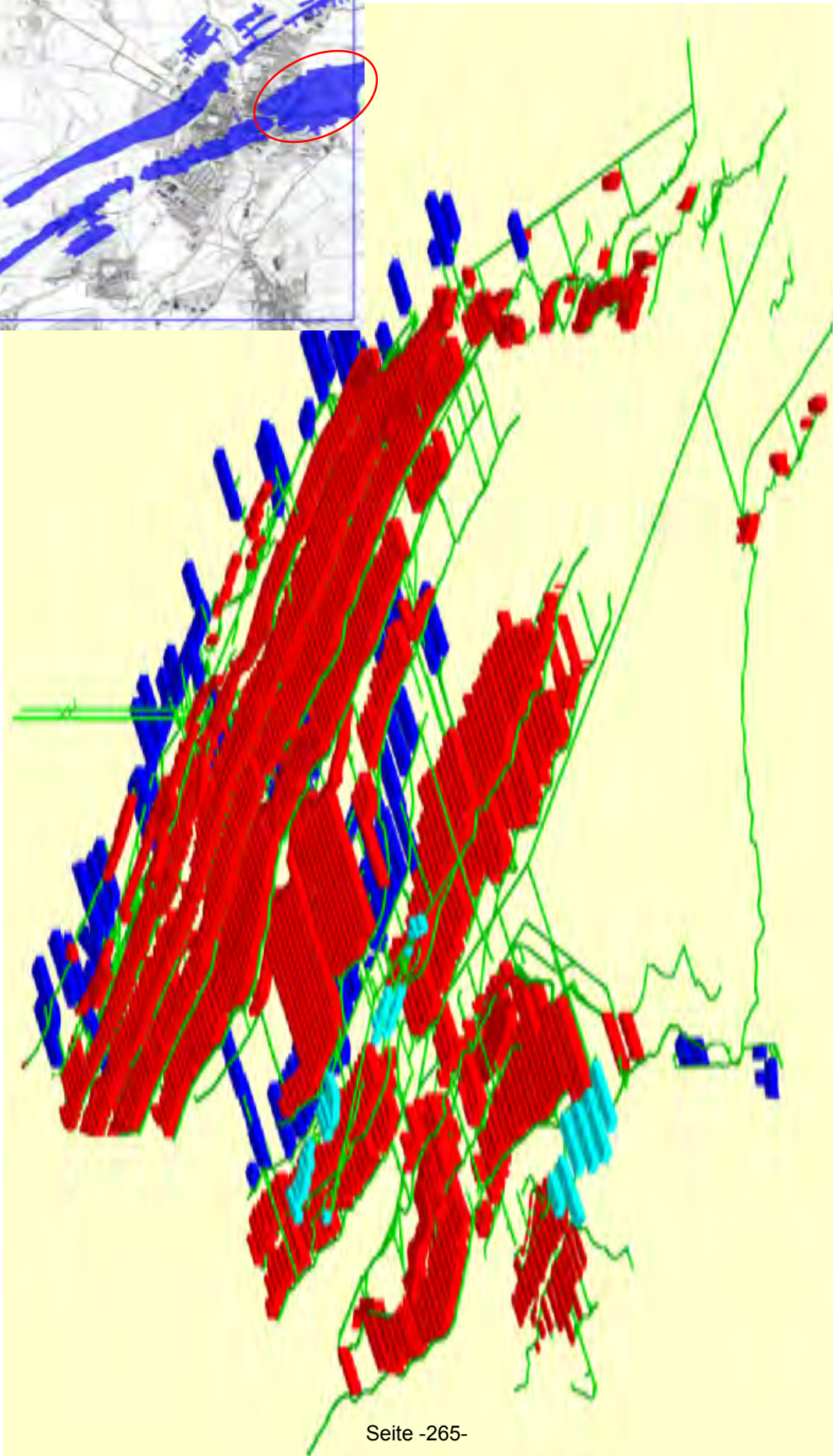
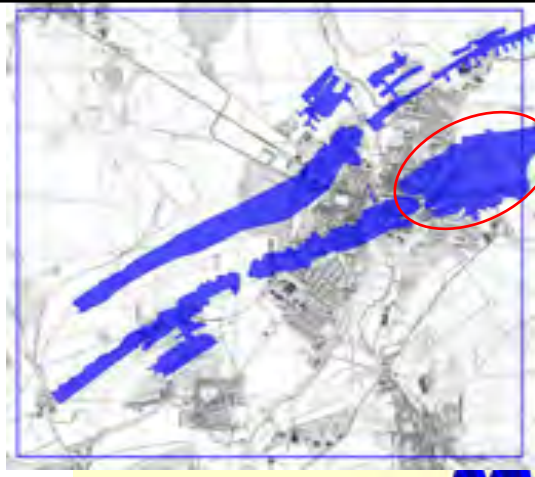
Beispiel: Grube Berlepsch-Maybach



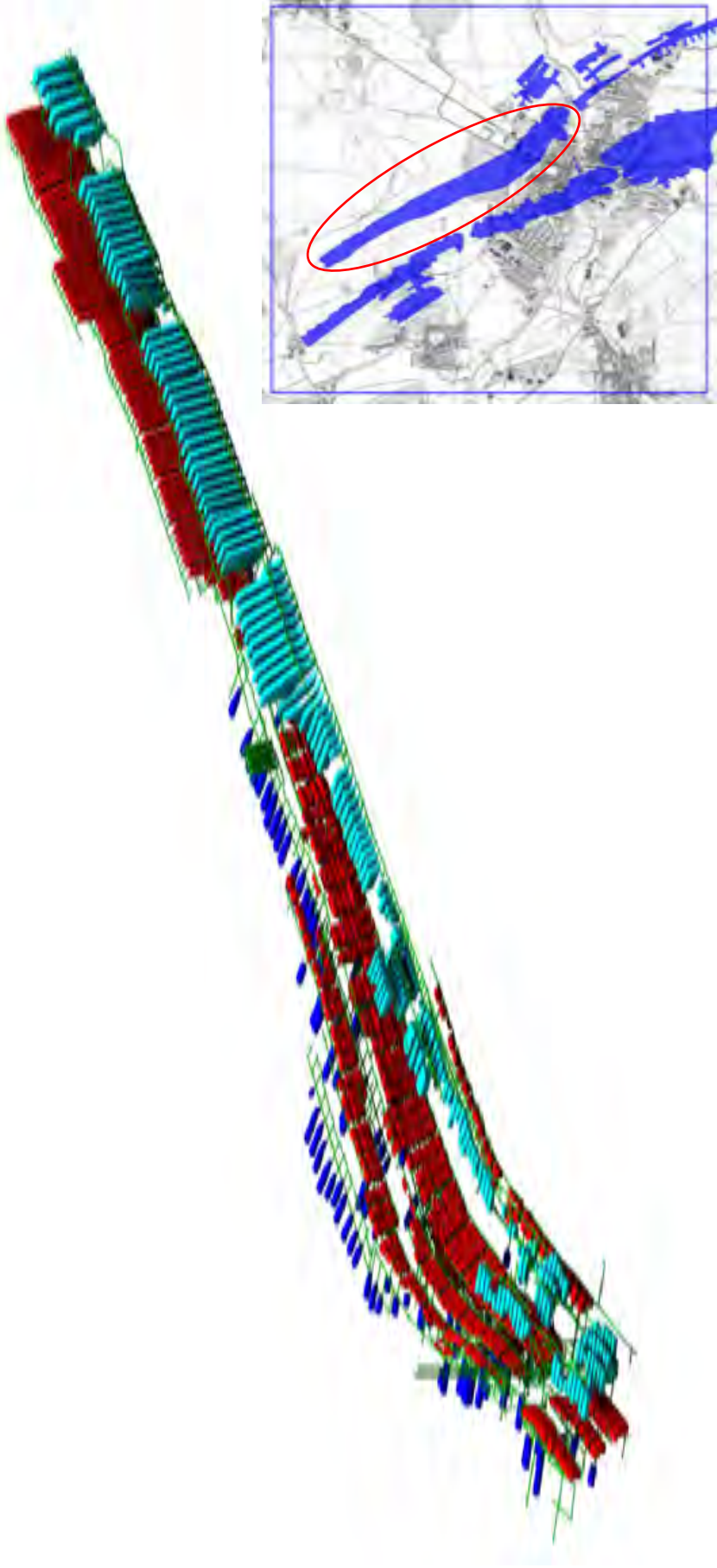
Grubenhohlräummodell



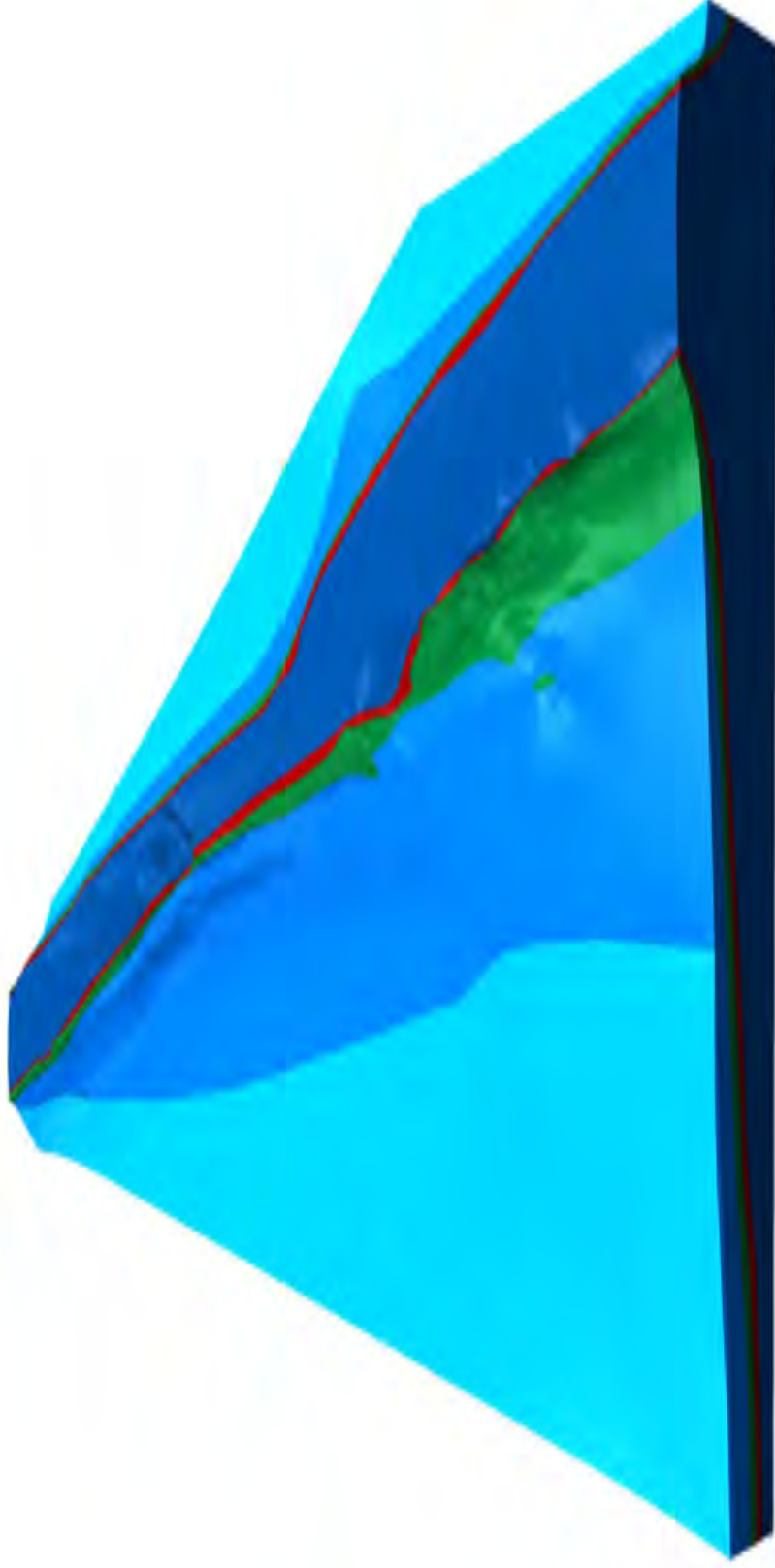
Grube Leopoldshall I & II



Grube Berlepsch-Maybach



Staßfurter Salzattel (Basis Hutgestein)



Staufurter Salzsattel (Quartärbasis)



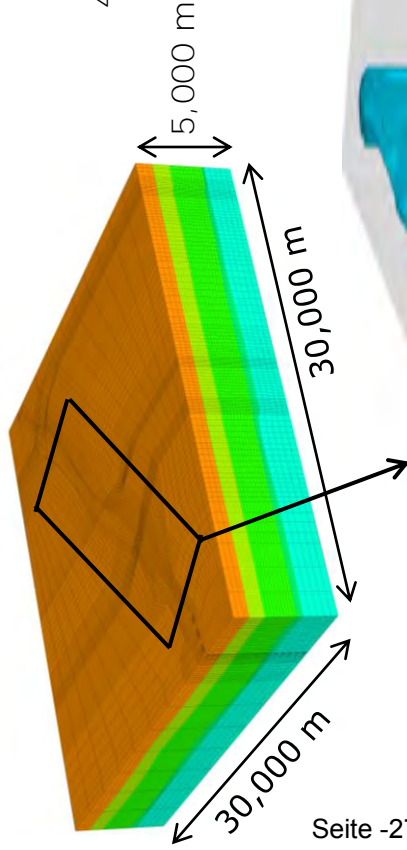
Beispiele für geologische 3D-Modelle und ihre Nutzung (4)

➤ Staßfurt: Prognose Senkungen

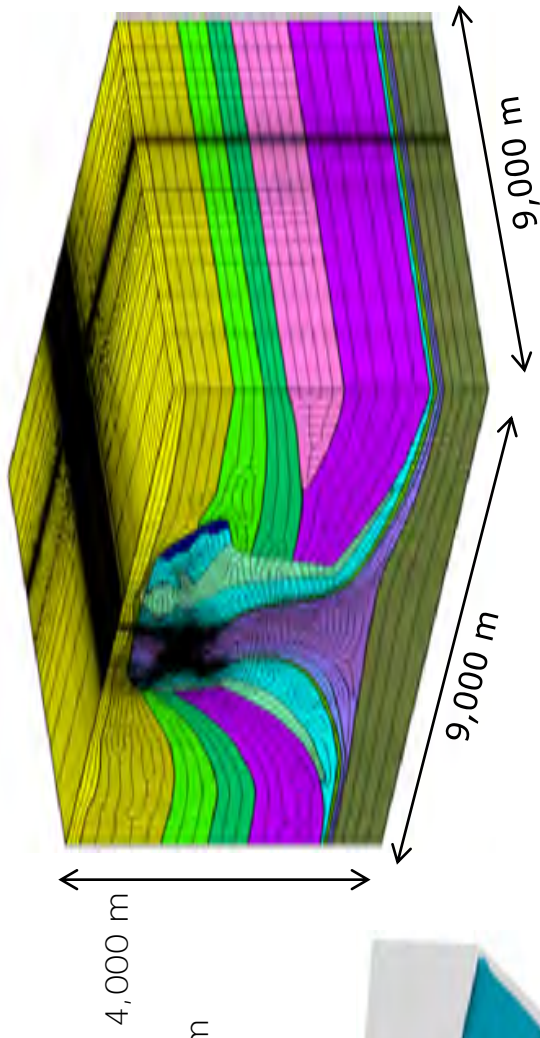
➤ **Gorleben: 3D-numerische
Modelle**

Gorleben: 3D-numerical models

Regional 3D-model of the Gorleben-Rambow structure



Far-field 3D-model of the Gorleben salt dome



Objective:

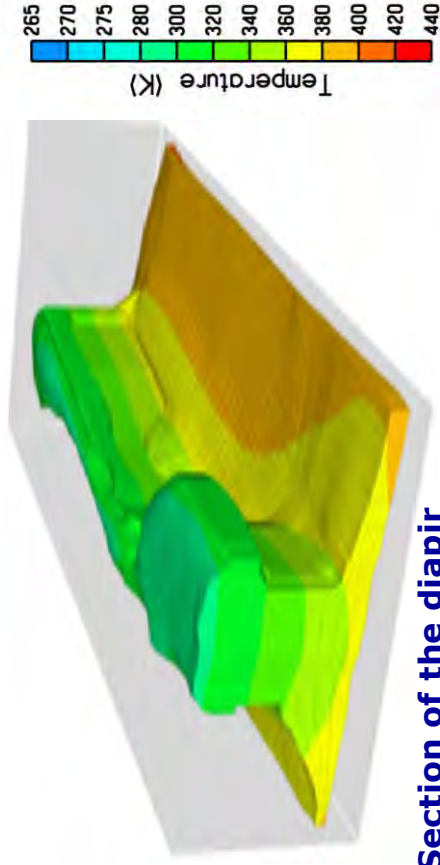
Thermomechanical Analysis of the long-term integrity of the salt barrier regarding the effects of various ice-age scenarios

Objective:

Thermomechanical Analysis of the long-term integrity of the salt barrier regarding the thermal impact caused by the disposal of heat-generating HLW in drifts

Regional 3D-model - Glacial cycle (permafrost)

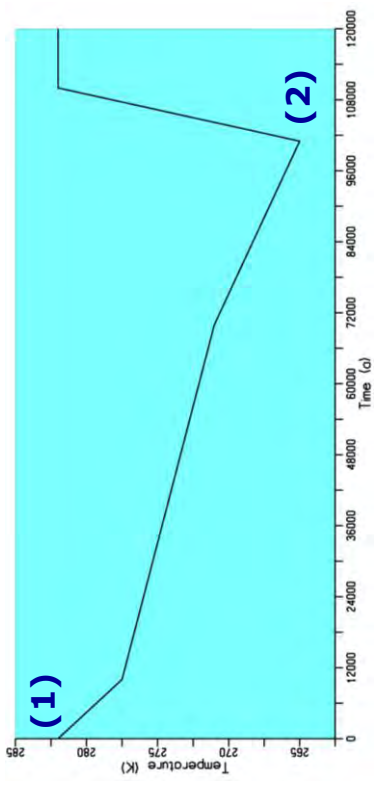
**Interglacial conditions -
Initial temperature distribution (1)**



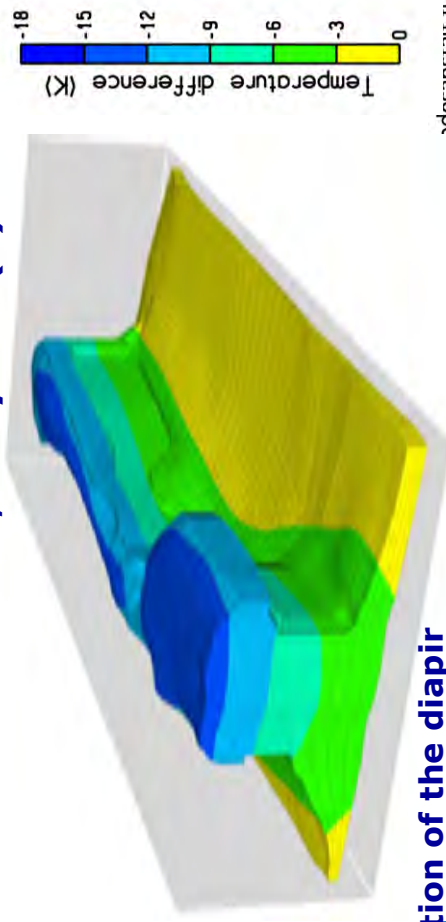
Section of the diapir

Initial temperatures in the salt structure is reached after a time elapse of about 200,000 years.

Evolution of surface temperature

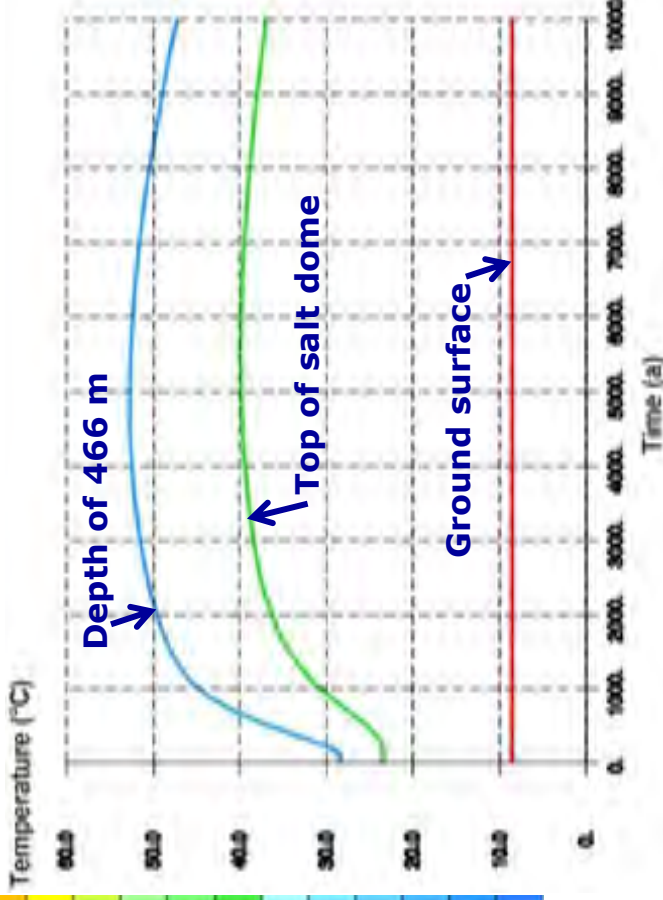
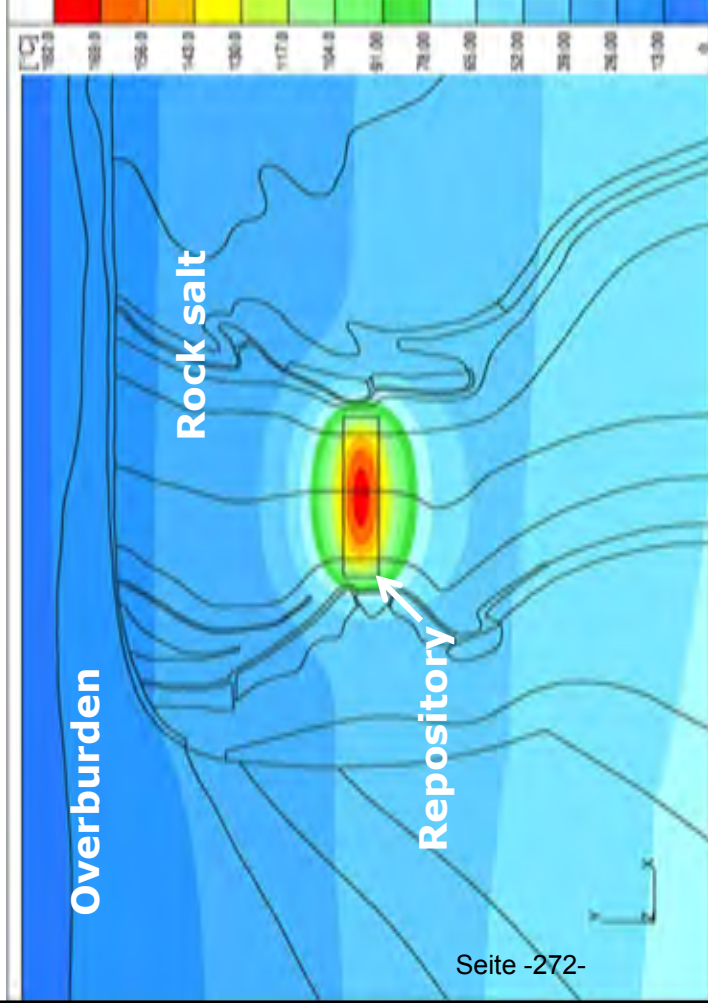


Maximum temperature difference after 100,000 years (2)



**Section of the diapir
in tiefen geologischen Formationen**

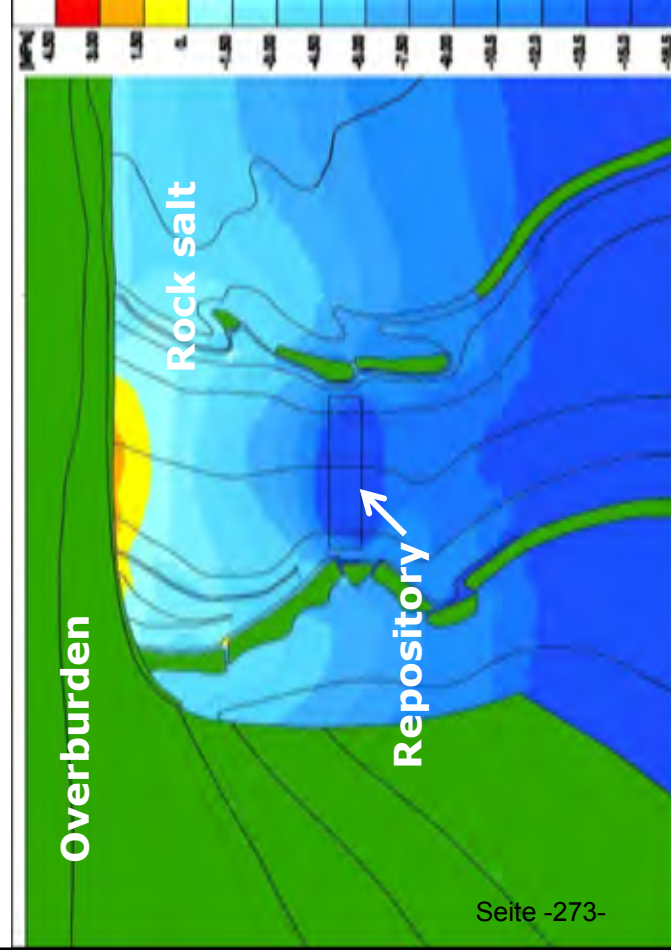
2D-model - Temperatures



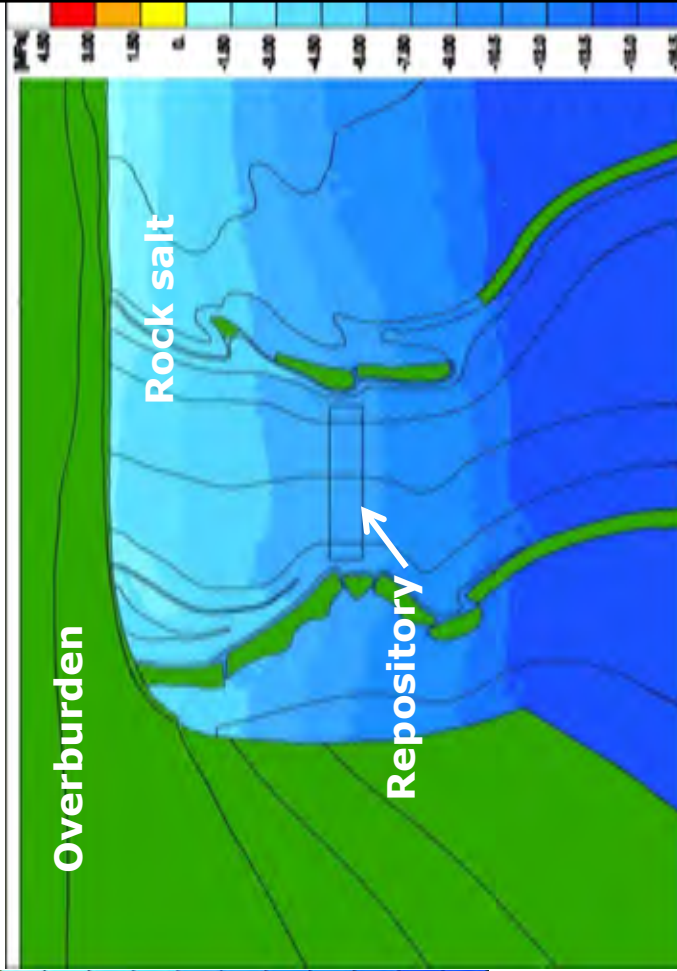
**Predicted temperatures
127.5 years after waste disposal**

**Time history of calculated
temperatures**

2D-model - Evaluation of frac criterion



**Frac-risked zones in the salt barrier
19.7 years after waste disposal**



**Frac-risked zones in the salt barrier
10,000 years after waste disposal**

Nachweis der Integrität der geologischen Barriere von UTD

Dr. Minkley, W.

Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), Leipzig

Nachweis der Integrität der geologischen Barrieren für UTD/UTV und Endlager

W. MINKLEY

IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig

1. *Wissenschaftliche Problemstellung*

Für chemotoxischen und radioaktiven Abfall wird in Deutschland die Entsorgung in tiefen geologischen Formationen mit vollständigem Einschluss angestrebt. Zielstellung dabei ist, die Abfallstoffe möglichst nachsorgefrei und dauerhaft von der Biosphäre fernzuhalten, ein Sicherheitsanspruch, den zuverlässig nur ein geologisches System gewährleisten kann. Das entscheidende Sicherungsglied stellen dabei die geologischen Barrieren dar. Die Geomechanik hat die Aufgabe nachzuweisen, dass die mechanische und hydraulische Integrität der geologischen Barrieren unter den gegebenen geogenen und anthropogenen Randbedingungen im Langzeitprozess dauerhaft erhalten bleiben.

Bei den geomechanischen Beanspruchungen der geologischen Barrieren ist zwischen den planmäßigen, den quasi statischen aus der Hohlraumauffahrung bzw. der Aufheizung des Gebirges resultierenden Einwirkungen und außergewöhnlichen Einwirkungen, z. B. den dynamischen, zu unterscheiden (Abb. 1). Statische und dynamische Beanspruchungen unterscheiden sich deutlich in ihrem Schädigungspotential, wie aus bestehenden Erfahrungen und vorliegenden Forschungsergebnissen zur Prognose der dynamischen Langzeitstabilität von Grubengebäuden im Salinar (FKZ 02C0639/3) hervorgeht.

Für das durch bergmännische Aufschlüsse ungestörte Salinargebirge weisen Untersuchungen die Dichtheit und den Einschluss von Gasen über geologische Zeiträume nach (SIEMANN, 2007). Dass diese grundsätzliche Eigenschaft auch in ausreichend mächtigen Salinargebirgen unter dem konvergenzbedingten, thermomechanisch induzierten Spannungsumlagerungen und Schädigungen um Hohlraumauffahrungen erhalten bleibt, ist durch geomechanische Untersuchungen nachzuweisen.

Unter den gegebenen Randbedingungen, der erforderlichen Isolation der Abfälle über einen für Ingenieurbauten extrem langen Zeitraum (1 Million Jahre), lässt sich ein wissenschaftlich-technischer Nachweis der Langzeitsicherheit nur für ein Bauwerk in einem einfachen, robusten geologischen System führen.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit für ein Endlager zur Entsorgung chemotoxischen und radioaktiven Abfalls ist gesichert zu erbringen, wenn die Wirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches unter extremen Beanspruchungen auf experimenteller Grundlage und durch Analogieschlüsse belegt werden kann.

Hierbei kann in Deutschland auf die praktischen Erfahrungen eines 150-jährigen Kali- und Steinsalzbergbaus und auf Erkenntnisse, die aus Fehleinschätzungen zu ziehen sind, zurückgegriffen werden (BERGMANNSSVEREIN, 2002; EISENBACH & PAULINYI, 1999; FULDA & HAUSKE, 1990).

Von fundamentaler Bedeutung für die Langzeitsicherheit von UTV, UTD und Endlagern in plastisch-viskos reagierenden Gesteinen ist die aus Gebirgsschlägen im Kalibergbau abzuleitende Schlussfolgerung (MINKLEY, 2003):

„Die stärksten bergbauinduzierten dynamischen Beanspruchungen, welche die aus natürlicher Seismizität in Deutschland möglichen Belastungen um ein Vielfaches übertreffen und im

Vergleich mit statischen Beanspruchungen weitaus kritischere Belastungsfälle für die geologischen Barrieren darstellen, sind ab einer bestimmten Mächtigkeit der Salinarbarrieren nicht mehr im Stande deren Integrität und Dichtheit zu verletzen.“

Da die Endlagerung in speziell aufzufahrenden Bergwerken erfolgen soll, bietet die Analyse dieser Ereignisse praktisch Einblicke in geodynamische „Versuchsabläufe“ unter extremen Beanspruchungen im Maßstab 1:1 und stellt somit einen originären Datenfundus zur Ableitung erforderlicher Mindestmächtigkeiten für Salinarbarrieren zur Verfügung.

Für eine in situ gegebene Mächtigkeit einer geologischen Salinarbarriere lässt sich damit gegenüber einem Integritäts- und Dichtheitsverlust eine Sicherheit ausweisen, die letztendlich auf experimentell abgesicherten „Crash-Tests“ mehrere Quadratkilometer großer Grubenfelder basiert, bei denen die umgebenden Barrieren dynamischen Beanspruchungen mit Verrückungen von bis zu mehreren Metern unterworfen worden sind.

Die dabei aufgetretenen dynamischen Beanspruchungen der umgebenden geologischen Salinarbarrieren waren um ein Vielfaches höher, verglichen mit dem seismischen Lastfall beim Durchlaufen von Erdbebenwellen mit der in Deutschland maximal möglichen Stärke. D. h. die großen Gebirgsschläge im Kalibergbau stellen den Extremfall der dynamischen Beanspruchung von abdichtenden Salinarbarrieren dar, der aufgrund des ablaufenden Herdmechanismus mit den großen Gebirgsverrückungen und der Lage des Hypozentrums in der Lagerstätte weit über der Beanspruchung liegt, die sich allein aus der natürlichen Seismizität in Deutschland ergibt.

Bei einem Endlager im Steinsalz ist davon auszugehen, dass bei ausreichender Dimensionierung der Tragelemente sowie Einbettung in Versatz Entfestigungsvorgänge die Systemstabilität nicht beeinträchtigen. Damit ist gewährleistet, dass die Salinarbarrieren um ein Endlager selbst bei einem Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre, geringeren dynamischen Beanspruchungen unterworfen werden, als beim Kollaps eines Grubenfeldes, d. h. Gebirgsschläge stellen in diesem Kontext worst-case-Szenarien dar.

Auf der Grundlage eines Beweissicherungsprogramms zum Verhalten geologischer Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung (FKZ 02C1264) ist der Nachweis der Langzeitsicherheit nach dem Prinzip des dauerhaften Einschlusses auf experimentell gesicherter Datenbasis durch eine größere Anzahl außerplanmäßiger „Großversuche“ in situ durchführbar.

In Deutschland wird sowohl bei der Untertageverwertung (UTV), d. h. dem untertägigen Versatz gefährlicher Abfälle in Salzformationen gemäß Versatzverordnung (VersatzV, 2006) als auch bei der Untertagedeponierung (UTD) gemäß Deponieverordnung (DepV, 2006) der Nachweis des vollständigen Einschlusses der Abfälle verlangt. Vollständiger Einschluss bedeutet, dass unabhängig vom eingelagerten Schadstoffinventar bei wahrscheinlichen und zu betrachtenden weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, wie z. B. Gebirgsschlägen, Erdbeben keine Schadstoffe in das Grundwasser gelangen und eine Beeinträchtigung der Biosphäre auszuschließen ist.

Im Unterschied zu den Radionukliden im radioaktiven Abfall bleibt bei den chemotoxischen Stoffen das toxikologische Gefährdungspotential zeitlich praktisch unverändert. Der Langzeitsicherheitsnachweis zum vollständigen Einschluss für eine UTV oder UTD wird grundsätzlich über einen vergleichbar langen Nachweiszeitraum wie für ein Endlager für radioaktive Abfälle geführt in dem sich auch chemotoxische Stoffe befinden (Chemotox, 2009).

Die zugelassenen und in Betrieb befindlichen UTD und UTV in Deutschland, für die ein Nachweis zum vollständigen Einschluss geführt worden ist, befinden sich alle in flacher Salzablagerung:

- UTD Herfa Neurode
- UTD Zielitz
- UTD/UTV Sondershausen
- UTV Unterbreizbach
- UTV Bernburg
- UTV Teutschenthal
- UTD/UTV Heilbronn

Die vorliegenden praktischen Erfahrungen, wissenschaftlichen Untersuchungsmethoden und Kriterien beim Nachweis der Integrität und Dichtheit der Salinarbarrieren zur Erlangung des vollständigen Einschlusses bei der untertägigen Entsorgung chemotoxischen Abfalls können auch für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen genutzt werden.

Die Untertagedeponien und Untertageverwertungen befinden sich zum Teil in Abbauregionen oder Kalibergwerken in denen in der Vergangenheit wiederholt starke Gebirgsschläge stattgefunden haben. Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA, 1997) fordert deshalb im Rahmen des geotechnischen Standsicherheitsnachweises u.a. eine:

"Rechnerische gebirgsmechanische Modellierung zur Simulation des Beanspruchungszustandes des Gebirges und des Langzeitverhaltens des Einlagerungsbereiches und des Grubengebäudes unter Berücksichtigung ...seismologisch bedingter dynamischer Wirkungen... (Einschätzung der Möglichkeit eines Festigkeits- bzw. Verformungsversagens, seismische Systemstabilität)."

2. Entwicklung von Materialmodellen für Salinargesteine und Schichtflächen

Im Forschungsprojekt FKZ 02C0264 „Untersuchungen (Stoffgesetz-Entwicklung, Modellierung) zum Spröbruchverhalten von Carnallit und seine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von Untertagedeponien“ wurde ein Materialmodell für Salinargesteine entwickelt, mit dem der dynamisch ablaufende Bruchvorgang von Carnallitpfeilern im Abbauhorizont und die daraus resultierenden dynamischen Beanspruchungen der umgebenden geologischen Barrieren quantitativ in Berechnungen analysiert werden konnten (Abb. 2). Das entwickelte Materialmodell wurde durch Nachrechnung von Laborversuchen an spröde versagenden Carnallit-Prüfkörpern und duktil reagierenden Steinsalz-Prüfkörpern sowie von Kriechversuchen und zeitabhängig eingetretenen Entfestigungserscheinungen an Pfeilern validiert (Abb. 3 bis 6). Das Besondere an dem auf der Plastizitätstheorie basierenden Materialmodell mit einer nicht assoziierten Fließregel besteht darin, dass es nicht nur zur Beschreibung der Schädigung im pre-failure Bereich bei Überschreitung der Dilatanzgrenze geeignet ist, sondern darüber hinaus auch die Entfestigung und Lokalisierung von Scherzonen im post-failure Bereich unter dynamischer Beanspruchung abbilden kann.

Das Salinar besteht überwiegend aus dem halitischen Salzgestein Steinsalz, den in den Kaliflözen abgelagerten Salzgesteinen zu denen hauptsächlich Carnallit, Sylvinit und Hartsalz zählen, den anhydritischen nicht kriechfähigen Gesteinsschichten und tonhaltigen Schichten wie Salzton. Das mechanische Verhalten der anstehenden Salinargesteine reicht dabei von duktil und kriechfähig wie Steinsalz über spröde und kriechfähig typisch für Carnallit bis zu spröde und nicht kriechfähig wie Anhydrit. Mit dem am IfG im Rahmen der BMBF-Forschung entwickelten visko-elasto-plastischen Stoffmodell mit Entfestigung und Dilatanz auf Basis der Plastizitätstheorie lässt sich die volle Bandbreite der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Salinargesteine von duktil bis spröde und kriechfähig bis nicht viskos beschreiben. Damit steht ein Instrumentarium für geomechanische Prognoserechnungen zum vollständigen Einschluss bei der Endlagerung im Salinar zur Verfügung.

Salzformationen sind aufgrund der zyklischen, sedimentären Ablagerung durch einen schichtartigen Aufbau gekennzeichnet. Die Schichtflächen beeinflussen das mechanische und hydraulische Verhalten des Salinars (Abb. 7). Um diesen Aspekt in die Betrachtung einzubeziehen, wurde im Forschungsprojekt FKZ 02C0892 „Langzeitstabilität von Grubengebäuden im Salinar unter Berücksichtigung von Diskontinuitäts- und Schichtflächen“ ein spezielles Schermodell mit verschiebungs- und geschwindigkeitsabhängiger Entfestigung unter Einbeziehung der an salinaren Schichtflächen wirksamen Adhäsions- und Kohäsionskräfte entwickelt (Abb. 8 bis 11).

Auf der Grundlage dieser Entwicklungsarbeiten zur Beschreibung des komplexen mechanischen Verhaltens von Salinargesteinen und Schichtflächen/Diskontinuitäten war es möglich den dynamischen Ablauf von Versagensvorgängen (Gebirgsschlägen) in geomechanischen Berechnungsmodellen zu simulieren (MINKLEY & WÜSTE, 2008) und die Wirkungen auf die umgebenden geologischen Barrieren zu studieren. Zielstellung dabei waren Prognosen zum Integritätsverhalten der geologischen Barrieren für UTD/UTV, die von dynamischen Ereignissen betroffen waren, wie zum Beispiel die Grube Teutschenthal 1996 oder für die derartige Beanspruchungen zukünftig nicht auszuschließen sind (FKZ 02C0639/3 „Prognose der dynamischen Langzeitsicherheit von Grubengebäuden im Salinar“).

3. Analyse des Integritätsverlustes von Salinarbarrieren unter dynamischen Beanspruchungen

In Tabelle 1 sind Versagensfälle geologischer Barrieren durch dynamische Beanspruchung zusammengestellt. Gebirgsschläge stellen bezüglich der Beanspruchung der umgebenden geologischen Barrieren worst-case-Szenarien dar:

- Unter dynamischen Beanspruchungen sind die viskosen Gesteinseigenschaften nicht wirksam, so dass größere deviatorische Belastungen hervorgerufen werden (Abb. 12) mit der Folge einer weitreichenderen Verletzung des Dilatanzkriteriums (Abb. 13)
- Bei plötzlichen Gebirgsverrückungen können große elastische Entspannungen auftreten, ein Spannungsausgleich durch Kriechen findet nicht statt, mit der Folge einer Verletzung des Frac - Kriteriums

Tabelle 1: Versagensfälle geologischer Barrieren durch dynamische Beanspruchung

Grube / Gebirgsschlag	Magnitude ML	Mächtigkeit Barriere (m)	Barriere-Gestein
Leopoldshall 1879	3	25	Kainit Grauer Salzton (Hangendbarriere)
Völkershausen 1989	5,6	28	Steinsalz (Liegendbarriere)
Retsof Salt Mine 1994	3,6	50	Karbonatgesteine Tonschiefer (Hangendbarriere)

Weltweit sind im Kali- und Steinsalzbergbau 12 Gebirgsschläge bekannt geworden mit Magnituden im Bereich $M_L = 3...5,6$ und Absenkungen des Deckgebirges im Dezimeterbe-

reich bis zu mehreren Metern. Die Bruchvorgänge sind hauptsächlich im Carnallit eingetreten, in einem Fall in einer Trona (sprödes karbonatisches Salzgestein) abbauenden Grube in den USA, einer Sylvinit/Carnallit abbauenden Grube in Russland und einer Steinsalzgrube in Frankreich (MINKLEY, 2004a).

Bei dem bislang stärksten jemals im Bergbau ausgelösten seismischen Ereignis, dem Gebirgsschlag Völkershäuser 1989, hat die liegende Steinsalzbarriere ihre Integrität verloren (Abb. 14), obwohl die deviatorische Beanspruchung der hangenden Salinarbarriere größer war. Für die Schutzwirkung im Hangenden von Vorteil waren die größere Mächtigkeit und der geschichtete Aufbau in Form eines Multi-Barrierensystems aus ca. 180 m Steinsalz und ca. 40 m Salzton und Tongesteinen.

Im Gebiet der Feldatal-Störung, mit der flächenhaften Ausdünnung des Unteren Werra-Steinsalzes auf weniger als 30 m unter dem östlichen Bruchfeldrand, wurden infolge der dynamischen Beanspruchung sowohl das Dilatanzkriterium als auch das Frac-Kriterium verletzt. Die in größerer Entfernung von der Kammersohle eintretenden Dilatanzbeträge im Unteren Werra-Steinsalz sind relativ gering, so dass die Permeabilität allein durch den Auflockerungseffekt nur marginal erhöht worden wäre. Entscheidend für das Versagen der Liegendenschutzschicht sind die dynamisch hervorgerufenen Spannungsumlagerungen unter dem östlichen Bruchfeldrand, wo der kettenreaktionsartige Pfeilerzerstörungsvorgang zum Stehen gekommen ist (MINKLEY, 2004b). Nach Durchlaufen der Druckwelle vor der Bruchfront fällt verbunden mit dem Konvergenzsprung im Abbauhorizont und der Stützfunktion des mehrere hundert Meter breiten Abbaufreibereiches die minimale Hauptspannung an der Basis des Unteren Werra-Steinsalzes im Gebiet der Ausdünnung unter dem östlichen Bruchfeldrand schlagartig um etwa 15 MPa auf wenige MPa ab (Abb. 15).

Das Subsalinar wurde seit Jahrzehnten zur Förderung von vulkanisch akkumulierten CO₂ genutzt. In den Bohrungen Schorngraben 2 und 3 wurde ein CO₂-Gasdruck von 7...7,5 MPa angetroffen.

Aus dem berechneten Spannungsfeld nach dem Gebirgsschlag wird deutlich, dass der Sicherheitsfaktor gegenüber einem Frac-Vorgang der liegenden Steinsalzbarriere im Bereich der Ausdünnung des Unteren Werra-Steinsalzes durchgehend vom Niveau der Abbausohle bis zur Oberkante des Unteren Werra-Anhydrits (A1) mit $n_{\text{FRAC}} \leq 0,5$ weit unter 1 liegt (Abb. 16). Bei anstehendem Gasdruck an der Basis des Unteren Werra-Steinsalzes in der angegebenen Größenordnung musste es zwangsläufig infolge des Gebirgsschlages in besagtem Gebiet aufgrund der dynamisch ablaufenden starken Liegendenspannung zu einem Gasfrac kommen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SR 2470 „Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept“ (IfG, 2007) ist der Zustand der beim Gebirgsschlag 1989 durch Gas-Frac undicht gewordenen liegenden Steinsalzbarriere untersucht worden. In einer 240 m langen Horizontalbohrung Hz 156 im Unteren Werra-Steinsalz wurden im Gebiet der ehemaligen CO₂-Durchtrittszone verheilte und offene Gas-Fracrisse erbohrt. Die Orientierung der Risse entspricht der berechneten Richtung der größten Hauptspannung (Abb. 17).

Mit einer am IfG speziell entwickelten 3-Kreis-Doppelpackersonde (80 mm) wurden Fracmessungen entlang der 240 m langen Bohrung durchgeführt. Für den vom Gas-Frac betroffenen Bereich an der Basis des Unteren Werra-Steinsalzes am östlichen Bruchfeldrand ist die kriechbedingte Zunahme der minimalen Hauptspannung nach dem Gebirgsschlag mit dem visko-elasto-plastischen Modell berechnet worden. Ausgehend vom entspannten Zustand von einigen Megapascal wenige Sekunden nach dem Gebirgsschlag (Abb. 15), der zum Gas-Frac geführt hat, folgt aus der Berechnung für einen Zeitraum von 14 Jahren ein Anstieg auf fast 10 MPa. Die Extrapolation bis zum Zeitpunkt der Spannungssondierung 2007, d. h. 18 Jahre nach dem Gebirgsschlag, führt auf eine Einspannung an der Basis des

Unteren Werra-Steinsalzes um 10 MPa. Die in der Bohrung Hz 156 gemessenen minimalen Hauptspannungen im Niveau 10 m über der Basis des Unteren Werra-Steinsalzes liegen größtenteils im Bereich zwischen 11...14 MPa.

Auf der Basis dieser Untersuchungs- und Berechnungsergebnisse konnte die Entscheidung getroffen werden, die nach dem Gebirgsschlag aufgenommene Abförderung von CO₂ und Salzlösungen aus dem Unteren Werra-Anhydrit (A1) einzustellen. Die Förderbohrungen Hz 154/99 und Hz 143/4 wurden am 12.02.2007 verschlossen. Trotz eines Fluiddruckaufbaus bis auf ca. 40 bar unter dem östlichen Bruchfeldrand im Unteren Werra-Anhydrit (A1) ist die liegende Steinsalzbarriere dicht geblieben.

Dieser einmalige Großversuch in situ belegt die Wiederherstellung der Barriereintegrität im Steinsalz nach einem durch dynamische Entspannung induzierten Gas-Frac und demonstriert das Selbstabdichtungspotential von Steinsalz.

Mit Auffahrung einer Wetterstrecke über dem Gebirgsschlagsfeld von 1996 in der Grube Teutschenthal (Abb. 18), die seit Mitte 2005 durchschlägig ist, waren einmalige Voraussetzungen für Untersuchungen der Schädigungsauswirkungen in der hangenden Salinarbarriere über einem Bruchfeld gegeben (FKZ 02C1264 „Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss“).

Die geologische Hangendbarriere aus Rotem Salzton und Leine-Steinsalz über dem zusammengebrochenem Ostfeld der Grube Teutschenthal hat insgesamt eine Absenkung von 1,3 m erfahren, wovon 0,5 m in wenigen Sekunden während des Gebirgsschlages eingetreten sind.

Der dynamische Bruchvorgang konnte mit dem entwickelten visko-elasto-plastischen Entfestigungsmodell (Pkt. 2) in seinen wesentlichen Erscheinungsformen, wie Auslösemechanismus durch lokales Pfeilerversagen, Herddauer von wenigen Sekunden, Lokalmagnitude um 5, Deckgebirgsabsenkung um 0,5 m und kettenreaktionsartige Ausdehnung des Bruchvorganges auf das gesamte Ostfeld vorausberechnet werden (MINKLEY & MENZEL, 1999).

Durch den Implosionsvorgang beim Zusammenbruch des im Carnallit des Flözes Staßfurt aufgefahrenen Kammer-Pfeiler-Abbausystems ist in der hangenden Salinarbarriere über dem kollabierenden Ostfeld plötzlich eine Entspannung eingetreten. Die mit dem visko-elasto-plastischen Modell durchgeführten Berechnungen liefern für die minimale Hauptspannung an der Oberkante des 50 m mächtigen Leine-Steinsalzes Na3 einen Spannungsabfall von bis zu 10 MPa über der Bruchfeldkante. Über dem Bruchfeld fällt die Entspannung geringer aus. Wendet man das allgemein akzeptierte Frac-Kriterium auf die hangende Salinarbarriere an, welches der minimalen Hauptspannung den in der Teufe wirkenden Fluiddruck gegenüber stellt, so zeigt sich ohne Ansatz einer hydraulischen Aufreißfestigkeit eine durchgehende Verletzung des Integritätskriteriums innerhalb der 65 m mächtigen Barriere über der Bruchfeldkante.

Frac-Versuche an Rotem Salzton aus der benachbarten Grube Angersdorf (Abb. 18) unter triaxialen Einspannungsbedingungen mit minimalen Hauptspannungen, wie sie sich während des Gebirgsschlages in der hangenden Salinarbarriere eingestellt haben, liefern Aufreißfestigkeiten die deutlich über der minimalen Einspannung liegen. Bei Ansatz einer Aufreißfestigkeit des Roten Salzton von 4 MPa ist das Frac-Kriterium im Roten Salzton nicht mehr verletzt und die 15 m mächtige Salztonschicht dichtet das unterlagernde Leine-Steinsalz temporär ab.

Der Rote Salzton hat damit während und nach dem Bruchvorgang eine temporäre Dichtfunktion übernommen. Dem Multi-Barrierensystem aus Salzton/ bzw. Ton und Steinsalz ist es zu verdanken, dass bei dem Dutzend implosionsartiger Feldeszusammenbrüche in flacher La-

gerung mit Entspannungsvorgängen in den umgebenden Salinarbarrieren in keinem Fall Zuflüsse aus dem Hangenden eingetreten sind.

In dem kompakten, spröde reagierenden Hauptanhydrit unmittelbar über dem Kaliflöz K2 sind stärkere Schädigungen eingetreten (Abb. 19). Über der Bruchfeldkante hat sich eine Scherzone entwickelt, die von der Unterkante des Grauen Salzton T3 bis in die Mitte des A3/T3-Schichtpaketes hoch reicht und schichtparallel über dem Bruchfeld verläuft.

Unabhängig von der Kenntnis dieses Berechnungsergebnisses wurde im Verbundvorhaben „Problemzonen im Salinar“ FZK: 02C1325 von UCHTMANN, et al. (2007) durch Georadarmessungen über der westlichen Bruchfeldgrenze ein deutlicher Reflektor im Hauptanhydrit A3 gefunden, der vermutlich durch den Bruchvorgang aufgeweitet, evtl. laugeführend ist und sich außerhalb des Bruchfeldes verliert (Abb. 19). Die geöffnete Schicht über dem Bruchfeld im Hauptanhydrit wird als dünne karbonathaltige Schicht interpretiert.

Ein weiteres Berechnungsergebnis mit dem visko-elasto-plastischen Modell sind markante Schädigungen in Form von Rissen ausgehend von der Oberkante des Hauptanhydrit A3 über dem Bruchfeldrand bzw. im unmittelbaren Vorfeld (Abb. 19).

Über der östlichen Bruchfeldkante ist zum Einbau einer Wetterschleuse ein südlich verlaufender Bypass zur Wetterstrecke aufgeföhren worden. Infolge des Anstiegs der Schichten nach Süden ist in der Sohle der Umföhrunsstrecke der Hauptanhydrit angefahren worden, wobei es zum Zufluss von Salzlösungen kam. Der noch heute anhaltende Zufluss von mehreren Kubikmetern am Tag wird vermutlich durch das beim Gebirgsschlag aufgerissene und vernetzte Bruchsystem im Hauptanhydrit gespeist. Die Lage der Zuflussstelle steht in Übereinstimmung mit den berechneten stärksten Schädigungsauswirkungen und der Ausbildung von Scher- und Zugrissen im kompakten Hauptanhydrit über der Bruchfeldkante (Abb. 19).

Im Rahmen des Vorhabens FKZ 02C1264 wurden entlang eines 1800 m langen W-E-Profiles der Wetterstrecke (Abb. 20) 19 Horizontalbohrungen im Leine-Steinsalz Na3 gestoßen. Die Bohrungen im Abstand von 100 m haben eine Tiefe von ca. 15 m und wurden sowohl für Spannungssondierungen als auch für Permeabilitätsmessungen genutzt. Das Messprofil verläuft über dem nördlichen Bereich des am 11. Sept. 1996 zusammengebrochenen Ostfeldes der Grube Teutschenthal und reicht um einige Hundert Meter über die östliche und westliche Feldesgrenze hinaus (Abb. 20).

Ein typischer Verlauf für die 11 Jahre nach dem Gebirgsschlag gemessenen Einspannungen in der hangenden Steinsalzbarriere über dem Bruchfeld ist in Abb. 20 auf Basis der Fracmessungen in 8 m Bohrlochtiefe dargestellt. Ein wesentliches Messergebnis ist die deutliche Absenkung der minimalen Hauptspannung über dem Bruchfeld. Die gemessenen Einspannungen liegen bis zu 8 MPa unter dem lithostatischen Teufendruck. Über dem westlichen Baufeldrand steigt die Einspannung bis auf den Teufendruck an, der auch im Abbauvorfeld gemessen wird. Im Vorfeld des östlichen Bruchfeldrandes, der aufgrund der Feldesausdehnung nach Norden eine „harte“ Abbaukante darstellt, steigt die Einspannung bis über 20 MPa an.

Die gemessenen Spannungen stimmen in ihrer Größenordnung gut mit berechneten Spannungsprofilen um die Wetterstrecke überein, die über dem Bruchfeld Werte der minimalen Hauptspannung um 9,5 MPa und im Abbauvorfeld einer „harten“ Abbaukante 21,6 MPa ergeben (Abb. 20).

Über der Bruchfeldkante, wo unmittelbar nach dem Gebirgsschlag das Frac- / bzw. Minimalspannungskriterium im Leine-Steinsalz Na3 verletzt war, hat innerhalb eines Zeitraumes von 1 bis 2 Jahren die minimale Hauptspannung wieder annähernd den lithostatischen Teufendruck erreicht. Das Minimalspannungskriterium in der geologischen Barriere Leine-

Steinsalz Na₃ ist damit im Hinblick auf die Langzeitsicherheit wieder flächendeckend über dem Bruchfeld erfüllt.

4. Analyse des Integritätsverlustes von Salinarbarrieren unter quasi-statischen Beanspruchungen

Auch unter quasi-statischen Beanspruchungen ist es zum Integritätsverlust von Salinarbarrieren in der 150-jährigen Bergbaugeschichte im Kali- und Steinsalzbergbau gekommen (Tabelle 2). Insbesondere die Fehleinschätzungen und Ursachen, die in der Vergangenheit zum Integritäts- und Dichtheitsverlust von Salinarbarrieren und damit zur Aufgabe und zum Absaufen von Bergwerken in der steilen und flachen Lagerung geführt haben sind zu analysieren und beim Nachweis der Integrität der geologischen Barrieren für UTD, UTV und Endlager zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Versagensfälle geologischer Barrieren durch statische Beanspruchung

Grube	geol. Struktur	Mächtigkeit Barriere (m)	Barriere- Gestein
Wapno 1977	steile Lagerung	30	Steinsalz Ca-Flöz
Asse 1988	steile Lagerung	10	Steinsalz
Bokeloh 2003	steile Lagerung	80	Steinsalz
Berezniki III 1986	flache Lagerung	130	Salz-Mergel-Schicht Steinsalzschieben: 2 m...17 m
Berezniki I 2006	flache Lagerung	90	Steinsalz

Im Jahr 1977 ist das Steinsalzbergwerk im Salzstock Wapno in Polen abgesoffen. Die chemische Zusammensetzung der Lösung änderte sich im Laufe der Zeit. Der Anteil an Magnesium nahm ab und der Natriumanteil zu (WERNER, 1989). Es wird davon ausgegangen, dass das Absaufen über leicht lösliche carnallitische Schichten und Bänder erfolgte, wie sie im Salzstock Wapno angetroffen wurden. Die Salzmächtigkeit zwischen den tiefsten Erosionsrinnen am Salzstockspiegel und der Abbaufirste der Langkammern der III. Sohle betrug nur etwa 30 m.

Der seit 1919 begonnene konzentrierte Abbau in dem kleinen Salzstock mit ovalem Querschnitt von 400 m x 900 m muss zu einer deutlichen Entspannung geführt haben, zumal die schlanken Pfeiler auf der höchstgelegenen III. Sohle in 384 m Teufe nach heutigen Gesichtspunkten als nicht dauerstandsicher anzusehen sind (Verhältnis Pfeilerbreite zu Pfeilerhöhe 0,6). Bereits vor Aufnahme der Abbautätigkeit auf der III. Sohle waren an der Tagesoberfläche beträchtliche Senkungen eingetreten.

Der Integritätsverlust der Steinsalzbarriere an der Südflanke des Asse-Sattels hat sich ebenfalls unter den Randbedingungen einer zu geringen Barrieremächtigkeit (weniger als 10 m) bei einem im Langzeitprozess nicht standsicheren Abbausystem vollzogen (Verhältnis Pfeilerbreite zu Pfeilerhöhe 0,3). Gebirgsmechanische Berechnungen mit dem in Pkt. 2 dargestellten visko-elasto-plastischen Modell mit Nachbildung der ablaufenden Entfestigung im Tragsystem führen zu einer ausgeprägten Schädigung der Steinsalzbarriere mit einer Dilatanz > 10 % im Niveau der 511 m Sohle (Abb. 21). In diesem Bereich konzentriert sich auch die mikroseismische Aktivität, welche die Schädigungsakkumulation im Gebirge anzeigt.

Um das sich im Entfestigungszustand befindliche Tragsystem der Asse mit seiner Wirkung auf das umgebende Gebirge abbilden zu können war es erforderlich, ein Materialmodell zur Verfügung zu haben, mit dem die zeitabhängige Entfestigung der anstehenden Salzgesteine bis in den Nachbruchbereich (Post-Failure Bereich) erfasst werden konnte. Mit dem im Rahmen der BMBF-Forschung entwickelten visko-elasto-plastischen Materialmodell ist es gelungen, die Mechanik und Physik der Entfestigung im Nachbruchbereich u. a. mit der Lokalisierung von Scherzonen (Rissbildungen) realitätsnah abzubilden. Die Abbildungen 22 bis 24 zeigen den sich zeitabhängig entwickelnden Versagensprozess im Tragsystem, der an den zu schwach bemessenen Schweben einsetzt und nach dessen Bruch zu einer Überlastung mit Rissbildungen in den schlanken Pfeilern führt. Als Folge davon, stellt sich im numerisch-physikalischen Berechnungsmodell selbständig ein beschleunigter Verformungsprozess ein, wie er in situ beobachtet wurde und erst durch die Verfüllung der Abbaukammern der Südflanke mit Versatz abgebremst werden konnte, um einen Kollaps des Tragsystems zu verhindern.

Bei sehr starker abbauinduzierter Entspannung kann das Minimalspannungskriterium auch bei mächtigen Salinarbarrieren verletzt werden. Im Salzstock Bokeloh (Abb. 25) erfolgte der Abbau im Sylvinit durch Strossen und Herstellung von Abbaukammern von etwa 200 m Höhe und 100 m Breite (SESSER & HOLLÄNDER, 2002). Durch längeres offen Stehenlassen von Abbaukammern ohne Versatz in 860 m Teufe und der dadurch hervorgerufenen Absenkung der minimalen Hauptspannung in der 80 m mächtigen Barriere aus Leine-Steinsalz Na₃, Roter Salzton T4 und Aller-Steinsalz Na₄ ist es temporär zu begrenzten Zuflüssen vom Salzstockrand gekommen. Die mit dem visko-elasto-plastischen Modell berechneten dilatanten Scherzonen durchdringen nicht die gesamte Salinarbarriere. Die Einspannung am Rand der Salinarbarriere, dem Aller-Steinsalz Na₄, liegt in 860 m Teufe jedoch deutlich unter dem anstehenden Fluiddruck einer bis zum Salzspiegel hoch reichenden Wassersäule, so dass ein Lösungsdurchtritt möglich wurde (Abb. 26). Nach Absenkung des Flüssigkeitsdruckes durch Abfordern von Salzlösung über eine gezielt gestoßene Bohrung zum Salzstockrand und damit Aufhebung der Verletzung des Minimalspannungskriteriums kam der Zufluss praktisch zum Erliegen. Die fluiddruck-generierte Perkolation der Salinarbarriere, die Fluiddrücke oberhalb der minimalen Hauptspannung voraussetzt, war nicht mehr möglich und die Barriere hat durch Selbstabdichtung ihre Integrität wieder erlangt.

In der flachen Lagerung sind als typische Beispiele eines Integritätsverlustes der hangenden geologischen Barriere die Ersaufensfälle von Gruben in der Kalisalzagerstätte an der oberen Kama in Russland bekannt geworden. Der Abbau von Sylvinit und Carnallit erfolgt dort in geringer Teufe von nur einigen Hundert Metern mit einer hangenden Barriere aus Salz-Mergel-Schichten und nur wenigen Dekametern Decksteinsalz. Im Jahr 1986 ist die Grube Berezniki III abgesoffen, und 2006 die Grube Berezniki I am Rande der Stadt Berezniki. Über beiden Gruben haben sich Einbruchstrichter durch Auflösung von Salzgestein gebildet (Abb. 27).

Zum Versagensmechanismus der hangenden Salinarbarriere sind Berechnungen mit dem visko-elasto-plastischen Modell durchgeführt worden (Abb. 28 und 29). An steilen Senkungsflanken bei Absenkung der Tagesoberfläche von mehreren Metern bilden sich durch Scherdehnung (Abb. 30) entspannte Zonen bis zur Oberkante des Decksteinsalzes, in denen das Minimalspannungskriterium überschritten ist (Abb. 31). Die Zuflüsse in die Grube Berezniki I und der Einbruchstrichter sind über einer bergmännisch gesehen „harten“ Abbaukante (am nordöstlichen Rand eines Bohrlochsicherheitspfeilers) an der Senkungsflanke mit der zum Zeitpunkt des Eintritts größten an der Tagesoberfläche erreichten Absenkung von 3,7 m aufgetreten (Abb. 28). Eine Verletzung des Dilatanzkriteriums reicht über der Abbaukante nur wenige Meter ins Hangende (Abb. 32).

Die Analyse zeigt, dass der Versagensmechanismus von Salinarbarrieren sowohl unter dynamischen als auch quasi-statischen Beanspruchungsbedingungen mit dem im Rahmen der

BMBF-Forschung entwickelten visko-elasto-plastischen Stoffmodell quantitativ erklärt werden kann.

Für das Versagen von Salinarbarrieren im Salzbergbau lassen sich im Wesentlichen drei Mechanismen anführen:

- zu geringe Mächtigkeit der Salinarbarriere (Dekameter)
- zu geringe Einspannung der Salinarbarriere (Teufe von nur einigen hundert Metern)
- zu starke abbauinduzierte Entspannung der Salinarbarriere infolge der statisch oder dynamisch eingetretenen Hohlraumkonvergenz

Die praktischen Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Kali- und Salzbergbau sowie den durchgeführten geomechanischen Rückrechnungen sind beim Nachweis der Integrität der geologischen Barrieren für UTD, UTV und Endlager (Abb. 33) zum Erhalt eines dauerhaften Einschlusses zu berücksichtigen.

5. Schlussfolgerungen zur Endlagerung

Aus den durchgeführten Forschungsvorhaben lassen sich zum Integritätsverhalten von Salinarbarrieren folgende wesentliche Schlussfolgerungen ziehen:

- Das entwickelte visko-elasto-plastische Stoffmodell und das Schermodell für saline Schichtflächen sind in der Lage das Integritätsverhalten von Salinarbarrieren in zutreffender Weise zu beschreiben, wie die zahlreichen praktischen Anwendungsfälle und Rückrechnungen zu Versagensfällen belegen.
- Ursache für den Integritätsverlust von Salinarbarrieren im Kali- und Salzbergbau waren zu geringe Mächtigkeiten der geologischen Barrieren, zu geringe Einspannungen (Teufe) und/oder zu starke abbauinduzierte Entspannungen.
- Barrieren aus Salzton und Steinsalz in flacher Lagerung wirken als Multi-Barriersystem gegenüber dem Grundwasserleiter (Biosphäre).
- Ein Aufreißen mit Frac-Rissbildung in Salinarbarrieren setzt dynamische Beanspruchungen voraus und ist bisher nur bei Implosionen (Grubenfeld Kollaps bei Gebirgsschlägen) oder Explosionen (Kernexplosionen, Vulkaneruptionen) beobachtet worden.
- Im Ergebnis von In-situ-Untersuchungen ist festzustellen, dass nach starker dynamischer Beanspruchung mit Abfall der minimalen Hauptspannung im Gebirge ein kriechbedingter Wiederanstieg der Gebirgseinspannung in Steinsalzbarrieren und damit eine Rekompaktion stattfindet.
- Experimentelle Untersuchungen belegen die Wiederherstellung der Barriereintegrität im Steinsalz nach einem Gas-Frac infolge eines Gebirgsschlages und damit das Selbstabdichtungspotential von Steinsalzbarrieren.
- Aus der Analyse starker bergbauinduzierter dynamischer Beanspruchungen ist abzuleiten, dass ein im Steinsalz angelegtes Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bei ausreichend mächtig dimensionierten Salinarbarrieren erdbebensicher ist.
- Der dauerhafte Einschluss unter den gegebenen anthropogenen und geogenen statischen und dynamischen Beanspruchungen für Endlager, UTD, UTV ist bei ausreichend bemessenen Salinarbarrieren und Teufen auf Basis der validierten Modelle nachweisbar.

Die bereits zugelassenen und in Betrieb befindlichen UTD und UTV in flacher Salzablagerung in Deutschland, mit beständigem Langzeitsicherheitsnachweis basierend auf dem Prinzip des vollständigen Einschlusses, sind praktische Referenzbeispiele dafür, dass sich nach dem gleichen Grundprinzip auch ein Endlager für radioaktive Abfälle im Salzgestein technisch realisieren lässt.

Für UTD, UTV und Endlager in Salzformationen stellen die geologischen Barrieren im Langzeitprozess das entscheidende Sicherungselement dar. Unter ungestörten Bedingungen sind Salzgesteine flüssigkeits- und gasdicht. Für die Schaffung vernetzter Fließwege (Perkolation) im polykristallinen Salzgestein sind zwei mechanisch unabhängige Prozesse verantwortlich:

- dilatanz-induzierte Perkolation bei deviatorischer Belastung oberhalb der Dilatanzgrenze (Dilatanzkriterium)
- fluiddruck-generierte Perkolation bei Fluiddrücken oberhalb der minimalen Hauptspannung (Minimalspannungs- bzw Frackkriterium).

Mechanische Schädigung und damit ein Integritäts- und Dichtheitsverlust kann durch deviatorische Belastung hervorgerufen werden, wenn der im plastisch- viskosen Salzgestein vorliegende annähernd isotrope Grundspannungszustand gestört wird.

Im Allgemeinen ist die mechanische Schädigung bzw. Dilatanz auf einen engen Bereich um die untertägig aufgefahrenen Strecken und Hohlräume begrenzt. Bei dynamischen Belastungen können größere deviatorische Beanspruchungen im kriechfähigen Steinsalz hervorgerufen werden, die größere Barrierebereiche erfassen. Gebirgsschläge stellen in diesem Kontext bezüglich der Schädigungsauswirkungen worst-case-Szenarien dar.

Verallgemeinernd aus den durchgeführten In-situ-Untersuchungen nach starker dynamischer Beanspruchung und geomechanischen Berechnungen sowie der Analyse von Gebirgsschlagereignissen, mit großen Verschiebungen der Salinarbarrieren, wurde eine Dimensionierungsrichtlinie für Salinarbarrieren abgeleitet (FZK 02C1264), bei deren Einhaltung eine durchgehende dilatante Schädigung infolge deviatorischer Belastung nicht zu besorgen ist.

Dies bedeutet, dass ein neu aufgefahrenes Endlagerbergwerk bei Einhaltung der Barrierenmächtigkeiten erdbebensicher ist und Zuflüsse über die Salinarbarrieren infolge dilatanter Schädigung durch deviatorische Belastung auszuschließen sind.

Unter statischen Belastungen bei Normalentwicklung des Endlagers oder der UTD, UTV sind die deviatorischen Beanspruchungen aufgrund der visko-plastischen Eigenschaften des Salinars stets geringer, als im dynamischen Belastungsfall bei außergewöhnlicher Entwicklung.

Die Dichtheit und Integrität der Salinarbarrieren in einem Endlagerbergwerk oder um eine UTD, UTV wäre damit, wenn man eine Verletzung des Dilatanzkriteriums als Voraussetzung für einen Dichtheitsverlust (Zufluss) ansieht, auf der Basis von Großversuchen im Maßstab 1:1 unter dynamischer Beanspruchung, also dem worst case, nachgewiesen.

Die durchgeführte Analyse der Versagensfälle von Salinarbarrieren im Kali- und Steinsalzbergbau zeigt jedoch, dass relativ mächtige Salinarbarrieren unter statischen Beanspruchungen undicht geworden sind, ohne durchgehende dilatante Schädigung.

Verantwortlich dafür ist ein von deviatorischer, dilatanter Beanspruchung unabhängiger Mechanismus durch zeitabhängige fluiddruck-getriebene Generierung hydraulischer Fließwege, sobald der Wasserdruck größer als die minimale Hauptspannung bzw. Normalspannung entlang der Korngrenzen der Salzgesteine ist.

Im Kalibergbau ist der Abfall der minimalen Hauptspannung im Salzgebirge unter den anstehenden Wasserdruck im Deckgebirge oder Nebengebirge an Salzstockflanken durch intensive Gewinnungstätigkeit mit großen Senkungen bzw. Verschiebungen bewirkt worden.

Um ein Endlagerbergwerk für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle können größere Verschiebungen in Form von Hebungen, infolge der temperaturbedingten Ausdehnung des Gebirges mit weitreichenden Spannungsumlagerungen auftreten, wie die durchgeführten geo-

mechanischen Berechnungen zur Dimensionierung von Salinarbarrieren für ein Endlager in der flachen und steilen Lagerung ausweisen.

Die damit im Zusammenhang stehenden, thermomechanisch induzierten Spannungsumlagerungen könnten zu einer temporären Verletzung des Minimalspannungskriteriums führen (Abb. 34). Dies eröffnet die Möglichkeit einer fluiddruck-getriebenen, zeitabhängigen Generierung hydraulischer Fließwege in die das Endlager umgebende Steinsalzbarriere.

Für die Dichtheit von Salinarbarrieren bei thermomechanischer Beanspruchung ist die zeitabhängige, fluiddruck-generierte Vernetzung von interkristallinen Fließwegen, bei einem Abfall der Gebirgseinspannung unter den am Salzspiegel anstehenden Flüssigkeitsdruck infolge der thermischen Gebirgsausdehnung, von entscheidender Bedeutung (Abb. 34).

Mechanische Schädigung durch Überschreitung der Dilatanzgrenze ist auf die unmittelbare Hohlraumumgebung begrenzt (EDZ) und für die Integrität und Dichtheit der Salinarbarrieren von sekundärer Bedeutung.

Die druckgetriebene Generierung von Fließwegen kann bevorzugt an Schichtflächen im Salinar erfolgen (Abb. 34). In diesem Zusammenhang stellen steilstehende Schichtflächen in Salzstöcken, die ohne Tonabdeckung in grundwasserführende Bereiche des Salzspiegels hineinreichen, keine günstige geologische Gesamtsituation dar.

Im Zechstein der flachen Lagerung in Deutschland kann man ein natürliches geologisches Mehrbarrierensystem, aufgebaut aus Tongesteinen im Deckgebirge, Salzton als überlagernde Schutzschicht vor Subrosion und Steinsalz mit horizontal orientierten Schichtflächen und Diskontinuitäten, vorfinden (Abb. 35 und 36). Das in Abb. 35 dargestellte geologische Profil basiert auf einer realen in Deutschland vorhandenen flach gelagerten Salzformation.

Durch das geologische Multibarrierensystem mit horizontaler Sedimentationsabfolge werden vertikale fluiddruck-getriebene Strömungsvorgänge stärker behindert bzw. blockiert (Abb. 37). Die flache Lagerung mit Tonüberdeckung stellt ein robustes, geologisches Mehrbarrierensystem dar, wo sich die Vorteile der Endlagerkonzepte im Salz und Ton mit einander verbinden lassen (MINKLEY et al., 2010).

In den USA wird die flache Lagerung gegenüber der steilen Lagerung aufgrund der größeren flächenhaften Ausdehnung flach gelagerter Salzformationen bevorzugt, wegen der daraus resultierenden flexiblen Auffahrungsmöglichkeit des Endlagers während der Betriebsphase (DOE, 2011).

Die stärksten thermomechanischen Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle auf die Barriereintegrität zeigen sich bereits Jahrzehnte nach Abschluss des Einlagerungsvorganges (Abb. 34). In der darauffolgenden Zeit nehmen kriechbedingt die Bereiche in denen eine Verletzung des Minimalspannungskriteriums vorlag kontinuierlich ab, auch wenn es aufgrund der Wärmezufuhr weiterhin zu Hebungen kommt. Dies bedeutet, dass mit den größten thermomechanisch- hydraulischen Beanspruchungen der geologischen Barriere in den ersten hundert Jahren der Endlagernutzung zu rechnen ist. Danach dominieren wieder zunehmend die natürlichen geologischen Einflussfaktoren das Barriereverhalten unter denen Salzlagerstätten über hunderte von Jahrillionen ihre Integrität bewahrt haben.

Bei dem in der Bundesrepublik Deutschland gegebenen geologischen Untergrund ist Steinsalz als Wirtsgestein zur Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, wegen des in Salzformationen realisierbaren vollständigen Einschlusses, aus geomechanischer Sicht zu präferieren. Ob die steile oder flache Lagerung den gestellten Anforderungen in ausreichendem Maße gerecht wird, ist auf Grundlage konkreter geowissenschaftlicher Untersuchungen zu entscheiden. Die flache Salzablagerung ist als Alternative für die steile Lagerung zur End-

lagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Betracht zu ziehen und der Option Ton und Kristallin in Deutschland vorzuziehen.

Literaturverzeichnis

- BERGMANNSSVEREIN (2002): 150 Jahre Salzbergbau: Staßfurt - Wiege des Kalibergbaus. Salzland Druck Staßfurt
- CHEMOTOX (2009): Forschungsvorhaben: Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle. Öko-Institute e. V., Darmstadt, DBE Technology GmbH, Peine, GRS mbH Braunschweig
- DOE (2011): A management proposal for Salt Disposal Investigations with a field scale heater test at WIPP, U. S. DOE Carlsbad Field Office, May 2011
- DepV (2006): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung-DepV), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I.S 2807), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 13.12.2006 (BGBl. I.S 2860)
- EISENBACH, U.; PAULINKYI, A. (1999): Die Kaliindustrie an Werra und Fulda. Hessisches Wirtschaftsarchiv Darmstadt
- FULDA, D.; HAUSE, K. H. (1990): Das bunte, bittere Salz. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig
- IfG (2007): BFS-Forschungsvorhaben: SR 2470 – Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept (Abschlussbericht). Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, Sept. 2007
- MINKLEY, W. (2003): Geomechanische Bewertung geologischer Barrieren. Berichte FZKA-PTE Nr. 8, 193 – 206, August 2003
- MINKLEY, W. (2004a): Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbrechungserscheinungen im Carnallit. Schriftenreihe des Institutes für Gebirgsmechanik – Band 1, Shaker Verlag Aachen
- MINKLEY, W. (2004b): Back analysis rock burst Völkershäuser 1989. Numerical Modelling of Discrete Materials – In Geotechnical Engineering, Civil Engineering, and Earth Sciences. A.A. Balkema Publishers, 105 – 112
- MINKLEY, W.; MENZEL, W. (1999): Vorausberechnung des Kollapses eines Grubenfeldes-Gebirgsschlag Teutschenthal 11. Sept. 1996. Proc. 9th Int. Congress on Rock Mechanics, Paris, Vol. 2, 1115 - 1118
- MINKLEY, W.; WÜSTE, U. (2008): Numerische Simulation von Entfestigungsvorgängen im Salzgebirge: Geomonitoring, FE-Modellierung, Sturzprozesse und Massenbewegungen. COG-Fachtagung, Salzburg, 02.-04.07.2008, Wichmann Heidelberg, 58-74
- MINKLEY, W.; POPP, T.; SALZER, K., GRUNER, M., BÖTTGE, V. (2010): Hydro-Mechanical Properties of the red Salt Clay (T4) - Relevancy of the Minimum Stress Criterion for barrier integrity. 4. Int. Meeting - Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, 29.03. - 01.04.2010 Nantes (in press)
- SESSLER, W., HOLLÄNDER, R. (2002): Das Kaliwerk Sigmundshall der K+S AG. Akad. Geowiss. Hannover, Veröffentl. 20, 70 - 76
- SIEMANN, M.G. (2007): Herkunft und Migration mineralgebundener Gase der Zechstein 2 Schichten in Zielitz. Kali und Steinsalz, Heft 3, 26 - 41
- UCHTMANN, S.; EHRET, B.; WONIK, T.; ZIEKUR, R. (2007): Georadarerkennung und Komplexauswertung im Salinar. 4. Fachgespräch – Geophysik und Barriersysteme, Universität Leipzig, 07.-08.03.2007
- VersatzV (2006): Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung-Versatz V), vom 24. Juli 2002 (BGBl. I. S 2833), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 15. Juli 2006 (BGBl. I. S. 1619)
- WERNER, Z.H. et al. (1989): The history of inundation of the salt mine WAPNO (Poland). Rock at Great Depth – Vol. 2, Maury & Fourmaintraux, Balkema, Rotterdam

Forschungsvorhaben

- FKZ02C0264: Untersuchungen (Stoffgesetz-Entwicklung, Modellierung) zum Sprödbbruchverhalten von Carnallitit und seine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von Untertagedeponien
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Projektträger Wassertechnologie u. Entsorgung
Laufzeit: 1995 - 2000
- FKZ02C0639/3: Prognose der dynamischen Langzeitsicherheit von Grubengebäuden im Salinar
Forschungszentrum Karlsruhe, Projektträger des BMBF und BMWA für Wassertechnologie und Entsorgung, Laufzeit: 2000 - 2001
- FKZ02C0892: Langzeitstabilität von Grubengebäuden im Salinar unter Berücksichtigung von Diskontinuitäts- und Schichtflächen
Forschungszentrum Karlsruhe, Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Laufzeit: 2002 - 2004
- FKZ02C1264: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss
Forschungszentrum Karlsruhe, Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Laufzeit: 2005 - 2010

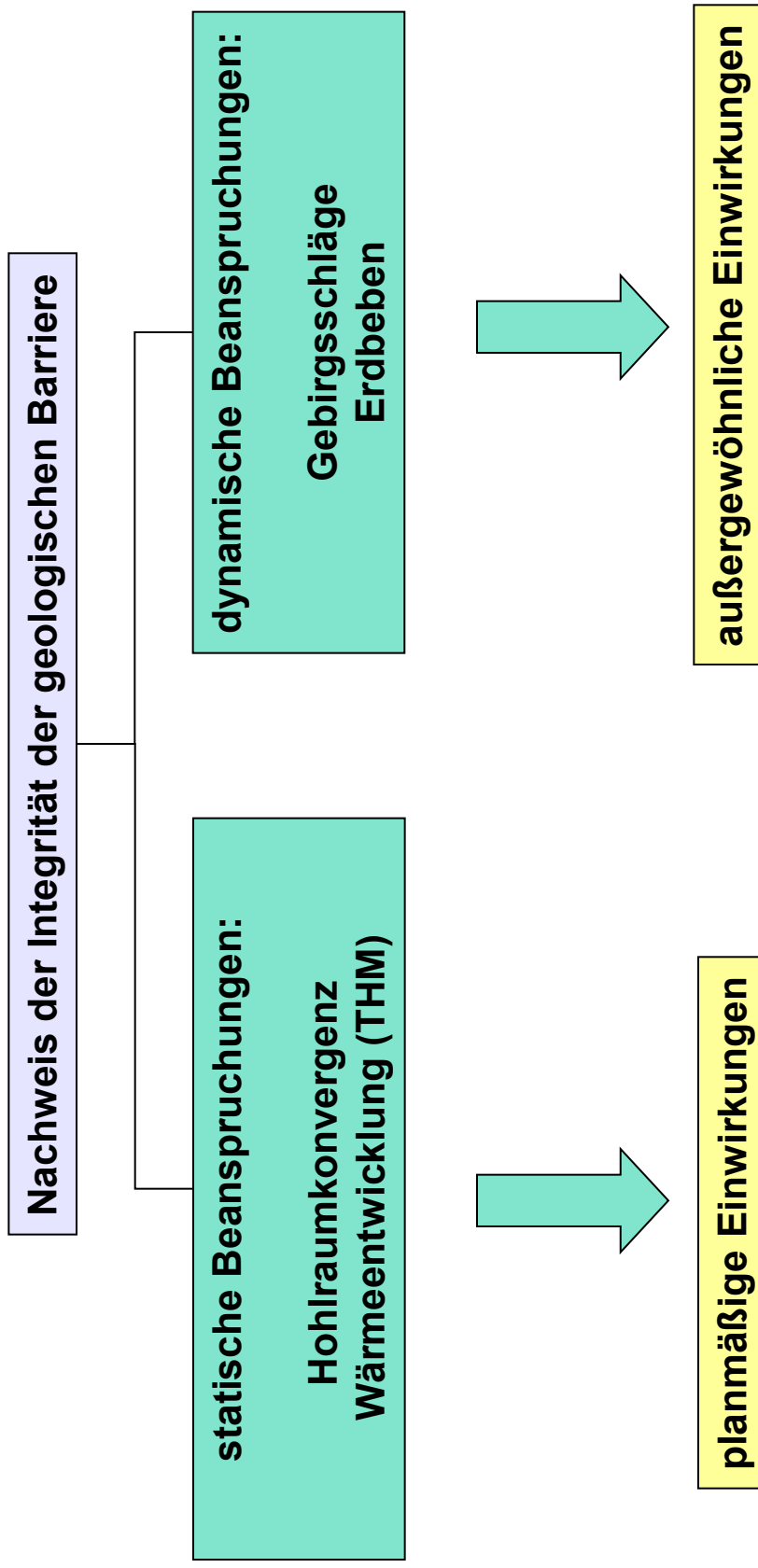
Nachweis der Integrität der geologischen Barriere

Wolfgang Minkley

**IfG-Institut für Gebirgsmechanik
GmbH Leipzig**

Abschlussveranstaltung zum BMBF-Förderschwerpunkt „Untertägige Ablagerung-
Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen“
14. und 15. Februar 2012 im Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Entsorgung chemotoxischer und radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen



visko-elasto-plastisches Stoffmodell mit Entfestigung



Dilatanz und Schädigung (plastische Verformung): Entfestigungsmodell

$$\Delta \varepsilon_i^P = \lambda_S^* \cdot \frac{\partial g_S}{\partial \sigma_i}$$

$$\lambda_S^* = \frac{\sqrt{C_4^* - C_2^2}}{2 \cdot C_1^*}$$

$$C_1^* = -\frac{1}{\sigma_\phi} (\alpha_2 - \alpha_1 \cdot N_\psi) \cdot [(\alpha_2 - \alpha_1 \cdot N_\psi) - (\alpha_1 - \alpha_2 \cdot N_\psi)]$$

$$C_2^* = -\frac{1}{\sigma_\phi} (\alpha_2 - \alpha_1 \cdot N_\psi) \cdot (\sigma_1 - 2 \cdot \sigma_3 + \sigma_{MAX} + \sigma_\phi) + (\alpha_1 - \alpha_2 \cdot N_\psi) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_\phi}\right)$$

$$C_3^* = \frac{\sigma_3}{\sigma_\phi} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3 + \sigma_{MAX}) - (\sigma_1 - \sigma_3 + \sigma_D)$$

$$\sigma_{eff}^{Dil, Bruch, Rest} = \sigma_D + \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_D}{\sigma_\phi + \sigma_3} \cdot \sigma_3$$

VERALLGEMEINERTES MOHR-COULOMB - ENTFESTIGUNGS - MODELL

MODIFIZIERTES BURGERS -MODELL

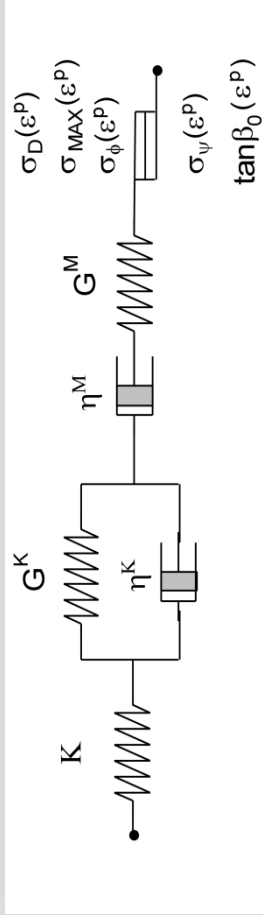
$$\alpha_{1,2} = f(K, G_M, G_K, \eta_M, \eta_K)$$

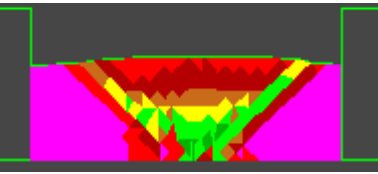
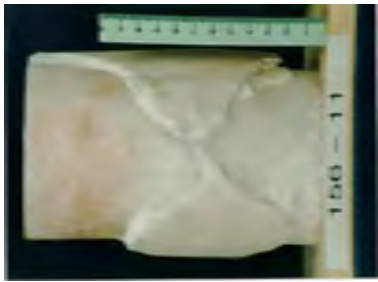
Dilatanzfunktion

$$N_\psi = 1 + \frac{\sigma_\psi^2}{(\sigma_\psi - \sigma_3)^2} \cdot \tan \beta_0$$

$$\Delta \varepsilon_{Vol}^P = \lambda_S^* \cdot (1 - N_\psi)$$

$$K(\varepsilon_{Vol}^P), G_M(\varepsilon_{Vol}^P)$$

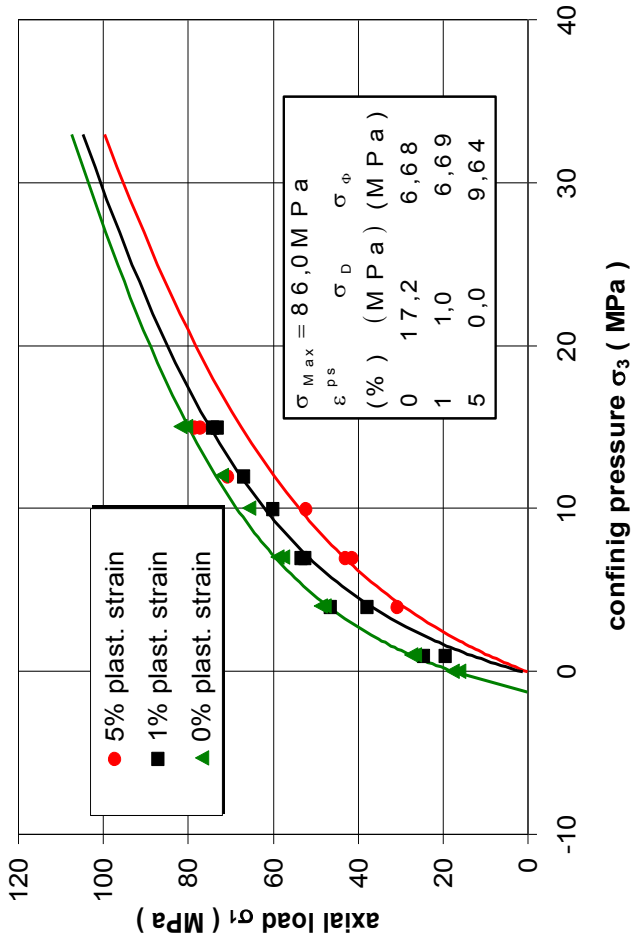




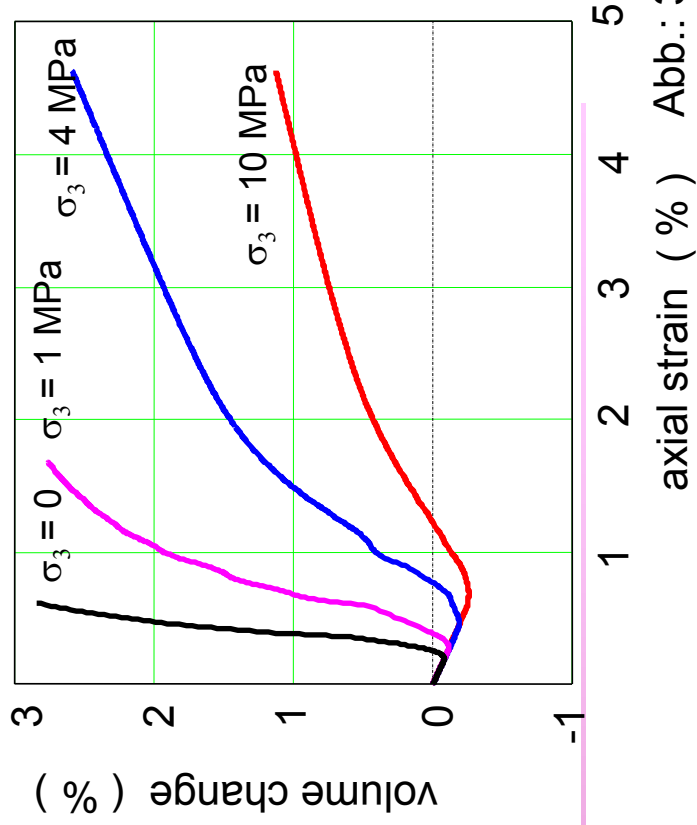
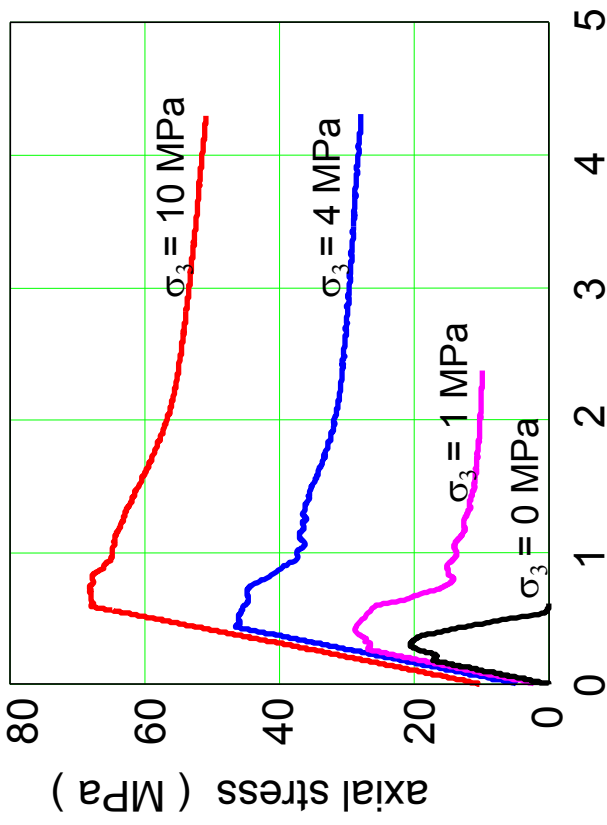
Numerical simulation of lab test on carnallite

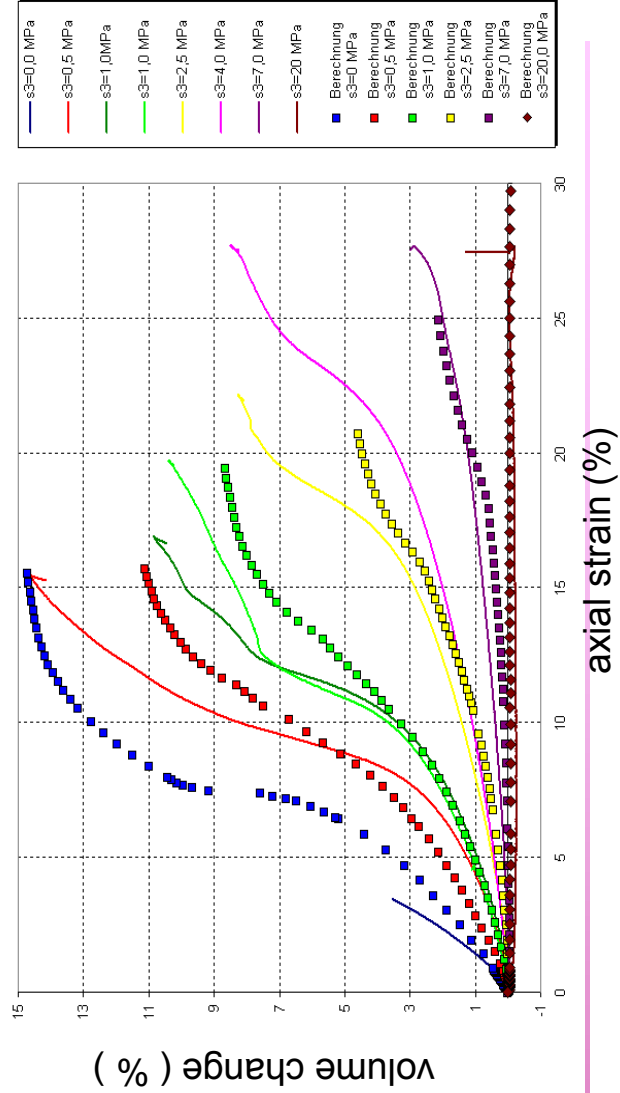
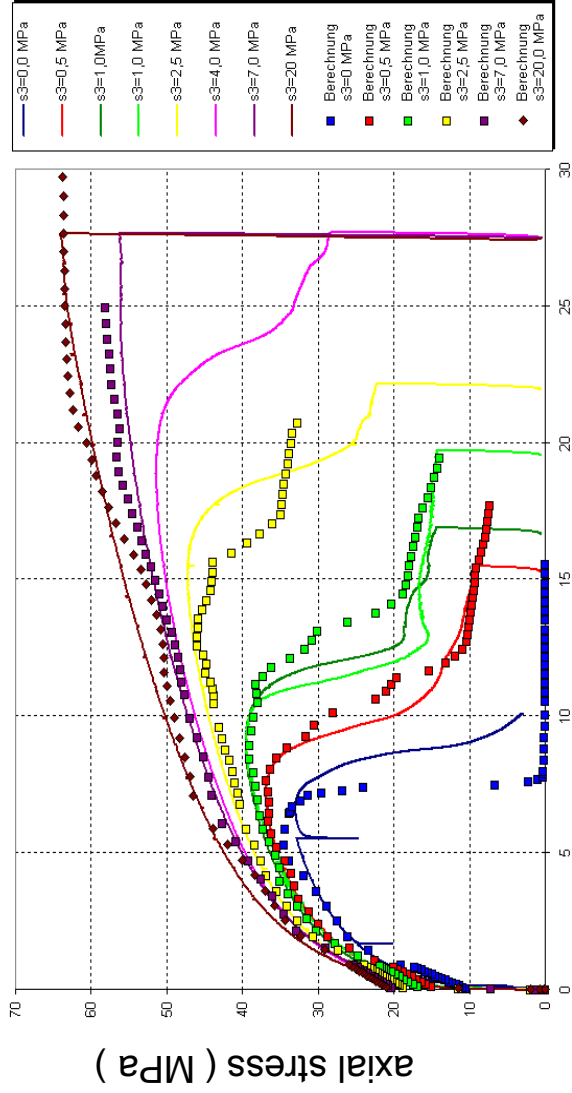
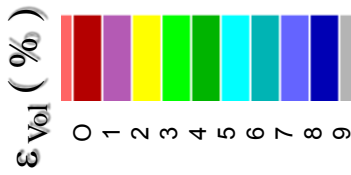
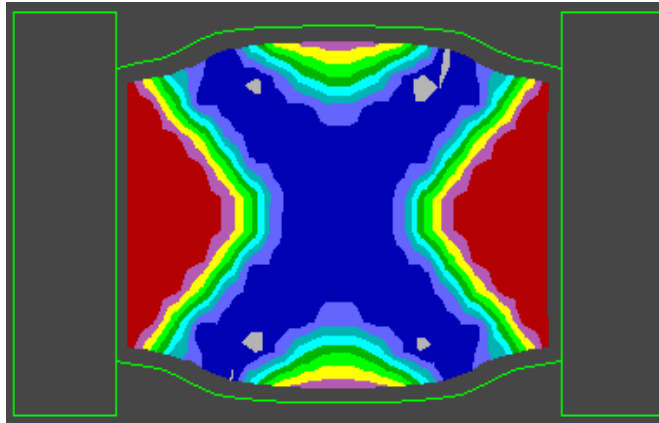
$$\sigma_{1B} = \sigma_D + N_\phi \cdot \sigma_3$$

$$N_\phi = 1 + \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_D}{\sigma_\phi + \sigma_3}$$



Measured and calculated failure envelope of carnallite





Numerical simulation of triaxial compression tests on rock salt

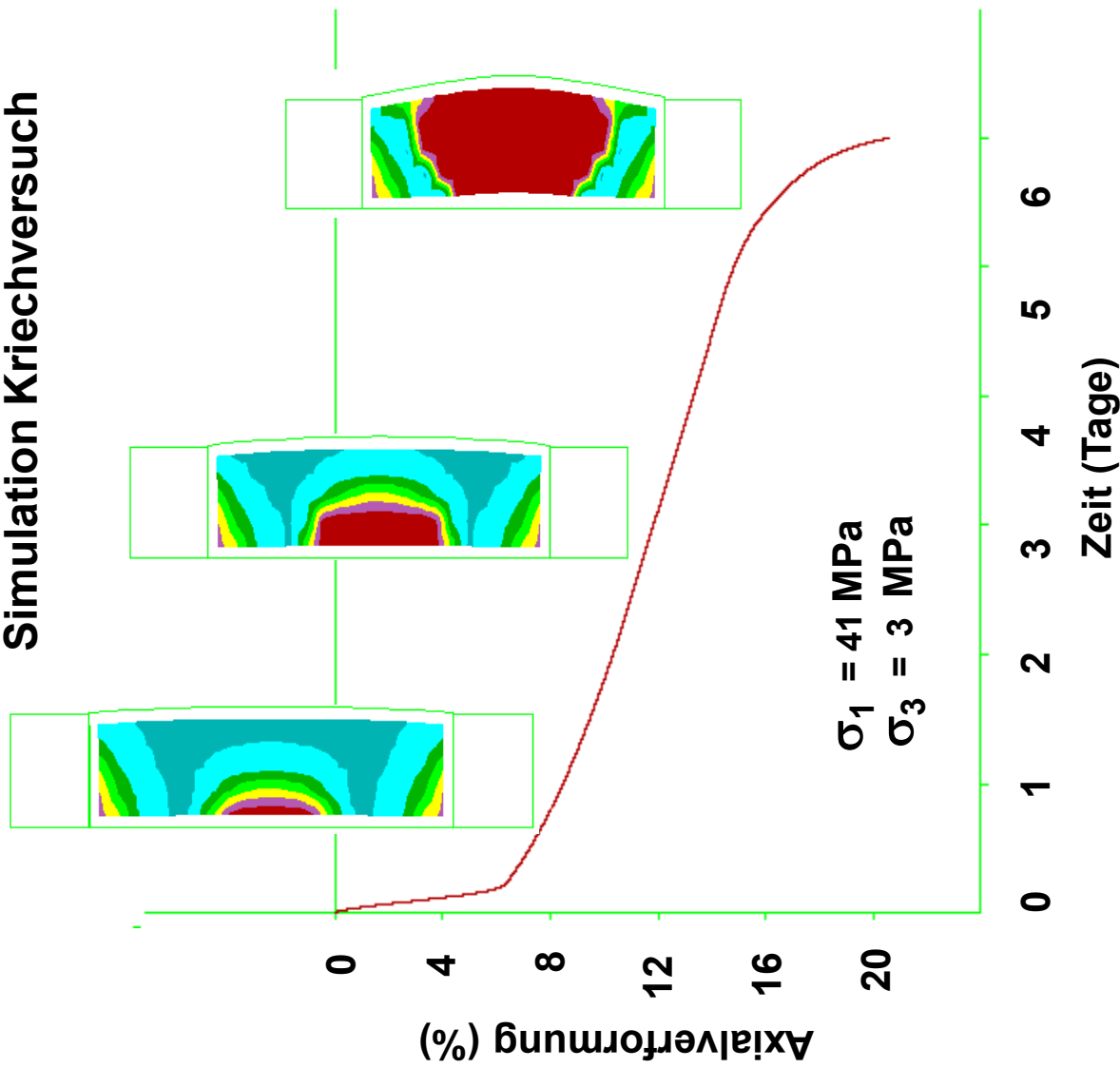
Abb.: 4

Druckfestigkeit

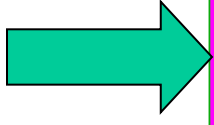
$\sigma_D(\epsilon^p)$ [MPa]



Simulation Kriechversuch

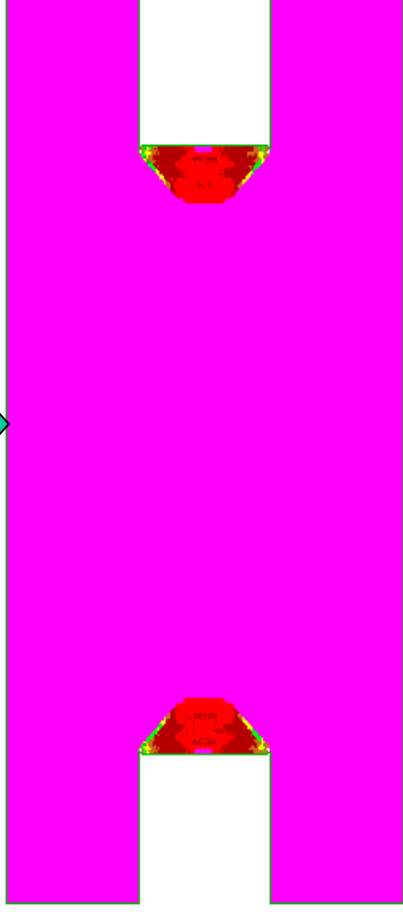


$$\sigma_{yy} = 32 \text{ MPa}$$



Model of a compact carnallite pillar (W:H = 4)

Dilatancy (%)



typical
pillar
contour
damage

the role of bedding planes on the stability of pillars



Verification of the developed shear model in 3DEC

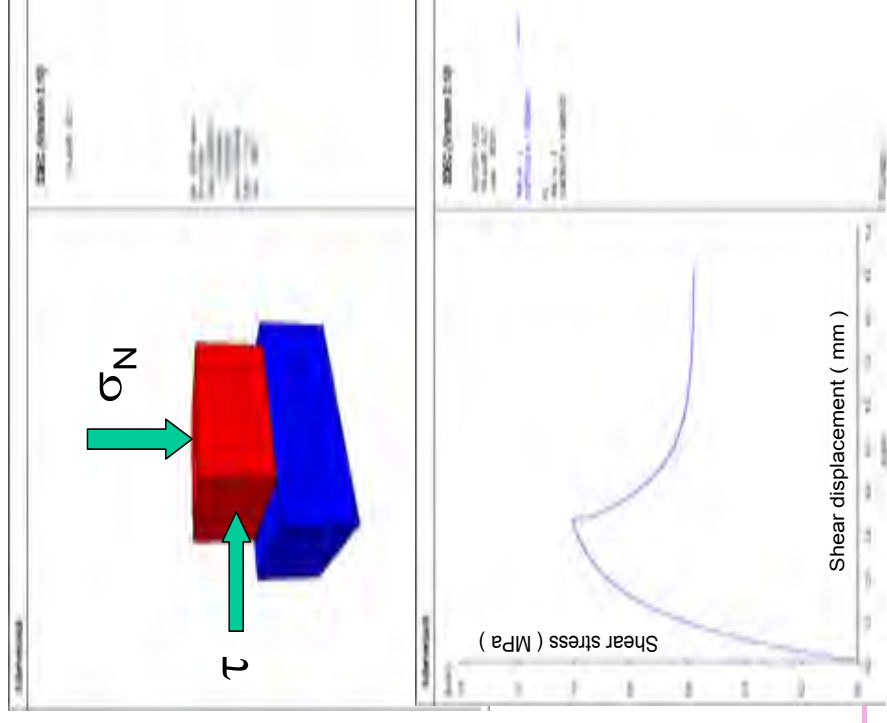


$$\tau_{\max} = \mu_K (1 + \Delta\mu) \cdot \sigma_N + c$$

μ_K = kinetic friction

$\Delta\mu$ = adhesive friction

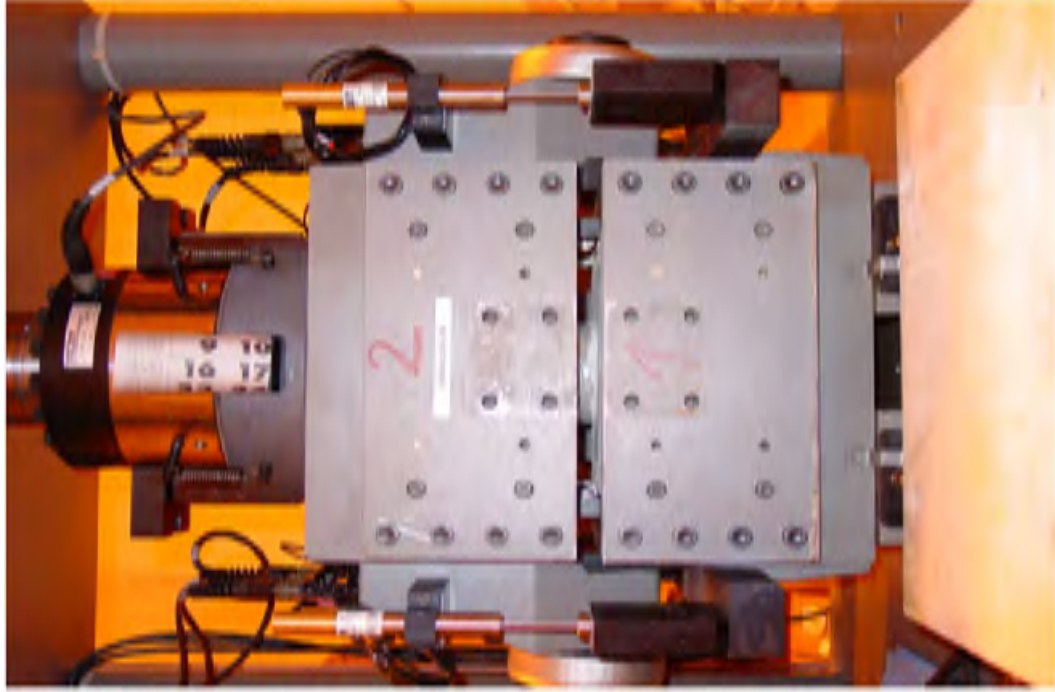
c = cohesion



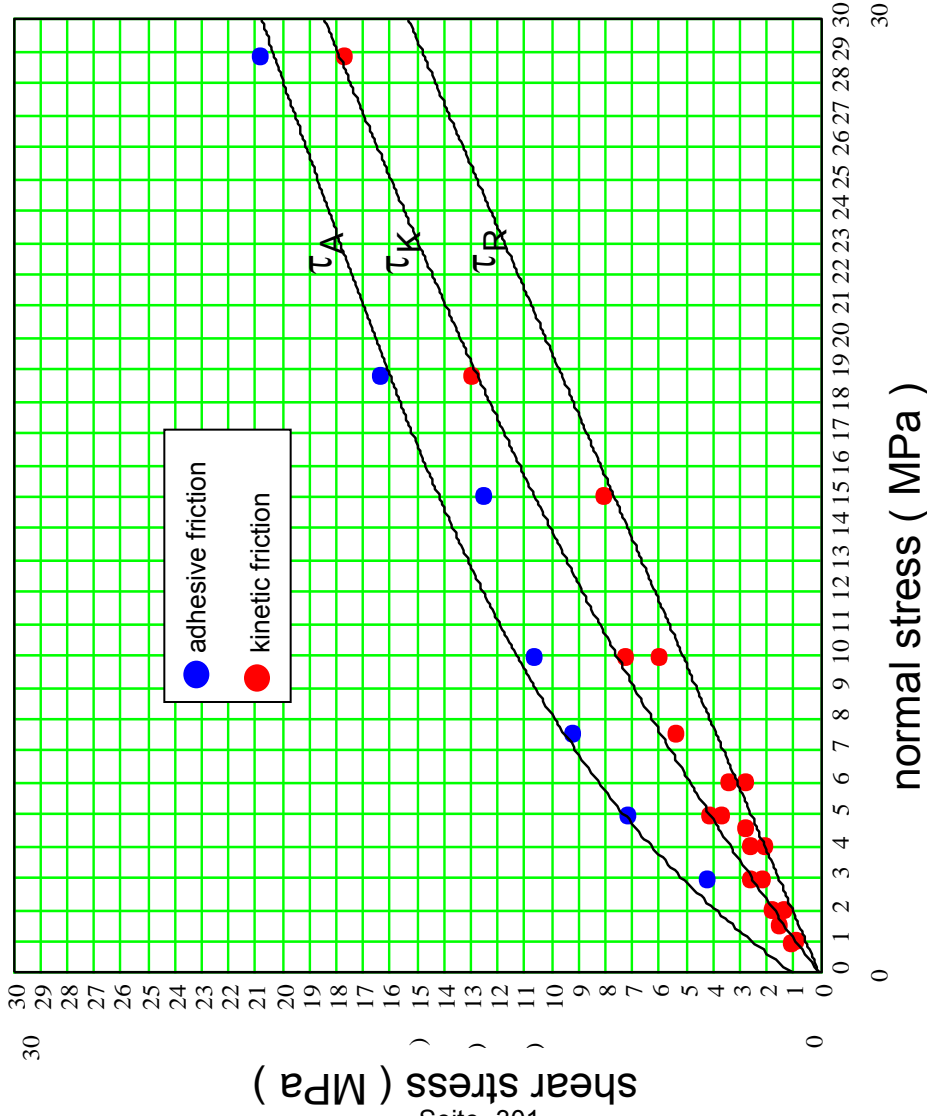
The progressive features of the new shear model are as follows:

- Peak shear strength with adhesive friction component
- Dependence of the adhesive friction on the velocity of the shear process
- Shear strength decreases with progressing shear displacement if the softening region is reached

shear test on bedding plane carnallite / rock salt



Shear model for bedding planes



1) Peak shear strength with adhesive friction component

$$\tau_A = \mu_K (1 + \Delta\mu) \cdot \sigma_N + c$$

$$\Delta\mu = f_{vel} \cdot \Delta\mu_{MAX} \cdot e^{-K1 \frac{\sigma_N}{\sigma_K}}$$

2) Kinetic friction if $\Delta\mu = 0$ and $c = 0$

$$\tau_K = \mu_K \cdot \sigma_N$$

$$\mu_K = \tan \left(\Phi_R + i_0 \cdot e^{-K2 \frac{\sigma_N}{\sigma_K}} \right)$$

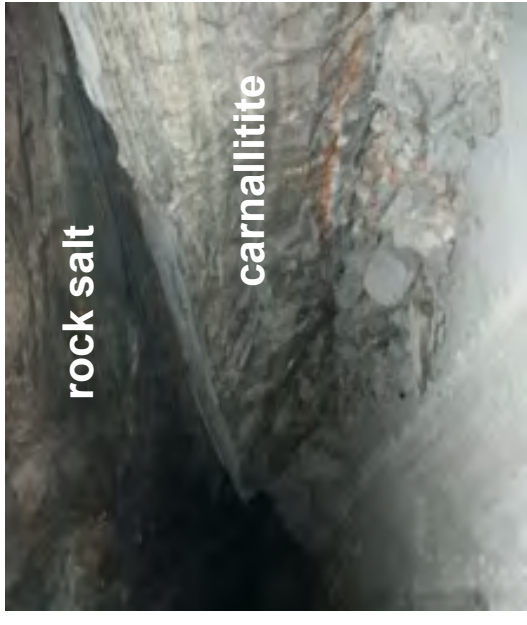
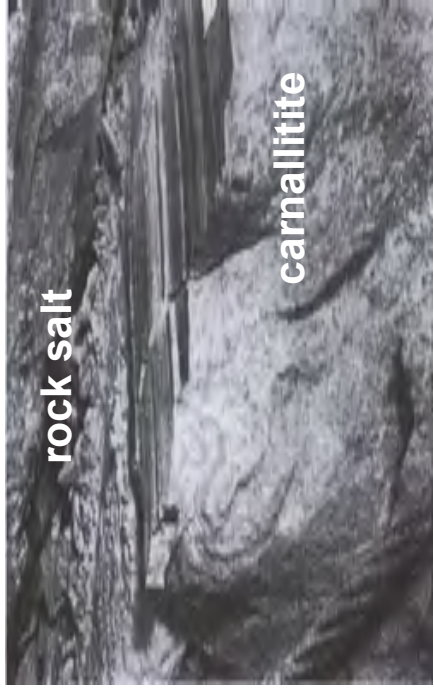
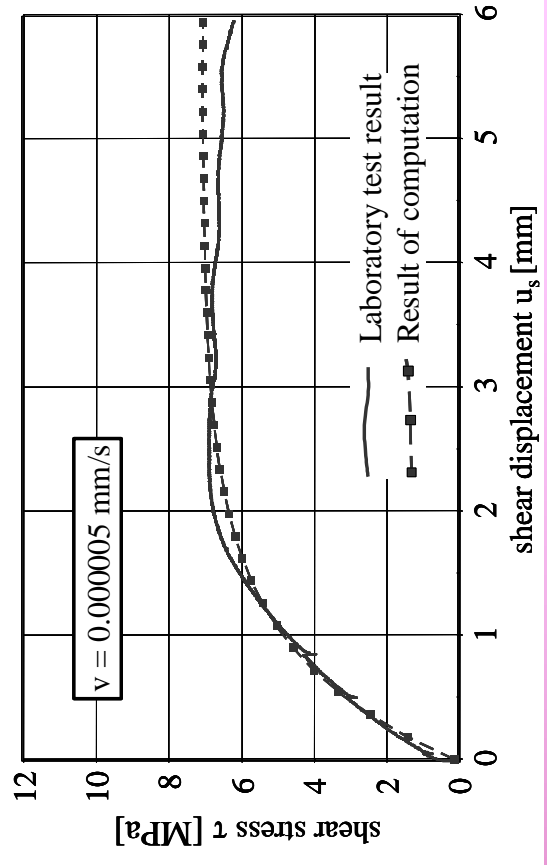
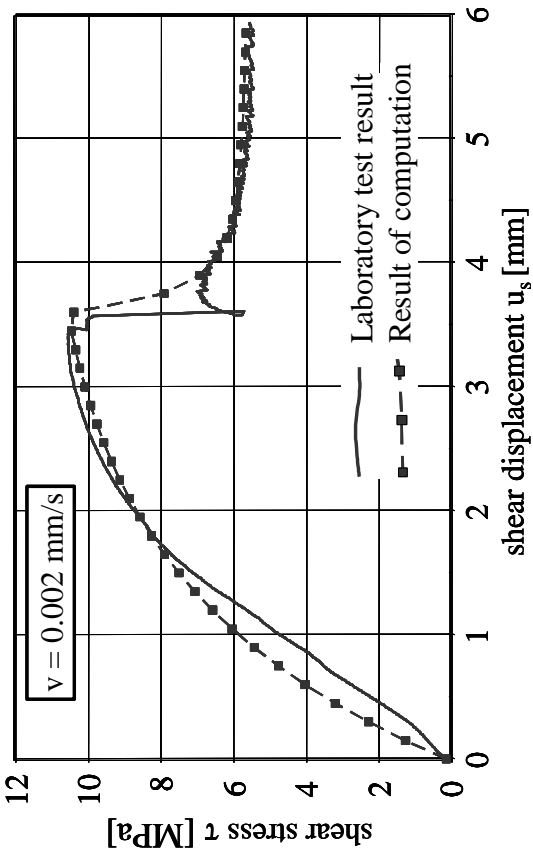
3) Residual friction if $i_0 = 0$

$$\tau_R = \sigma_N \cdot \tan \Phi_R$$



Shear strength on a bedding plane carnallite / rock salt

**Direct shear test with different shear velocities
bedding plane rock salt/carnallite, $\sigma_N = 10$ MPa**



Leine-Steinsalz

Prüfkörper nach Deformation
 $\epsilon_1 = 4\%$, im Auflicht mit Marker



Lab.-Nr.: 212

Manteldruck :

$\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$

Verformungsregelung

Rate :

- 1,00E-03 1/s
- 5,00E-04 1/s
- 5,00E-05 1/s
- 5,00E-06 1/s
- 5,00E-07 1/s

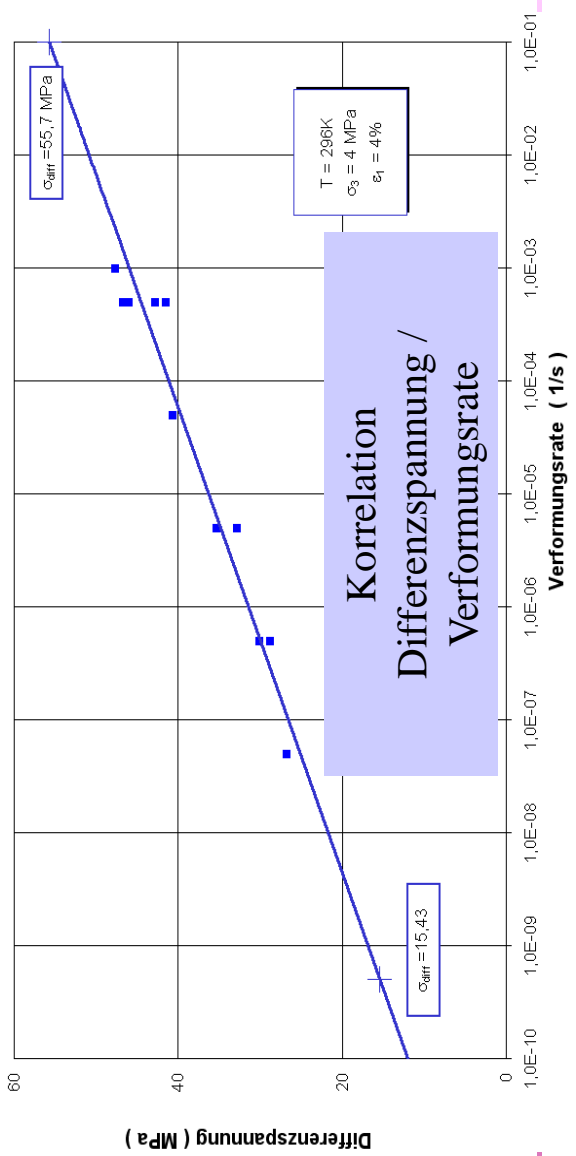
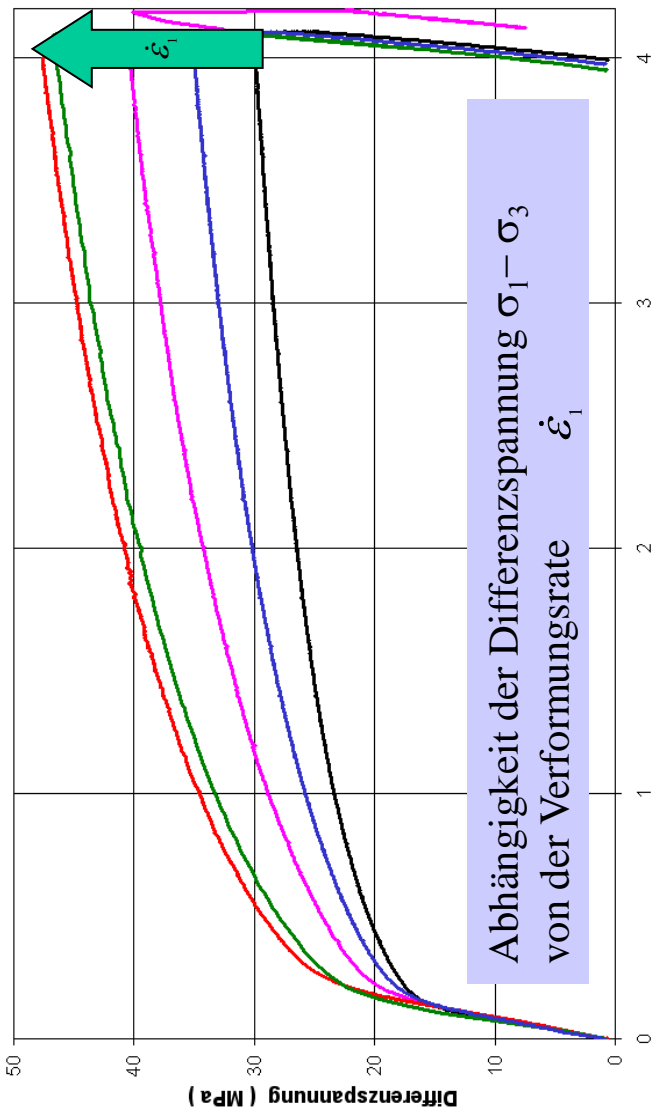
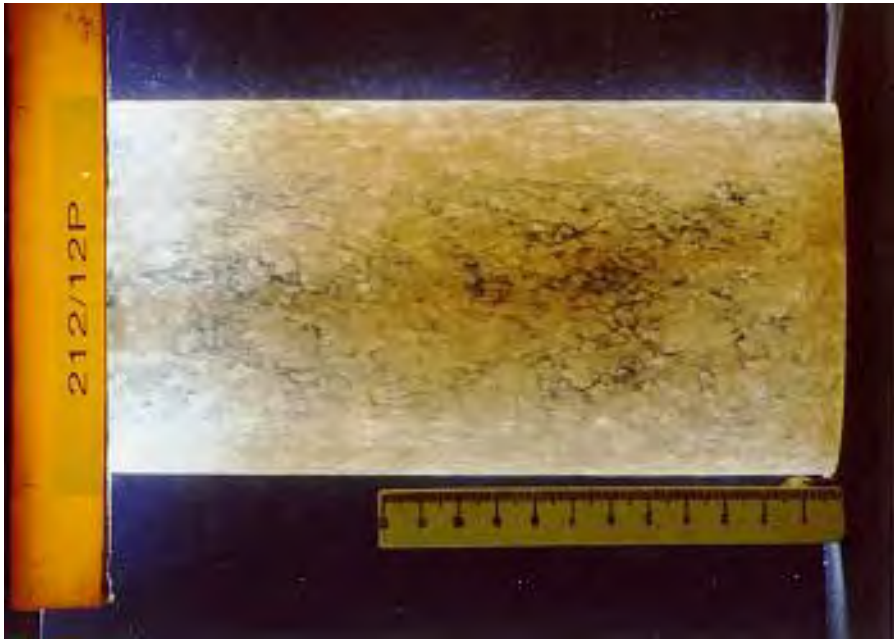


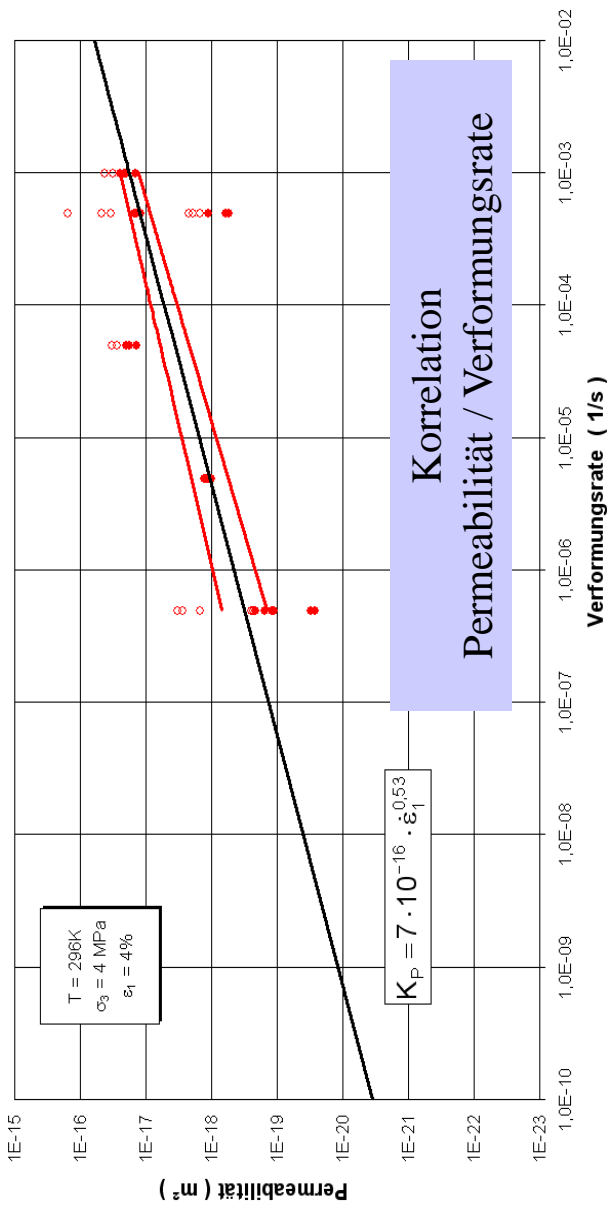
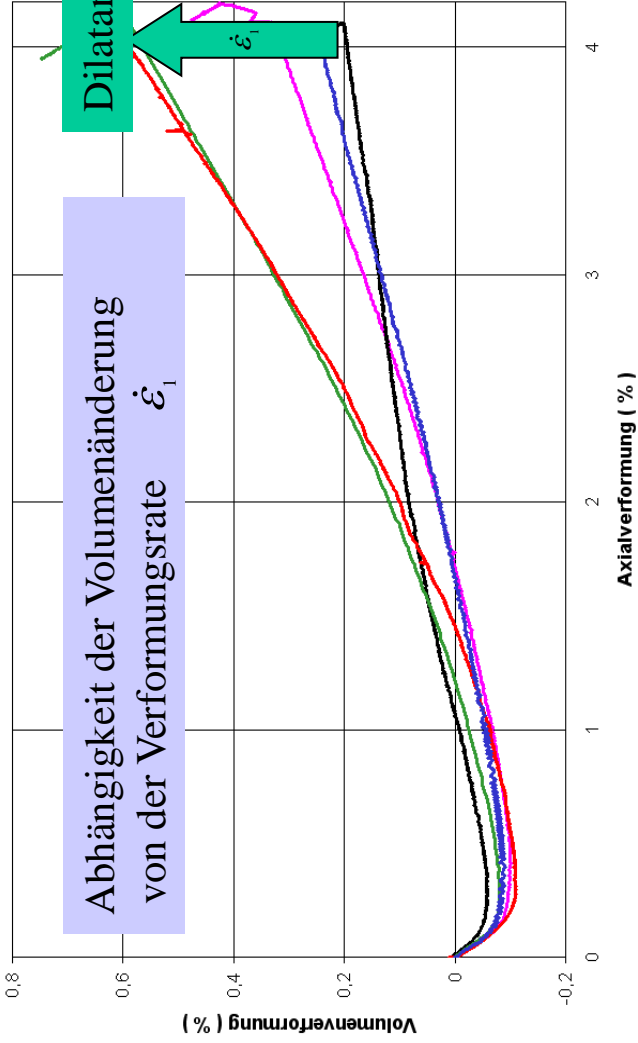
Abb.: 12

Leine-Steinsalz

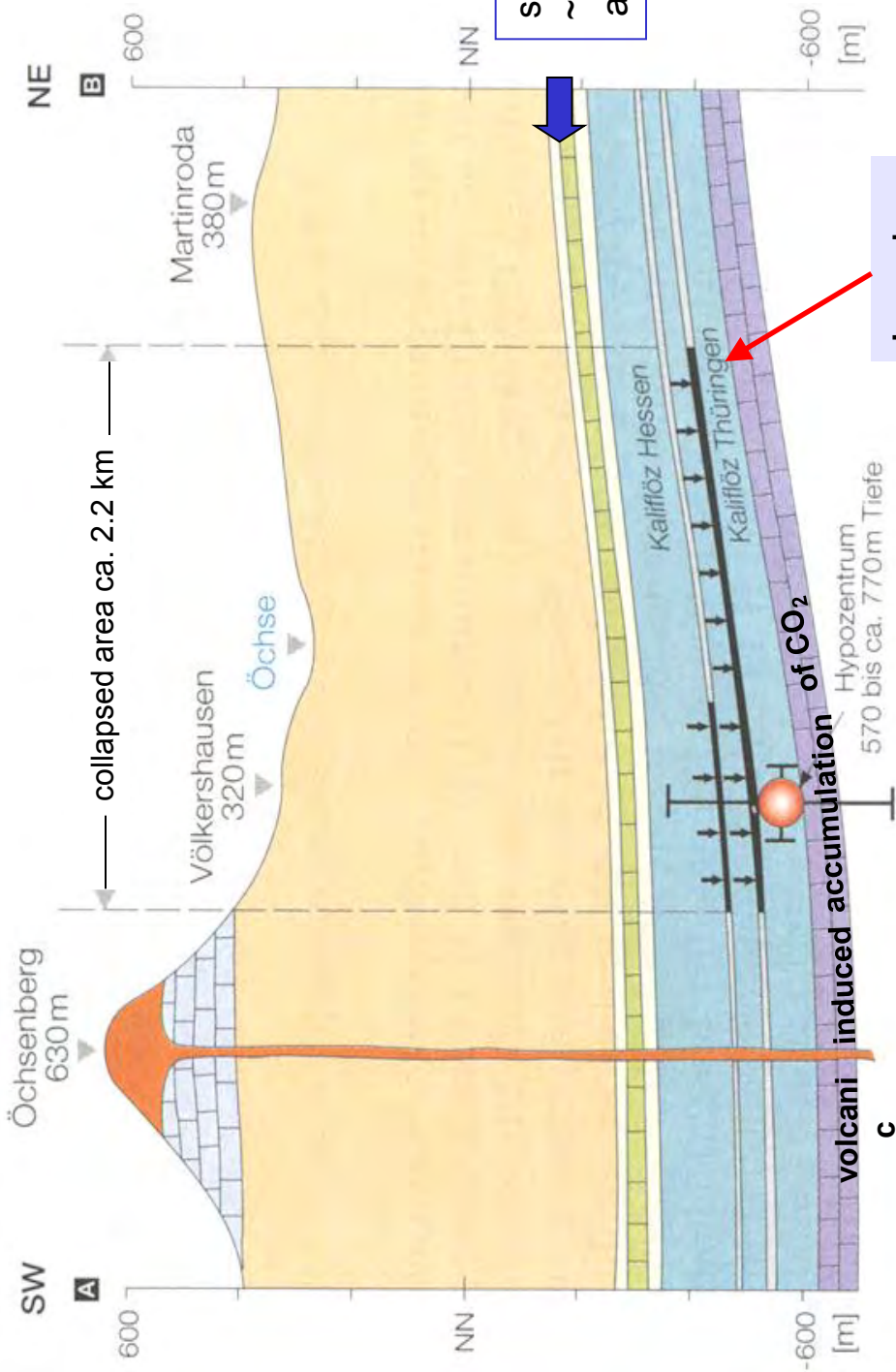
Prüfkörper nach Deformation
 $\epsilon_1 = 4\%$, im Durchlicht



Lab.-Nr.: 212



Natural analogon: Gas-frac during the rock burst Völkershausen 1989

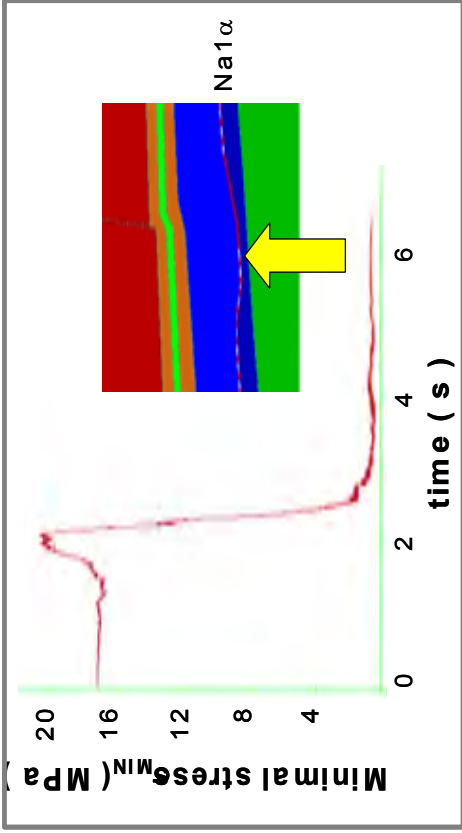


since 1925 storage of
~10⁹ m³ water directly
above the salt barrier

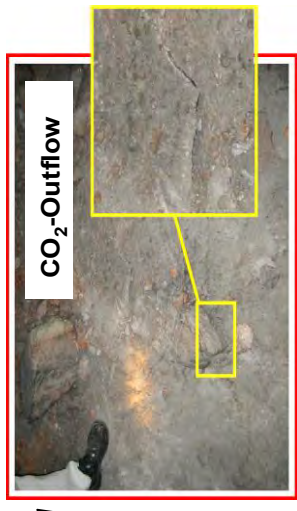
Local
gas-frac



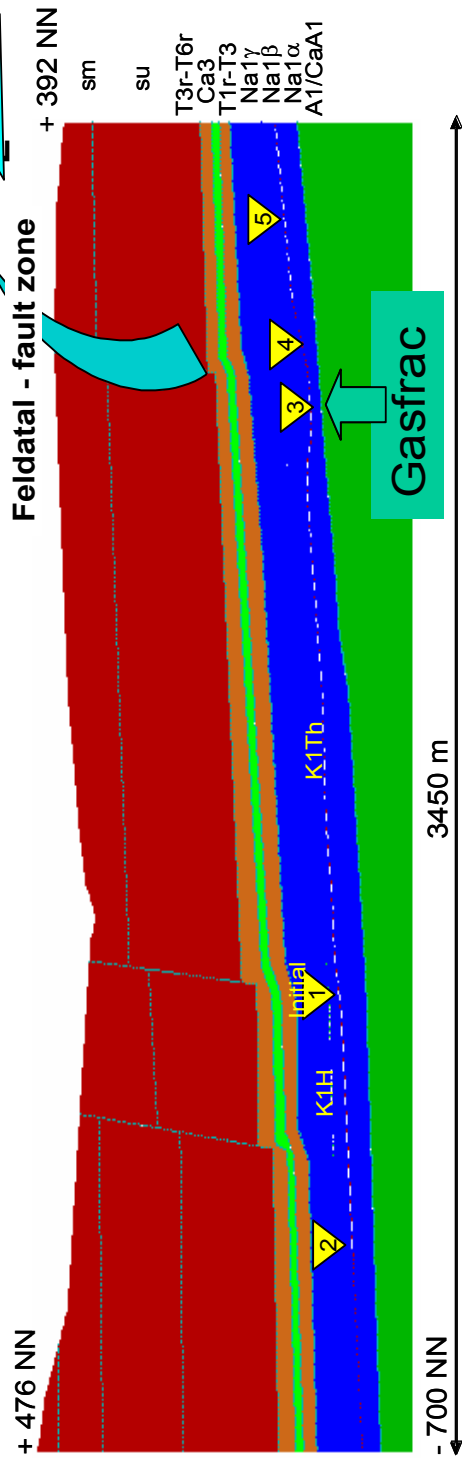
Impact on the geological salt barriers



As a consequence of the rock burst Völkershausen 1989 an gas breakthrough of CO₂ occurred in the lower rock salt barrier in the salt mine Merkers due to the unloading of the upper mine parts.



gas outflow
1989 - 2000
~ 46 Mio. m³ CO₂



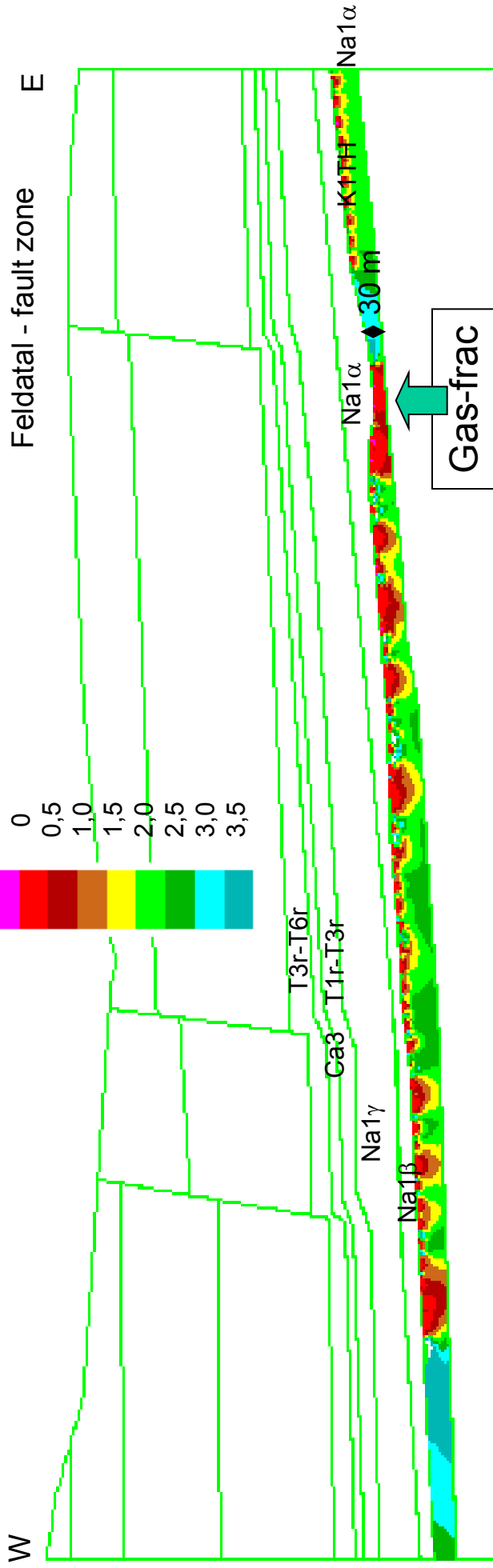
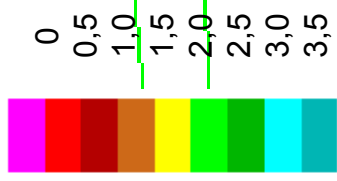
Volcanic induced accumulations of CO₂
(p_{gas} ~ 7.5 MPa)



Impact on the geological salt barriers

minimum stress criterion
factor of safety

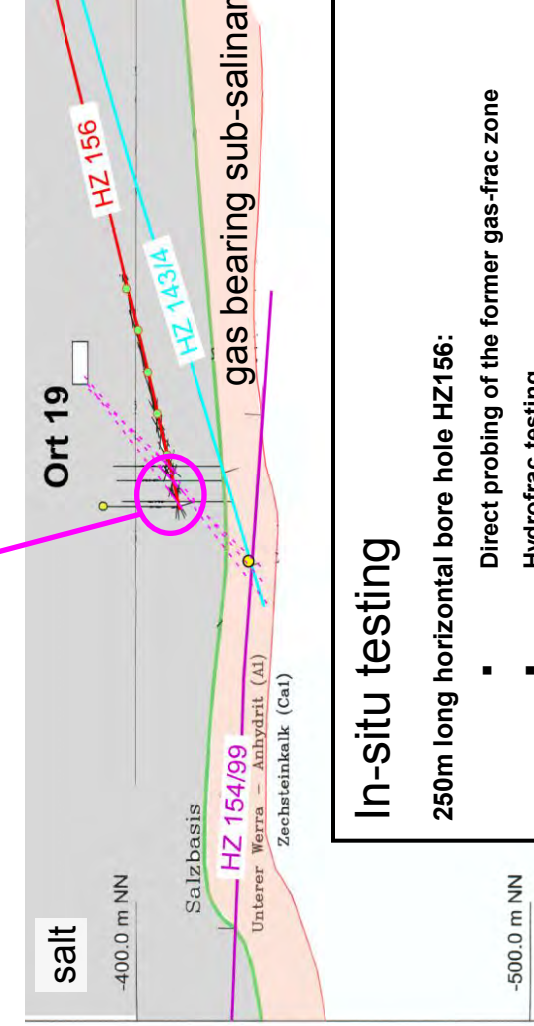
$$n_F = \frac{\sigma_{MIN} + \sigma_{ZUG}}{p_{FL}}$$



In-situ testing in the former gasfrac zone



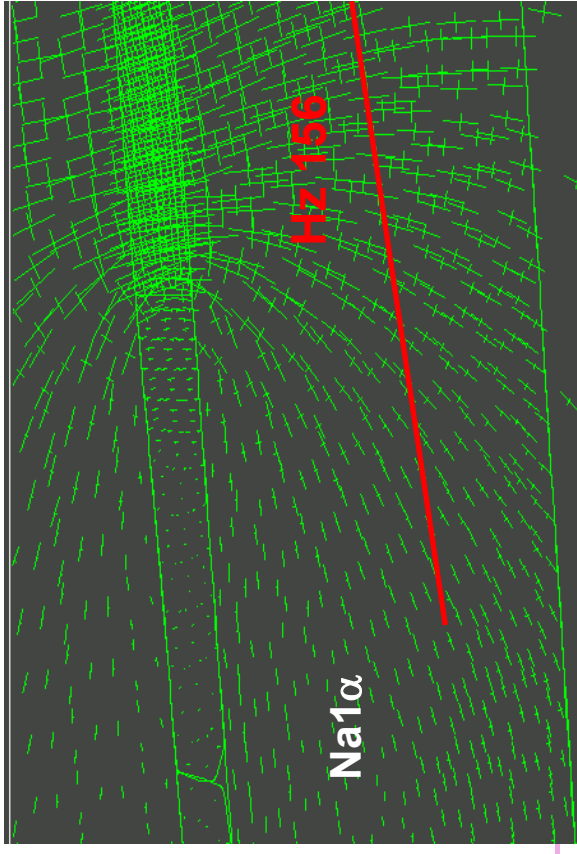
- At least partial, but „real“ healing is documented
- Only local gas reservoirs were found without connection to the gas bearing sub-salinar
- Recovery of minimal stress in the former gas-frac zone
- Gasfracs are oriented parallel to the direction of the maximal stress



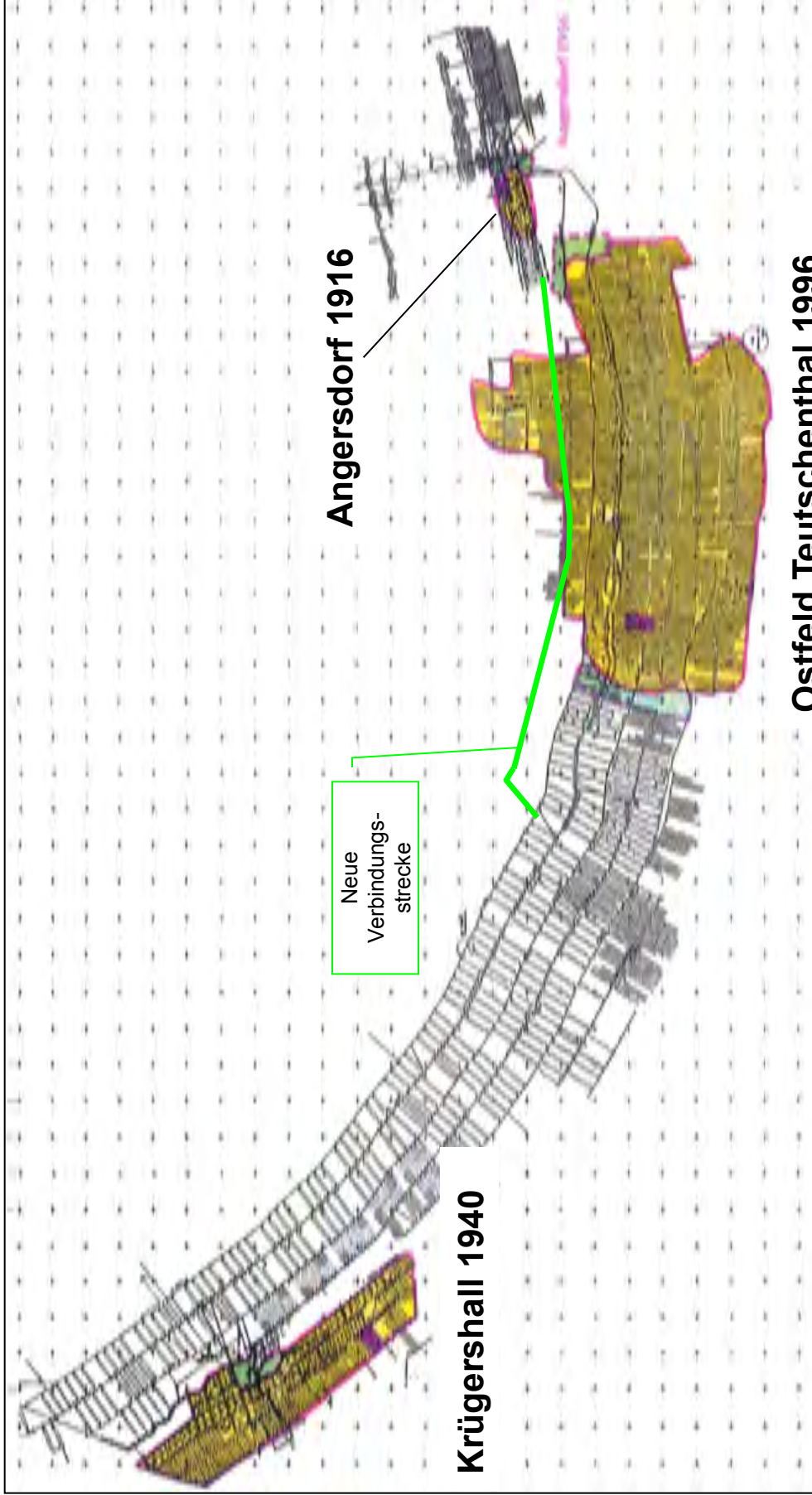
In-situ testing

250m long horizontal bore hole HZ156:

- Direct probing of the former gas-frac zone
- Hydrofrac testing
- Pressure build-up tests
- Gas-injection tests



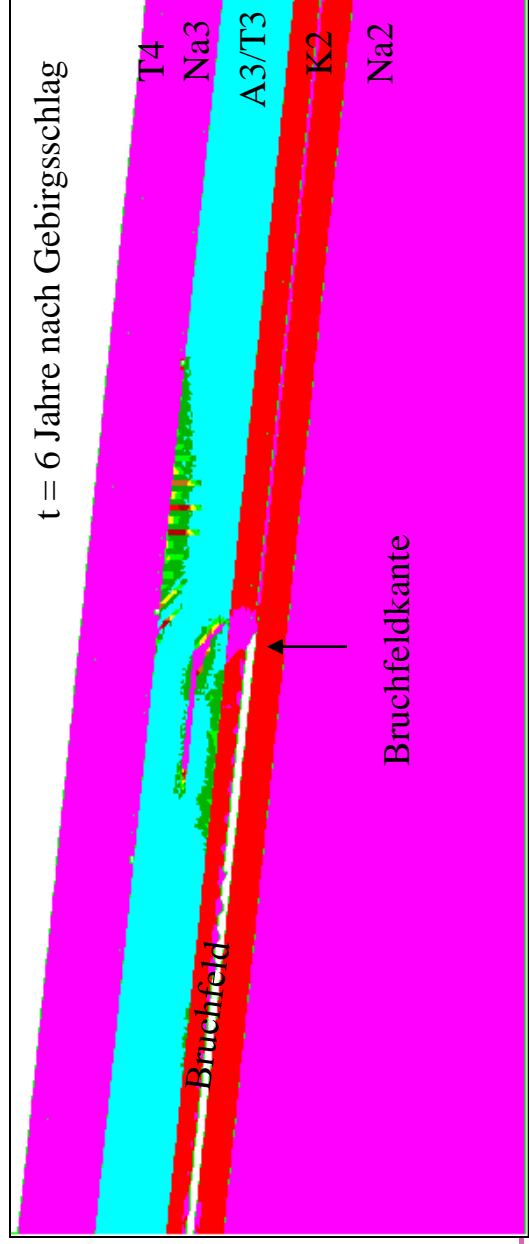
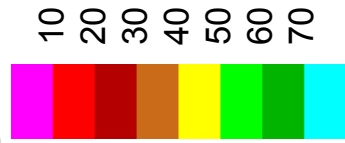
Neue Wetterstrecke zwischen Angersdorf und Teutschenthal



Modellausschnitt Zechstein (unten): Entfestigung im Hauptanhydrit nach Gebirgsschlag 1996 und Laugenzufluss aus dem Anhydrit in der Wetterschleuse über der Bruchfeldkante (oben)

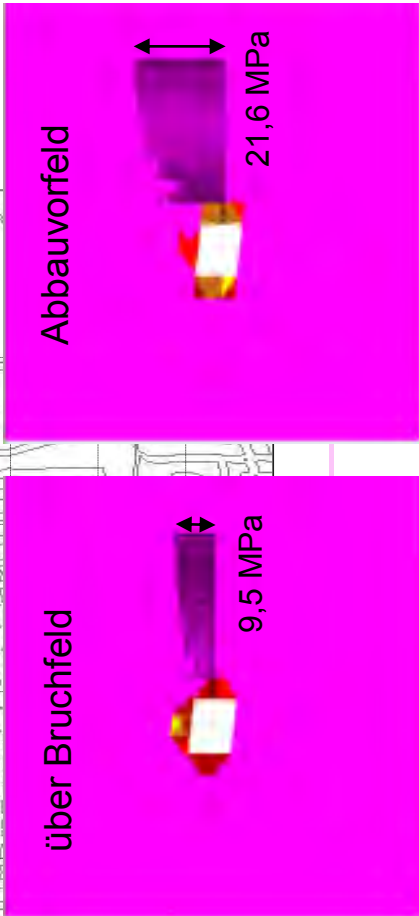
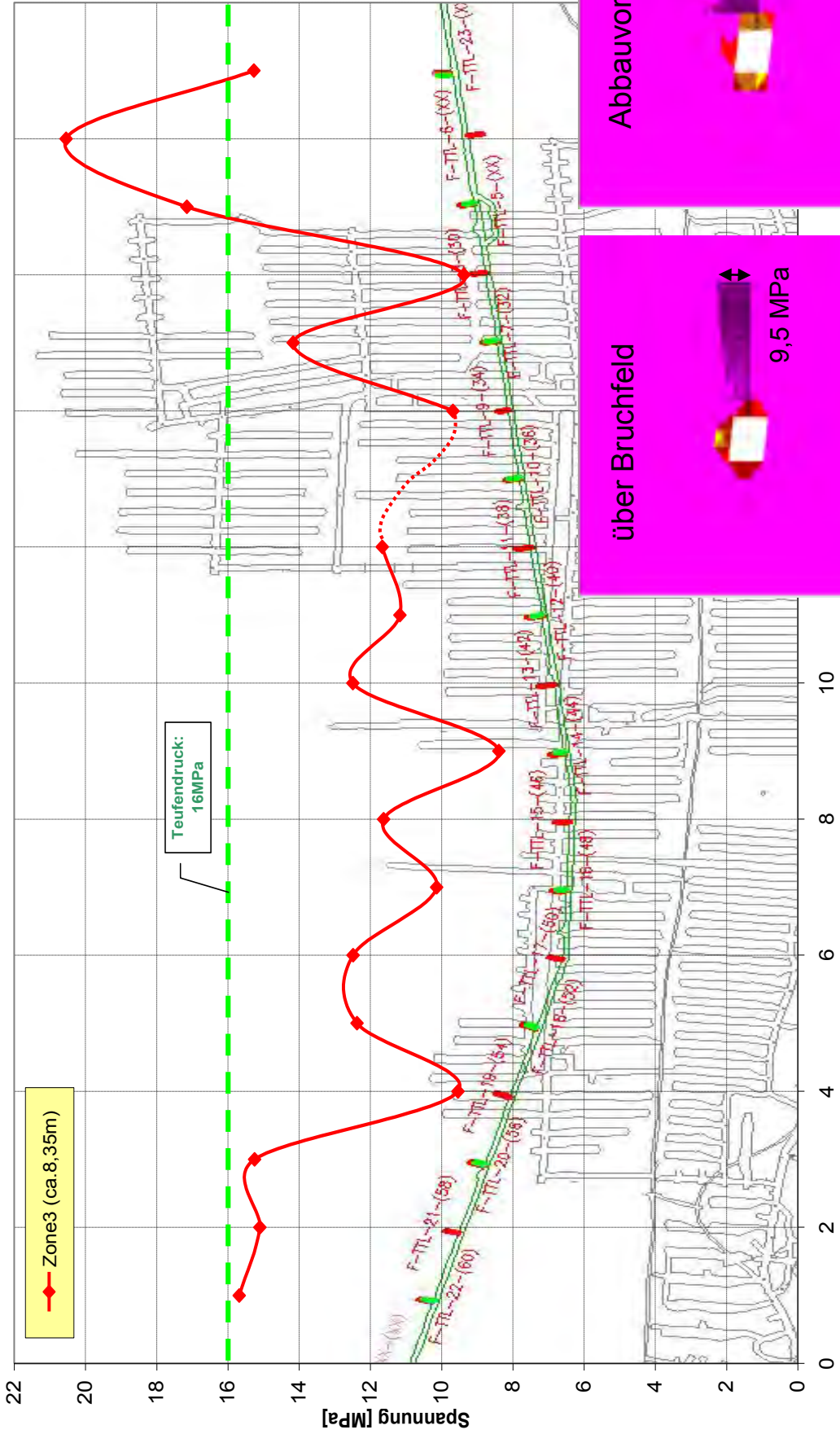


Druckfestigkeit
 $\sigma_D(\epsilon^P)$ MPa

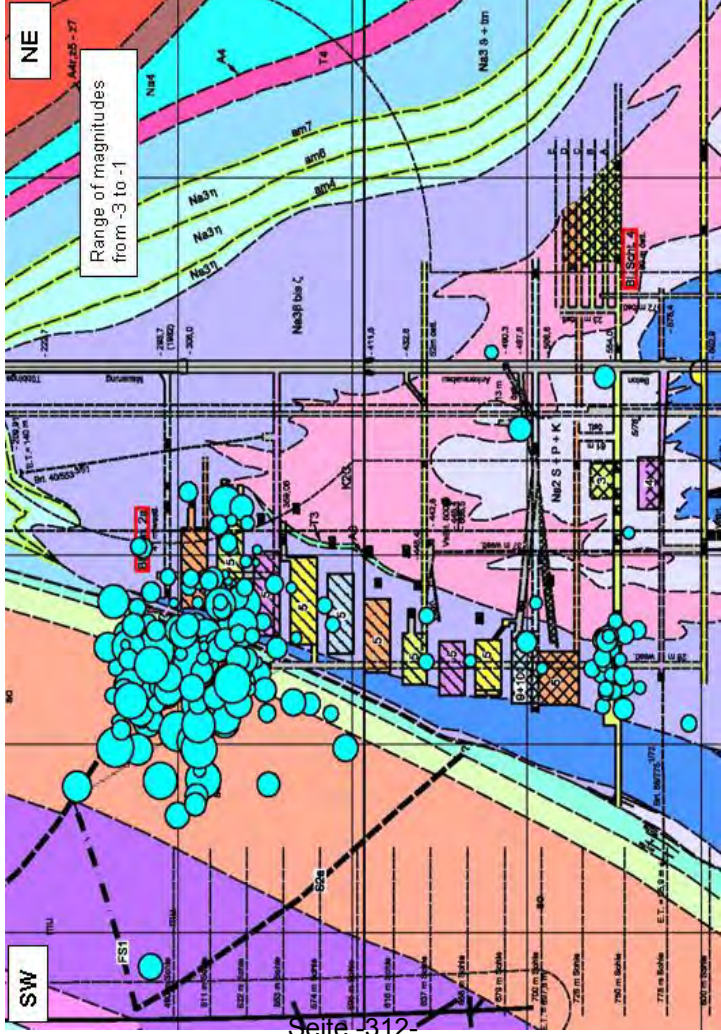


Verlauf der minimalen Hauptspannung im W-E-Profil Bohrlochtiefe 8 m

Zone3 (ca. 8,35m)



Case study (1) Asse 2: Violation of the dilatancy and minimum stress criterion Inflow of water into the former salt-mine, used as URL



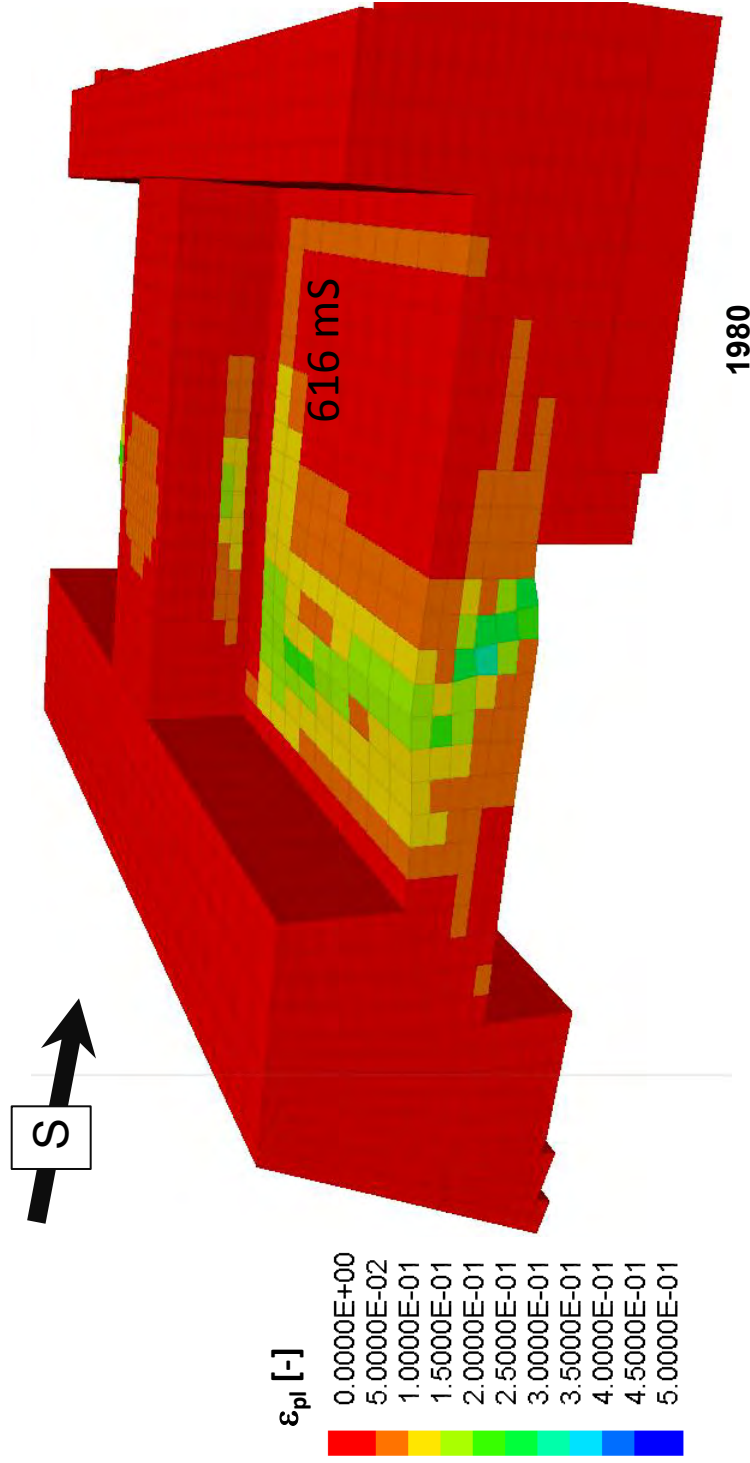
Recorded micro-seismic activities



Calculated dilatant zones around the mining rooms at the southern flank of the Asse II mine

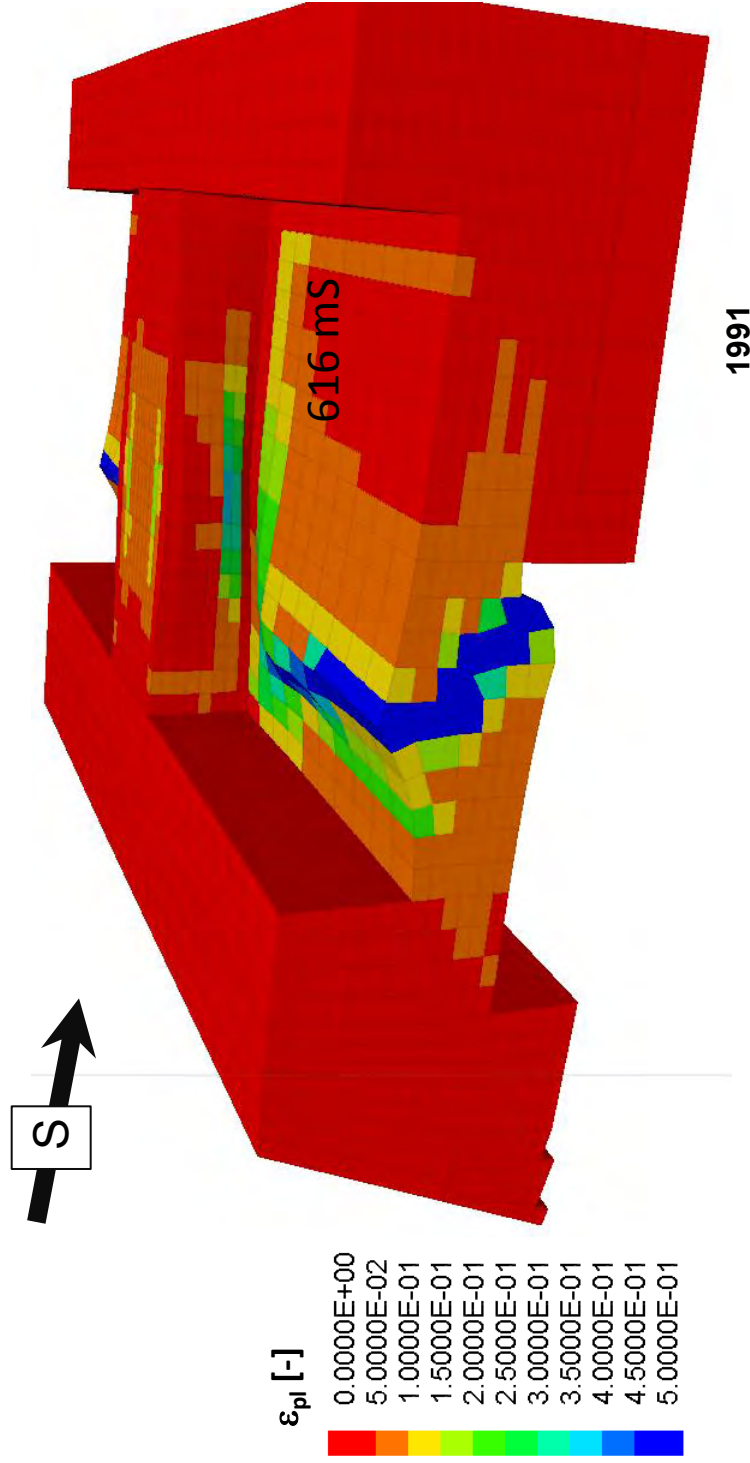
Case study (1) Asse 2: Violation of the dilatancy and minimum stress criterion

Inflow of water into the former salt-mine, used as URL



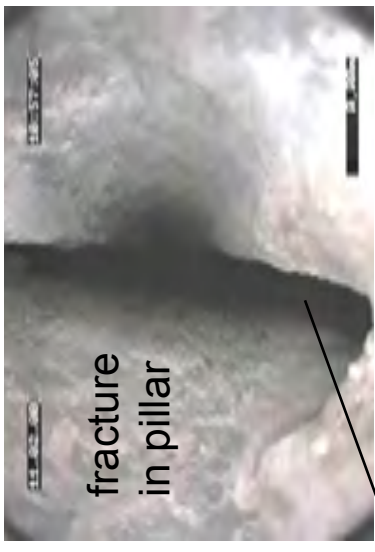
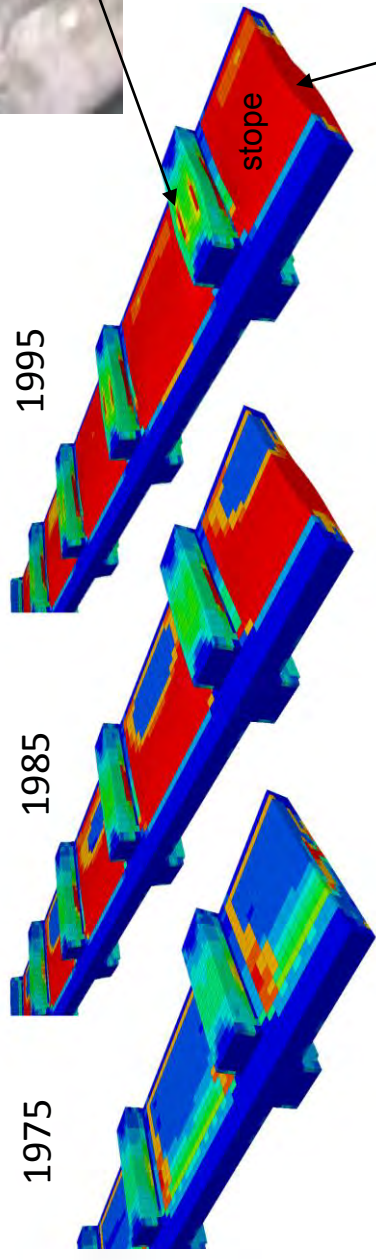
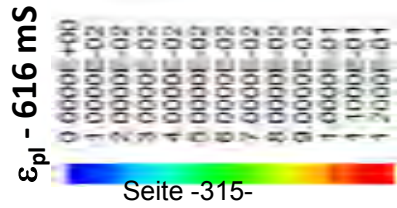
Case study (1) Asse 2: Violation of the dilatancy and minimum stress criterion

Inflow of water into the former salt-mine, used as URL



Case study (1) Asse 2: Violation of the dilatancy and minimum stress criterion

Inflow of water into the former salt-mine, used as URL



Schematisiertes geologisches Profil des Salzstockes Bokeloh und Aufbauschema im Sylvinit (SESSLER & HOLLÄNDER, 2002)

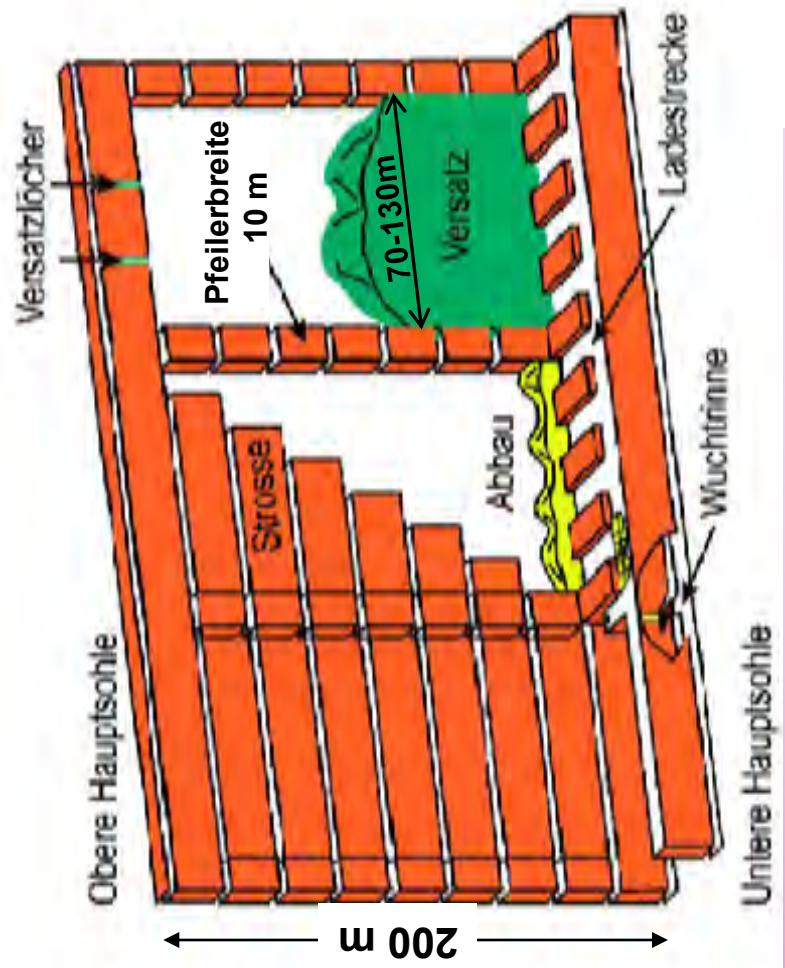
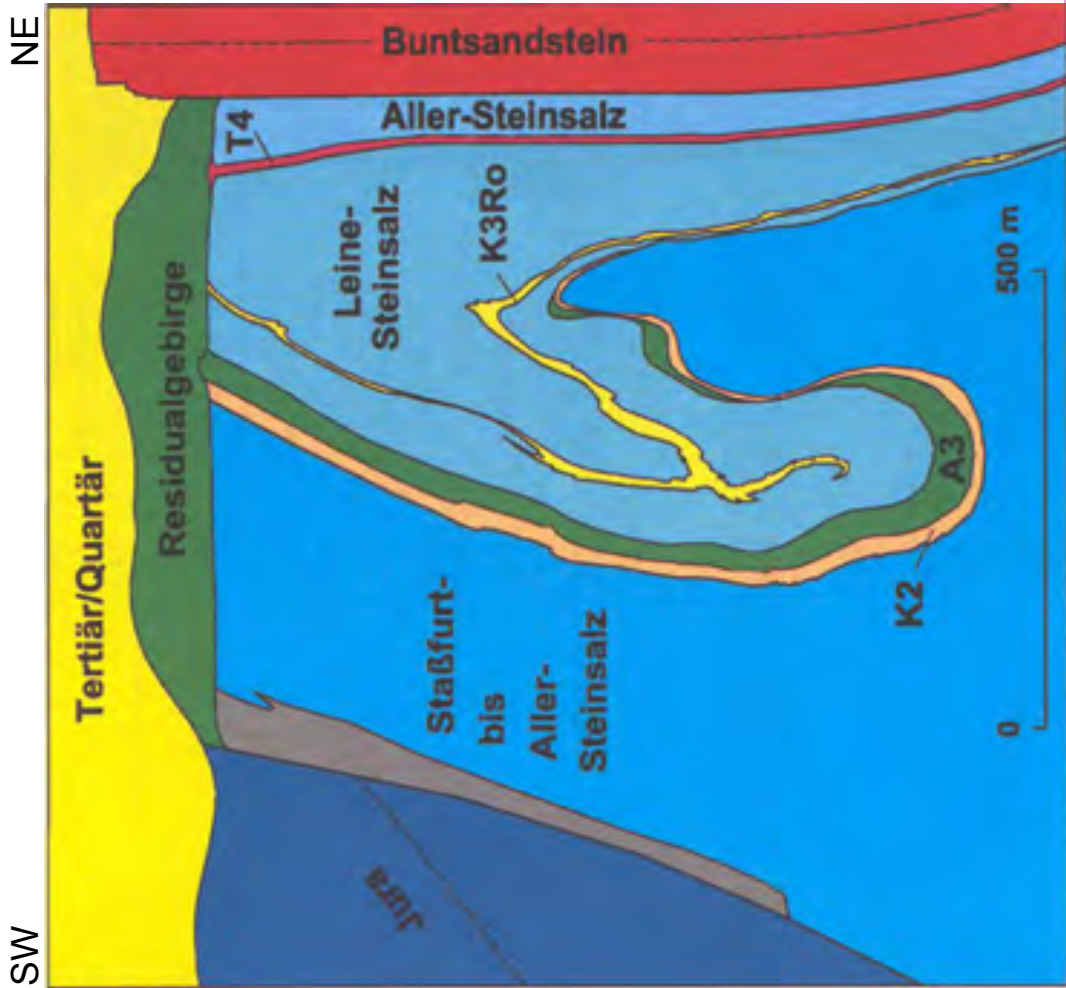
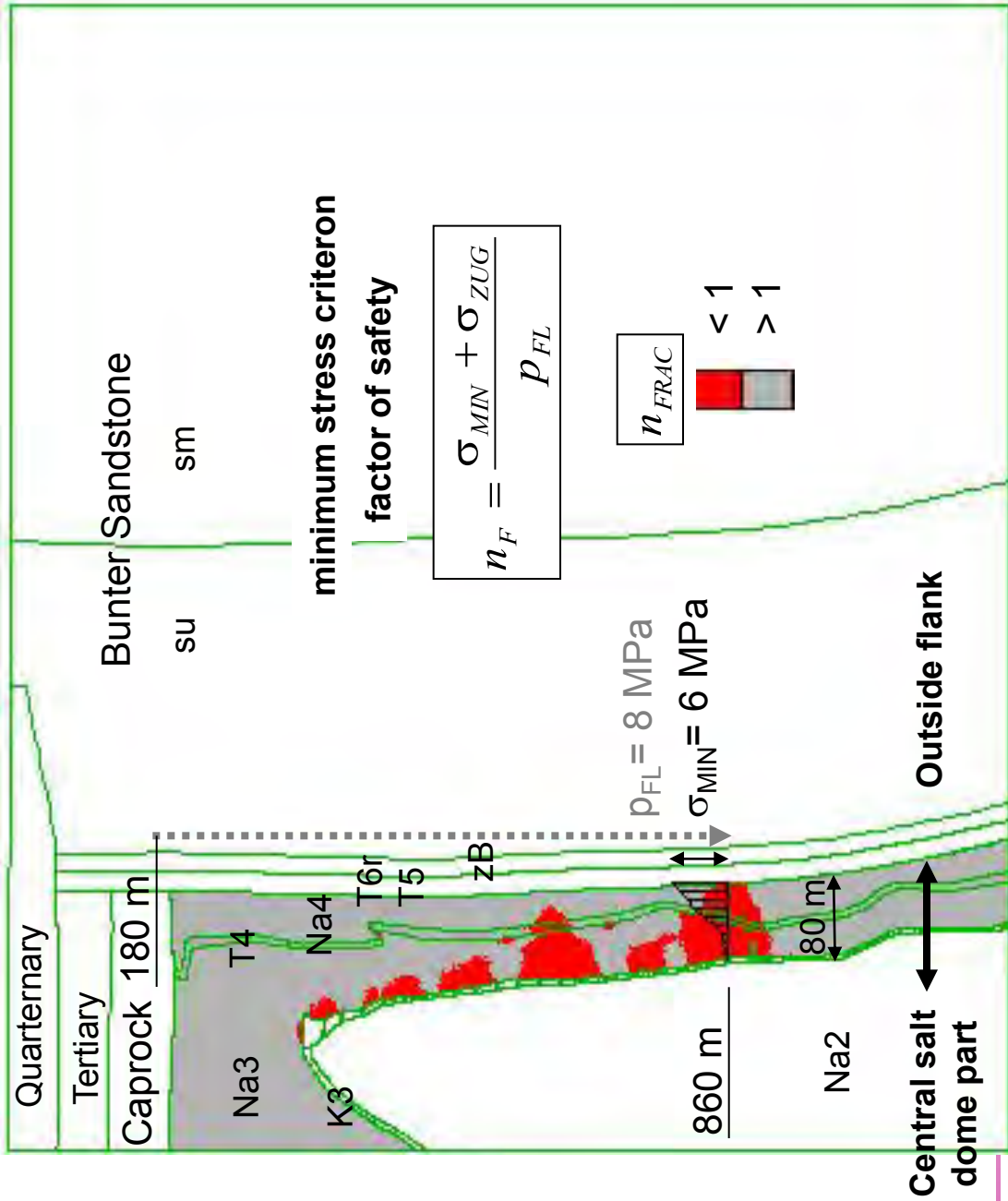
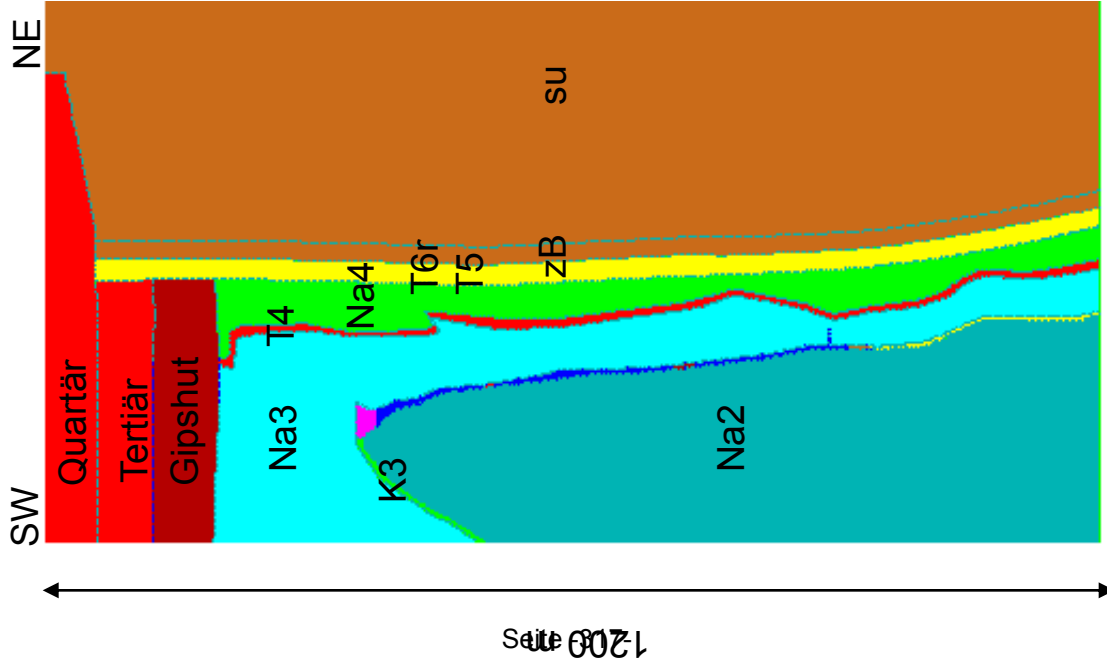


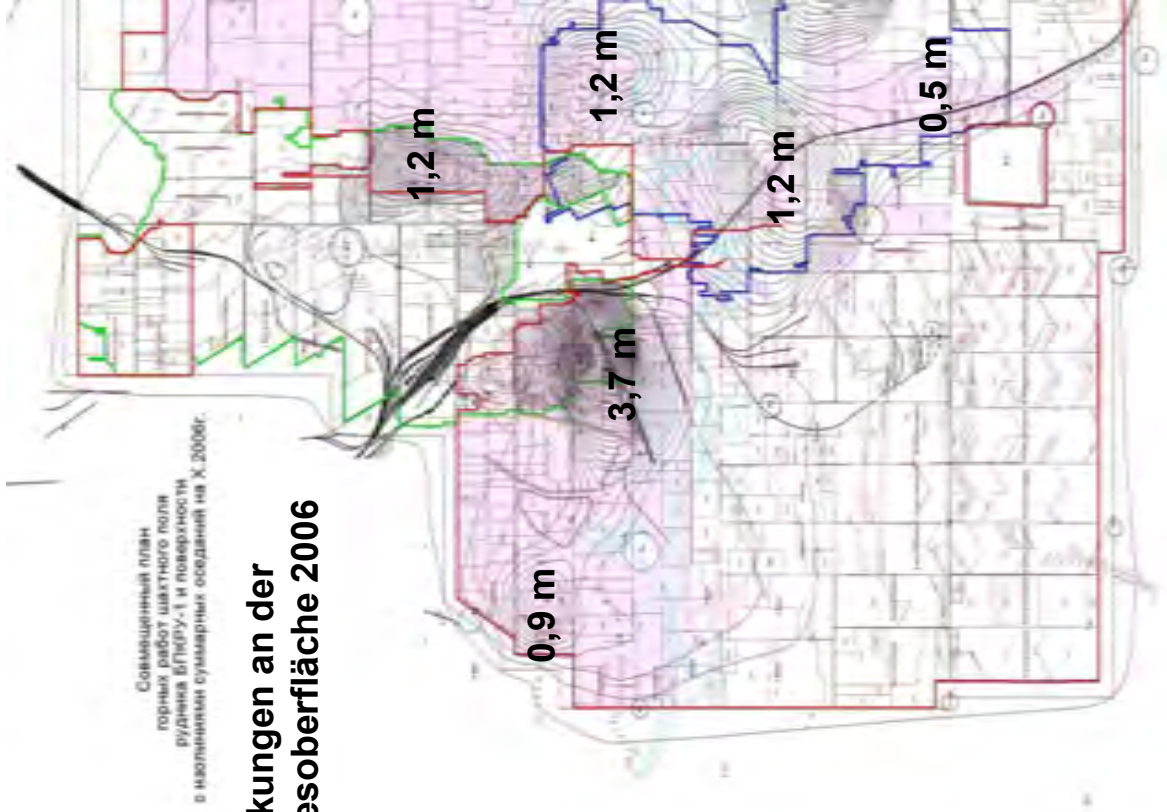
Abb.: 25

Case study (2) salt dome Bokeloh: Violation of the Minimal stress criterion



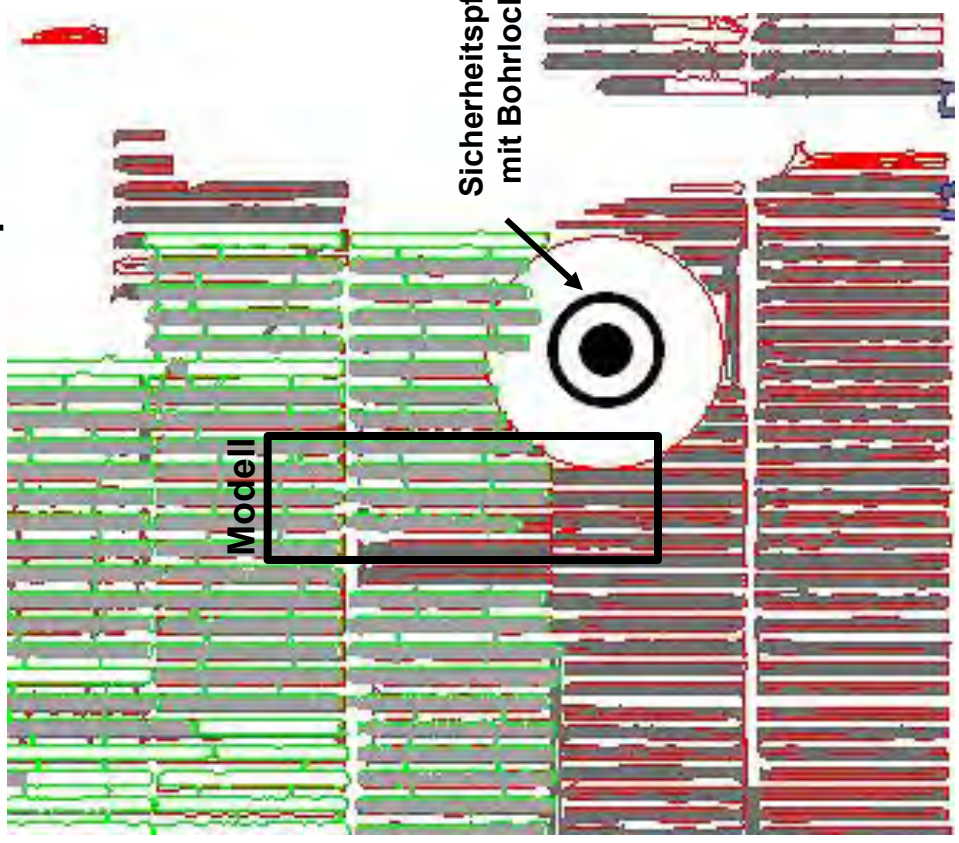
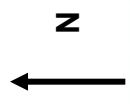
Einbruchrichter Berezniki I (28.08.2007)

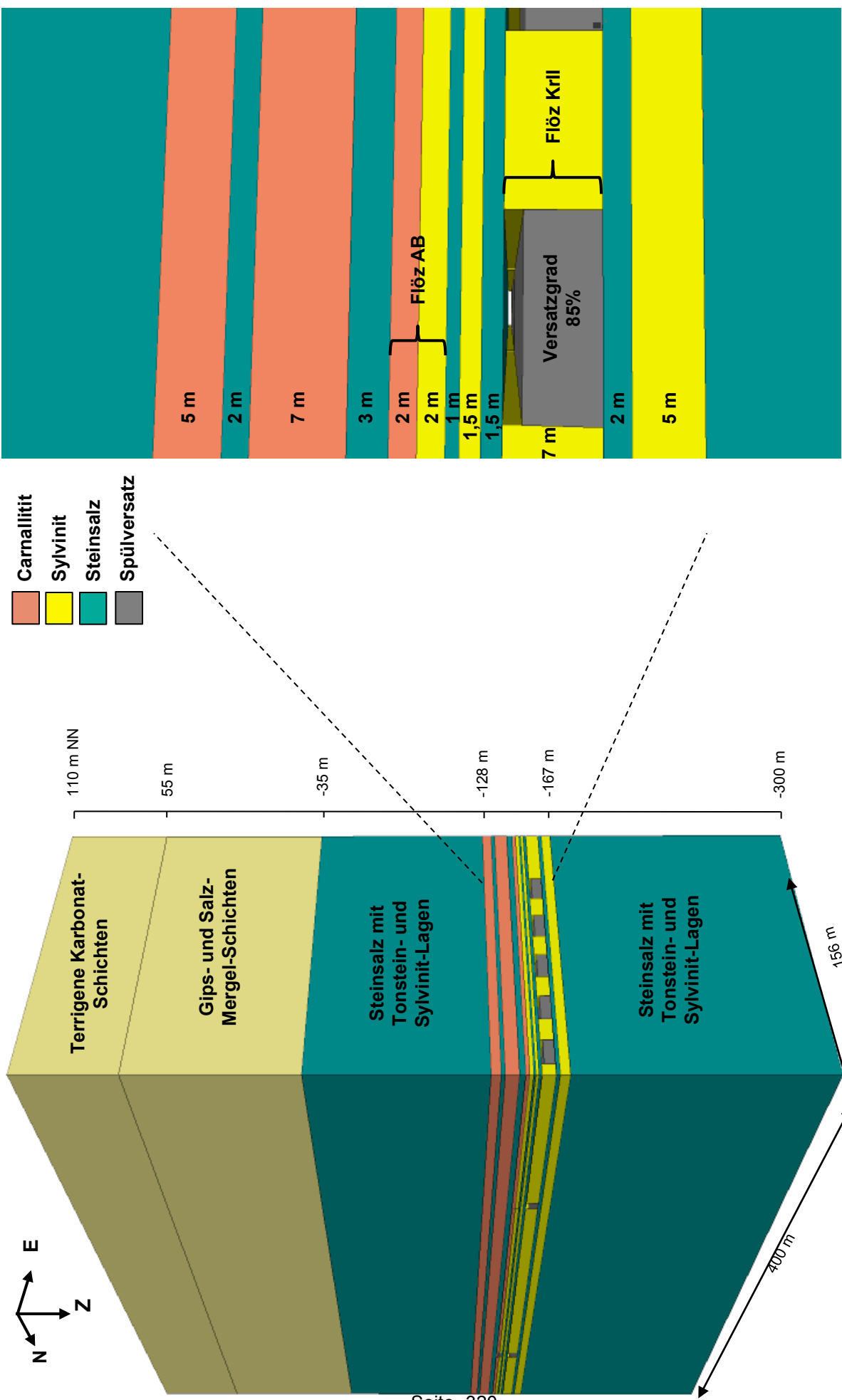




Senkungen an der Tagesoberfläche 2006

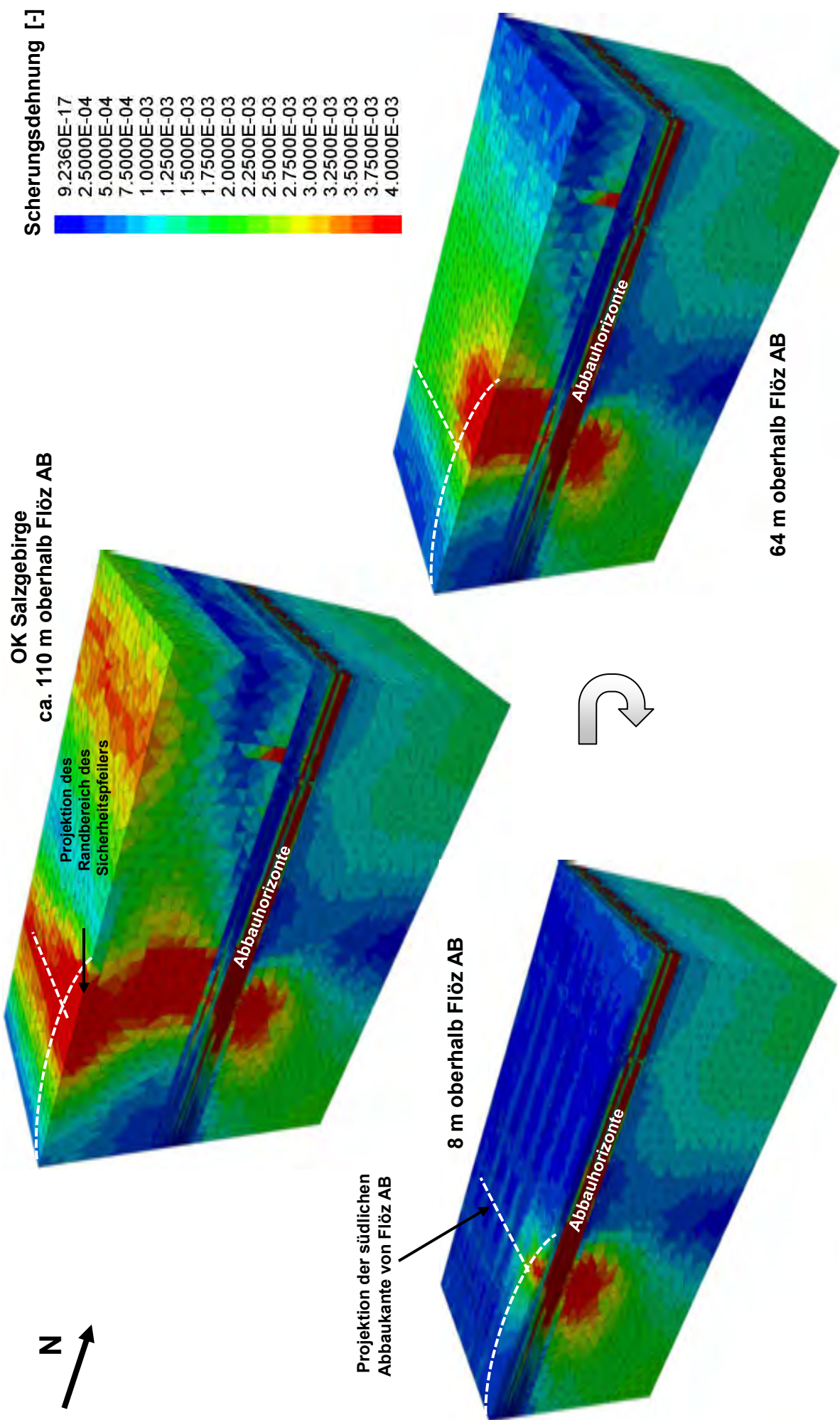
Flöz AB
Flöz Krill





- Carnallit
- Sylvinit
- Steinsalz
- Spülversatz





Scherungsdehnung [-]

- 9.2360E-17
- 2.5000E-04
- 5.0000E-04
- 7.5000E-04
- 1.0000E-03
- 1.2500E-03
- 1.5000E-03
- 1.7500E-03
- 2.0000E-03
- 2.2500E-03
- 2.5000E-03
- 2.7500E-03
- 3.0000E-03
- 3.2500E-03
- 3.5000E-03
- 3.7500E-03
- 4.0000E-03

OK Salzgebirge
ca. 110 m oberhalb Flöz AB

Projektion des
Randbereichs des
Sicherheitspfeilers

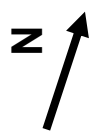
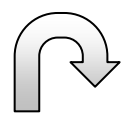
Abbauhorizonte

8 m oberhalb Flöz AB

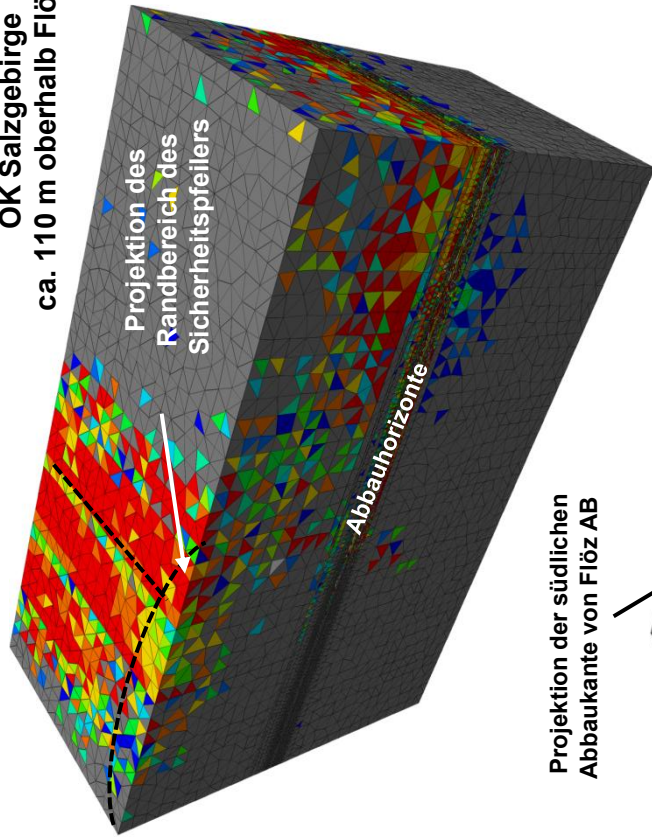
Projektion der südlichen
Abbaukante von Flöz AB

Abbauhorizonte

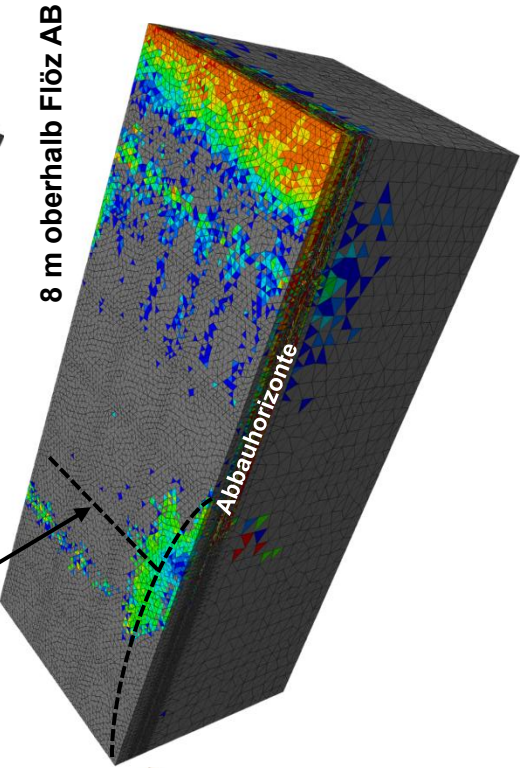
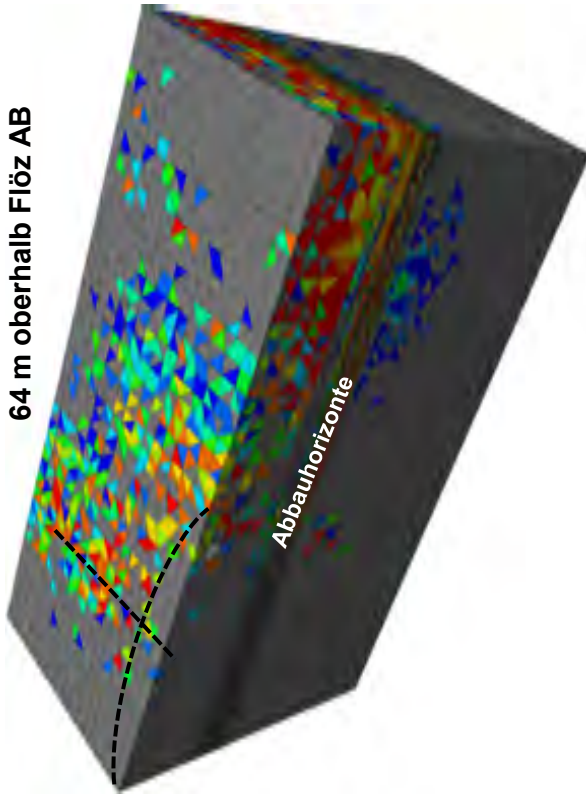
64 m oberhalb Flöz AB



OK Salzgebirge
ca. 110 m oberhalb Flöz AB



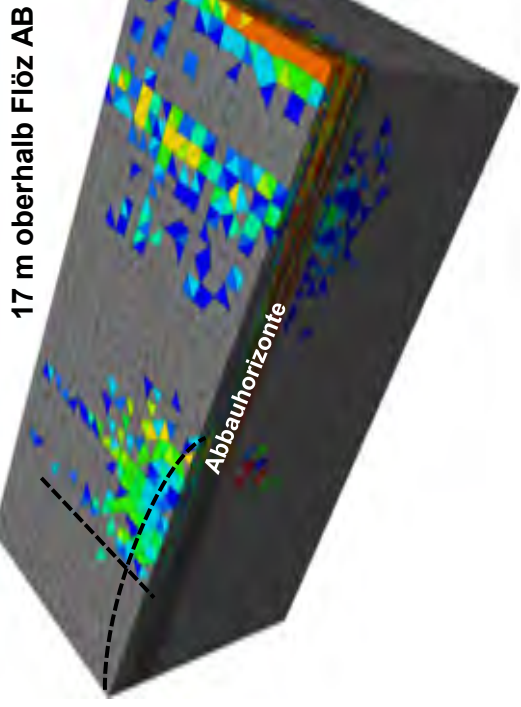
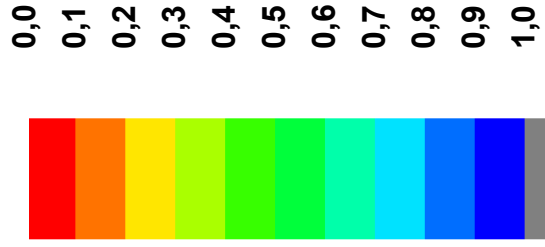
64 m oberhalb Flöz AB



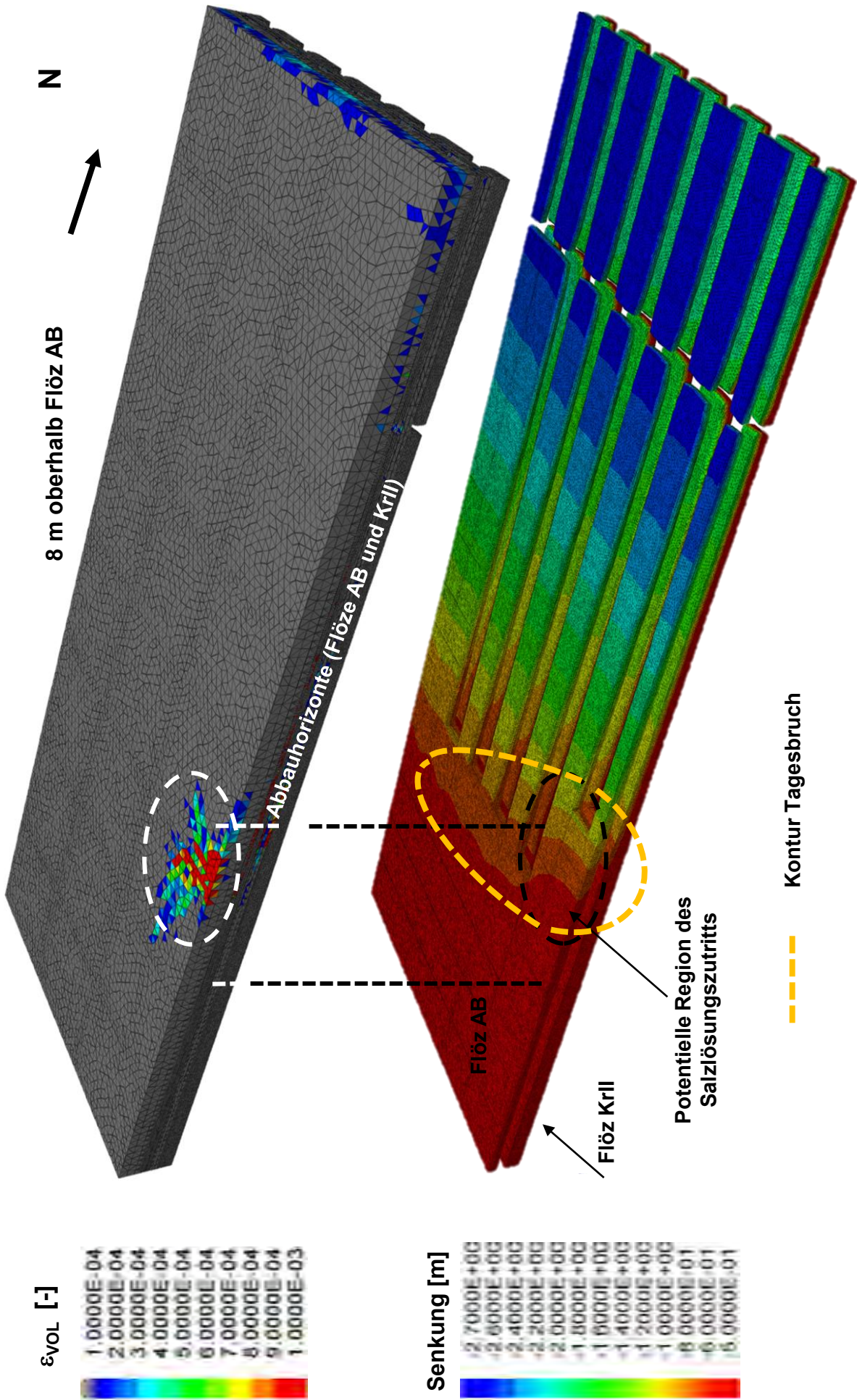
Projektion der südlichen
Abbaukante von Flöz AB

8 m oberhalb Flöz AB

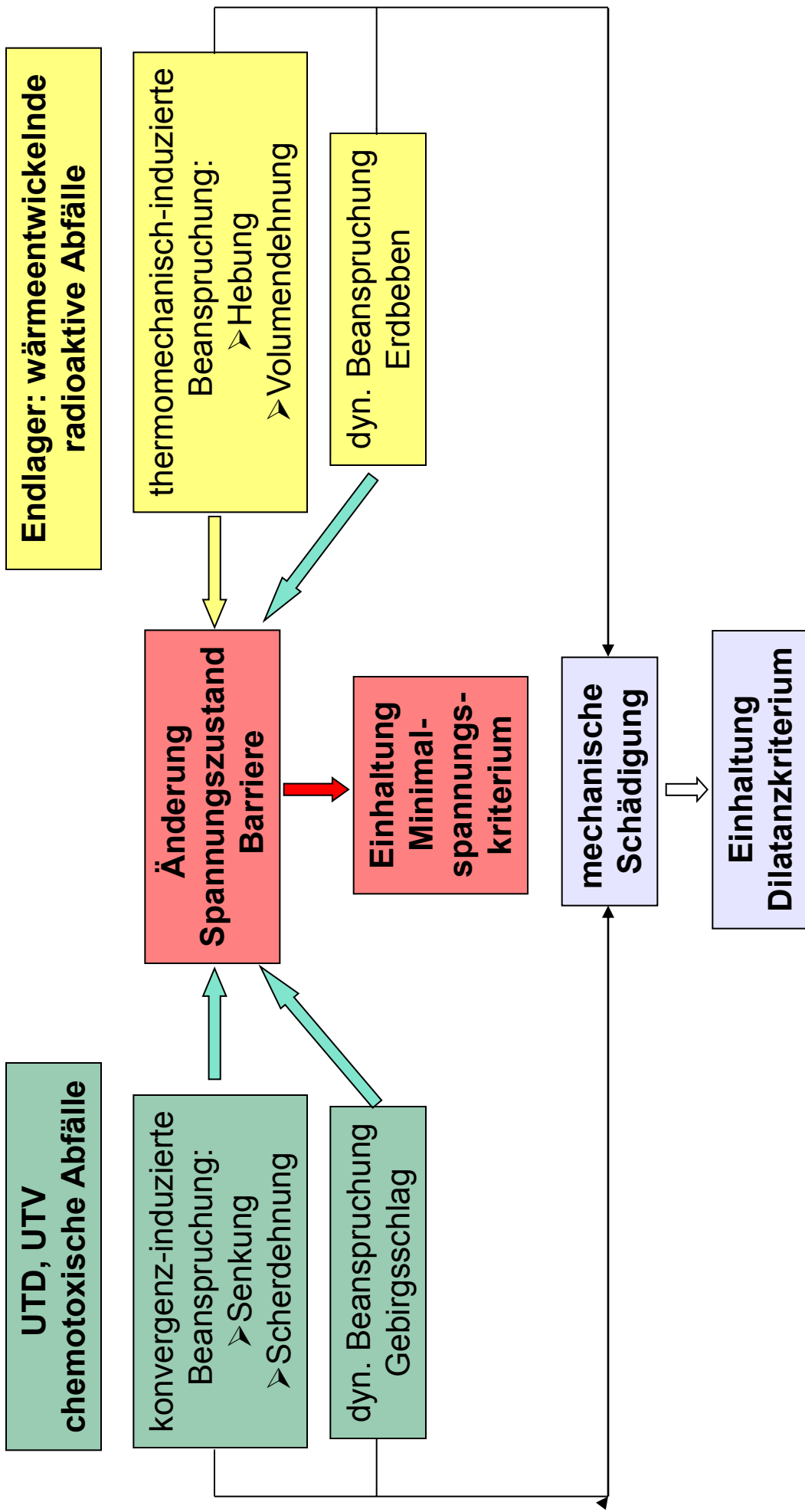
$$S_L = (\sigma_3 + \sigma_z) / p_{fl}$$



17 m oberhalb Flöz AB



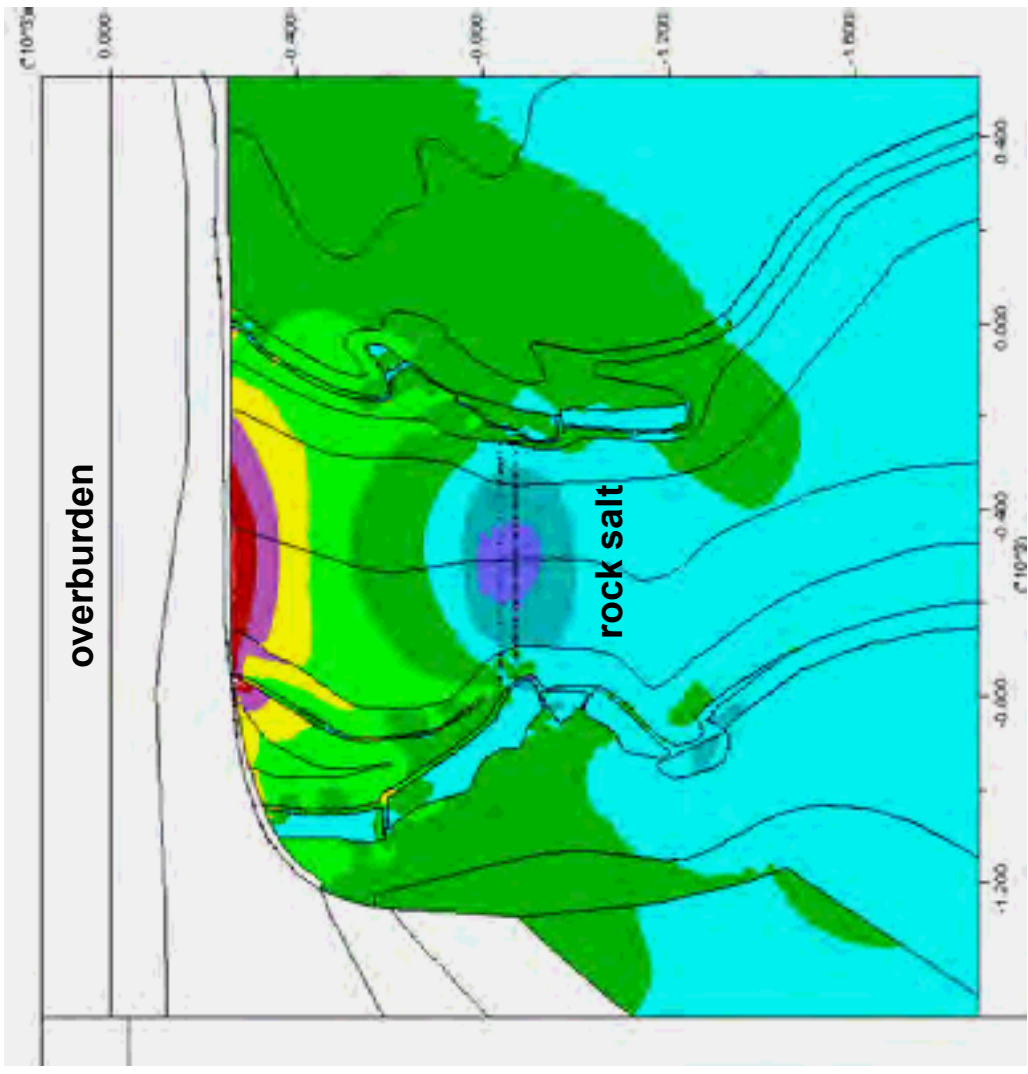
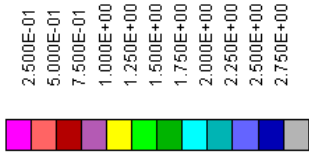
Nachweis Barriereintegrität Untertagedeponien und Endlager im Salzgebirge



Thermo-mechanical calculation of a final disposal in steep bedded deposits

minimum stress criterion
factor of safety

$$n_F = \frac{\sigma_{MIN} + \sigma_{ZUG}}{p_{FL}}$$



Geological cross-section through the reference-site in a flat bedded salt formation

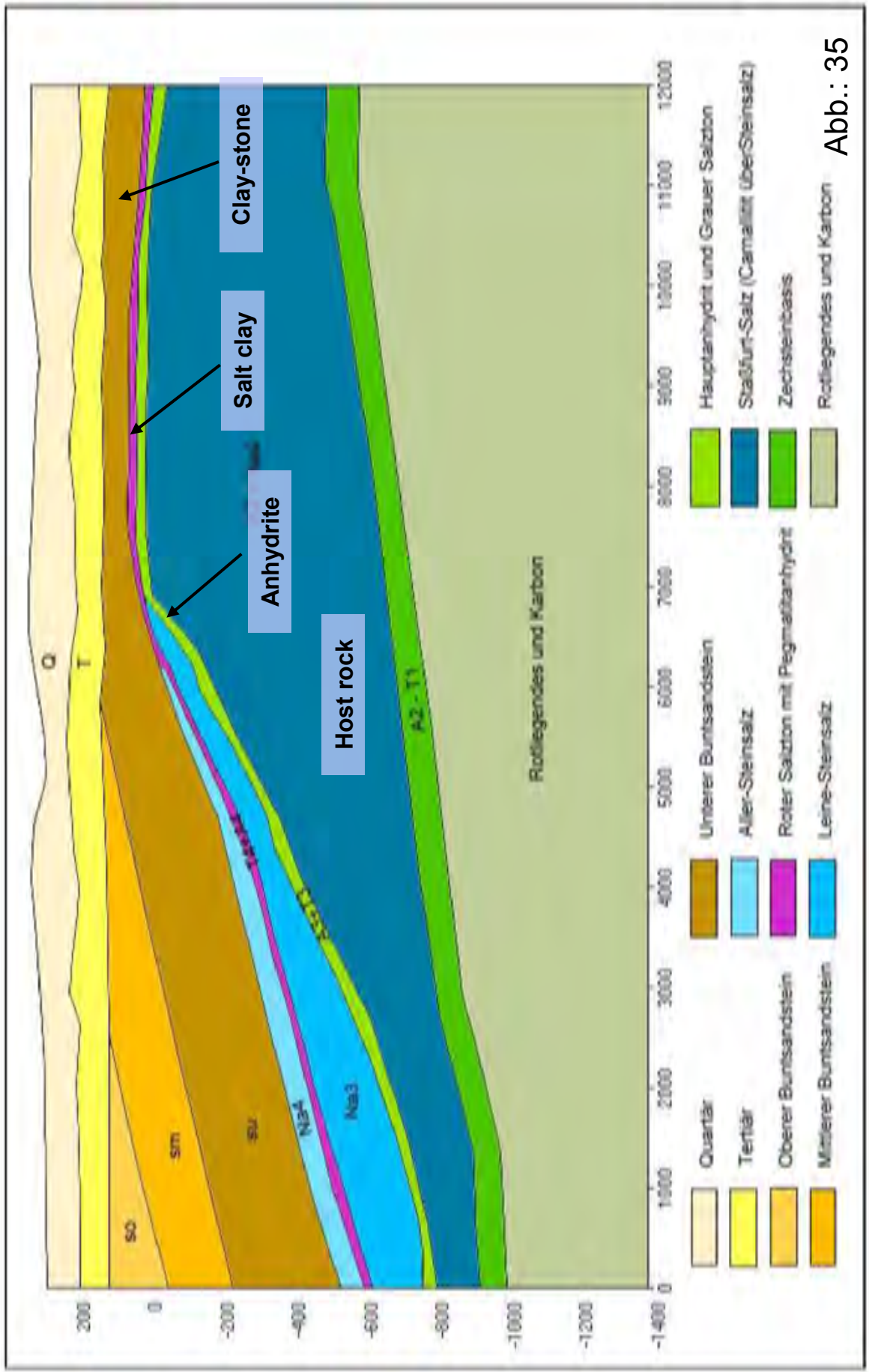


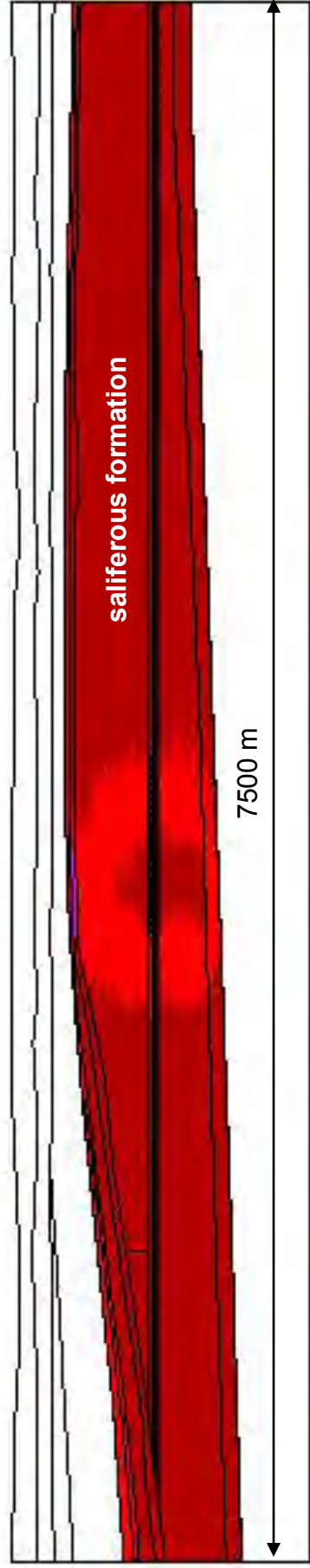
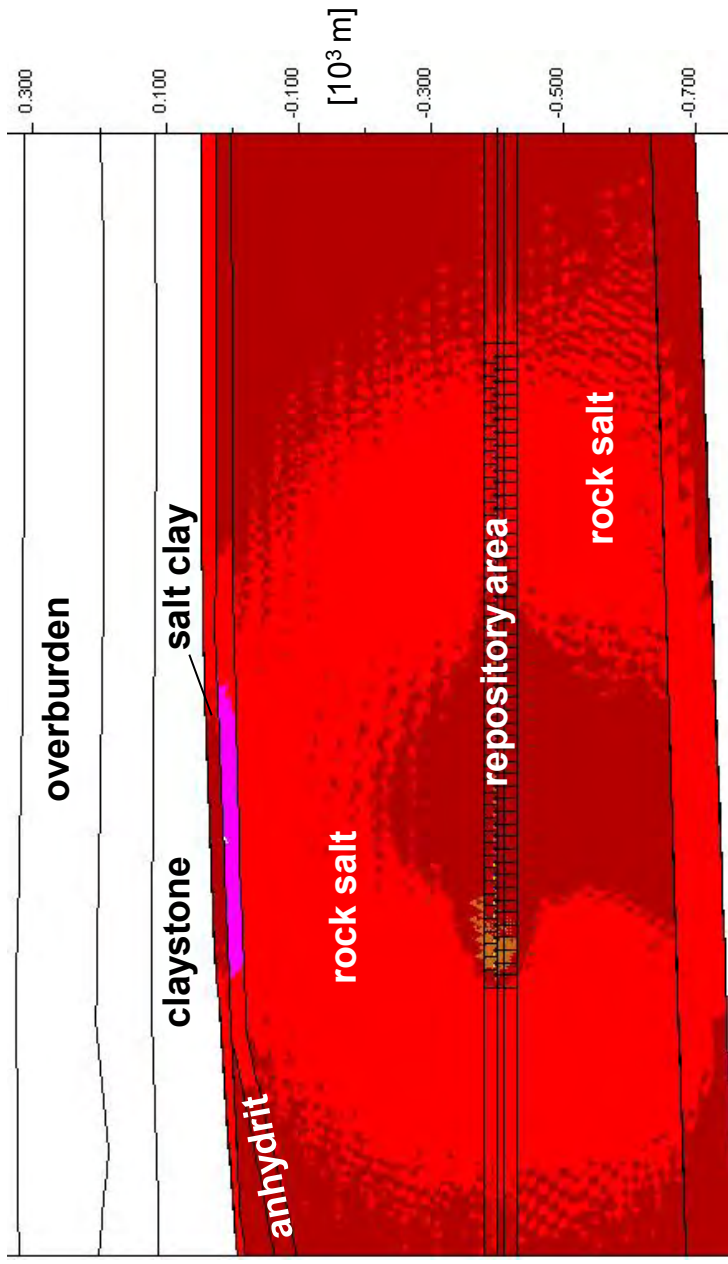
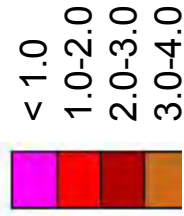
Abb.: 35

Thermo-mechanical calculation of a final disposal in a flat bedded deposit

minimum stress criterion

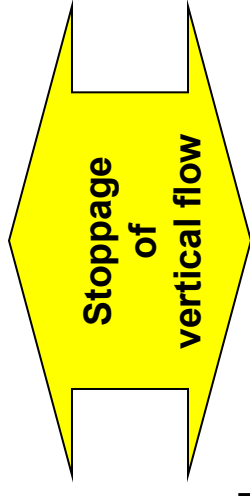
factor of safety

$$n_F = \frac{\sigma_{MIN} + \sigma_{ZUG}}{p_{FL}}$$



Flat bedded salt deposits - a natural geological multi-barrier-system

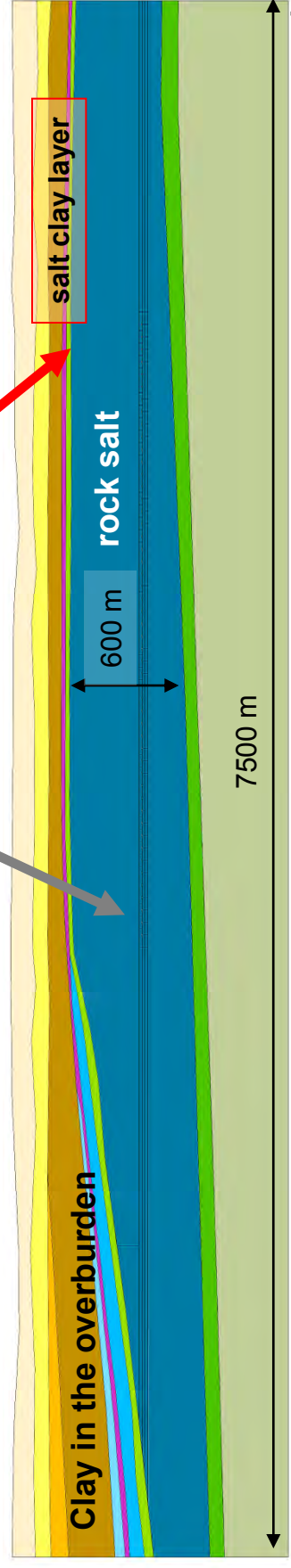
- **Advantages**
- Clay layers in the overburden
- Bedded intra-saliferous salt clay as additional protective shield
- Rock salt with bedding planes/discontinuities in a horizontal direction



bedded rock salt



salt clay



Mechanisches Verhalten von Steinsalz – Laborversuche und Modellierung

Prof. Dr. Lux, K.-H. & PD Dr. Düsterloh, U.

TU Clausthal

Mechanisches Verhalten von Steinsalz – Laborversuche zur physikalischen Modellierung

1. Vorwort

Die im Forschungsschwerpunkt „Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ durch das BMBF geförderten Vorhaben zur laborativen Analyse des mechanischen Verhaltens von Steinsalz und der darauf aufbauenden physikalischen Modellierung des Stoffverhaltens sind im Förderzeitraum zwischen 1991 und 2011 charakterisiert durch den Übergang von der klassischen Kontinuumsmechanik zur so genannten Schädigungsmechanik. Die nachfolgende Kurzdarstellung der in den vergangenen 20 Jahren auf dem Gebiet der laborativen Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz und seiner Modellierung erzielten wissenschaftlichen Fortschritte hat das Ziel, in Ergänzung zu den beigefügten Vortragsfolien einerseits aufzuzeigen, welche Fragestellungen aus dem Bereich der untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle ursächlich waren für den Wechsel von der klassischen Kontinuumsmechanik zur Schädigungsmechanik und andererseits begründet darzulegen, welche wissenschaftlichen Fortschritte erzielt worden sind bzw. warum durch die erzielten wissenschaftlichen Fortschritte ein wesentlicher Beitrag zum Schutz der Umwelt und zur Sicherheit der Bürger erarbeitet wurde. Dazu wird im Sinne einer Zeitreise durch den Förderzeitraum der vergangenen 20 Jahre zunächst der in 1990 bestehende Kenntnisstand auf dem Gebiet der Versuchstechnik zur Charakterisierung und Modellierung des Stoffverhaltens von Steinsalz dokumentiert. Darauf aufbauend wird dann erläutert, welche Fragestellungen zum langfristigen Nachweis des vollständigen Einschlusses untertägig abgelagerter chemotoxischer Abfälle mit kontinuumsmechanischen Konzepten nicht abschließend beantwortet werden können und in der Konsequenz die Forschungsarbeiten initiiert haben. Die Dokumentation des erzielten wissenschaftlichen Fortschritts erfolgt schließlich chronologisch, dem Erkenntniszuwachs im Förderzeitraum folgend, indem versucht wird aufzuzeigen, wie und warum einzelne Teilergebnisse die jeweils nachfolgenden Forschungsaufgaben begründet haben.

Darauf hinzuweisen ist, dass die nachfolgenden Ausführungen nicht den Anspruch auf eine in sich abgeschlossene Dokumentation des Sachzusammenhanges erheben, sondern ausschließlich als Gedankenstütze im Sinne eines „Roter Fadens“ und in Ergänzung zu den Vortragsfolien schlagwortartig den wissenschaftlichen Entwicklungsprozess im Förderzeitraum beschränkt auf die Themengebiete Laborversuche und Modellierungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Steinsalz grob skizzieren. Die Ausführungen sind ausdrücklich nicht geeignet, den wissenschaftlichen Progress in seiner Gesamtheit darzustellen oder die

Forschungsleistungen einzelner Institutionen angemessen zu berücksichtigen. In Würdigung der Vielzahl der im Förderzeitraum erarbeiteten Erkenntnisse wird daher um Nachsicht gebeten, dass nicht alle wissenschaftlichen Arbeiten im Rahmen des Vortrages Berücksichtigung finden.

Die in der nachfolgenden Kurzfassung sowie in den anliegenden Vortragsfolien dokumentierten Forschungsergebnisse sind in wesentlichen Anteilen mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie gefördert worden. Eine Zuordnung einzelner Forschungsergebnisse zu einzelnen Förderkennzeichen erfolgt angesichts der Zielstellung, nicht die Teilergebnisse einzelner Forschungsvorhaben darzustellen, sondern im Sinne einer ergebnisorientierten Übersichtsdarstellung den aus einer Vielzahl einzelner Forschungsvorhaben resultierenden wissenschaftlichen Progress eines 20-jährigen Förderzeitraumes zu dokumentieren nicht. Der Autor dankt persönlich und stellvertretend für alle mit den Forschungsarbeiten betrauten Mitarbeiter dem Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe – Projektträger des BMBF und BMWi für Wassertechnologie und Entsorgung - für die finanzielle Förderung der Projekte und für die stets konstruktive und hilfreiche Projektbegleitung.

2. Versuchstechnik und Modellierung - Kontinuumsmechanik

Der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der geotechnischen Analyse untertägiger Tragsysteme war zu Beginn des Förderzeitraumes charakterisiert durch geomechanische Nachweiskonzepte auf kontinuumsmechanischer Grundlage. Die physikalische Modellierung des ausgeprägt nichtlinearen, von der Temperatur, der Beanspruchungsart, der Beanspruchungsdauer, der Beanspruchungsrate sowie vom Gefüge und der petrographischen Ausbildung abhängigen mechanischen Materialverhaltens von Steinsalz basierte auf rheologischen Stoffmodellen unter Ansatz eines volumentreuen Spannungs-Verzerrungs-Verhaltens. Die Ermittlung der Stoffmodellkennwerte zur Quantifizierung des Kriechverhaltens erfolgte vornehmlich durch einaxiale Kriechversuche auf Versuchsanlagen entsprechend der Darstellung in Folie 3, indem als Lastpfad eine über die Versuchszeit von mehreren Wochen bis Monaten konstante Spannung und Temperatur regelungstechnisch vorgegeben wurde und die zeitabhängig resultierenden Axialverformungen messtechnisch erfasst wurden. Die nach wenigen Wochen Versuchszeit beobachtete lineare Abhängigkeit zwischen Verzerrung und Zeit definiert gemäß Darstellung in Folie 4 die der konstanten Beanspruchung entsprechende stationäre Kriechrate. Aus einer Auftragung der bei variierten Spannungen und jeweils gleicher Versuchstemperatur ermittelten stationären Kriechraten kann die Abhängigkeit der stationären

Kriechrate von der Spannung ermittelt werden, Folie 5. Aus einer Auftragung der bei variierten Versuchstemperaturen und jeweils gleicher Spannung ermittelten stationären Kriechraten kann die Abhängigkeit der stationären Kriechrate von der Temperatur ermittelt werden, Folie 6. Ausgewählte Stoffmodelle zur mathematischen Beschreibung des stationären Kriechverhaltens in Abhängigkeit von der Spannung und der Temperatur zeigt Folie 7.

Das in den ersten Tagen bis Wochen nach Lastaufgabe beobachtete transiente Kriechen ist in Analogie zum stationären Kriechen abhängig vom Niveau der einwirkenden Spannung und der Temperatur und kann entsprechend der exemplarischen Darstellung in Folie 8 aus der versuchstechnisch gemessenen Gesamtverformung durch Subtraktion der stationären Kriechverformung ermittelt werden. Die Auftragung ausgewählter Stoffmodelle zur mathematischen Beschreibung der transienten Kriechrate in Folie 9 dokumentiert eine Abhängigkeit von der Spannung, der Temperatur und der Dehnung bzw. der Versuchszeit (→ Dehnungsverfestigungsansatz bzw. Zeitverfestigungsansatz).

Im Ergebnis der vorstehend skizzierten Kriechversuche sowie der darauf aufbauenden Bestimmung der Parameter für die Modellierung des Kriechverhaltens konnten die Spannungen und Verformungen im Steinsalzgebirge unter Berücksichtigung standortbezogener und betrieblicher Einwirkungen (primäre Spannungen und Temperaturen, geometrische Konfiguration des Grubengebäudes, Hohlraumauffahrung und Versatz, Mächtigkeit und Raumlage geologischer Formationen, etc.) in Raum und Zeit (x,t) berechnet werden.

Die für eine Bewertung des Tragvermögens untertägiger Grubenbaue erforderliche Kenntnis der Festigkeitseigenschaften von Salzgestein wurde zu Beginn des Förderzeitraumes klassischerweise durch ein- und triaxiale Kompressionsversuche erarbeitet, bei denen entsprechend der exemplarischen Darstellung in Folie 11 unter Konstanthaltung des Manteldruckes $\sigma_{2,3}$ die Axialspannung σ_1 verzerrungsgeregelt und unter Einschaltung einer Be- und Entlastungsphase zur Bestimmung der elastischen Verformungseigenschaften bis zum Bruch bzw. darüber hinaus gesteigert wurde. Die minimalspannungsabhängige Bruchfestigkeit resultiert gemäß Darstellung in Folie 12 schließlich aus einer Auftragung der bei variierten Manteldrücken ermittelten Bruchfestigkeiten über der versuchstechnisch jeweils vorgegebenen Minimalspannung. Unter weiterer Berücksichtigung von Festigkeitsversuchen unter Extensionsbeanspruchungen entsprechend Folie 13 konnten schließlich die für eine Modellierung der Bruchfestigkeit im dreidimensionalen Hauptspannungsraum erforderlichen Parameter ermittelt werden, Folie 14.

Die Bewertung der berechneten bzw. rechnerisch prognostizierten Zustandsgrößen erfolgte regelmäßig dadurch, dass im Grundsatz die rechnerisch ermittelten Spannungen und Verformungen den aus Laborversuchen abgeleiteten Grenzwerten des Trag- und Verformungsver-

mögens (Bruchfestigkeit, Bruchdehnung) gegenübergestellt wurden, Folie 15. Sofern die berechneten Spannungen und Verformungen unter Berücksichtigung einer für angenommen eingeschätzten Sicherheitsmarge kleiner waren als die im Laborversuch ermittelten Bruchfestigkeiten und Bruchverzerrungen wurde davon ausgegangen, dass standsichere Verhältnisse vorliegen. Lastfälle bzw. betriebliche Einwirkungen, die innerhalb des Prognosezeitraumes in rechnerisch prognostizierten Spannungs- und/oder Verformungszuständen resultierten, die größer waren als die im Laborversuch bestimmten Grenzwerte der Bruchfestigkeit und Bruchverzerrung, einschließlich der jeweiligen Sicherheitsmarge, wurden als unzulässig bewertet, da die nach Überschreitung des Tragvermögens ermittelten Zustandsgrößen lediglich einen durch das Berechnungsverfahren bedingten artifiziellen Beanspruchungszustand dokumentierten, der bei Berücksichtigung der realen Materialeigenschaften physikalisch nicht möglich war. D.h. die kontinuumsmechanischen Berechnungen beinhalten keine Stoffgleichungen, die das Spannungs-Verformungs-Verhalten von Steinsalz nach Überschreitung von Bruchfestigkeit und/oder Bruchverzerrung abbilden.

Der in Folie 16 gezeigte Zustand eines insgesamt noch standfesten Salzpfelers, der jedoch in Folge einer offensichtlichen Überbeanspruchung im Bereich der Pfeilerkontur bereits Abschaltungen ausweist, konnte mit dem Instrumentarium der klassischen Kontinuumsmechanik daher rechnerisch nicht abgebildet werden. Bekannt war aus der bergbaulichen Praxis jedoch, dass die im Festigkeitsversuch ermittelte Bruchfestigkeit von Steinsalz zeitabhängig ist. Abhängig von der Intensität der Ausnutzung der Bruchfestigkeit, d.h. dem Verhältnis zwischen Gebirgsbeanspruchung und Gebirgsfestigkeit, wurden im Lauf der Zeit mehr oder weniger schnell zunehmende Schädigungen des Gesteinsgefüges in Form von vernetzten Rissen im konturnahen Gebirge beobachtet, die integral eine progressiv fortschreitende Auflockerungszone ausbildeten und bei fehlender Ertüchtigung der Tragsysteme schließlich in einen ruptuell durch Konturbrüche und Abschaltungen geprägten Versagensprozess übergingen. Bei näherem Hinsehen ist der Versagensprozess gemäß Darstellung in Folie 17 gekennzeichnet durch eine an die stationäre Kriechphase unmittelbar anschließende so genannte tertiäre Kriechphase mit abschließendem Kriechbruch. Damit war bekannt, dass eine als Dauerfestigkeit bezeichnete Grenztragfähigkeit des Steinsalzgebirges existierte, bei deren Überschreitung eine zeitlich zunehmende Entfestigung zu besorgen war. Die Tatsache, dass diese Grenztragfähigkeit nicht abschließend belegt werden konnte, resultierte in einem nachweistechischen Dilemma: Die Forderung, den vollständigen Einschluss der untertägig abgelagerten Abfälle für geologische Zeiträume nachzuweisen, resultierte letztlich in der Notwendigkeit aufzuzeigen, dass die durch die Auffahrung und den Betrieb der Untertagedeponie induzierten Gebirgsbeanspruchungen

auch in geologischen Zeiträumen nicht zu einer Auflockerung/Entfestigung der abdichtenden Gebirgsschichten und damit zu einem Verlust der Barriereintegrität führten. Die hierfür erforderliche genaue Kenntnis der Dauer- bzw. Dilatanzfestigkeit lag nicht vor. Der Beginn des Förderzeitraumes war vor diesem Hintergrund charakterisiert durch Forschungsvorhaben, die sich inhaltlich mit den Ursachen, Eigenschaften und Charakteristika der Auflockerungszone (ALZ), Excavation Damage Zone (EDZ) bzw. dem dilatant verformten Gebirgsbereich auseinandersetzten.

3. Versuchstechnik und Modellierung - Schädigungsmechanik

Für den mechanischen Nachweis des vollständigen Einschlusses der untertägig abgelagerten Abfälle wird gemäß Darstellung in Folie 18 gefordert, dass sich Gebirgsbereiche mit dilatanten Verformungen (Dilatanz = Volumenzunahme) auch langfristig nicht bis zum wasserführenden Nebengebirge ausbreiten. Im Bereich geotechnischer Abdichtungsbauwerke ist gemäß Folie 19 in Analogie zu fordern, dass die Dichtheit der Bauwerke durch dilatante Verformungen im konturnahen Salzgebirge nicht in unzulässiger Weise herabgesetzt wird. Da dilatante Verformungen erst zu besorgen sind, wenn die Dauer- bzw. Dilatanzfestigkeit des Salzgesteins überschritten wird, wurden zu Beginn des Förderzeitraumes Forschungsvorhaben initiiert, die die Ermittlung der Dilatanzfestigkeit zum Ziel hatten. Im Ergebnis der wissenschaftlichen Untersuchungen existieren heute drei mechanische Verfahren, die geeignet sind, die Dilatanzfestigkeit laborativ zu ermitteln:

- a) Folie 20: Versuchsbegleitende Bestimmung der Volumenänderung des Prüfkörpers. Bei Überschreitung der Dilatanzfestigkeit resultieren im Salzgestein Mikrofissuren und Poren, die makroskopisch und integral in einer Zunahme des Prüfkörpervolumens resultieren. Die versuchsbegleitende Messung dieser Volumenzunahme kann durch die in Folie 20 gezeigte Messanordnung realisiert werden. Die Bestimmung der Dilatanzfestigkeit erfolgt als Identifizierung derjenigen Deviatorspannung, bei der im Versuch $\min \varepsilon_{\text{vol}}$ erhalten wird.
- b) Folie 21: Versuchsbegleitende Bestimmung der Ultraschallwellengeschwindigkeit. Da Ultraschallwellen in porösen Medien grundsätzlich eine geringere Geschwindigkeit aufweisen als in kompakten Medien, nimmt die Schallwellenlaufzeit mit zunehmender Ausbildung von Fissuren kontinuierlich zu bzw. die Schallwellengeschwindigkeit entsprechend ab.

- c) Folie 22: Versuchsbegleitende Bestimmung akustischer Emissionen AE. Die Entstehung von Mikrofissuren ist mit akustischen Emissionen verbunden, die durch auf dem Prüfkörper arretierte Geophone geortet werden können.

Im Ergebnis der laborativen Untersuchungen zur Dilatanzfestigkeit kann gemäß Folie 23 gezeigt werden, dass in Analogie zur minimalspannungsabhängigen Bruchfestigkeit auch eine minimalspannungsabhängige Dilatanzfestigkeit bestimmt werden kann und sich die Grenzkurven der Bruch- und Dilatanzfestigkeit mit zunehmender Minimalspannung einander annähern. Unter Verweis auf Folie 24 bleibt schließlich festzuhalten, dass im Lauf der Zeit auch verschiedene Stoffmodelle zur Modellierung der Dilatanzfestigkeit entwickelt wurden.

Mit Bezug auf die aus dem Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien resultierende Forderung, den vollständigen Einschluss der untertägig abgelagerten Abfälle auch langfristig zu belegen, konnte aus den vorstehenden Forschungsergebnissen abgeleitet werden, dass ein Nachweis von Langzeitsicherheit und Integrität dann geführt werden kann, wenn die prognostischen rechnerischen Simulationen ausweisen, dass die Dilatanzfestigkeit in Raum und Zeit nicht überschritten wird. Angesichts der Teufenlage existierender und auch geplanter Untertagedeponien in Verbindung mit der Erkenntnis, dass die Dilatanzfestigkeit bei geringen Minimalspannungen – wie sie im Nahbereich der Ablagerungshohlräume anstehen – in etwa mit 20% - 30% der Bruchfestigkeit gegeben ist, war als Konsequenz der Untersuchungen zur Dilatanzfestigkeit festzustellen, dass grundsätzlich eine Ausbildung dilatanter Gebirgsbereiche im Nahbereich von Grubenbauen erwartet werden muss. Da auch nach Einführung der Dilatanzfestigkeit das zeitabhängige Verformungsverhalten des Salzgebirges durch volumentreue Stoffmodellformulierungen berechnet wurde, war die Bewertung der berechneten Zustandsgrößen nach wie vor auf eine bloße Auswertung kontinuumsmechanisch ermittelter Zustandsgrößen beschränkt, indem nunmehr die rechnerisch ermittelten Spannungen den aus Laborversuchen abgeleiteten Grenzwerten der Dilatanzfestigkeit gegenübergestellt wurden. Das nach Überschreitung der Dilatanzfestigkeit zu erwartende Verformungsverhalten des Gebirges konnte allein durch die Kenntnis und Berücksichtigung der Dilatanzfestigkeit jedoch nach wie vor nicht rechnerisch simuliert werden. Hierfür erforderlich waren Stoffmodelle, die das Spannungs-Verzerrungs-Verhalten von Steinsalz nach Überschreitung der Dilatanzfestigkeit beschreiben. Hierfür erforderlich war somit zunächst eine Quantifizierung des Kriechverhaltens in Abhängigkeit von der Intensität der Schädigung bzw. Dilatanz, Folie 25.

Da die Dilatanz (= Volumenänderung) durch die im Rahmen der klassischen Kontinuumsmechanik regelmäßig eingesetzten einaxialen Kriechversuche nicht bestimmt werden kann, wechselte die Versuchstechnik zur Bestimmung des Kriechverhaltens bei Beanspruchungen

oberhalb der Dilatanzfestigkeit auf TCc-Versuche (Triaxial Compression creep). Die im Rahmen der Kurzzeitversuche zur Ermittlung der Dilatanzfestigkeit entwickelte Messtechnik musste hierfür auf Versuchsanlagen zur Durchführung triaxialer Kriechversuche übertragen und hinsichtlich Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit den Anforderungen an Langzeitversuche entsprechend ertüchtigt werden. Als eindrucksvolles Resultat der entwickelten Messtechnik zeigt Folie 26 die Messergebnisse eines triaxialen Kriechversuches mit online-Messung von Volumendilatanz und Ultraschallwellengeschwindigkeit über einen Versuchszeitraum von annähernd 250d. Ziel derartiger Versuche war es entsprechend der Darstellung in Folie 27, schädigungsfreie und schädigungsinduzierte Kriechverformungen zu separieren und in Abhängigkeit von der jeweils realisierten Volumendilatanz zu quantifizieren. Im Ergebnis der diesbezüglichen Forschungsarbeiten bleibt festzuhalten, dass die Kriechrate von Steinsalz nunmehr nicht nur in Abhängigkeit von der Spannung und der Temperatur, sondern darüber hinaus auch in Abhängigkeit von der Größe der Dilatanz rechnerisch abgebildet werden kann. In der Konsequenz kann der im Konturbereich untertägiger Tragstrukturen beobachtete Entfestigungsprozess (ALZ / EDZ) heute rechnerisch in Raum und Zeit (x,t) simuliert werden, Folie 28. Von wesentlicher Bedeutung hierbei ist, dass die nunmehr mögliche Berücksichtigung von Schädigungsprozessen und ihrer Konsequenzen für das Spannungs-Verformungsverhalten des Salzgebirges in Raum und Zeit nicht nur eine bloße Bewertung, sondern vielmehr auch eine langfristige, die ablaufenden Prozesse realitätsnah abbildende und damit in die Zukunft gerichtete Prognose der Standsicherheit und Integrität von Untertagedeponien ermöglicht und damit ein deutlich über die Möglichkeiten der klassischen Kontinuumsmechanik hinausgehendes Instrumentarium für den Nachweis des vollständigen Einschluss der abgelagerten Abfälle verfügbar ist.

Hierbei von signifikanter Bedeutung ist, dass durch die Dilatanz gleichzeitig auch die sich ausbildende Sekundärporosität quantifiziert wird und damit durch die Integration der Dilatanz (= effektive Porosität) in die Stoffmodellgleichungen zur mechanischen Modellierung des Kriechverhaltens eine Schnittstelle geschaffen wurde, über die hydraulische und mechanische Prozesse miteinander gekoppelt werden können, Folie 29. Begründet durch die Tatsache, dass hydraulische Stoffmodelle zur Charakterisierung der Durchlässigkeit bzw. der Permeabilität immer auch die Porosität beinhalten, konnte durch die Integration der Dilatanz in die mechanischen Stoffmodelle der Erfahrungsbereich aus dem Sachgebiet der Hydraulik vergleichsweise einfach an das mechanische Instrumentarium zur sicherheitlichen Nachweisführung für Untertagedeponien angekoppelt werden, Folie 30. Damit eröffnete sich erstmals die Möglichkeit, grundsätzlich Szenarien zum Zutritt wässriger Lösungen in die Untertagedeponie bzw. zum

Austritt kontaminierter Fluide aus der Untertagedeponie den realen Verhältnissen entsprechend in Raum und Zeit (x,t) rechnerisch zu simulieren. In der Konsequenz sind die im Förderschwerpunkt realisierten Forschungsvorhaben nach erfolgreicher Integration schädigungsmechanischer Prozesse in das rechnerische Instrumentarium zur mechanischen Modellierung des Tragverhaltens untertägiger Deponien gekennzeichnet durch weitergehende Fragestellungen zum so genannten THMC–Verhalten von Steinsalz, d.h. zur mechanisch-hydraulisch-thermisch- chemisch gekoppelten Analyse des Tragverhaltens. Gemäß der exemplarischen Darstellung in Folie 31 ermöglicht beispielsweise die mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnung die Analyse des Trag- und Dichtigkeitsverhaltens geotechnischer Barrieren, sodass erstmals belastbare, weil den in situ Bedingungen entsprechende Prozesse zur raum- und zeitbezogenen Funktionalität geotechnischer Abdichtungsbauwerke modelliert und simuliert werden können.

Mit den vorstehend skizzierten Mechanismen noch nicht beantwortet ist die Frage, ob ein dilatant verformter Gebirgsbereich durch das kriechbedingte Auflaufen auf einen Versatzkörper, auf einen Ausbau oder auf ein Abdichtungsbauwerk im Sinne der zu führenden Nachweise auch wieder verheilt werden kann (Schädigungsrückbildung). Erste diesbezügliche Untersuchungen zeigen gemäß Folie 32, 33 und Folie 34, dass zumindest die mechanischen Indikatoren Dilatanz und Ultraschallwellengeschwindigkeit bei einer Reduktion der Belastung auf ein Niveau unterhalb der Dilatanzfestigkeit auf das im ungeschädigten Zustand ermittelte Maß zurückgeführt werden können und dass auch geeignete Ansätze zur rechnerischen Modellierung der im Versuch beobachteten Effekte bekannt sind. Ob bzw. inwieweit vorstehende Aussagen auch auf die hydraulischen Materialeigenschaften übertragen werden können, ist noch nicht abschließend untersucht. Dessen ungeachtet kann unter Verweis auf Folie 35 jedoch festgestellt werden, dass durch die im Rahmen des Förderzeitraumes erarbeiteten Forschungsergebnisse das mechanische Verhalten von Steinsalz heute nicht mehr nur durch seine minimalspannungsabhängige Bruchfestigkeit charakterisiert ist, sondern die Forschungsarbeiten eine Diversifizierung des Festigkeitsverhaltens mit Bruchgrenze, Dilatanzgrenze und Verheilungsgrenze ermöglicht haben. Auch kann mit Bezug auf Folie 36 resümiert werden, dass abhängig von der jeweiligen Fragestellung die Untersuchungen und Modellierungen zum mechanischen Verhalten von Steinsalz nicht mehr ohne Berücksichtigung zunächst thermischer und hydraulischer und dann auch chemischer Prozesse erfolgen. Durch die im Förderzeitraum bearbeiteten Forschungsprojekte wurde das Prozessverständnis und damit auch der Fokus der insgesamt zu berücksichtigenden Einwirkungen deutlich erweitert. Als Stand der Wissenschaft kann postuliert werden, dass die geotechnische Nachweisführung für untertägige Deponien

heute charakterisiert ist durch mechanisch-thermisch-hydraulisch gekoppelte Analysen zum Tragverhalten und zur Dichtheit.

Allerdings ist im Rahmen von geotechnischen Sicherheitsanalysen für Untertagedeponien nicht nur das in Folie 18 dokumentierte mechanische Integritätskriterium nachzuweisen, sondern auch das in Folie 37 skizzierte hydraulische Integritätskriterium. Das hydraulische Integritätskriterium gilt als erfüllt, wenn die minimale Hauptspannung im Berechnungsgebiet größer ist als der teufenbezogen berechnete hydraulische Flüssigkeitsdruck. Dieser Nachweis kann grundsätzlich mit dem vorstehend skizzierten Konzept der Kopplung mechanischer und hydraulischer Zustandsgrößen über die Schnittgröße Dilatanz = effektive Porosität geführt werden. Entsprechend der Darstellung in Folie 38 führt die rechnerische Analyse auf Basis der hydraulischen Strömungsgleichungen jedoch auf ein durch die Berechnungsalgorithmen induziertes Dilemma. Unabhängig von der zahlenmäßigen Größe der Gebirgspermeabilität werden im gesamten Berechnungsgebiet Potentialdifferenzen und damit Fluidströmungen ausgewiesen. D.h. auch bei Ansatz und/oder prozessabhängiger Berechnung beliebig kleiner Permeabilitäten für das die Untertagedeponie bzw. die geotechnischen Abdichtungsbauwerke umgebende Gebirge wird rechnerisch eine Fluidströmung im Salzgebirge ausgewiesen. Die Forderung, einen vollständigen Einschluss der abgelagerten Abfälle nachzuweisen, kann mit dem vorstehend skizzierten Instrumentarium rechnerisch nicht erfüllt werden. Auch widerspricht das rechnerische Ergebnis dem aus natürlichen Analoga abgeleiteten Postulat, dass das Salzgebirge im unverritzten Zustand dicht ist gegenüber Flüssigkeiten und Gasen.

Zur Klärung des vorstehenden Widerspruchs können die im Förderzeitraum durchgeführten Untersuchungen zur druckgetriebenen Infiltration herangezogen werden. Entsprechend der Darstellung in Folie 39 und 40 sind mechanisch-hydraulisch gekoppelte Versuche an Steinsalzprüfkörpern durchgeführt worden, bei denen mechanische Beanspruchungen deutlich unterhalb der Dilatanzfestigkeit unter gleichzeitiger Vorgabe hydraulischer Drücke unterhalb, oberhalb und im Niveau der kleinsten mechanischen Hauptspannung aufgegeben wurden. Messtechnisch untersucht wurde, ob und ggf. unter welchen mechanisch-hydraulisch gekoppelten Beanspruchungen eine Infiltration des Messfluids in das Prüfkörpergestein erfolgt, welche Infiltrationsrate beobachtet wird und in welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit sich die Infiltrationsfront ausbreitet. Die aus den Laborversuchen abgeleiteten Erkenntnisse zum Infiltrationsprozess wurden schließlich durch ein von der klassischen Strömungstheorie nach Darcy unabhängiges Stoffmodell mit Anlehnung an die Hydrofracttheorie modelliert, sodass im Ergebnis mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungen durchgeführt werden können, bei denen das Salzgebirge sich differenziert in beanspruchungsabhängig undurchläss-

sig bleibende und damit im Sinne der Forderung nach einem vollständigen Einschluss dichte Gebirgsbereiche und in Gebirgsbereiche, in denen abhängig von der mechanisch-hydraulisch gekoppelten Beanspruchung variierte Permeabilitäten resultieren, Folie 41.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der im Förderzeitraum zwischen 1991 und 2011 erzielte wissenschaftliche Fortschritt im Bereich der Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz und der zugrundeliegenden Laborversuche ist insgesamt charakterisiert durch den Übergang von der klassischen Kontinuumsmechanik mit volumentreuer Abbildung des Spannungs-Verzerrungs-Verhaltens zur so genannten Schädigungsmechanik, bei der das Spannungs-Verzerrungs-Verhalten unter Berücksichtigung dilatanter Verformungen beschrieben wird. Erst durch die Integration der Dilatanz in die Stoffmodellgleichungen ist es möglich geworden, nicht nur standsichere Tragwerkszustände gegen nicht standsichere Tragwerkszustände abzugrenzen, sondern auch den zeitabhängigen Versagensprozess bei Beanspruchungen im Spannungsfeld zwischen der Bruch- und der Dilatanzfestigkeit quantitativ in Raum und Zeit zu modellieren. Eine gleich lautende Aussage gilt auch für die Rückbildung dilatanter Verformungen. Für den Fall, dass die durch den Verformungsprozess induzierten Spannungsumlagerungen auf ein Beanspruchungsniveau unterhalb der Dilatanzfestigkeit führen, kann auch die Rückbildung dilatanter Verformungen im Sinne einer Verheilung zuvor eingetragener Schädigungen heute zumindest im Grundsatz modelliert und simuliert werden. Damit ist als Ergebnis der Forschungsarbeiten im Förderzeitraum die grundsätzliche Möglichkeit geschaffen worden, den vollständigen Einschluss untertägig im Steinsalzgebirge abgelagerter Abfälle durch rechnerische Modellierungen unter Berücksichtigung des geforderten langen Nachweiszeitraumes abschließend zu belegen. Von übergeordneter Bedeutung und daher besonders hervorzuheben ist, das durch die Integration der Dilatanz in die Stoffmodellgleichungen zur Charakterisierung des Kriechverhaltens von Steinsalz eine Schnittstelle realisiert wurde, über die mechanische und hydraulische Prozesse ein- bzw. zweiseitig miteinander gekoppelt werden können. Damit ist im Ergebnis des Förderschwerpunktes weiter auch die Grundlage für eine den realen Verhältnissen hinreichend entsprechende Analyse des Trag- und Abdichtungsverhaltens geotechnischer Abschlussbauwerke geschaffen worden. Erst durch die wechselseitige Kopplung mechanischer und hydraulischer Prozesse können die für Abdichtungsbauwerke relevanten Szenarien mit angemessener Prädiktionsqualität analysiert werden. Ungeachtet der Einschätzung, dass auch nach Abschluss des Förderschwerpunktes sicherlich noch vielfältige Fragestellungen einer weiteren Bearbeitung bedürfen, ist im Förderzeitraum durch die Forschungsergebnisse im Be-

reich der physikalischen Modellierung des hydraulisch-mechanischen Verhaltens von Steinsalz ein deutlicher Fortschritt gelungen.

**Abschlussveranstaltung zum Förderschwerpunkt
„Untertägige Ablagerung“
BMBF – 14./15. Februar – Karlsruhe**

**Mechanisches Verhalten von Steinsalz –
Laborversuche und Modellierung**

PD Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
Technische Universität Clausthal – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

Mechanisches Verhalten von Steinsalz – Laborversuche und Modellierung

Gliederung:

1. Versuchstechnik und Modellierung Kontinuumsmechanik

1.1 Kriechvermögen

1.2 Bruchfestigkeit

1.3 Nachweisführung / Defizite

2. Versuchstechnik und Modellierung Schädigungsmechanik

2.1 Dilatanzfestigkeit

2.2 Schädigungsinduziertes Kriechen

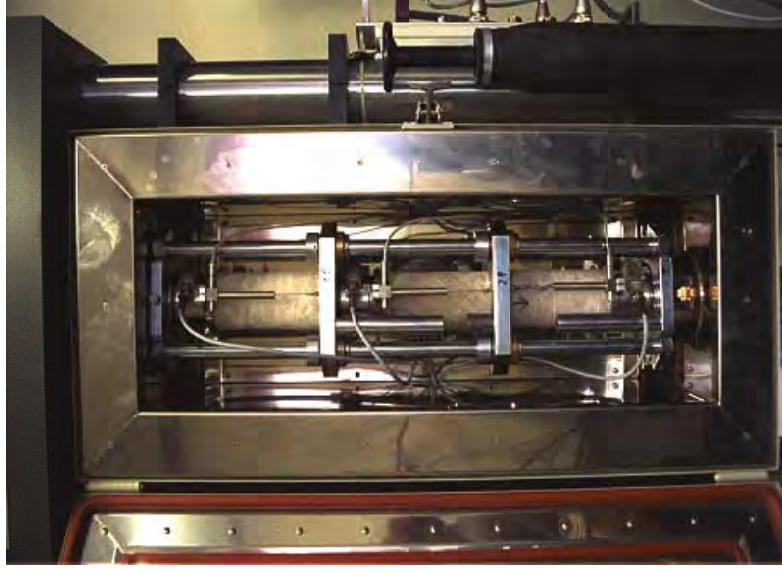
2.3 MH-Kopplung

2.4 Schädigungsrückbildung

2.5 Infiltration

Kontinuumsmechanik – Kriechversuche und Modellierung der stationären und transienten Kriechrate

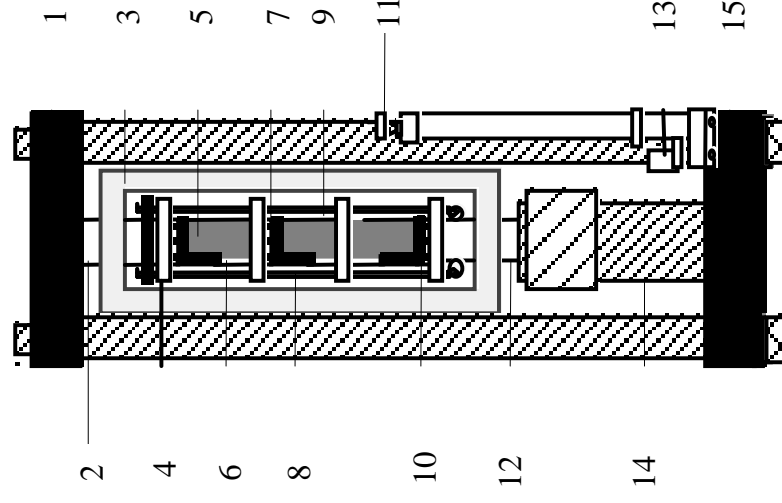
Versuchstechnik



- 1 Oberes Widerlager
- 2 Druckstempel (oben)
- 3 Temperierkammer
- 4 Druckplatte
- 5 Prüfkörper

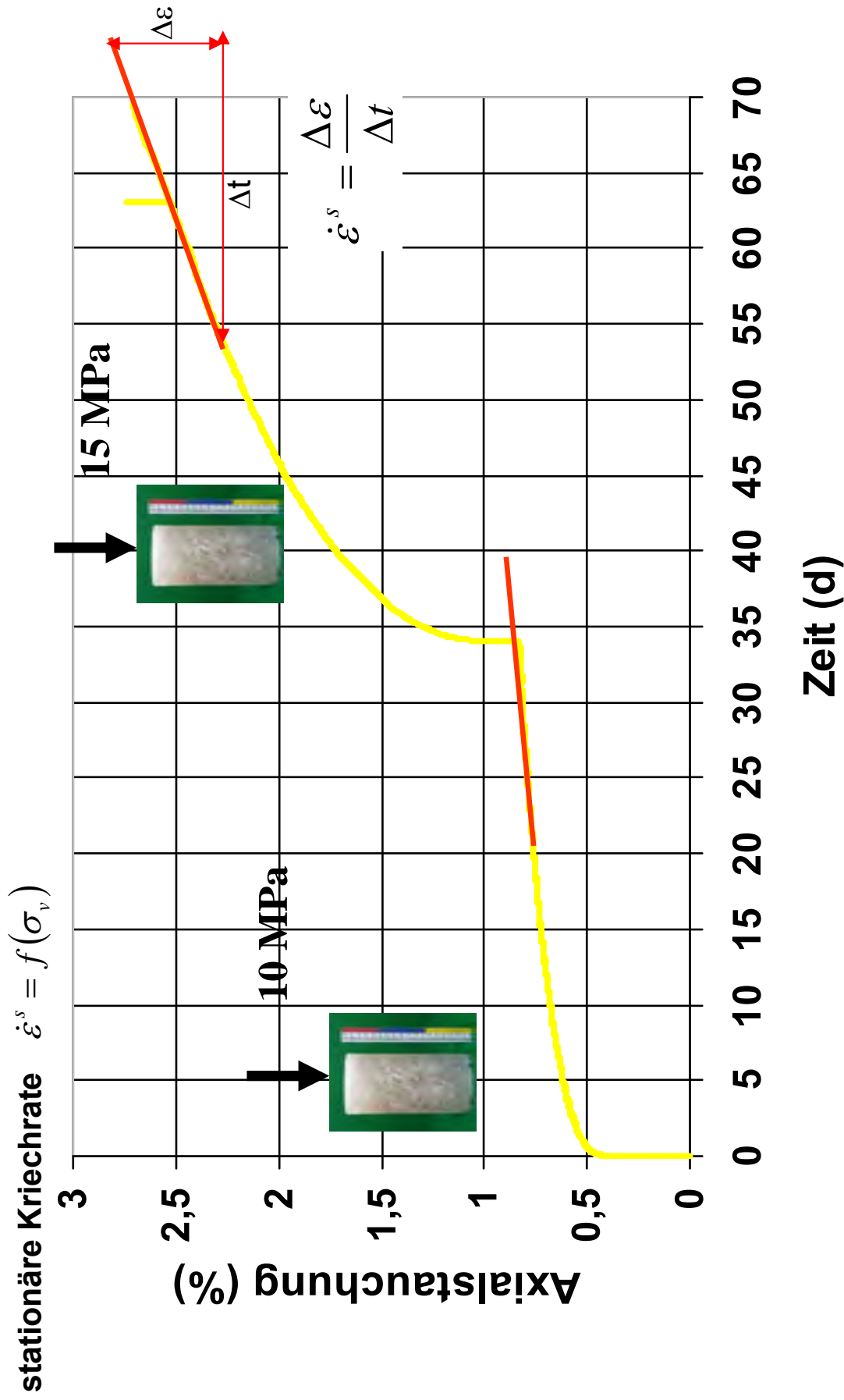


- 6 Wegaufnehmer
- 7 Halterung für Wegaufnehmer
- 8 Führungsgestänge
- 9 Abstandshalter
- 10 Kraftmessdose



- 11 Handrad des Steuerventils
- 12 Druckstempel (unten)
- 13 Steuerventil
- 14 Hydraulikzylinder
- 15 Unteres Widerlager

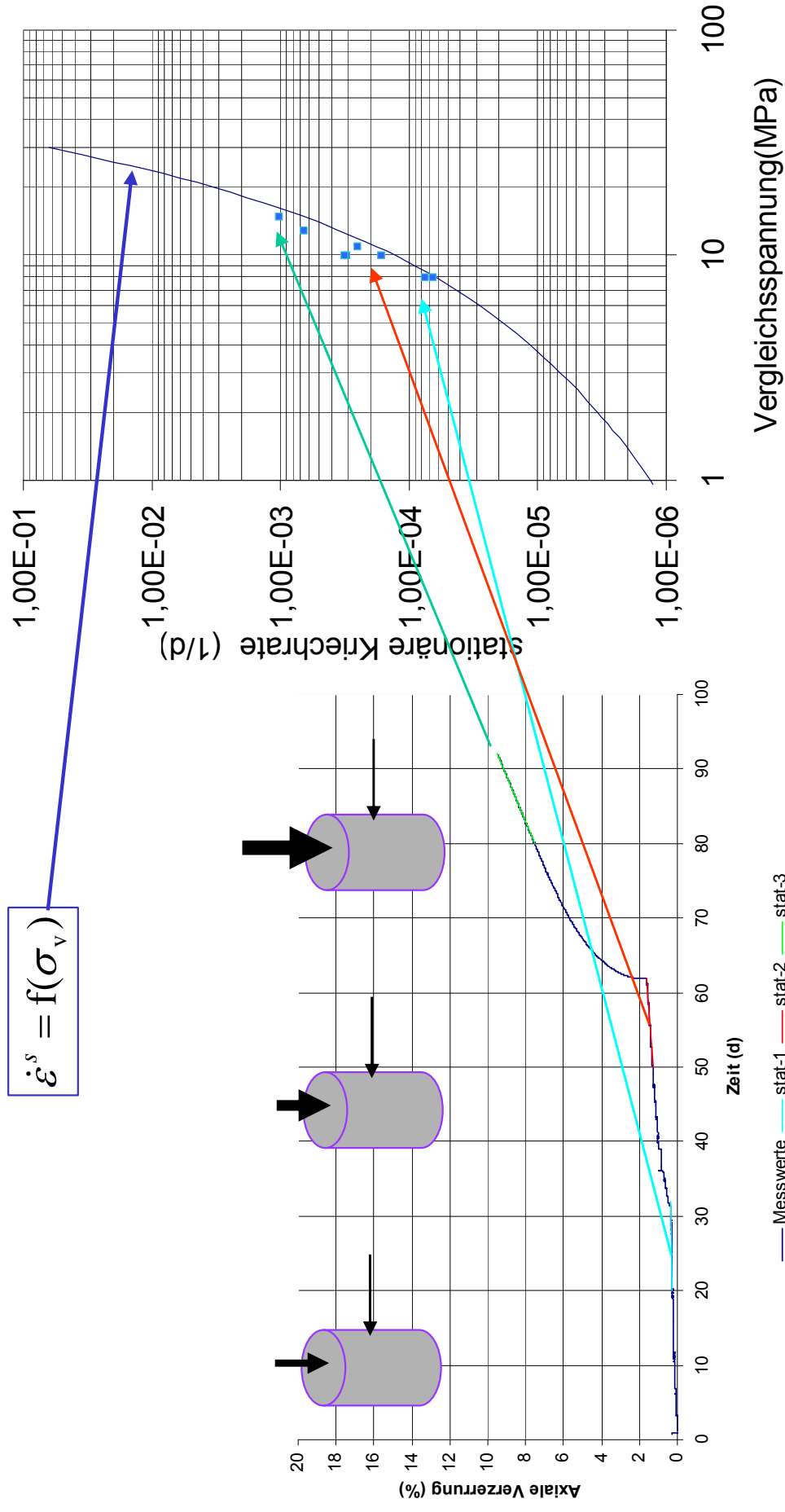
Kontinuumsmechanik – Kriechversuche und Modellierung der stationären und transienten Kriechrate



Kontinuumsmechanik – Kriechversuche und Modellierung der stationären und transienten Kriechrate

stationäre Kriechrate

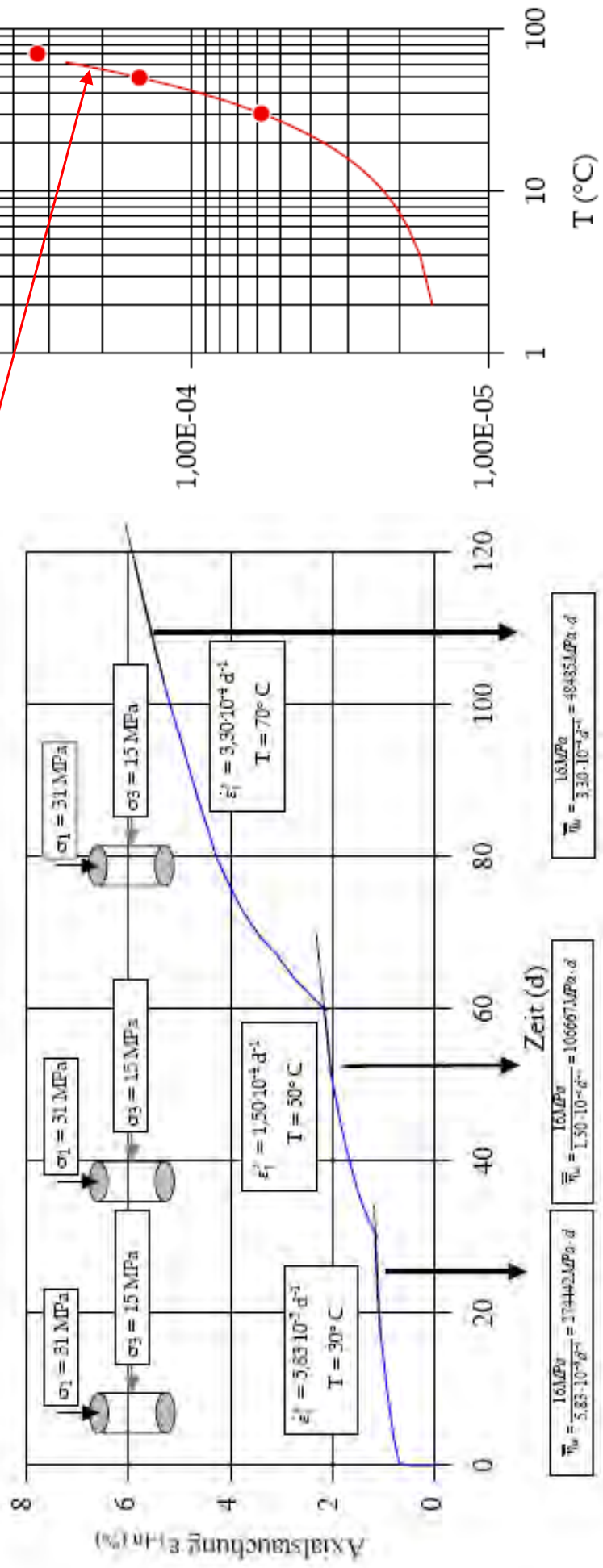
$$\dot{\epsilon}^s = f(\sigma_v)$$



Kontinuumsmechanik – Kriechversuche und Modellierung der stationären und transienten Kriechrate

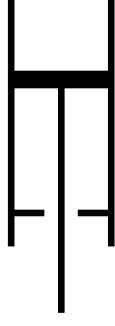
stationäre Kriechrate $\dot{\epsilon}^s = f(T)$

$\dot{\epsilon}^s = f(T)$



Kontinuumsmechanik – Kriechversuche und Modellierung der stationären und transienten Kriechrate

Stoffmodelle zur **Modellierung der stationären Kriechrate** in Abhängigkeit von der Vergleichsspannung und der Temperatur



$$\dot{\epsilon}^s = \frac{\sigma_v}{\eta_m^*} \cdot \exp(m \cdot \sigma_v) \cdot \exp(l \cdot T)$$

$$\dot{\epsilon}^s = A \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^*} \right)^n$$

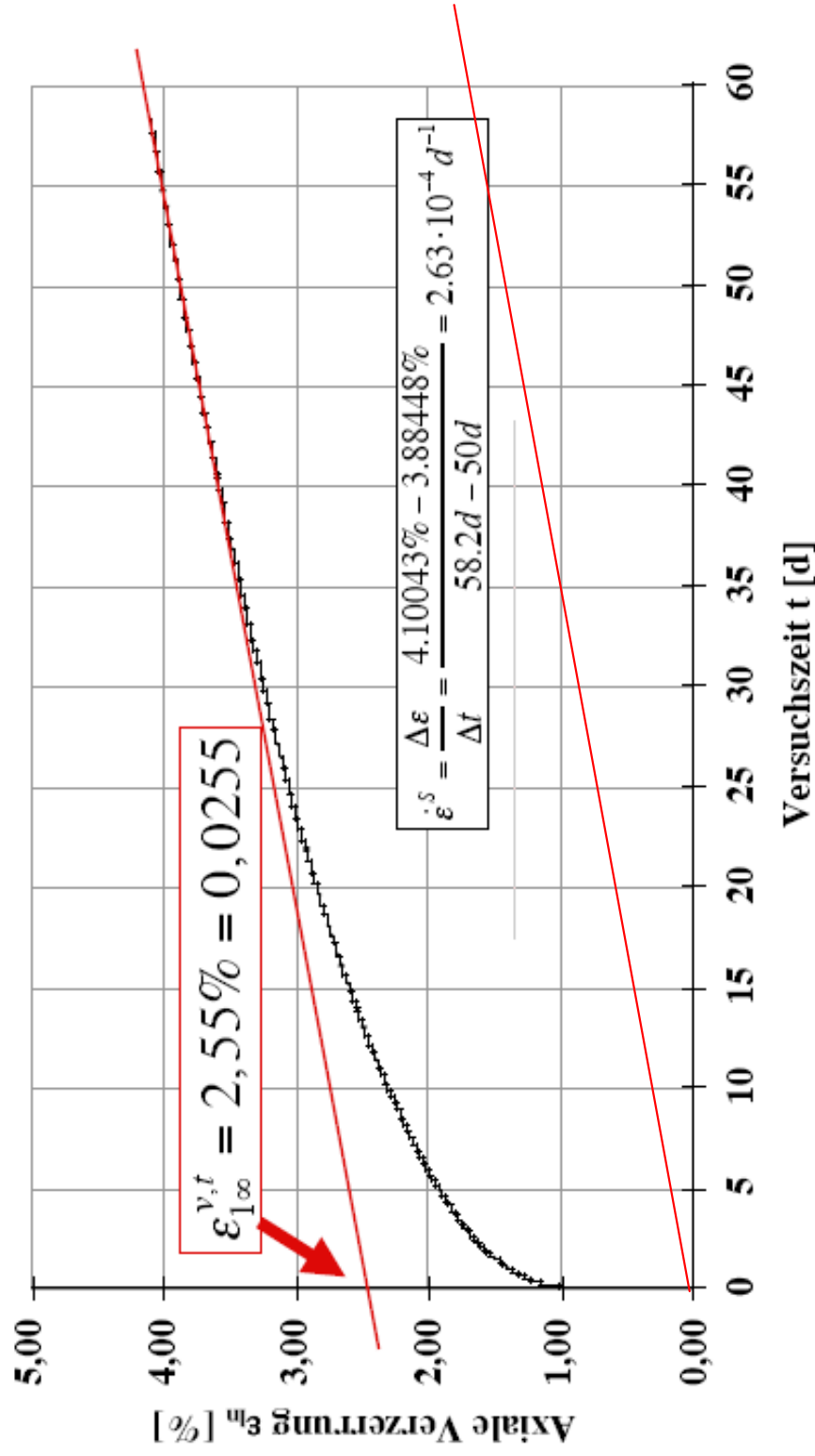
$$\dot{\epsilon}^s = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^*}\right)^n$$

$$\dot{\epsilon}^s = H(\sigma_v - \sigma_0) \cdot \left[B_1 \cdot \exp\left(\frac{-Q_1}{R \cdot T}\right) + B_2 \cdot \exp\left(\frac{-Q_2}{R \cdot T}\right) \right] \cdot \sinh\left[\frac{q \cdot (\sigma_v - \sigma_0)}{\mu}\right]$$

$$\dot{\epsilon}^s = A \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^*}\right)^\beta \cdot \epsilon_v^{-\mu}$$

Kontinuumsmechanik – Kriechversuche und Modellierung der stationären und transienten Kriechrate

transiente Kriechrate $\dot{\epsilon}^{tr} = f(\sigma_v, T, t, \epsilon_v)$



Kontinuumsmechanik – Kriechversuche und Modellierung der stationären und transienten Kriechrate

Stoffmodelle zur **Modellierung der transienten Kriechrate** in Abhängigkeit von der Vergleichsspannung, der Temperatur und der Zeit bzw. Verzerrung

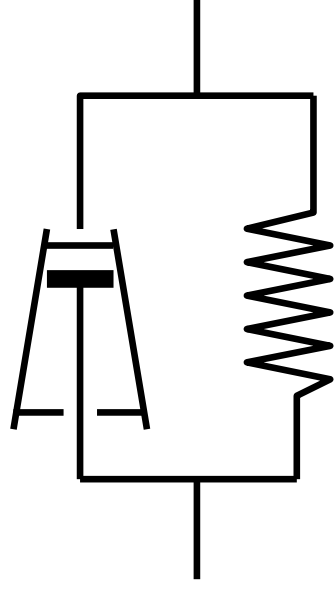
$$\dot{\epsilon}^{tr} = \frac{\sigma_v}{3\eta_k(\sigma)} \cdot \exp\left(\frac{G_k(\sigma)}{\eta_k(\sigma)} \cdot t\right) = \frac{\sigma_v}{\bar{\eta}_k^* \cdot \exp(k_2 \cdot \sigma_v)} \cdot \exp\left(\frac{\bar{G}_k^* \cdot \exp(k_1 \cdot \sigma_v)}{\bar{\eta}_k^* \cdot \exp(k_2 \cdot \sigma_v)} \cdot t\right)$$

$$\dot{\epsilon}^{tr} = \sigma_v \cdot \left[\frac{1}{3\eta_k(\sigma)} \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_1^{v,t}}{\sigma_v} \cdot 3G_k(\sigma)\right) \right] = \sigma_v \cdot \left[\frac{1}{\bar{\eta}_k^* \cdot \exp(k_2 \cdot \sigma_v)} \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_1^{v,t}}{\sigma_v} \cdot \bar{G}_k^* \cdot \exp(k_1 \cdot \sigma_v)\right) \right]$$

$$\dot{\epsilon}^{tr} = m \cdot a \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^*}\right)^n \cdot \left(\frac{t}{t^*}\right)^{m-1}$$

$$\dot{\epsilon}^{tr} = m \cdot a \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^*}\right)^n \cdot \left(\frac{t}{t_N}\right)^{m-1} \cdot \left(\frac{T}{T^*}\right)^p$$

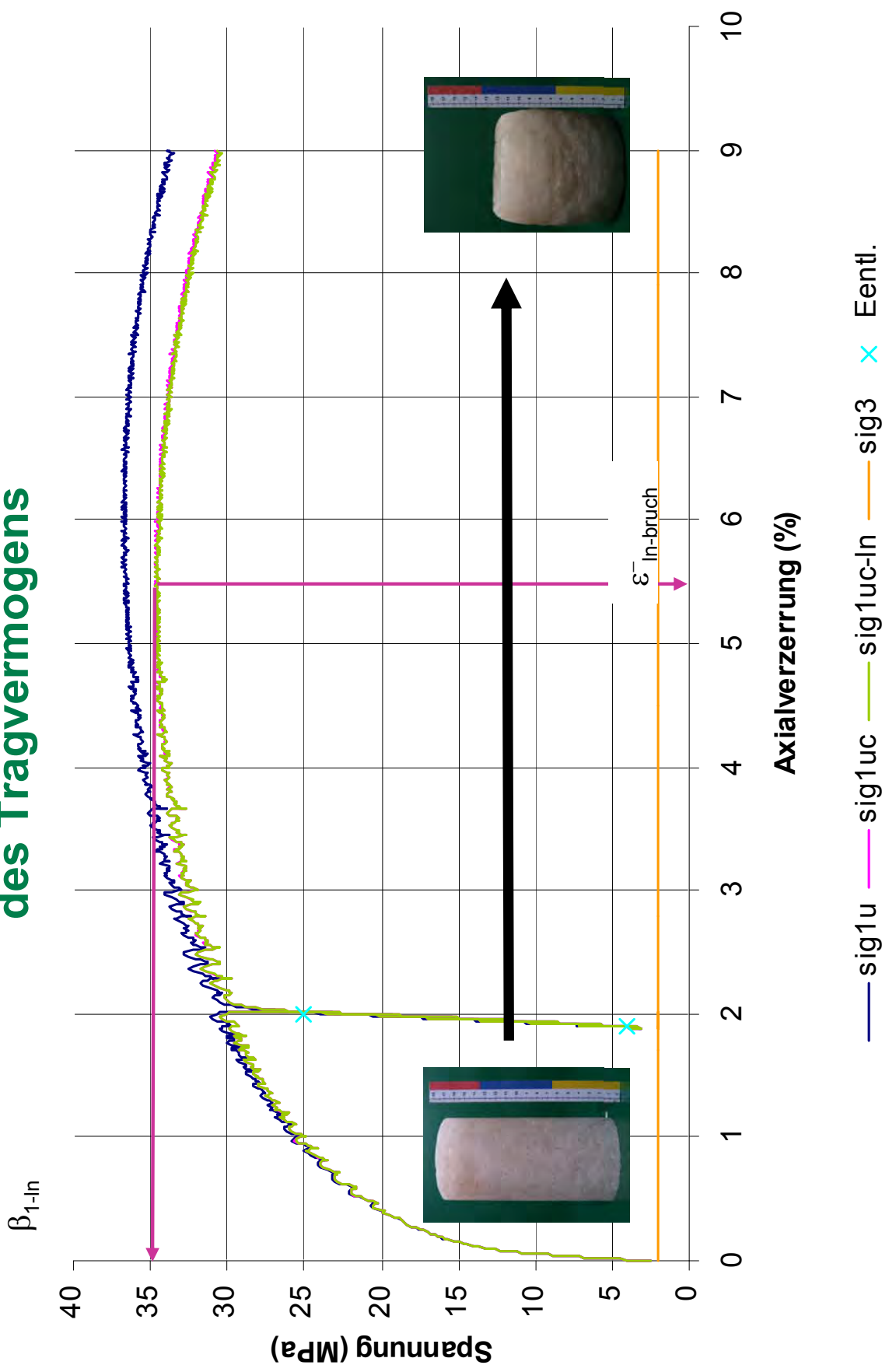
$$\dot{\epsilon}^{tr} = A \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma^*}\right)^\beta \cdot \epsilon_{tr}^{-\mu}$$



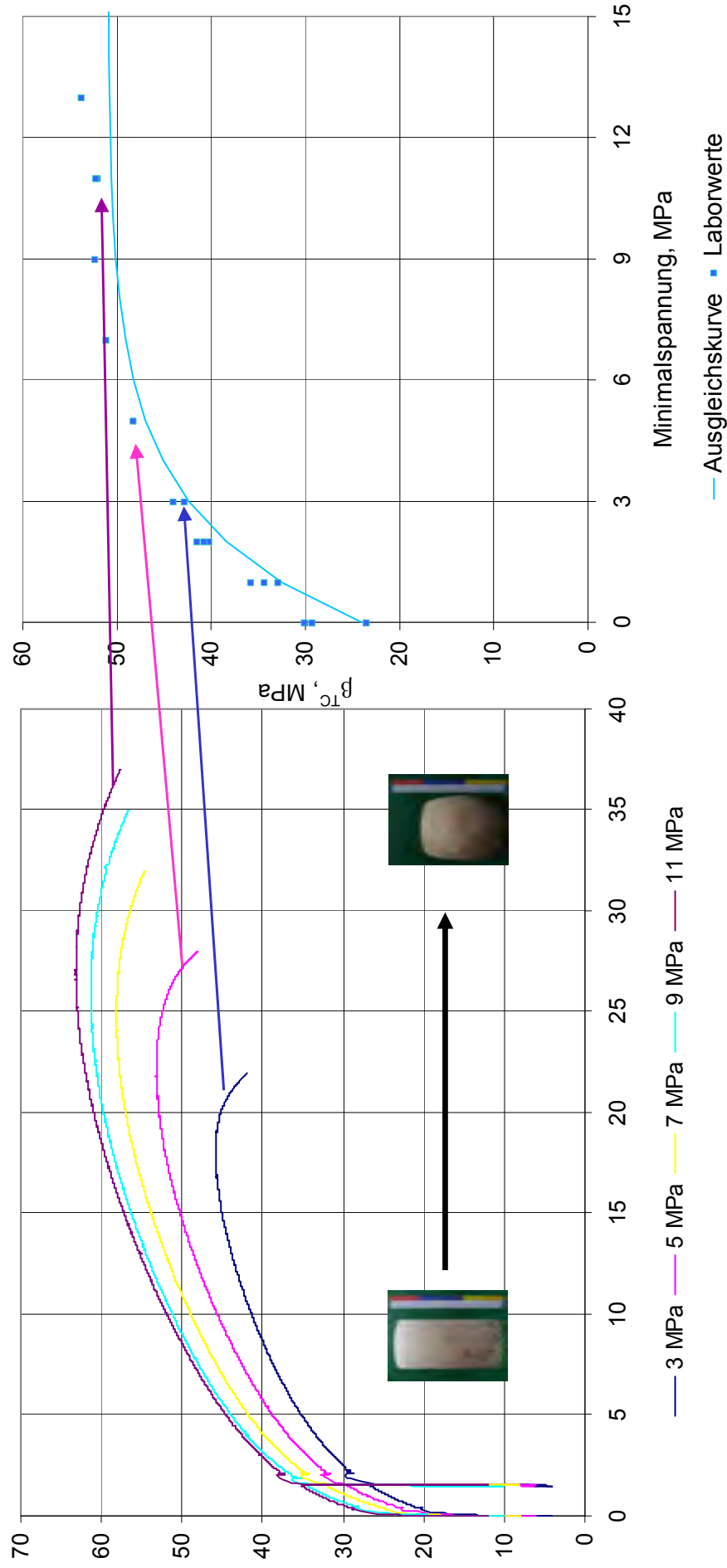
Kontinuumsmechanik – Festigkeitsversuche und Modellierung des Tragvermögens



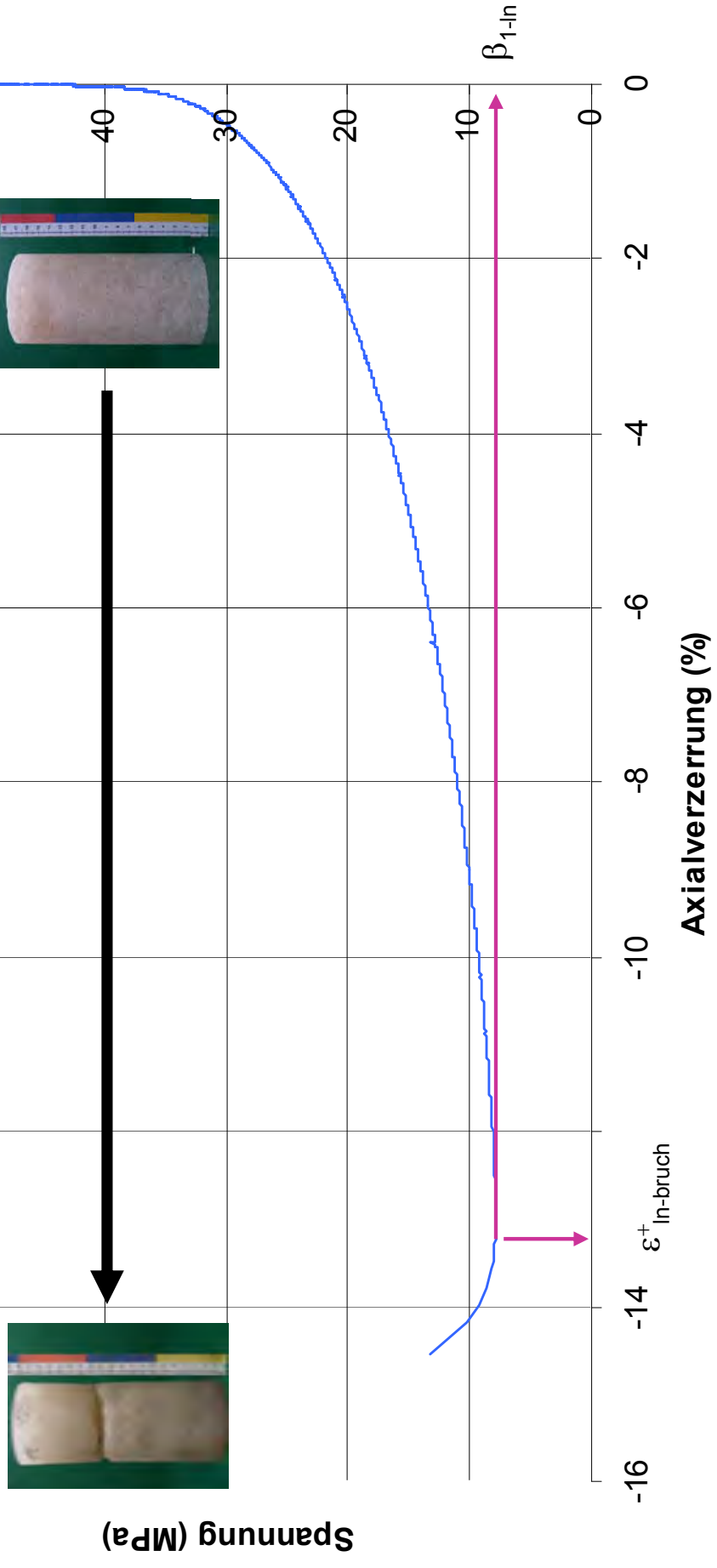
Kontinuumsmechanik – Festigkeitsversuche und Modellierung des Tragvermögens



Kontinuumsmechanik – Festigkeitsversuche und Modellierung des Tragvermögens



Kontinuumsmechanik – Festigkeitsversuche und Modellierung des Tragvermögens



— σ_{1-1n} — σ_3

Kontinuumsmechanik – Festigkeitsversuche und Modellierung des Tragvermögens

$$\beta_{(\sigma_3)}^{TC} = \max \beta^{TC} - (\max \beta^{TC} - \beta_{luc}) \cdot \exp(-a_8 \cdot \sigma_3)$$

$$\beta_{(\sigma_3, \Phi=+30^\circ)}^{TE} = \beta_{(\sigma_3)}^{TC} \cdot k_{(\sigma_3, \Phi=+30^\circ)}$$

$$k(\sigma_3, \Phi) = \frac{1}{\cos\left(\Phi + \frac{\pi}{6}\right) + a_9 \cdot \sin\left(\Phi + \frac{\pi}{6}\right)} \cdot \exp(-a_{10} \cdot \sigma_3)$$

$$\beta^{TC} = \beta_{luc} \cdot \left(\frac{\max \beta^{TC} - \beta_{luc}}{\sigma_g + \sigma_3} \right) \cdot \sigma_3$$

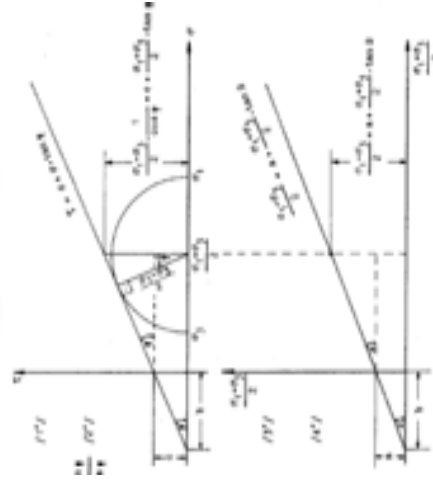
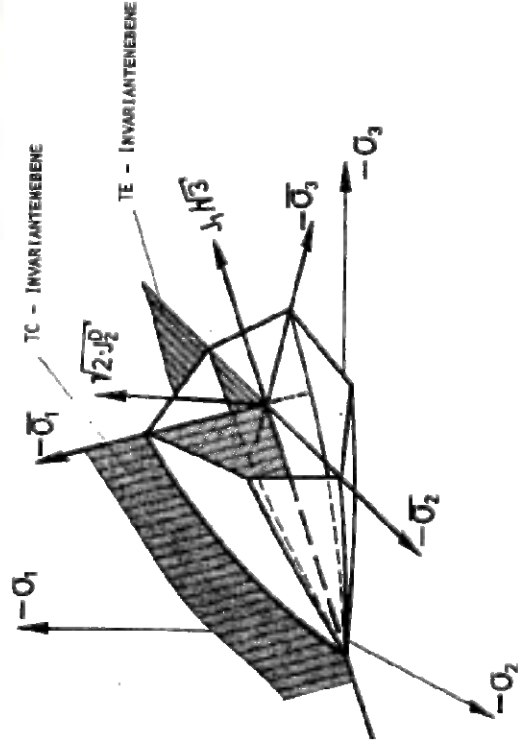
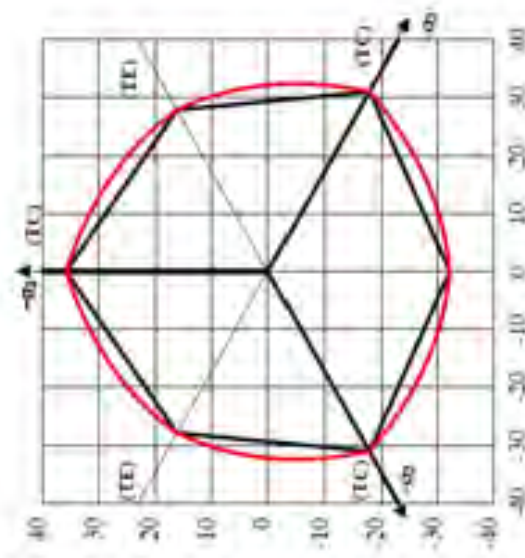
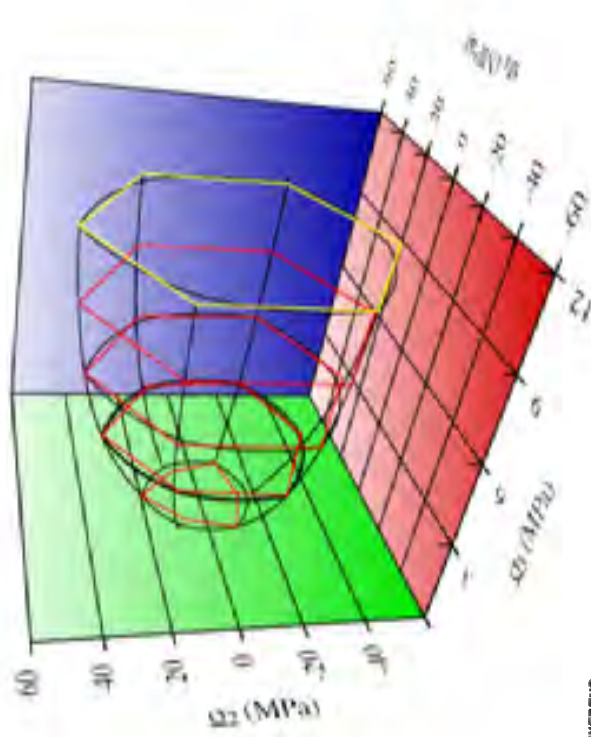
$$\sigma_D^{TC} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot \sin \Phi}{3 - \sin \Phi} \cdot J_1 + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{6 \cdot c \cdot \cos \Phi}{3 - \sin \Phi}$$

$$\sigma_D^{TE} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2 \cdot \sin \Phi}{3 + \sin \Phi} \cdot J_1 + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{6 \cdot c \cdot \cos \Phi}{3 + \sin \Phi}$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_{v0}$$

$$\sigma_D^{TC} = \sigma_D^{TE} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_{v0}$$

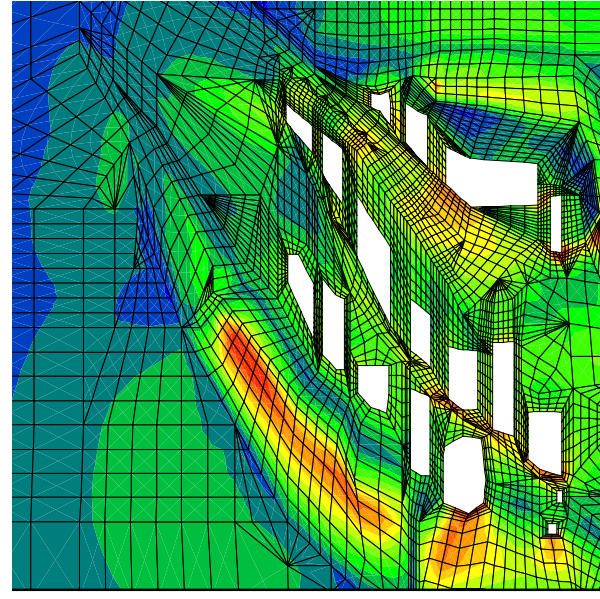
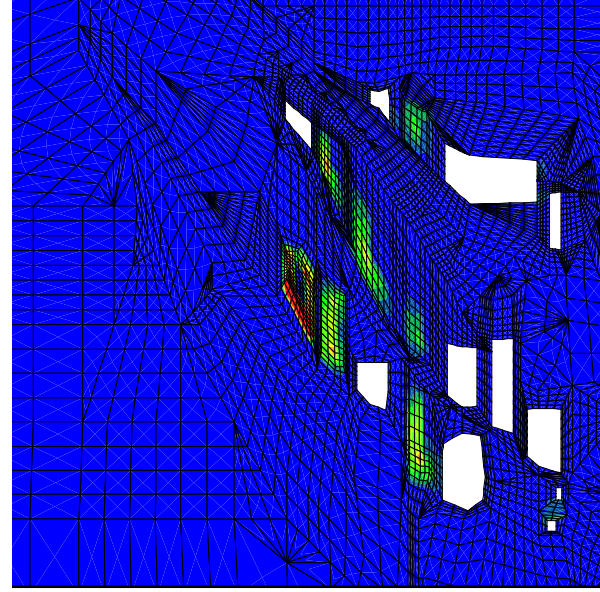
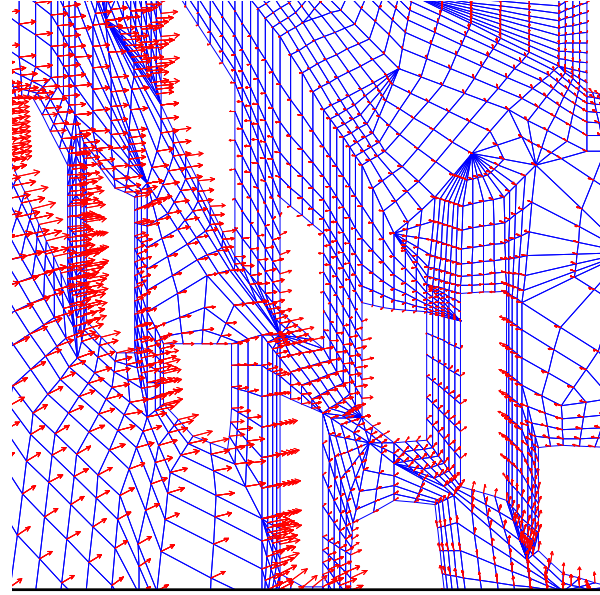
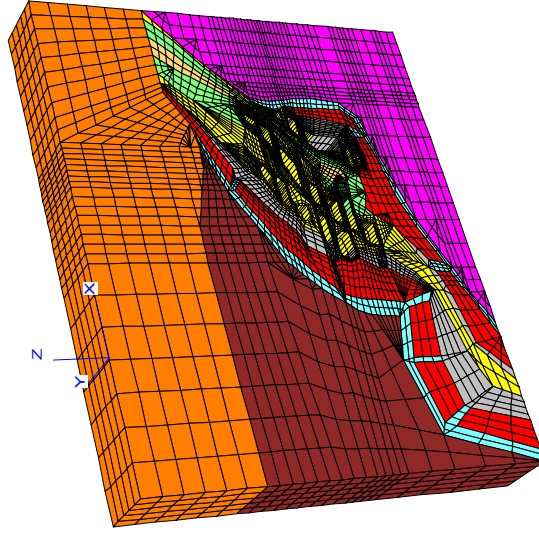
$$\sigma_D = \sqrt{2} \cdot k \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot J_1$$



Kontinuumsmechanik – Festigkeitsversuche und Modellierung des Tragvermögens

Retrospektive Bewertung

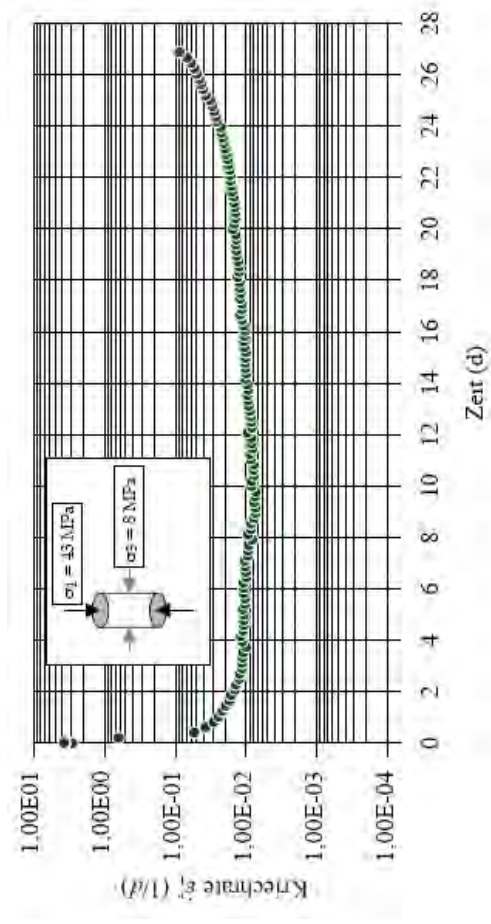
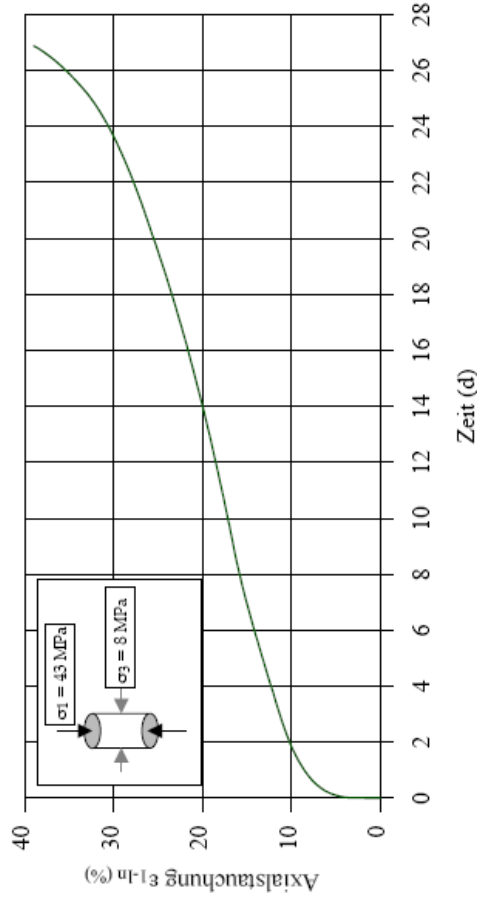
$$\varepsilon_V, \sigma_V, \eta \rightarrow \mathbf{x}, \mathbf{t}$$



Schädigungsmechanik – EDZ (Excavation Damage Zone) / ALZ (Auflockerungszone) / dilatant verformte Gebirgsbereiche



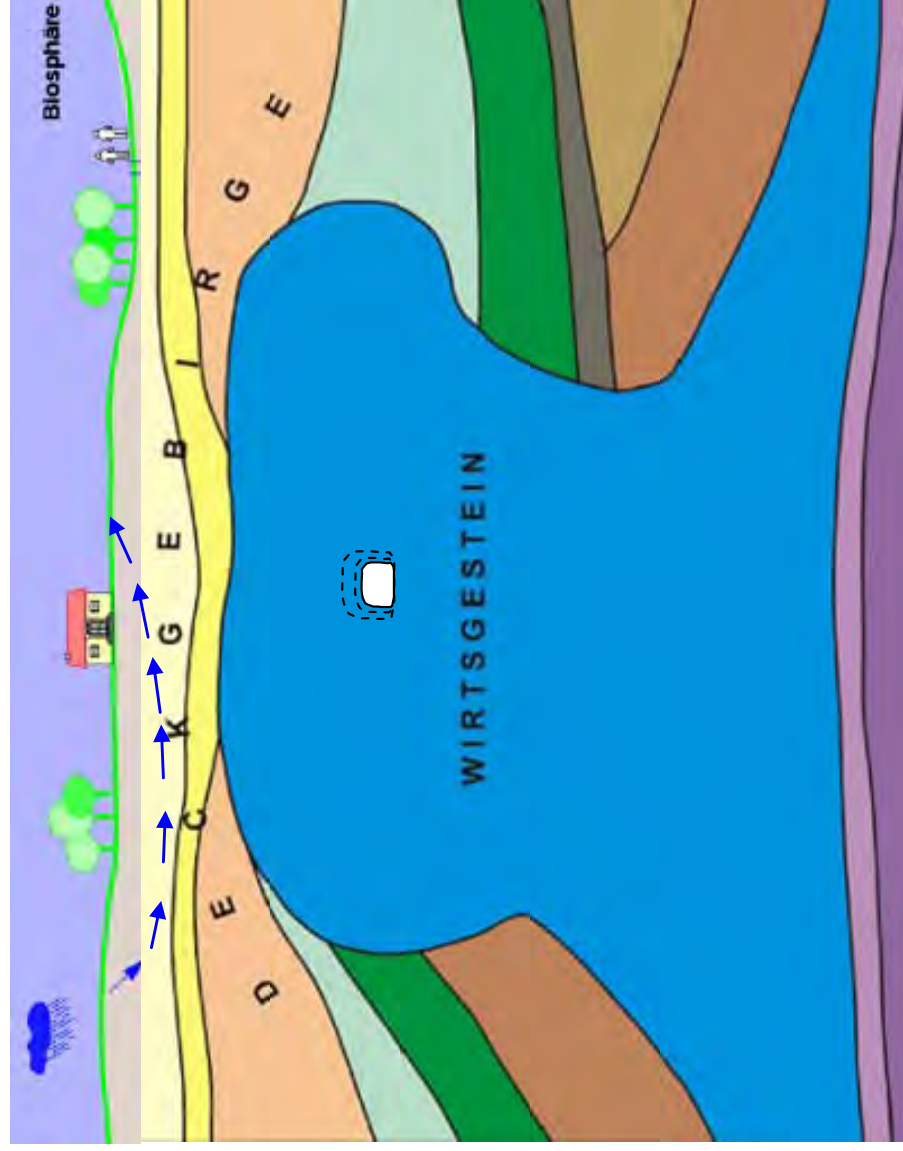
Schädigungsmechanik – EDZ (Excavation Damage Zone) / ALZ (Auflockerungszone) / dilatant verformte Gebirgsbereiche



Schädigungsmechanik – EDZ (Excavation Damage Zone) / ALZ (Auflockerungszone) / dilatant verformte Gebirgsbereiche

Nachweiserfordernis: Integrität geologischer Barrieren

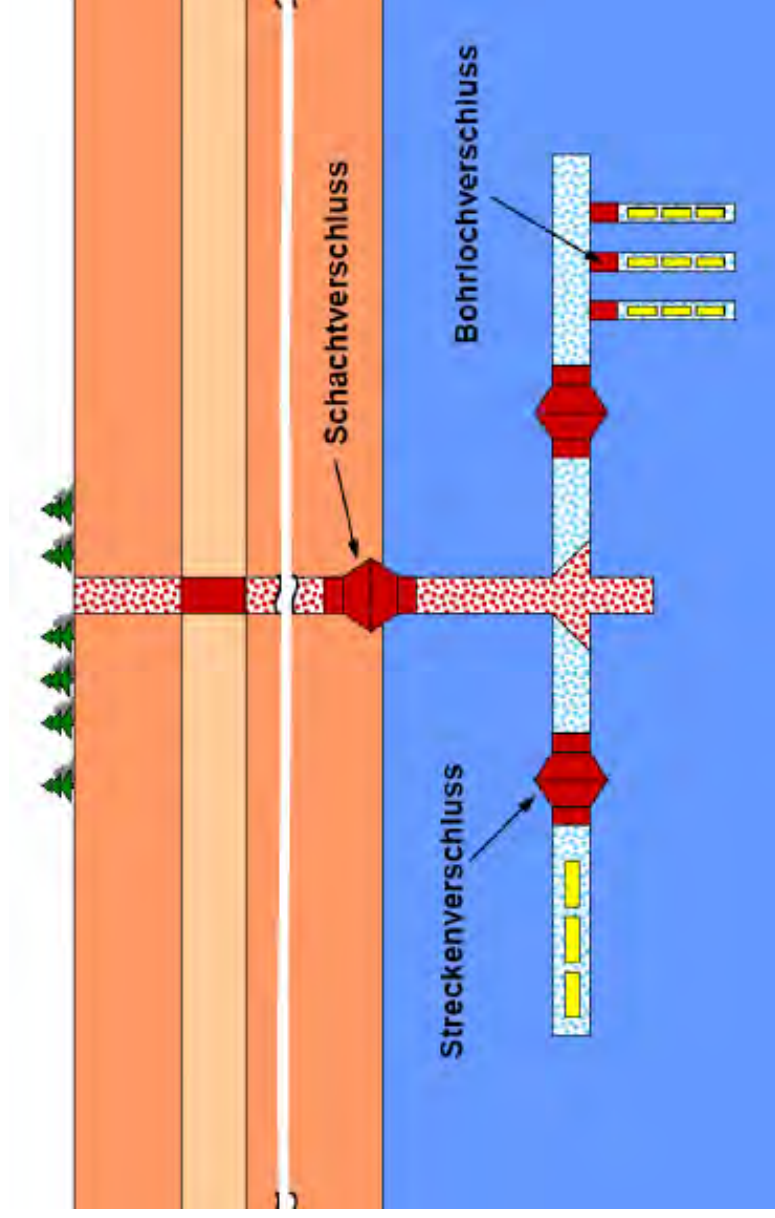
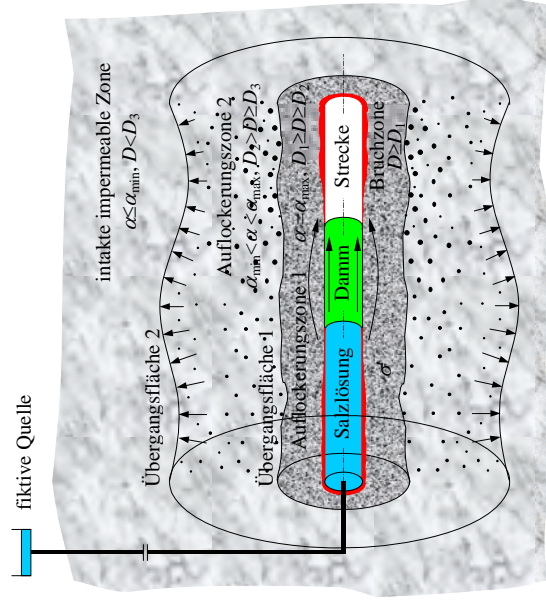
Dilatante Verformungen breiten sich auch langfristig nicht bis zum wasserführenden Deck- und Nebengebirge aus.



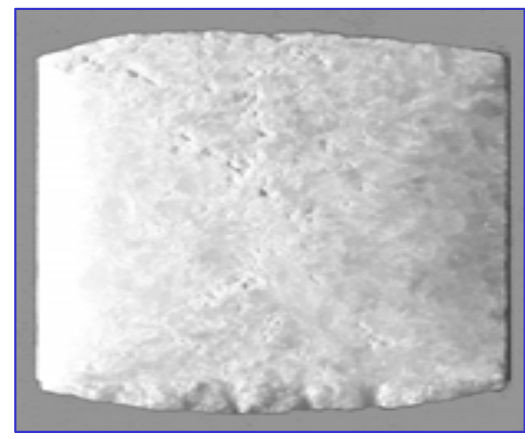
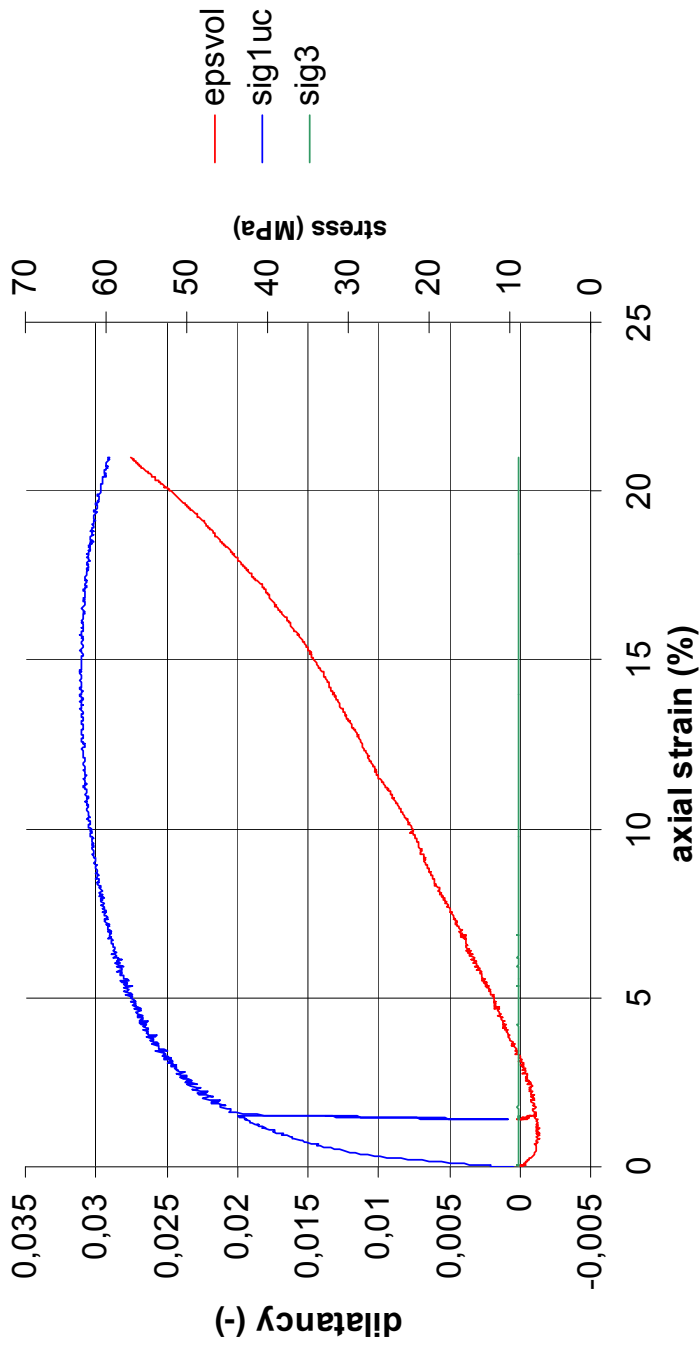
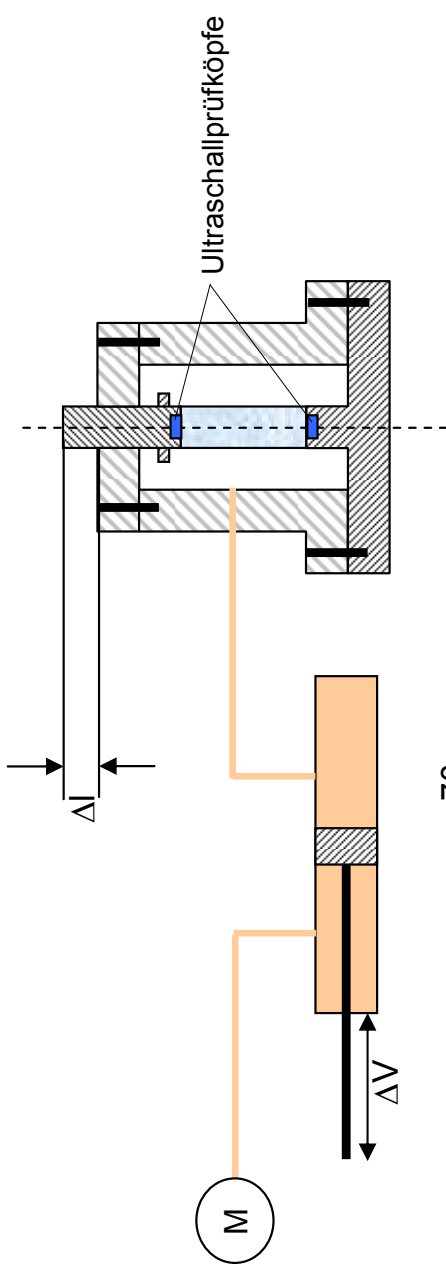
Schädigungsmechanik – EDZ (Excavation Damage Zone) / ALZ (Auflockerungszone) / dilatant verformte Gebirgsbereiche

Nachweiserfordernis: Dichtigkeit geotechnischer Barrieren

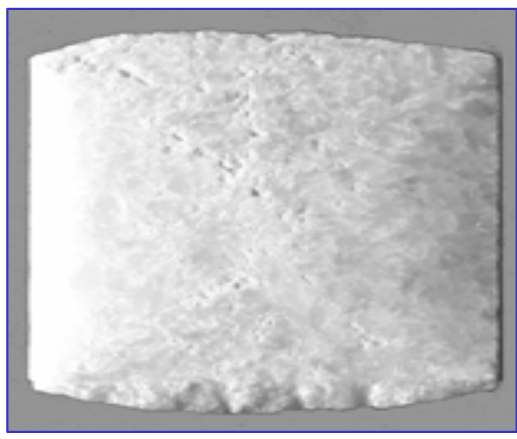
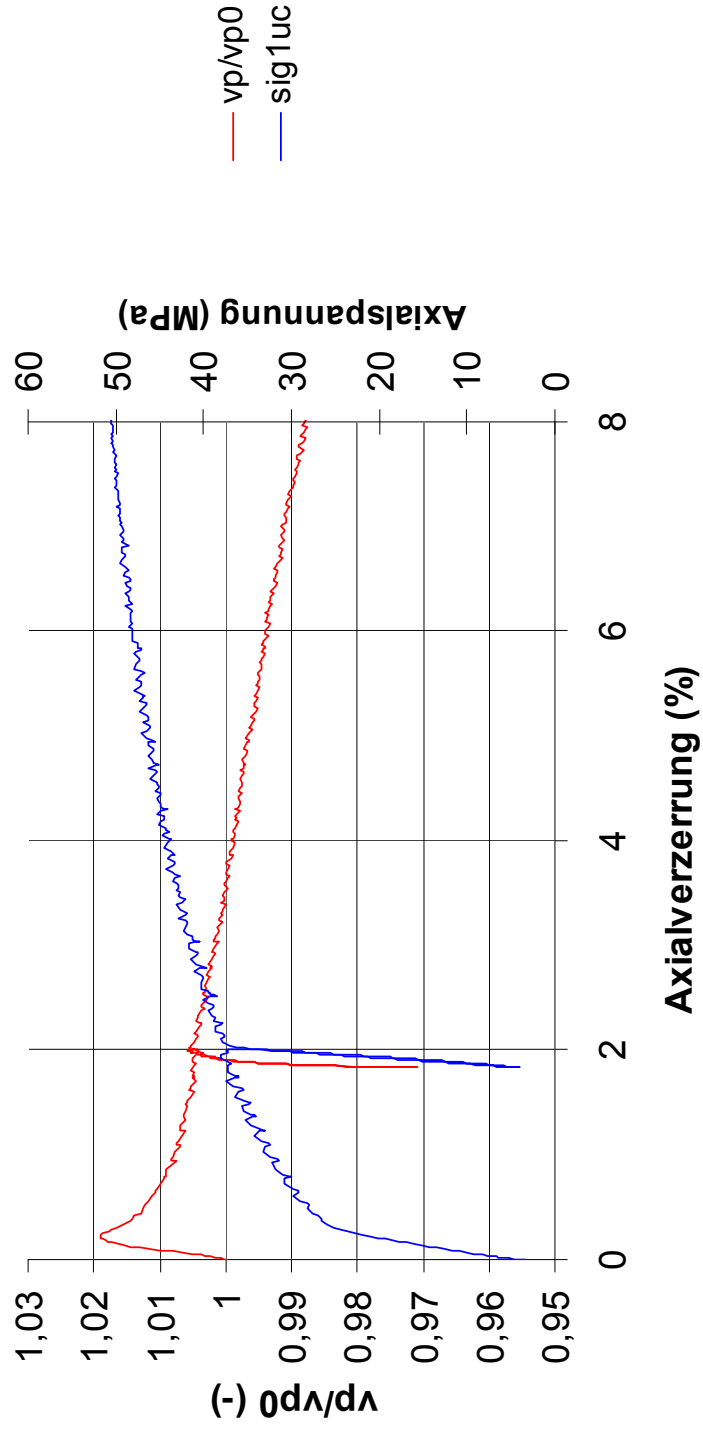
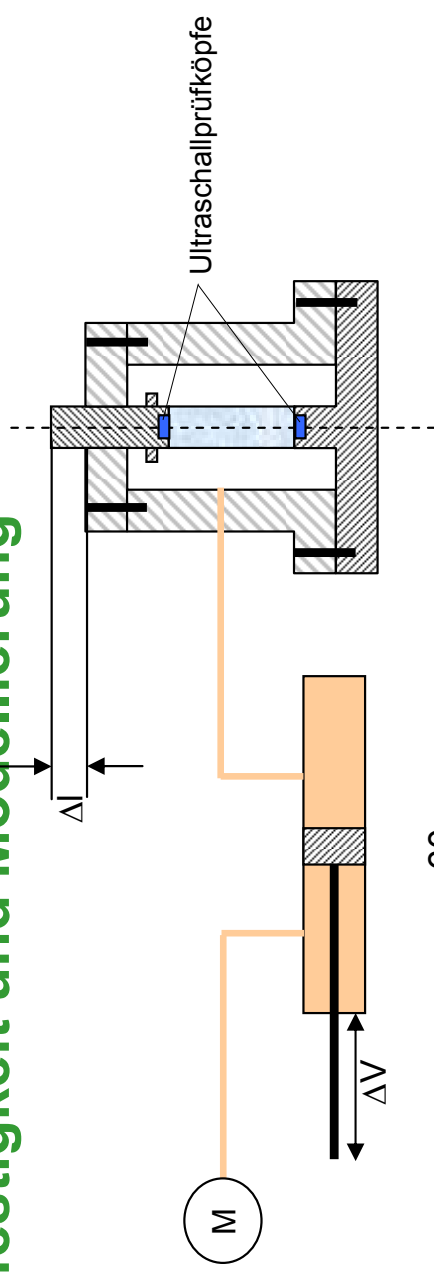
- bautechnische Konstruktion
- Kontaktzone
- Auflockerungszone
- umgebendes Gebirge



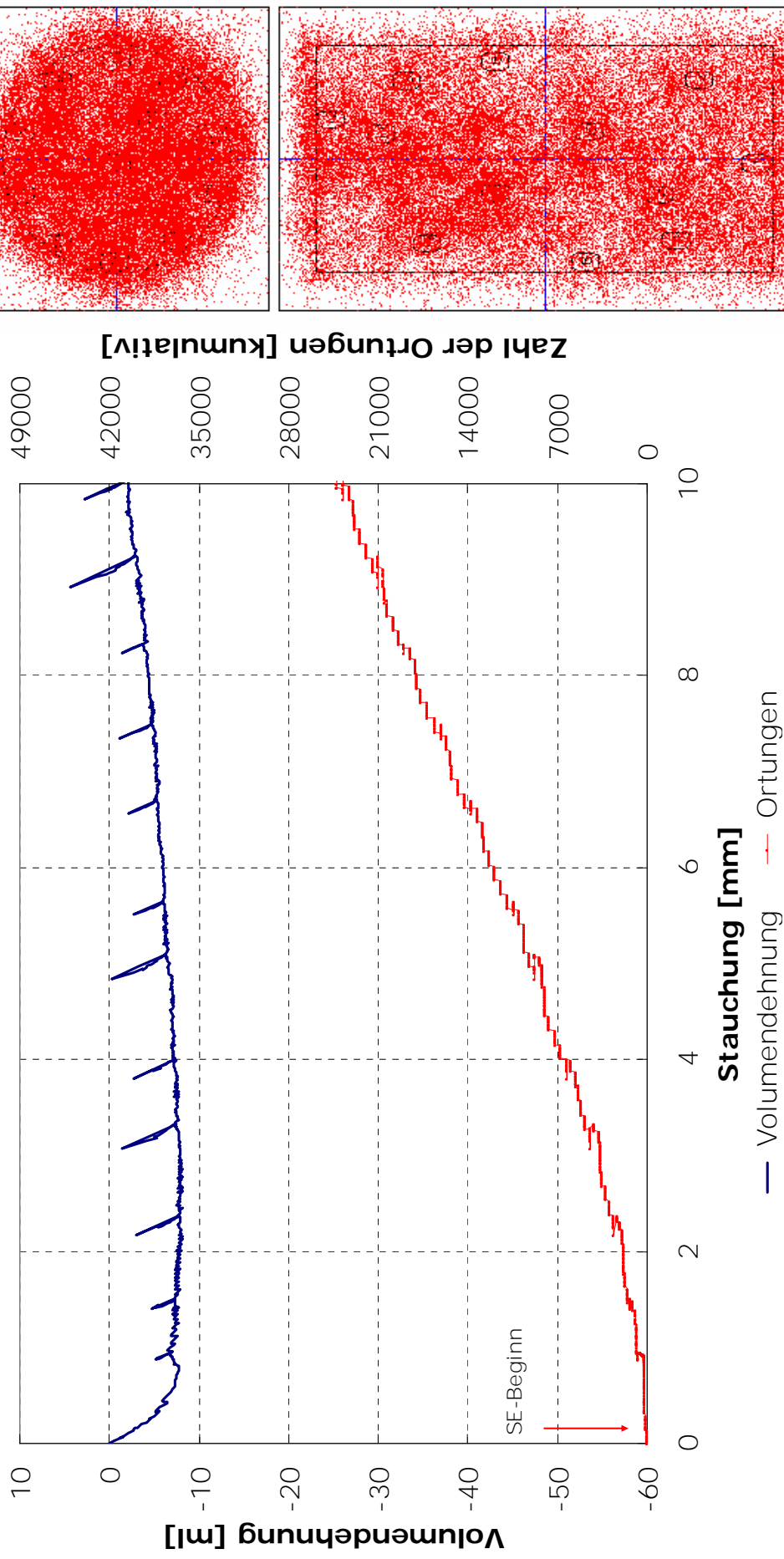
Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanzfestigkeit und Modellierung



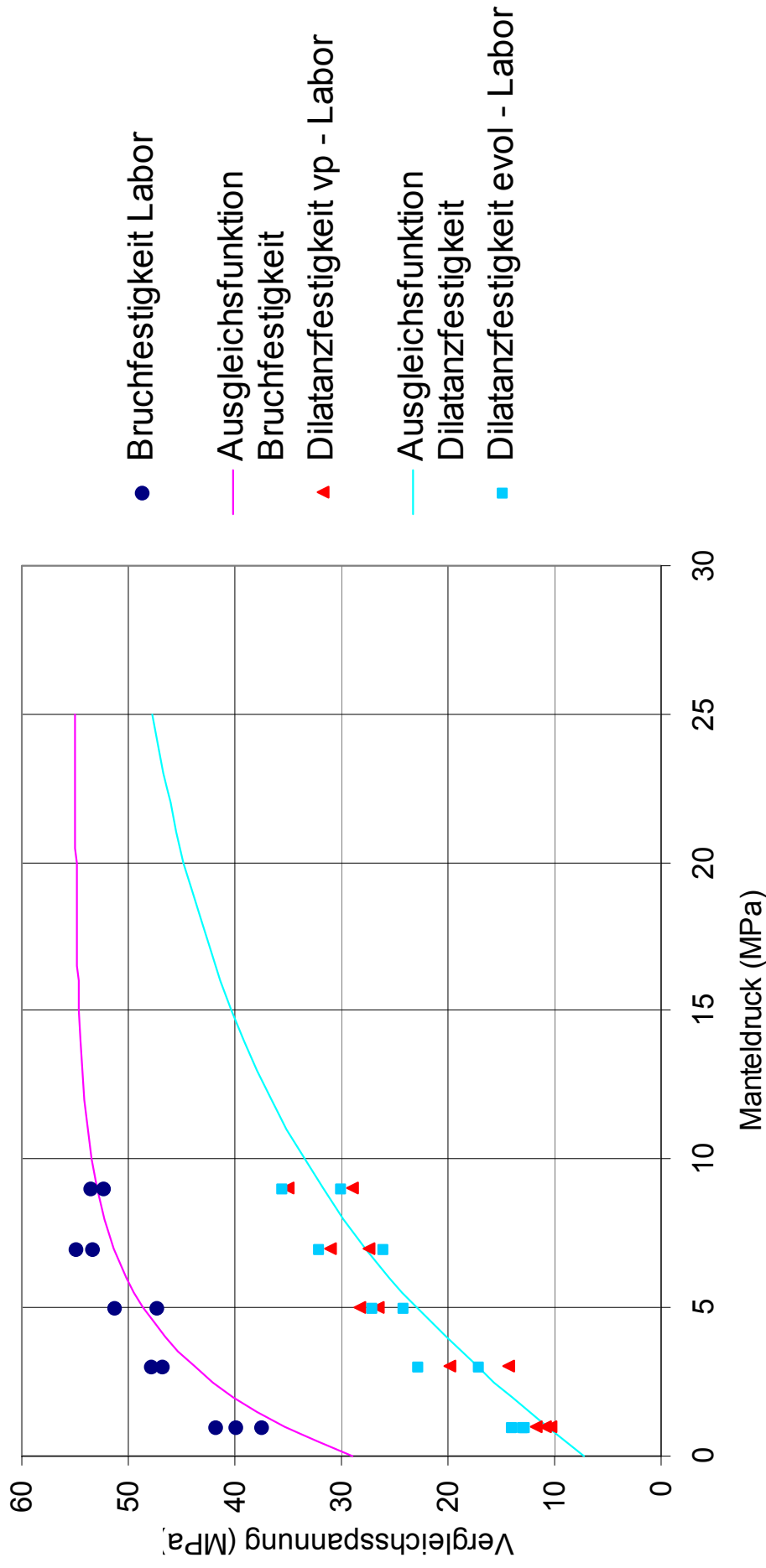
Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanzfestigkeit und Modellierung



Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanzfestigkeit und Modellierung



Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanzfestigkeit und Modellierung



Schadigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanzfestigkeit und Modellierung

$$\beta_{Dil(\sigma_3)}^{TC} = \beta_{(\sigma_3)}^{TC} \cdot (1 - a_4 \cdot \exp(-a_5 \cdot \sigma_3)) = [a_6 - a_7 \cdot \exp(-a_8 \cdot \sigma_3)] \cdot (1 - a_4 \cdot \exp(-a_5 \cdot \sigma_3))$$

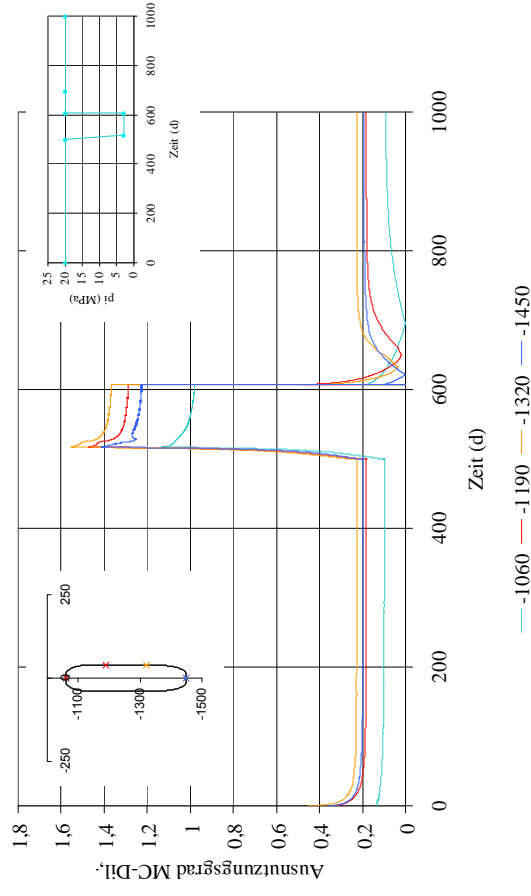
$$\beta_{Dil(\sigma_3)}^{TE} = \beta_{(\sigma_3)}^{TE} \cdot (1 - a_4 \cdot \exp(-a_5 \cdot \sigma_3)) = \left[(a_6 - a_7 \cdot \exp(-a_8 \cdot \sigma_3)) \cdot \frac{1}{\cos\left(\Phi + \frac{\pi}{6}\right) + a_9 \cdot \sin\left(\Phi + \frac{\pi}{6}\right)} \right] \cdot \exp(-a_{10} \cdot \sigma_3) \cdot (1 - a_4 \cdot \exp(-a_5 \cdot \sigma_3))$$

$$\frac{\tau}{\sigma^*} \geq -0,01679 \cdot \left(\frac{\sigma^2}{\sigma^*} + 0,8996 \cdot \frac{\sigma}{\sigma^*} \right) \Leftrightarrow \frac{1}{\sigma^*} \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \geq -0,01679 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2}{\sigma^*} + 0,8996 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sigma^*} \right)$$

$$\sigma_{Dil} = \sigma_{DDil} + \frac{(\sigma_{max,Dil} - \sigma_{DDil})}{(\sigma_{\psi} + \sigma_3)} \cdot \sigma_3$$

Retrospektive Bewertung

$$\epsilon_v, \sigma_v, \eta_{Dil} \rightarrow X, t$$



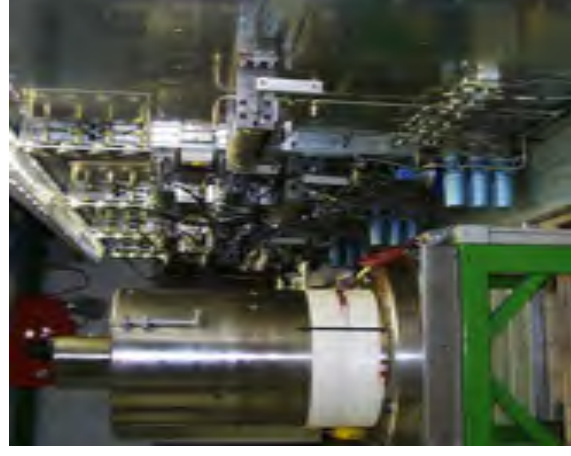
Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanz / Volumendehnung und Modellierung

$$\dot{\epsilon}_{vol} = ?$$

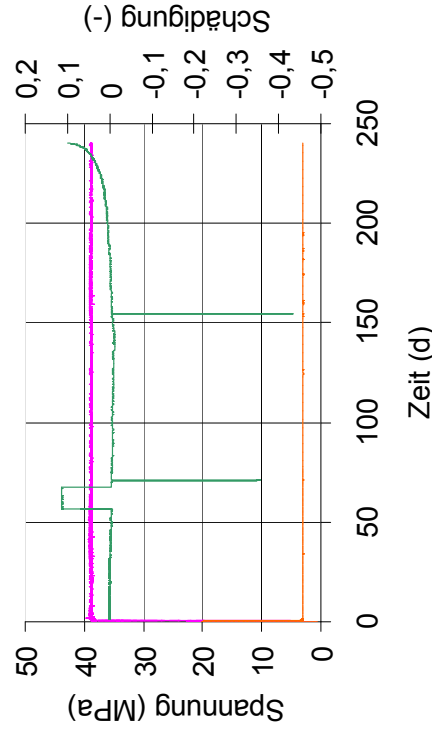
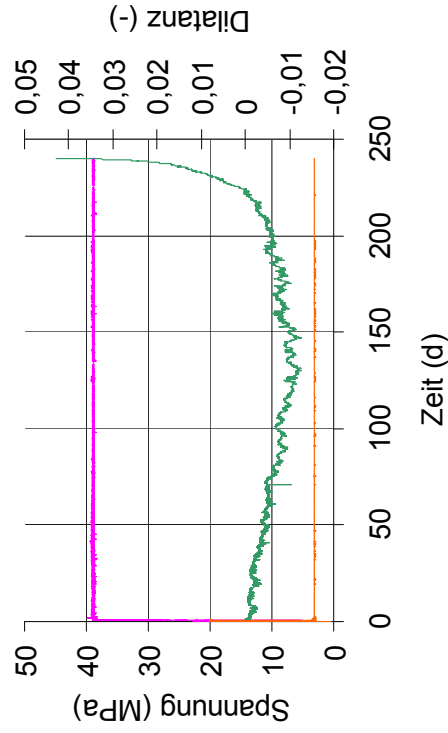
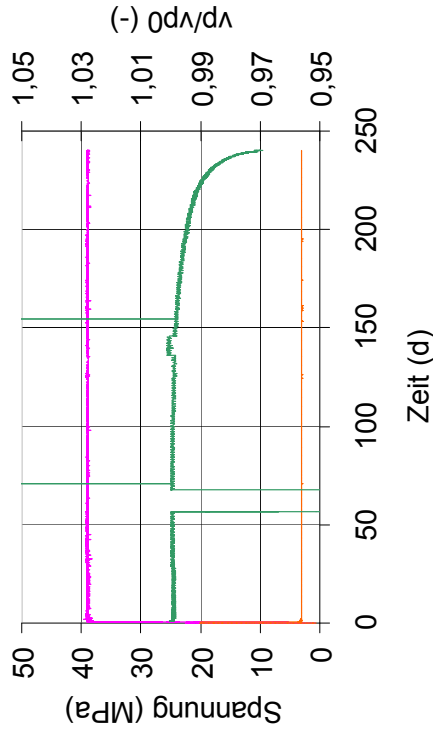
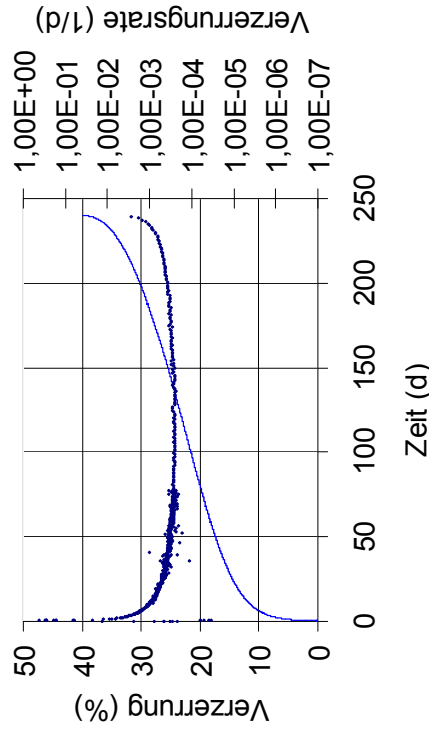
$$\dot{\epsilon}_D = ?$$



Analyse des zeitabhängigen Verformungsverhaltens bei Beanspruchungen oberhalb der Dilatanzfestigkeit

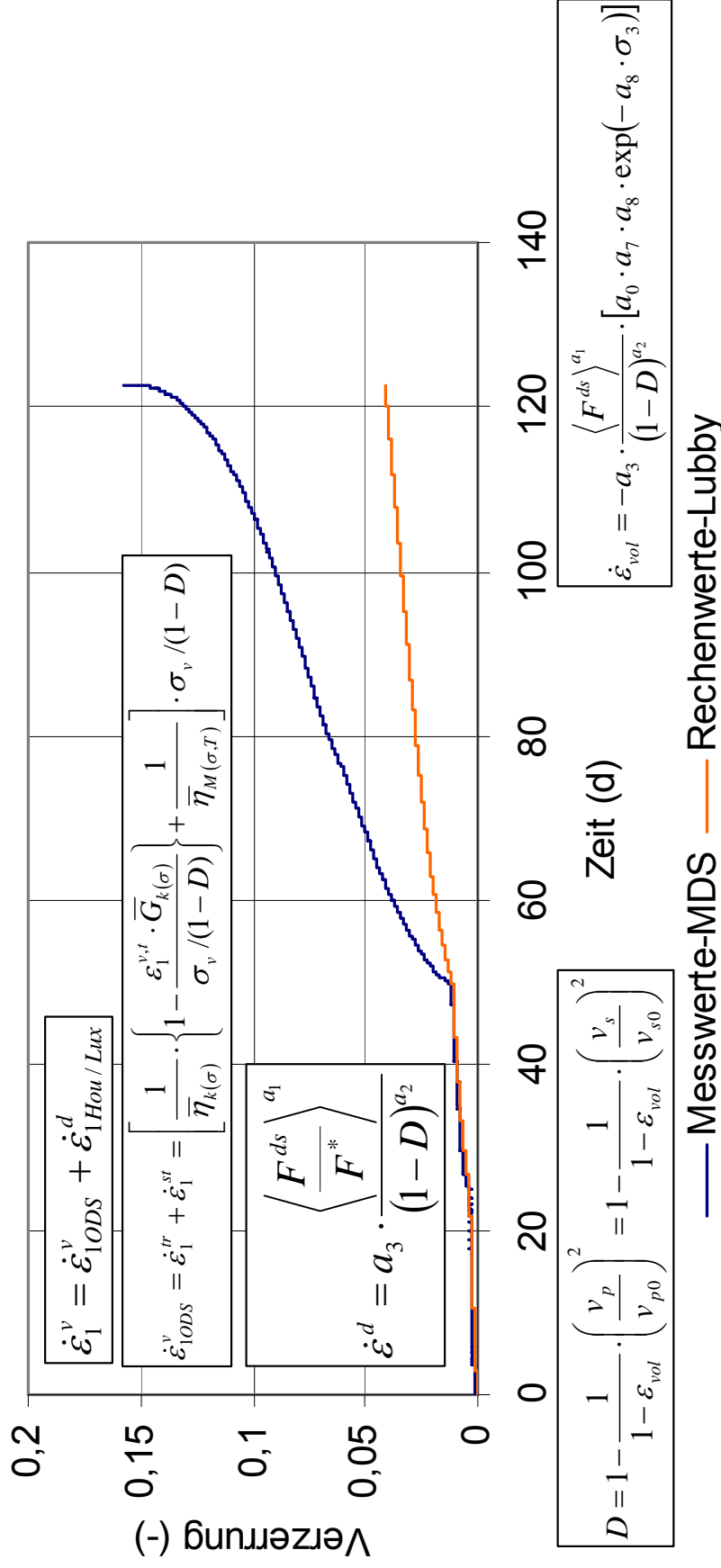


Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanz / Volumendehnung und Modellierung

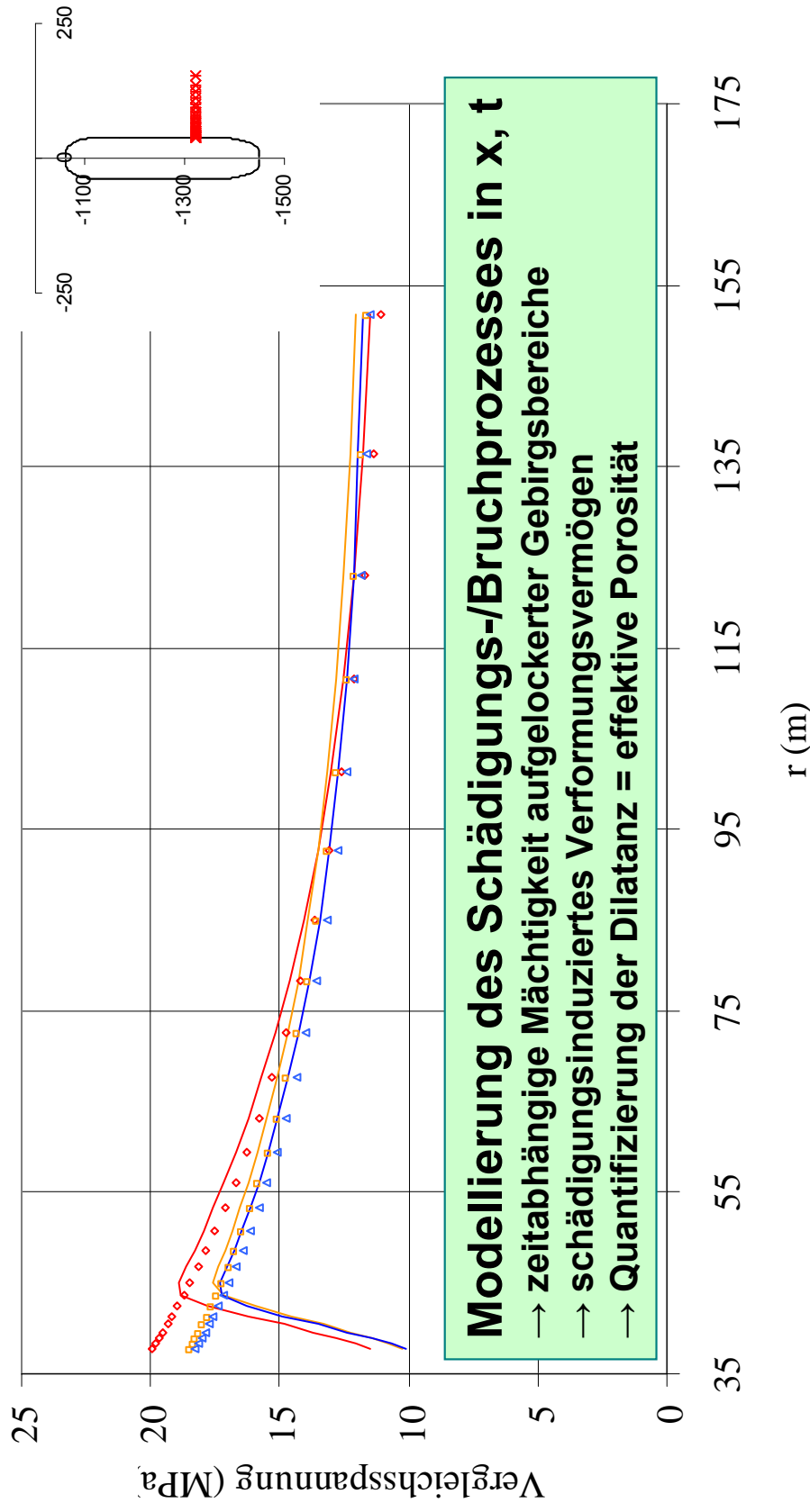


Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanz / Volumendehnung und Modellierung

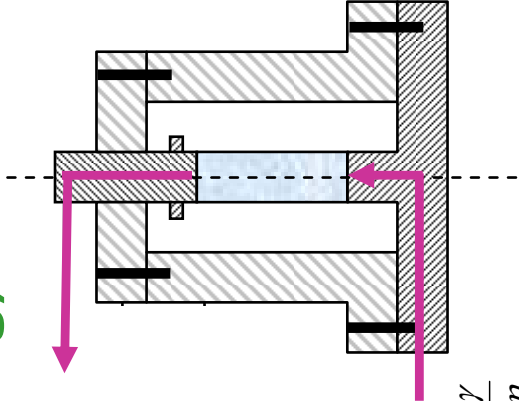
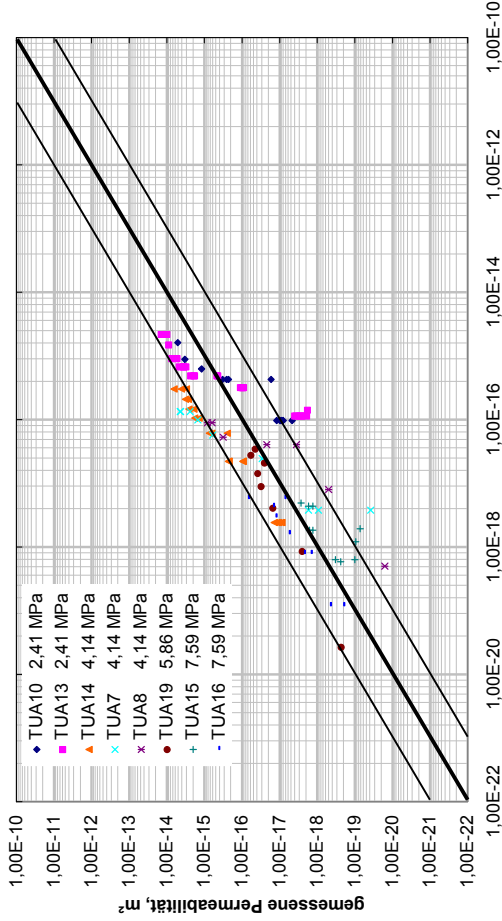
schädigungsfreies Kriechen \longleftrightarrow schädigungsinduziertes Kriechen



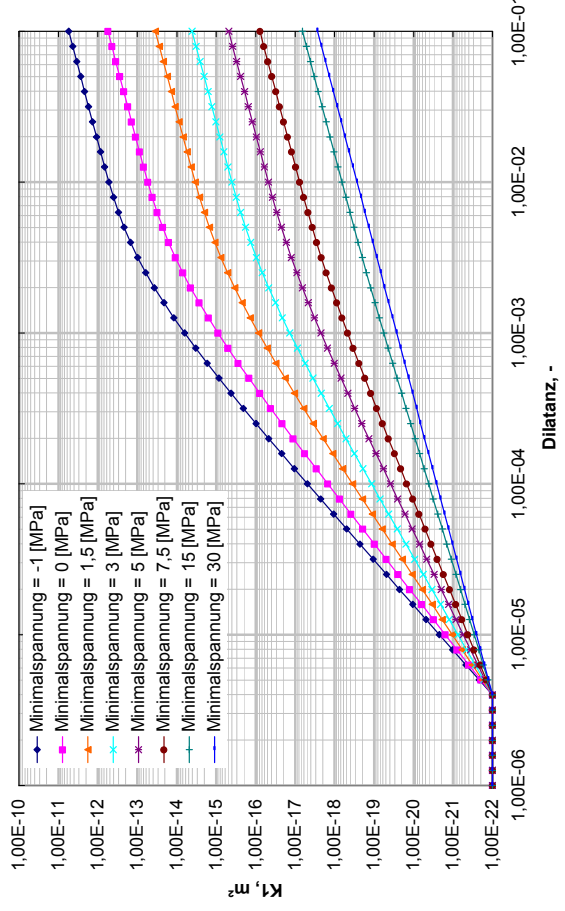
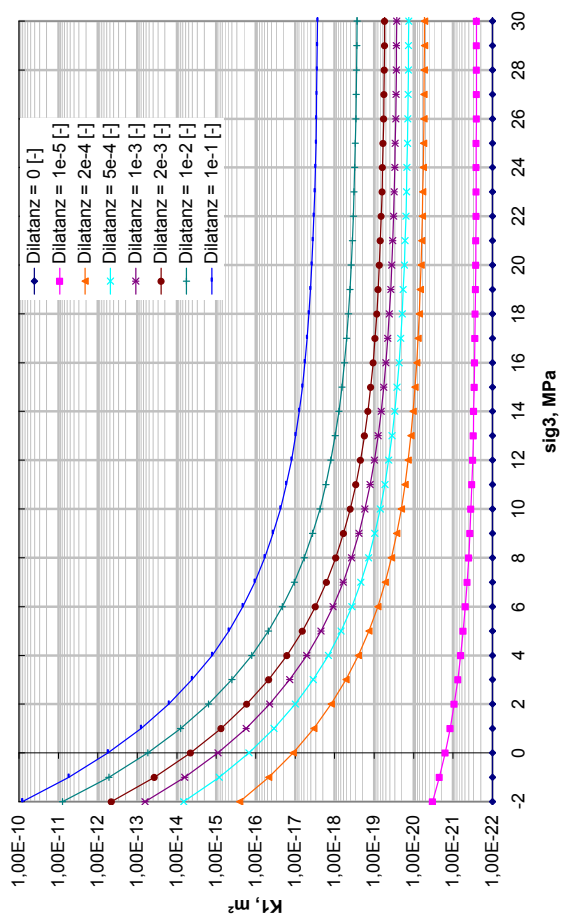
Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Dilatanz / Volumendehnung und Modellierung



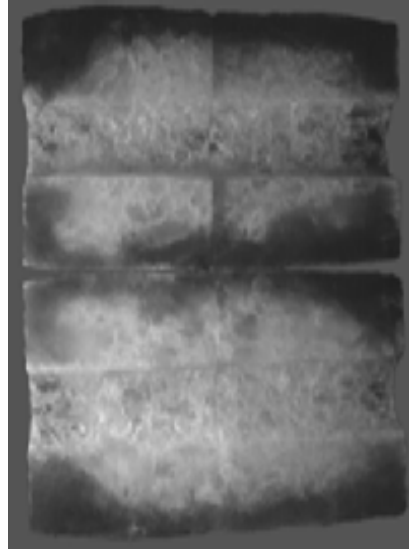
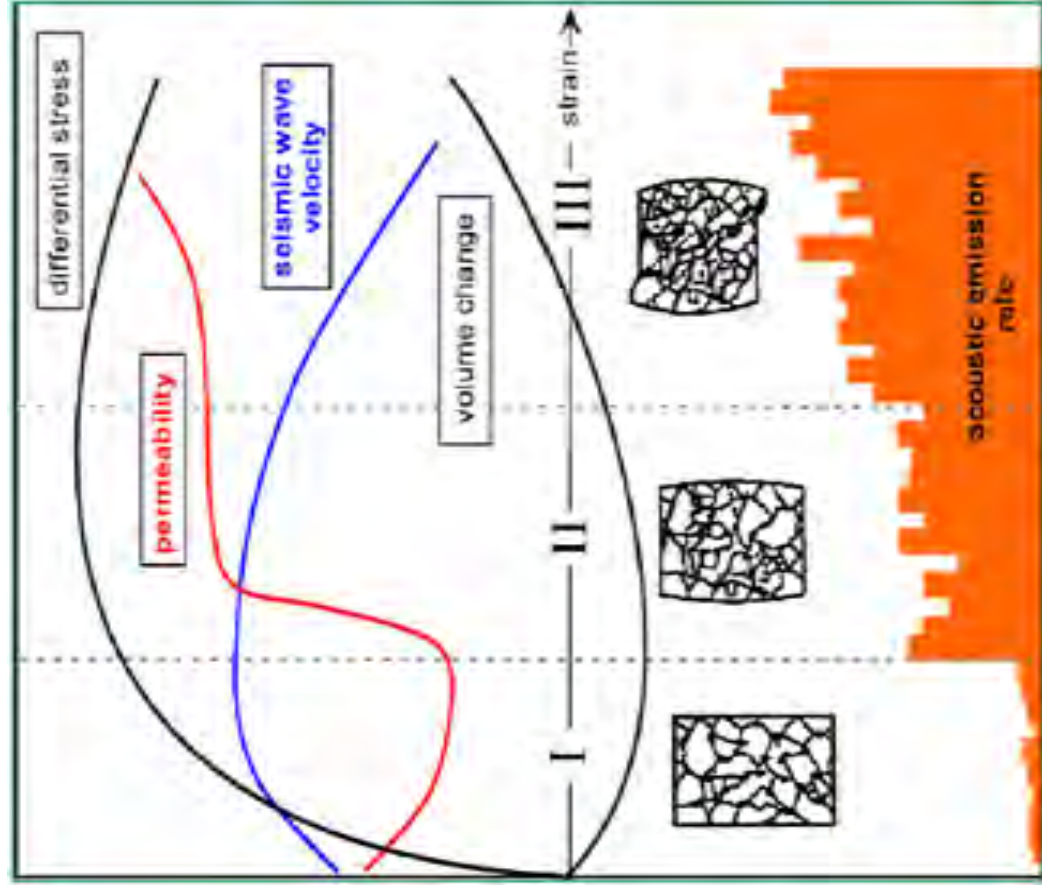
Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Permeabilität (→ Poro-Perm-Modellierung)



$$K = \frac{2 \cdot \eta \cdot l \cdot p_2 \cdot \dot{p}_2 \cdot V_2}{A \cdot (p_1^2 - p_2^2)} \cdot \frac{k_f \cdot V_2}{p_2} / \frac{k_f}{K} = \frac{\gamma}{\eta}$$



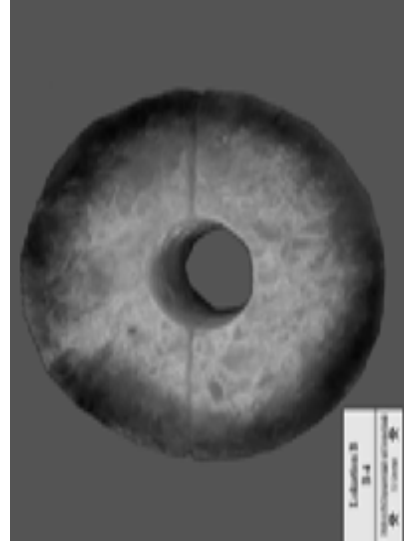
Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung



I - compaction

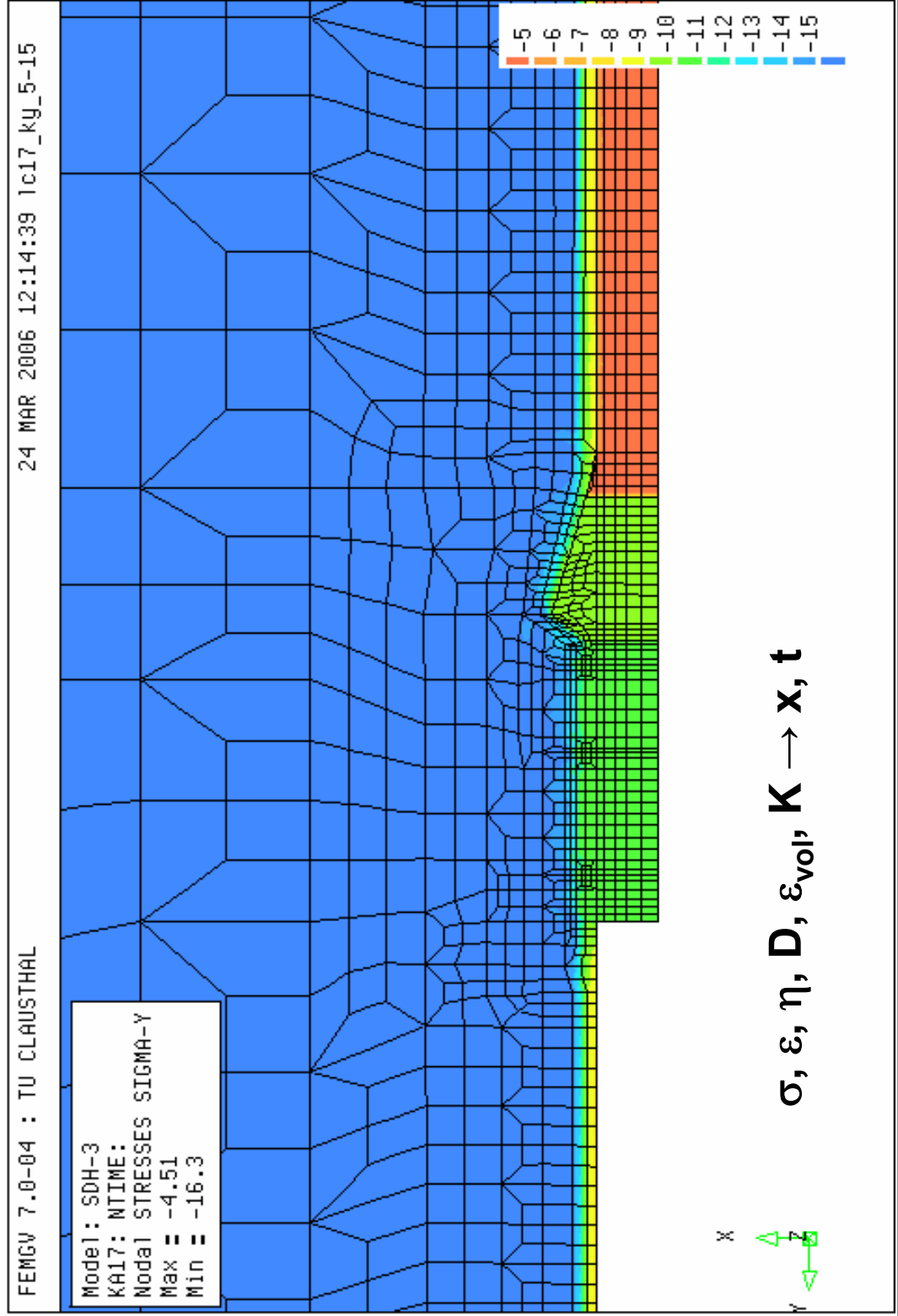
II - damage (micro)

III - rupture (macro)



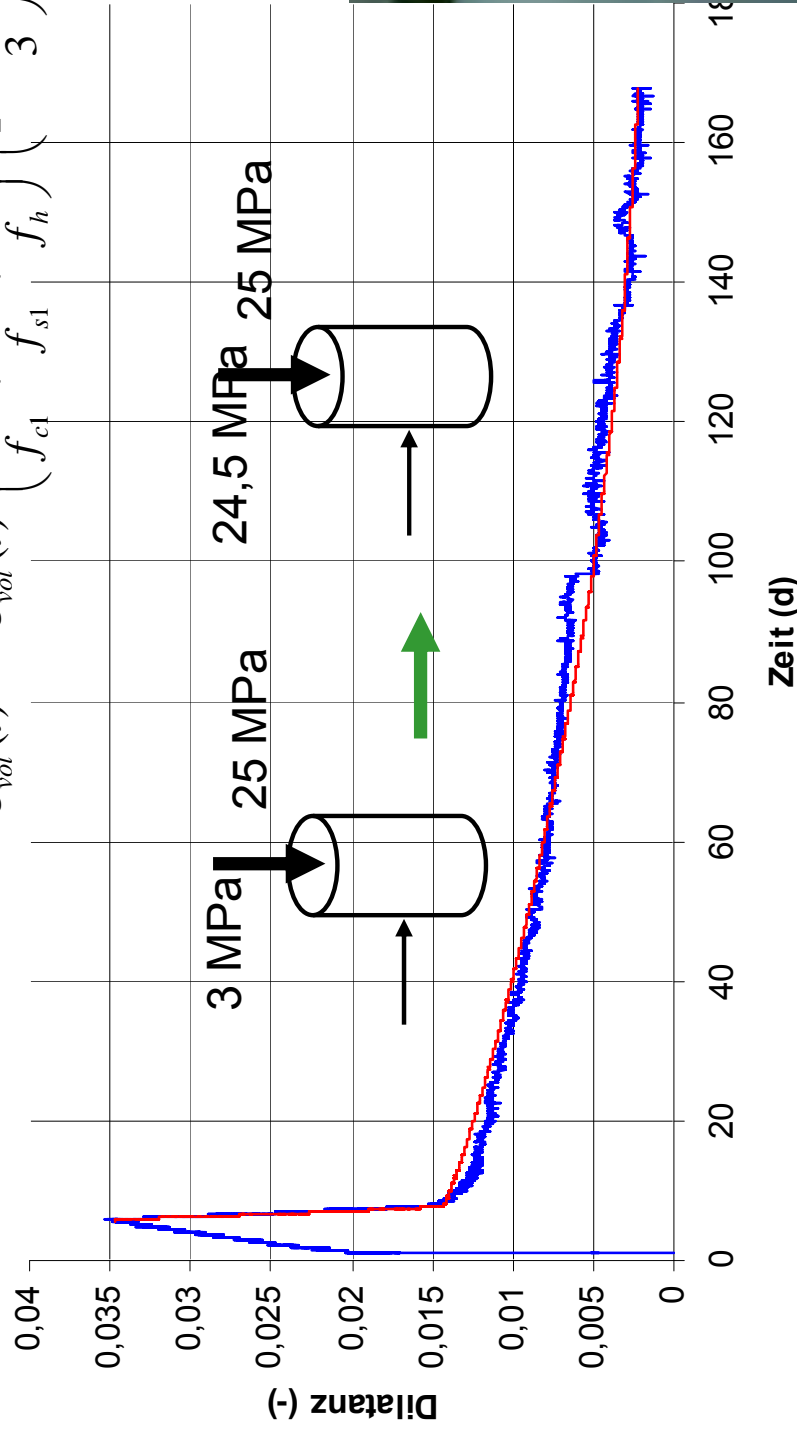
(Schulze et al., 2001)

Schädigungsmechanik – Mechanisch-Hydraulisch gekoppelte Modellierung



Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Schädigungsrückbildung und Modellierung

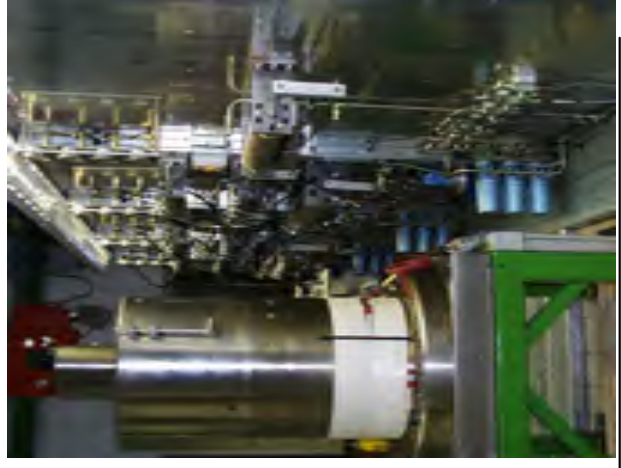
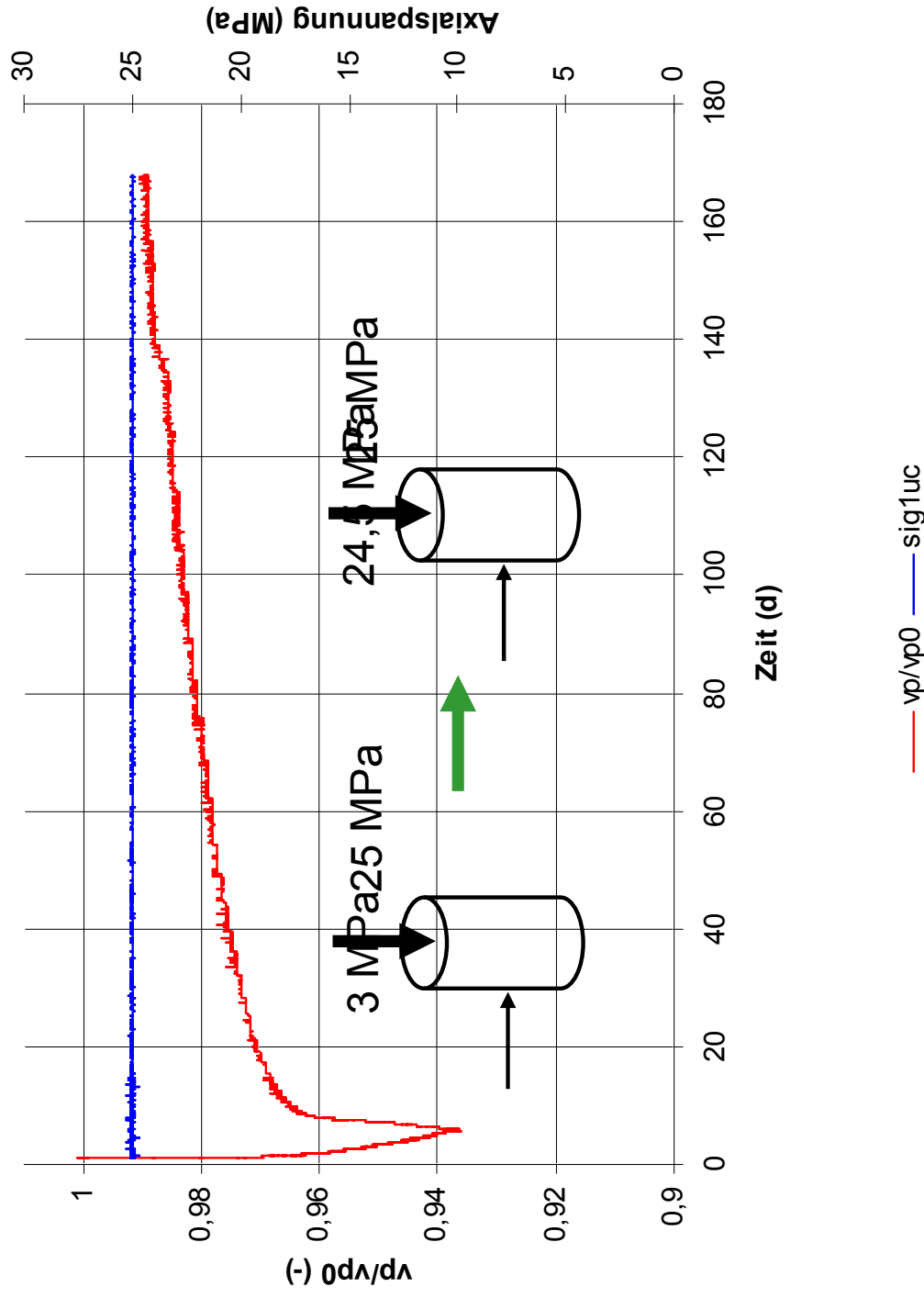
$$\dot{\epsilon}_{vol}^h(t) = -\dot{\epsilon}_{vol}(t) \cdot \left(\frac{\dot{F}^h}{f_{cl}} + \frac{I_1}{f_{s1}} + \frac{1}{f_h} \right) \cdot \left(1 - \frac{g_h}{3} \right) \quad / \quad g_h = 1 - \frac{2\dot{\epsilon}_1^h}{\dot{\epsilon}_{vol} - \dot{\epsilon}_1^h}$$



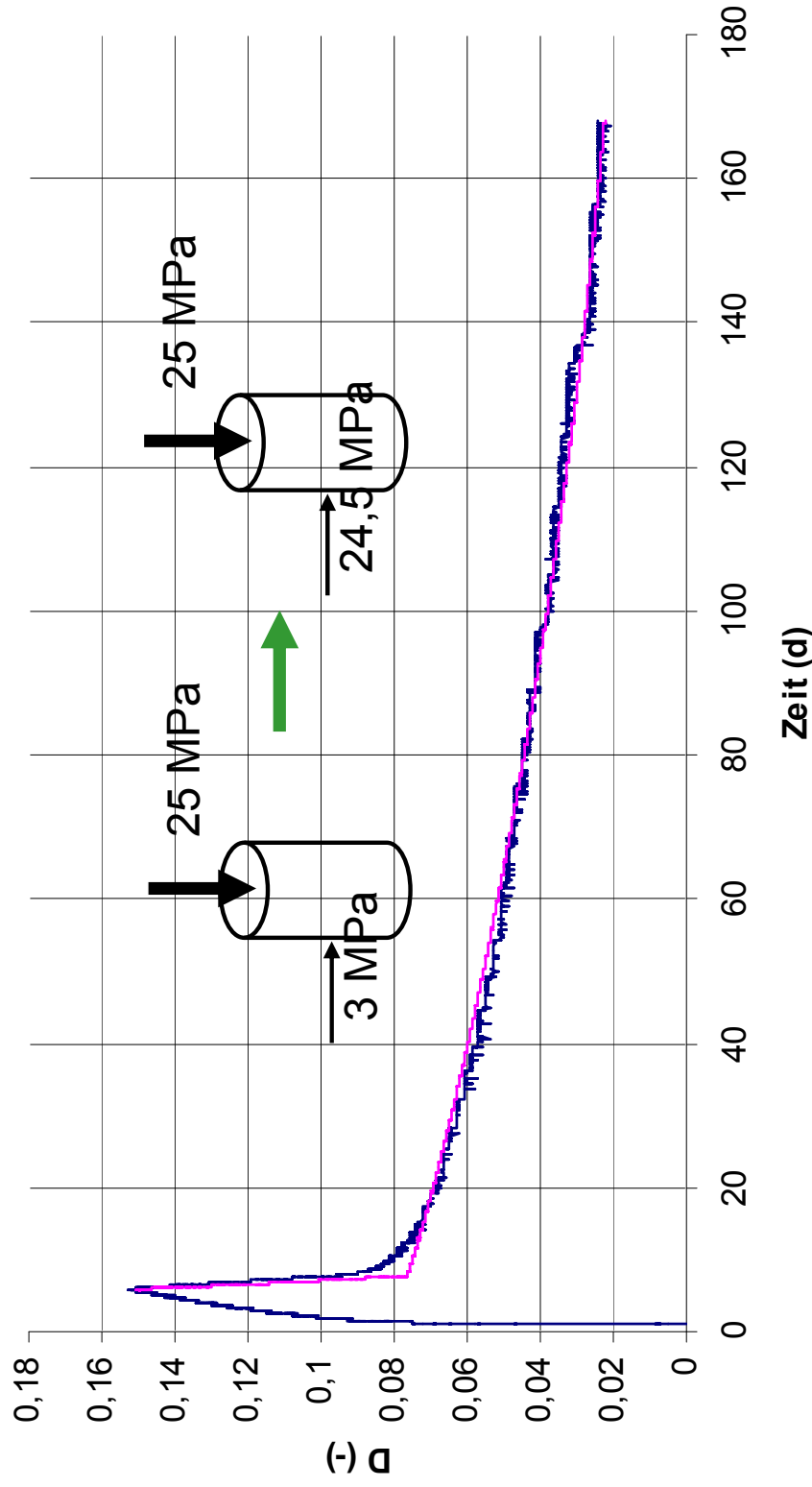
— epsvol-gemessen — epsvol-berechnet



Schädigungsmechanik – Laborative Ermittlung der Schädigungsrückbildung und Modellierung



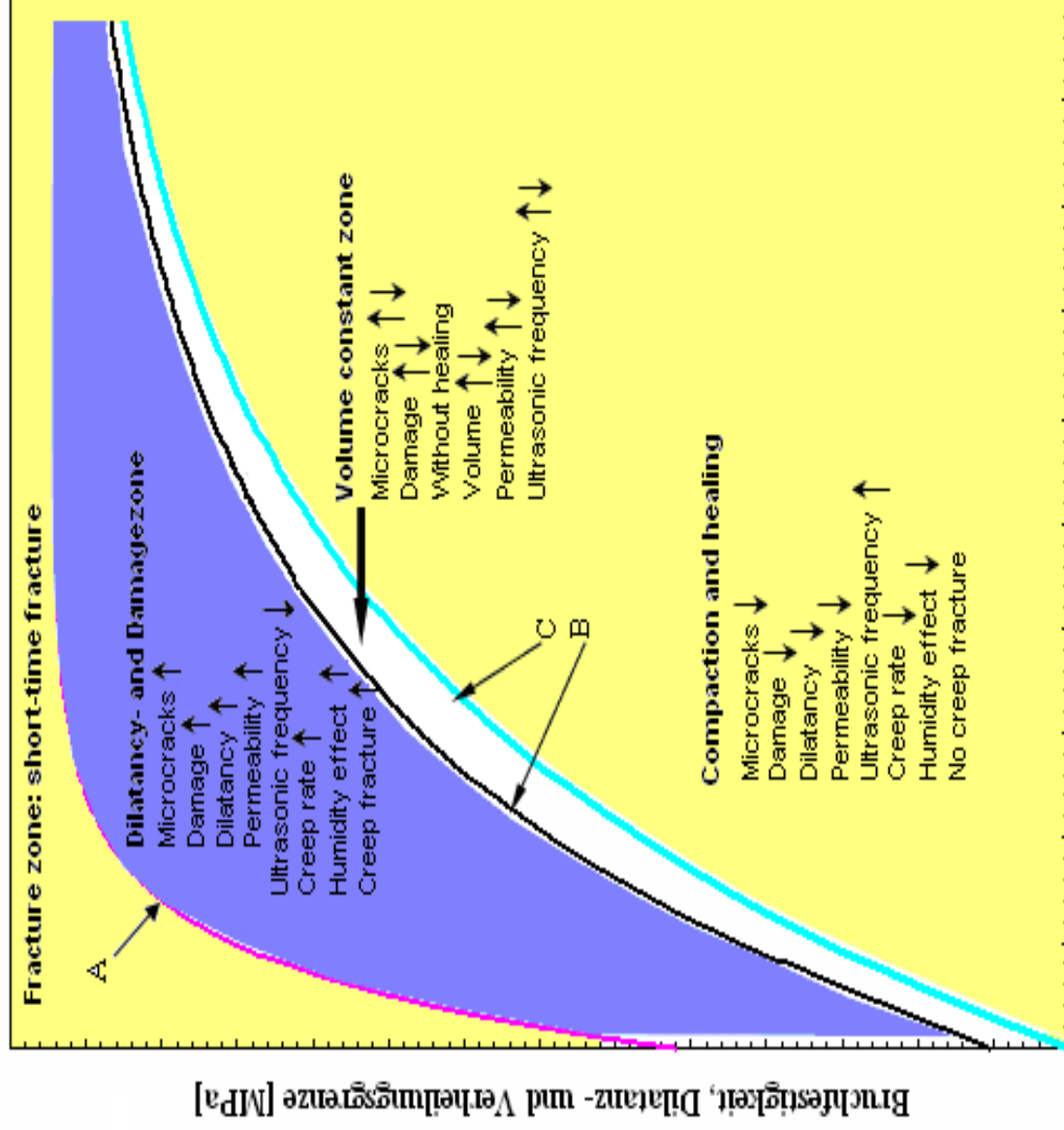
Schadungsmechanik – Laborative Ermittlung der Schadungsrückbildung und Modellierung



$$\dot{D}^h(t) = -D(t) \cdot \left(\frac{\dot{F}^h}{f_{c1} \cdot f_{c2}} + \frac{I_1}{f_{s1} \cdot f_{s2}} + \frac{1}{f_h} \right)$$

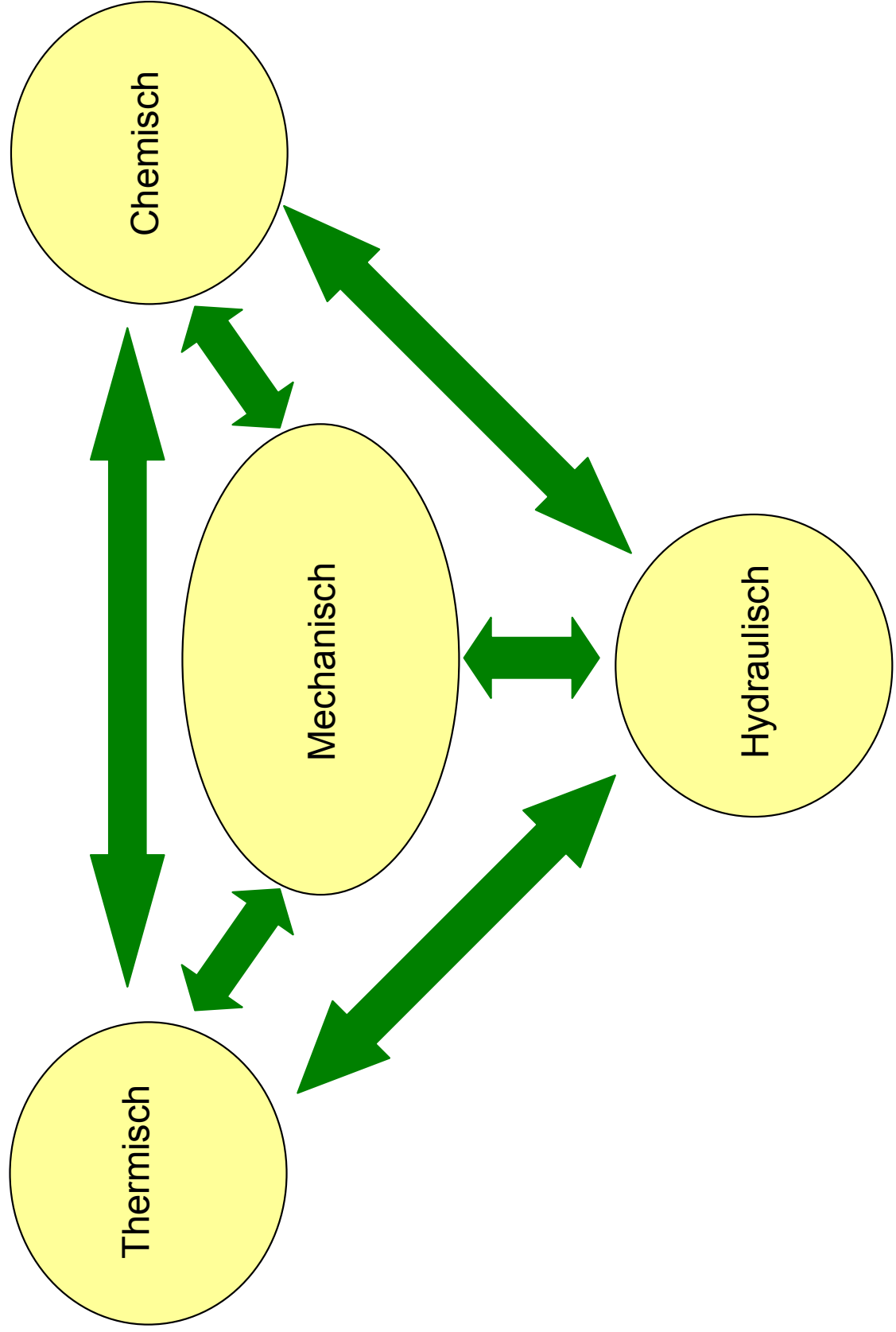
— D-gemessen — D-berechnet

Modellierung schadigungsbezogener Prozesse



minimale Hauptspannung [MPa]

THMC – Gekoppelte Prozesssimulation

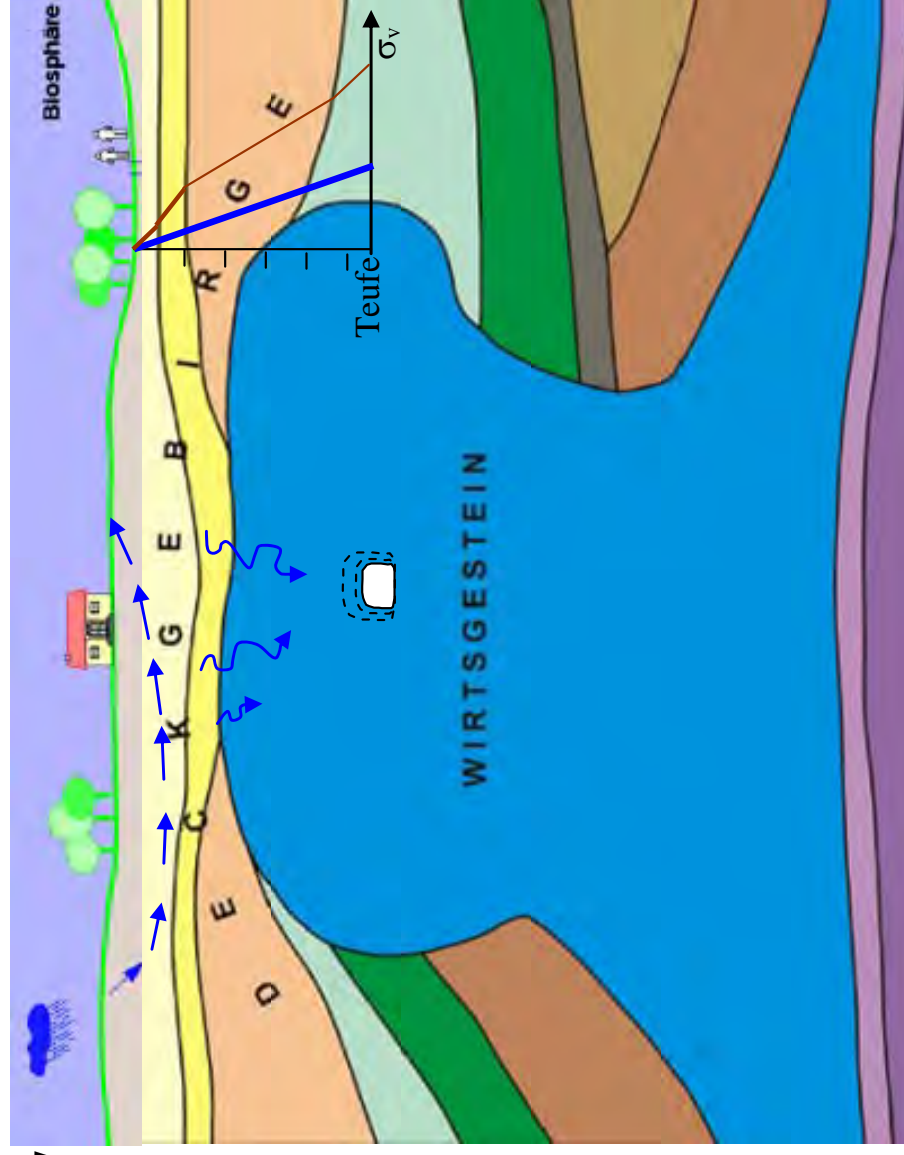


THM-Modellierung der Integrität geologischer Barrieren

Hydraulisches Integritätskriterium / Fluidkriterium:

Hydraulische Integrität gilt als nachgewiesen, wenn die minimale Hauptspannung im Bereich der rechenungsgebiet größer ist als der teufenbezogen berechnete hydraulische Flüssigkeitsdruck.

$$\min \sigma > p_{fl}$$



Modellierung der Integrität geologischer Barrieren

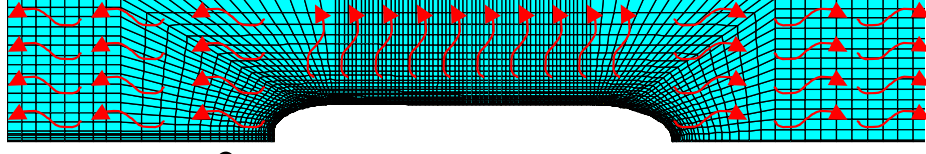
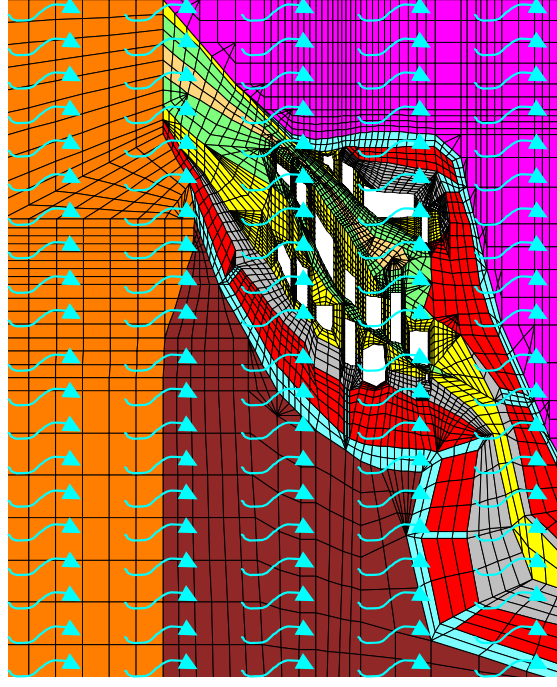
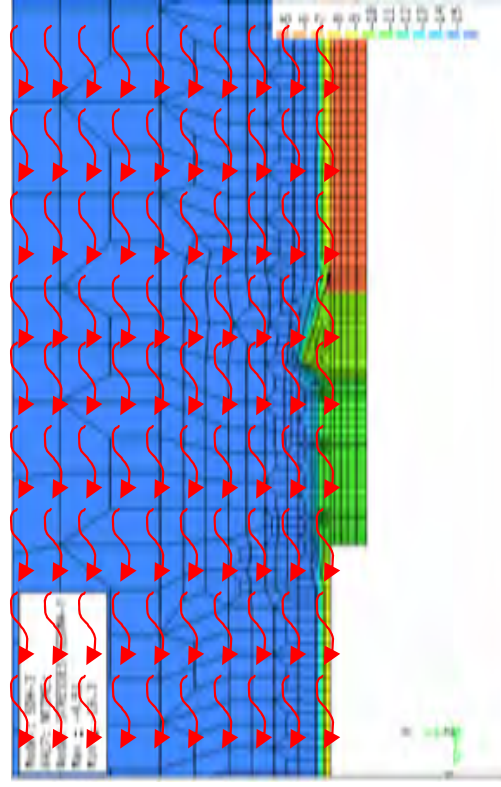
$$K = \frac{\eta \cdot k_f}{\gamma} / k_f = \frac{\nu}{i}$$



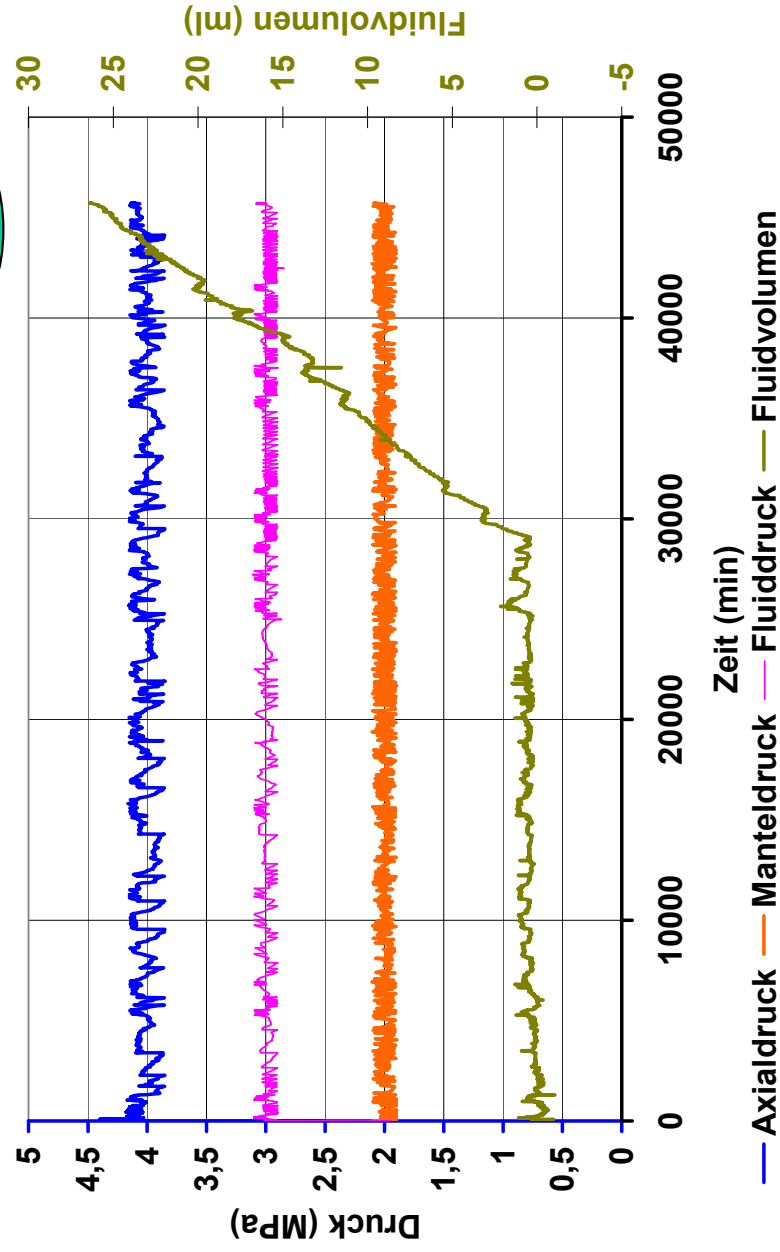
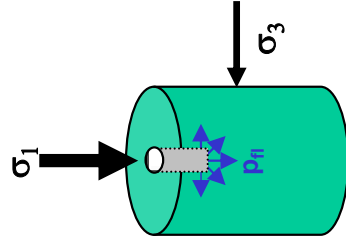
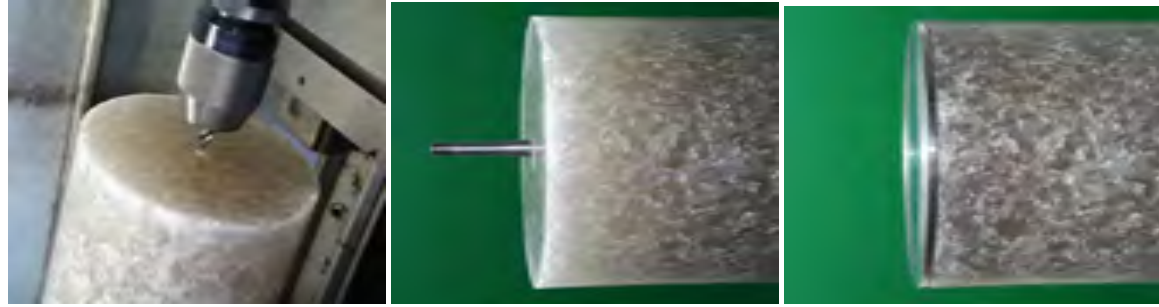
Gebirgsdurchlässigkeit / Gebirgspermeabilität $\neq 0$!



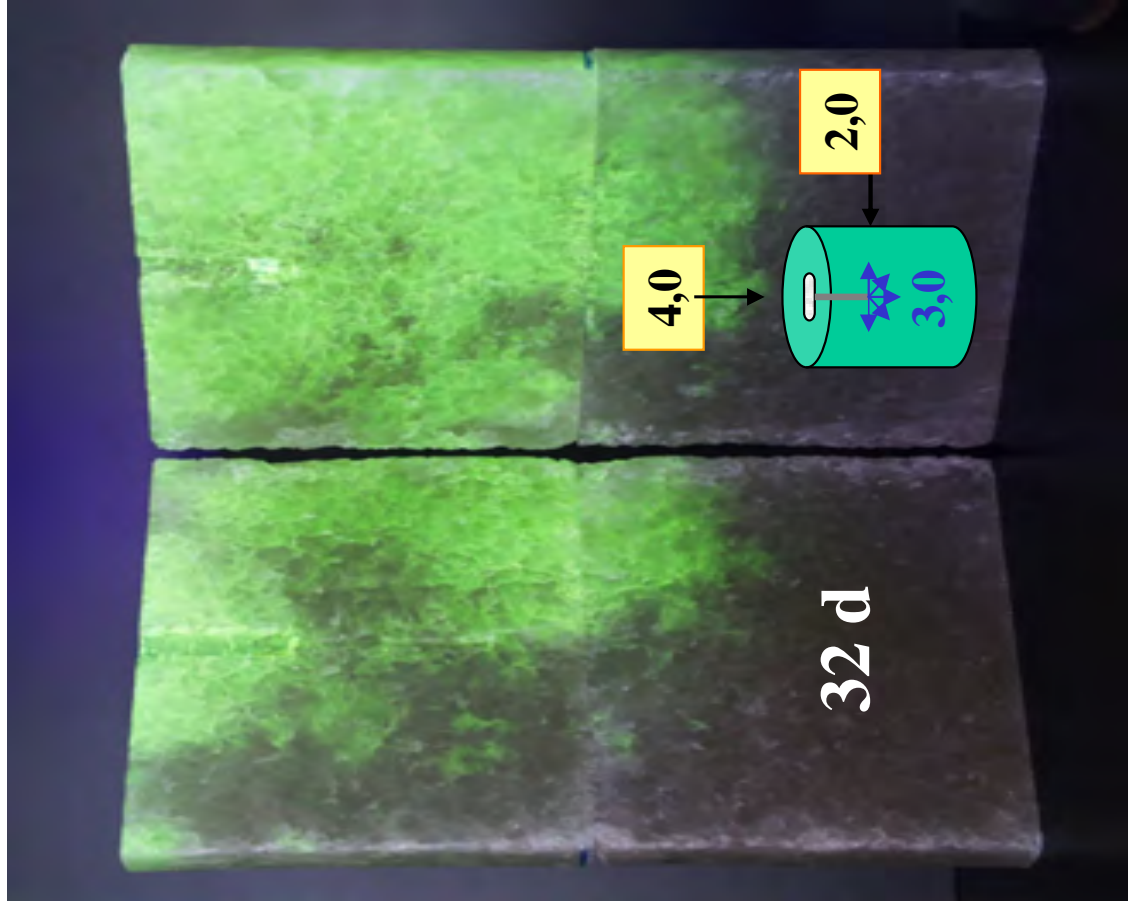
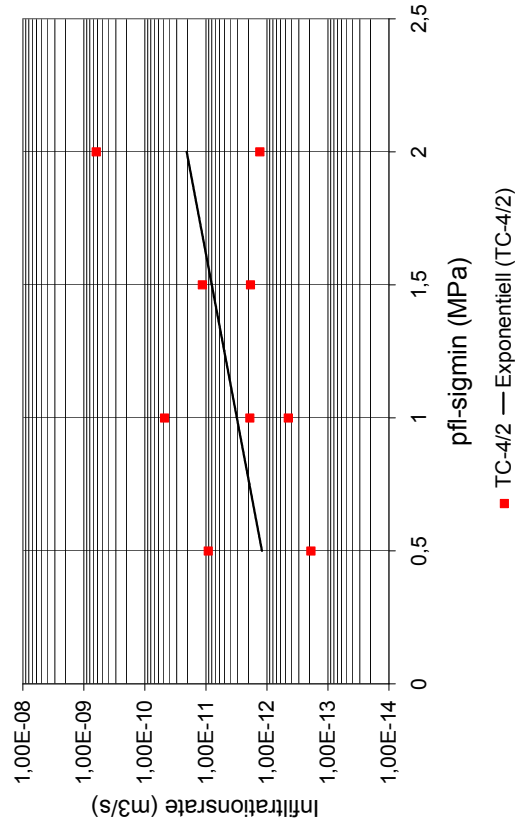
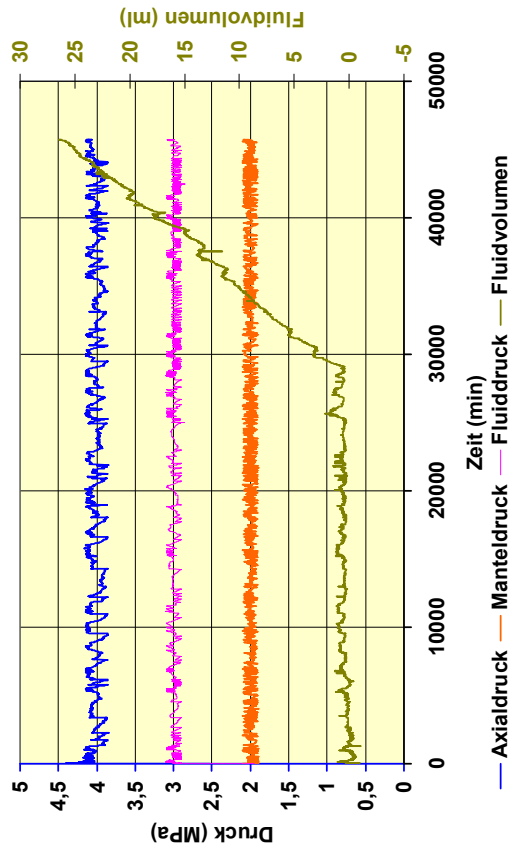
**Vollständiger Einschluss ? / Nachsorgefreie Endlagerung ?
Salzgestein ist dicht gegenüber Flüssigkeiten und Gasen ?**



Versuche zur druckgetriebenen Infiltration

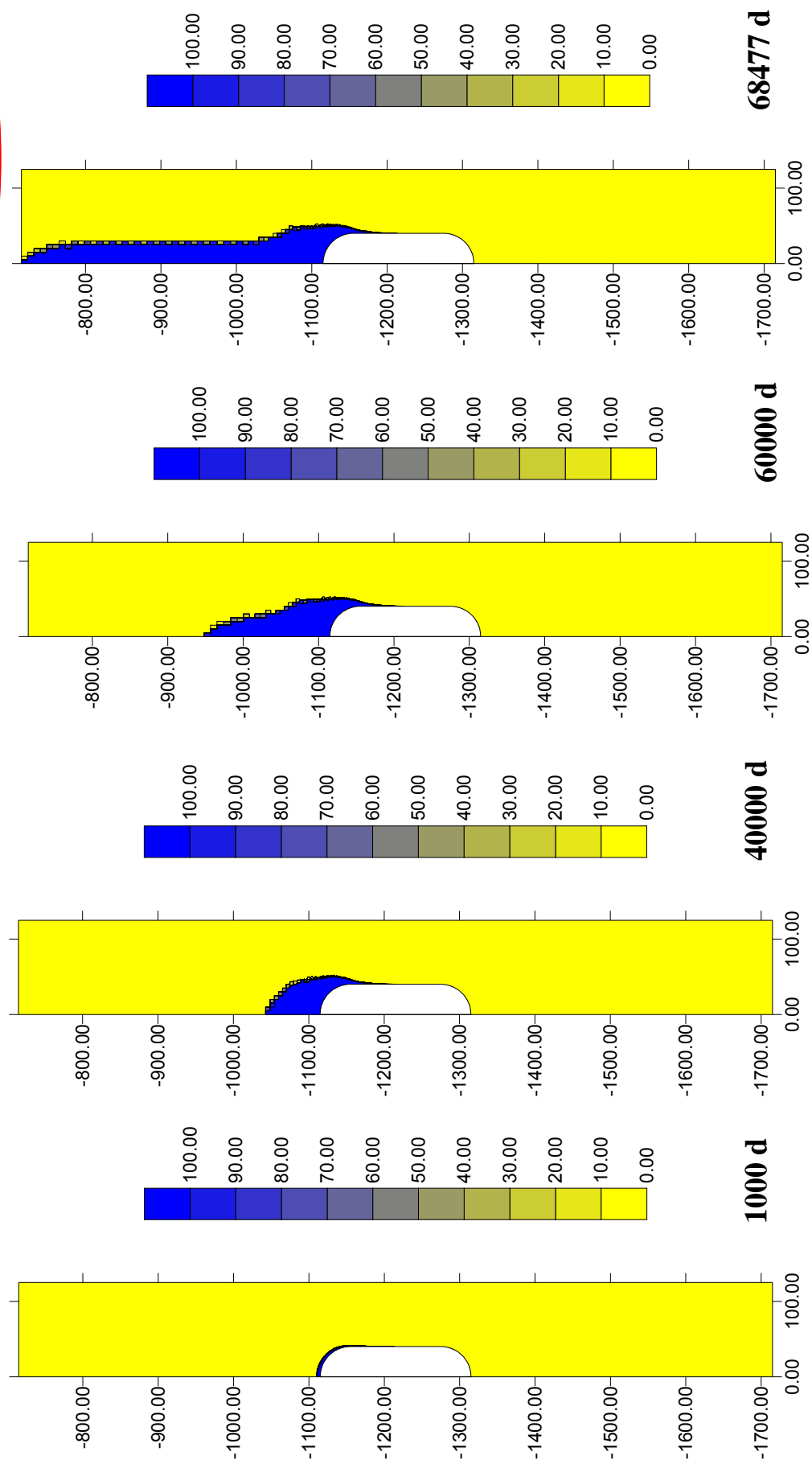


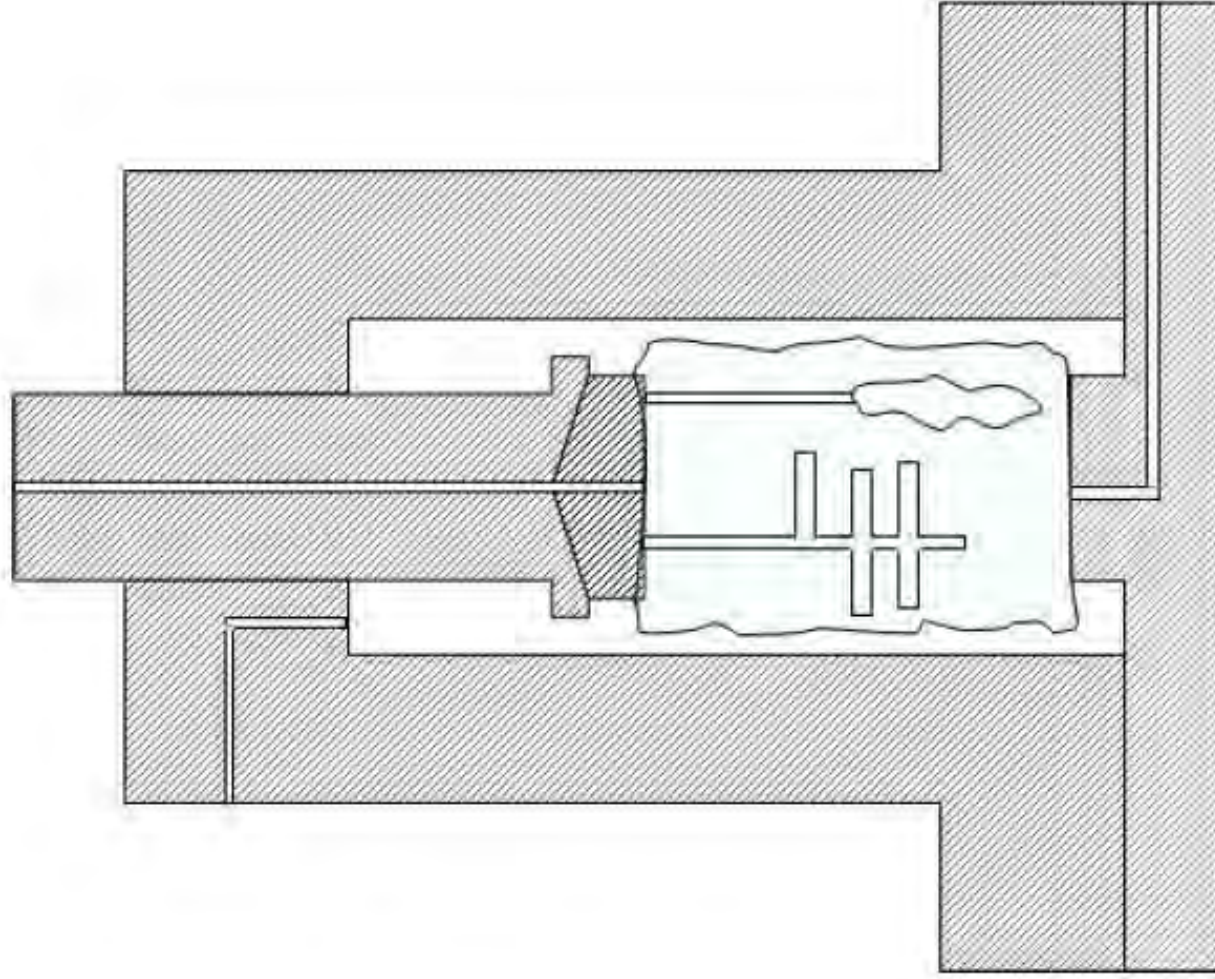
Versuche zur druckgetriebenen Infiltration



Modellierung der Barrierenintegrität

rock mass with 0.2 – 0.5 %
brine saturated micro-fissures





Mit einem herzlichen Dank für
die langjährige wohlwollende
Förderung der wissenschaftlichen
Arbeiten durch

BMBF und PTKA-WTE

Ende

Streckenverschlusssysteme – am Beispiel CARLA

Prof. Dr. Kudla, W.

TU BA Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

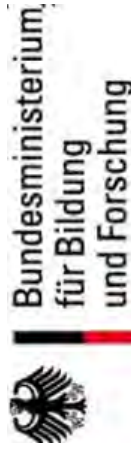


Abschlussveranstaltung
„Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen“
am 14./15.02.2012 in Karlsruhe

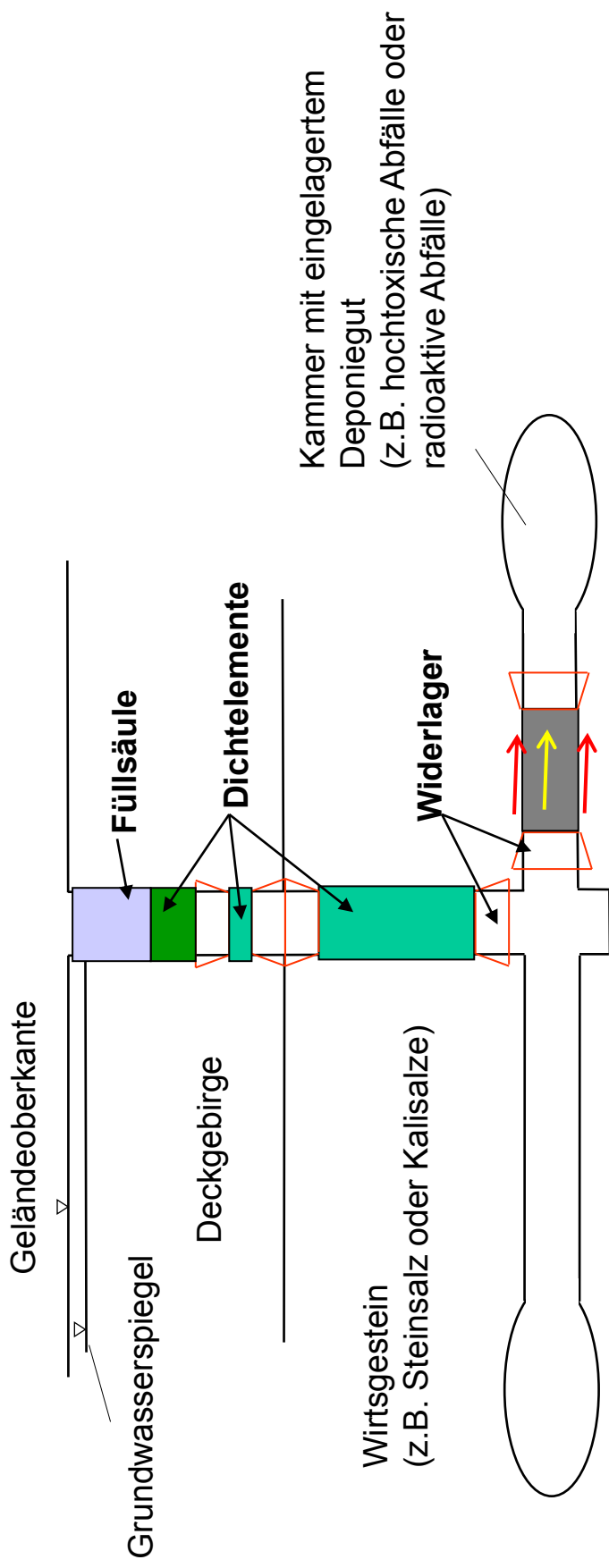
Streckenverschlusssysteme – am Beispiel CARLA

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla

(Finanziert aus Mitteln des BMBF, des Landes Sachsen-Anhalt und aus Eigenmitteln der GTS)



Prinzipdarstellung für geotechnische Verschlussbauwerke bei einem Schacht und einer Strecke



Generelle Fragestellungen:

1. Permeabilität und Heterogenität des Wirtsgesteins
2. Mächtigkeit und Permeabilität der Auflockerungszone
3. Permeabilität der Kontaktzone
4. Langzeitsicherheit und Permeabilität des eigentlichen Verschlussbauwerkes

Das Forschungsvorhaben CARLA:

Laufzeit: a) Teil 1 vom 01.10.2002 bis zum 31.10.2004
b) Teil 2 vom 01.12.2004 bis zum 30.06.2010

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Knoll

01.10.2002 bis 31.12.2007
Dipl.-Ing. Finder und Prof. Dr.-Ing. Kudla 01.01.2008 bis 30.06.2010

Projektbeteiligte:

- TU Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Institut für Anorganische Chemie
- Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig
- K-UTEK AG Salt Technologies, Sondershausen
- Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik, Wilsnack & Partner, Freiberg
- Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus – Universität, Weimar

Partner für forschungsbezogene bergbauliche Arbeiten: TS-Bau



Ziel des Forschungsvorhabens:

1. Entwicklung von **Grundsatzlösungen** für einen Streckenverschluss im leicht löslichen Salzgestein – Entwicklung eines Grundkonzeptes (Teil 1)

2. **Test von Funktionselementen** dieses Grundkonzeptes im 1:1 Maßstab (Teil 2)

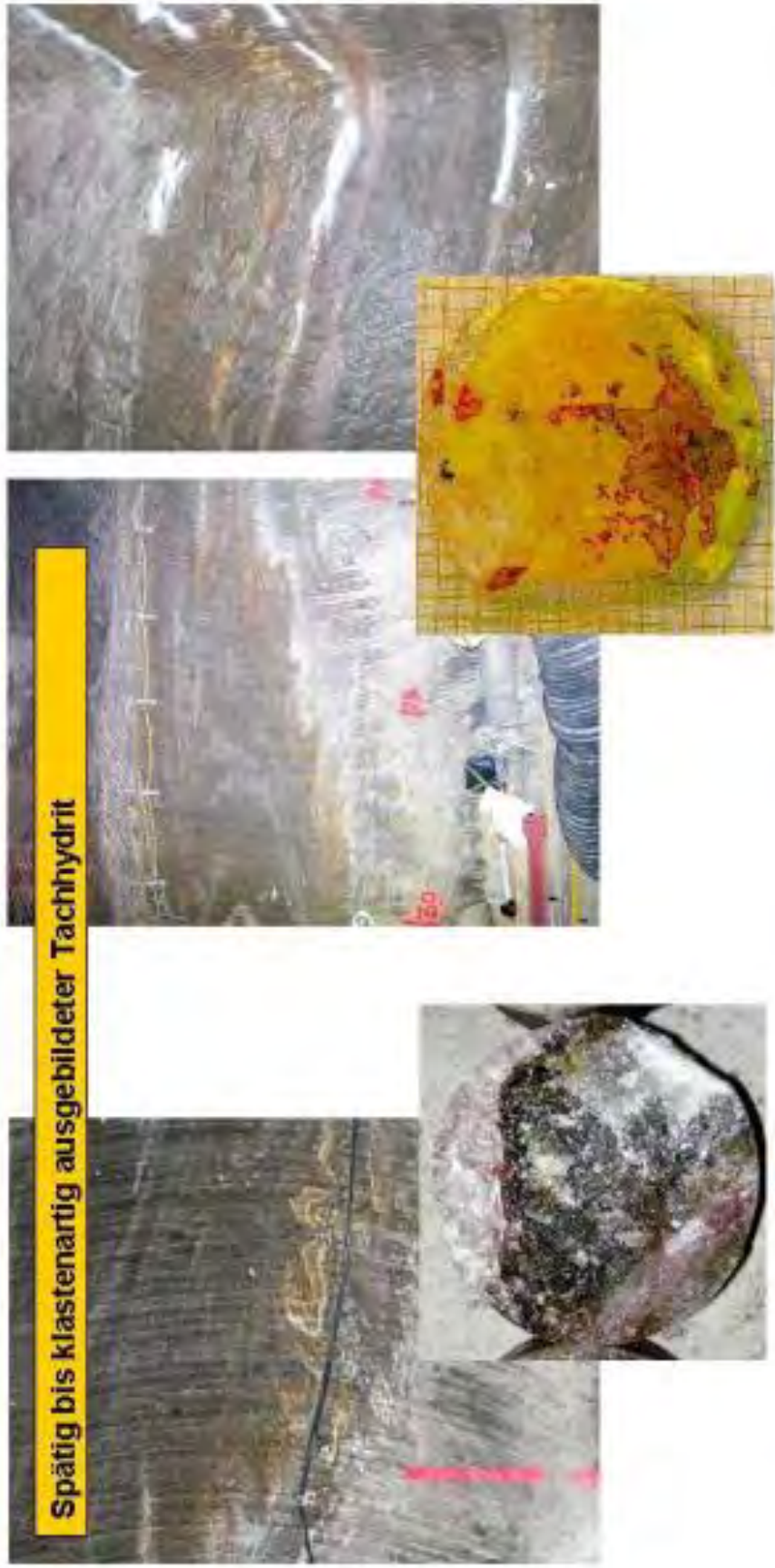
Besondere Schwierigkeit:

Wirtsgestein ist ein tachyhydhaltigem und kieserithaltigem Carnallit (spröde, leicht löslich, Tachyhydrit stark verwitterungsempfindlich)

Ergebnisse im Abschlussbericht (143 Seiten, 2000 Seiten Anlagen auf CD):



Klastenartig ausgebildeter Tachyhydrit und Kieserit



Durchgeführte in situ Untersuchungen im **Teil 1**

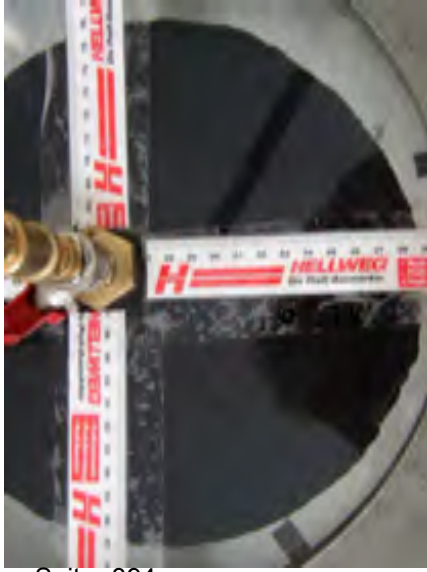
- Beschichtung des Gebirgsstoßes mit Bitumenanstrich
- Injektion von MgO-Bindern
- Injektion von 2K-Bitumen
- Simulation einer Bitumenkammer
- Test von Bentonitdichtelementen
- Test von MgO-Beton-Elementen



Zweikomponenten-Injektionsbitumen zum Verpressen von Rissen und Klüften (Teil 1)

Vorteile:

- Verarbeitbarkeit bei Umgebungstemperatur
- Geringe Anfangsviskosität (1 ... 50 Pas)
- Ausbildung einer Schubfestigkeit
- Vergütung der ALZ bis auf 10^{-16} ... 10^{-18} m²



Labortest mit einer
Injektionsapparatur
Spaltweite 30 µm



Verpressen der Kontaktzone
MgO-Beton - Gebirge



Verpressen der Kontaktzone Mit Injektionsbitumen gefüllter
Riss im Salzgestein

Patentanmeldung im Februar 2005

CARLA Teil 2:

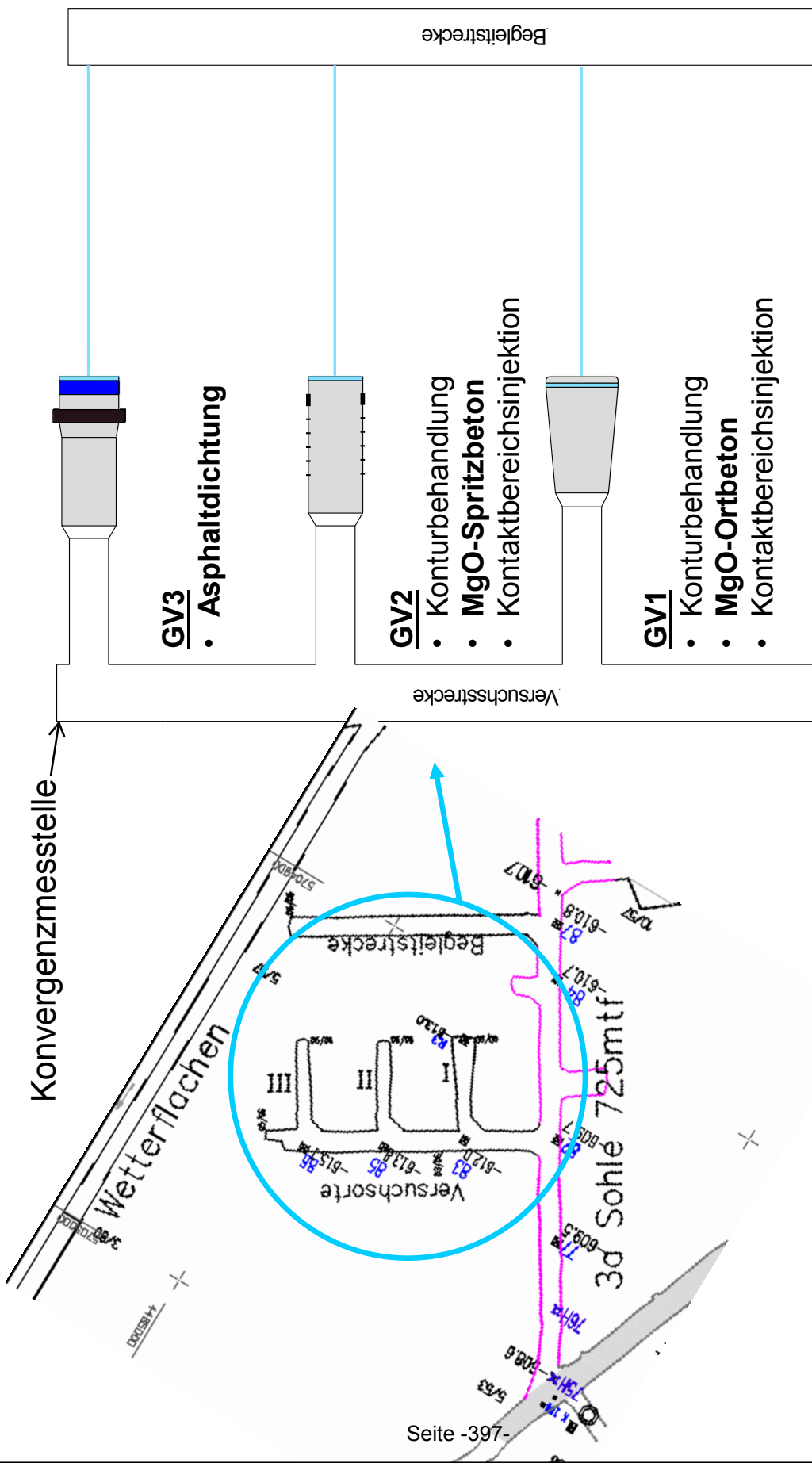
3 Großversuche (GV1, GV2 und GV3)

- **Ziele**
- **Aufbau und Versuchsablauf**
- **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Funktionselemente langzeitstabiler Streckenverschlüsse im Carnallitit

Element	Funktion	Untersuchungsziele
3-Zonen-Vorschüttung	Einstellung der Lösungszusammensetzung (tachyhydritgesättigte CaCl ₂ -MgCl ₂ -Lösung	<ul style="list-style-type: none"> · Zusammensetzung der austretenden Lösung
Schotter-Gel-Vorbau-Element	Depot für tachyhydritgesättigte CaCl ₂ -MgCl ₂ -Lösung	<ul style="list-style-type: none"> · Zusammensetzung der austretenden Lösung
	Stützelement; Widerlager	<ul style="list-style-type: none"> · Lagerungsdichte · Winkel der inneren Reibung · Böschungswinkel
Hauptelement MgO-Beton	Lastabtrag	<ul style="list-style-type: none"> · Festigkeitsparameter · Haftfestigkeit am Gebirge
	Dichtheit (Querschnitt)	<ul style="list-style-type: none"> · Permeabilität (Lösung, Gas) · Fehlen hydraulisch wirksamer Risse
	Kontaktbereichsabdichtung	<ul style="list-style-type: none"> · Kontaktdruck · Permeabilität (Lösung, Gas)
Injektion	Kontaktbereichsabdichtung	<ul style="list-style-type: none"> · Permeabilität (Lösung, Gas)
	Vergütung des konturnahen Gebirges	<ul style="list-style-type: none"> · Permeabilität (Lösung, Gas)
Asphaltelement	Dichtheit (Querschnitt)	<ul style="list-style-type: none"> · Permeabilität (Lösung, Gas)
	Kontaktbereichsabdichtung	<ul style="list-style-type: none"> · Permeabilität (Lösung, Gas) · Kontaktdruck
Widerlagerelemente (ggf. auf Hartgesteinsschotterbasis)	Stützwirkung	<ul style="list-style-type: none"> · Lagerungsdichte · Winkel der inneren Reibung · Böschungswinkel

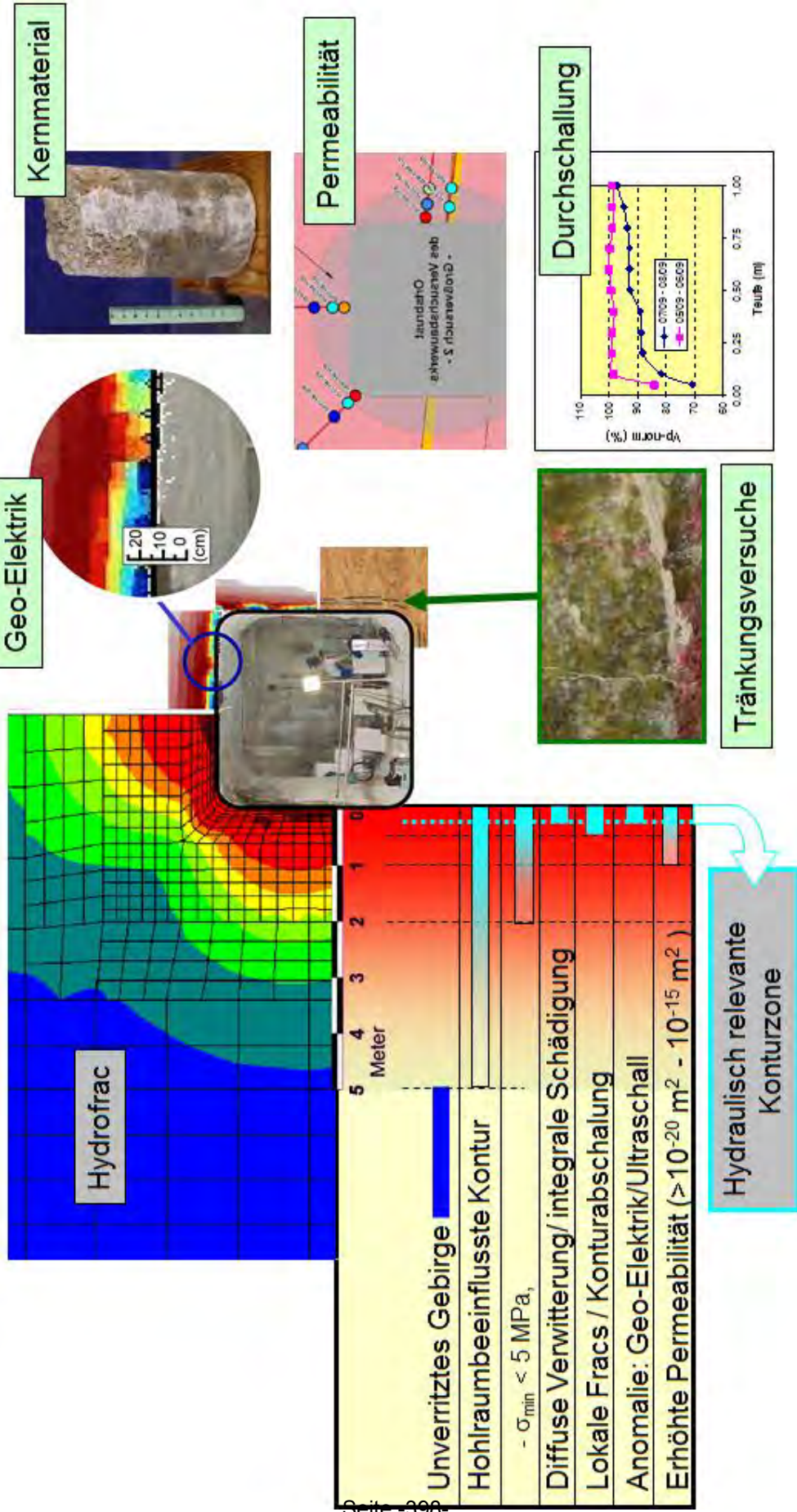
Erforderliche Nachweise – in situ Großversuche



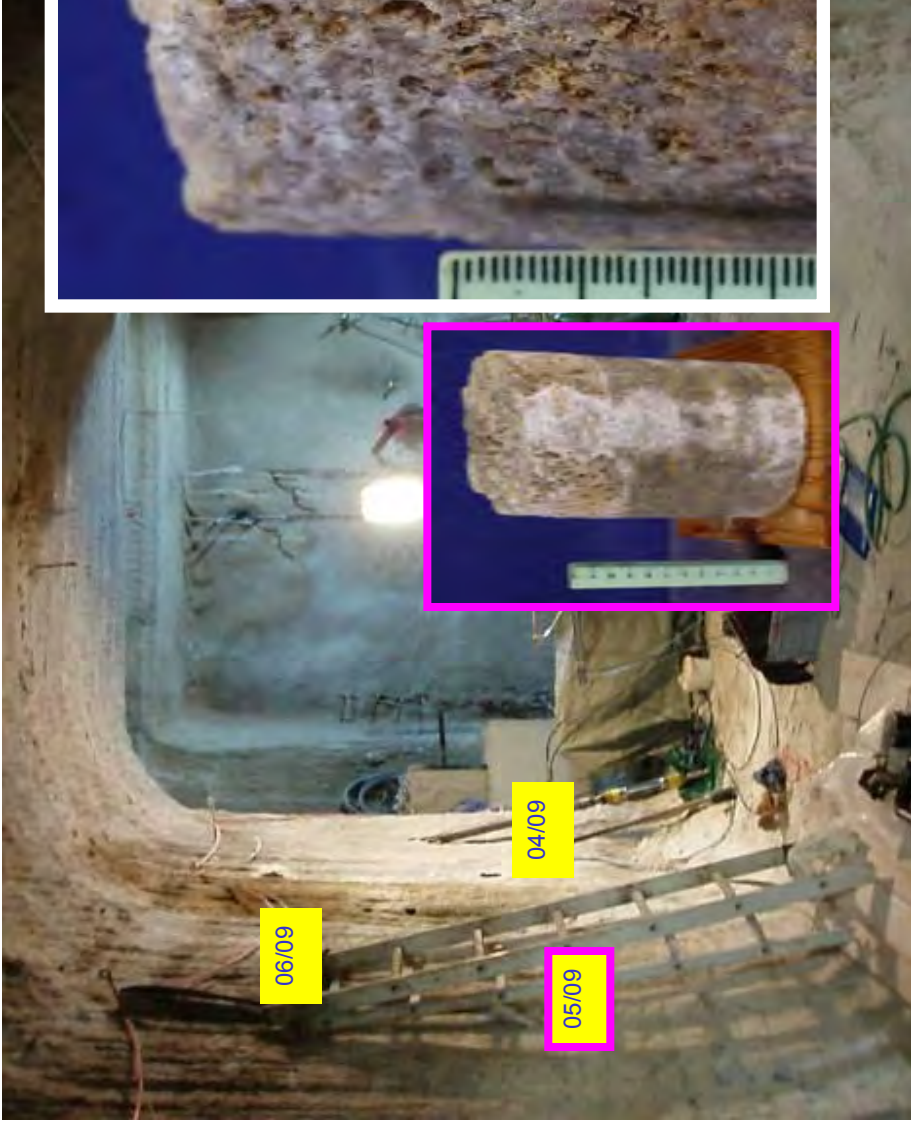
Grube Teutschenthal auf der 3a-Sohle (725 m)

Geotechnische Synthese – Ausdehnung ALZ / VWZ

„Hydraulic fracturing“



Verwitterte Kontur – Beprobung Bohrung 05/09

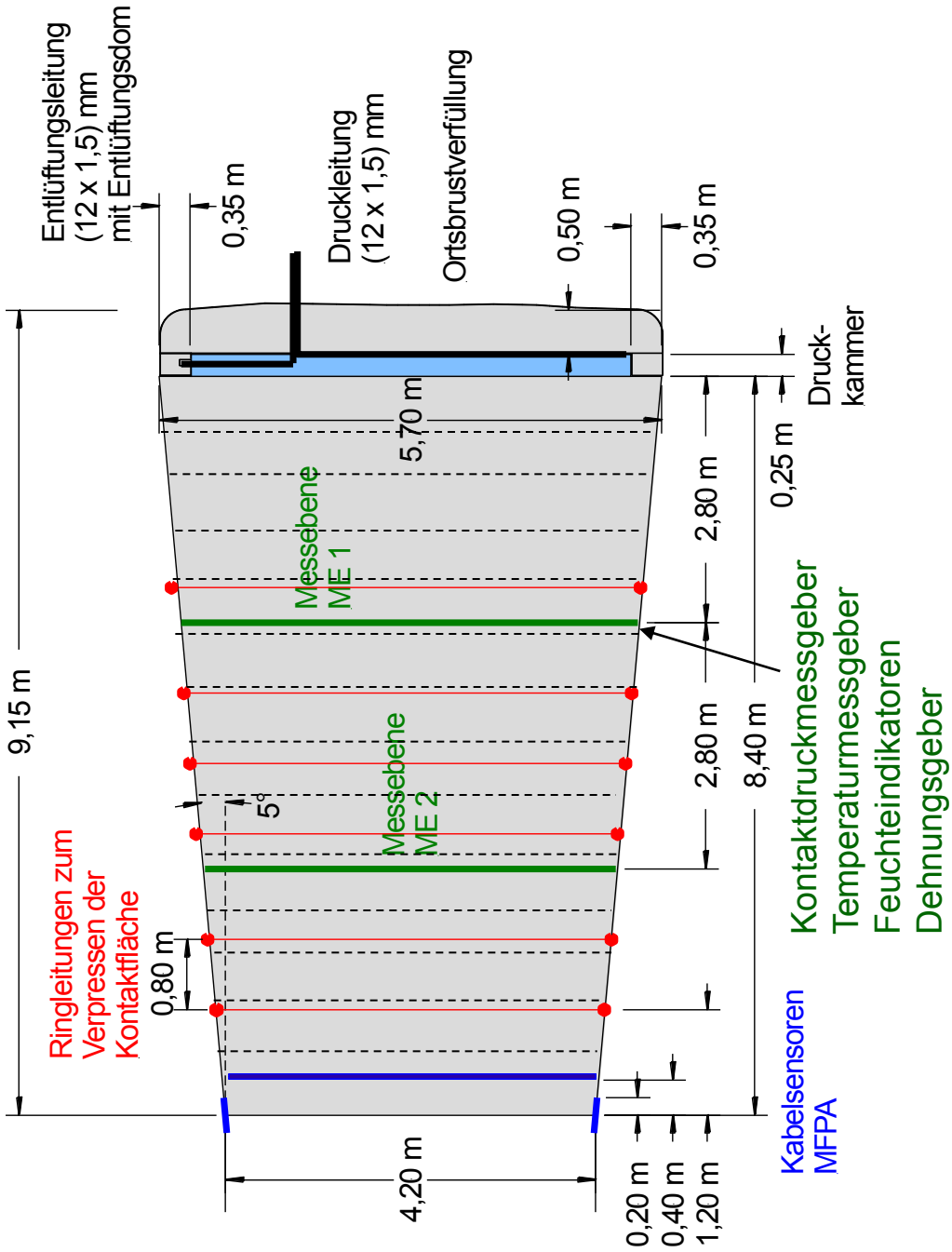


Großversuch 1

Ziel: Test eines Ortbetonelementes



Aufbau GV1 (MgO-Ortbeton)



Volumen: 163 m³
365 t MgO-Beton
Herstellung in 13
vertikalen Scheiben

GV1: 5-1-8 MgO-Beton für Ortbetontechnologie (GV1) - Basisrezeptur MB10 -



MgO	18,3 % (16,7 – 19,5 %)
R-Lösung	18,3 % (16,7 – 19,5 %)
Gesteinskörnung (0-8 mm)	63,4 % (66,6 – 61,0 %)

MgO-Sorte: G75 der Fa. STYROMAG mit ca. 75 % MgO
bei 2 Scheiben MgO der Fa. Mannekus

Reinigung der Konturoberfläche durch Trockenstrahlen

Problem: Verwitterungsprodukte
und Staub auf der
Gebirgskontur

Ziel: Reinigung der
Konturoberfläche
innerhalb kurzer
Zeitabschnitte

Lösung: Trockenstrahlen kurz vor
Einbau des MgO-Betons

synthetisches
Strahlmittel
(Aluminiumsilikat)
0,25 – 1,4 mm



Kontur im Ausgangszustand,
vor wenigen Tagen frisch geschnitten,
noch nicht mit Strahlmittel behandelt



Reinigung der Konturoberfläche durch Trockenstrahlen

Übergang gestrahltes (oben) und ungestrahltes (unten) Gebirge bei einer ca. 50 Jahre alten Strecke



ca. 25 kg Strahlgut
je m²

ca. 5-10 Minuten
Strahldauer je m²

**Die „Reinigung“ der Konturoberfläche ist
von essentieller Bedeutung!**



Konsistenz des MgO-Betons

5. Betonierabschnitt
(4 kg Zuschlag / kg MgO)



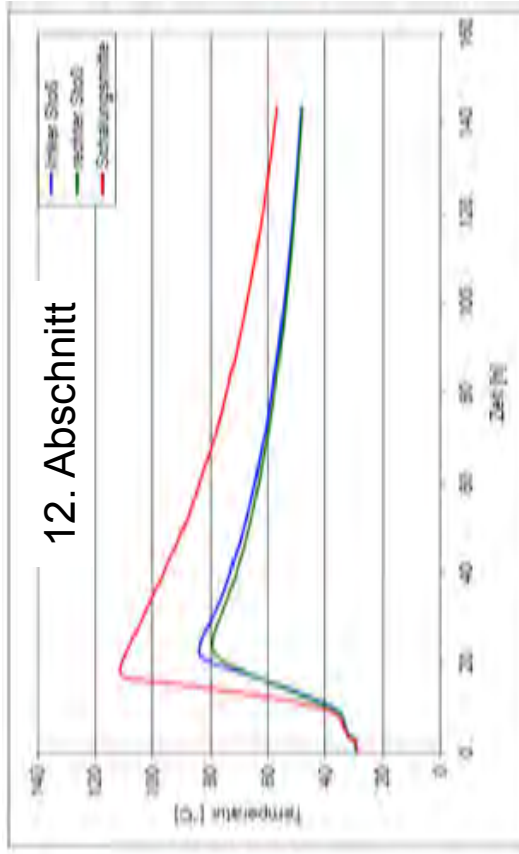
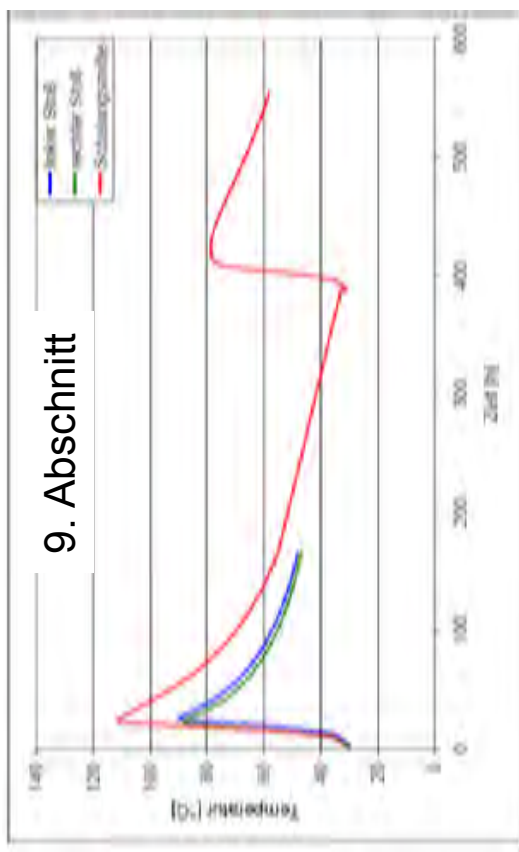
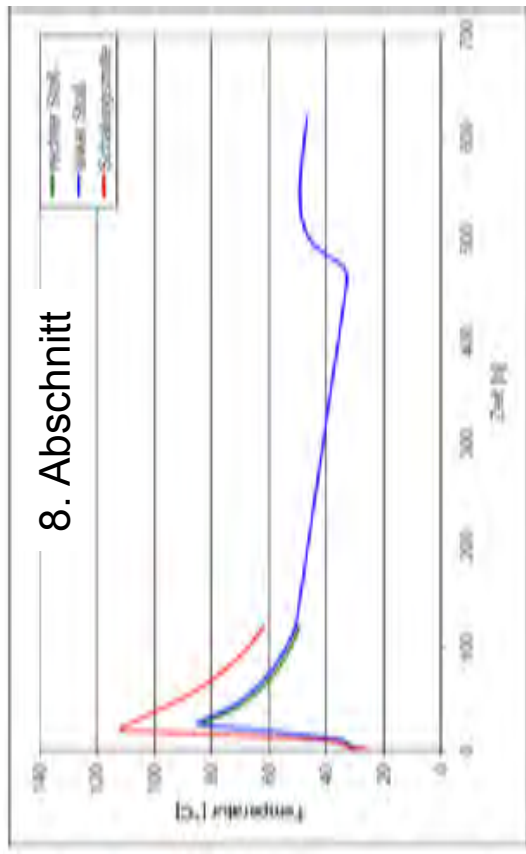
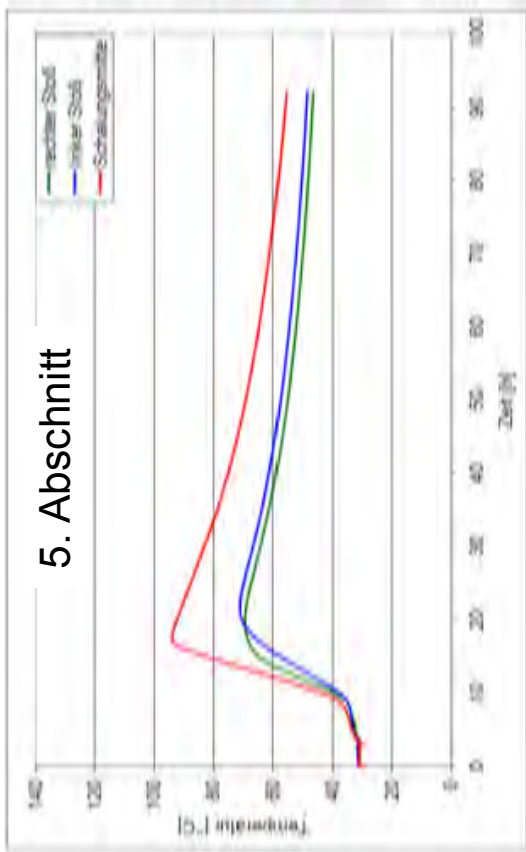
8. Betonierabschnitt
(3,5 kg Zuschlag / kg MgO)



GV 1



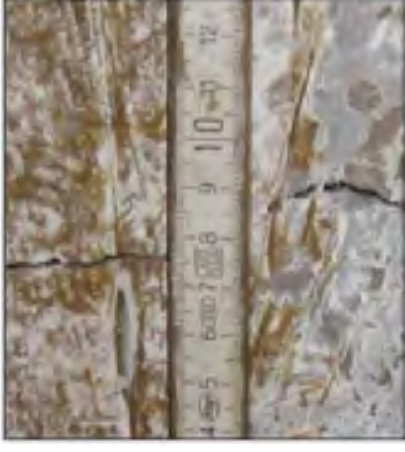
Temperaturentwicklung bei der Betonage (MgO-Ortbeton)



Geringfügige Rissbildung im MgO-Beton (9 von 13 Betonierabschnitten rissfrei)

Ursachen:

- Zu geringer Bindemittelgehalt (= geringere Frühfestigkeit, Zugfestigkeit)
- Betonageunterbrechung ("Neu auf Alt", technische Ursachen)
- Zu schnelles Ausschalen



Sichtbare Risstiefe < 5 cm

Ergebnisse der Injektion von 2K-Bitumen in der Kontaktzone



Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus GV1-Versuch zum MgO-Ortbeton (1)

1. Strenge Einhaltung der Bindemittelrezeptur, da bereits geringe Abweichungen zu anderer Phasenbildung führen können (stark sensitiver Baustoff!).
2. Eine Temperaturüberwachung ist in allen Phasen notwendig.
3. Bei Ortbetonbauweise und der vorhandenen Geometrie der Betonierscheiben war eine Ausschalzeit von ca. 3 Wochen notwendig.
4. 5-1-8-MgO-Beton (MB10) großtechnisch prinzipiell gut verarbeitbar nach Lernphase.
5. 5-1-8-MgO-Beton (MB10) ist nur unter Einspannung langzeitstabil (hat sich erst während des Forschungsarbeiten herausgestellt).

Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus GV1-Versuch zu den Kontaktpalteinjektionen (2)

1. Kontaktbereich muss zwingend durch Sandstrahlen vorbehandelt werden.
2. 2K-Bitumen (und Epoxidharz Denepox 40 eingesetzt beim GV2) grundsätzlich für Kontaktpalteinjektionen geeignet (140 kg injiziert).
3. Die Injektionstechnik muss im Salz zwingend weiterentwickelt werden, da mit den verwendeten Ringleitungen (oder Teilringleitungen) nicht jeder Umfangsmeter gezielt angefahren werden kann, sondern das Injektionsmittel aus dem Injektionsschlauch nur an der schwächsten Stelle austritt!
4. GV1 wegen hoher Gasdurchlässigkeit und geringem Kontaktdruck nicht druckbeaufschlagt.
5. Auf Grund der hohen Temperaturen des MgO-Ortbeton wurde ein MgO-Spritzbeton entwickelt (GV2).

Großversuch 2

Ziel: Test eines Spritzbetonelementes

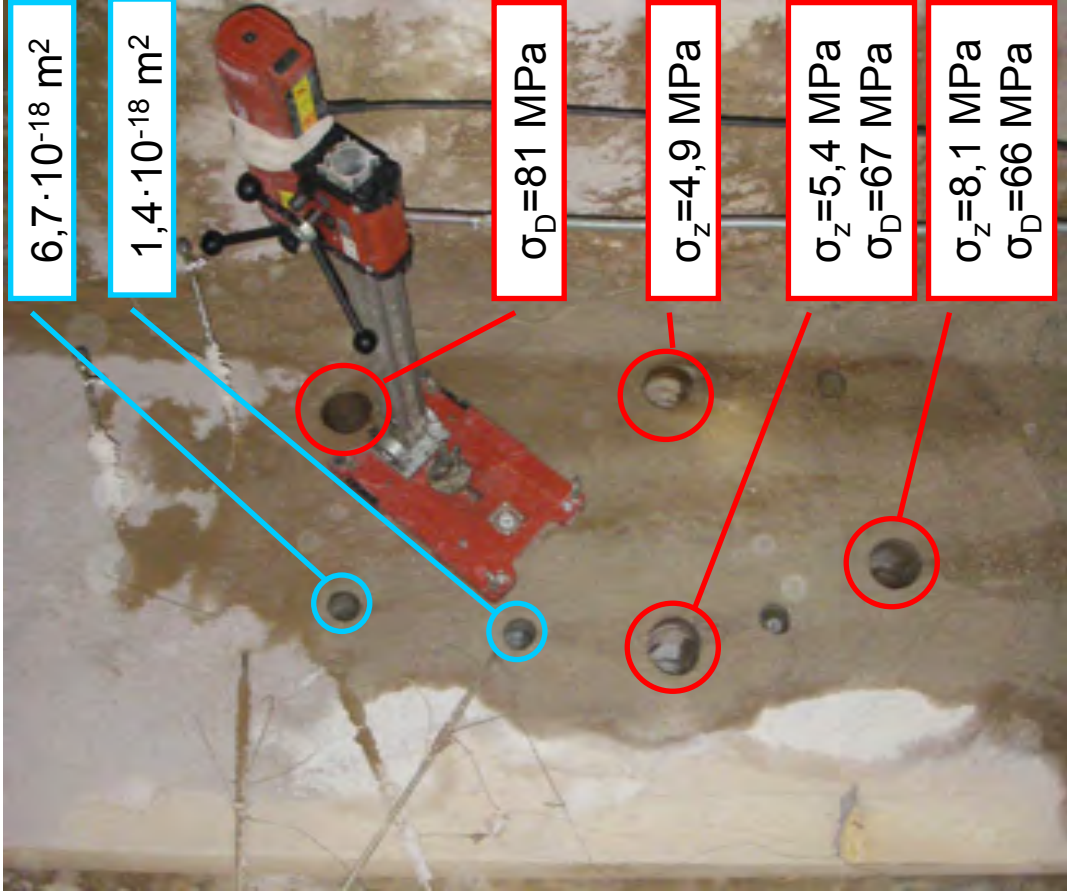


Entwicklung MgO-Spritzbeton - In situ Vortests



- Rezepturenentwicklung (auf Basis des Ortbetons GV1)
- Trockenspritzverfahren (Nassspritzverfahren nicht anwendbar)
- Über eine Höhe von 3,5 m ist eine Schichtstärke von 15 cm realisierbar
- 3 Schichten aufgespritzt

MgO-Spritzbeton – Untersuchung von Bohrkernen

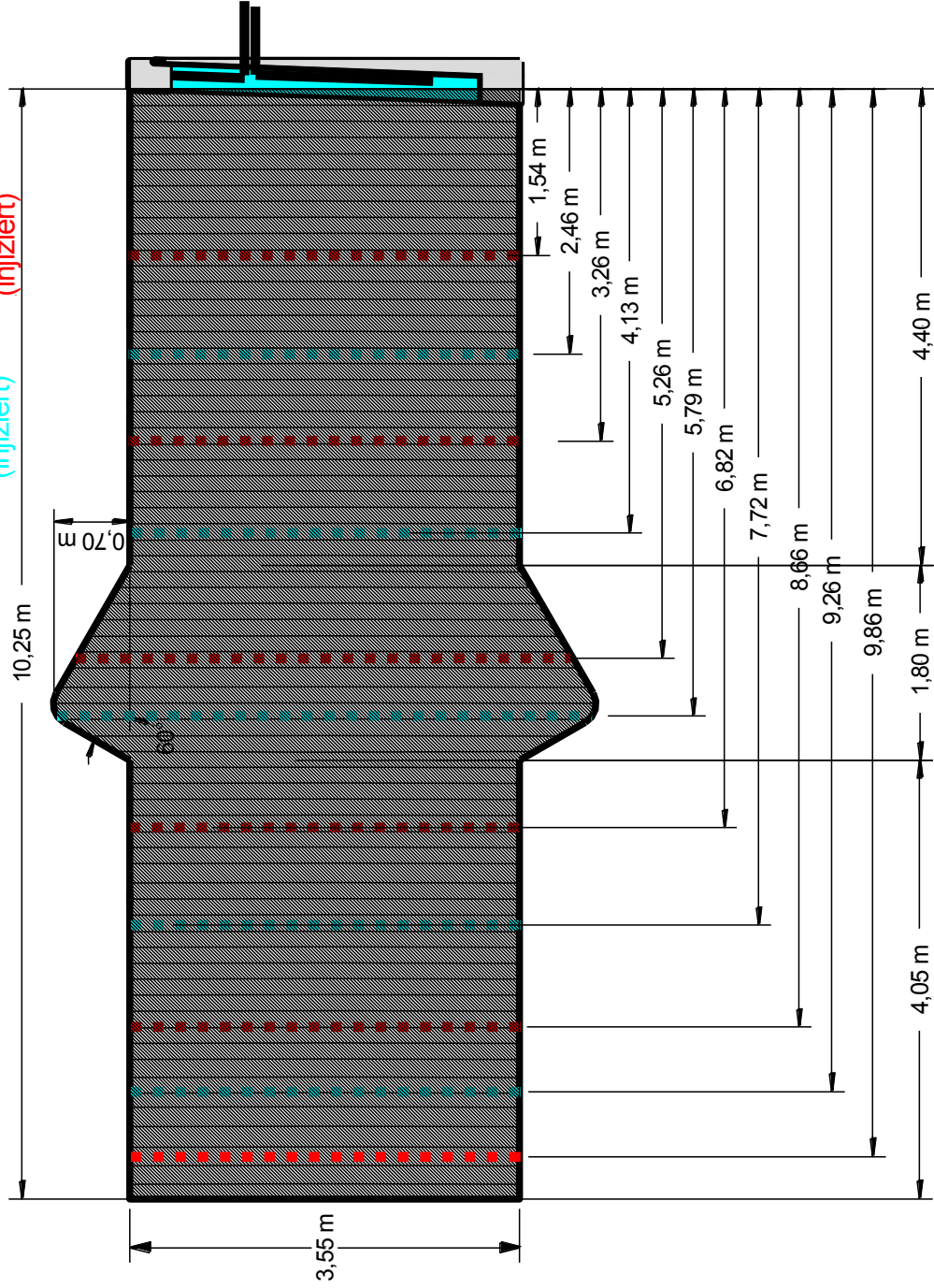


Gaspermeabilität

Druckfestigkeit
Zugfestigkeit

GV2- MgO-Spritzbeton

Denebox 40 (injiziert)
2K-Bitumen (injiziert)



Bauwerk
mit
Gebirge
verzahnt.

11 Verpressebenen (6 x 2K-Bitumen und 5 x Denebox)

Messebenen nicht dargestellt

Rezeptur für 5-1-8-MgO-Spritzbeton GV2

MgO	R-Lösung	Zuschlag
[M-%]	[M-%]	[M-%]
15,6	11,5	72,9

Trockenspritzverfahren

MgO-Spritzbeton – Qualitätssicherung GV 2

Erfassung von:

- Zuschlagverbrauch,
- MgO Verbrauch,
- R-Lösungsverbrauch,
- mittlere Schichtdicke (Lasertfernungsmessung)
- Kerngewinnung aus Spritzkästen

Daraus wird ermittelt:

- Betonrezeptur (Tagesdurchschnitt)
- Materialverbrauch und Baufortschritt
- Rückprallanteil ca. 40 %
- Einaxiale Druckfestigkeit: 71 MPa
- Spaltzugfestigkeit: 6,1 MPa
- Gaspermeabilität: $< 7 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
- Lösungspermeabilität: $< 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ (CaCl₂-MgCl₂-Lsg.)

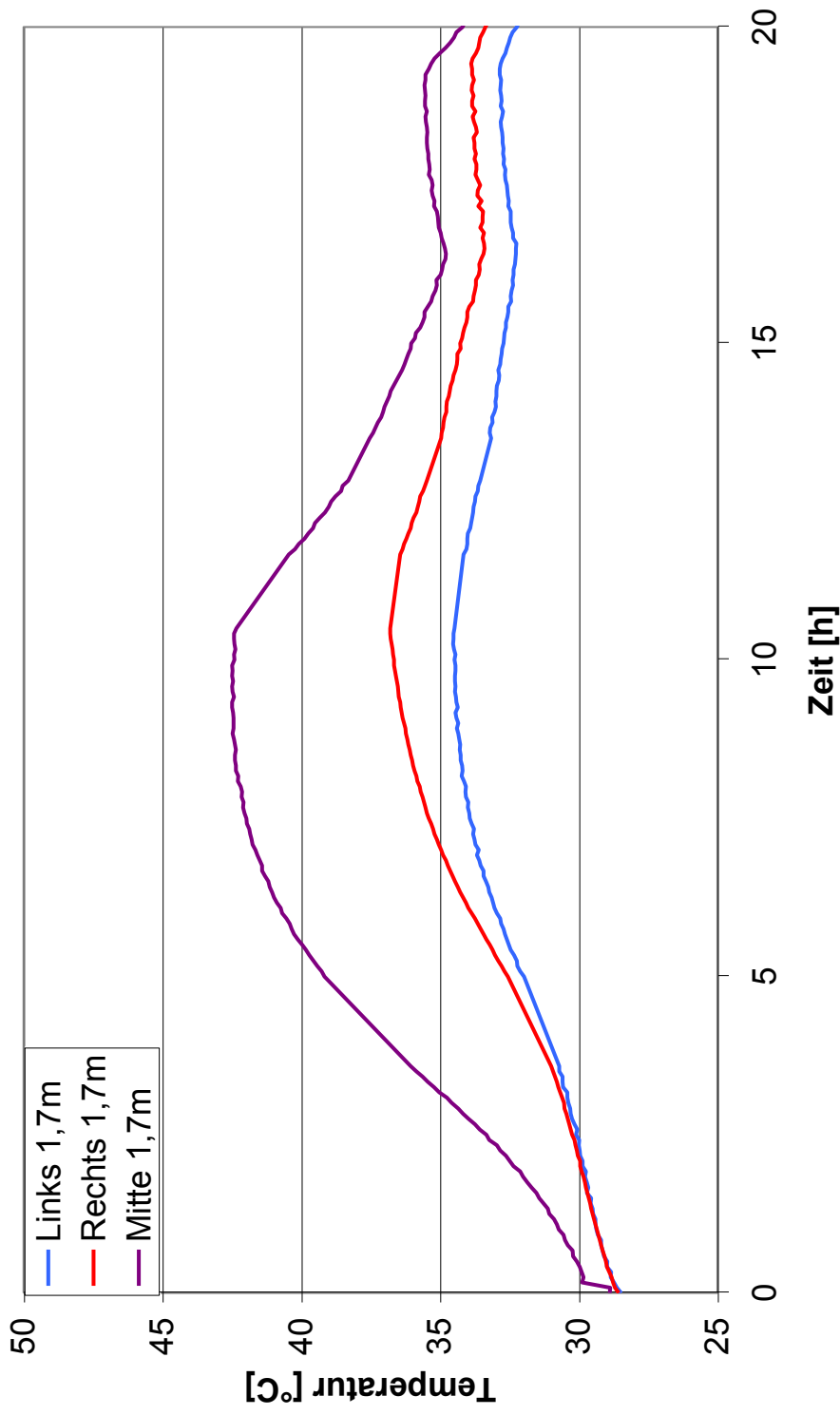


Tatsächlich eingebaute Rezeptur von Sorgfalt und Erfahrung des Spritzdüsenführers abhängig!

MgO-Spritzbeton – Temperaturentwicklung GV 2

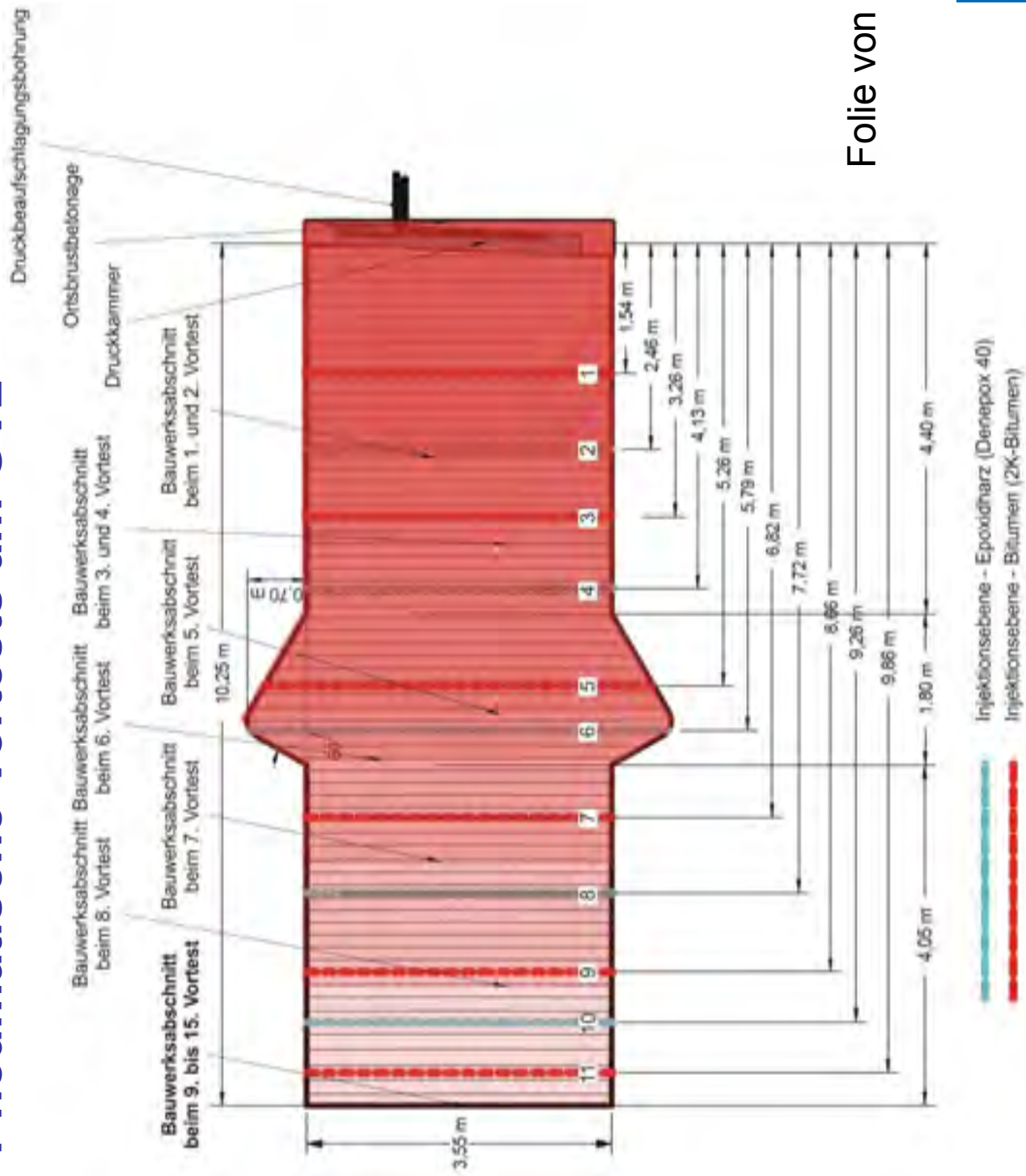
Temperaturdaten (12.KW 08):

$T_{\max} = 42,9^{\circ}\text{C}$



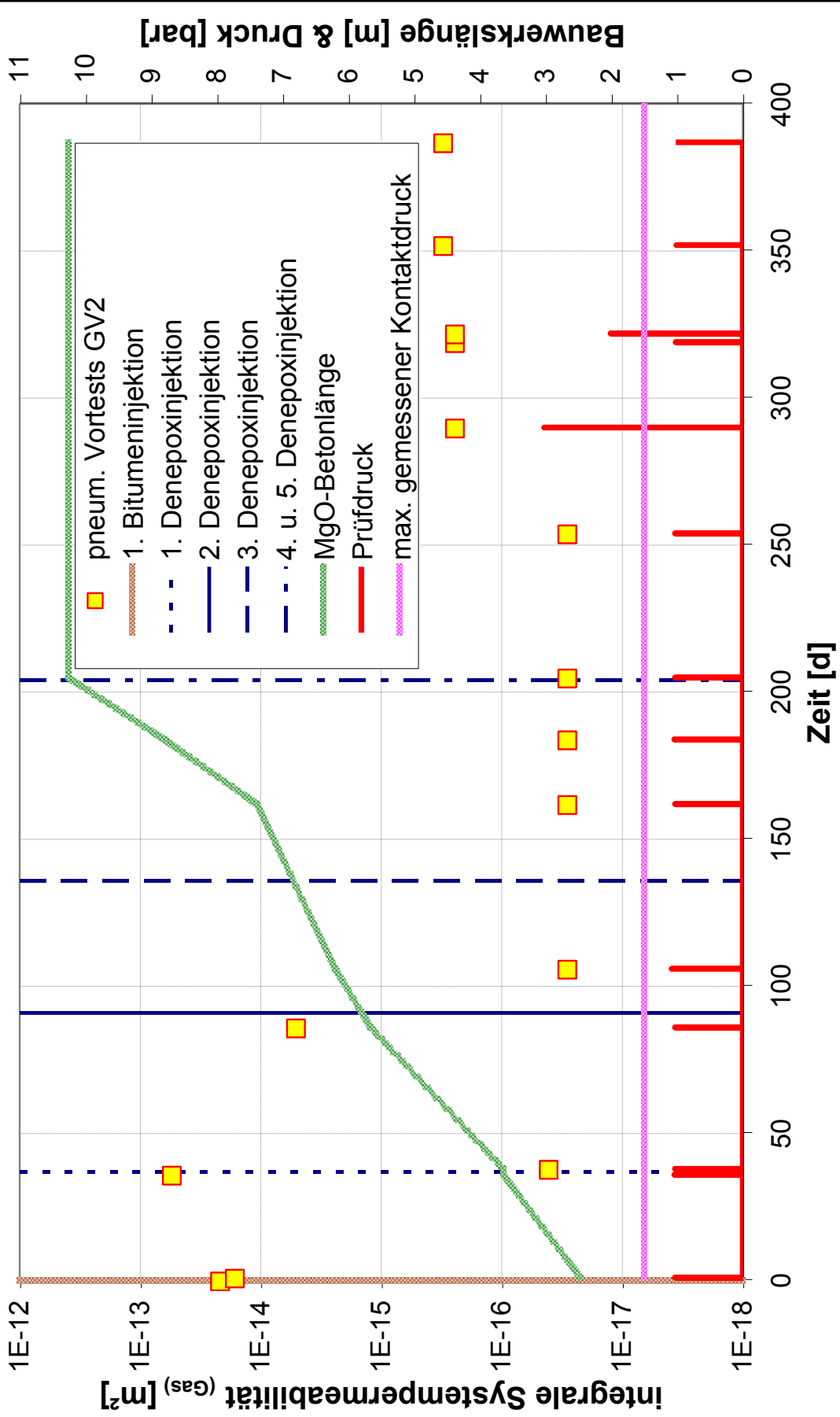
Wesentlich geringerer Temperaturgradient als beim Ortbeton!

Pneumatische Vortests am GV2



Folie von IBEWA

Pneumatische Vortests am GV2



Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus GV2-Versuch (1)

1. Gaspermeabilität Bohrkern: $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bis $2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
2. In-situ Permeabilität Spritzbeton mit Gas: $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bis $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
3. In-situ-Permeabilität Spritzbeton mit Lösung: $2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ nach 480 Tagen (Nachreaktion des MgO-Betons in Kontakt mit Lösung)
4. In situ Permeabilität am Gesamtbauwerk mit Gas: ca. $2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ bzw. $2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
5. Spritzfugen in Permeabilitätstests nicht erkennbar.
6. Umfangreiches Qualitätssicherungsprogramm notwendig.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus GV2-Versuch (2)

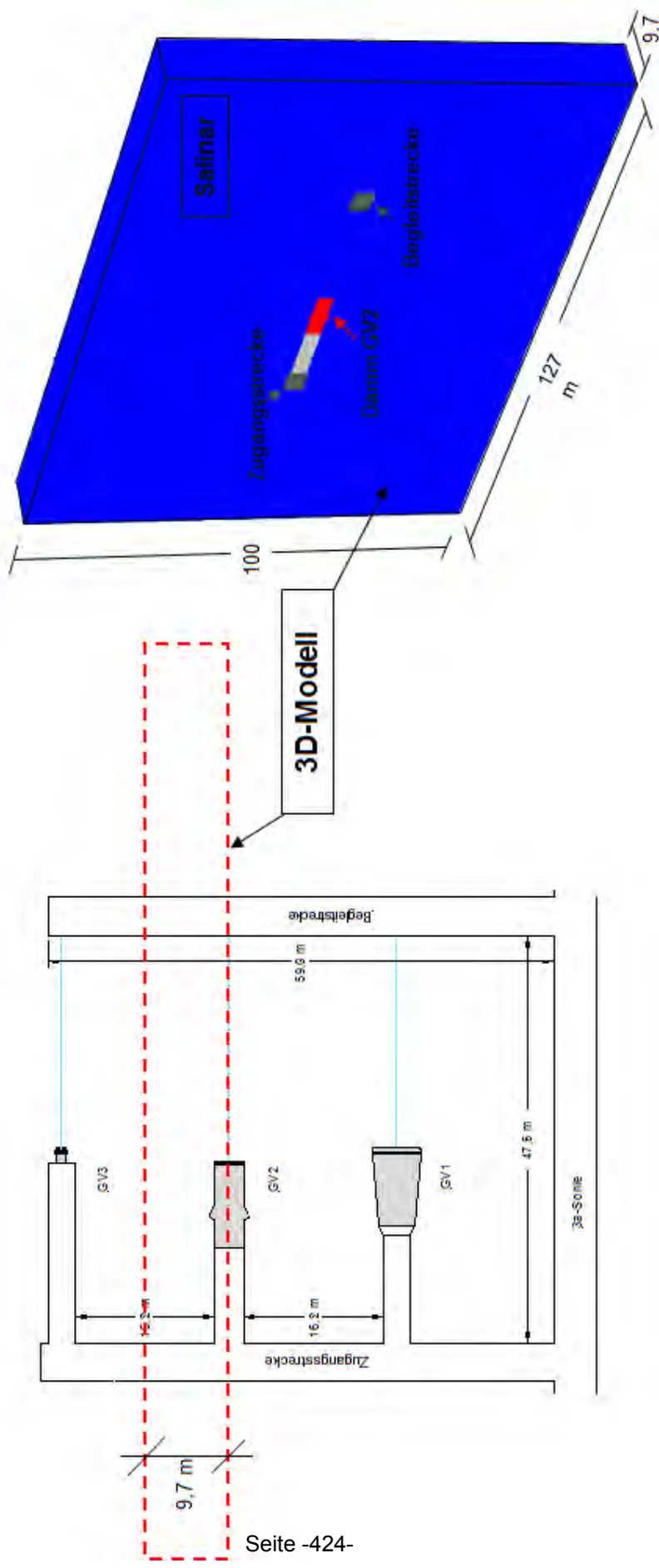
7. Sandstrahlen der Kontur auch bei Spritzbeton notwendig.
8. Maximaltemperatur in Schichtmitte höchstens 15 K höher als die Gebirgstemperatur.
9. Mit der Trockenspritztechnologie für MgO-Beton in Verbindung mit einer Vergütung des konturnahen Kontaktbereiches mit 2K-Bitumen und Epoxidharz konnte ein **technisch weitgehend gasdichter Streckenverschluss** im Carnallit errichtet werden.

Großversuch 3

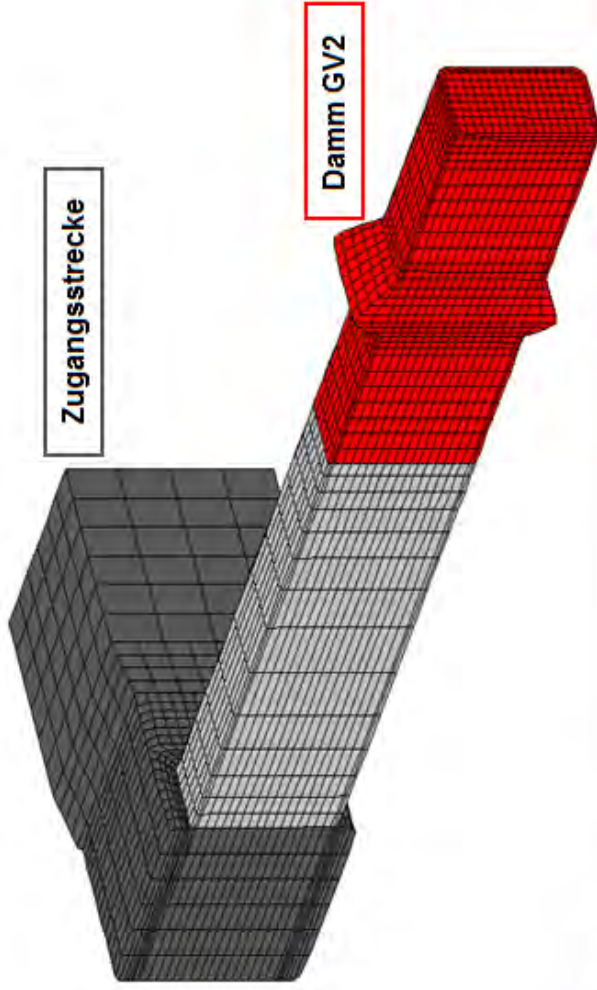
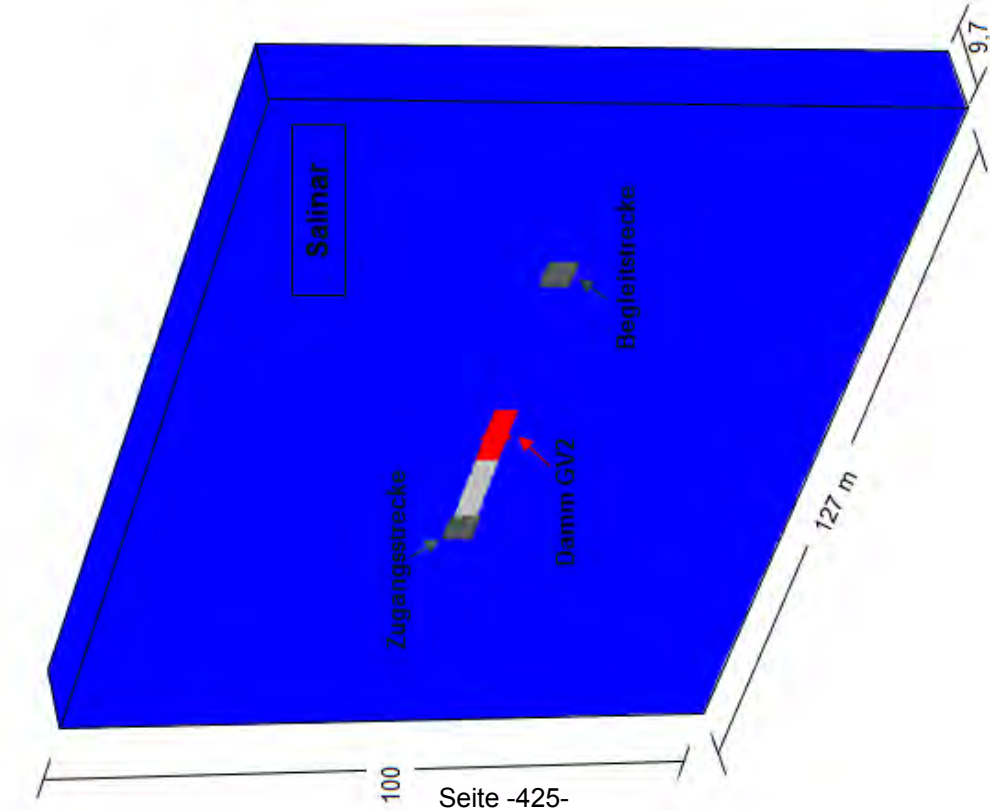
Ziel: Test eines Asphalt dichtelementes

**Verweis auf den Abschlussbericht aus
Zeitgründen**

Numerische Modellierung – beispielhaft am GV2



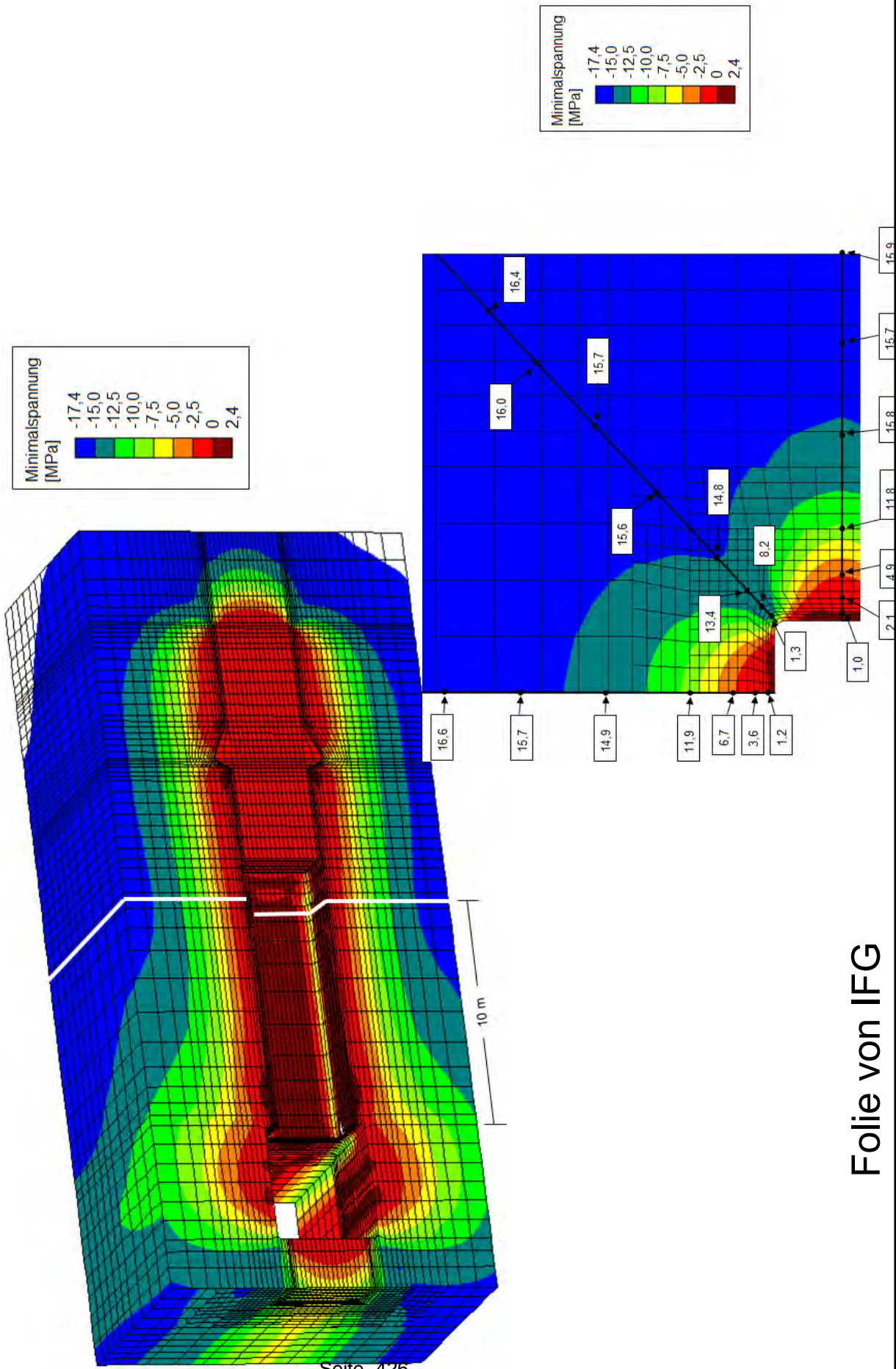
GV2 / 3D-Modell und Bauzustände



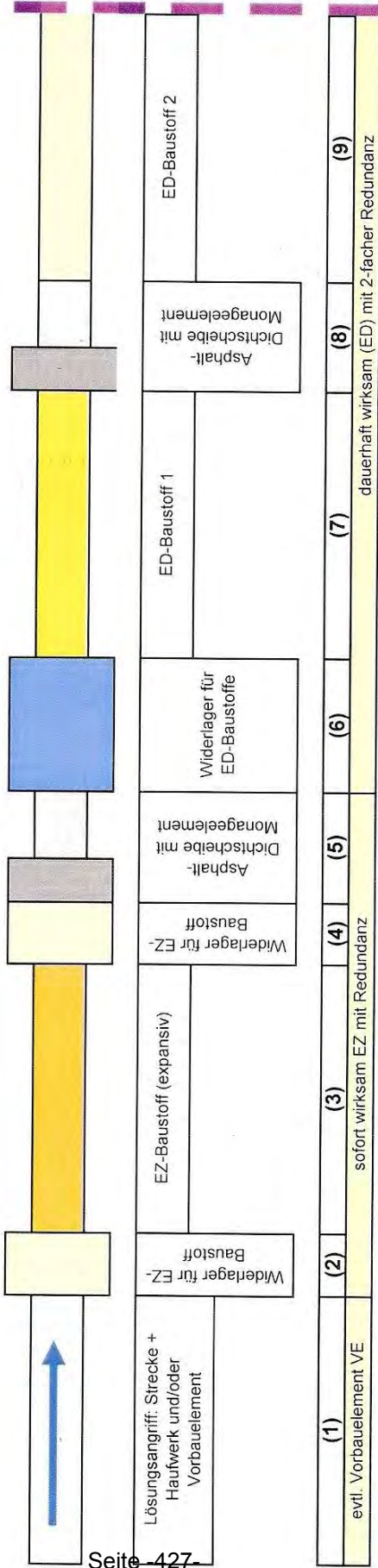
Primärzustand

1. BZ: Ausbruch der Zugangsstrecke, 1,5 Monate Kriechen (bis Mai 2006)
2. BZ: Ausbruch GV2, 1 Monat Kriechen (bis Juni 2006)
3. BZ: Ausbruch Begleitsrecke, 17 Monate Kriechen bis (November 2007)
4. BZ: Nachschnitt Kontur GV2 (ohne Zahn), 1 Monat Kriechen (bis Dezember 2007)
5. BZ: Ausbruch Widerlager (Zahn), 2 Monate Kriechen (bis Februar 2008)
6. BZ: Dammeinbau, Februar 2008 – September 2008, Kriechberechnung bis 30.09.2009

GV2 / Minimale Hauptspannungen Januar 2009



Abgeleitetes Grundkonzept



Gesamtergebnis zu den Großversuchen – Schlussfolgerungen (1)

1. Mit dem Großversuch 2 (Spritzbetonbauweise) konnte ein weitgehend gasdichter und (vermutlich auch flüssigkeitsdichter) Streckenverschluss realisiert werden.
2. Im temperaturempfindlichen Gebirge ist die Spritzbetonbauweise im Trockenspritzverfahren für Verschlusselemente die sinnvollere Bauweise als die Ortbetonbauweise.
3. Die bisherige Spritzbetonrezeptur führt zur 5-1-8-Phase, die nur unter Einspannung langzeitstabil ist. Die technologische Umsetzung einer chemisch langzeitstabilen 3-1-8-Rezeptur für Spritzbeton steht noch aus.

Gesamtergebnis zu den Großversuchen – Schlussfolgerungen (2)

4. Durch Kombination von Injektionsmitteln (2K-Bitumen und Denepox 40) mit unterschiedlicher Viskosität kann im Kontaktbereich zum Carnallit die Dichtheit des Systems wesentlich verbessert werden.
5. Die Injektionstechnologie muss trotzdem weiterentwickelt werden.
6. **Durch das Vorhaben CARLA konnte die Verschlusstechnik im (leicht löslichen) Salzgestein wesentlich weiterentwickelt werden – vor allem auch dank interdisziplinärer Zusammenarbeit.**

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung bzw. dem Projektträger Karlsruhe für die Förderung und der GTS und allen FuE – Partnern:

- TU Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Institut für Anorganische Chemie
- Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig
- K-UTEK AG Salt Technologies, Sondershausen
- Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deonietechnik, Wilsnack & Partner, Freiberg
- Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus – Universität, Weimar



Schachtverschlusssysteme – am Beispiel Salzdettfurth

Rumphorst, K.

Inaktive Werke K+S AG

Schachtverschlusssysteme am Beispiel Salzdetfurth Langzeitsichere Verwahrung von Schächten im Kalibergbau

Die Inaktiven Werke (IW) gehören als Geschäftseinheit zur K+S Aktiengesellschaft. Ihre Aufgabe ist es, die in Stilllegung befindlichen Bergwerke der K+S AG und ihrer Vorgängergesellschaften mit ihren Schächten sowie Althalden mit dem Ziel der Beendigung der Bergaufsicht zu verwahren.

Die Verwahrung der Grubenbetriebe in Niedersachsen erfolgt entsprechend den Vorgaben der Allgemeinen Bergverordnung im Allgemeinen durch planmäßiges Fluten der Grubenbetriebe und Verfüllen der Schächte mit Hartgesteinsmaterial.

Das Bergwerk Salzdetfurth muss dagegen aufgrund der vorhandenen Salzstruktur trocken verwahrt werden. Dies wurde mit einer Ausnahmegewilligung zur Flutungsvorschrift in § 7 Abs. 3 der ABVO unter der Maßgabe bewilligt, dass durch spezielle Dichtsysteme die Verbindung zwischen den wasserführenden Horizonten des Deckgebirges und dem Grubengebäude langzeitsicher ausgeschlossen werden müssen.

Der Nachweis hierzu wurde im Forschungsprojekt „Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht SA II“, Aktenzeichen 02C 0516, erbracht.

Für die trockene Verwahrung der Schächte des Bergwerkes Salzdetfurth wurde als Grundkonzept ein Dichtungssystem aus Salinardichtung - Auslegung entsprechend dem durchgeführten Forschungsprojekt - und Deckgebirgsdichtung erarbeitet, dies aufbauend auf einer setzungsstabilen Verfüllsäule einschließlich auslaufsicherer Verfüllung der Füllörter.

Um ein direktes Anliegen der Salinardichtung am Steinsalznebengebirge zu erreichen, wurde mit der durch die IW konzipierten und gebauten Schachtfräse sowohl das Mauerwerk als auch klüftiges Steinsalz weggeschnitten. Anschließend wurde der Schacht vom letzten Füllort aufwärts mit Schotter bis zum Salinardichtelement verfüllt. Hierbei muss der Schotter bis in den letzten Winkel des Füllortes eingebracht werden, um eine setzungsarme Füllsäule zu erhalten.

Bei der Salinardichtung wird ein binäres Gemisch aus auf dem Werk Hugo der K+S KALI GmbH gefertigten Bentonit-Pellets und –Granulat eingebaut. Hierbei sind sowohl an die Herstellung wie auch an den Einbau des binären Gemisches höchste Anforderungen zu stellen.

Anschließend wird auf die Salinardichtung eine Füllsäule aus salzwasserresistenten Kies eingebracht und der Schacht abschließend mit der Deckgebirgsdichtung aus Ton bis zur Ackersohle verfüllt.

Nach Abriss des Fördergerüsts wird als Abschluss der Schachtdeckel betonierte.

Schachtverschlussysteme – am Beispiel Salzdettfurth

Langzeitsichere Verwahrung von Schächten im Kalibergbau

Dipl. Ing. Klaus Rumphorst



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke

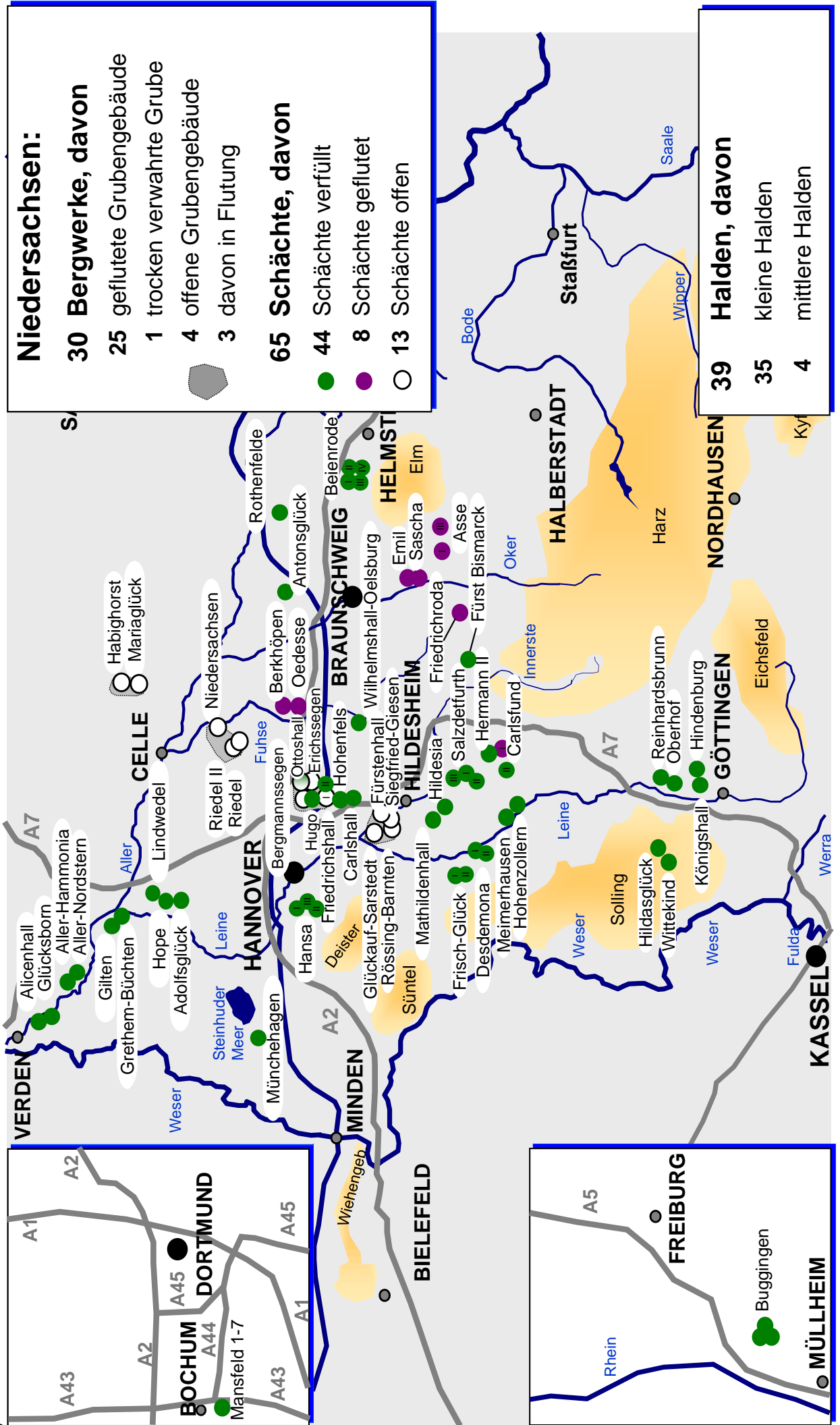
Unternehmensstruktur



 K+S Gruppe *		
Kerngeschäftsfeld Düngemittel		Kali- und Magnesiumprodukte
		Stickstoffdüngemittel
Kerngeschäftsfeld Salz	  	Salz
	   	Entsorgung und Recycling Logistik (KTG) Tierhygieneprodukte Handelsgeschäfte

* **Inaktive Werke**

K+S Gruppe /



Wesentliche Aufgaben in § 7 "Sichern der Tagesoberfläche"

- (1)
- (2) Tagesschächte, die nicht in betriebssicherem und befahrbarem Zustande unterhalten werden, sind zu verfüllen, soweit nicht das Oberbergamt andere Sicherungsmaßnahmen zulässt.
- (3) Im Salzbergbau sind bei der endgültigen Einstellung des Betriebes die übrigen Grubenbaue **planmäßig** zu fluten.

Beendigung der Bergaufsicht

- **planmäßiges Fluten der Grubengebäude**
- **Verfüllen der Schächte**
- **Abriss der Tagesanlagen**



	Gesamt	verfüllt	offen geflutet	luftef. luftef.
Stilllegung vor 1945	37	14	22	1
Stilllegung von 1945 - 1985	11	6	1	4
Stilllegung ab 1986	16	0	0	16
Gesamt	64	20	23	21



	Gesamt	verfüllt	offen geflutet	luftef. luftef.
Stilllegung vor 1945	38	29	9	0
Stilllegung von 1945 - 1985	14	12	0	2
Stilllegung ab 1986	16	5	0	11
Gesamt	68	46	9	13

K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke **Autoschachtwinde - neu**



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke
Autoschachtwinde - neu

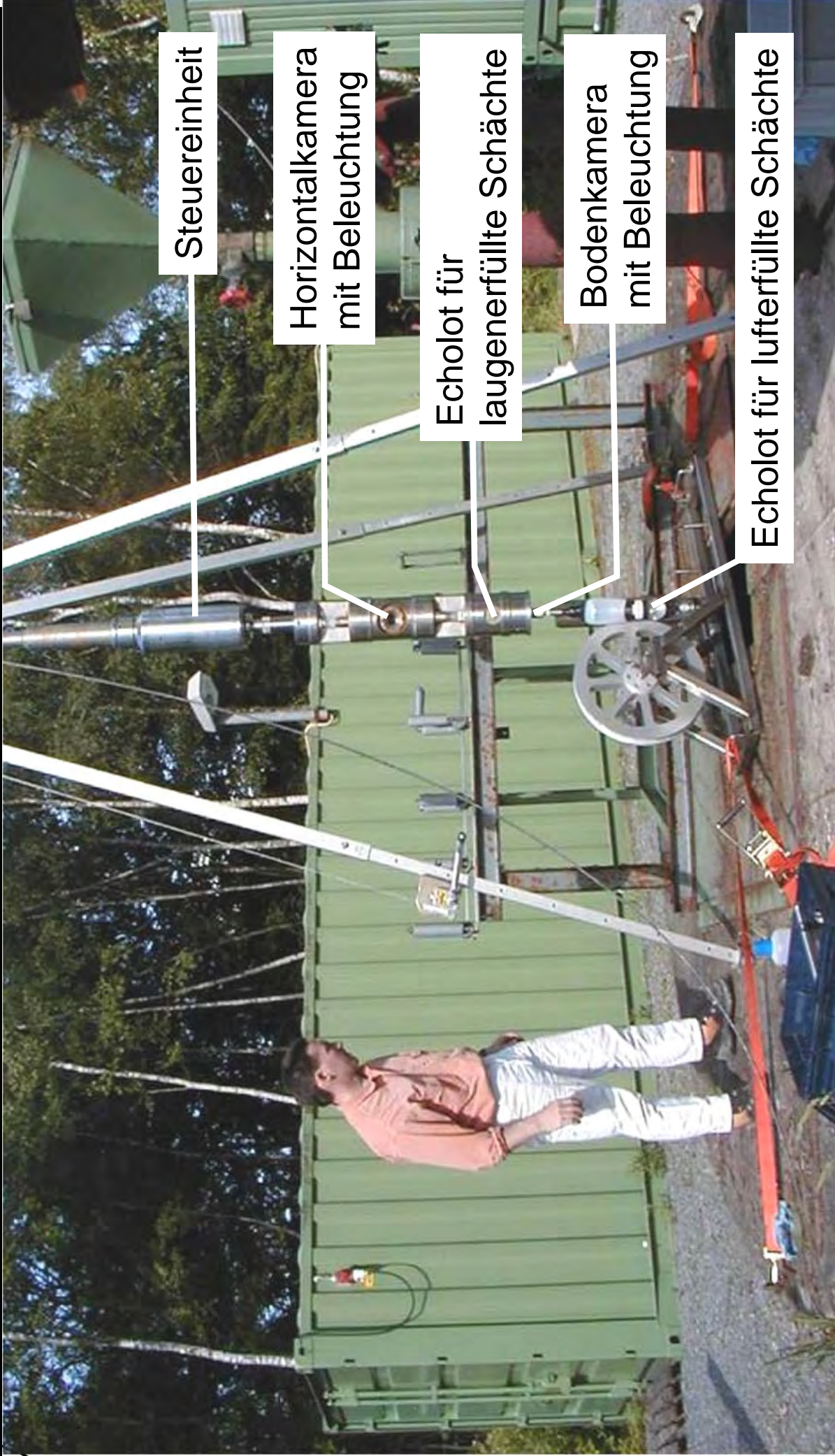


K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Autoschachtwinde - neu





Videoschachtwinde - Videokamerasonde



Steuereinheit

Horizontalkamera
mit Beleuchtung

Echolot für
laugenerfüllte Schächte

Bodenkamera
mit Beleuchtung

Echolot für luftgefüllte Schächte

K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke

Videoschachtwinde - Videokamerasonde



Schacht Rössing-Barnten Füllort - Lufterfüllt



Bergwerk Siegfried/Giesen
Schacht Roessing - Barnten
Datum 25. April 2000
Schachtbefahrung 0 bis ... in Teufe

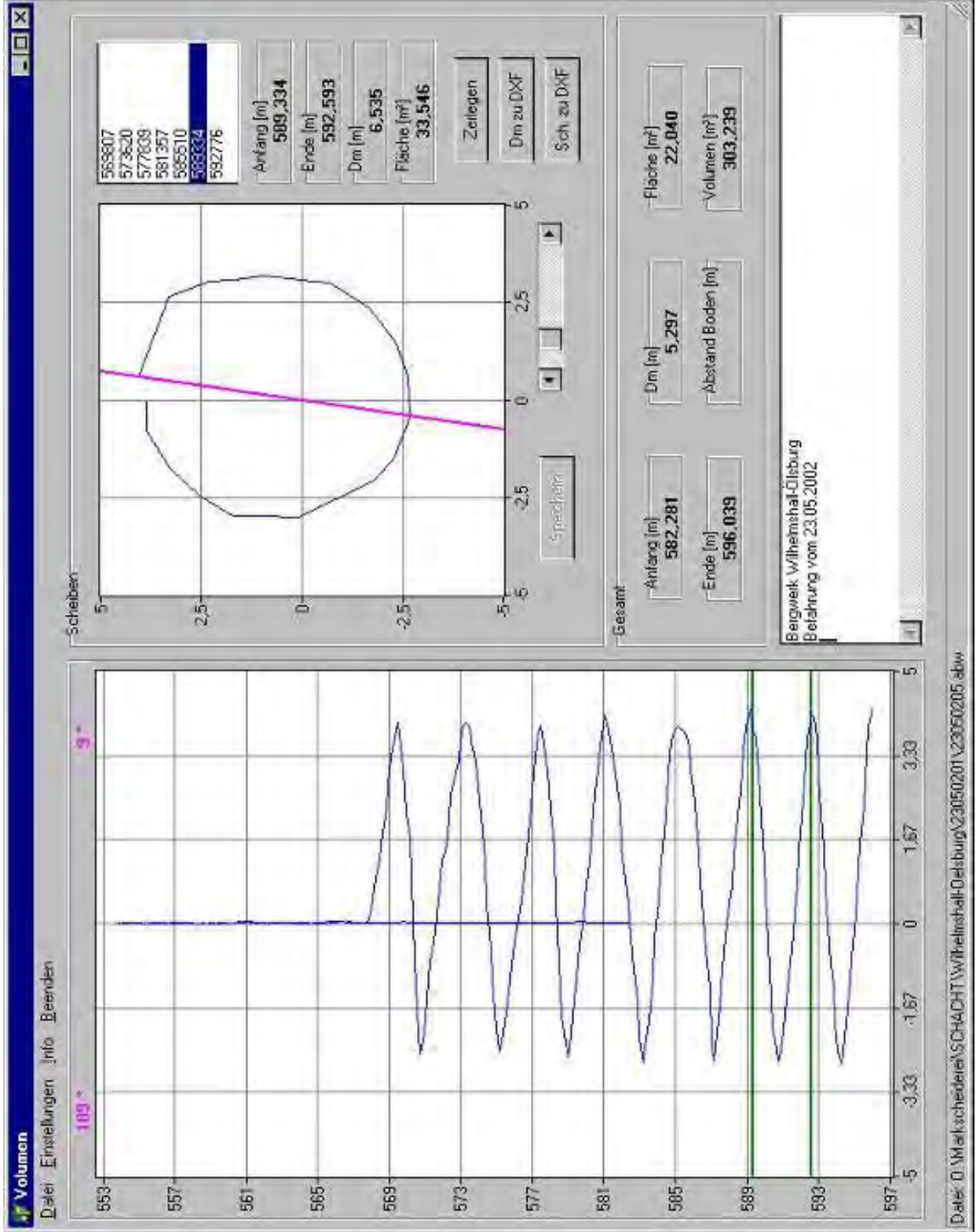
Schacht Wilhelmshall-Oelsburg



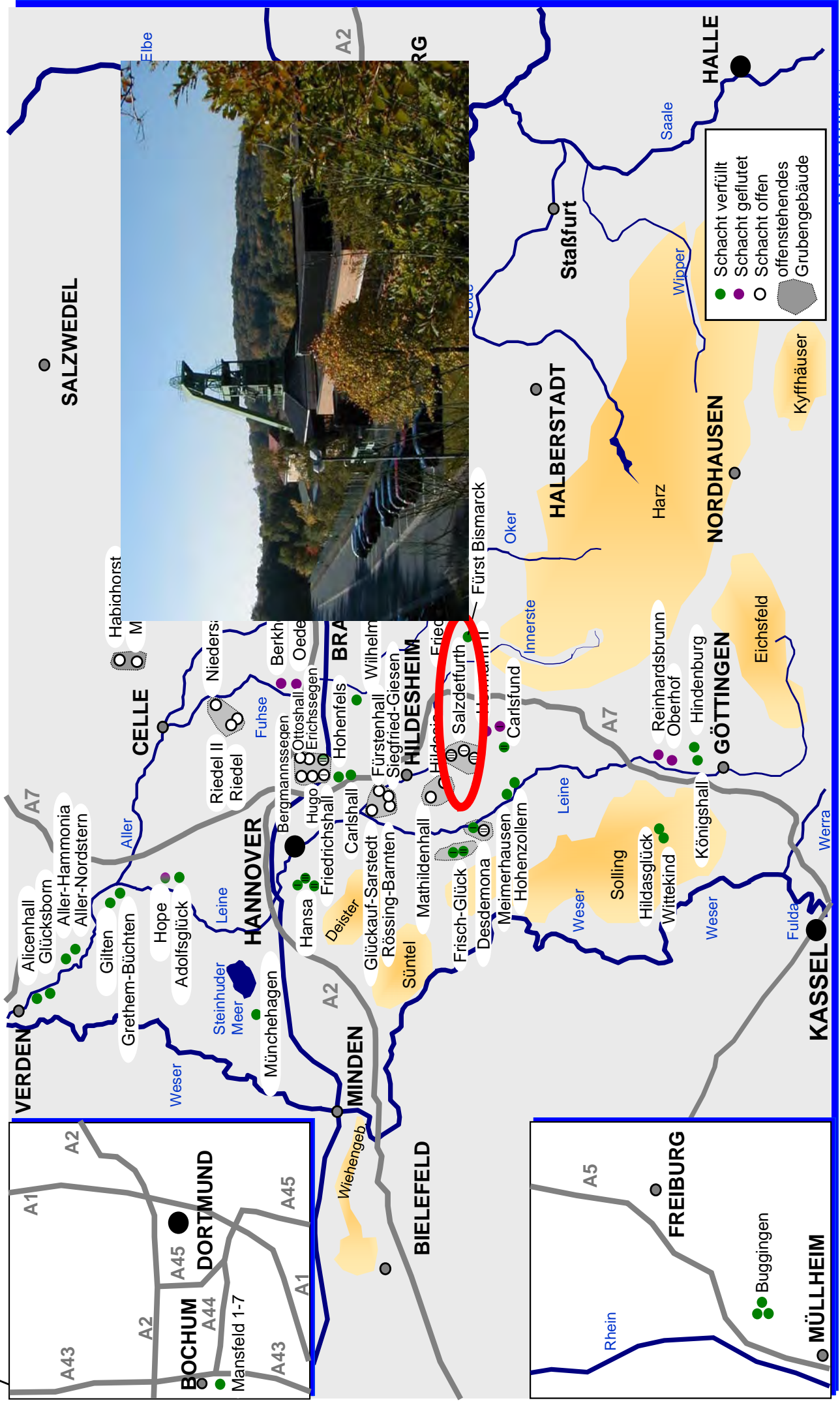
Schacht Wilhelmshall-Oelsburg



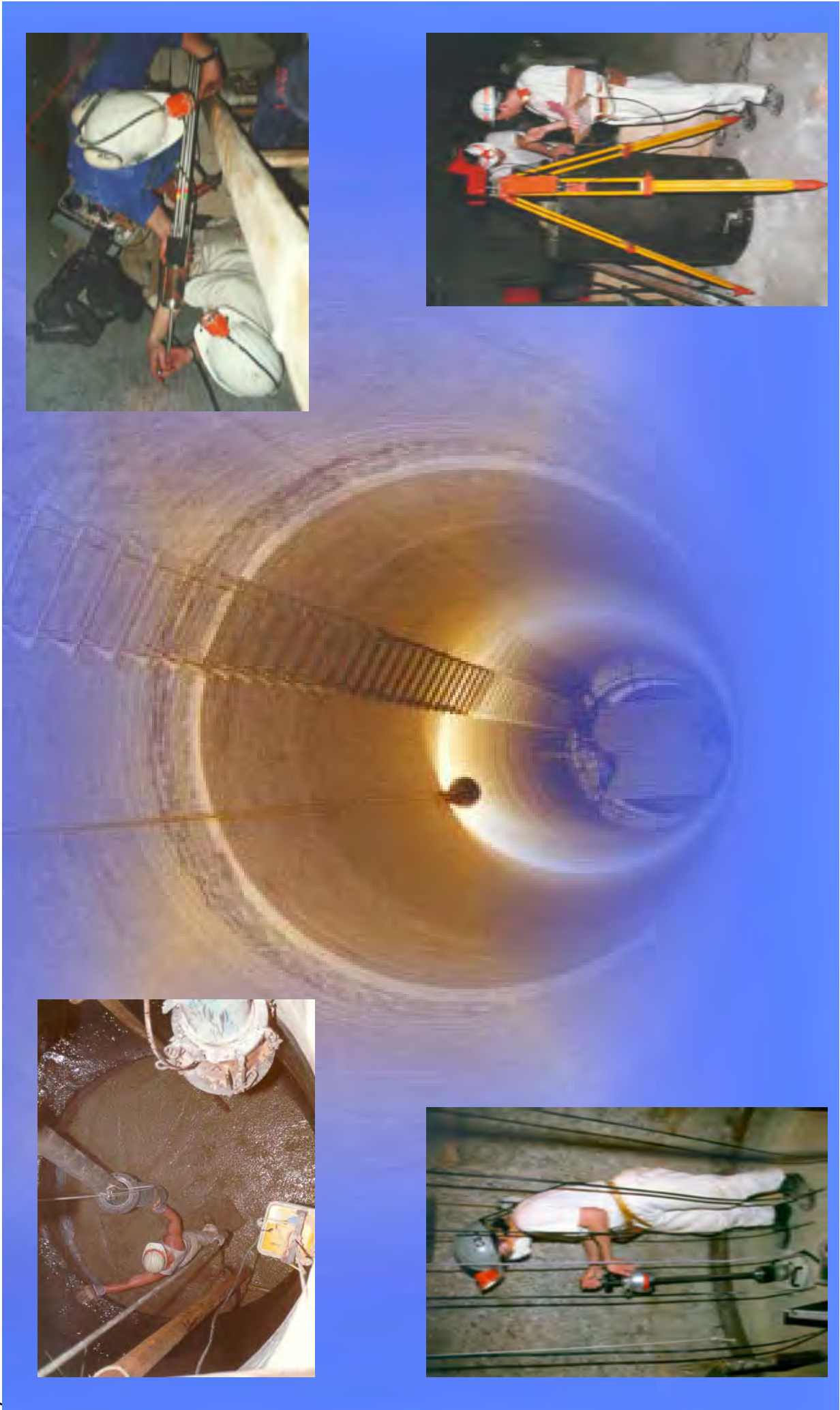
K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Videoschachtwinde



Langzeitsichere Verwahrung von Schächten



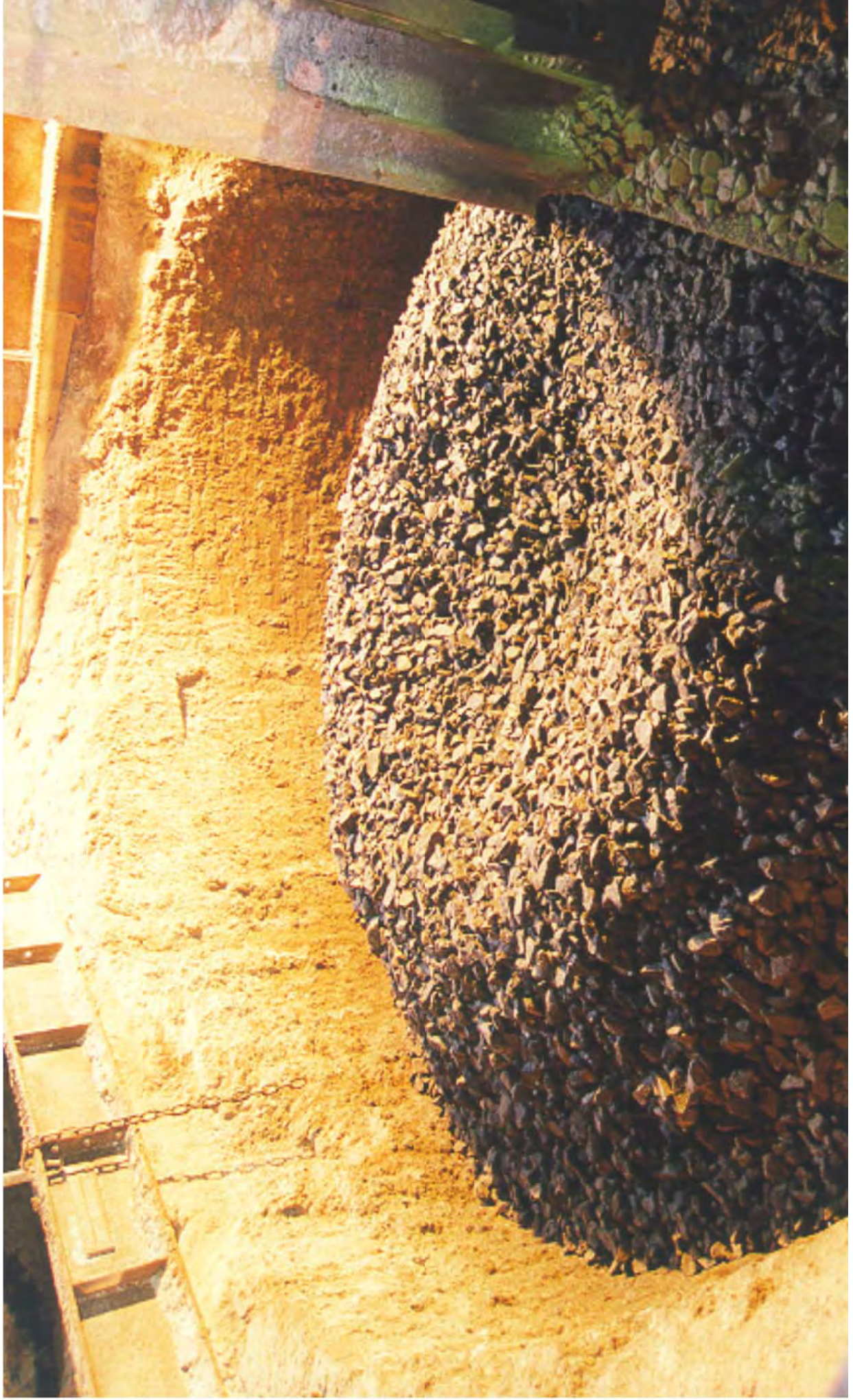
Forschungsprojekt Schachtverschluß Salzdetfurth



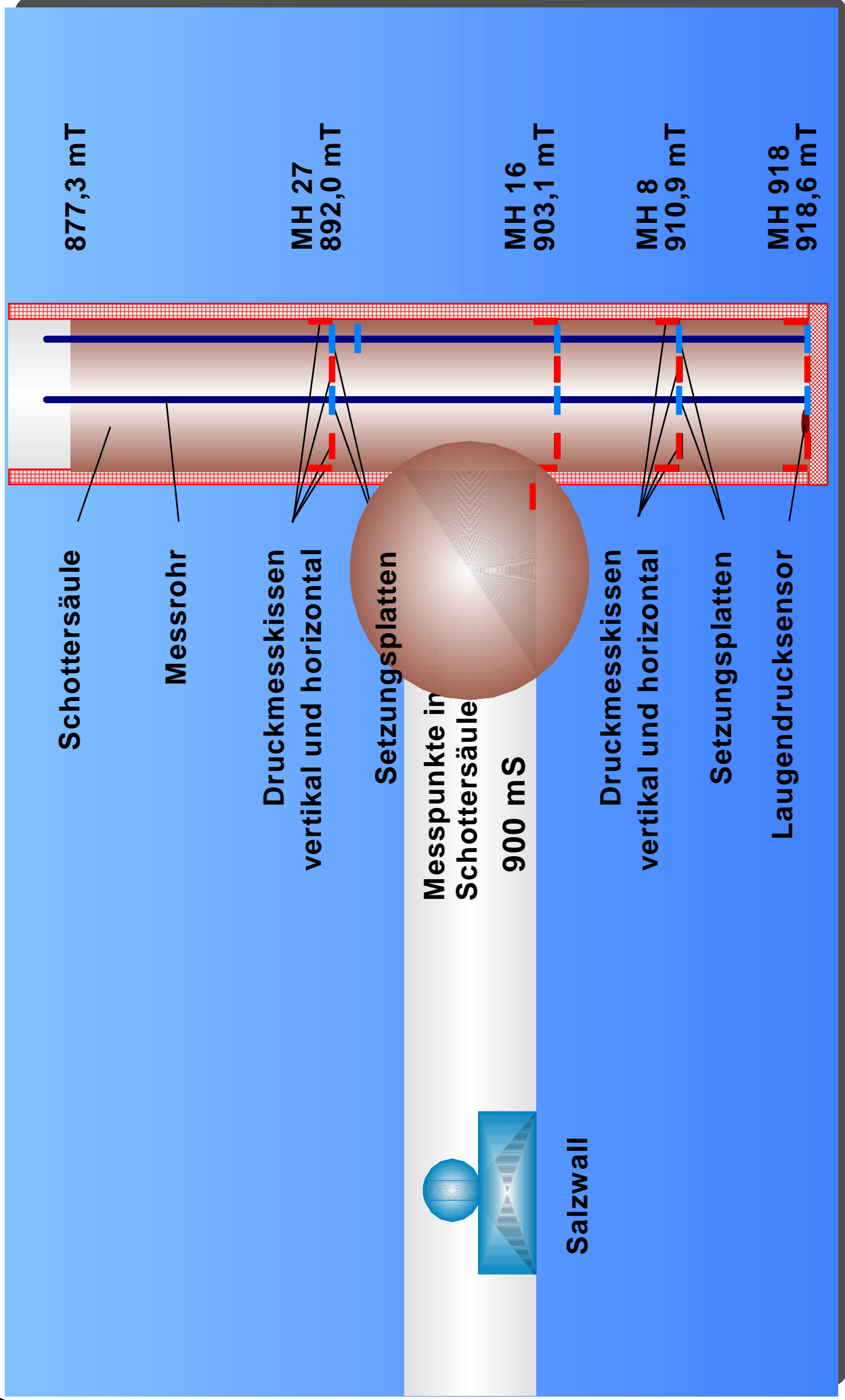
Pressversuche von Schotter im Stahlrohr bei K+S



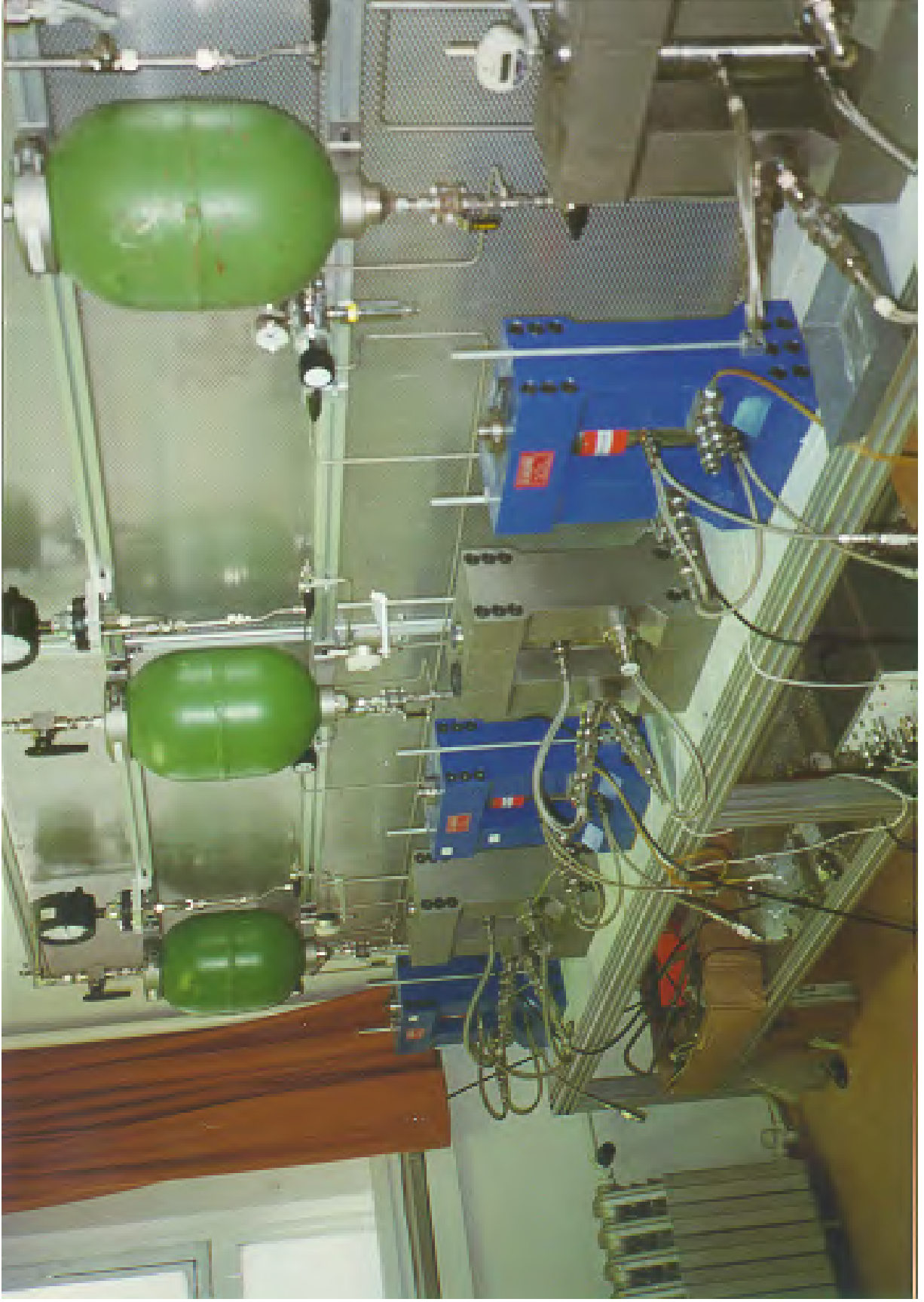
Ringförmiges Schüttprofil der Schottersäule



In-Situ-Versuch Schottersäule Schacht Salzdettfurth |



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Labor in der TU Freiberg

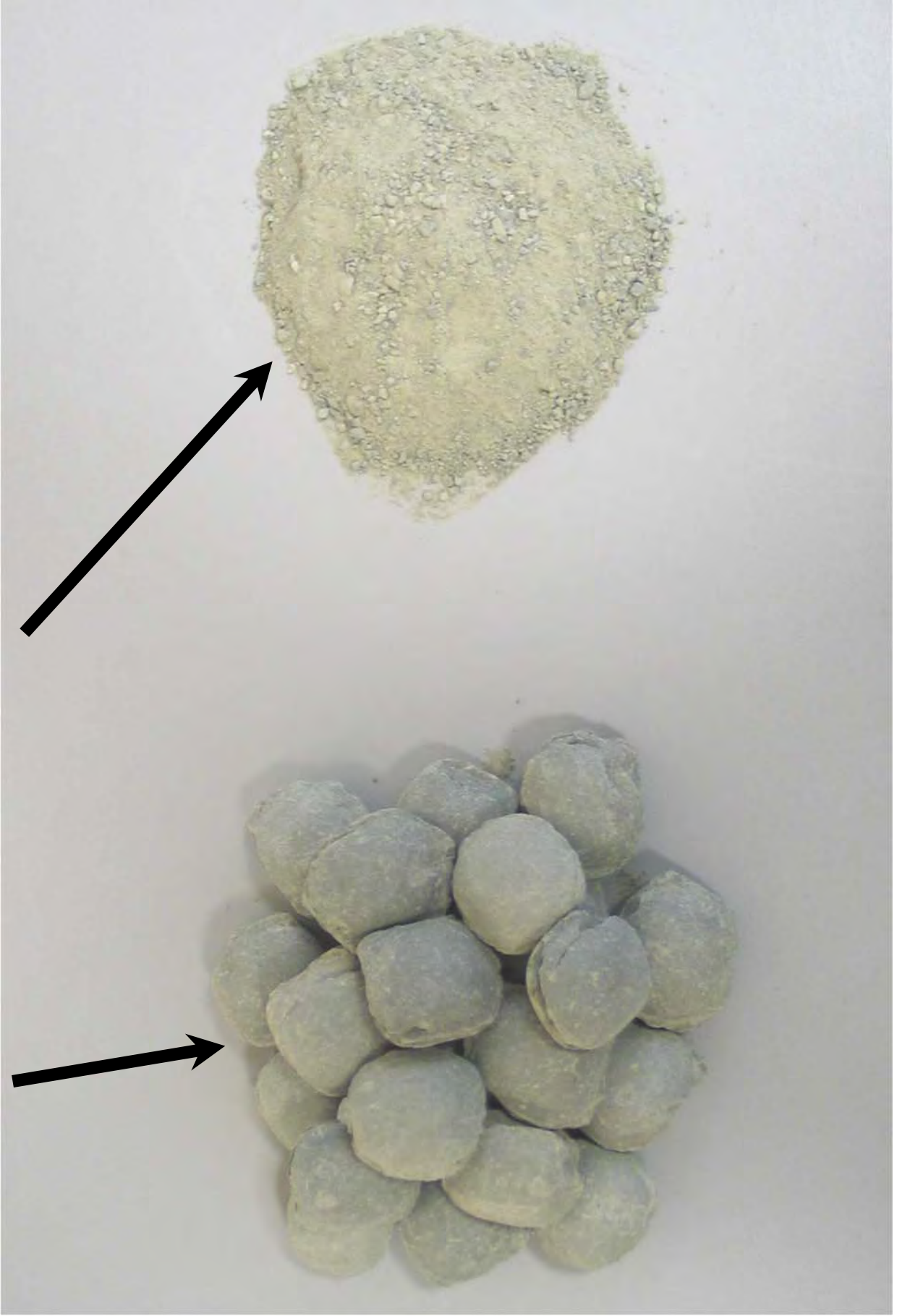


K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke

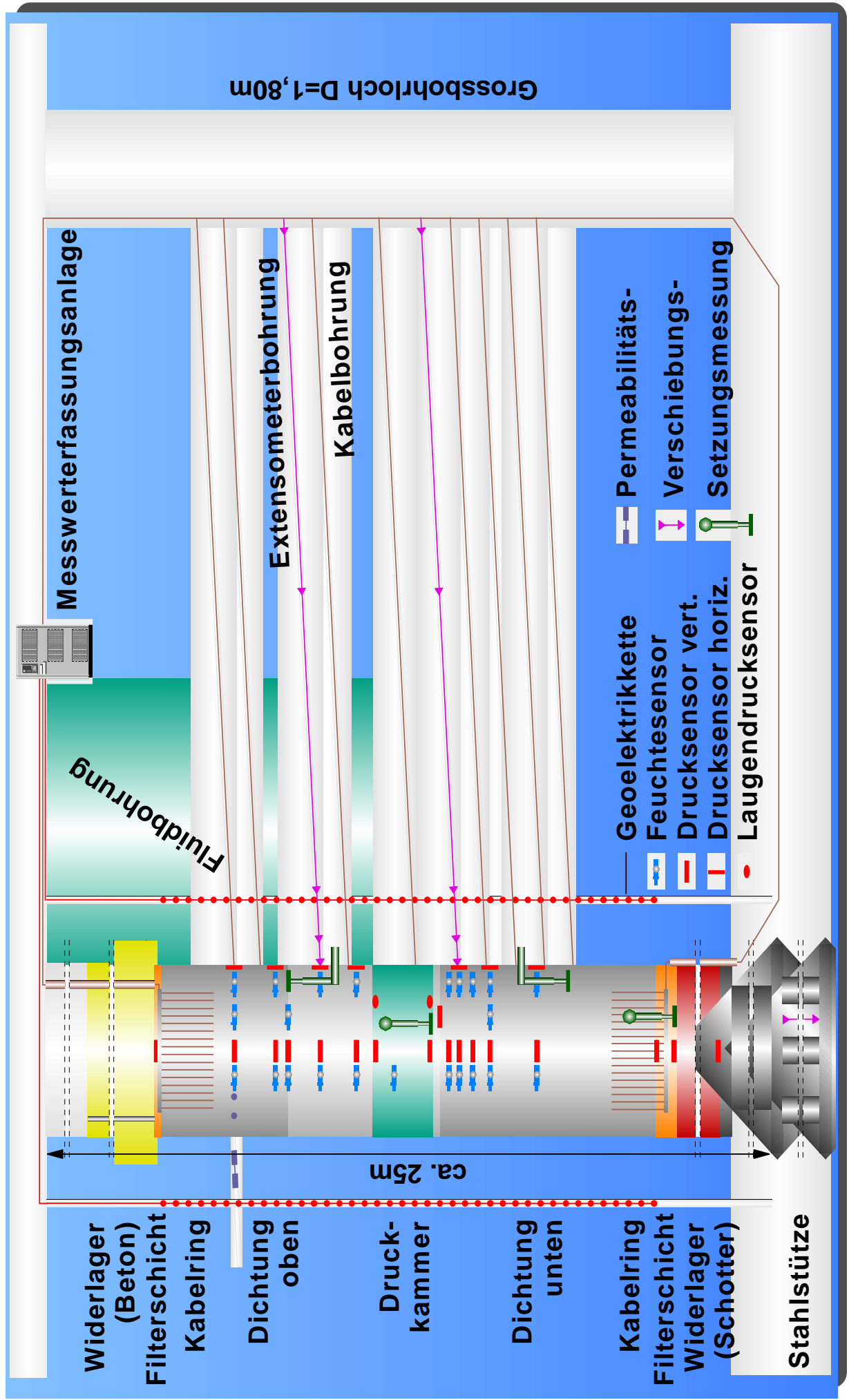
Stahlrohrversuchsanlage in der TU Freiberg



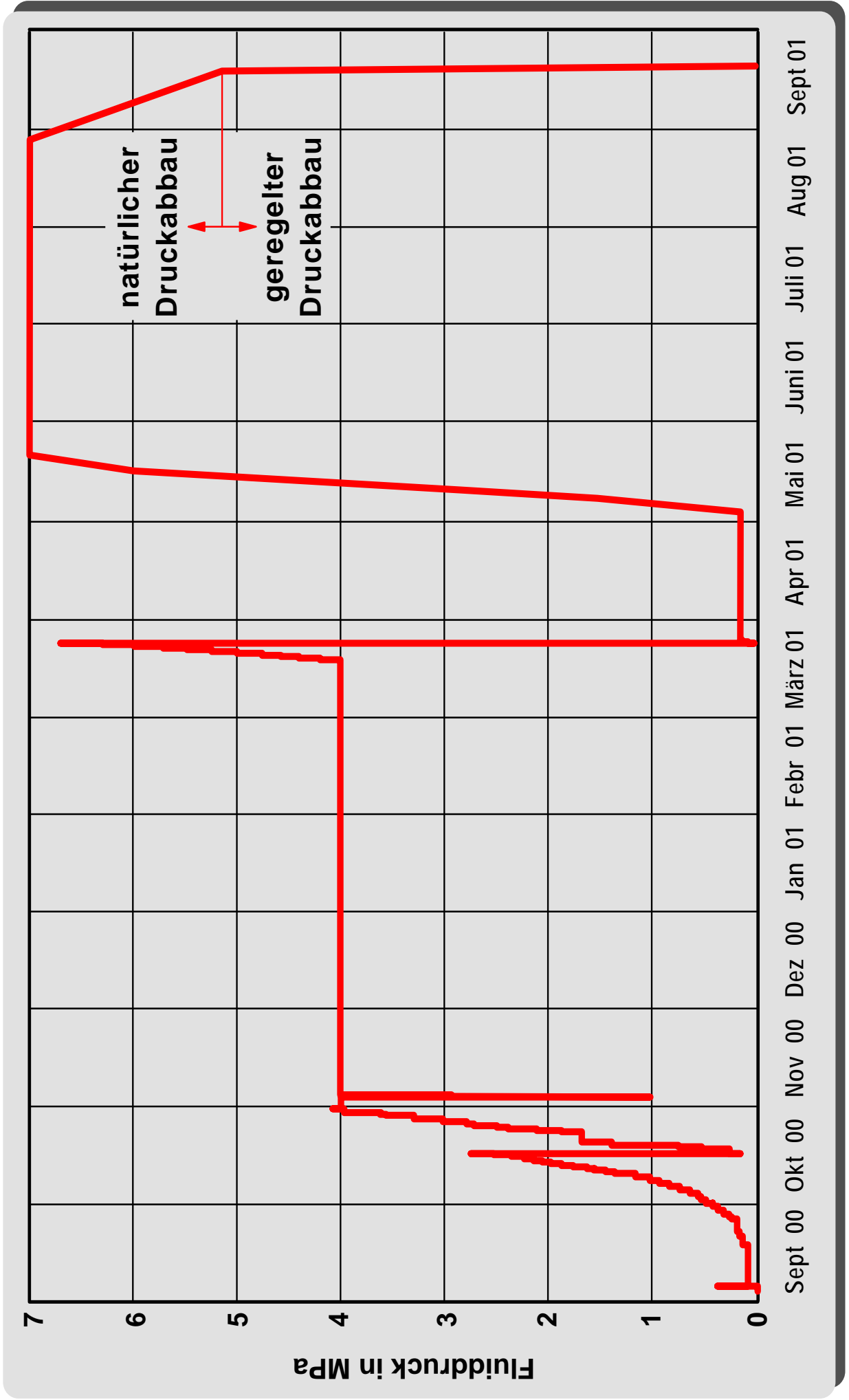
K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke
Bentonitpellets und -granulat



Messkonzept Bohrschacht



Fluiddruckbelastung Bohrschachtversuch

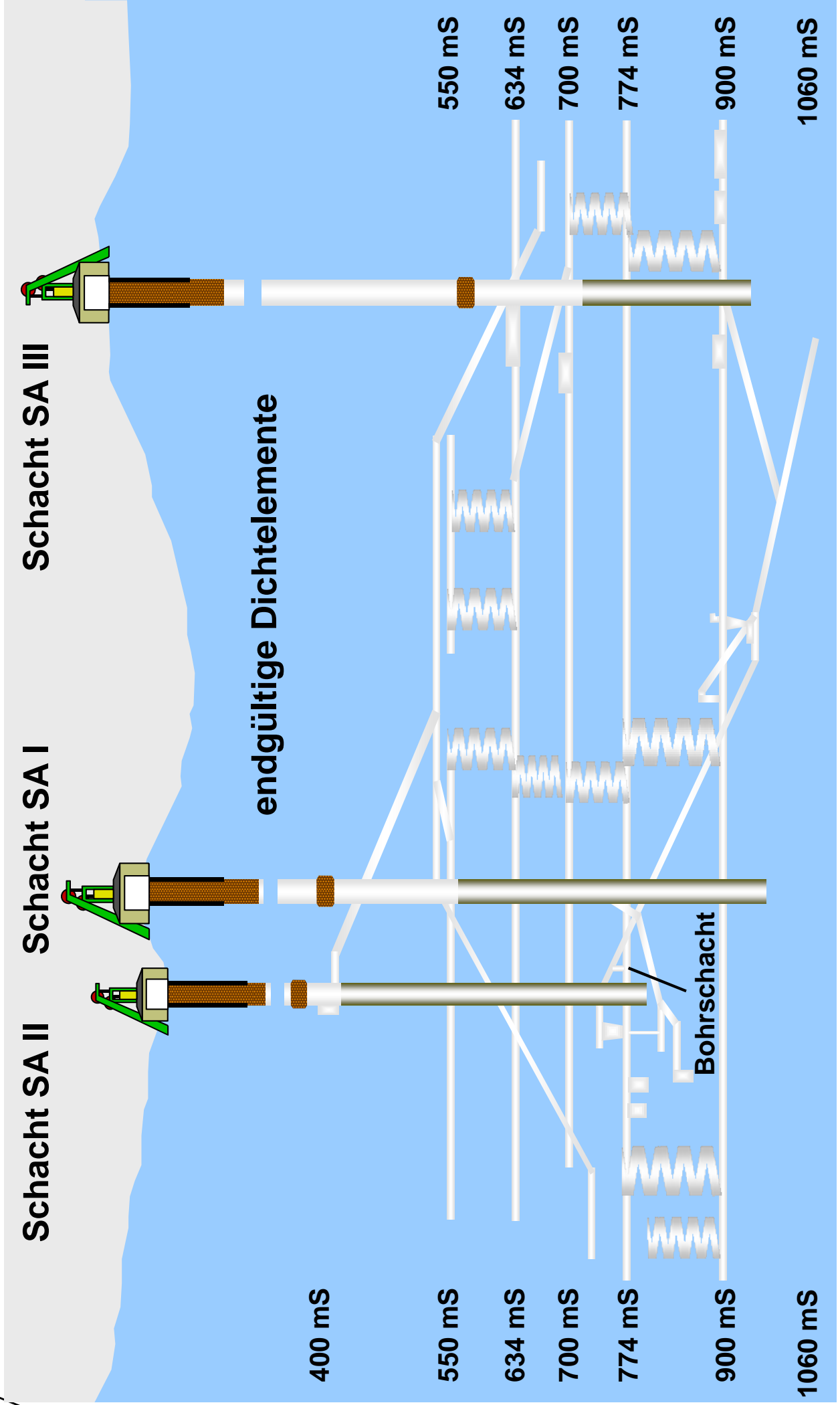




Workshop am
24. Sept. 2002
bei der K+S AG
in Kassel



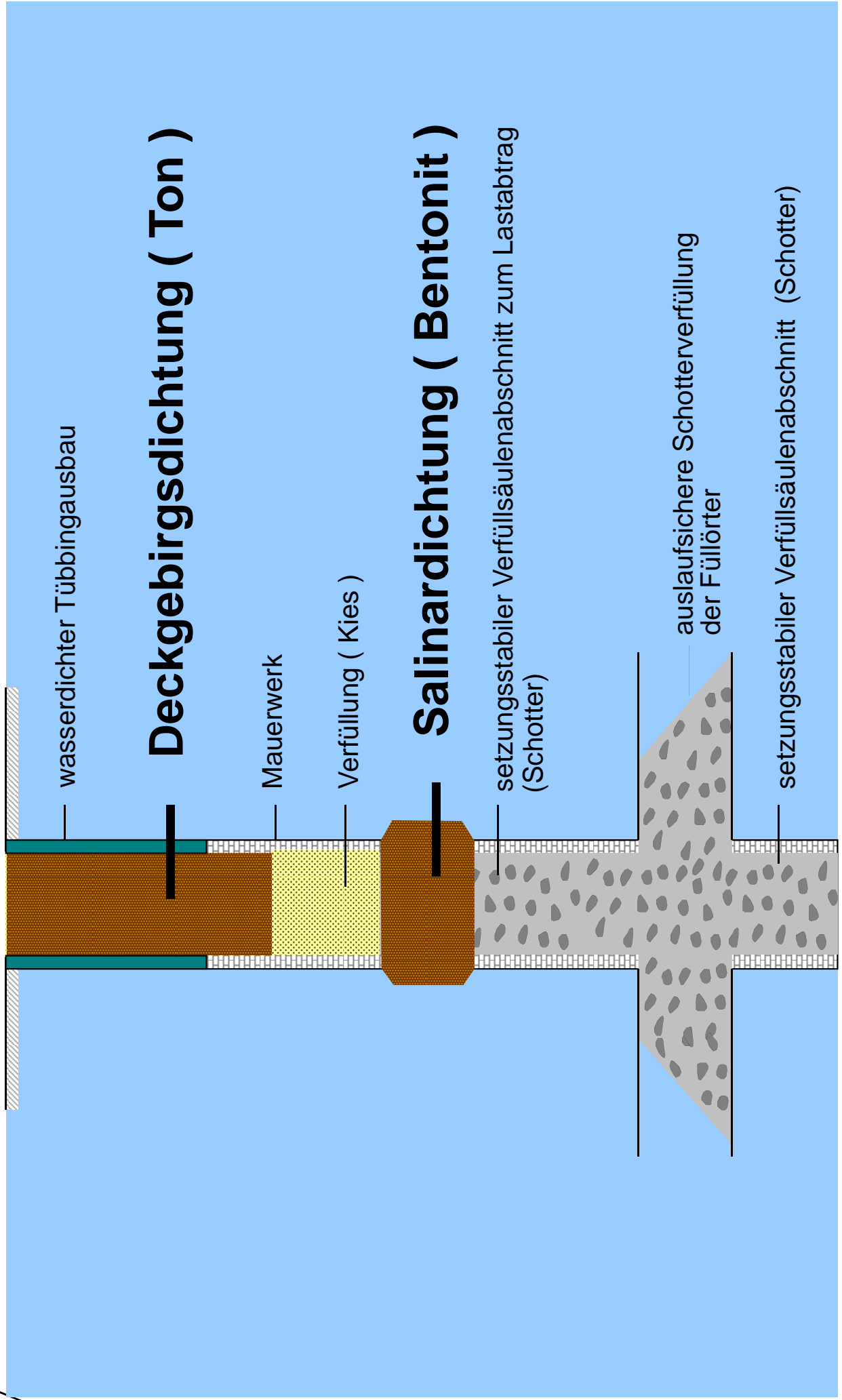
Langzeitsichere Verwahrung von Schächten



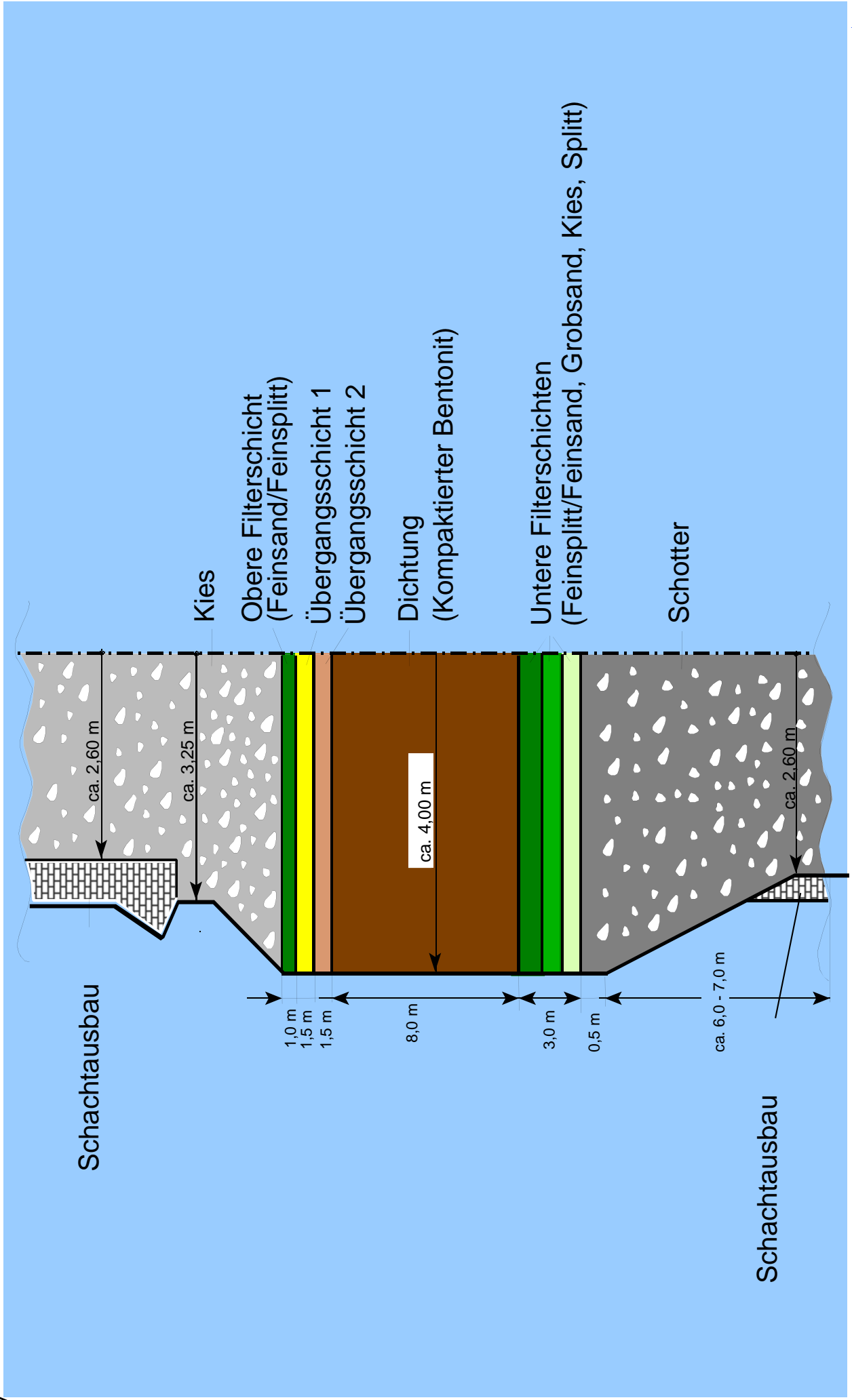
Planungsauftrag an das Ingenieurbüro IBeWa

- 1 Präzisierung von Aufgabenstellung, Anforderungen an die Verwahrung
- 2 Geologisch-hydrogeologische Gesamtbetrachtungen unter Berücksichtigung der Schachtdichtsysteme
- 3 Zustandsanalyse der drei Schachtröhren
- 4 Prinzipien bei der Konzeptentwicklung für flüssigkeitsdichte, dauerhafte Schachtverwahrungen
- 5 Durchführung von geologischen, hydrogeologischen und geomechanischen Untersuchungen und Festlegung der Dichtbereiche
- 6 Entwicklung von technischen Konzepten für die Schachtverwahrung**
- 7 Überwachung und Qualitätssicherung
- 8 Zusammenfassung

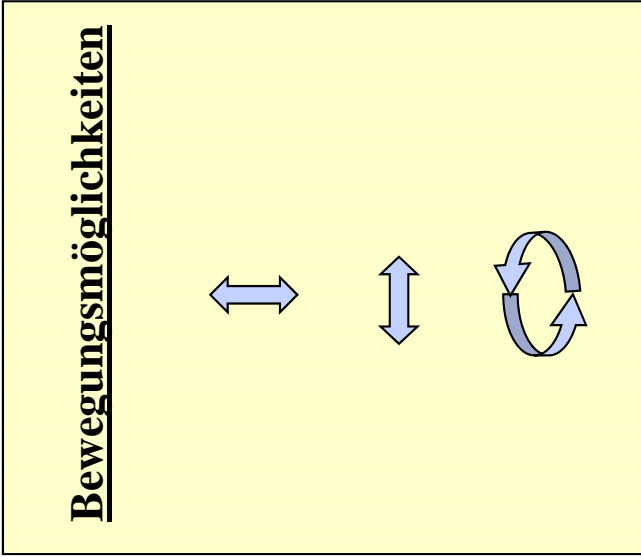
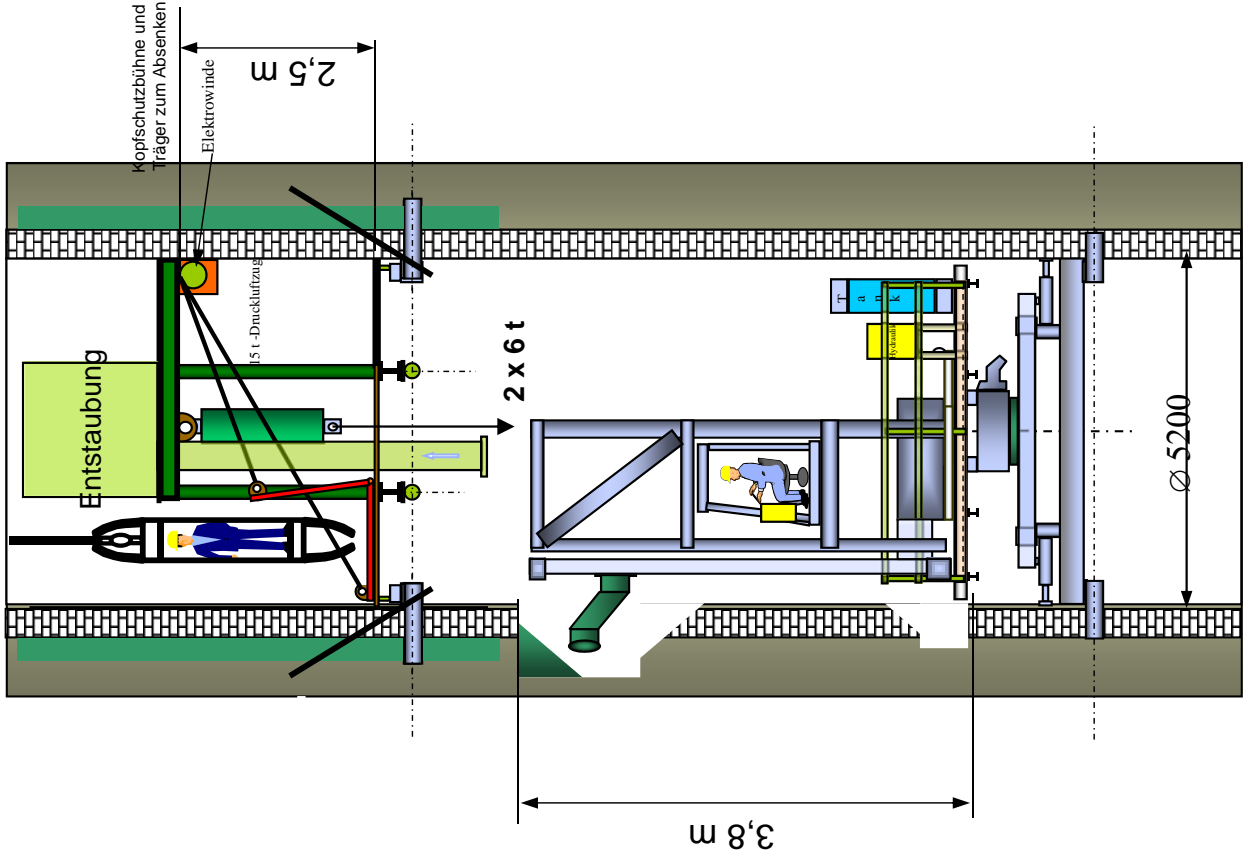
Grundkonzept für Verwahrung der Schächte SA



Prinzipielle Darstellung des Salinardichteelementes



Fräse zur Schachterweiterung für das Dichtelement





K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Schachtfräse

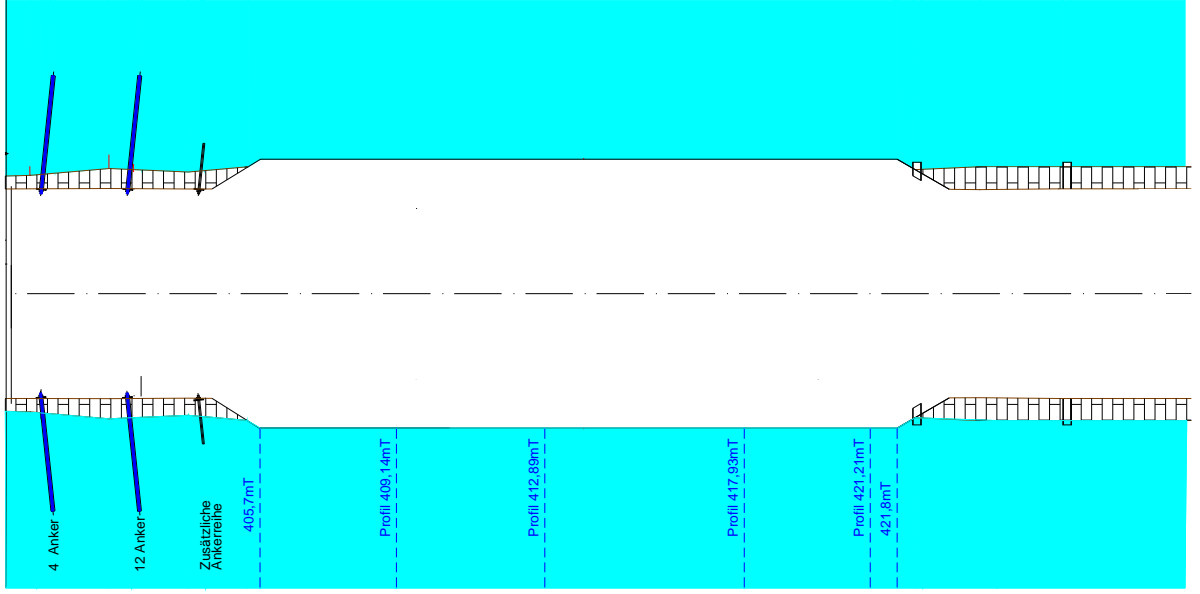


K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke
Erster Kontakt zum Gebirge

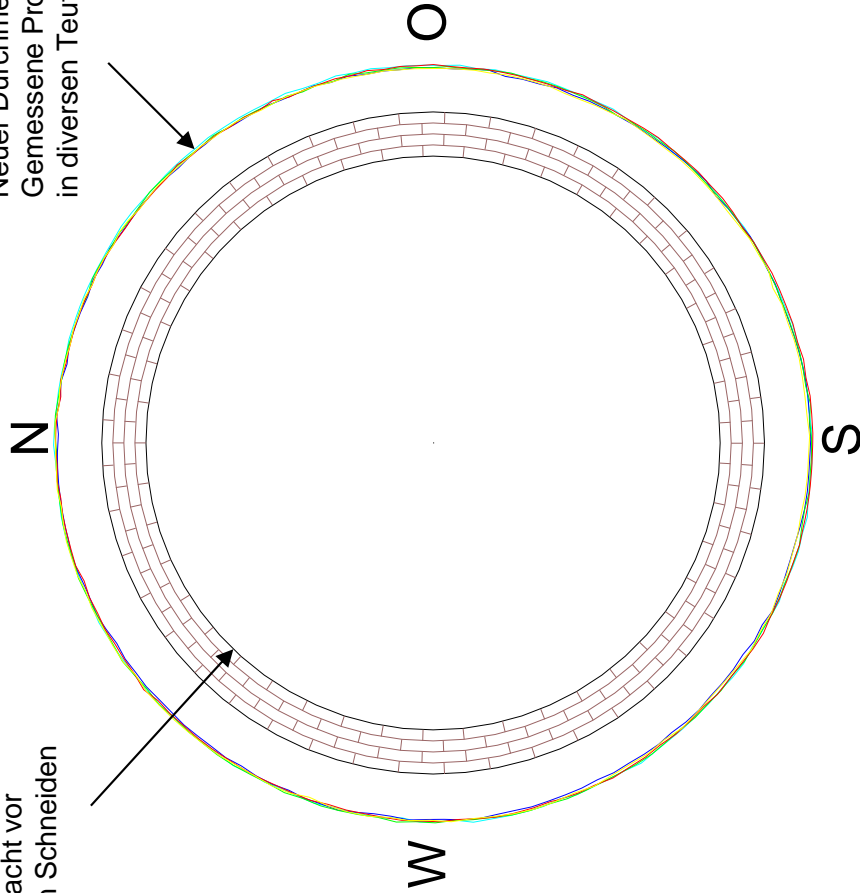




Schacht SA1 – Gemessene Horizontalprofile



Neuer Durchmesser:
Gemessene Profile
in diversen Teufen



Schacht vor
dem Schneiden

Profil Teufe [m T]	Fläche [m ²]	Durchmesser [m]
-409,14	36,46	6,81
-412,89	36,93	6,86
-417,93	36,77	6,84
-419,07	36,81	6,85
-421,12	36,64	6,83

K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Verfüllen der 400 mS, Schacht SA II



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Verfüllen der 400 mS, Schacht SA II

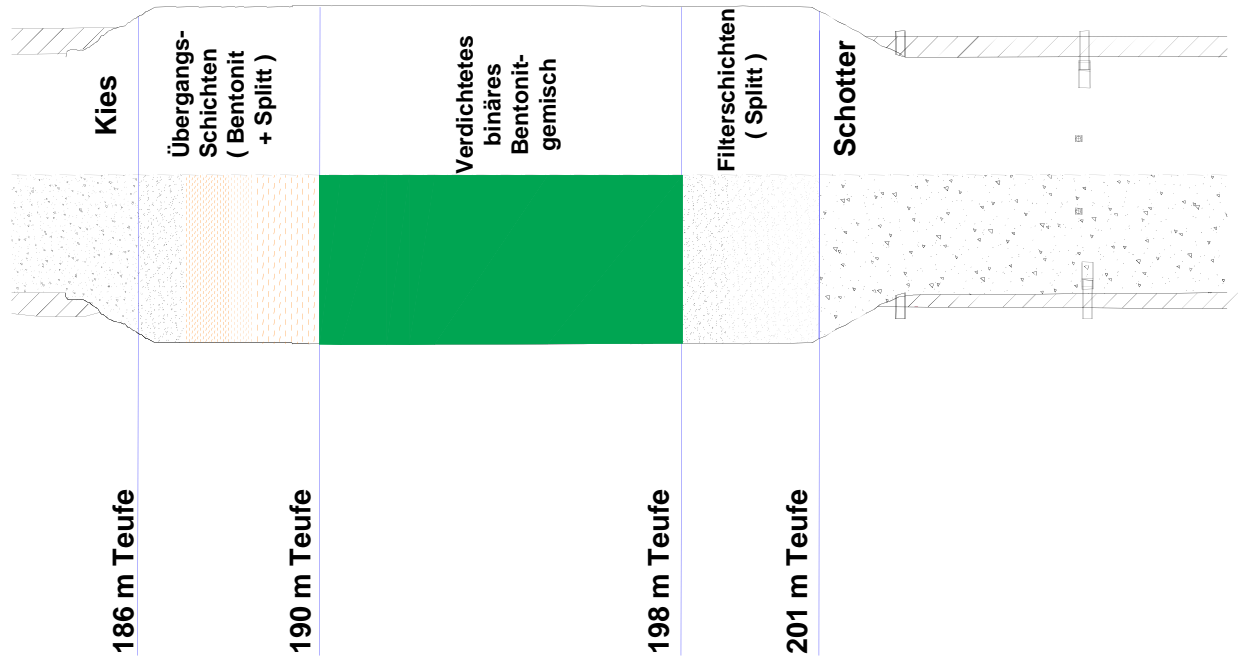


K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Verfüllen der 400 mS, Schacht SA II

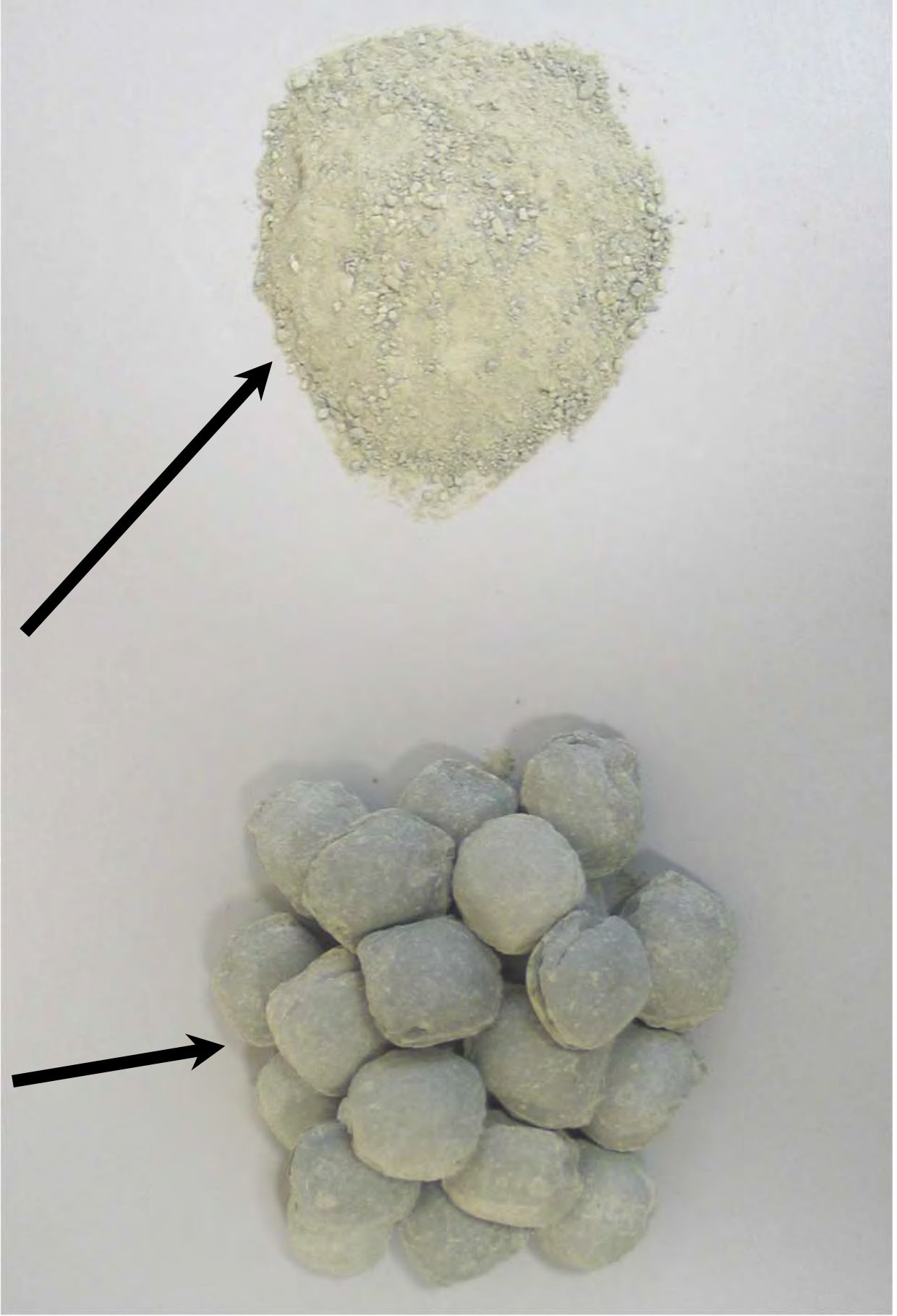


K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke

Einbauschichten Schacht SA 2



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke
Bentonitpellets und -granulat





K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Einbringen Bentonit



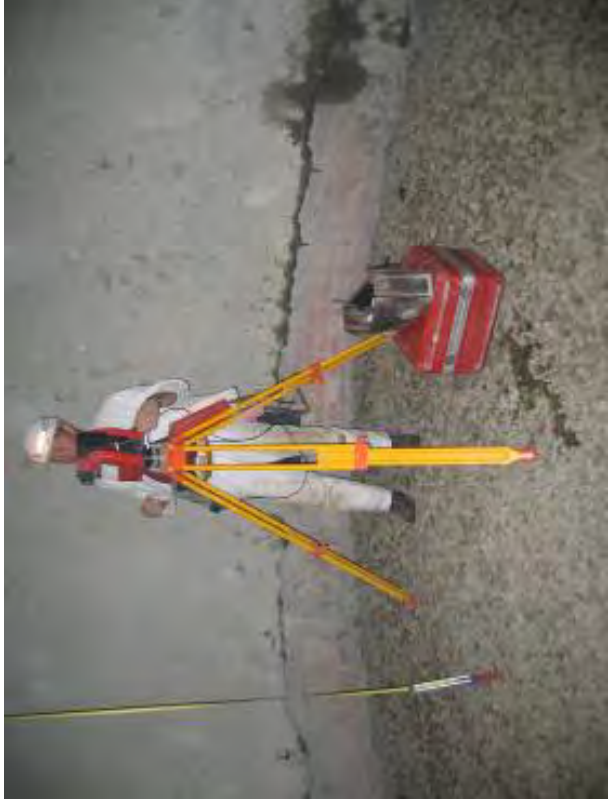
Einbringen Bentonit: Schachttransport



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Einbringen Bentonit



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Einbringen Kies, Schacht SA 2



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Einbringen Ton, Schacht SA 2



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Schachtverfüllung SA 2



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Schacht SA 2



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke **Abriss Fördergerüst Schacht SA 2**



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Abriss Fördergerüst Schacht SA 2



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke **Abriss Fördergerüst Schacht SA 2**



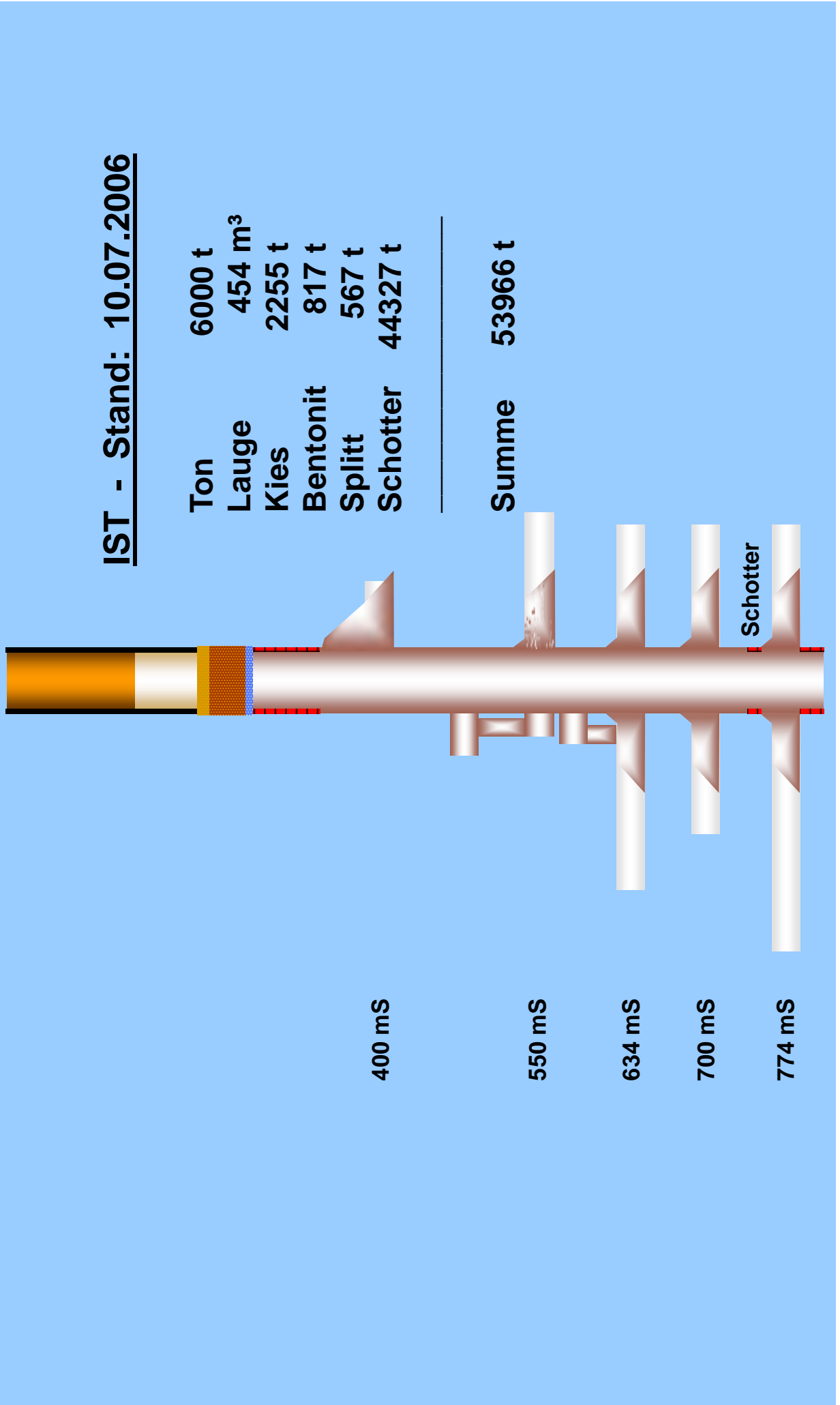
K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke **Schachtdeckel Schacht SA 2**



K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke Schachtdeckel Schacht SA 2



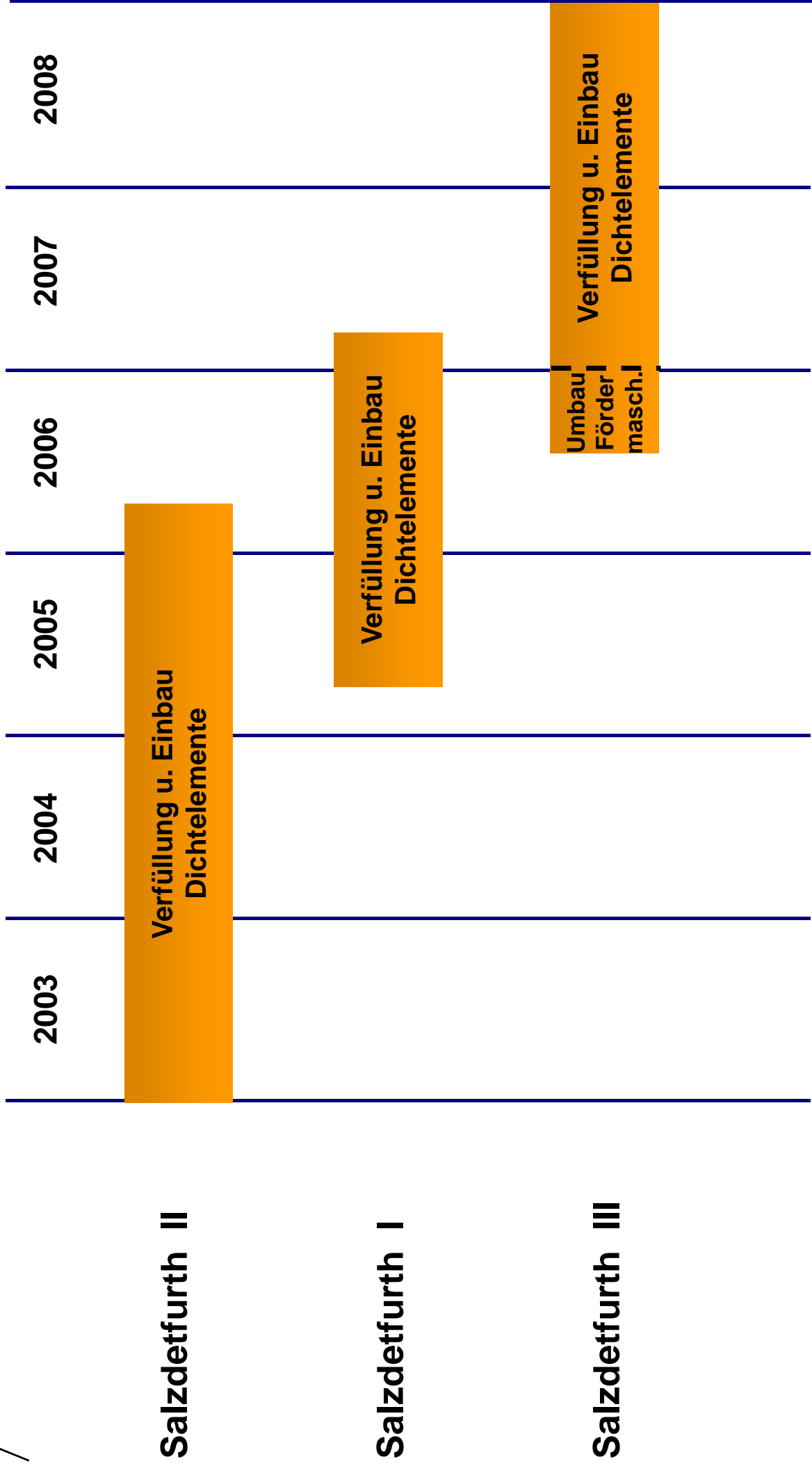
Verfüllmengen Salzdetfurth SA II



IST - Stand: 10.07.2006

Material	eingebraachte Mengen [t]	Vorgaben Gutachter g/cm ³	erzielte Werte g/cm ³ *
Schotter	44327	1,7	1,74
Bentonit (Bin. Gemisch)	676	1,7*	1,75*
Kies	2.255	1,6	1,69
Duingen Ton	6.000	1,7*	1,85*

* Trockendichte





**Langzeitsichere Verwahrung
von Schächten im Kalibergbau**

Dipl. Ing. Klaus Rumphorst

K+S Aktiengesellschaft, Inaktive Werke

