

**40 Jahre Forschung und
Entwicklung für die sichere
Endlagerung hochradioaktiver
Abfälle:
Wo stehen wir?**

Informationsveranstaltung
am 10. und 11. Juni 2008 in Peine

Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung

November 2008

Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA-PTE Nr. 11

40 Jahre Forschung und Entwicklung für die sichere
Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.
Wo stehen wir?

Informationsveranstaltung
10. und 11. Juni 2008
Peine

Veranstalter

Projekträger Forschungszentrum Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2008

FZKA-PTE-Berichte

Der vorliegende Band dient der aktuellen Unterrichtung der auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle und der untertägigen Ablagerung chemotoxischer Abfälle arbeitenden Institutionen und der zuständigen Behörden.

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Das Forschungszentrum Karlsruhe GmbH übernimmt keine Gewähr insbesondere für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

Druck und Verbreitung:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
ISSN – 1430-6751

Vorwort

In den Diskussionen um die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle werden sachliche und technisch-wissenschaftliche Erkenntnisse und Fakten zuweilen als wenig relevant angesehen. Hingegen haben divergierende politische oder ideologisch begründete Meinungen und Ansichten einen höheren Stellenwert. In der Öffentlichkeit werden die Leistungen der Wissenschaftler und Ingenieure und deren in vier Jahrzehnten Forschung und Entwicklung für die sichere Endlagerung erzielten Ergebnisse wenig wahrgenommen. Dies entspricht nicht dem tatsächlichen Status des Standes von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Endlagerung, der in Deutschland weit fortgeschritten ist: Nach Meinung vieler Experten könnte auf dieser Basis ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in einem Salzstock gebaut werden.

Ziel der Veranstaltung war es den aktuellen Stand der Forschung vorzustellen. Die Vortragenden, die über das in den letzten Jahren Erreichte informierten, waren ausgewiesene Sachverständige aus den Institutionen, die auf dem Gebiet der Endlagerung die Expertise in Deutschland repräsentieren.

Mit den ausgewählten Themen sollte ein Überblick gegeben und einen Eindruck davon vermittelt werden wie breit gefächert dieses Gebiet ist – vom Schwermaschinenbau über den Bergbau hin zur Geologie, Mathematik, Chemie, insbesondere die Radiochemie – und welche Expertise und Kompetenz für die Bearbeitung wichtig und vorhanden sind.

Dieser Band enthält die Zusammenstellung der Tagungsbeiträge in schriftlicher Form und die präsentierten Folien.

Inhaltsverzeichnis

E. Biurrun, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

Stand internationaler Endlagerprogramme 1

W. Bollingerfehr, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

Entwicklung und Stand von Konzepten für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Steinsalz (inkl. Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung) 67

V. Bräuer, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Salz, Ton, Granit – Endlagerwirtsgesteine in Deutschland 122

H. Geckes, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Nukleare Entsorgung, Karlsruhe

Geochemische Grundlagenforschung als wichtiger Bestandteil für eine sichere Endlagerung 165

J. Hammer, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Standortauswahl und Standorterkundung am Beispiel Gorleben 212

M. Pöhler, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

Entwicklung von Konzepten für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Tonstein 281

K. Röhlig, J. Krone, TU Clausthal, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine

Vom Anhydritszenario zum sicheren Einschluss - Evolution des Sicherheitsnachweises für Endlager im Steinsalz 331

A. Rübel, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig

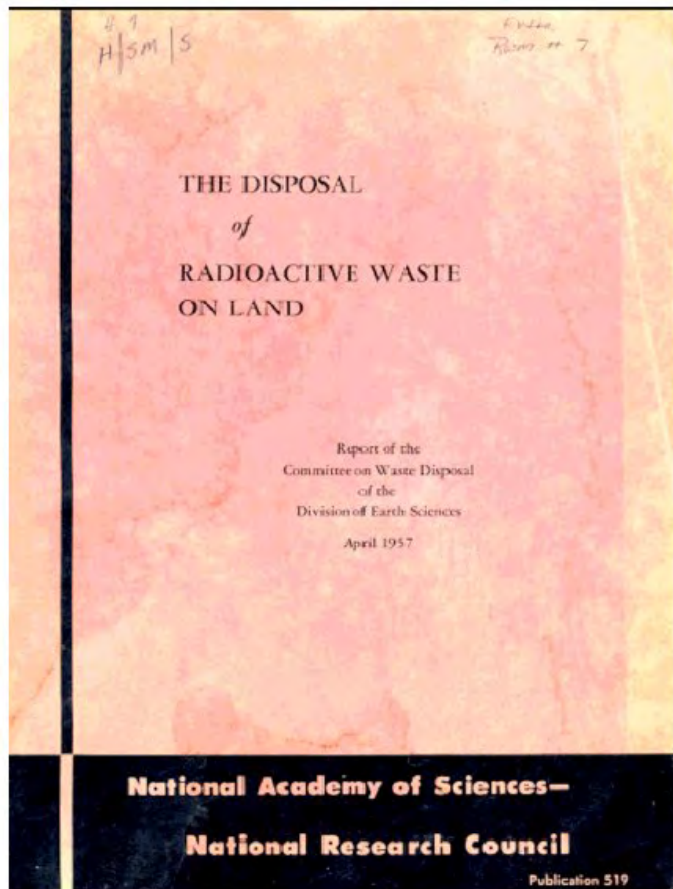
Sicherheitsnachweis für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tongestein 368

Internationaler Stand der Endlagerung radioaktiver Abfälle

Dr. Enrique Biurrun
DBE TECHNOLOGY GmbH

Vorbemerkungen

Bereits zu Beginn der industriellen Nutzung der Kernenergie für die Elektrizitätserzeugung in den fünfziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurden Untersuchungen über die Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle durchgeführt. Sehr früh schon wurden Salzformationen



als viel versprechendes Wirtsgestein für unterirdische Deponien solcher Abfälle erkannt und untersucht. In einem Bericht der US National Academy of Sciences wurde 1957 darauf hingewiesen, daß „*disposal in cavities mined in salt beds and salt domes is suggested as the possibility promising the most practical immediate solution of the problem*”.

Die Bemühungen konzentrierten sich zu anfangs auf die Entsorgung der leicht- und der mittelaktiven Abfälle (international üblich als LLW/ILW bezeichnet). Die Entsorgung der hochaktiven Abfälle (HLW), die aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente resultieren, sowie die Entsorgung der ausgedienten Brennelemente, welche als Abfall deklariert werden, wurde zunächst zurückge-

stellt. Ziel war somit eine Reduzierung der anfänglich sehr hohen Nachzerfallswärme dieser Abfälle zu erreichen. Es handelt sich zudem bei den HLW um relativ geringe Mengen, die kostengünstig zwischengelagert werden können, und die den Betrieb eines industriellen Endlagers zunächst nicht rechtfertigen.

Gleichzeitig mit der schnellen Verbreitung der nuklearen Elektrizitätserzeugung in den Industriestaaten wurden in vielen Ländern Endlager für LLW/ILW in Betrieb genommen. In Europa zum Beispiel in Deutschland, aber auch in Polen, Tschechien, der Slowakei, Ungarn, England, Frankreich, Spanien, Rumänien, Bulgarien, Schweden und Finnland sowie in der damaligen Sowjetunion. Mittlerweile existieren spezielle Endlager für sehr leicht aktive Abfälle aus dem Betrieb und dem Abriss von kerntechnischen Einrichtungen, wie zum Beispiel

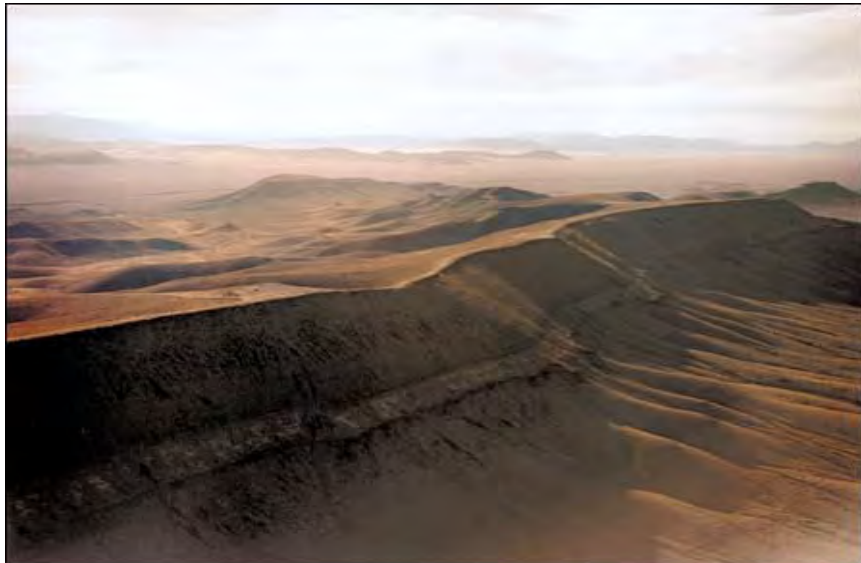
in Morvilliers (Frankreich) sowie El Cabril (Spanien). Weitere sind in der Slowakei und Bulgarien in Planung.

Es gibt im internationalen Rahmen auch eine Reihe von fortgeschrittenen Projekten für die tiefe geologische Endlagerung von hochaktiven Abfällen. Am weitesten entwickelt in Bezug auf die Realisierung ist immer noch das Erkundungsbergwerk Gorleben, auch nach nahezu 8 Jahren Moratorium. Die Endlager in Finnland und Schweden sowie in den USA dürften aber, aufgrund des vorteilhafteren gesellschaftlichen und politischen Umfeldes eher in Betrieb gehen. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf diese drei erfolgreichen Beispiele.

USA: das Yucca Mountain Projekt

Versuche zur tiefen geologischen Endlagerung von radioaktiven Abfällen begannen in den USA in den späten 60er und frühen 70er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Im Auftrag der Atomic Energy Commission (heute Department of Energy DOE) führte damals das Oak Ridge National Laboratory Versuche in einem ehemaligen Salzbergwerk nahe Lyons, im Bundesstaat Kansas durch. Der Kongreß von Nevada schlug der Bundesregierung im Jahre 1975 vor einen Standort innerhalb des ausgedehnten Nevada Test Site für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen zu nutzen.

Im Jahre 1980 verabschiedete der US Kongreß ein Gesetz zur Auswahl eines Standorts zum Bau der Waste Isolation Pilot Plant (Pilotanlage zur Abfallentsorgung) bei Richland, im Bundesstaat New Mexico. Damit sollte eine Forschungs- und Entwick-



lungsanlage zur Demonstration der sicheren Entsorgung von langlebigen radioaktiven Abfällen aus dem Verteidigungsbereich zur Verfügung gestellt werden. Mit dem Nuclear Waste Policy Act von 1982 (Public Law 97-425) wurde die Basis für die Entwicklung eines Endlagers für wärmeerzeugende Abfälle aus Kernkraftwerken geschaffen. Das Gesetz sah vor, daß der Energieminister fünf Standorte zur detaillierten Erkundung benennt. In einer Änderung des NWP Act begrenzte der Kongress im Jahre 1987 mit der Public Law 100-203 die Erkundungsarbeiten ausschließlich auf den Standort Yucca Mountain, der sich innerhalb des Atomwaffenversuchsgeländes Nevada Test Site in der Wüste Nevadas befindet. Dort haben in der Vergangenheit mehr als 900 ober- und unterirdische Kernwaffenversuche stattgefunden. Diese Entscheidung war im Einklang mit dem o.g. ursprünglichen Vorschlag des Kongresses von Nevada, dessen Regierung jedoch mittlerweile seine Meinung geändert hatte. Die Be-

trachtung alternativer Wirtgesteine und Standorte sollte laut NWPA nur wiederaufgenommen werden, falls Yucca Mountain (in den Abbildungen gezeigt, Quelle DOE) sich als ungeeignet erweisen sollte.

Nach einer positiven Bewertung des Standortes durch die Office of Civilian Radioactive Waste Management (OCRW, die für die Endlagerung verantwortliche Organisation im DOE)



und durch den Energieminister wurde Yucca Mountain 2002 vom Präsidenten dem Kongreß als Endlagerstandort empfohlen.

Nach dem Veto des Bundesstaates Nevada bestätigten sowohl das Rep-

räsentantenhaus als Vertretung des amerikanischen Volkes als auch der Senat als Vertretung der Bundesstaaten Yucca Mountain mit großer Mehrheit als Endlagerstandort. Auch Clark County, in dessen Territorium sich Yucca Mountain befindet, hat sich stets positiv zum Bau des Endlagers in Yucca Mountain geäußert.

Im Jahre 2007 wurden in dem sogenannten License Application Support Network (LASN) alle Dokumente, die im Rahmen des Yucca Mountain Projektes erstellt wurden, wie vom Gesetz verlangt im Internet veröffentlicht. Am 3. Juni 2008 wurde der Genehmigungsantrag (LA) der Genehmigungsbehörde, der unabhängigen Nuclear Regulatory Commission, zur Prüfung und Entscheidung vorgelegt. In einer ersten Entscheidung vom 8. September 2008 gab NRC bekannt, dass die Kommission den Antrag als umfassend und vollständig erachtet und zur detaillierten Prüfung und Entscheidung akzeptiert. Nach den Vorschriften des NWPA ist dafür ein Zeitrahmen von maximal vier Jahren vorgesehen. Eine positive Entscheidung der NRC vorausgesetzt, könnte Yucca Mountain frühestens im Jahre 2017 den Betrieb aufnehmen. Aufgrund der Budgeteinschränkungen der Vergangenheit, die auch für die Zukunft erwartet werden, ist ein Einlagerungsbeginn ab ungefähr 2021 jedoch wahrscheinlicher. Grundlage des Erfolges des Yucca Mountain Projektes ist die gesetzliche Regelung des Entscheidungs- und Genehmigungsprozesses sowie seine absolute Legitimation, die durch die Entscheidungen des Repräsentantenhauses und des Senats als höchste Vertreter des Volkes gegeben sind.

Verantwortlich für die Endlagerung ist nach dem Gesetz OCRWM. Diese Organisation bedient sich eines Dritten, der die Detailplanung sowie die Arbeiten vor Ort ausführt. Die Schutzziele werden von der EPA definiert, von der NRC konkretisiert und im Code of Federal Regulations festgelegt. Nach einer erfolgreichen Klage gegen den Zeitraum, der im Sicherheitsnachweis zu betrachten ist, wird gegenwärtig an einer diesbezüglichen Präzisierung der Schutzziele gearbeitet.

Die Kosten der Endlagerentwicklung werden vom Abfallverursacher getragen. Hierfür wurde ein Fonds aufgelegt, in den die Kernkraftwerksbetreiber 0,1 Cent per Kilowattstunde einzahlen. Bis Anfang 2008 sind Projektkosten in Höhe von ca. 8 Milliarden US\$ angefallen. Die Lösung anhand eines vom Staat verwalteten Fonds hat sich als problematisch erwiesen, da die Ausgaben für das Projekt über das Bundesbudget laufen und das Budgetdefizit unmittelbar erhöhen, wodurch ein Hindernis für eine zügige Allokation der notwendigen Mittel entstanden ist.

Finnland: Olkiluoto

In Finnland wird das erfolgreichste Endlagerprogramm Europas betrieben. Dies ist nicht zuletzt eine Folge der speziellen Bedingungen in einem großen, sehr dünn besiedelten Land mit weitgehend einheitlichen, günstigen geologischen Gegebenheiten. Dadurch ist es im Prinzip in Finnland nahezu überall möglich, sichere Endlager zu errichten. Andererseits sind im Wesentlichen keine Wirtsgesteinalternativen zu dem Granit des skandinavischen Schildes vorhanden, so dass sich eine Diskussion über das „beste“ Wirtsgestein erübrigt. Diese Faktoren und die sehr positive Haltung der finnischen Bevölkerung gegenüber der Nutzung der Kernenergie haben sich in der Vergangenheit als Schlüsselfaktoren für die Endlagerung erwiesen.

In Finnland sind die Abfallverursacher gesetzlich dazu verpflichtet worden, die Entsorgung der radioaktiven Abfälle zu organisieren und durchzuführen. An beiden Kernkraftwerksstandorten Loviisa und Olkiluoto sind daher von den Betreibern Endlager errichtet worden, in denen Betriebsabfälle, später auch Abrissabfälle routinemäßig entsorgt werden. Die ausgedienten Brennelemente der Kernkraftwerke Olkiluoto 1 und 2 werden am Standort zwischengelagert, die von Loviisa 1 und 2 wurden anfänglich zur Sowjetunion zurück transportiert. Nach Unterbrechung der Rücktransporte werden diese zur Reduktion der Nachzerfallswärme auch am Standort zwischengelagert zur Reduktion der Nachzerfallswärme.

Erste Durchführbarkeitsstudien wurden bereits 1977 durchgeführt. Die Ziele und der Zeitplan für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in Finnland wurden von der Regierung im Jahre 1983 festgelegt. Im Rahmen der Standortsuche wurden in der darauffolgenden Zeit mehrere Standorte in Zentral- und Südfinnland untersucht. Aufgrund der deutlich positiven Haltung der Bevölkerung gegenüber Endlagern an den Kernkraftwerksstandorten selbst wurde später die Suche auf Gemeinden in direkter Nachbarschaft zu Loviisa und Olkiluoto beschränkt. Im Jahre 1995 bündelten die Elektrizitätsversorger Teollisuuden Voima Oy (TVO)

und Fortum Power Heat Oy deren Endlageraktivitäten in der Firma Posiva Oy. Posiva sollte sich um die Standortauswahl kümmern, die für die Endlagerung notwendigen F&E Arbeiten durchführen und später das Endlager bauen und betreiben. TVO hält einen Anteil von 60% in der gemeinsamen Firma, Fortum die restlichen 40%. Somit ist Posiva nicht die Endlagerorganisation Finnland, sondern die der genannten Elektrizitätsversorger.

Der Standort Olkiluoto wurde 2000 für die Endlagerung aller finnischen ausgedienten Brennelemente von Posiva ausgewählt und der Regierung vorgeschlagen. In einer Grundsatzentscheidung wurde 2001 ein Standort auf der Insel Olkiluoto in der Nähe des gleichnamigen



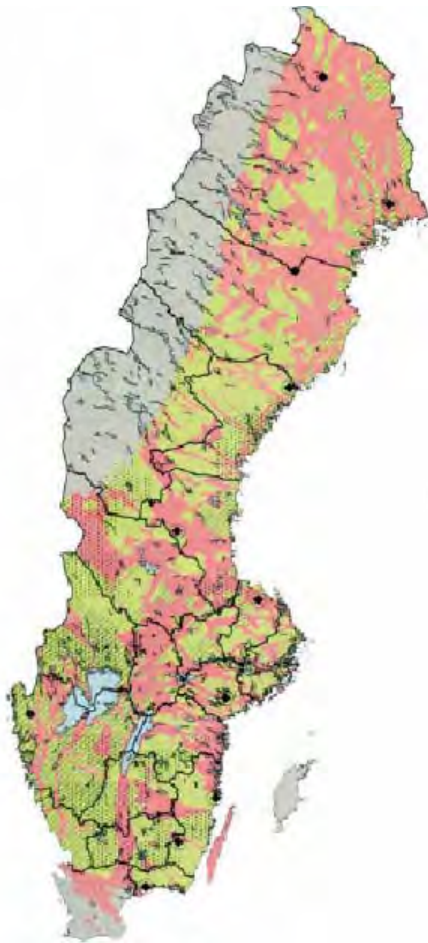
Kernkraftwerks von der finnischen Regierung ausgewählt und vom Parlament bestätigt. Im Sommer 2004 begann Posiva mit dem Bau von Onkalo, ein Erkundungsbergwerk mit dem die Eignung des Standortes bestätigt werden sollte. Die Abbildung (Quelle Posiva) zeigt Onkalo im Vordergrund und im Hintergrund die Kernkraftwerke Olkiluoto 1, 2 und 3.

Der Antrag zur Genehmigung des Baus des Endlagers wird für 2012 erwartet, der Antrag für die Betriebsgenehmigung für 2018. Somit könnte Olkiluoto als weltweit erstes Endlager für wärmeerzeugende Abfälle im Jahre 2020 den Einlagerungsbetrieb aufnehmen. Das Endlager wird zur Aufnahme der ausgedienten Brennelemente von 50 Jahren Betrieb der Kernkraftwerke Loviisa 1 und 2 sowie von 60 Jahren Betrieb von Olkiluoto 1, 2 und 3 vorbereitet. Da in Finnland der Bau weiterer Kernkraftwerke geplant ist, wird das Endlager Olkiluoto so gebaut werden, daß es auch für die Aufnahme der Abfälle aus den Kernkraftwerken Olkiluoto 4 und Loviisa 3 vorbereitet ist.

Die Finanzierung der Entsorgung wird in Finnland durch einen gesonderten Fonds sichergestellt, der von einer unabhängigen Institution verwaltet wird, der die Mittel sehr konservativ investiert. Im Fonds wird ein getrenntes Konto für jeden Abfallverursacher geführt. Diese können sich einen großen Teil der Fondsmittel ausleihen und damit die eigenen Aktivitäten finanzieren. Wie in den USA, gibt es in Finnland auch eine unabhängige Genehmigungsbehörde, STUK, die nur Genehmigungsaufgaben wahrnimmt.

Schweden: Forsmark oder Oskarshamn

Nach anfänglichen Schwierigkeiten führt auch Schweden ein sehr erfolgreiches Endlagerprogramm. Auch hier wird die Standortsuche durch die Größe des Landes und die geringe Bevölkerungsdichte stark erleichtert. Zudem führt die weitgehend einheitliche Geologie dazu, daß eine Diskussion der Vor- und Nachteile verschiedener Wirtsgesteine sich mangels Alternativen wie in Finnland erübrigt. Eine weitere Gemeinsamkeit beider Länder ist die Tatsache, daß der Staat bereits sehr früh die Verantwortung für die Abfallentsorgung den Abfallverursachern auferlegt hat. Diese haben mit der Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) eine spezialisierte Gesellschaft gegründet, die die notwendigen Entsorgungseinrichtungen baut und betreibt. Der Staat selbst setzt den gesetzlichen Rahmen, u.a. die Schutzziele, überwacht deren Einhaltung, und erteilt die entsprechenden Genehmigungen.



- Probably suitable bedrock
- Probably unsuitable bedrock

Diese haben mit der Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) eine spezialisierte Gesellschaft gegründet, die die notwendigen Entsorgungseinrichtungen baut und betreibt. Der Staat selbst setzt den gesetzlichen Rahmen, u.a. die Schutzziele, überwacht deren Einhaltung, und erteilt die entsprechenden Genehmigungen.

Die Aktivitäten der SKB werden durch einen von den Abfallverursachern unabhängigen Fonds finanziert, in den die Elektrizitätsversorger Beiträge in getrennte Konten einzahlen. Diese werden so bestimmt, dass die Deckung zukünftiger Entsorgungskosten jederzeit gesichert ist. Durch weitere Mechanismen (Bankbürgschaften) wird für eine eventuelle Insolvenz der Abfallverursacher vorgesorgt.

Eine Besonderheit Schwedens ist die Organisation des Staates mit nur zwei Verwaltungsebenen, die Zentralregierung und die Municipalities oder Gemeinden. Die Ansiedlung von industriellen Anlagen oder großen Infrastruktureinrichtungen, etwa Kraftwerken oder ähnliches, bedarf der Zustimmung der Standortgemeinden. Zwar hat die Zentralregierung für die Auswahl eines Endlagerstandortes mit dem

Vetoventil im Environmental Code die Möglichkeit, eine negative Entscheidung der betroffenen Municipality außer Kraft zu setzen. Jedoch würde eine solche Regierungsentscheidung entgegen dem Willen der Gemeinde nicht dem üblichen Umgang in Schweden entsprechen und hat auch bisher nicht stattgefunden. Somit ist die Realisierung eines Endlagers nur mit der ausdrücklichen Zustimmung der Standortgemeinde beabsichtigt.

Zwischen 1977 and 1985 fanden Erkundungsbohrungen an 10 verschiedenen Standorten statt. Der Widerstand war regional stark unterschiedlich. In den Jahren 1993 bis 1997 wurden Durchführbarkeitsstudien in zwei Gemeinden im Norden des Landes, Storuman and Malå durchgeführt. Es wurden 1995 und 1997 regionale Referenden abgehalten, und die Bevölkerung lehnte mit ca. 70% respektive 53 % die Realisierung eines Endlagers in diesen Gemeinden ab. Daraufhin konzentrierte SKB zwischen 1995 und 2001 die Standortsuche auf den Süden des Landes und dort auf sechs Gemeinden mit kerntechnischen Einrichtungen: die Standortgemeinde des Kernkraftwerks Forsmark, Östhammar, in dem sich auch das Endlager für leicht- und mittelaktiven Abfall SFR befindet, sowie zwei Nachbargemeinden (Thierp und Älvkarleby); Oskarshamn, die Standortgemeinde des gleichnamigen Kernkraftwerks und des Brennelement-Zwischenlagers CLAB sowie die Nachbargemeinde Hultsfred; und schließlich die Gemeinde Nyköping, in dem die Anlagen von Studsvik sich befinden. Zwischen 2002 und 2007 konzentrierten sich die Untersuchungen auf Oskarshamn und Östhammar.

Die Erkundung dieser zwei Standorte von der Oberfläche aus ist bereits beendet worden; gegenwärtig werden die Erkundungsergebnisse einer eingehenden Prüfung unterworfen. Die Entscheidung für den Bau eines Erkundungsbergwerks an einem der zwei Standorte, daß wie in Finnland bei Bestätigung der Standorteignung später Teil des Endlagers selbst wird, wird für 2009 erwartet. SKB legt Wert auf die Feststellung, daß die Bewertung nicht auf Basis vorher festgelegter Kriterien stattfindet. Die Ergebnisse werden vielmehr in ihrer Gesamtheit betrachtet und einer ganzheitlichen Bewertung unterzogen.

In den Jahren nach der Standortentscheidung wird das Erkundungsbergwerk aufgefahren und bei Bestätigung der Eignung das Endlager gebaut. Da im Falle eines Endlagers im Granit die geologische Formation nicht die Hauptbarriere zur Radionuklidausbreitung ist, ist eine Änderung der Eignungsbeurteilung relativ unwahrscheinlich. SKB beabsichtigt das Endlager etwa im Jahre 2020 in Betrieb zu nehmen.

Schlussbemerkungen

Mit Yucca Mountain in den USA, Olkiluoto in Finnland und Forsmark/Oskarshamn in Schweden sind drei Projekte für die Endlagerung von wärmeerzeugenden Abfällen in fortgeschrittenem Stadium. Diese Endlager werden voraussichtlich um das Jahr 2020 in Betrieb gehen (in Deutschland sieht die Bundesregierung gegenwärtig keinen Bedarf für ein Endlager für wärmeerzeugenden Abfall vor 2030-2035). Auch in Frankreich sind erhebliche Fortschritte in der Endlagerung zu verzeichnen. Das Planungsgesetz vom 28. Juni 2006 schreibt vor, daß ein Genehmigungsantrag im Jahre 2015 vorzulegen ist. Das Endlager, das sich voraussichtlich in der Nähe des Standortes des Untertageabbaus Bure befinden wird, soll um 2025 in Betrieb gehen.

Basis des Erfolges in den genannten Ländern ist nicht zuletzt die entschlossene, positive Haltung der Regierungen und der Endlagerorganisationen. Insbesondere in Schweden und Finnland ist es den Endlagerorganisationen der Kernkraftwerksbetreiber, SKB und Posiva, vorbildhaft gelungen, in einem fruchtbaren Dialog mit der Bevölkerung eine große Akzeptanz für die Endlagerprojekte zu erzeugen. Auch unter Berücksichtigung der genannten Besonderheiten dieser Länder lassen sich wertvolle Lehren für die Fortführung der Endlagerprojekte in Deutschland ziehen.

Akzeptanz durch die Bevölkerung ist unerlässlich. Dass jedoch Endlagerprojekte auf freiwilliger Basis nicht per se zielführend sind, beweist das japanische Beispiel. Dort bemüht sich die Endlagerorganisation NUMO seit 2002 mit großem Aufwand um Gemeinden, die sich um die Ansiedlung eines Endlagers auf ihrem Territorium bewerben. Bisher gab es keinen Interessenten.

Internationaler Stand der Endlagerung radioaktiver Abfälle

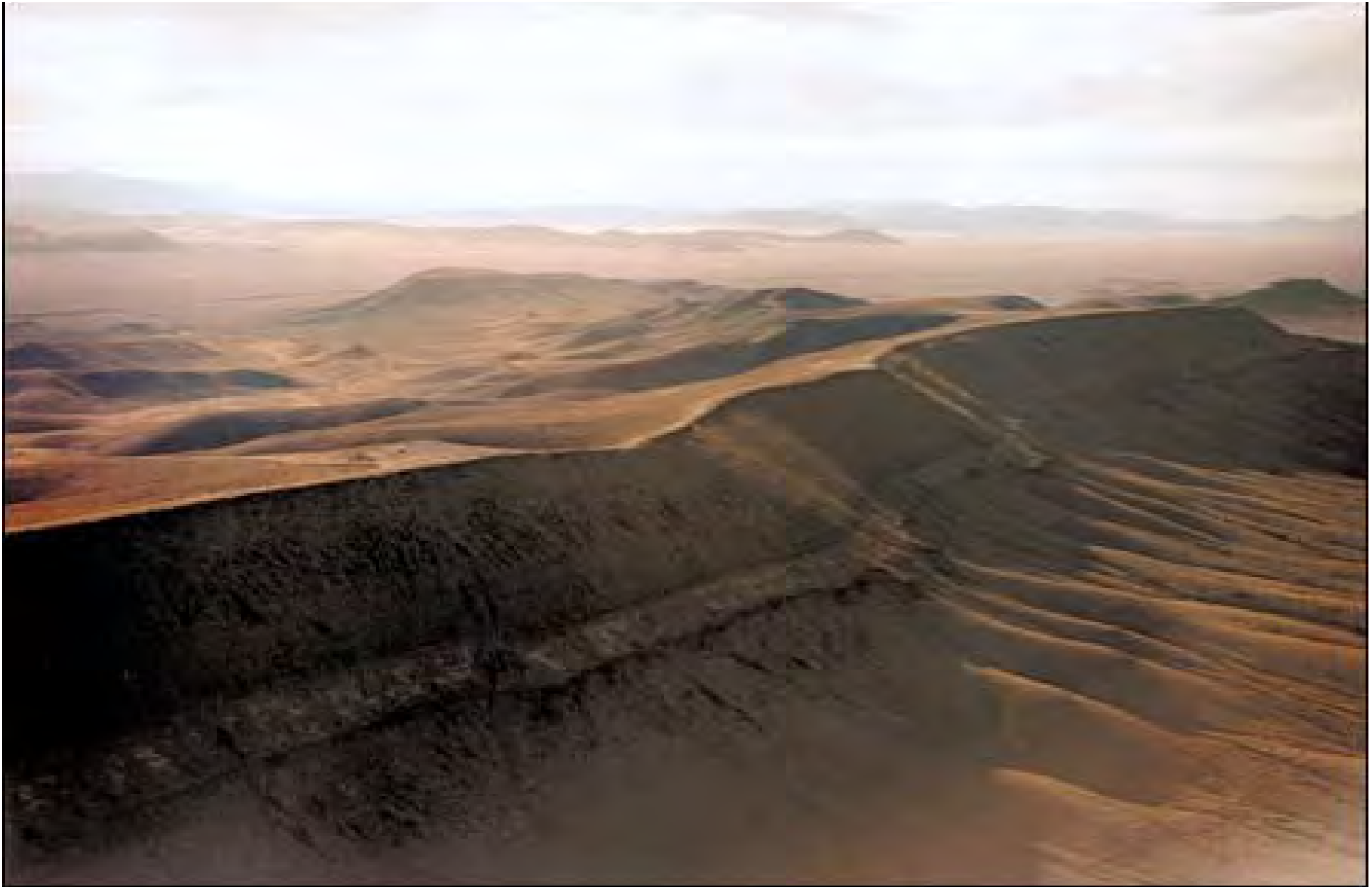
== I. HAW und ausgediente Brennelemente ==

- **Yucca Mountain, USA**
- **Olkiluoto, Finnland**
- **Gorleben, Deutschland**
- **Oskarshamn/Forsmark, Schweden**
- **Bure, Frankreich**
- **???, Japan**



Yucca Mountain

Dr. E. Biurrun / 10.6.2008



Yucca Mountain

Dr. E. Biurrun / 10.6.2008



Yucca Mountain

Dr. E. Biurun / 10.6.2008





Yucca Mountain Timeline

- **1975 vom Bundesstaat Nevada als Standort vorgeschlagen**
- **1982 NWPA verabschiedet: mehrere Standorte**
- **1986 Erkundung vom Kongreß bestätigt: nur YM**
- **2002 nach Eignungsaussage vom Präsidenten dem Kongreß als Endlagerstandort empfohlen**
- **2002 Veto von Bundesstaat Nevada**
- **2002 von beiden Kongreßkammern bestätigt**
- **2002-2008 Vorbereitung der License Application**
- **2007 Erstellung der LASN**



Yucca Mountain Timeline

- **2008 3. Juni: LA Genehmigungsantrag eingereicht**
- **2017 Frühestmögliche Einlagerungsbeginn**
- **2008 M&O Vertrag neu ausgeschrieben**
- **2008-2011 NRC Prüfung und LA Ergänzungen**
- **2012 Construction?**
- **2017 Frühest-mögliche Inbetriebnahme**
- **2021 Most-likely Endlagerungsbeginn**



Yucca Mountain Organization

- **Verantwortlich für die Endlagerung ist DOE**
- **DOE – EM (WIPP), DOE – OCRW (YM)**
- **Genehmigungsbehörde ist die NRC**
- **Schutzziele werden von EPA definiert**
- **CFR beinhaltet konkrete Anforderungen an das Genehmigungsverfahren**
- **Schutzziele erfolgreich beklagt (10000 a)**
- **Neue Schutzzieldefinition in Vorbereitung**



Yucca Mountain Finanzierung

- **Fonds-Lösung bezahlt vom Verursacher**
- **1 Mil. per KWh**
- **Bisherige Kosten ca. 8 Milliarden US\$**
- **Budgetbeschränkungen**
- **Senator Harry Reid-Appropriations Committee**
- **Defizit-Wirksamkeit der YM Ausgaben**
- **Gesamtkosten ca. \$ 80 Milliarden**



Yucca Mountain Challenges

- **Abfalltransport: Caliente Corridor**
- **Opposition der Regierung in Nevada sowie der Spielbanken in Las Vegas**
- **Gegensatz Clark County – Nye County**
- **Gerichtsverfahren Abfallannahme 1998**
- **Budget, Senator Reid, Defizit**



Yucca Mountain Current Milestones

Design for License Application (LA) Complete - Nov. 2007

→ Actual: Completed 12/1/07

Licensing Support Network (LSN) Certification – Dec. 2007

→ Actual: October 19, 2007

Supplemental Environmental Impact Statement - May 2008

→ Actual: Draft Issued October 2007/Hearings completed

Radiation Protection Standard

→ Expected to be released by the EPA in 2008

License Application Submittal to the NRC - June 2008 (6/3/08)



Olkiluoto Timeline

- **1977** Begin von Durchführbarkeitsstudien
- **1983** Regierungsentscheidung über Ziele und Zeitplan
- **2000** Standortentscheidung
- **2001** Grundsatzentscheidung von Regierung und Parlament
- **2001** Baubeginn Erkundungsbergwerk ONKALO
- **2012** Antrag auf Baugenehmigung
- **2018** Antrag auf Betriebsgenehmigung
- **2020** Betriebsbeginn



Olkiluoto Finanzierung

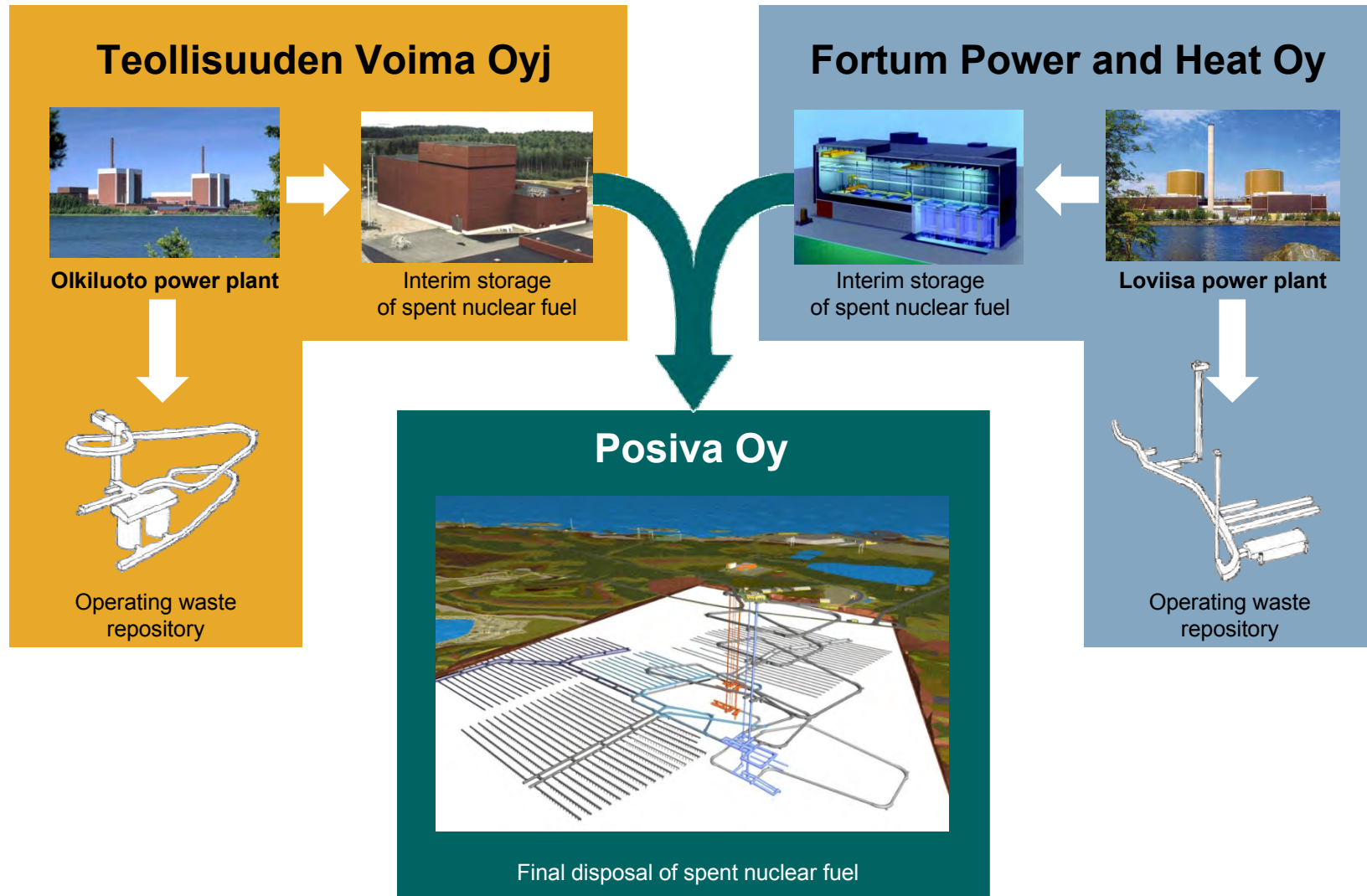
- **Verantwortlich für die Endlagerung sind die Abfallverursacher**
- **Finanzierung über Endlagerfond (unabhängig)**
- **TVO und Fortum haben Entsorgungsaufgaben auf POSIVA übertragen**
- **Genehmigungsbehörde ist STUK**
- **Abfallverursacher können (teilweise) Fondsgelder ausleihen**



Olkiluoto

Dr. E. Biurrun / 10.6.2008

Implementation of waste management





General design conditions

Fortum

Loviisa 1-2
operation 50 y



1000 tU

TVO

Olkiluoto 1-2
operation 60 y



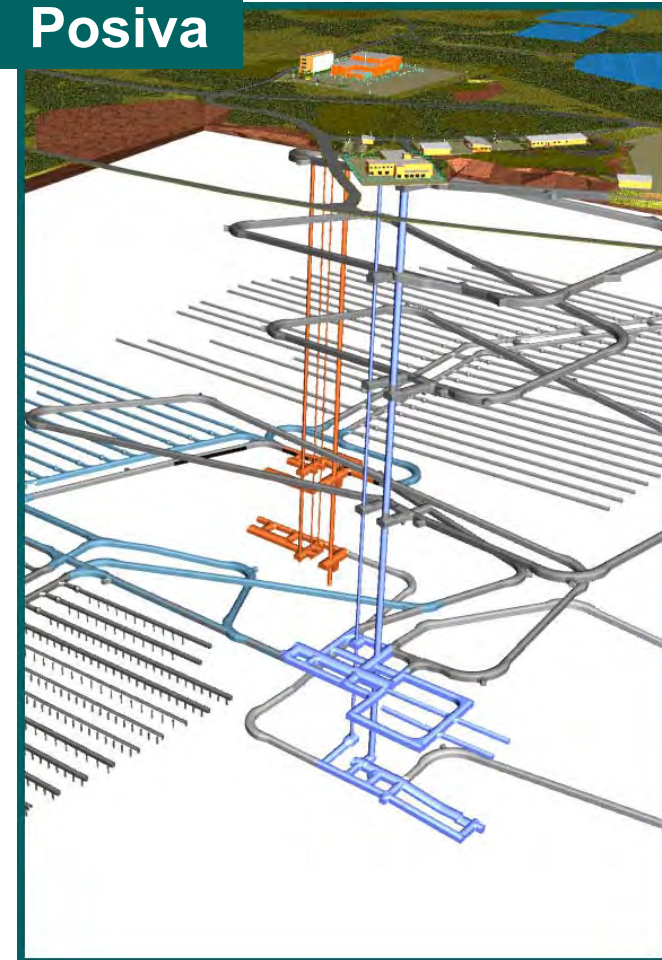
2500 tU

Olkiluoto 3
operation 60 y

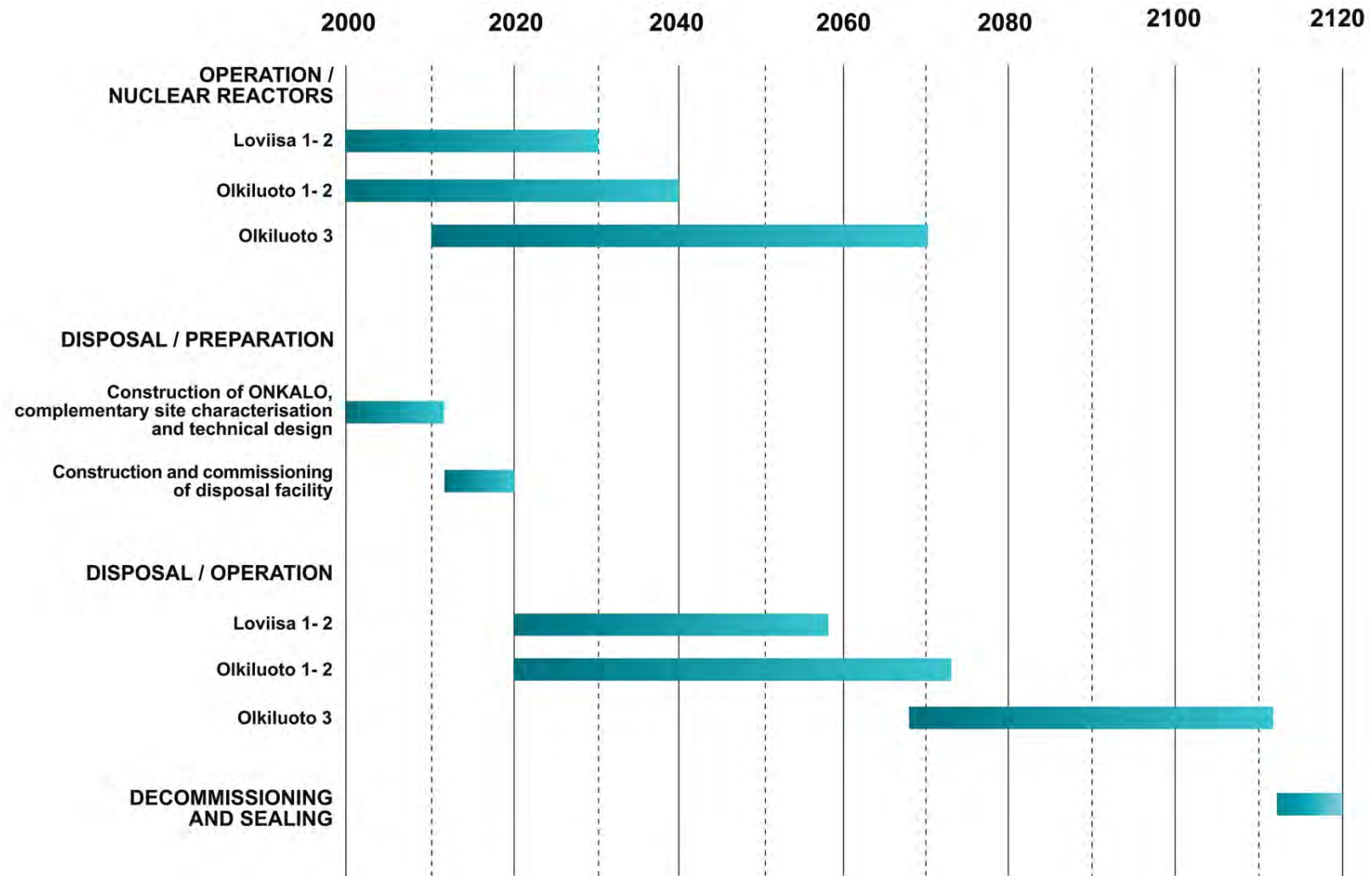


2000 tU

Posiva



Schedule of spent fuel disposal



Costs of final disposal

- Total about 3,010 M€
 - Investments 630 M€
 - Operation 2,140 M€ (until year 2120)
 - Decommissioning 240 M€
- Basic assumption
 - Some 5,500 tonnes of uranium accumulated in spent fuel during 50-60 years of operation in NPPs
 - All costs calculated in December 2006 level and representing overnight costs at this moment

New nuclear power plant projects in Finland and Posiva

- Posiva is responsible for the final disposal of spent nuclear fuel of its owners – TVO and Fortum.
- TVO and Fortum are conducting Environmental Impact Assessment (EIA) procedures for potential new NPP units (Olkiluoto 4 / Loviisa 3).
- If implemented, these would be the sixth and the seventh unit of the owners ("FIN6" and "FIN7").
- The owners have commissioned Posiva to conduct the necessary environmental impact assessment for the final disposal of spent fuel from FIN6 and FIN7.

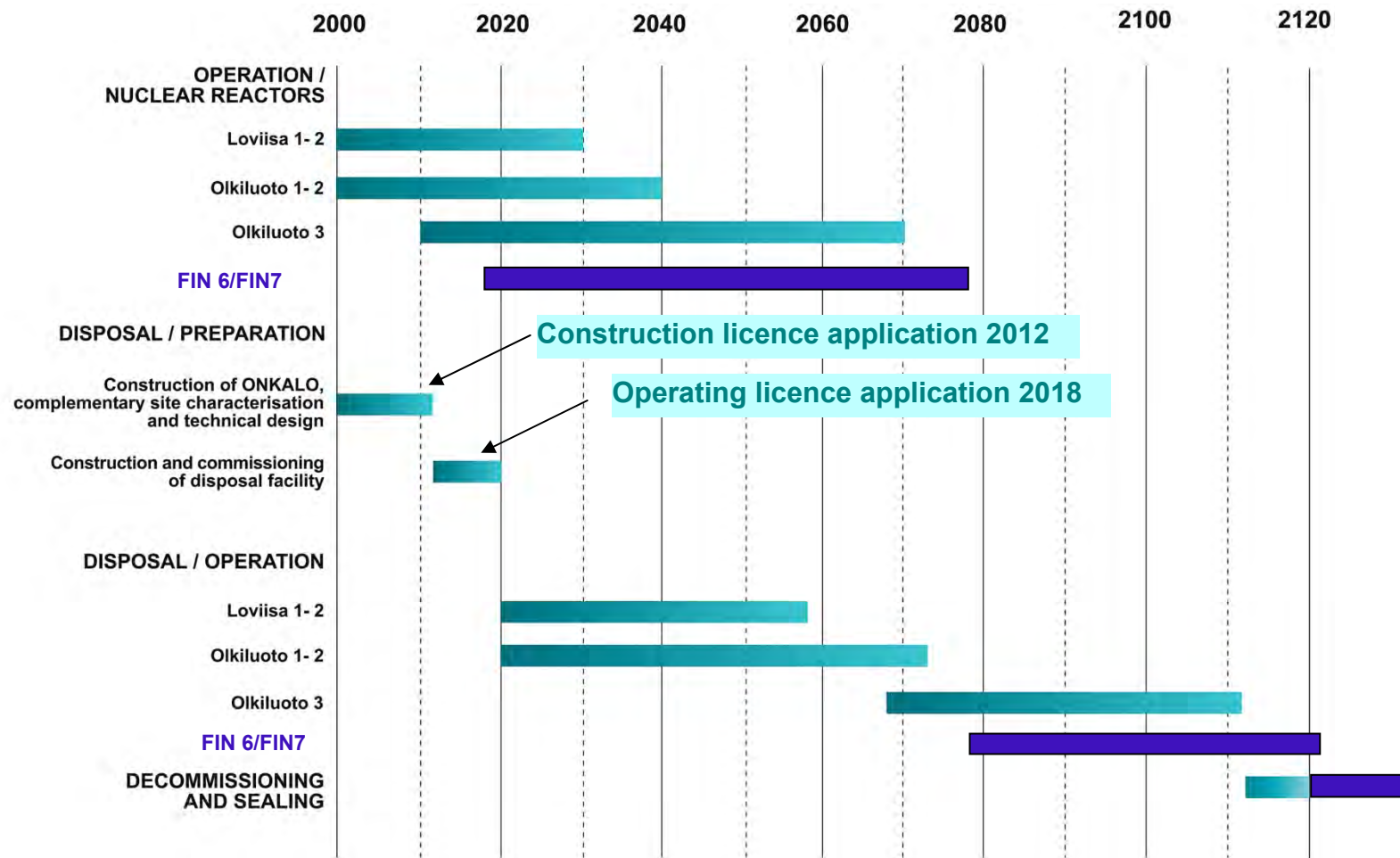
Why does Posiva conduct a new EIA procedure?

- The EIA procedure finalised by Posiva in 1999 already covered final disposal of spent fuel from six nuclear power plant units, or a total of 9 000 tU.
- This quantity covers also the planned sixth NPP unit (FIN6).
- For FIN6, an update of the previous EIA report is needed.
- If a seventh NPP unit is built (FIN7), a new EIA procedure is required for the final disposal of spent fuel generated by that unit.
- The estimated fuel quantity for FIN7 is 3 000 tU.
- Total amount of fuel for final disposal is 12 000 tU.

Posiva's new EIA procedure

- Undertaking
 - Extension of final disposal facility to be built in Olkiluoto by 3 000 tU to accommodate 12 000 tU in total.
- Alternatives
 - Decisions-in-Principle ratified by Finnish Parliament on the construction of the final disposal facility apply to a total quantity of 6 500 tU of spent fuel.
 - The validity of the previous EIA procedure for a total of 9 000 tU has been confirmed by a separate decision of the Ministry of Trade and Industry.
 - The zero alternative under review is the final disposal of this 9 000 tU of spent fuel.

New Schedule of spent fuel disposal





Olkiluoto

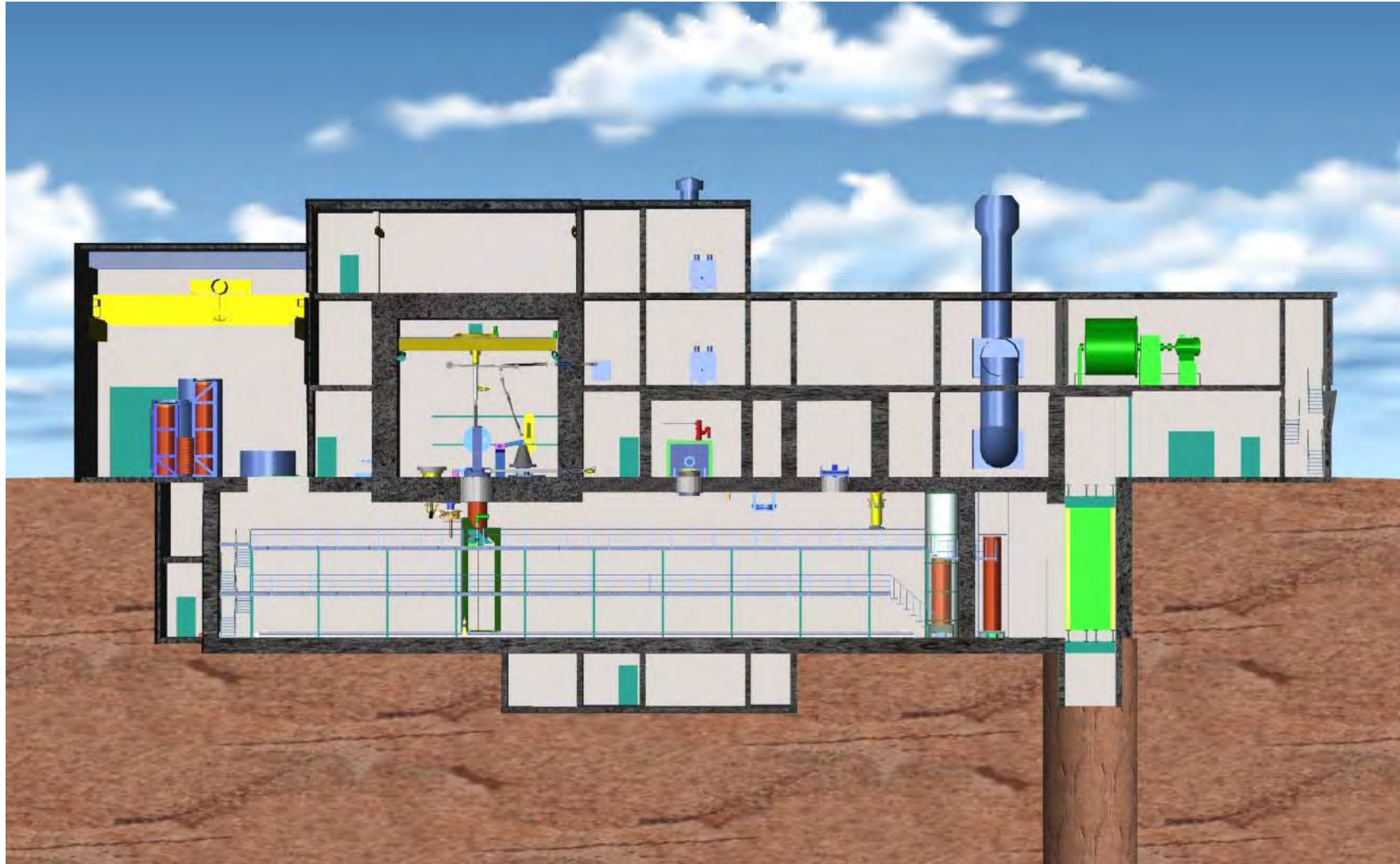
Dr. E. Biurun / 10.6.2008

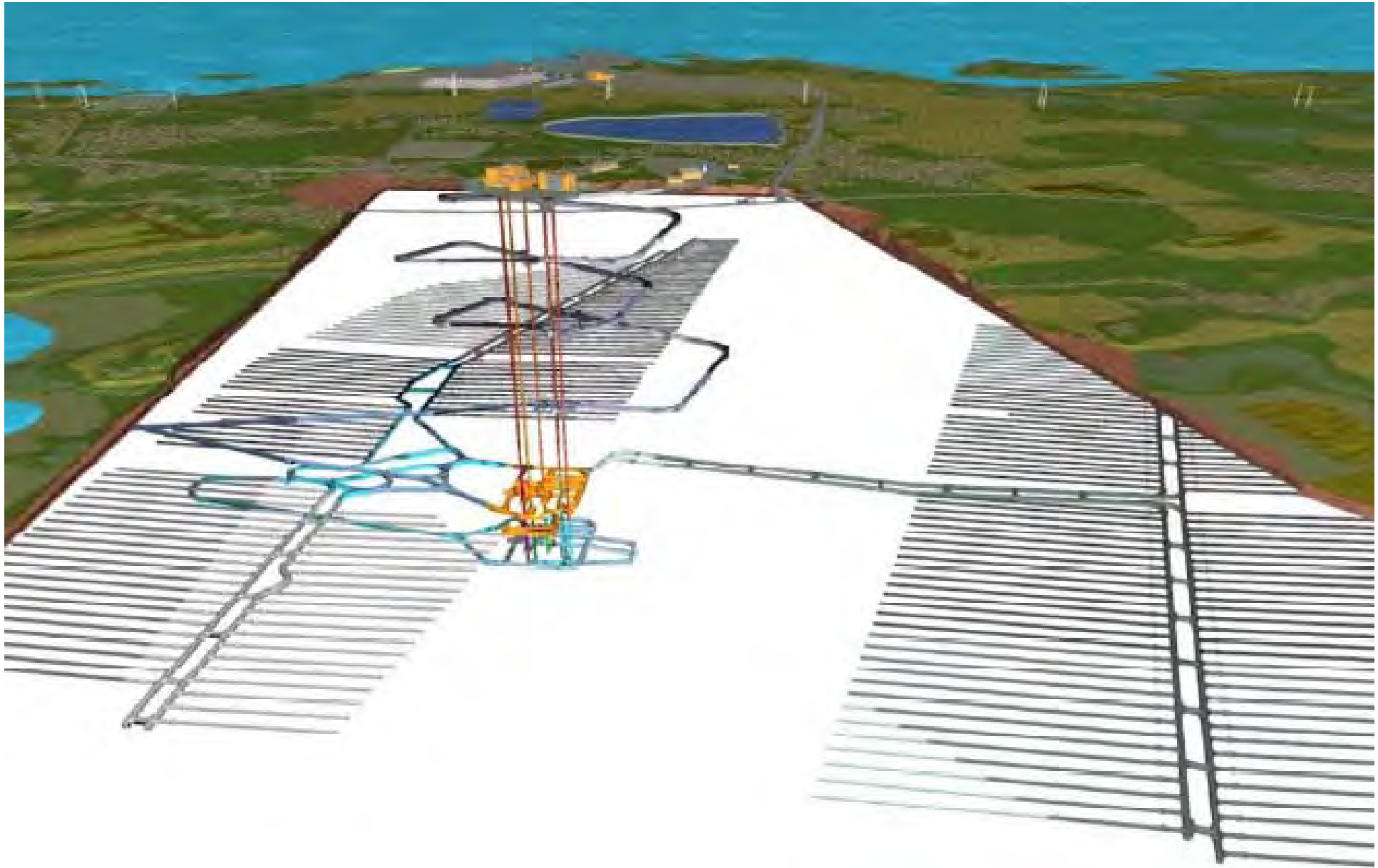


Olkiluoto

Dr. E. Biurrun / 10.6.2008

Encapsulation plant





Olkiluoto

Dr. E. Biurun / 10.6.2008



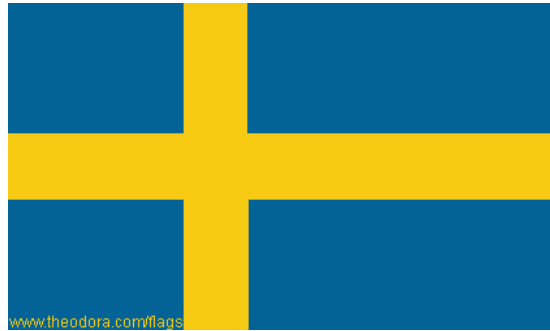
Gorleben

- **1977 Standortauswahl durch Niedersachsen**
- **1979 Standortbestätigung durch Bundesregierung**
- **1979 Beginn der Standorterkundung**
- **1986 Beginn der untertägigen Erkundung**
- **1996 Untertage Verbindung zwischen Schacht 1 und 2**
- **2000 Erkundung EB1 vollendet**
- **2000 Moratorium für 3 bis 10 Jahre**
- **2008 ?????**



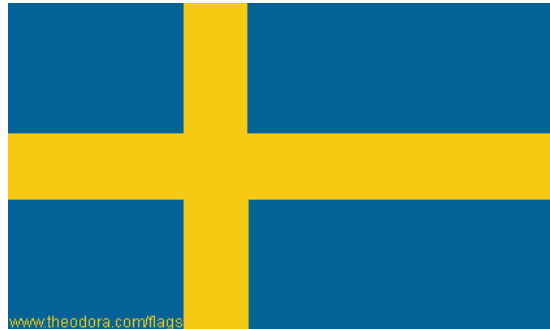
Gorleben

Dr. E. Biurrun / 10.6.2008



Oskarshamn – Forsmark Timeline

- **Durchführbarkeitsstudien an 4 Standorten (achtziger/neunziger)**
- **Fokussierung auf Oskarshamn, Forsmark und Thierp nach Ablehnung durch Standortgemeinden**
- **2002-2007 Erkundung von Übertage in Oskarshamn Forsmark (Thierp aufgegeben)**
- **2006 Genehmigungsantrag Encapsulation Plant**
- **2009 Standortentscheidung Oskarshamn/Forsmark**
- **2020 Begin der Versuchseinlagerung**



Oskarshamn – Forsmark Finanzierung

- **Verantwortlich für die Endlagerung sind die Abfallverursacher**
- **Finanzierung über Endlagerfond (unabhängig) und Bürgschaften**
- **Vattenfall AB, OKG AB, Forsmark Kraftgrupp AB und Sydsvenska Värmekraft AB haben Entsorgungsaufgaben auf Svensk Kärnbränslehantering AB übertragen**
- **Genehmigungsbehörde ist SKI/SSI**
- **Abfallverursacher können (teilweise) Fondsgelder ausleihen**



Oskarshamn

Dr. E. Biurrun / 10.6.2008

Siting history

- Drilling at about 10 study-sites, 1977-85

Siting of CLAB, 1976-79

Siting of SFR, 1980-83

Siting of Äspö, 1986-89

- Feasibility studies, north 1993-97



Local referenda, 1995 and 1997:
70% and 53% said No

- Feasibility studies, south 1995-2000





Suitability of bedrock for a repository of spent nuclear fuel

-  Probably suitable bedrock
-  Probably unsuitable bedrock



SKB:s conclusion:

A suitable bedrock for a repository could probably be found in most parts of Sweden providing the search area is large enough.

Without a local acceptance it is not possible to establish a repository.

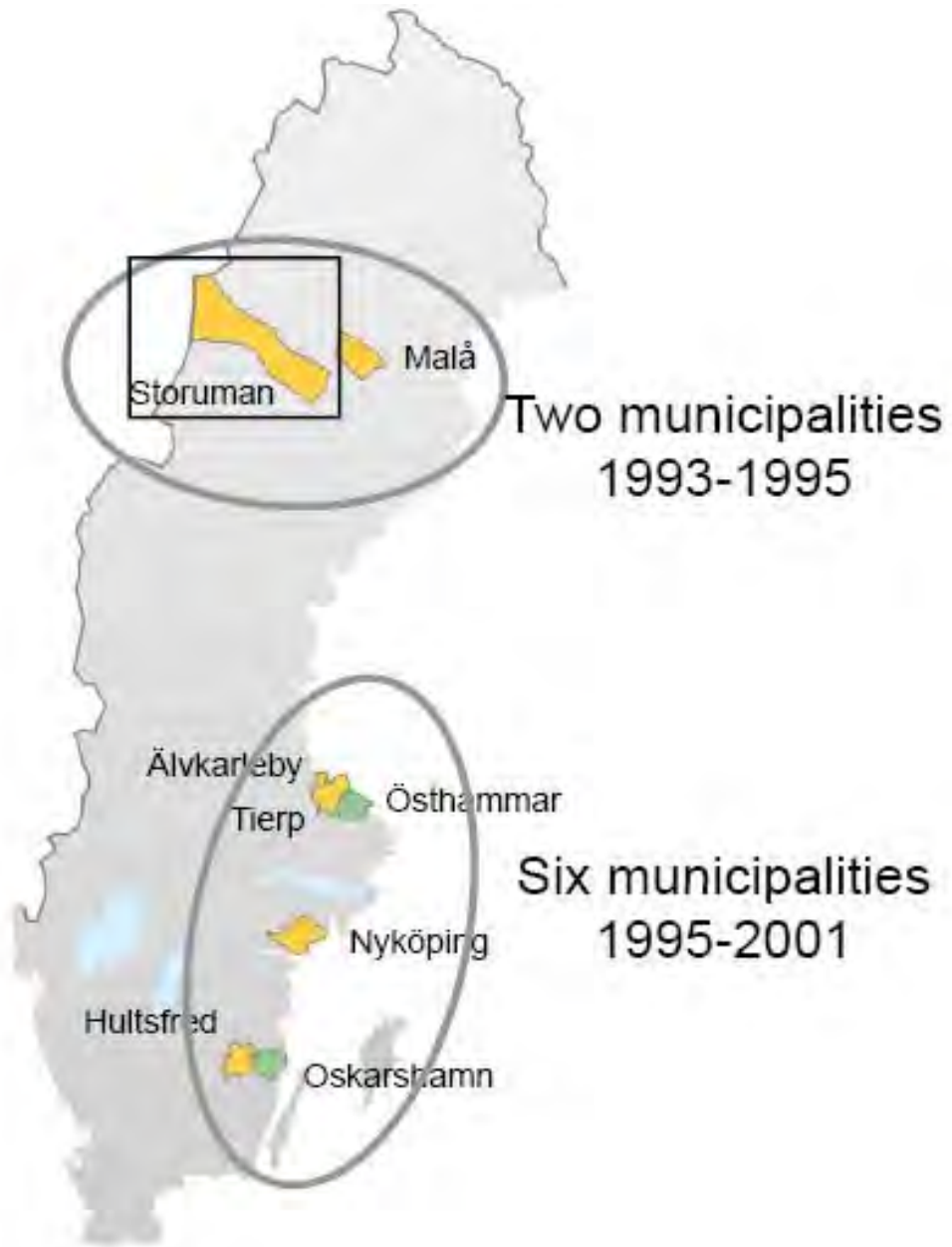
Steps in the siting process



Feasibility studies of voluntary municipalities during 1993–2001



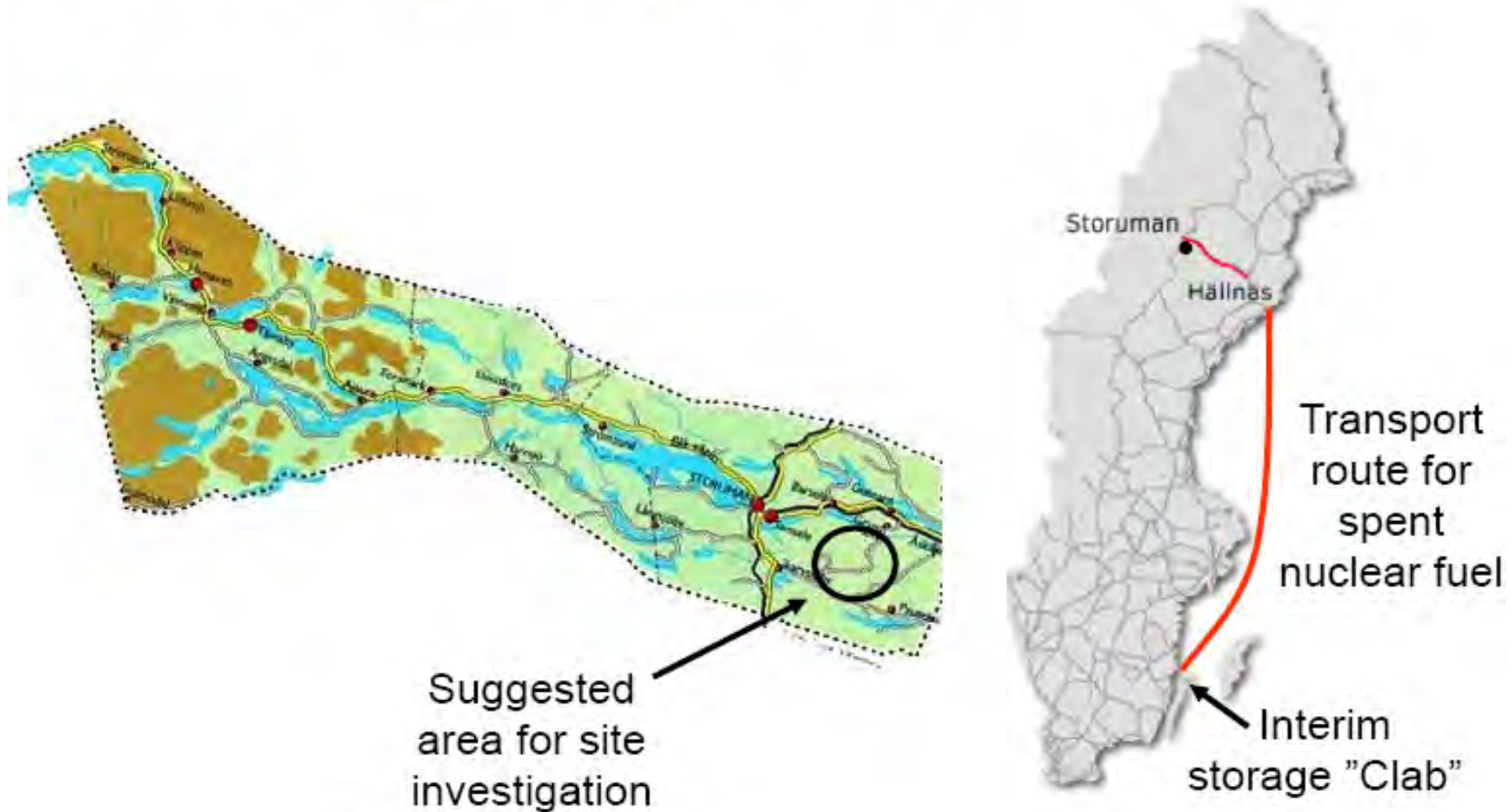
★ Nuclear facilities



**Two municipalities
without nuclear
facilities**

**Six municipalities
with nuclear facilities**

Probable suitable bedrock for site investigation and route for transport of spent nuclear fuel



Storuman municipality holds referendum 1995

”Shall we allow SKB to continue their siting work in Storuman?”

71% says No 28% says Yes

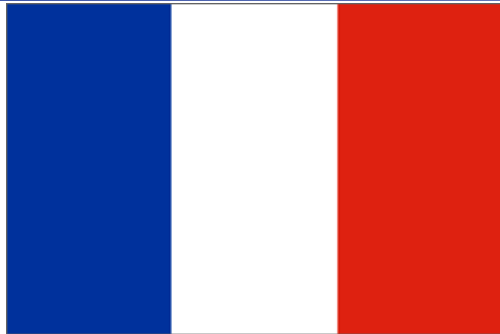
SKB close its local office and leaves Storuman





**2002-2007 Investigation
at two candidate sites:
Forsmark, Oskarshamn**

2009 Site Selection



Bure Timeline

- **1991 – 1998** Mediation für die Auswahl von Standorten für Untertagelaboratorien
- **1998** Baubeginn eines Untertagelabors in Meuse / Haute-Marne (Bure). Andere Standorte aufgegeben
- **2005** Dossier Argille vorgestellt (Endlagerkonzept)
- **2009** Erste Stufe der Standortentscheidung (Eignung)
- **2012** Standortentscheidung (Standort muß mit einem Untertagelabor erkundet worden sein)
- **2015** Genehmigungsantrag



Bure

Dr. E. Biurun / 10.6.2008

Bure – The Development Plan

- *Planning Act of 28 June 2006: license application by 2015* for the implementation of a *geological disposal* facility to be commissioned in 2025
- **Project Development Plan:**
 - **structures** the overall activities designed to meet the objective
 - **describes** the strategy for studies and investigations to be conducted between 2007 and 2015
 - has been presented to the CNE and to the CLIS

Bure – Project Activities

Main deadlines defined for the 2007-2015 period :

2009: Selection of an interest zone (about 30 km²)

Description of the design, safety and reversibility options
Proposal of options for storage

2012: Submission of a Dossier supporting the **Public Debate**

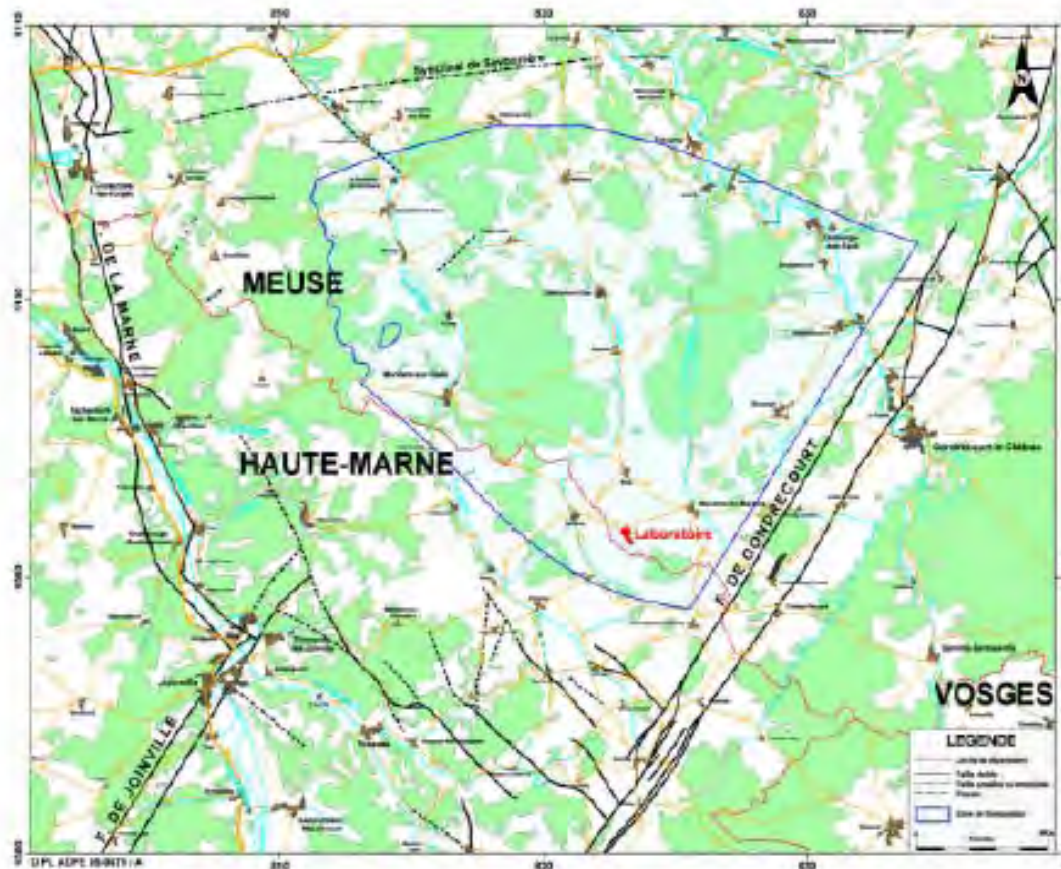
Dossier also used as a support to the site selection

2014: Application for the creation of a deep geological disposal

Consistent with the **Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs** (PNGMDR) updates

Industrial studies launched in 2010 to meet the 2025 target

Progressive approach to the site selection

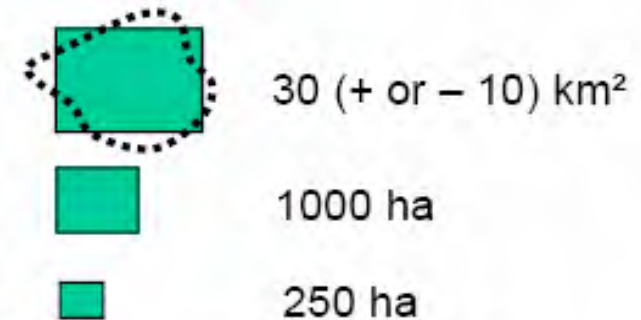


2007-2008 : reconnaissance
of the transposition zone

2009 : selection of a
restricted zone

2010-2011 : reconnaissance
of the 30 km² zone (3D seismic
survey)

2013 : public debate, site
selection



Bure – Project Activities

- Main deadlines : 2009, 2013, 2015
- Research budget 2007 : 89,1 M€, in 2008 : 96,6 M€
- Reconnaissance for the site selection : 14 deep boreholes, among which 1 to the Trias, 2D seismic lines
- Laboratory : 600 m of new galleries to dig, 25 experimentations,
- 230 boreholes, 2000 sensors to be installed
- Scientific program : 9 laboratories groups, partnership agreements



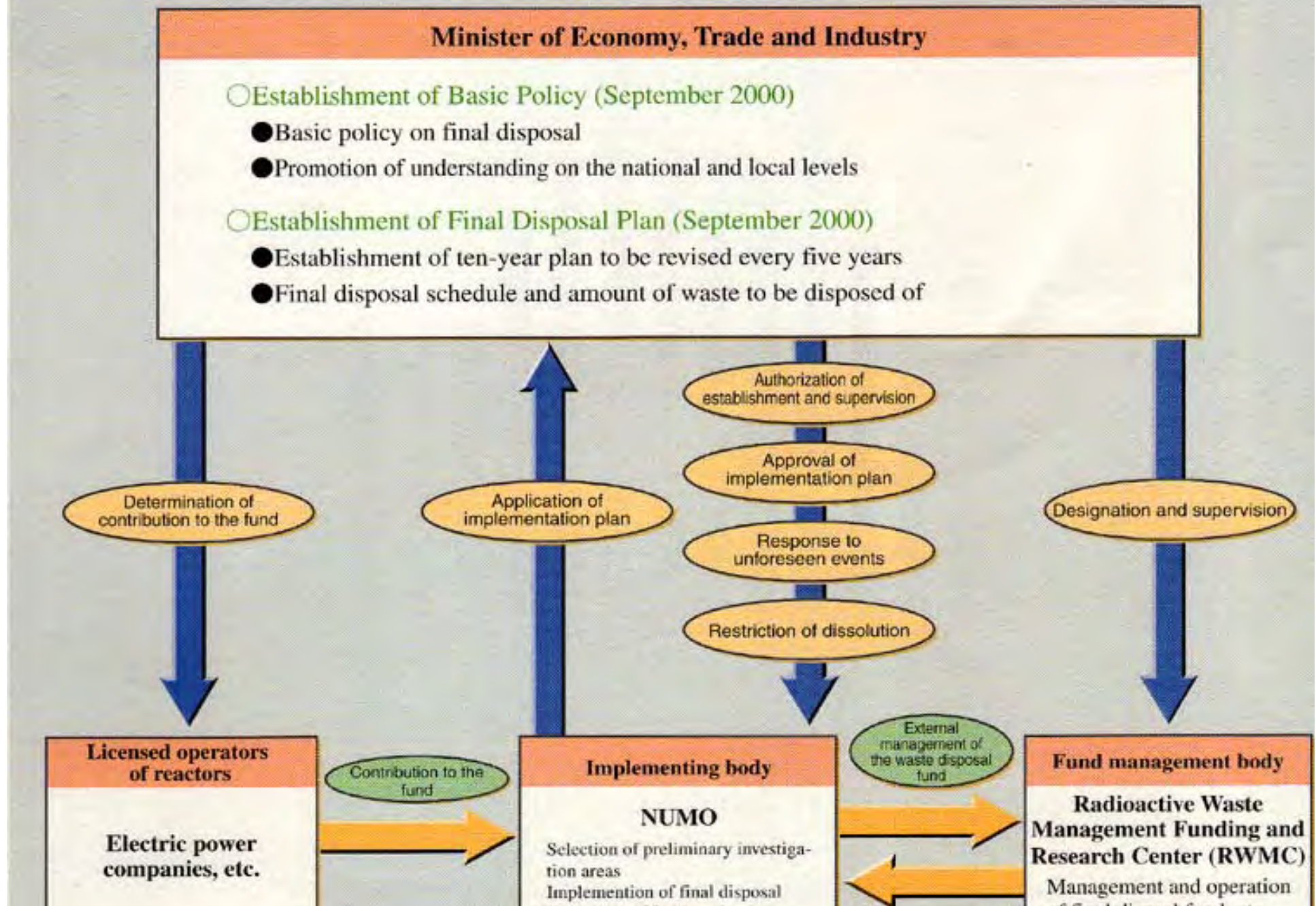
www.theodora.com/flags

Japan Abfallkategorien

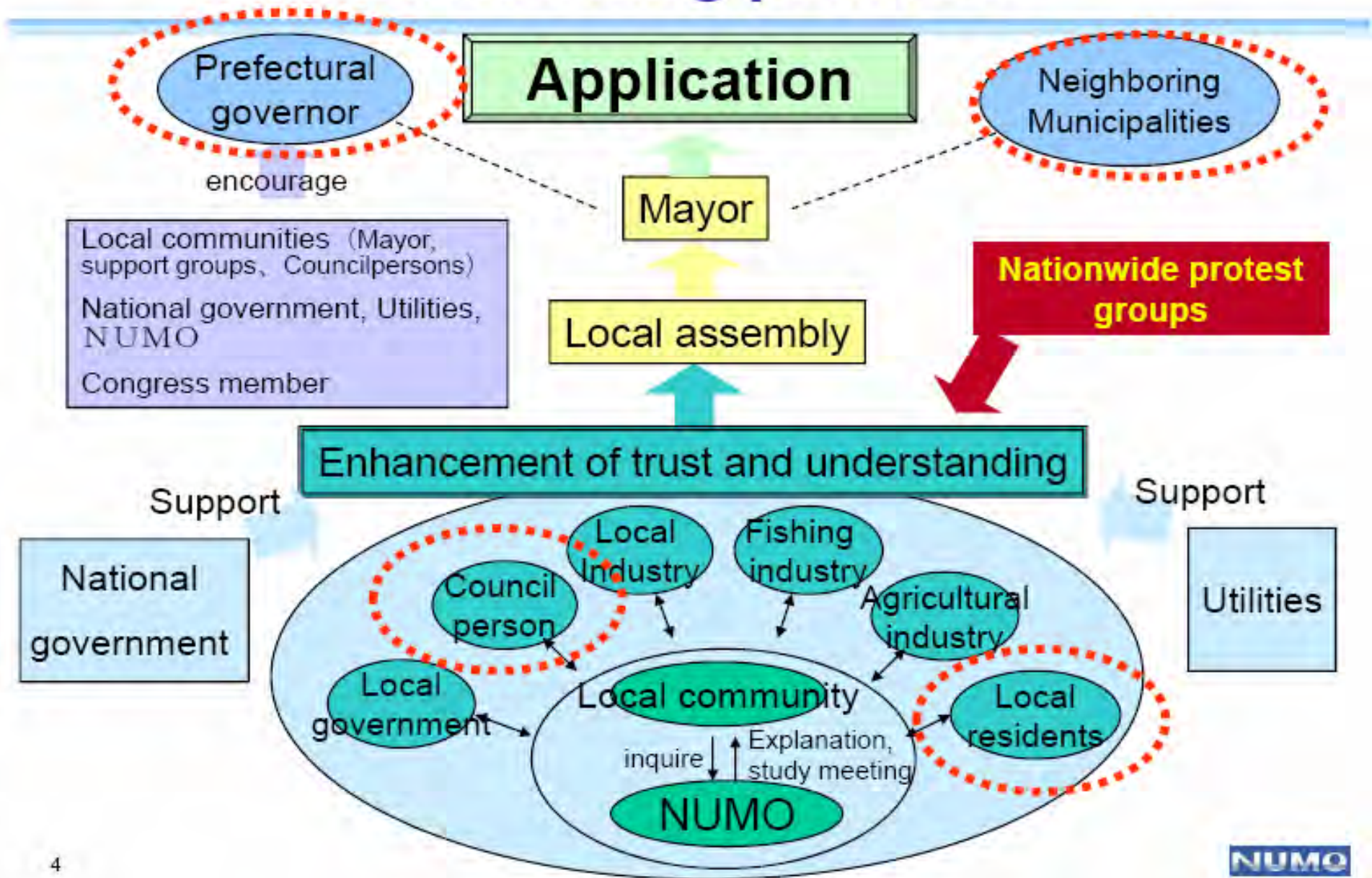
Waste categories			Implementing body
HLW			NUMO
Low-level Waste	TRU*		NUMO
	Waste generated from NPP	Relatively High-level	JNFL
		Relatively Low-level	
Extremely Low-level			

10 *TRU waste stands for Trans-uranium waste

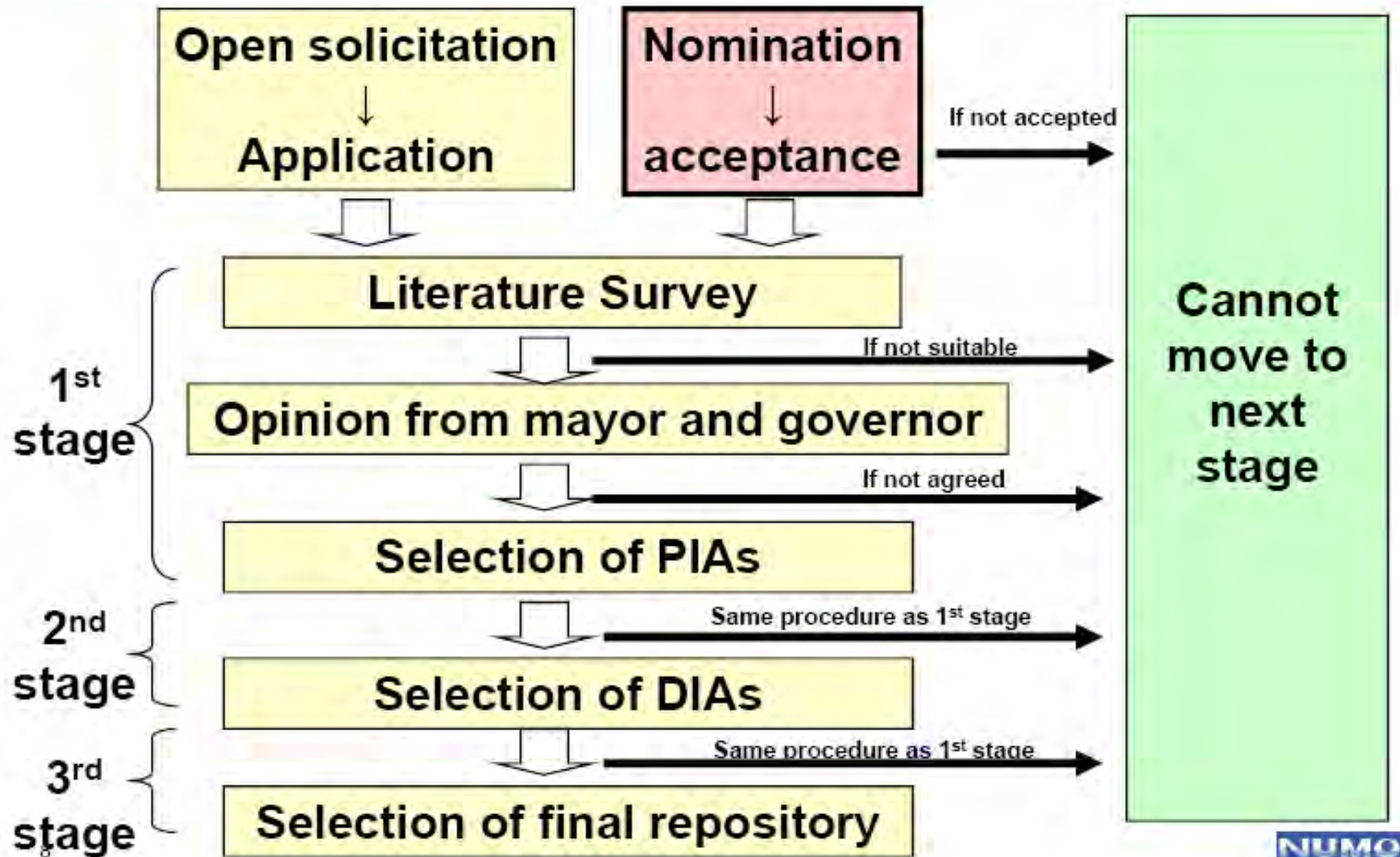
Basic scheme of final disposal operations



Ideal siting process



Siting procedure



NUMO's Siting Activities

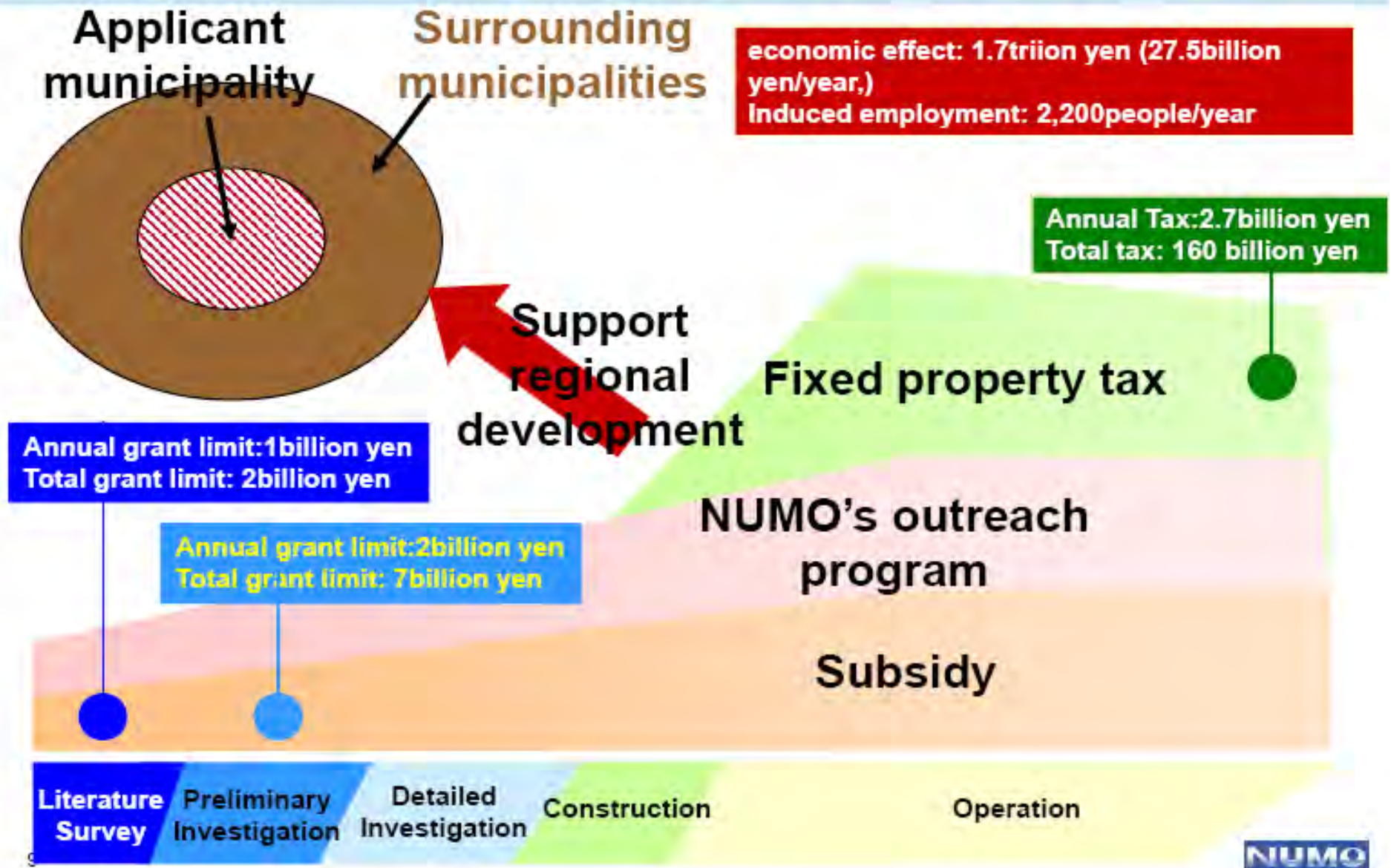
- NUMO announced the commencement of open solicitation of volunteer municipalities on 19 December 2002
- Some movements in several municipalities to apply for the NUMO program, but most of them give up inviting the candidate site.
- Toyo town applied to host the candidate site for Preliminary Investigation Area on January 25, 2007.



Detail about Toyo Town's movement

- Toyo Town's application on January 25, 2007.
- Japanese government's approval of conducting Literature Survey on March 28
- Mayor of Toyo Town's resignation as mayor on April 4
- Toyo mayoral election on April 22
- The candidate, opponent of hosting repository site, defeated former mayor
- The new mayor's withdrawal of the application
- Japanese government's approval of withdrawal annual plan on April 26

Propose a regional development plan



II. LAW und MAW in Europa

- **SFR, Schweden**
- **Olkiluoto und Loviisa, Finnland**
- **Drigg und Dounrey, United Kingdom**
- **Centre d L'Aube und Morvilliers, Frankreich**
- **Konrad, Deutschland**
- **El Cabril, Spanien**
- **Dukovany, Richard und Bratsvy, Tschechien**
- **Mochovce, Slowakische Republik**
- **Puspökszilagy, Ungarn**
- **Baita-Bihor, Rumänien**
- **Baldone, Lettland**
- **Himdalen, Norwegen**
- **Weitere Endlager in Rußland und der Ukraine**

II. LAW und MAW weltweit

- **WIPP, Barnwell, Clive County, Hanford, Nevada Test Site, USA**
- **Kinkardine, Canada**
- **Goiana, Brasilien**
- **Ezeiza, Argentinien**
- **Pelindaba, Südafrika**
- **Rokasho, Japan**
- **Sowie 2 Standorte in China**
- **7 Standorte in Indien**
- **1 Standort in Taiwan**

Entwicklung und Stand von Konzepten für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Steinsalz

Wilhelm Bollingerfehr
DBE TECHNOLOGY GmbH

1 Anfänge der Endlagerplanungen

Erste Ideen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salz gehen zurück auf das Jahr 1955, als die amerikanische National Academy of Sciences / National Research Council ihre bisherigen Untersuchungsergebnisse mit dem Statement „Geological salt deposits seem to offer the least hazard for the disposal of high-level-wastes“ (Folie 3) zusammenfasste. In den Folgejahren wurden auch in Deutschland Untersuchungen in dieser Richtung verfolgt und Mitte der 70er Jahre mit der Standortsuche für ein nukleares Entsorgungszentrum begonnen (Folie 2), bestehend aus Einrichtungen für die Wiederaufarbeitung, Zwischenlagerung und Endlagerung. Für die Endlagerung wurden damals nur Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (HAW-Kokillen und Technologieabfälle) betrachtet. Fast zur gleichen Zeit wurden Forschungsprogramme aufgelegt, um sowohl einen Vergleich von Entsorgungswegen mit und ohne Wiederaufarbeitung, d.h. direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen zu ermöglichen – FuE-Schwerpunkt Andere Entsorgungstechniken - (Folien 8 und 9), als auch die Direkte Endlagerung soweit zu entwickeln, dass diese in den Stand der Technik erhoben wird. 1994 war dieses Ziel erreicht und die Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente wurde im Artikelgesetz anerkannt als alternativer Entsorgungsweg zur Wiederaufarbeitung. Vorangegangen war dieser Gesetzesänderung ein umfangreiches FuE-Programm (Folie 10), in dem sowohl systemanalytische Arbeiten als auch Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung durchgeführt worden waren. Die Schwerpunkte dieses Programms sowie weiterer Entwicklungen im Bereich der Optimierung von Endlagertechnologien werden in den folgenden Kapiteln an einzelnen Beispielen erläutert.

2 Referenz-Endlagerkonzept

Das Referenz-Endlagerkonzept (Folie 11) sieht die Einlagerung von ausgedienten Brennelementen in horizontalen Strecken in einer Teufe von 870 m eines Endlagerbergwerkes im Salz in selbstabschirmenden so genannten POLLUX-Behältern vor (Folie 12). Die Einlagerung von HAW-Kokillen aus der Wiederaufarbeitung ist in vertikalen bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern geplant. Für die Auslegung des Endlagers (Mindestabstände der Bohrlöcher, Strecken und Felder) gilt eine maximale Temperatur von 200° C an der Kontaktfläche zwischen Endlagerbehälter und Salz. Der Zugang zum Endlagerbergwerk erfolgt über zwei Tagesschächte, die zum einen für den Gebindetransport und die Abwetter und zum anderen für Personen- und Materialtransport und die Frischwetter dienen. Die Grubenhohlräume werden insbesondere im

Einlagerungsbereich gebirgsschonend mit Teilschnittmaschinen hergestellt. Die Einlagerungsstrecken für die POLLUX-Behälter und die Strecken für die Einlagerung der Kokillen in vertikalen Bohrlöchern sind jeweils rund 200 m lang und werden in Einlagerungsfeldern zusammengefasst. Im Einlagerungsbetrieb werden zunächst die vom Schacht am weitesten entfernten Felder genutzt und die verbleibenden Hohlräume anschließend mit Salzgrus aus der Streckenauffahrung versetzt. Am Ende der Endlagerbetriebszeit werden die restlichen Grubenräume verfüllt und durch Abschlussbauwerke gegenüber den Schächten abgedichtet. Als letzte Maßnahme der Endlagerstilllegung erfolgt die Verfüllung und der Verschluss der beiden Schächte.

3 Programm Direkte Endlagerung

Auf der Basis des Referenz-Endlagerkonzeptes wurden u. a. Systemanalysen für unterschiedliche Mengenverhältnisse von Wiederaufarbeitungsabfällen und ausgedienten Brennelementen durchgeführt. D. h. es wurden dafür jeweils Endlagerauslegungen vorgenommen und bewertet. Dabei sollen Aussagen über die Auswirkungen von verschiedenen Konzepten für die Einlagerung der Gebinde in Strecken, Bohrlöcher oder Kombinationen davon z.B. auf die flächenmäßige Ausnutzung des Salzstockes und auf notwendige Zwischenlagerzeiten (Folie 14) erzielt werden. Dabei wurde u.a. festgestellt, dass sowohl bei einer standortunabhängigen Planung als auch unter Berücksichtigung von Standort relevanten geologischen Gegebenheiten entsprechend angepasste Endlagerkonfigurationen entwickelt werden können. Die Auslegungstemperatur von 200° C konnte dabei jeweils eingehalten werden.

Mit dem Beschluss der Bundesregierung von 1985, die Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente bis zur Anwendungsreife zu entwickeln, wurde ein entsprechendes Programm für vier Demonstrationsversuche mit folgendem Inhalt aufgelegt (Folie 15):

- Simulation des Transportes schwerer Nutzlasten bis 85t über eine Schachtförderanlage (der sichere Transport von 65 t schweren POLLUX-Behältern und Transportwagen von 20 t durch den Schacht) nach untertage
- Handhabungsversuche zur Streckenlagerung von POLLUX -Behältern (sicherer Transport unter Tage und die Einlagerung von POLLUX-Behältern in einer Einlagerungsstrecke)
- Aktives Handhabungsexperiment mit Neutronenquellen (die Untersuchung der Rückstreuung der Neutronenstrahlung am Steinsalz eines mit ausgedienten Brennelementen gefüllten Endlagerbehälters unter in situ Bedingungen)
- Simulation der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern unter in situ-Bedingungen (Untersuchung der Auswirkungen von wärmeentwickelnden Abfällen auf das Salz durch einen in situ-Erhitzerversuch)

Für den letztgenannten in situ-Versuch wurde im Forschungsbergwerk Asse Ende der 80er Jahre ein Versuchsfeld hergerichtet, in dem die Einlagerung von wärmeentwickelnden POLLUX-Endlagerbehältern simuliert werden sollte. Die Grafik (Folie 16) zeigt auf der 800 m-Sohle die dazu

vorbereiteten zwei Einlagerungsstrecken, in die jeweils 3 elektrisch beheizbare Versuchsbehälter mit der Dimension der POLLUX-Behälter eingelagert und mit Salzgrus versetzt wurden. 50 m höher wurden sogenannte Überfahrungsstrecken aufgefahren, von denen aus Messinstrumente in den umgebenden Salzkörper eingebaut wurden. Die Montage der Versuchsbehälter wird in Folie 17 auf dem linken Foto, die Demontage 10 Jahre später auf dem rechten Foto gezeigt. Die Abmessungen der Einlagerungsstrecke ($H = 3,5 \text{ m}$; $B = 4,5 \text{ m}$) entsprechen realen Endlagerbedingungen. Der Hohlraum zwischen Behälter und Streckenstoß wurde mit trockenem Salzgrus, das bei der Streckenauffahrung anfällt, verfüllt. Zusätzlich wurden für die geowissenschaftlichen Experimente eine Reihe von Messinstrumenten eingebaut, um die Auswirkungen des Wärmeeintrages auf das Salz zu untersuchen. Mit den Ergebnissen des in situ-Versuches konnte zum einen die Endlagerauslegung überprüft werden - die für die Endlagerung in Salz geltende Grenztemperatur von 200 °C an der Kontaktfläche Behälter/Salz wurde immer eingehalten oder unterschritten - und zum anderen konnte auch die Prognosegenauigkeit der eingesetzten Rechenprogramme bestätigt werden. Mit der Zeit kompaktiert der den Behälter umgebende Salzgrus und leitet die Wärme immer besser in das feste Gestein ab. Deshalb nimmt die Temperatur kontinuierlich ab. Das angestrebte Ziel, zu zeigen, dass die Endlagerbehälter vollständig durch das Wirtsgestein eingeschlossen werden, konnte mit diesem Demonstrationsversuch belegt werden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit den Ergebnissen der Demonstrationsversuche die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Transport- und Einlagerungstechnologie für POLLUX-Behälter nachgewiesen, die Prognosegenauigkeit der Rechenmodelle zur Beschreibung des thermo-mechanischen Verhaltens von Salz und Salzgrus durch in situ -Versuch in der Asse bestätigt und damit die Direkte Endlagerung von POLLUX-Behältern in den Stand der Technik erhoben werden konnte (Artikelgesetz zum Atomgesetz von 1994).

4 Weiterentwicklung HAW-Endlagerkonzept

Auf Basis des vorgenannten Referenz-Endlagerkonzeptes und den in diesem Zusammenhang erzielten Ergebnissen bei den systemanalytischen Arbeiten und den Demonstrationsversuchen wurde 1998 im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz eine Endlagerkonzeption erstellt, die ein aktualisiertes Abfallmengengerüst und die bisherigen Erkundungsergebnisse zum Salzstock Gorleben berücksichtigte. Es wurden alle Elemente eines künftigen HAW-Endlagers für diesen Standort in Vorkonzepttiefe geplant. Dazu zählten die Standortbeschreibung, die Planungen der übertägigen Anlagen, die Planung des Grubengebäudes auf der Basis von thermomechanischen Auslegungsrechnungen und die Herstellung des Grubengebäudes, die Planung der Transport- und Einlagerungskonzepte und -techniken für die Endlagerbehälter.

ter (POLLUX-Behälter mit ausgedienten Brennelementen, HAW-Kokillen), die Verfüll- und Verschleißmaßnahmen sowie logistische Fragestellung für die Errichtung des Endlagers, dessen Betrieb und die Stilllegung. Darüber hinaus wurden Aussagen zur Integrität der geologischen Barriere getroffen. Eine Abschätzung des zeitlichen und Kostenaufwandes schloss die Untersuchungen ab. Als Besonderheit beinhaltete diese Planungsarbeit auch die Untersuchung, ob und wie radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung mit in dem Salzstock Gorleben untergebracht werden können. Es zeigte sich, dass alle Wärme entwickelnden Abfälle in den zentralen Bereich des Salzstockes im jüngeren Steinsalz und die vernachlässigbarer Wärme entwickelnden Abfälle in dem älteren Steinsalz eingelagert werden konnten (Folie 19).

Im Rahmen weiterer FuE- Arbeiten wurde u.a. das Instrumentarium zur Bewertung der Sicherheit eines HAW-Endlagers überprüft. Damit sollte festgestellt werden, ob und welche FuE-Themen für die Endlagerung in Salz noch zu lösen sind. Für ein Referenzendlagerkonzept auf Basis des Abfallmengengerüsts für das Ausstiegsszenario (Folie 20) wurde ein entsprechender FEP-Katalog (systematische Aufstellung von möglichen zukünftigen Ereignissen und Prozessen nach der Endlagerstilllegung) erarbeitet. Darüber hinaus wurden die Integritätsnachweise für technische, geotechnische und geologische Barrieren überprüft.

Die Planung der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen für ein HAW-Endlager waren Bestandteil jeder Endlagerkonzeption. Konzepte für geotechnische Barrieren wie Schachtverschlüsse (Folie 22), Streckenverschlüsse (Folie 23) und Bohrlochverschlüsse (Folie 24) wurden im Rahmen von FuE-Vorhaben entwickelt und zum Teil gebaut und deren Wirkungsweise (Dichtheit und Standfestigkeit) unter in situ-Bedingungen überprüft.

5 Neue Technologien zur Direkten Endlagerung

Ausgediente Brennelemente sollen gemäß dem Referenz - Endlagerkonzept in selbstabschirmenden POLLUX-Behältern in horizontalen Strecken eines Endlagerbergwerkes im Salz endgelagert werden. Für HAW-Kokillen ist eine Einlagerung in unverrohrten vertikalen Bohrlöchern bis zu 300m Tiefe vorgesehen. Die Vorteile der Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen in Bohrlöchern (Folie 25) sind in einem besseren Wärmeübergang ins Wirtsgestein Salz und damit in einem schnelleren Einschluss der Behälter durch die geologische Barriere begründet. Durch dieses Einlagerungskonzept wird auch die insgesamt erforderliche Flächenausdehnung des Endlagers verringert und es lassen sich Einsparungen für Endlagerbehälter und für den Endlagerbetrieb erreichen. Insofern wurde geprüft, ob sich diese Vorteile auch für ein Einlagerungskonzept für unzerschnittene Brennstäbe von ausgedienten Brennelementen nutzen lassen. Die Grundidee bestand darin, unter sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein möglichst einheitliches System von Endlagerbehältern für alle Wärme entwickelnde Abfälle zu entwickeln. Die kerntechnische Industrie hatte dazu einen entsprechenden Endlagerbehälter entworfen, eine sogenannte Brennstabkokille (BSK 3),

die die Brennstäbe von 3 DWR – Brennelementen oder 9 SWR - Brennelementen aufnehmen kann (Folie 27). Die BSK3 hat annähernd denselben Außendurchmesser wie eine HAW-Kokille und auch einen Pilzgreifkopf zur Handhabung des Behälters. Die Unterschiede beschränken sich im Wesentlichen auf die Höhe und die Masse des Behälters.

Im Rahmen dieser Optimierung wurde DBE TECHNOLOGY GmbH beauftragt, eine Technik für die Einlagerung von Brennstabkokillen in vertikale Bohrlöcher eines Endlagers im Salz zu entwickeln und zu erproben. Mit Mitteln des BMWi, der EU und der Industrie führt DBE TECHNOLOGY GmbH seit Anfang 2004 ein in das 6. EU-Rahmenprogramm eingebundenes FuE-Vorhaben durch. Dort werden in einem sogenannten Integrierten Projekt namens ESDRED (Engineering Studies and Demonstration of Repository Design) in einem Konsortium von 13 europäischen Partnern – im Wesentlichen Endlagerorganisationen - auch Einlagerungstechnologien für andere Wirtsgesteine entwickelt.

Das Einlagerungssystem (Folie 28) für die BSK3 (Folie29) besteht aus einer Transporteinheit (Grubenlokomotive und Transportwagen), einem sogenannten Transferbehälter, einer Einlagerungsvorrichtung und einer Bohrlochschleuse. Die batteriebetriebene Grubenlokomotive ist ein im Bergbau seit Jahrzehnten eingesetztes Beförderungsmittel. Für dieses Vorhaben konnte eine bereits Anfang der Neunziger Jahre für das Demonstrationsvorhaben Handhabungsversuche zur Streckenlagerung genutzte Lok wieder mobilisiert werden. Der Transportwagen wurde jedoch maßgeschneidert für den Einsatzzweck neu entwickelt (Folien 37 und 38) und dient dazu, zum einen den Transferbehälter während des Transportes aufzunehmen und zum anderen auch, um die Einlagerungsvorrichtung von einer Position zur nächsten zu befördern. Der Transferbehälter (Folien 30 bis 36) besteht aus einem zylindrischen Grundkörper (Kugelgraphitgussbehälter mit einer integrierten Neutronenabschirmung aus Polyethylenstäben), der an beiden Enden mit einem Behälterschleusensystem verschlossen ist. Die Behälterschleusensysteme sind jeweils mit Positionierbolzen ausgestattet, die der exakten Führung beim Aufsetzen auf die Bohrlochschleuse respektive beim Aufsetzen der Abschirmhaube auf den Transferbehälter dienen, und zum anderen mit Schiebern, die beim Einlagerungsprozess geöffnet werden. Die Einlagerungsvorrichtung (Folie 42 und 43) ist als Hubportal ausgebildet, das mittels eines integrierten Klapprahmens den Transferbehälter vom Transportwagen hebt und mit einem Schwenkwerk in eine vertikale Position drehen kann. Das Hubportal steht auf 4 spindelgetriebenen Stützen, mit denen die notwendigen Hubbewegungen vollzogen werden können. Ein Kokillenhubwerk, das mit einem 300m langen Seil ausgerüstet ist, ermöglicht das Fördern der BSK 3 aus dem Transferbehälter in das Einlagerungsbohrloch. Die BSK 3 wird mittels eines neu entwickelten Greifersystems (patentiert) gefasst und sicher ins Bohrloch abgesenkt. Der Einlagerungsprozess der BSK 3 erfolgt in permanent abgeschirmtem Zustand. In der Einlagerungsvorrichtung wird dies über die Abschirmhaube gewährleistet, durch die der obere Schieber des Transferbehälters geöffnet wird, so dass der Kokillengreifer an die BSK 3 andocken kann. Im Bohrlochkeller erfolgt die Abschirmung durch die Bohrlochschleuse, die die Verbindung zwischen Transferbehälter und Bohrloch darstellt und wie die Abschirmhaube mit einem motorgetriebenen Schieber ausgestattet ist, mit dem gleichzeitig

der untere Schieber des Transferbehälters geöffnet wird. Darüber hinaus dient die Bohrlochschleuse (Folien 39, 40, 41) dazu, während der Betriebszeit von einigen Wochen einen dichten Verschluss des Bohrloches zu gewährleisten.

Zur Erprobung dieses Einlagerungssystems wurden die vorgenannten Komponenten gefertigt und ein Versuchsstand (Folie 44) errichtet. Als Versuchsort konnte eine ehemalige Turbinenhalle des E-ON - Kraftwerkes Robert Frank in Landesbergen bei Nienburg angemietet werden. Dort wurde Anfang 2008 der Versuchsstand (Folie 45, 46 und 48) im Maßstab 1:1 errichtet und die Komponenten des Einlagerungssystems angeliefert und in Position gebracht. In der Versuchsstandskonstruktion wird das Einlagerungsbohrloch durch ein 60cm (entspricht dem späteren Bohrlochdurchmesser im Endlager) starkes Stahlrohr simuliert. Durch Zwischenböden und entsprechende Öffnungen in diesem Stahlrohr kann der Einlagerungsprozess jederzeit beobachtet werden. Ab Mitte 2008 werden mit dem vorher beschriebenen Einlagerungssystem für etwa 10 Monate Demonstrationsversuche und Zuverlässigkeitstests durchgeführt. Ziel ist es, durch hinreichend viele Einlagerungszyklen (1000) die Zuverlässigkeit des Systems und jeder einzelnen Komponente nachzuweisen. Damit soll eine Aussage zur Genehmigungsreife dieses Systems erreicht werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Parallel zur industriellen Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung wurden in Deutschland Programme zur Standortsuche für Endlager für radioaktive Abfälle gestartet. Forschungs- und Entwicklungsprogramme wurden aufgelegt, um den vollständigen Entsorgungsweg incl. Wiederaufarbeitung, Konditionierung, Zwischenlagerung und Endlagerung zu planen. Verfahren und Technologien zum sicheren Transport, zur Handhabung und Einlagerung von Endlagerbehältern wurden durch Demonstrationsversuche im Maßstab 1:1 erprobt und in den Stand der Technik erhoben.

Konzeptplanungen für ein HAW-Endlager in Salz und Erprobungen von Verfahren und Technologien zum sicheren Umgang mit entsprechenden Endlagerbehältern sind in Deutschland hinreichend oft und genau durchgeführt worden. Der nächste sinnvolle Schritt in dieser Hinsicht wäre eine Entscheidung für einen konkreten Standort, um dort die wenigen noch fehlenden Fragestellungen unter Berücksichtigung der Standortrandbedingungen zu klären.

Die Transport- und Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter - und demnächst auch für Brennstabkokillen - wurden bzw. werden bis zur Genehmigungsreife entwickelt und erprobt (Nachweis der Zuverlässigkeit). In diesem Zusammenhang wird auf die offizielle Inbetriebnahme des Versuchsstandes zur Einlagerung von Brennstabkokillen in Landesbergen (September 2008) hingewiesen. Darüber hinaus ist beabsichtigt, in Peine einen Internationalern Workshop zu "Transport- und Einlagerungstechnik" zu halten und diesen mit einem Besuch des Versuchsstandes in Landesbergen (November 2008) zu verbinden.

**Entwicklung und Stand von Konzepten
für die Endlagerung hochradioaktiver
Abfälle im Steinsalz
(inkl. Demonstrationsversuche
zur Direkten Endlagerung)**

Wilhelm Bollingerfehr

**DBE TECHNOLOGY GmbH
Peine**

Gliederung

1. Anfänge der Endlagerplanung (kurzer Rückblick)
2. Endlagerkonzepte
3. Programm “Direkte Endlagerung”
 - Systemanalytische Arbeiten
 - Demonstrationsversuche zur Streckenlagerung
4. Weiterentwicklung HAW-Endlagerkonzept
5. Neue Technologie zur Direkten Endlagerung
6. Zusammenfassung und Ausblick

1. Rückblick

- 1955:** National Academy of Sciences – National Research Council (USA)
- Erste Ideen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salz
“Geologically salt deposits seem to offer the least hazard for the disposal of high-level-wastes”
- 1957:** Deutsche Atomkommission (Vorgänger der RSK und SSK)
- Hinweise auf notwendige Forschungsarbeiten zur Entsorgung
- 1963:** Bundesanstalt für Bodenforschung (Vorgänger der BGR)
- Idee der Endlagerung im Salz hinsichtlich Übertragbarkeit auf Verhältnisse in Deutschland überprüft
 - Ergebnis: ... Verhältnis “zur sekular sicheren Speicherung” radioaktiver Abfälle Dank der Salzformationen in der Bundesrepublik Deutschland “beinahe ideal”

1. Rückblick

1974: Konzept der Bundesregierung

- gemeinsam mit der Industrie ein “Nukleares Entsorgungszentrum” (NEZ) aufzubauen (Wiederaufarbeitung, Abfallbehandlung, Endlagerung)

1975: Beginn Standortsuche für NEZ in Niedersachsen

1976: 4. Novelle zum Atomgesetz

- Zuständigkeit der PTB: Errichtung und Betrieb von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle
 - Industrie verantwortlich für Wiederaufarbeitung, Abfallbehandlung und Zwischenlager
 - Bund verantwortlich für Endlager

1. Rückblick

- 1981-1984:** Projektgruppe Andere Entsorgungstechnik (KfK-PAE):
➤ Vergleich der Entsorgungswege über Wiederaufarbeitung und über die Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente (FESAE)
- 1985-2003:** Projektträger Entsorgung (PTE)
➤ Programm zur Direkten Endlagerung:
(Systemanalytische Arbeiten und Demonstrationsversuche)
- 1994:** Artikelgesetz:
➤ Direkte Endlagerung anerkannt als alternatives Entsorgungskonzept zur Wiederaufarbeitung

2. Endlagerkonzepte

Endlagerauslegung beinhaltet:

- übertägige Anlagen (Empfangshalle, Umladeanlagen, Puffer- und Lagerhallen...)
- Schächte
- Grubengebäude
- Wettersysteme
- Transport- und Handhabungssysteme (über und unter Tage)
- Überwachungssysteme (Strahlenschutz, Geotechnik ...)
- Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

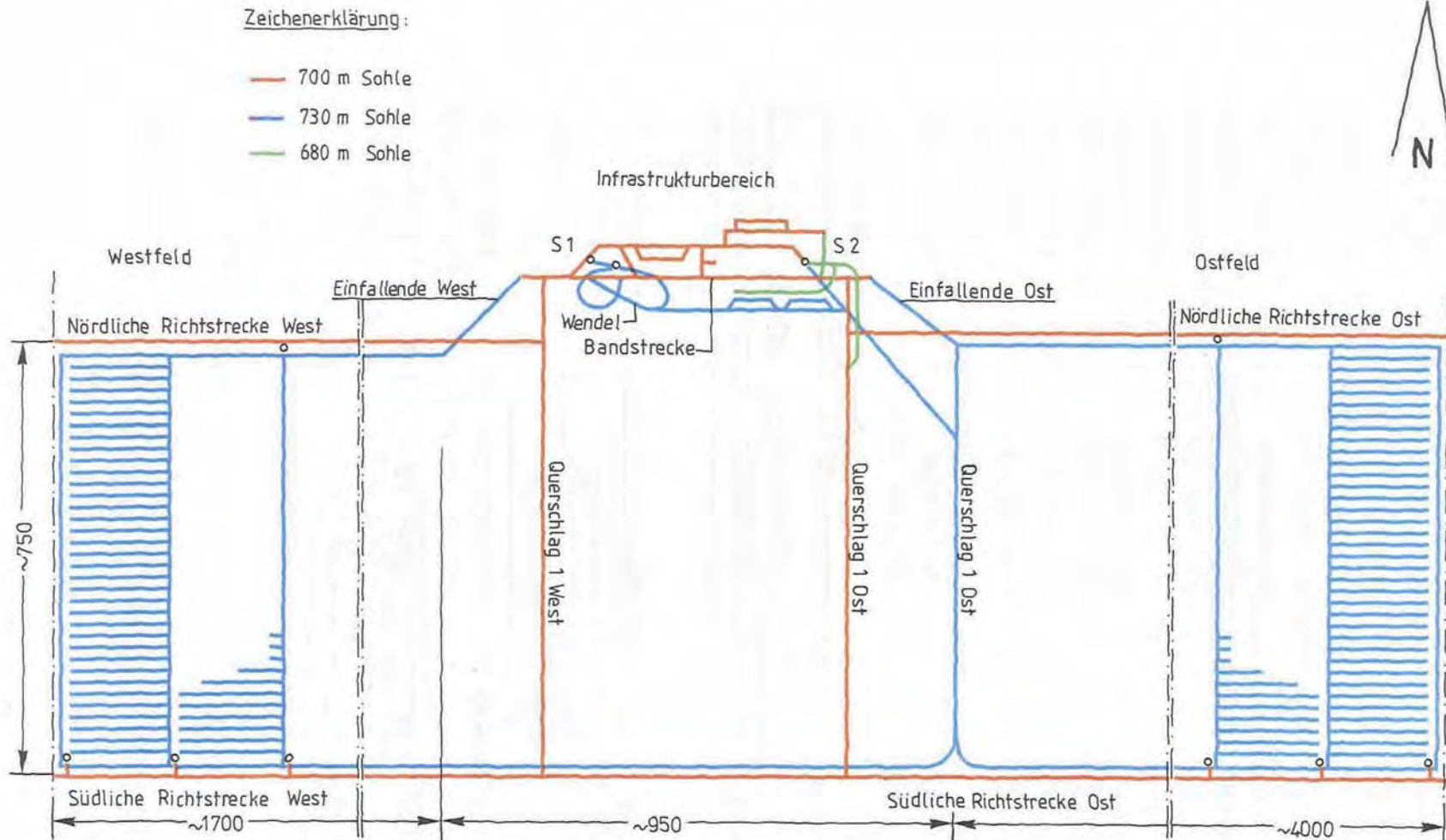
2. Grundlagen für Endlagerkonzepte

- **Art und Menge der radioaktiven Abfälle**
 - Anzahl und Dimension der Gebinde, Materialien, ...
- **Geologische Gesamtsituation**
 - Teufenlage und Ausdehnung (Mächtigkeit) des Wirtsgesteins und der Nebengesteine
 - Grenztemperaturbelastung
 - Homogenität des Wirtsgesteins
 - ...
- **Planungsrandbedingungen:**
 - gesetzliche (u. a. bergrechtliche) Vorgaben
 - radiologische (Grenzwerte, ALARA-Prinzip)
 - ...

2. Beispiel für Endlagerkonzepte

FESAE: FuE-Schwerpunkt Andere Entsorgungstechniken (1981 – 84)

Vergleich der Entsorgungswege über Wiederaufarbeitung (IE) und über Direkte Endlagerung ausgedienter BE (DE)



2. Beispiel für Endlagerkonzepte

Ergebnisse des Vergleichs IE/DE:

- Keine Unterschiede hinsichtlich der radiologischen Sicherheit
- Thema der Kernmaterialüberwachung bedarf weiterer Klärung
- Wirtschaftlich scheint die DE kostengünstiger zu sein, volkswirtschaftlich kein Vergleich möglich

Fazit:

Wiederaufarbeitungskonzept weiterverfolgen und gleichzeitig Direkte Endlagerung bis zur Anwendungsreife entwickeln

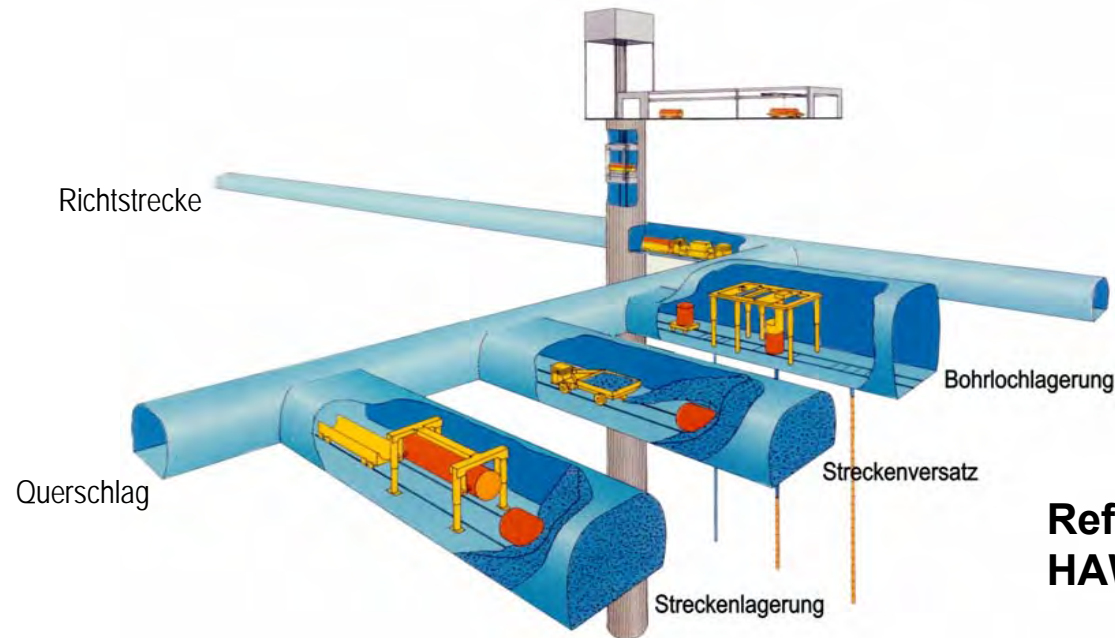
== 3. Direkte Endlagerung ==

FuE-Programm zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente (Zeitraum 1985 – 2003)

Ziel: Entwicklung und Erprobung der Endlagerung von selbstabschirmenden Endlagerbehältern bis 65 t Masse

- Demonstrationsversuche im Maßstab 1:1
- Systemanalytische Arbeiten (parallel zu Demonstrationsversuchen)

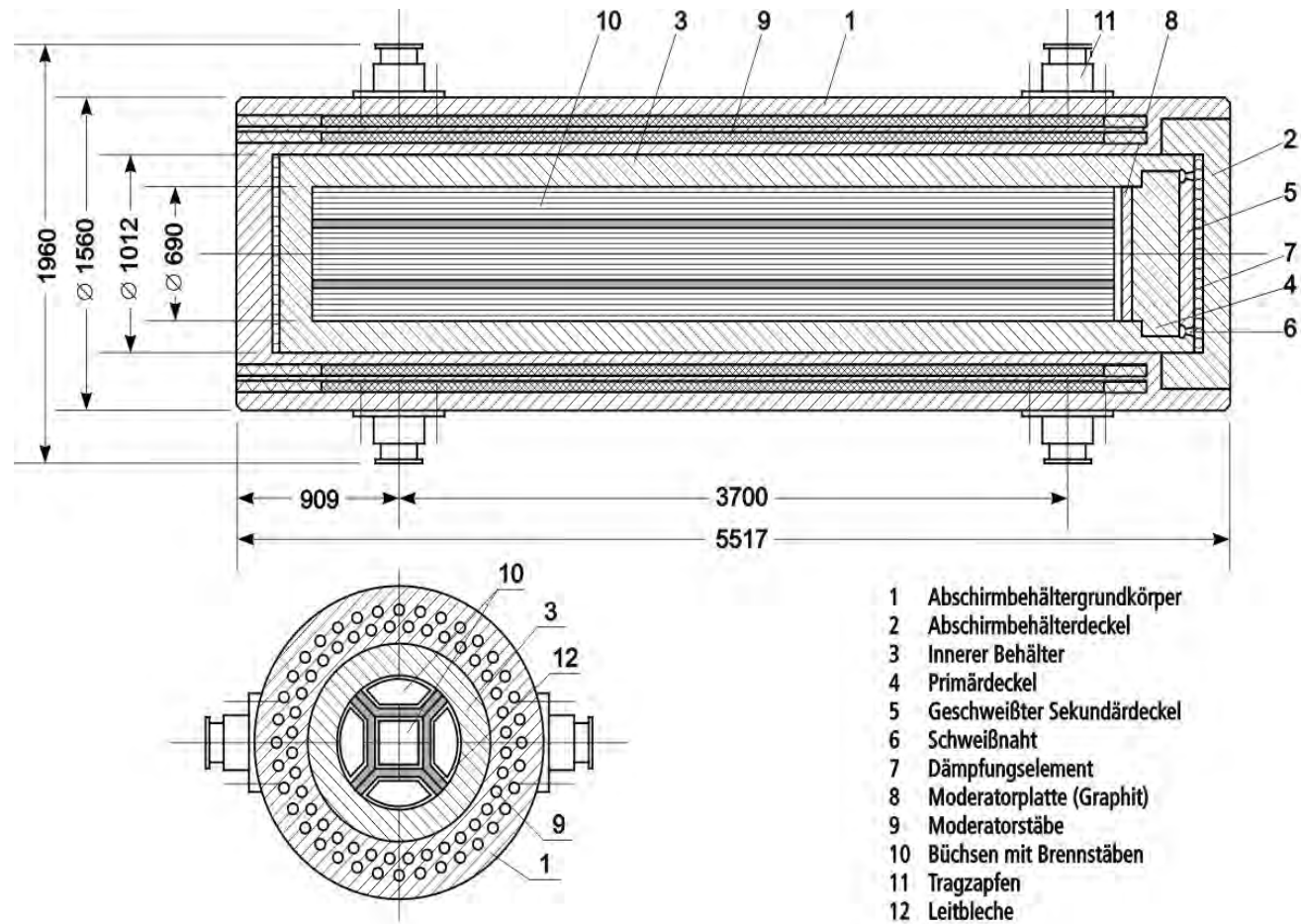
3. Referenzkonzept



Referenz-Endlagerkonzept für HAW-Endlager in Salz:

- Tiefe geologische Endlagerung (Teufe: 870m)
- Einlagerung von HAW-Kokillen in Bohrlöchern
- Einlagerung von POLLUX-Behältern in Strecken
- Versatzmaterial: Salzgrus

3. POLLUX 10-Streckenlagerung



(Quelle: GNS)

3. Systemanalytische Arbeiten

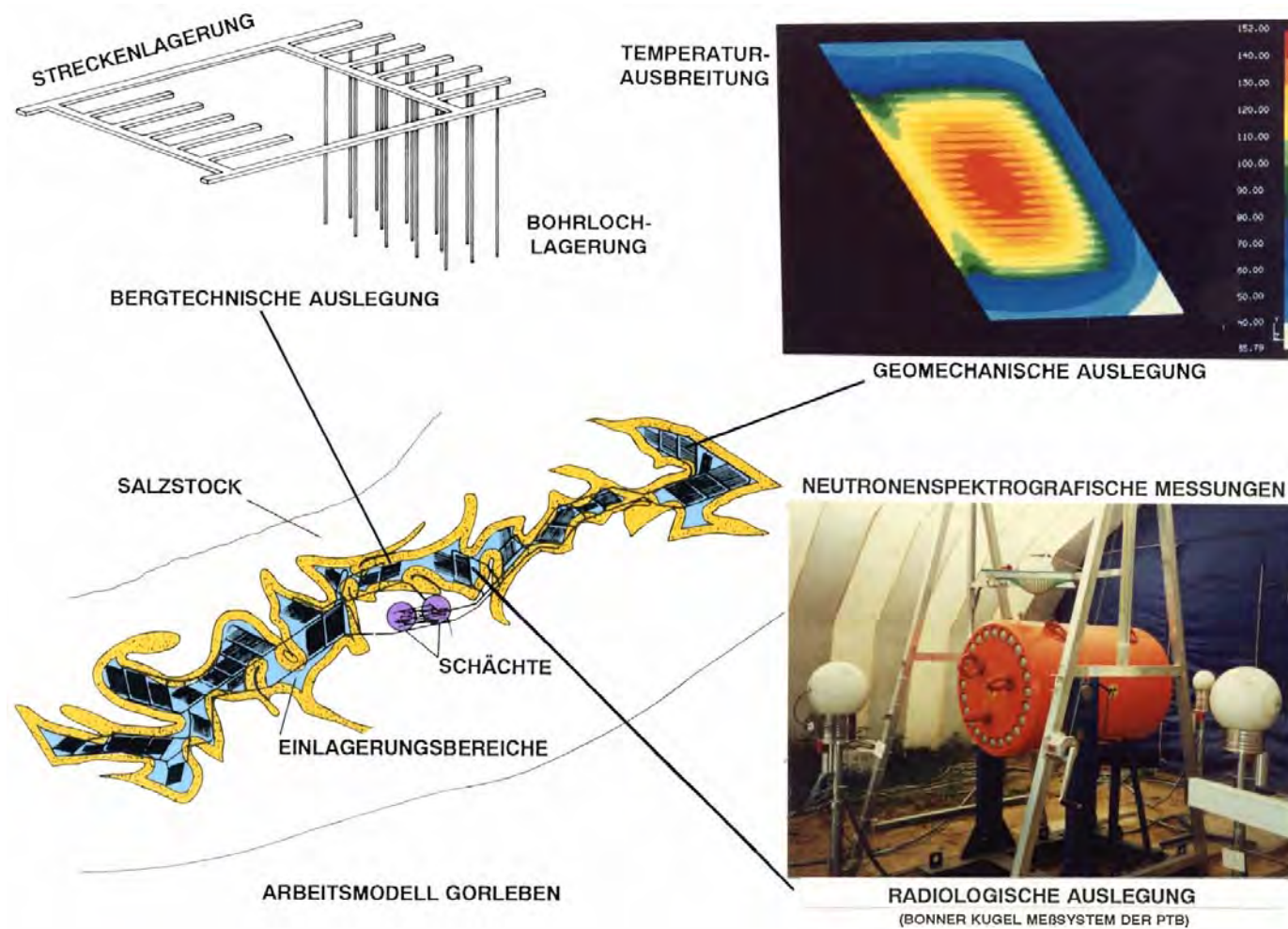
- **Systemanalyse Mischkonzept (1985-89)**

- **Mengengerüst:** Verhältnis IE/DE = 500/200 tSM per anno
- **Standortunabhängige Planung** (Annahmen zur Geologie)
- **Auslegungstemperatur 200 °C** (Kontakt Salz / Behälter)
- **Ergebnis:** Empfehlung, Konzept Reine Streckenlagerung und kombinierte Bohrloch- /Streckenlagerung vertieft planen

- **Systemanalyse Endlagerkonzepte (1990-95)**

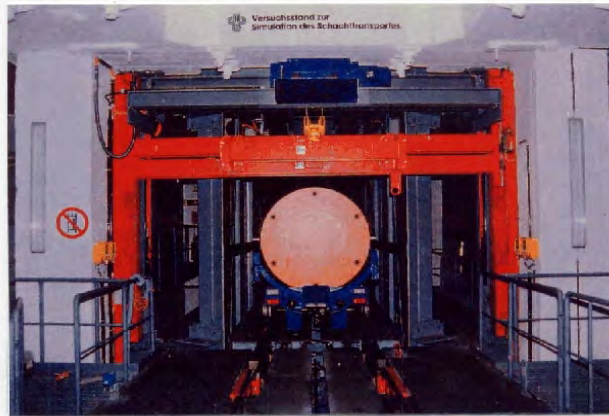
- **Mengengerüst(aktualis.):** Verhältnis IE/DE = 350/200 tSM per anno
- **Standortunabhängige und -abhängige Planung** (Geologie Gorleben)
- **Auslegungstemperatur 200 °C** (Kontakt Salz / Behälter)
- **Ergebnis:** Endlagerreferenzkonzept unter Standortrandbedingungen

3. Direkte Endlagerung



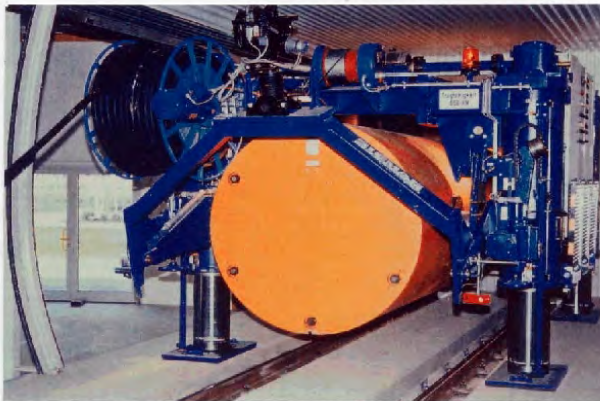
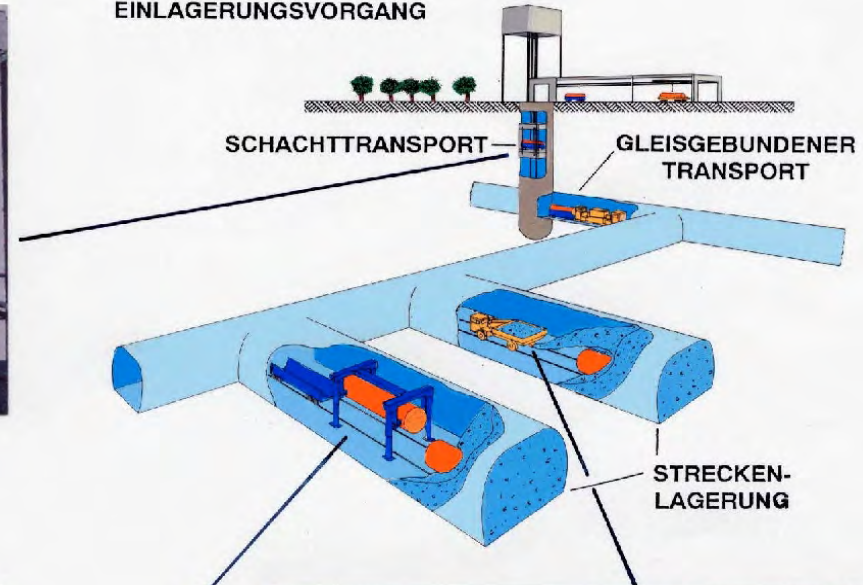
Auslegung eines Endlagers

3. Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung



FÖRDERKORB MIT 85 T NUTZLAST

EINLAGERUNGSVORGANG

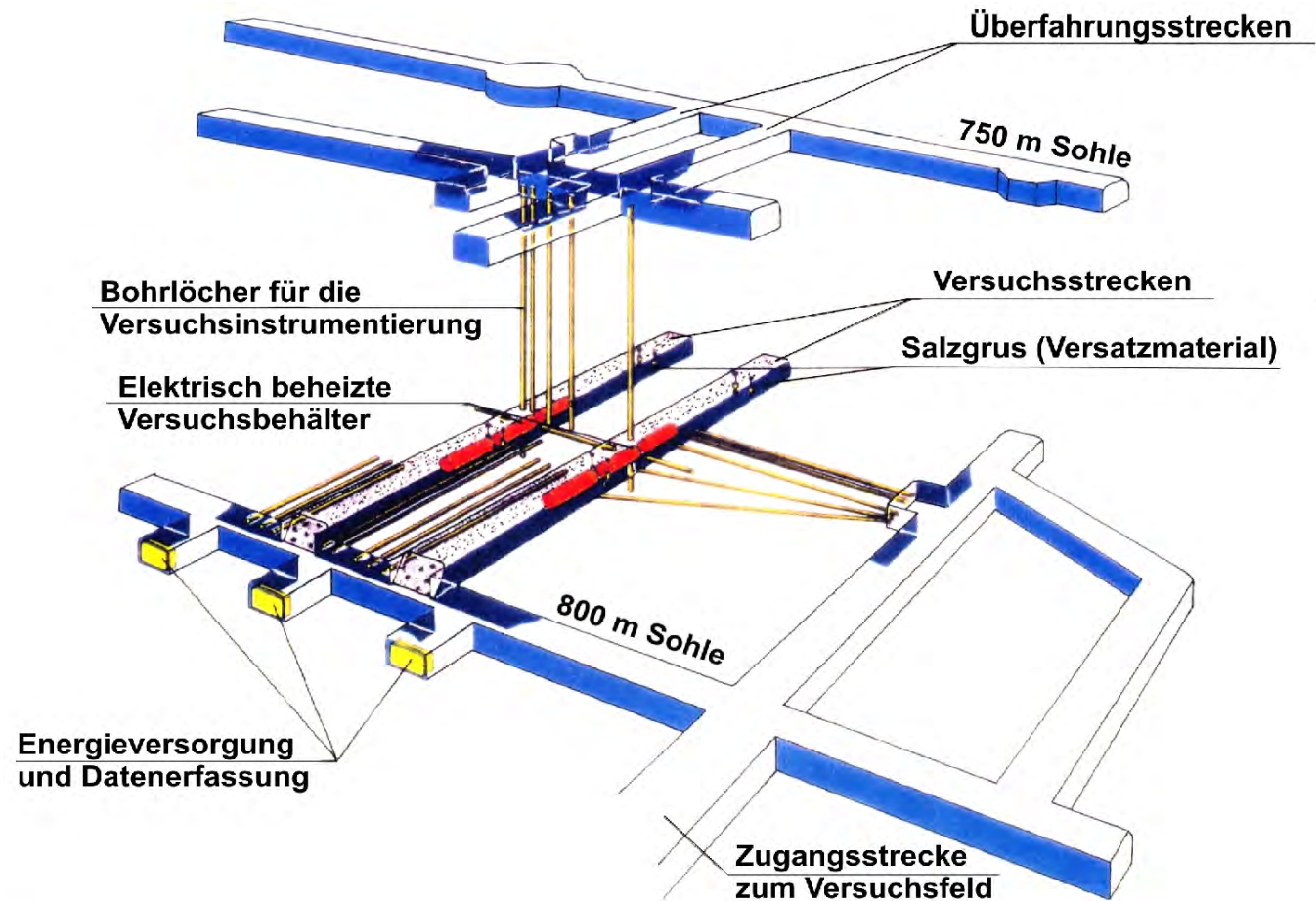


EINLAGERUNGSVORRICHTUNG (ELVIS)



VERSATZ-SCHLEUDERTRUCK IN EINER EINLAGERUNGSSTRECKE

3. Simulation der Streckenlagerung

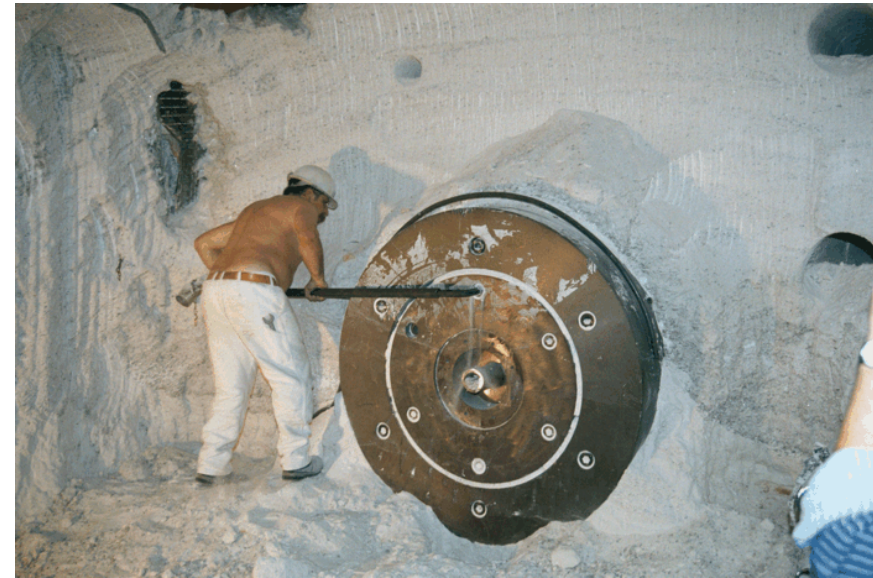


Versuchsfeld im Forschungsbergwerk Asse

3. Simulation der Streckenlagerung



Montage der Versuchsbehälter und
Messinstrumente



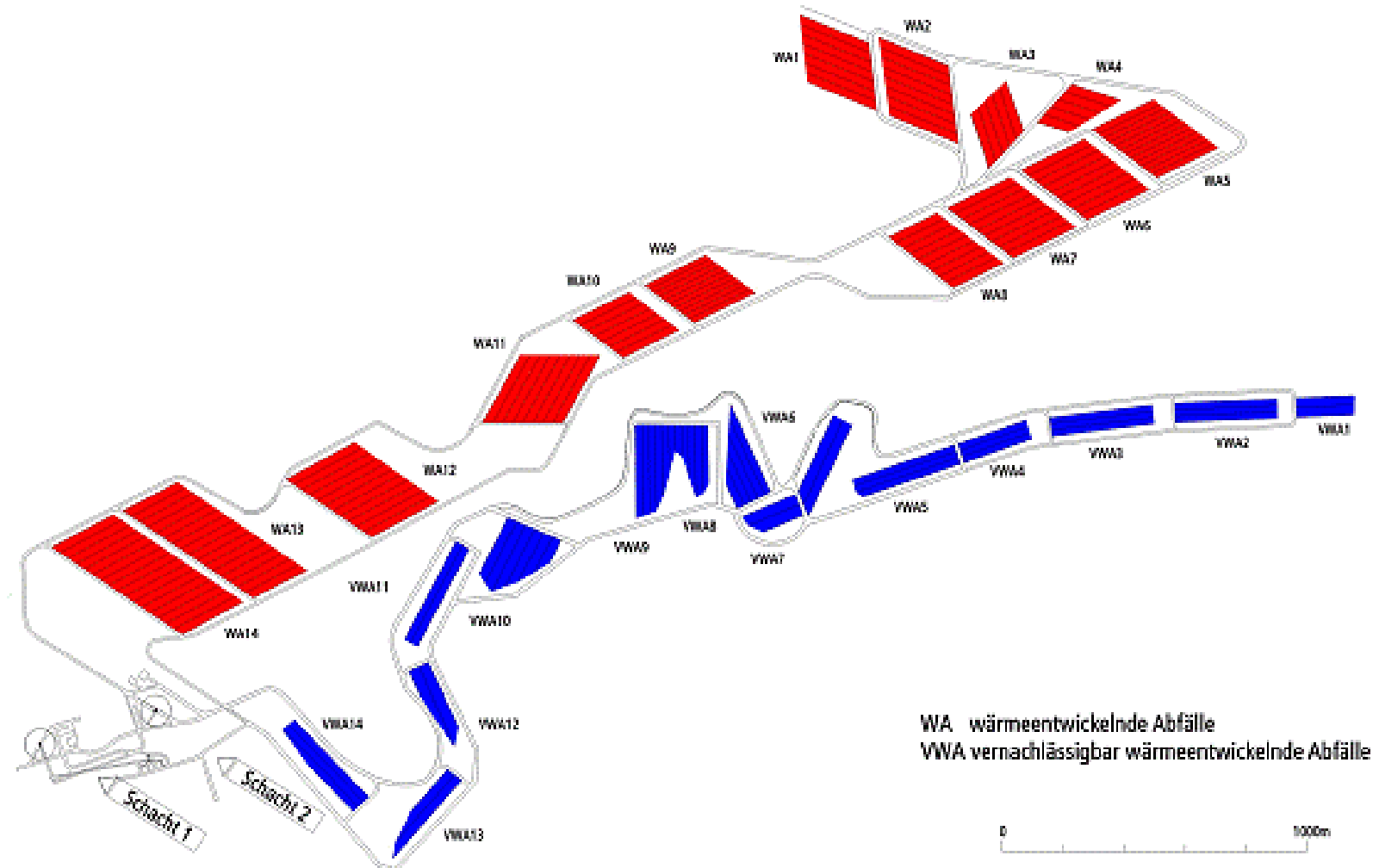
Demontage der Versuchsbehälter nach
10 Jahren Einsatz bei 200 °C

3. Ergebnisse der Demonstrationsversuche

- Zuverlässigkeit und Sicherheit der Transport- und Einlagerungstechnologie für POLLUX-Behälter erprobt und nachgewiesen
- Prognosegenauigkeit der Rechenmodelle zur Beschreibung des thermo-mechanischen Verhaltens von Salz und Salzgrus durch in situ –Versuch in der Asse bestätigt
- Direkte Endlagerung von POLLUX-Behältern in den Stand der Technik erhoben
- Artikelgesetz 1994: “.... Direkte Endlagerung ist Alternative zur Entsorgung über Wiederaufarbeitung”

4. Weiterentwicklung HAW-Endlagerkonzept

Aktualisierung Konzept Endlager Gorleben (1998)



4. Weiterentwicklung HAW-Endlagerkonzept

Überprüfung im Rahmen des F+E-Vorhabens ISIBEL (2005 – 2009)

Aktualisiertes Abfallmengengerüst (Stand Ende 2007):

Wärmeentwickelnde Abfälle		
Verglaster HAW Kokillen 3.767	CSD-C-Kokillen* CSD-B-Kokillen 7.462	BSK 3 6.818

* Colis Standard de Déchets Compactés

4. Verfüll- und Verschlusskonzept

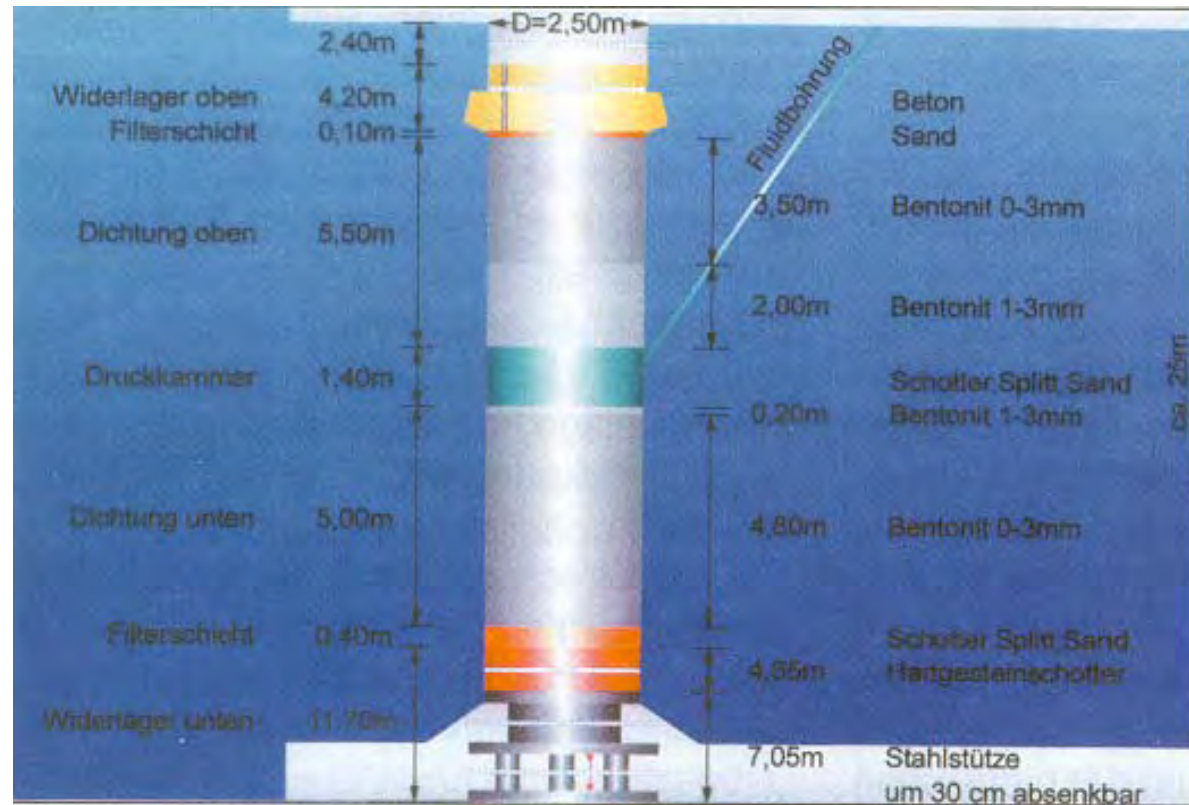
Ziel: Langfristig sicherer Einschluss der eingelagerten Abfälle und damit Isolation von der Biosphäre

- Wirtsgestein Steinsalz \cong einschlusswirksame geologische Barriere (hohe Dichtigkeit, praktisch undurchlässig)
- Versatzmaterial \cong Salzgrus
- Technische Barrieren
 - Schachtverschluss
 - Streckenverschluss
 - Bohrlochverschluss

Integritätsnachweise für geologische und (geo)technische Barrieren liegen vor

4. Verfüll- und Verschlusskonzept

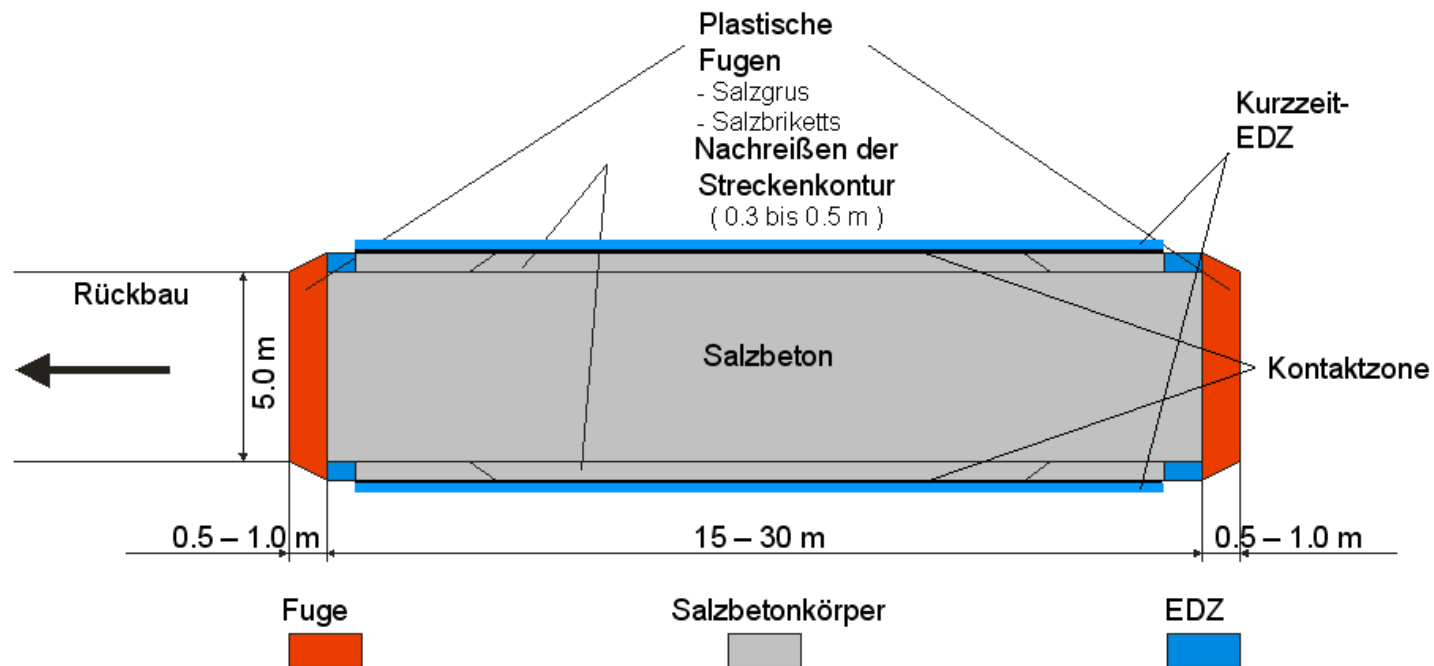
Beispiel für Schachtverschluss



Bohrschachtversuch in Salzdetfurth zur Untersuchung von Dichtelementen mit binärem Calciumbentonit (Quelle: DBE TEC 2008)

4. Verfüll- und Verschlusskonzept

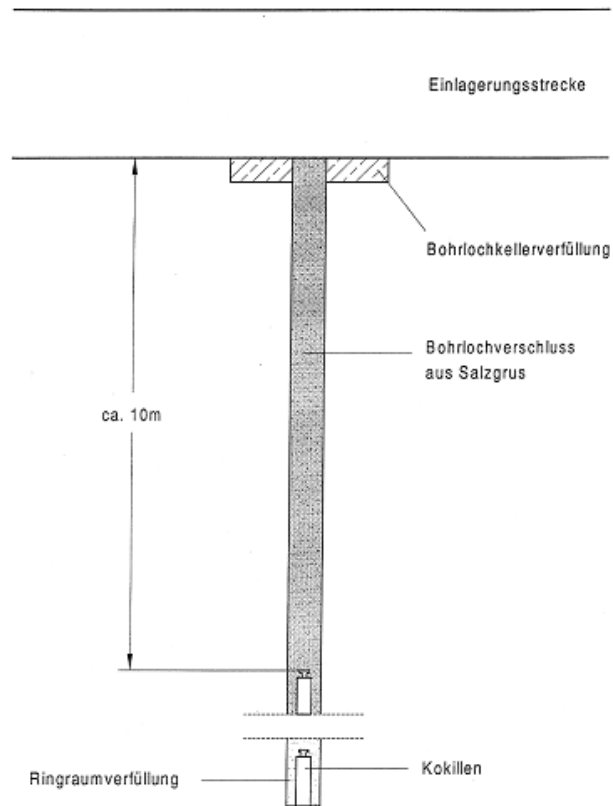
Beispiel für Streckenverschluss



**Entwurf Streckenverschluss ERAM
(Quelle: DBE TEC 2008)**

4. Verfüll- und Verschlusskonzept

Beispiel für Bohrlochverschluss



Bohrlochverschluss aus Salzgrus
(Quelle: DBE TEC 2008)

5. Neue Technologie zur Direkten Endlagerung

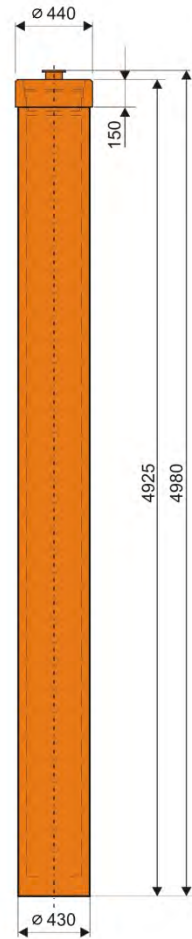
Vorteile der Bohrlochlagerung:

- Verbesserung des Wärmeüberganges
- Schnellerer Einschluss des Gebindes
- Verringerung der Flächenausdehnung des Endlagers durch 3-dimensionale Ausnutzung
- Einsparungen bei Endlagergebinden und Betriebskosten
- Verringerung der Gasproduktion

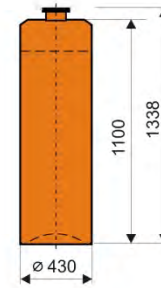
5. Einlagerungstechnologie für Brennstabkernen

- 6. EU-Rahmenprogramm
 - Integriertes Projekt ESDRED: Engineering Studies and Demonstration of REpository Designs
 - Entwicklung der Einlagerungstechnik für BSK 3 als Teil des ESDRED-Projektes
- Die Entwicklung der BSK 3-Einlagerungstechnologie wird finanziert durch:
 - Europäische Kommission, Brüssel / Belgien
 - Projektträger des Forschungszentrums Karlsruhe
 - Kerntechnische Industrie (vertreten durch GNS)

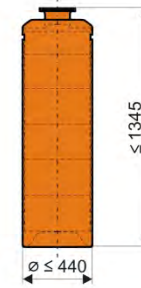
5. Abfallgebinde für Bohrlochlagerung



BSK 3 Kokille



HAW Kokille



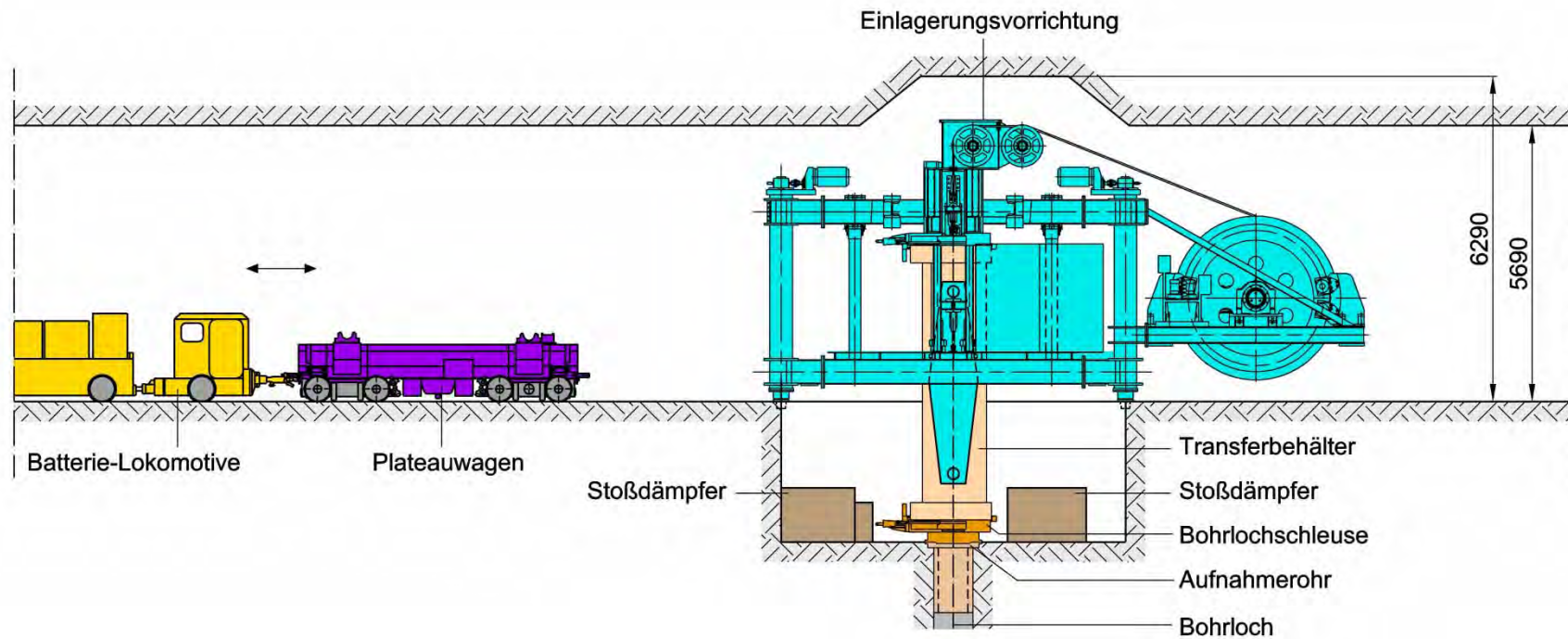
CSD-C Kokille

Masse: 5,20 t

0,50 t

0,85 t

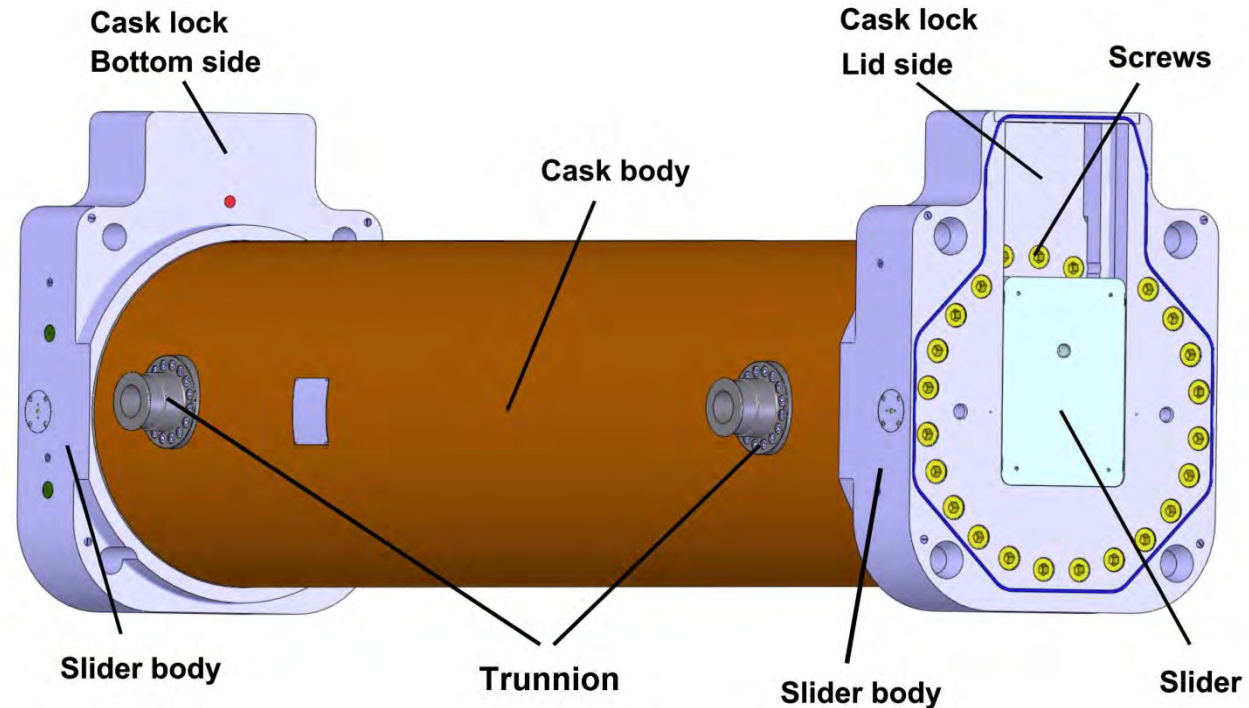
5. Bohrlocheinlagerungssystem



5. BSK 3-Dummy



5. Transferbehälter (TFB)



Technische Daten:

Länge:	5,57 m
Durchmesser (Grundkörper):	1,31 m
Höhe (Behälterschleuse):	1,89 m
Masse:	52 t (mit BKS 3)

(Quelle: GNS)

5. Transferbehälter

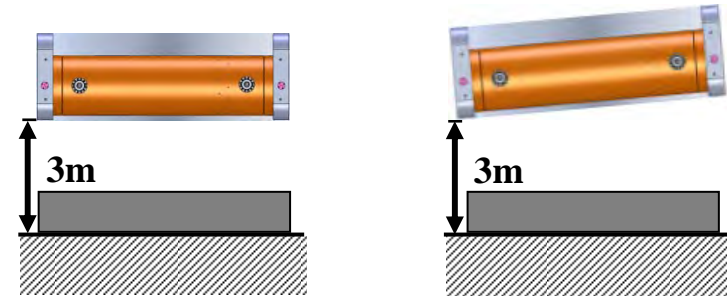
Berechnungsergebnisse der mechanischen Belastung

Komponente		Zulässige Last	Maximale Last	Ausnutzung
1.	Tragzapfen	405 MPa	237 MPa	59 %
2.	Tragzapfenschrauben	658 MPa	497 MPa	76 %
3.	Kurvenrollen am Schleusenschieber	88 kN	60.4 kN	69 %
4.	Verschraubung der Deckplatte am Schiebergehäuse	399 MPa	265 MPa	66 %
5.	Verschraubung der Behälterschleusen mit dem Behälterkörper	890 MPa	436 MPa	49 %
6.	Verschlussstopfen der Moderatorbohrungen an der bodenseitigen Behälterschleuse	11,9 MPa	0,43 MPa	4 %

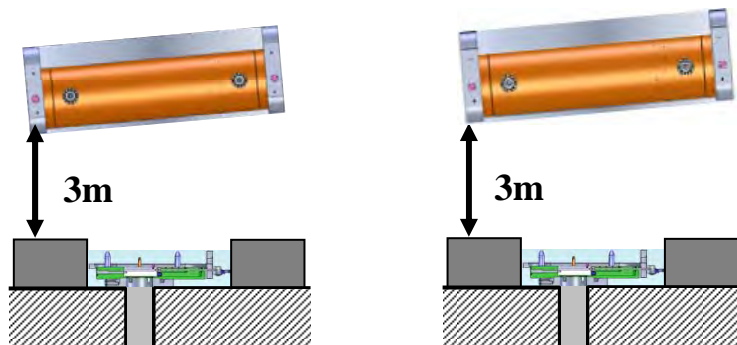
5. Absturzszenarien



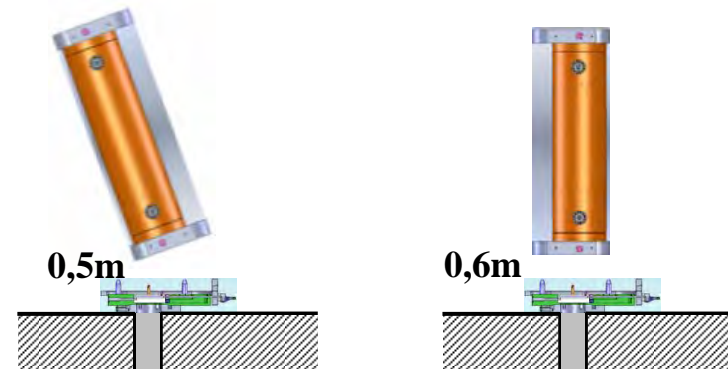
5 m Fall des TFB in der Konditionierungsanlage auf einen Stoßdämpfer (1)



3 m Mantellinienfall und 3 m Slap-Down-Fall in der Umladestation auf Stoßdämpfer (2)



3 m Mantellinienfall und 3 m Slap-Down-Fall im Bereich Bohrlochschleuse auf Stoßdämpfer (3)



0,5 m Bodenkantenfall und 0,6 m Bodenflachfall auf die Bohrlochschleuse (4 and 5)

5. Transferbehälter

Absturzscenarien:

1. 5 m Bodenflachfall auf einen Stoßdämpfer,
2. 3 m Mantellinien-/Slap-Down-Fall auf einen durchgehenden Stoßdämpfer,
3. 3 m Mantellinien-/Slap-Down-Fall auf einen geteilten Stoßdämpfer,
4. 0,5 m Bodenkantenfall auf die Bohrlochschleuse,
5. 0,6 m Bodenflachfall auf die Bohrlochschleuse.

Reduzierung der zu berechnenden Absturzfälle:

- das Absturzscenario in 5. deckt die Absturzscenarien in 1. und 4. ab,
- die Slap-Down-Fälle in 2. und 3. werden durch die jeweils zugehörigen Mantelfälle abgedeckt.

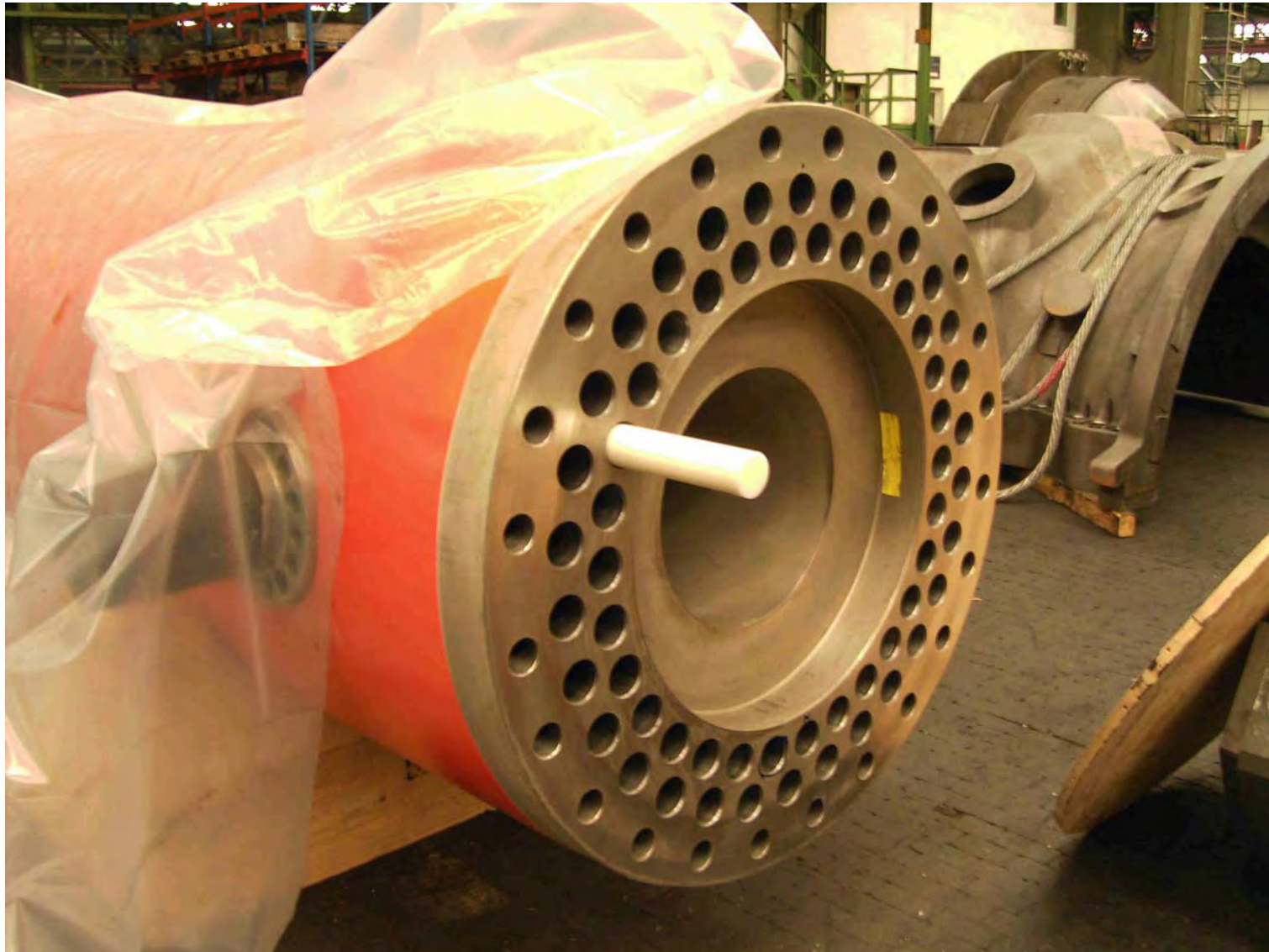
Ergebnisse:

- Ausreichende mechanische Integrität bei bestimmungsgemäßen Betrieb und unter Störfallbedingungen.
- Erfüllung aller Anforderungen der Regelwerke für den bestimmungsgemäßen Betrieb.
- Ausreichende Abschirmung der BSK 3 unter Störfallbedingungen.

5. Grundkörper TFB



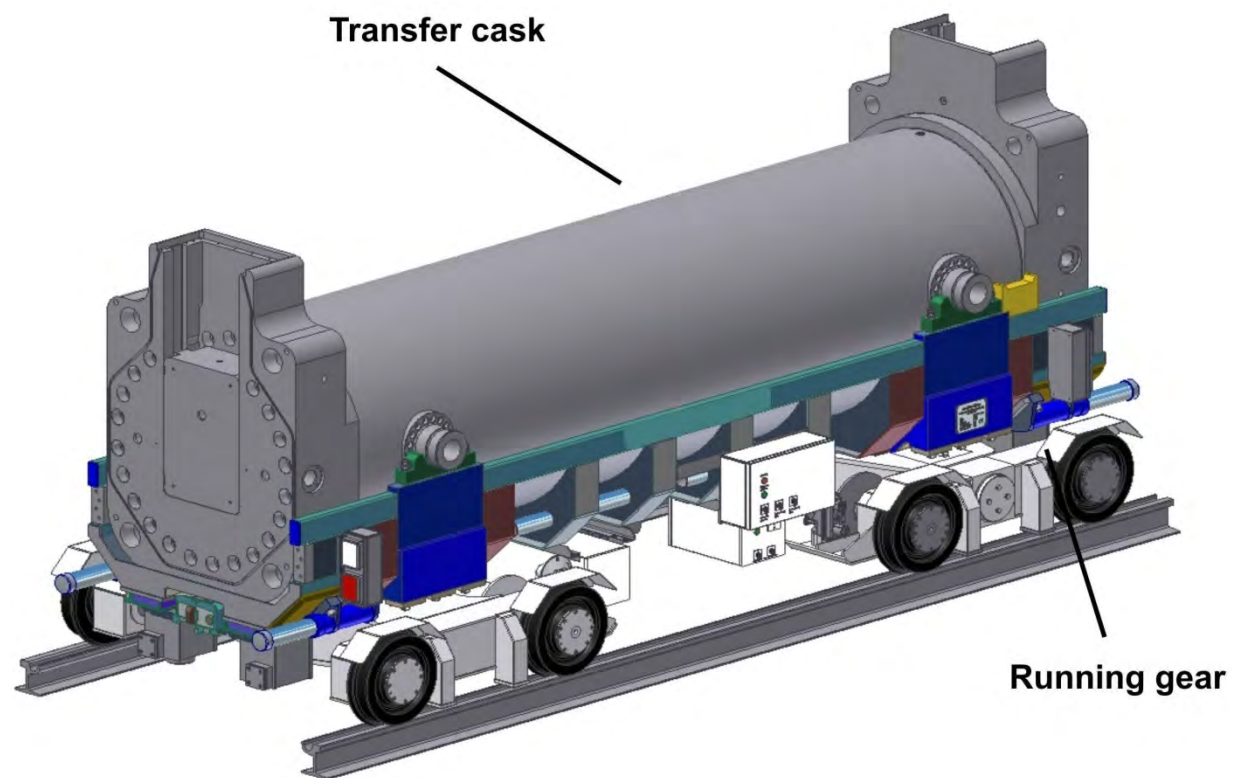
5. Grundkörper TFB



5. Herstellung Behälterschleuse



5. Plateauwagen



Technische Daten:

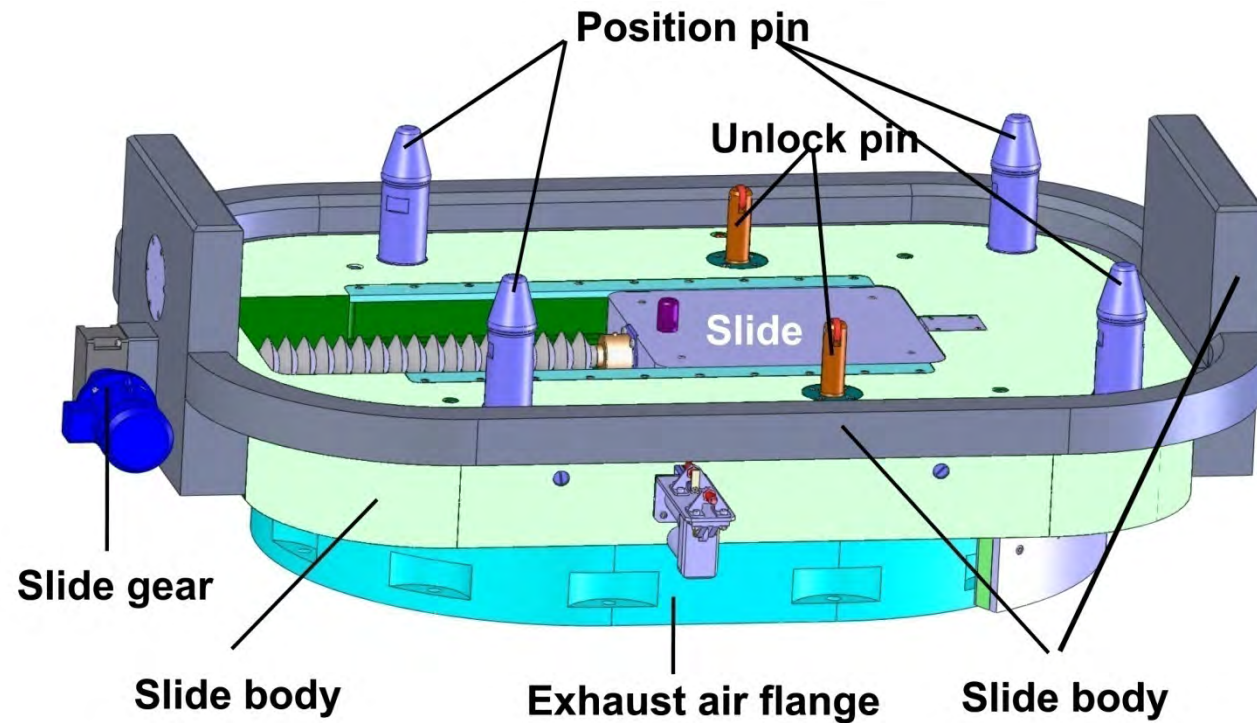
Länge:	6,15 m
Spurweite:	1,99 m
Breite (Chassis):	1,83 m
Höhe:	1,35 m
Masse:	10 t

(Quelle: GNS)

5. Herstellung Plateauwagen



5. Bohrlochschleuse

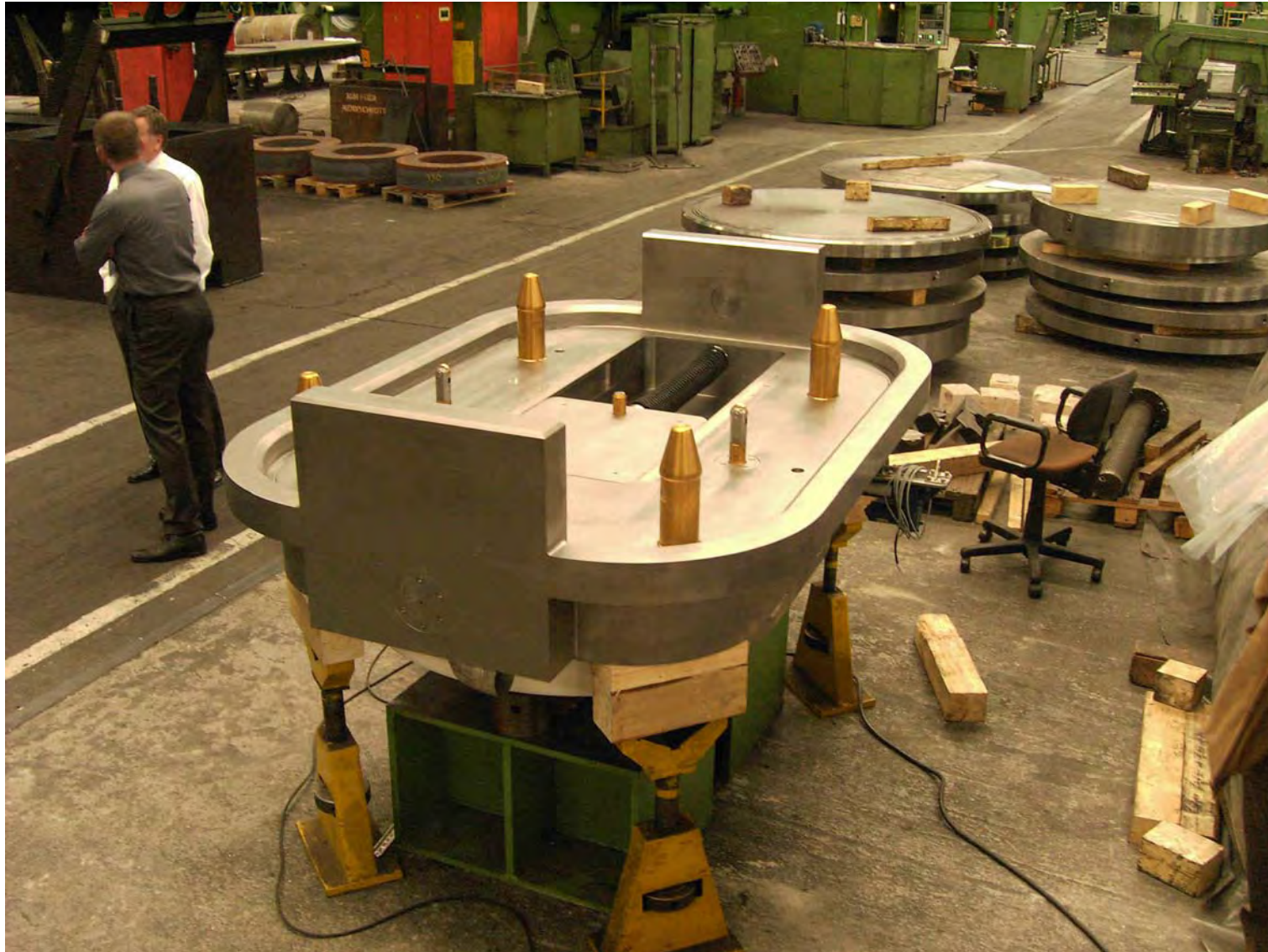


Technische Daten:

Länge und Breite:	2,46 x 1,59 m
Höhe:	0,55 m
Masse:	7,2 t
Material:	Edelstahl

(Quelle: GNS)

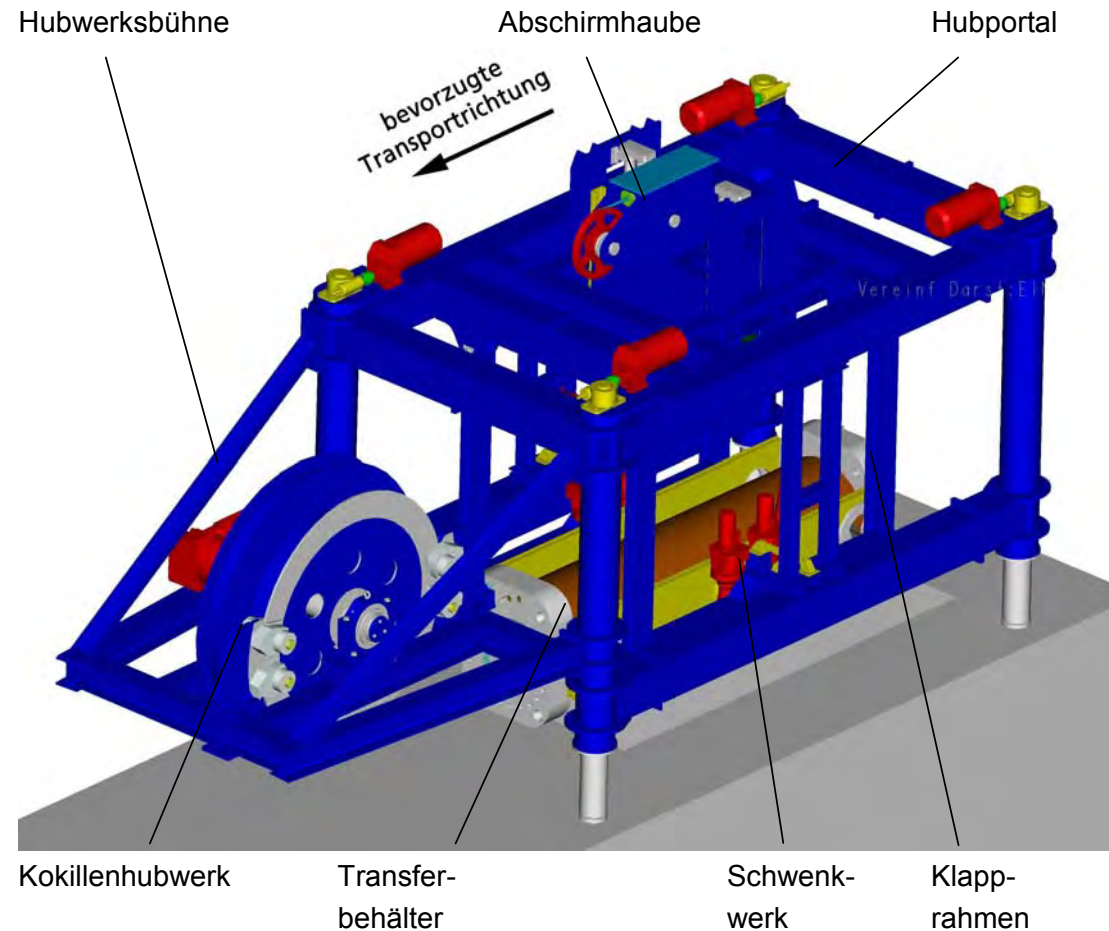
5. Bohrlochschleuse



5. Funktionstest: Schleuse TFB / Bohrlochschleuse

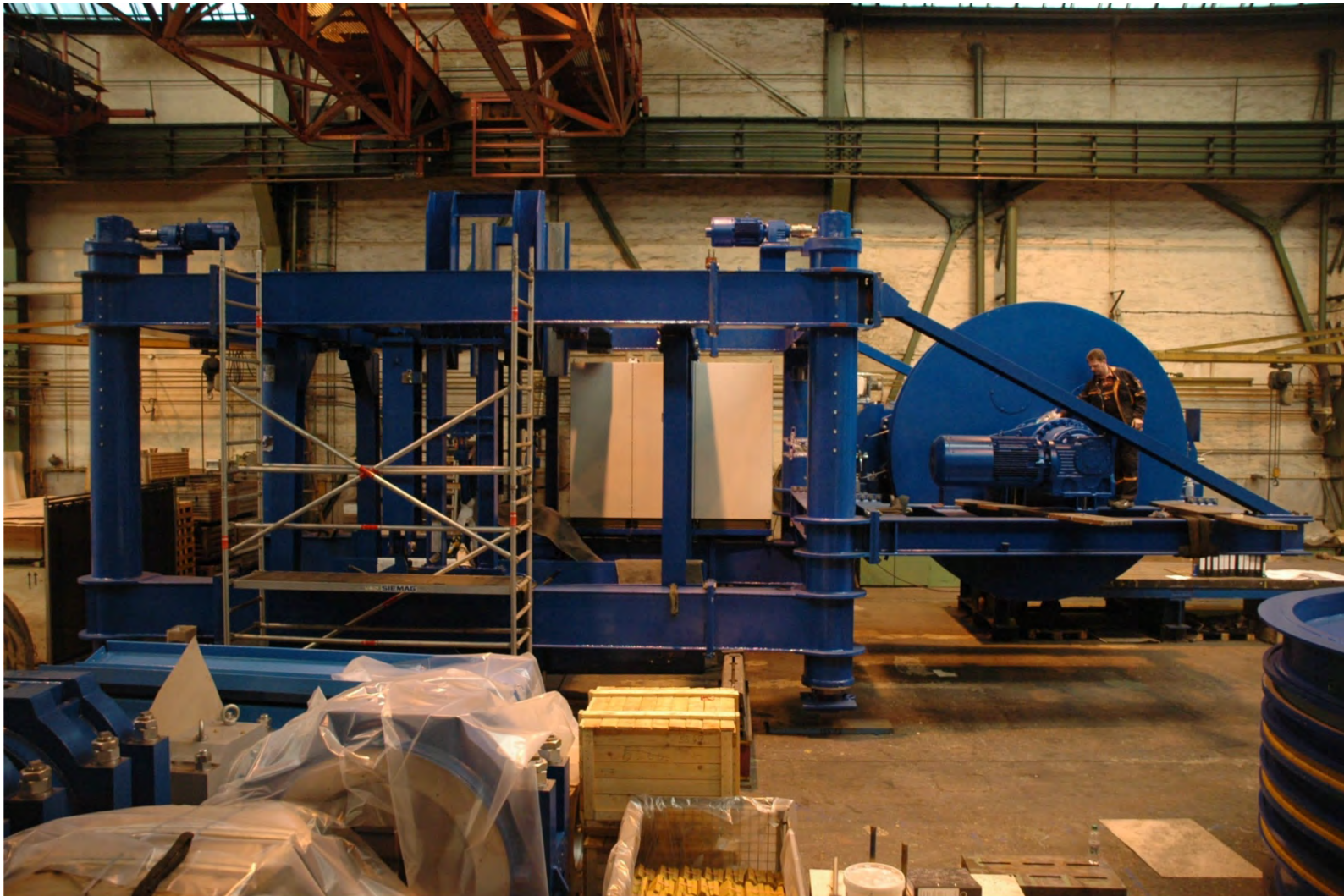


5. Einlagerungsvorrichtung

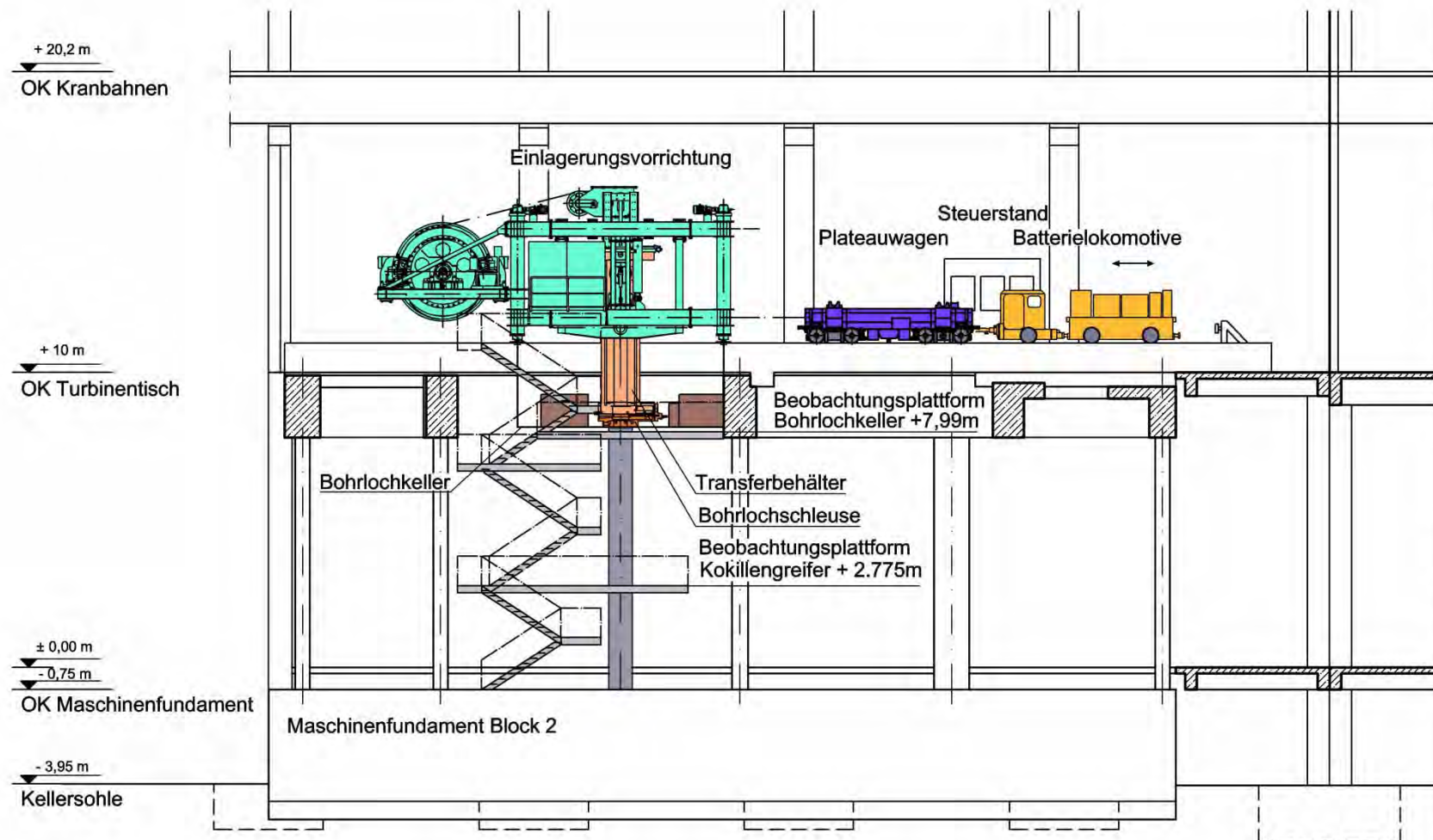


Gesamtgewicht = 66 Mg
 max. Länge = 12,2 m
 max. Höhe = 6,5 m
 max. Breite = 4,7 m

5. Herstellung Einlagerungsvorrichtung



5. Versuchsstand in Landesbergen



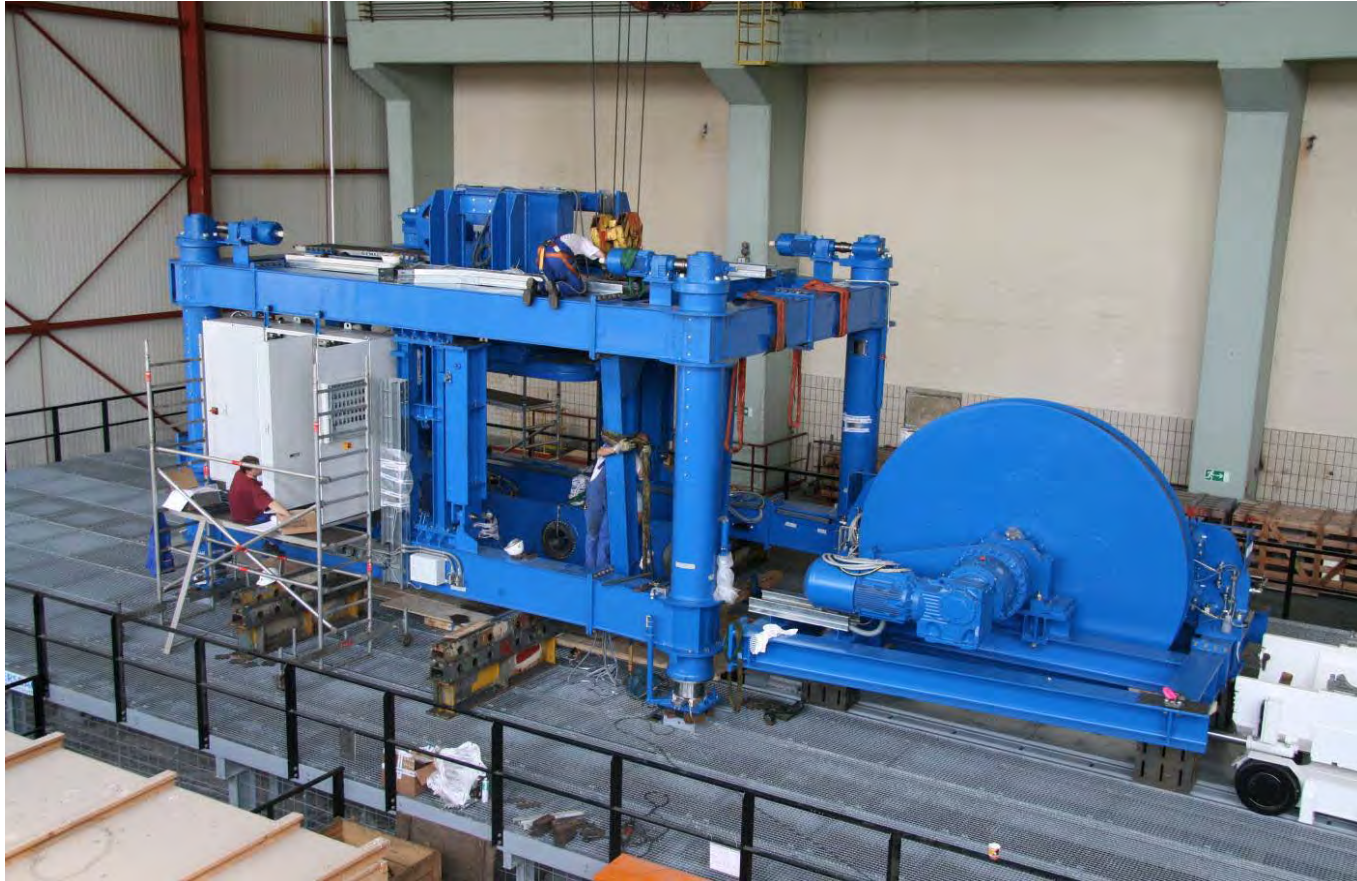
5. Versuchsstandsplattform



5. Bohrlochkeller



5. Montage Einlagerungsvorrichtung



== Zusammenfassung und Ausblick ==

1. Konzeptplanungen für ein HAW-Endlager in Salz in Deutschland hinreichend oft und genau durchgeführt
 2. Transport- und Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter - und demnächst auch für Brennstabkokillen – bis zur Genehmigungsreife entwickelt und erprobt (Nachweis der Zuverlässigkeit)
 3. Entscheidungen für standortbezogene weitere Planungen erforderlich
- Hinweise:
 - Offizielle Einweihung des Versuchsstandes zur Einlagerung von Brennstabkokillen in Landesbergen (September 2008)
 - Internationaler Workshop “Transport- und Einlagerungstechnik” in Peine und Besuch des Versuchsstandes in Landesbergen (November 2008)

DBE TECHNOLOGY GmbH



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit.**

Salz, Tongestein, Granit – Endlagerwirtsgesteine in Deutschland?

Volkmar Bräuer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2,
30655 Hannover

Einleitung

Die Frage der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist seit vielen Jahren ein international intensiv diskutiertes Thema. Laut einer Umfrage halten in Deutschland etwa 80 % der Bevölkerung die Lösung der „Endlagerfrage“ für eine dringliche Aufgabe. Dies wird auch durch Umfrageergebnisse aus dem Jahr 2005 in der Europäischen Gemeinschaft bestätigt (EUROBAROMETER 2005).

Während in einigen Ländern schon Endlager für mittel- und schwach-radioaktive Abfälle existieren, gibt es weltweit noch kein entsprechendes Endlager für den hoch aktiven und Wärme entwickelnden Abfall. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden international auch unterschiedliche Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Endlagerung untersucht. In vielen Ländern spielen dabei die jeweiligen nationalen geologischen Gegebenheiten eine wesentliche Rolle.

Wirtsgesteinsstudien in Deutschland

Nach dem deutschen Entsorgungskonzept sollen die bei der Stromerzeugung in Kernkraftwerken anfallenden hoch radioaktiven Abfälle konzentriert und isoliert in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Der langzeitsichere Einschluss der Abfälle in einem Endlager und ihre Isolation von der Biosphäre werden durch ein Mehrbarrierensystem gewährleistet, das aus einer geologischen und technischen Barriere besteht. Der Geologie kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Eine günstige geologische Gesamtsituation mit einem geeigneten Wirts- und Barrieregestein, das entsprechend dem deutschen Endlagerkonzept die Hauptlast im Mehrbarrierensystem übernimmt, ist die wesentliche Voraussetzung für einen geeigneten Endlagerstandort.

Zur Frage der möglichen Endlagerwirtsgesteine in Deutschland hatte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) je einen Katalog für die Salz- und Kristallinvorkommen veröffentlicht, deren Ergebnisse auch heute noch aktuell sind und Gültigkeit haben (KOCKEL & KRULL 1995, BRÄUER et al. 1994).

Als Ergebnis wurden dabei Salzstöcke und Regionen mit Kristallinvorkommen in Deutschland ausgewiesen, die als weiter untersuchungswürdig eingestuft wurden. Die Untersuchungen stützten sich auf Literatur-, Archiv- und Bohrungsdaten. Feldmessungen wurden nicht durchgeführt. Die Ergebnisse der Studien wurden am 28. August 1995 im Rahmen einer Pres-

sekonferenz von der damaligen Bundesumweltministerin Dr. Merkel der Öffentlichkeit vorgestellt.

Die BGR erhielt im Jahre 2003 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) den Auftrag, in Ergänzung zu den Untersuchungen zu Steinsalz und Kristallingesteinen, eine Studie über die Verbreitung von Tongesteinen als potenzielle Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland zu erstellen (HOTH et al. 2007).

Bei den für Tongesteine durchgeführten Untersuchungen dienten international anerkannte, von der BGR für die Wirtsgesteine Salz und Kristallin formulierte Ausschluss- und Abwägungskriterien als Grundlage. Sie wurden ergänzt durch die im Jahr 2002 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte aufgestellten wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (AkEnd 2002). Zusätzlich wurden von der BGR weitere, aus geowissenschaftlicher Sicht als maßgeblich erachtete, Abwägungskriterien bei der Auswahl der Regionen herangezogen.

Das Konzept der Endlagerung in geologischen Formationen setzt generell eine ausreichende Festigkeit für die Erstellung und Offenhaltung der untertägigen Strecken voraus. Besonders in tieferen Bereichen kann die Standsicherheit der Strecken in Tongesteinen nur mit Ausbaumaßnahmen erreicht werden. Bei unverfestigten Tonen sind diese Maßnahmen besonders aufwändig und kostspielig. Daher wurden nur verfestigte Tongesteine in die Betrachtung der BGR einbezogen. Endlagerrelevante Forschungsergebnisse von mineralogischen, geochemischen und geotechnischen Untersuchungen an Tongesteinen in internationalen Felslabors wurden ergänzend berücksichtigt.

Grundlage der im Rahmen der BGR-Tonstudie durchgeführten Beurteilung von Tongesteinsformationen im tieferen Untergrund Deutschlands waren etwa 25.000 Bohrungen, die im Rahmen der Erdöl-, Erdgas-, Salz-, Erz- oder anderer Rohstofferkundung sowie in geringerem Umfang als Forschungs- und Kartierungsbohrungen abgeteuft und ausgewertet wurden. Die Informationen zu den Bohrungen liegen in der BGR, dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie anderen staatlichen Geologischen Landesdiensten vor.

Lücken durch nicht zur Verfügung stehende digitale Datensätze wurden durch die Erfassung von Daten in anderen Formaten geschlossen. Dies betrifft einerseits nicht vorhandene Detailinformationen zu den Tongesteinsformationen und andererseits aber auch die Auswertung von tieferen Bohrungen mit anderem Erkundungsziel (z.B. Geothermie, Erzerkundung). Zusätzlich zu den Bohrungsdaten wurden die Ergebnisse wichtiger seismischer Profilmessungen mit einbezogen, sie bildeten zum Beispiel eine wichtige Grundlage für die Erfassung und Charakterisierung von Störungen und deren Tiefenreichweite. Auch die Korrelation von geophysikalischen Messergebnissen ermöglichte eine weitgehende Erfassung von endlagerrelevanten Parametern.

Die BGR-Tonstudie lieferte als Ergebnis keine Darstellung von Endlagerstandorten. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass mächtige und homogene Tongesteine, welche die Mindestanforderungen an Endlagerwirtsgesteine erfüllen, in der Unterkreide sowie in Gesteinen des Unter- und Mitteljura Norddeutschlands auftreten. In Süddeutschland konnten stärker regional begrenzt Gesteine des Mitteljuras als untersuchungswürdig ausgewiesen werden. Die Tonformationen des Tertiärs wurden dagegen wegen ihrer ungünstigen mechanischen Eigenschaften in der BGR-Studie nicht weiter betrachtet.

Geografisch und raumordnerisch gesehen liegen die ausgewiesenen Teilgebiete vor allem in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg und untergeordnet auch in Brandenburg und Nordrhein-Westfalen. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass eine weitere Eingrenzung der ausgewiesenen Teilgebiete im Sinne einer Standortauswahl nur mit einem sehr aufwändigen Erkundungsprogramm möglich ist.

Eigenschaften von Steinsalz

International werden im Rahmen der einzelnen Endlagerkonzepte im Wesentlichen Tongesteine, Steinsalz und Kristallingesteine als mögliche Endlagerwirtsgesteine untersucht. Schon Ende der 50-iger Jahre gab es in Deutschland Überlegungen über die Endlagerung in Salzgesteinen. Aufgrund jahrzehntelanger Forschung und über hundertjähriger Erfahrung im Salzbergbau wurde inzwischen ein umfangreiches Wissen zu den endlagerrelevanten Eigenschaften von Steinsalz und Salzformationen erarbeitet.

Unter natürlichen Lagerungsbedingungen ist Steinsalz praktisch undurchlässig gegenüber Gasen und Flüssigkeiten. Steinsalz besitzt zudem eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie viskoplastische Eigenschaften, die zum Verschluss von Hohlräumen im Gebirge führen. Aufgrund dieser günstigen Eigenschaften ist Steinsalz insbesondere als Wirtsgestein für Wärme entwickelnde hochaktive Abfälle (HAW) sehr gut geeignet.

Eigenschaften von Kristallingesteinen

Neben den Salzformationen wurden im Rahmen der BGR-Studien Kristallinvorkommen in ihrer räumlichen Ausdehnung und ihren spezifischen Eigenschaften in Deutschland untersucht. Kristallingesteine (Granite und metamorphe Gesteine) zeichnen sich besonders durch ihre hohe Festigkeit und Hohlraumstabilität sowie durch ihre geringe Temperaturempfindlichkeit aus. Auch ihr sehr geringes Lösungsverhalten ist für die Endlagerung günstig. Während die Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im ungeklüfteten Zustand meist sehr gering ist, weisen diese Gesteine im geklüfteten Zustand deutlich höhere bis sehr hohe Durchlässigkeiten auf. In diesem Fall ist der dichte Einschluss der Abfälle nur durch Hinzuziehung geeigneter, technischer Barrieren (Behälter, Bentonit-Versatz) zu gewährleisten.

Eigenschaften von Tongesteinen

Tongesteine weisen eine Bandbreite, vom plastischen Ton mit Übergangsformen bis zum stark verfestigten und z. T. geklüfteten Tonstein, auf. Dabei können erhebliche Unterschiede im Verformungsverhalten, der Temperaturempfindlichkeit und der Gebirgsstabilität auftreten. Die bisher bekannten, für die Endlagerung günstigen Eigenschaften der Tongesteine sind insbesondere die sehr geringe Durchlässigkeit und die hohe Sorptionsfähigkeit. Tongesteinsformationen haben als abdeckende, dichte Schichten z. B. für Kohlenwasserstoffvorkommen ihre langfristige Wirksamkeit als geologische Barriere nachgewiesen.

Konsequenzen für die Endlagerkonzepte

Als Konsequenz der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften sind die Endlagerkonzepte im Steinsalz, in Tongesteinen und in Kristallingesteinen ebenfalls unterschiedlich. Das Endlagerkonzept für Steinsalz basiert aufgrund der Undurchlässigkeit und der Kriecheigenschaften des Steinsalzes auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle. Im Hinblick auf die Qualität der Bewertung zugrunde liegenden Daten gilt generell, dass die standortspezifischen Kenntnisse über die Steinsalzvorkommen in Deutschland im Vergleich zum Kenntnisstand über Tongestein- und Kristallinvorkommen wesentlich größer sind. Eine umfassende Wissensbasis der Eigenschaften der Salzgesteine sowie erprobte Erkundungsmethoden und –verfahren sind vorhanden.

Im Vergleich zu Steinsalz sind die Kenntnisse über Tongesteinsformationen u. a. auch wegen der geringen Bergbauerfahrung geringer. Beim Endlagerkonzept mit Tongesteinen als Wirtsgestein darf die durch die Abfallwärme hervorgerufene maximale Gebirgstemperatur wegen der möglichen Veränderungen der physikalischen Eigenschaften der Tonminerale insbesondere infolge von Mineralumbildungen eine Temperatur von 100 °C nicht überschreiten (zum Vergleich Steinsalz: 200 °C). Dies bedingt eine längere Zwischenlagerzeit, ein für Deutschland neu zu entwickelndes Endlagerkonzept mit einem wesentlich erhöhten Platzbedarf sowie ein neues Behälterkonzept. In Tongesteinen sind zudem Sicherungsmaßnahmen (Spritzbeton, Ankerung und evtl. Ausbau) für die untertägigen Hohlräume notwendig, wobei dann die Gasbildung und das veränderte chemische Milieu zu berücksichtigen sind.

Kristallingesteine besitzen eine sehr hohe Festigkeit. Untertägige Hohlräume sind daher für den Betrieb von Zugangs- und Einlagerungsstrecken in der für die Endlagerung relevanten Tiefe im Allgemeinen ohne Ausbau standsicher. Obwohl kristalline Gesteine selbst keine hohen Temperaturempfindlichkeiten aufweisen, gelten die Einschränkungen in Bezug auf die maximal mögliche Temperaturbelastung wie bei den Tongesteinen, da die Einlagerungsstrecken mit Bentonit als zusätzliche Barriere versetzt werden müssen. Dies bedingt im Vergleich zur Einlagerung in Steinsalz einen erheblich höheren Platzbedarf und Aufwand.

Internationale Forschungsarbeiten zur Endlagerung

International sind deutsche Forschungseinrichtungen in die Untersuchungen in zahlreichen Untertage-Laboratorien eingebunden, z. B. in Frankreich (Meuse/Haute Marne), in der Schweiz (Mt. Terri, Grimsel) und in Schweden (Äspö). Ziel dabei ist es, Erkenntnisse über die unterschiedlichen Wirtsgesteine zu erlangen und Methoden für die Untersuchungen im eigenen Land zu entwickeln. Der dabei notwendige große Aufwand dient auch dazu, die eigenen Untersuchungsergebnisse international abzusichern. Die internationalen Projekte bilden eine hervorragende Basis um die Schwerpunkte der deutschen Endlagerforschung, die zukünftig im Wesentlichen in Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagersystemen liegen und die die weitere Charakterisierung von Tongesteinen als Alternative zu Steinsalz als Wirtsgestein zum Thema haben, zu bearbeiten.

Ausblick

Obwohl die Untersuchungen und Forschungsarbeiten auf dem Weg zu einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle schon sehr weit gediehen sind, ist die Frage der Standortbestimmung nur in den wenigsten Ländern weit fortgeschritten. In Deutschland ist dies im Wesentlichen damit begründet, dass die für die Bestimmung eines Standortes notwendigen politischen Entscheidungen nicht getroffen wurden und auch weiter ständig verschoben werden. Dieser politisch bedingte Stillstand bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle wird in der Öffentlichkeit dergestalt interpretiert, dass für politische Entscheidungen offensichtlich noch keine ausreichenden wissenschaftlich-technischen Lösungen vorliegen. Um diesem Trugschluss entgegen zu treten, sollte es daher Aufgabe der Politik sein, die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse aufzugreifen und auch dem dringenden Wunsch der Öffentlichkeit nachzukommen, die Lösung der Endlagerfrage zügig anzugehen.

Literatur

AKEnd (2002):

Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte).- 260 S., Köln.

Bräuer, V.; Reh, M.; Schulz, P.; Schuster, P.; Sprado, K.-H. (1994):

Endlagerung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen.- 142 S., BGR, Hannover.

Eurobarometer (2005): “Radioaktive Abfälle”, Eurobarometer Spezial 227/ Wave 63.2 - TNS Opinion & Social.

Hoth, P.; Wirth, H.; Reinhold, K.; Bräuer, V.; Krull, P.; Feldrappe, H. (2007):

Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.- 118 S., BGR, Hannover, Berlin.

Kockel, F.; Krull, P. (1995):

Endlagerung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen.- 66 S., BGR, Hannover, Berlin.

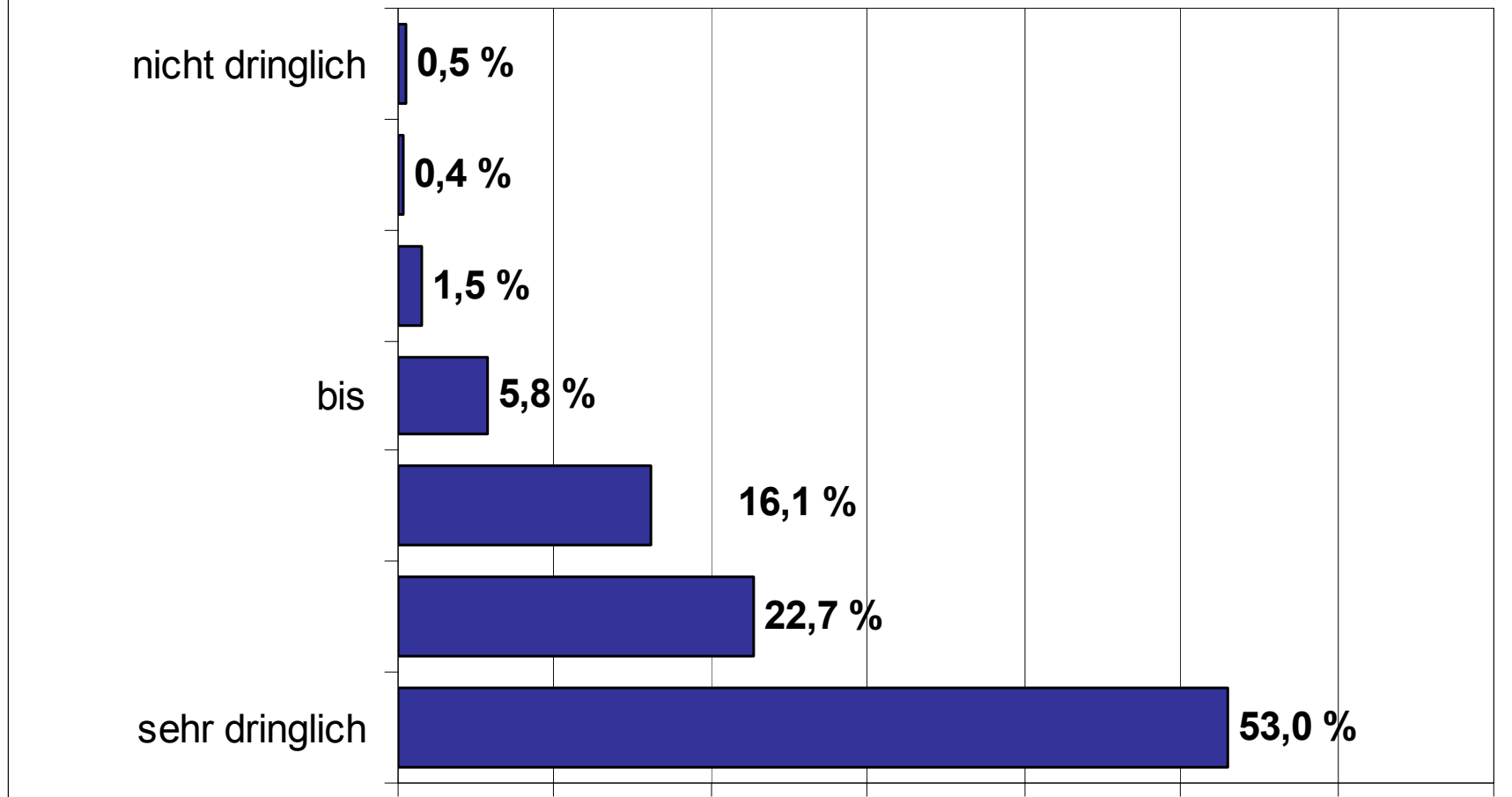


Salz, Tongestein, Granit –
Endlagerwirtsgesteine in Deutschland ?

Volkmar Bräuer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Für wie dringlich halten Sie das Problem der Endlagerung?



Quelle: AkEnd 2002

Endlagerwirtsgesteine international

Land	Endlager MAW/LAW	HAW Wirtsgestein	Vorauss. Betrieb
Deutschland	(ja) kein Betrieb	Steinsalz, (Alternativen)	2030
Frankreich	ja	Tonstein	Offen
Belgien	nein	Ton	Offen
Finnland	ja	Granit	2020
Großbritannien	ja (LLW)	offen	Offen
Schweden	ja	Granit	2015
Spanien	ja	Ton, Salz, Granit	Standort nicht vor 2010
Niederlande	(ja) 100 Jahre	Tonstein, Steinsalz	in 100 Jahren
Italien	nein	nicht festgelegt	offen
Litauen	ja	Ton, Anhydrit, Salz, Kristallin	offen
Slowak. Republik	ja	Granite, Siltstein, Ton	Standort nicht vor 2010
Slowenien	nein	Unverfestigte Sedimente, Tonstein, Granite	offen
Tschech. Republik	ja	Granite	2030
Ungarn	ja	Tonstein	2050
Schweiz	nein	Tonstein, (Granit)	2040
Bulgarien	nein	Mergel, Granit	offen
Rumänien	ja	Salz	offen
USA	ja	Tuff	2010
Japan	ja	Granit	2030

40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

Endlagerung im Salzgestein

- 1957: In USA wird die unterirdische Einlagerung in Salzformationen als Erfolg versprechendste Lösung bezeichnet (NAS).
- 1959: Von der Bundesanstalt für Bodenforschung (BfB) wird die Einlagerung in Salzformationen in Deutschland empfohlen (Monaco, November 1959)
- 1961: Die oberirdische Endlagerung wird von der Deutschen Atomkommission (DAAtK) verworfen.
- 1963: Die DAAtK beschließt ein Programm zur Endlagerung in einer Steinsalzformation.

Entsorgung radioaktiver Abfälle

Organaufsicht
Weisungsebene



Konzeptentwicklung unter
geowissenschaftlicher und
geotechnischer Mitarbeit
der BGR, Kontrolle



Forschungsarbeiten
Ausführung der
Projekte



Endlagerung - Arbeitsgebiete der BGR

1. Standortbezogene Arbeiten

Morsleben, Gorleben, Konrad

2. Forschung und Entwicklung

Wirtsgesteine, Geotechnische Barrieren,
Langzeitsicherheit

3. Internationale Zusammenarbeit

Kooperationsabkommen, Untertagelabors

Standortauswahl



Forschung



Erkundung

Langzeitsicherheit

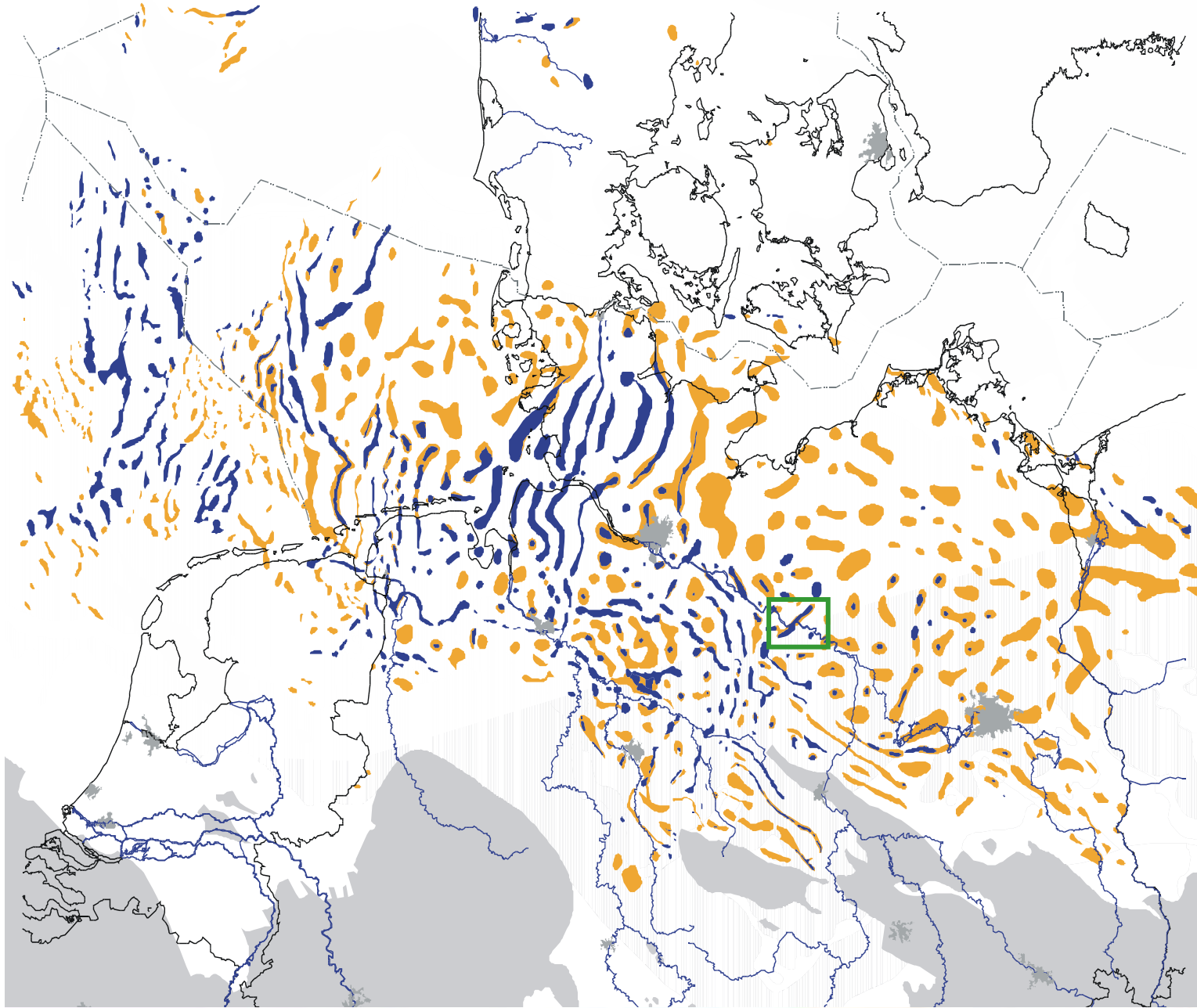
40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

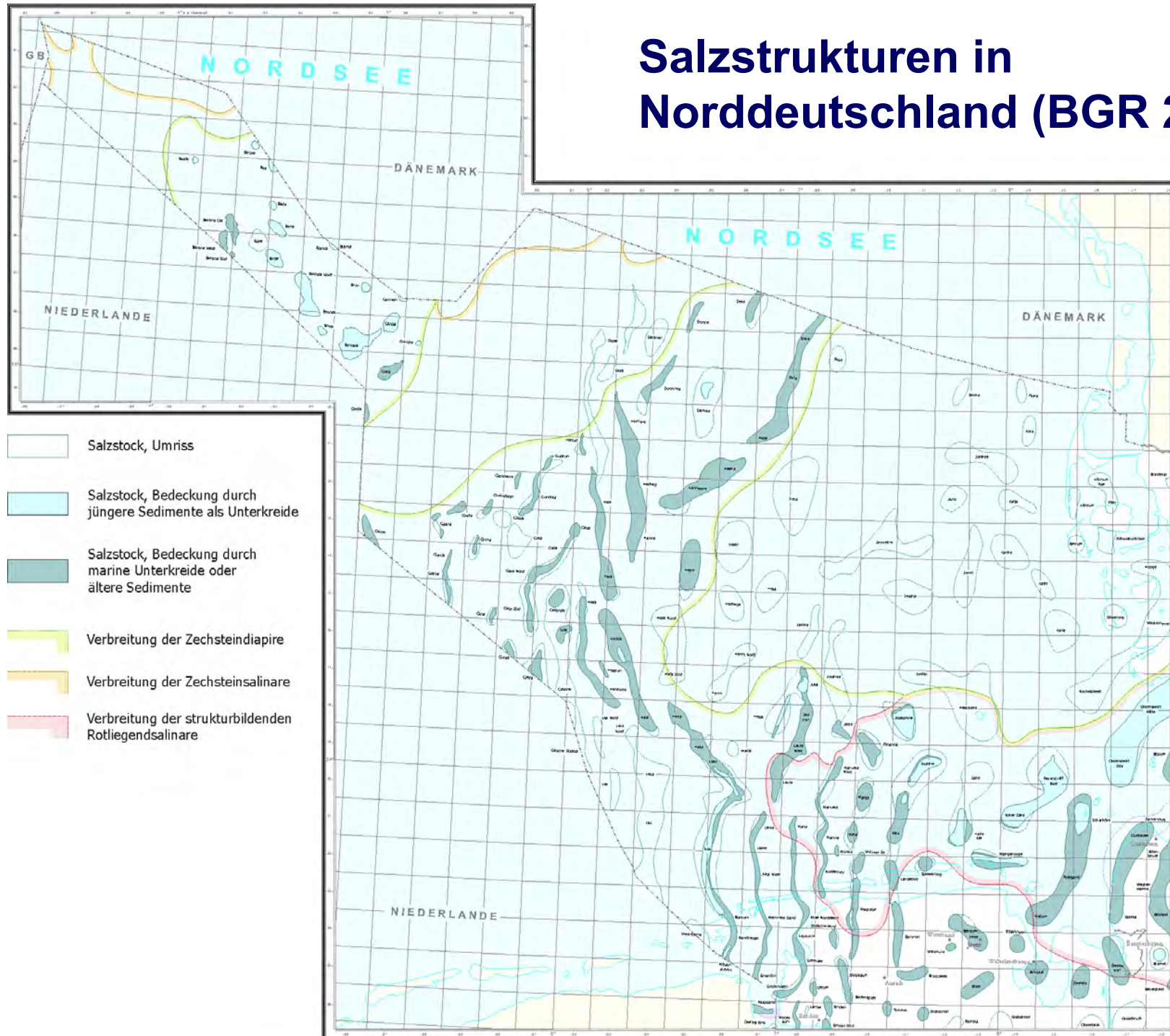
GEOZENTRUM HANNOVER

Salinarstrukturen

- Salzstöcke
- Salzkissen
- Präpermausstrich, z.T. unter Känozoikum



Salzstrukturen in Norddeutschland (BGR 2008)



Beauftragung der BGR zur Durchführung der Salinar- und Kristallinstudien

▶ Koalitionsvereinbarung zur 12. Legislaturperiode 1990

„Standorterkundung für stark wärmeentwickelnde Abfälle, ggf. auch in europäischer Kooperation, unbeschadet der Fortführung des Genehmigungsverfahrens Gorleben“

D.h., dass aus Gründen der Entsorgungsvorsorge auch andere Gesteinsformationen zur Vervollständigung des Kenntnisstandes über potentielle Endlagerwirtsgesteine überprüft werden sollen.

▶ Auftraggeber: BMU (Salinar) / BMFT (Kristallin)

Name	Kulmination in m u. NN	Deckge- birgsmäch- tigkeit in m (min.)	Fläche 300 m u. Caprockober- fläche in km ²	Fläche 1000 m u. NN in km ²	Tiefe des Salz- spiegels in m u. NN	Salin- ar- al- ter	Überdeckung im Scheitel- bereich (Formation)	kon- kurr. Nutz- ung
Baccum	300-500 *	340-540	15,0	15,0	?	jo	kru, tpg, q	nein
Bahnsen	160	220	11,0	21,0	180-208	z	tpg, q	ja
Bersenbrück (Alfhausen)	200	240	58,0	58,0	?	jo	kro, tpg, q	nein
Bippen (Ohrte)	200-500 *	225-525	52,0	52,0	?	jo	kru, tpg, q	nein
Colbitz	125	187	14,8	6,9	180-250	z	tpg, q	nein
Damme	200	240-260	15,0	15,0	?	jo	kru, kro, tpg, q	nein
Demker-Grieben	250 u. 500 (2x) **	285 u. 580	5,6 ***	5,6 ***	?	z	tpg, q	nein
Eisendorf-Gnutz	200 u. 480 (2x) **	230 u. 505	65,0	92,0	411 u. 686	ro, z	kru, kro, q	nein
Eitzendorf	389	403	6,5	13,0	440	z	tpg, q	nein
Gülze-Sumte	111 u. 305 (2x) **	122 u. 345	60,0	90,0	165 u. 367	z	tpg, tng, q	nein
Hamdorf	350	360	18,0	48,0	498	ro, z	kru, kro, q	nein
Harsefeld	240	270	37,0	40,0	300-340	ro, z	tpg, tng, q	ja
Hennstedt	390 (2x) **	395	58,5	70,0	683	ro, z	kro, tpg, q	nein
Herzlake (Haselünne)	340-500 *	355-515	30,0	30,0	?	jo	tpg, tng, q	nein
Jahrstedt	150 u. 200 (2x) **	220	5,5	9,9	?	z	tpg, q	nein
Kraak	249	280	27,7	18,4	340	z	q	ja
Krempa	30	32	26,5	62,0	75	ro, z	q	nein
Lilienthal	183	186	20,0	38,0	205	z	kro, tpg, q	nein
Lohne	300-800 *	330-830	38,0	38,0	?	jo	tpg, q	nein
Mützel-Wiesen	384 u. 310 (2x) **	347 u. 420	8,5 ***	8,5 ***	?	z	tpg, q	nein
Netzeband	140	180-210	14,9	14,1	ca. 500?	z	tng, q	nein
Neusustrum	180	191	3,0	15,0	250-280	z	tng, q	nein
Oberlanger Tenge	140	152	10,0	8,5	157-180	z	tpg, tng, q	ja
Peckensen	236 u. 240 (2x) **	285	46,0	42,0	340-400	z	tpg, q	ja
Schnellingen	240	130	6,0	9,0	265	z	tpg, q	nein
Siek	200	260	6,5	14,0	400	ro, z	kro, tpg, q	nein
Stammen-Otter-Todtshorn	600 (3x) **	640-660	25,5	43,0	?	z	kro, tpg, tng, q	nein
Sterup	260	320	15,3	25,5	>277	ro, z	kro, q	nein
Taaken	200 u. 250 (2x) **	225 u. 280	12,0	23,0	260-270	z	kro, tpg, tng, q	ja
Thedinghausen	275 u. 380 (3x) **	284 u. 290	9,0	11,0	300-410	z	kro, tpg, tng, q	nein
Volkwardingen	150	250	14,0	25,0	?	z	tpg, q	nein
Vorhop	200	260-270	23,0	21,0	260	z	tpg, q	ja
Waddekath	300 u. 300 (2x) **	440	16,5	16,5	363-441	z	tpg, tng, q	nein
Wahn	290 (2x) **	300-310	23,0	36,5	315-330	z	kru, tpg, tng, q	nein
Weesen-Lutterloh	49 u. 100 (2x) **	130 u. 170	15,5	40,5	114-145	z	kro, tpg, q	nein
Werle	511	545	40,0	40,0	700	z	kru, tpg, tng, q	nein
Wittingen	190	270	8,0	12,0	218-290	z	tpg, q	ja
Wredenhagen	73	150	12,0	11,0	293	z	tng, q	nein
Zechlin	200	260-300	14,8	16,0	>500?	z	tng, q	nein
Zobbenitz	200	250	11,0	0,0	219	z	tpg, q	nein
Zwischenahn	290 u. 380 (2x) **	300 u. 390	38,0	26,0	340 u. 430?	z	kro, tpg, q	nein

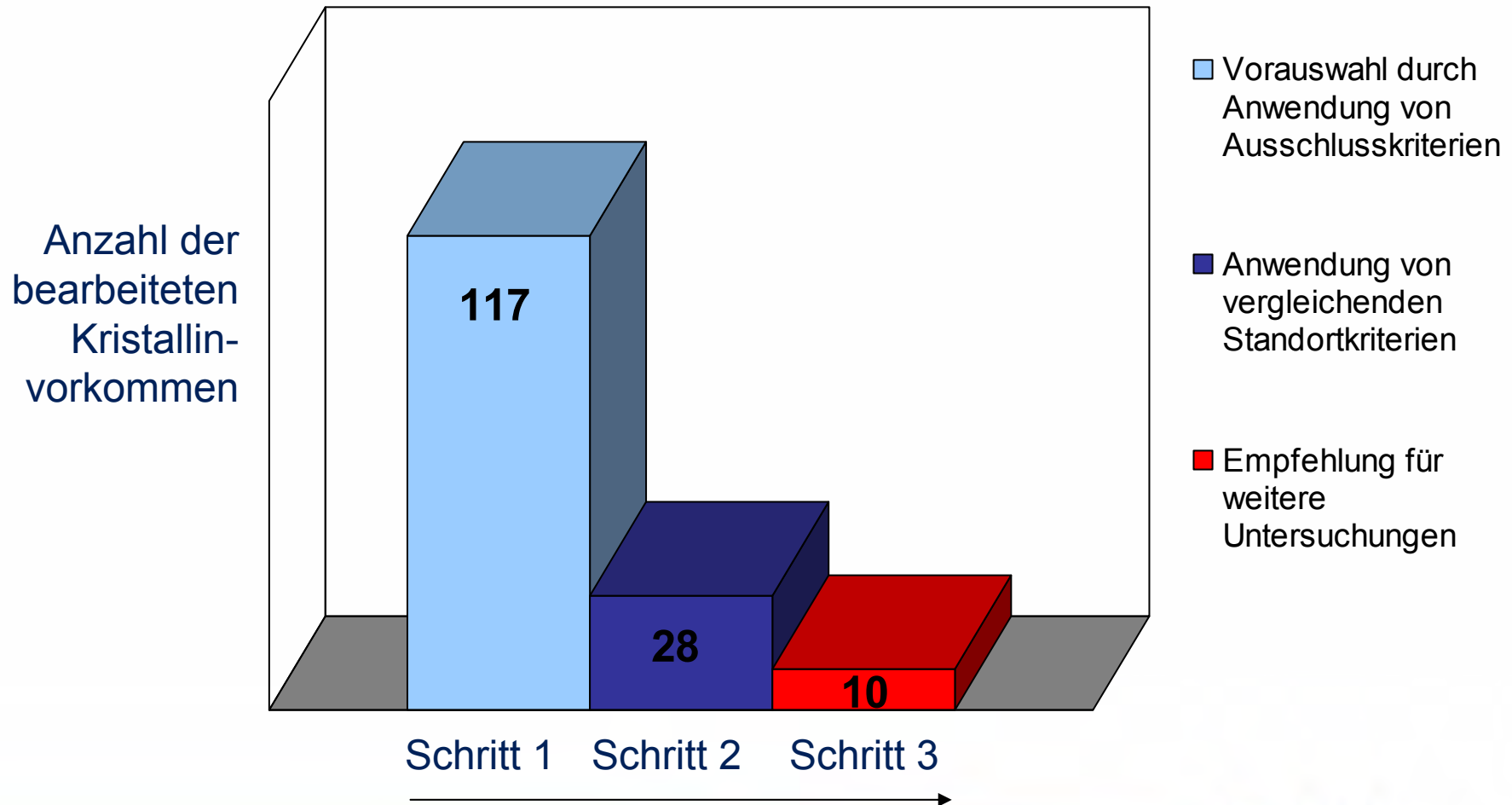
Bewertung von Salzstrukturen in Deutschland

BGR 1995

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Ergebnis der Kristallinstudie



40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

Bewertung der Kristallinvorkommen in Deutschland

Merkmalkategorie	Faktoren	Boyerisches Kristallin																		Elbezone						Erzgebirge/Vogtland						Granulit							
		Fichtelgebirge				Finn-sterau				Nördl. Oberpf. Wald		Saldenburg		Granodiorit		Dahlen-Loos		Schildau		Amphibolmonzonit		Biotit-monzonit		Syenit-Raudnitzgneise		Grau-stein		Nieder-bohr.		Schel-lerhau		Bergen		Eiben-stock		Kirch-berg		Granul.	
		ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB	ZW	VB
		360		101		385		137		84		44		48		*89		*40		1347		21		16		+50		+334		+116		527							
I	Tektonik / Gesteins-	Dichte der wesentl. tekt. Elemente in Anz./km ² (F6)	0,14	0,18	0,13	0,08	0,09	0,11	0,14	0,19	0,10	0,04	0,00	0,19	0,20	0,06	0,04	0,05																					
		Verteilung tekt. Elemente, günstig bis ungünstig in Bezug auf Freiflächen (F3)	g	m	g	m	g	u	g	u	m	g	g	u	u	m	g	g	g	g																			
	homogenität	Deformationsgrad, hoch bis gering (F3)	m	g	m	g	h	(g)	g	g	(m)	m	g	g	m	m	m	m	m	m																			
		Gesteinshomogenität, hoch bis gering (F3)	g	m	g	m	g	(h)	g	g	m	g	g	g	m	g	g	m	g	m																			
	Grundwasser- austritte	Anzahl der Quellen/km ² (F3)	0,5	0,9	0,2	0,5	0,0	0,0	<0,1	<0,1	-	0,1	-	0,1	0,1	0,3	0,1	-	-	-																			
		Bewertung Gruppe I (F3)																																					
II	Bergbau	Flächenanteil Untertageabbau in % (F3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	0,2	2	8	12	1	-	-																				
		Flächenanteil Obertageabbau in % (F3)	0,3	-	0,2	0,8	7,0	0,4	3	4	5	0,2	0,5	-	2	0,2	2	2	2																				
		Bewertung Gruppe II (F3)																																					
III	Hydrographie	Dichte der Vorfluter in km/km ² (F3)	1,2	1,8	1,1	1,3	0,5	0,6	0,6	0,5	1,1	3,4	0,8	1,8	0,8	0,8	0,7	0,5																					
		Entwässerungsrichtg. bezügl. Trennflächen, parallel bis nicht parallel (-; ≠) (F2)	=	-	≠	≠	=	=	=	=	=	-	≠	-	-	≠	-	-	=																				
		Anteil max. Stauhaltung in Mm ³ /km ² (F3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	-	-	-	0,3	0,01	0,02																				
		Bewertung Gruppe III (F3)																																					
IV	Seismizität	Erdbebenzone nach DIN 4149 (F3)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
V	Zusätzliche Angaben	Effektive Flächengröße in km ² (F6)	344	50	380	137	84	44	47	*83	*39	1261	21	15	+46	+283	+113	501																					
		Durchschnittliches Alter p=prävariszisch; v=variszisch (F3)	v	v	v	v	p	p	v	v	v	p	v	v	v	v	v	v	p																				
		Durchschnittliches Vorflutergetöse in % (F3)	22	80	3	9	2	3	5	5	10	20	13	22	16	34	17	10																					
		Max. Mächtigkeit des Deckgebirges in m (F3)	<10	<10	<10	<10	50	150	50	50	50	-	-	-	-	-	-	-	50																				
		Bewertung Gruppe V (F3)																																					
		Bewertung Gruppen I-IV (F6)																																					
Gesamtbewertung Gruppen I-V (F6)																																							

Abkürzungen: ZW = Zahlenwert; VB = Vergleichende Bewertung; () nicht ausreichender Kenntnisstand; - ohne Zahlenwert; * 2 Teilflächen; o geschlossene Fläche, ohne Kleinrflächen; + Fläche

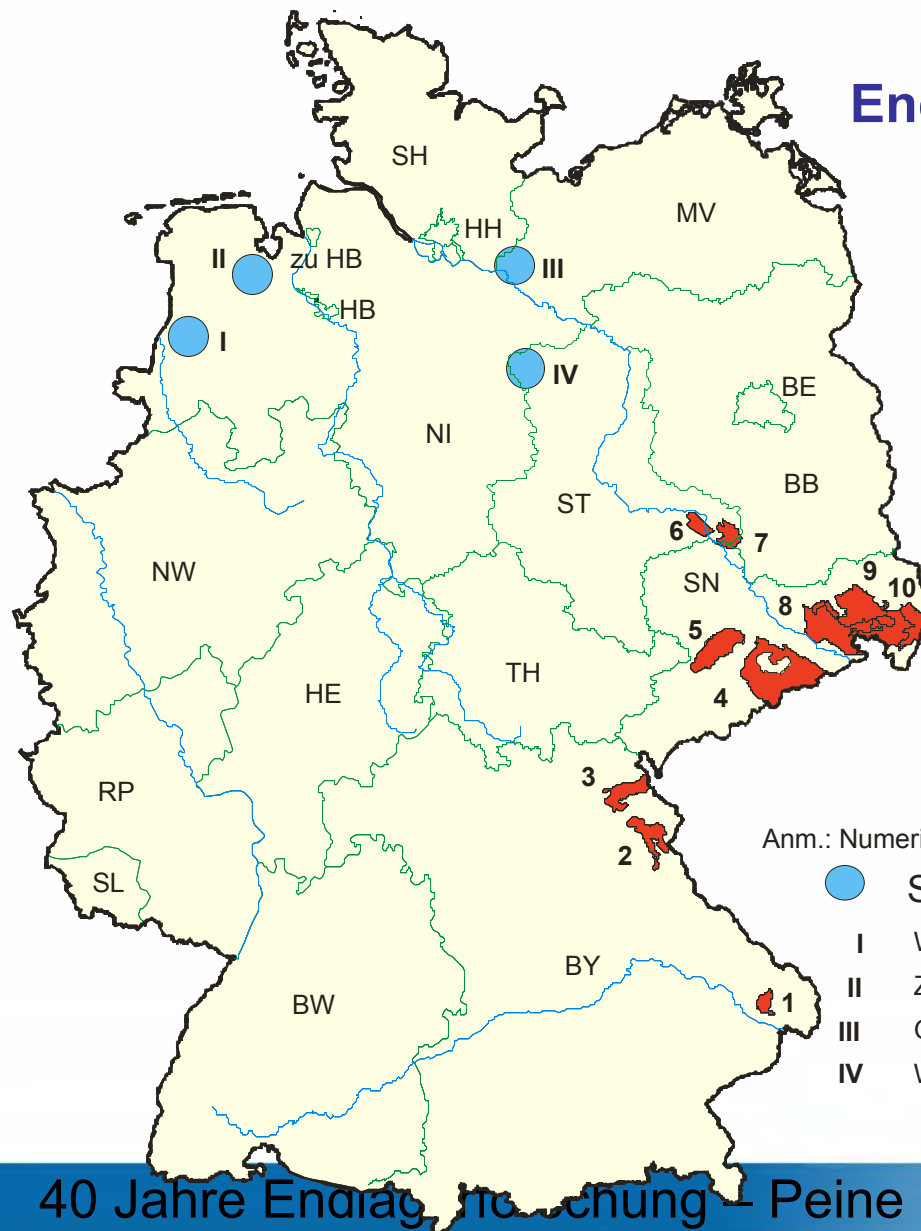
Pressekonferenz 28. August 1995

Vorstellung der BGR - Salz-/Kristallinstudie

durch BM Dr. Merkel

40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

Endlagerung stark Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen



Untersuchungswürdige Regionen
in salinaren und kristallinen Formationen
Deutschlands (1995)

Anm.: Numerierung beinhaltet keine Wertung



Salinarstrukturen



Kristallinregionen

- I Wahn
- II Zwischenahn
- III Gülze - Sumte
- IV Waddekath

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1 Saldenburg | 6 Pretzsch |
| 2 Nördl. Oberpf. Wald | 7 Prettin |
| 3 Fichtelgebirge | 8 Pulsnitz |
| 4 Graugneis | 9 Radeberg - Löbau |
| 5 Granulitgebirge | 10 Zawidow |

40 Jahre Endlagerforschung - Peine 10./11. Juni 2008

Welche Wirtsgesteine wurden untersucht?



<i>Eigenschaft</i>	<i>Steinsalz</i>	<i>Ton/Tonstein</i>	<i>Kristallingestein (z. B. Granit)</i>
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

günstige Eigenschaft
 ungünstige Eigenschaft
 mittel

Eigenschaften der Wirtsgesteine

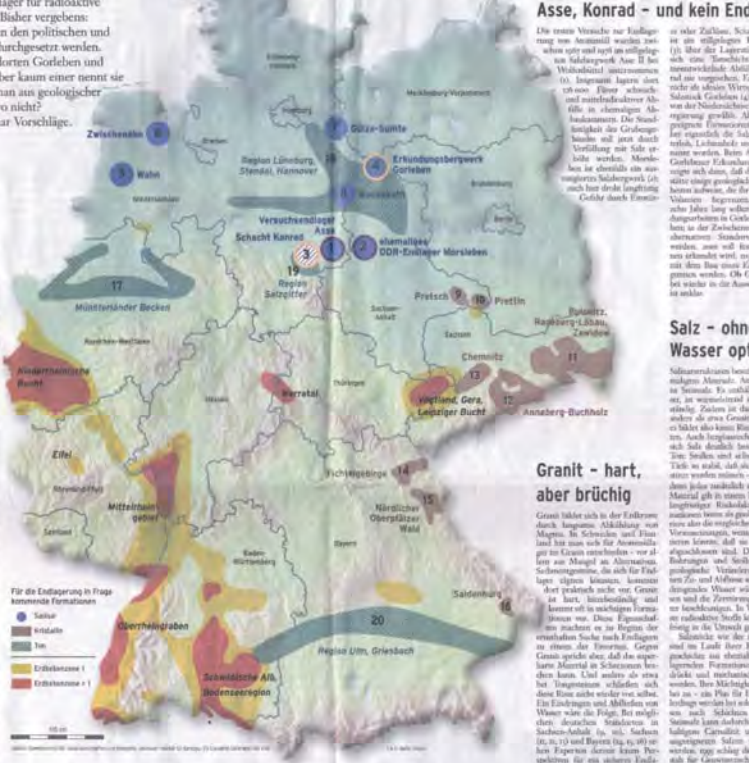
Wissenschaft

Es muß nicht immer Gorleben sein

Seit vierzig Jahren wird in Deutschland nach einem Endlager für radioaktive Abfälle gesucht. Bisher vergebens. Kein Projekt konnte gegen den politischen und juristischen Widerstand durchgesetzt werden. Alternativen zu den Standorten Gorleben und Konrad wären denkbar, aber kaum einer nennt sie beim Namen. Wo kann man aus geologischer Sicht Atommüll lagern, wo nicht? Unsere Karte zeigt ein paar Vorschläge.

Tief verbuddeln - aber wo?

Für Atomabfälle gibt es in ein- oder zwei Metern Tiefe kein Problem. Am Mittwoch kam der neue Containertyp in Gorleben an - wie geplant. Zwei Tage später ging der Inhalt in sechs Zylinder zum Nach- und Nach-nach ein. Bislang gab es nur zwei Atomabfälle, die im Jahr 2003 zum ersten Mal in ein Atomabfallbehälter gelangt sind. Das ist ein gutes Zeichen, denn es zeigt, dass die Anlagen für die Lagerung von Atomabfällen sicher sind. Die Anlagen sind jedoch noch im Bau. Die Anlagen sind jedoch noch im Bau. Die Anlagen sind jedoch noch im Bau.



Für die Endlagerung in Frage kommende Formationen

- Salze
- Kristalline
- Ergussgesteine
- Salzkammer
- Salzkammer +

Erdbeben und Vulkane - auch in Deutschland knarzt die Kruste

Die Erdkruste über die keine Richter wissen, knarzt und schrammt. Auch dort kann es zu Beben kommen. Erdbeben sind nicht nur in der Erde, sondern auch in der Kruste. Die Kruste ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen. Sie ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen. Sie ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen.

Die Kruste ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen. Sie ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen. Sie ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen. Sie ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen. Sie ist die oberste Schicht der Erde. Sie ist aus Gestein und Mineralen.

Asse, Konrad - und kein Ende

Die ersten Versuche zur Endlagerung von Atommüll wurden zwischen 1970 und 1980 an mehreren Standorten in Deutschland durchgeführt. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad.

Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad. Die Standorte waren Asse und Konrad.

Granit - hart, aber brüchig

Granit ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht. Es ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht. Es ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht. Es ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht.

Granit ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht. Es ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht. Es ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht. Es ist ein hartes Gestein, das aus Quarz, Feldspat und Glimmer besteht.

Ton - der mögliche neue Favorit

Ton ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht. Es ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht. Es ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht. Es ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht.

Ton ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht. Es ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht. Es ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht. Es ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralen besteht.

GAR NICHT SO SCHLIMM
Rätselhafter weißer Hai: Warum er Menschen eigentlich nicht gerne frisst mag, Seite 73

VIEL, VIEL SCHLIMMER
Oberirdische Atomtests: Wie Wissenschaftler und Militärs das Strahlenrisiko unterschätzten, Seiten 74-75

/11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER

Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung
14.11.2003



Peer Hoth
Holger Wirth
Klaus Reinhold
Volkmar Bräuer
Paul Krull
Hagen Feldrappe

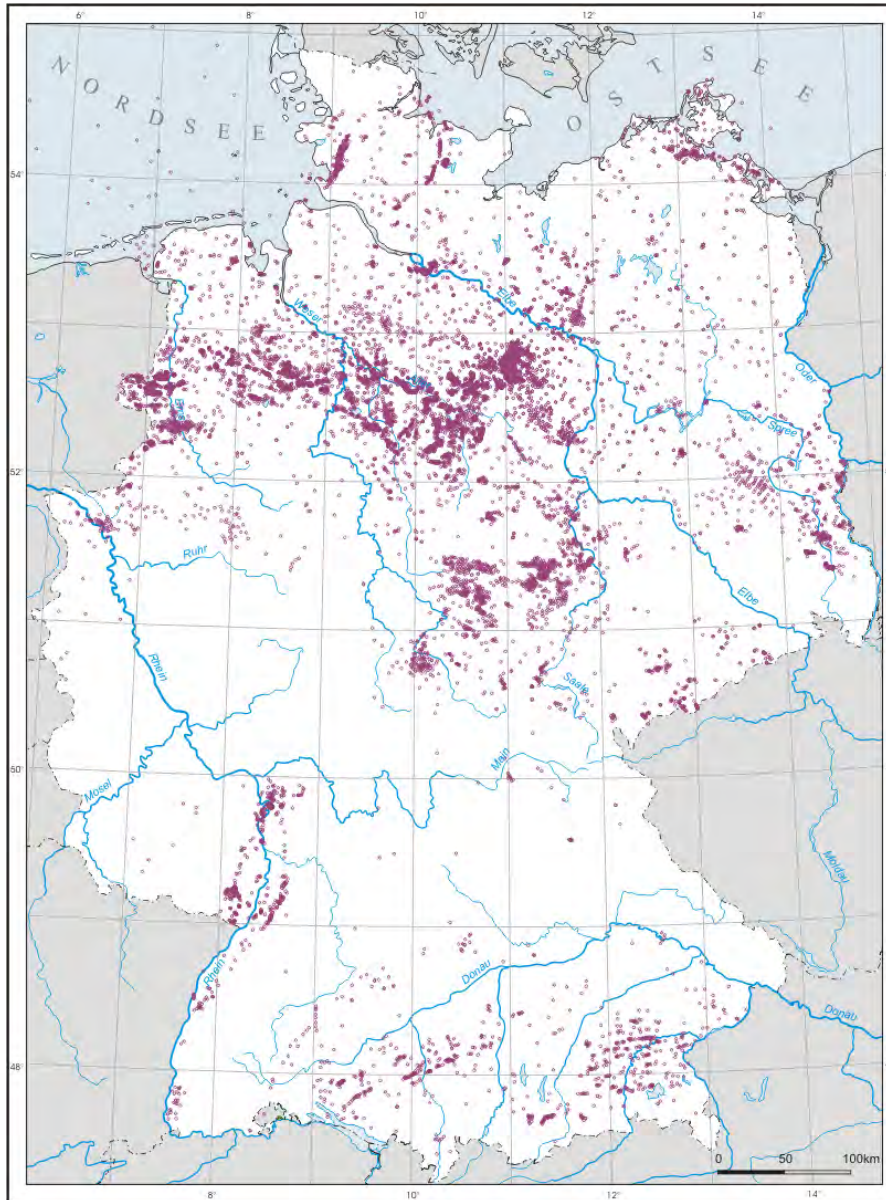
BGR 2007

Auftrag vom
Bundesministerium für
Wirtschaft und Technologie

40 Jahre Endlagertorschung – Peine 10./11. Juni 2008

Datengrundlage

- Literatur
- Archivunterlagen
- Bohrungsdaten
- Seismik-Daten
- Bohrung- und Seismik-Korrelationen
- Keine Felduntersuchungen



Datengrundlage

Bohrungen
(ca. 25 000)

Tiefenbereich >300 m

40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

System / Abteilung		Serie / Stufe	Norddeutschland		Süddeutschland	
			W	E	W	E
Tertiär	Quartär	Quartär				
	Neogen	Pliozän				
		Miozän				
		Oligozän				
	Paläogen	Eozän				
		Paläozän				
		Dan				
		Mastricht				
		Campan				
	Kreide	Oberkreide	Santon			
Coniac						
Turon						
Cenoman						
Alb						
Unterkreide		Apt				
		Barrême				
		Hauterive				
		Valangin				
		Berrias				
Jura	Oberjura (Malm)	"Serpulit"				
		"Münder Mergel"				
		"Eimbeckhäuser P.-K."				
		"Gigas-Schichten"				
		Kimmeridge				
	Mitteljura (Dogger)	"Korallenoolith"				
		"Heersumer Sch."				
		Callov				
	Unteljura (Lias)	Bathon				
		Bajoc				
Trias	Keuper	Aalen				
		Toarc				
		Pliensbach				
		Sinemur				
		Hettang				
	Muschelkalk	Rhät				
		"Steinmergelkeuper"				
		"Oberer Gipskeuper"				
	Buntsandstein	"Schilfsandstein"				
		"Unterer Gipskeuper"				
"Lettenkeuper"						
"Ob. Muschelkalk"						
"Mittl. Muschelkalk"						
Perm	Oberperm (Zechstein)	"Unt. Muschelkalk"				
		"Röt"				
		"Solling-Folge"				
		"Hardeggen-Folge"				
		"Detfurth-Folge"				
	Unterperm (Rotliegend)	"Volpriehausen-Folge"				
		"Quickborn-Folge"				
		"Bernburg-Folge"				
		"Calvörde-Folge"				
		"Möln-Zyklus"				
	"Friesland-Zyklus"					
	"Ohre-Zyklus"					
	"Aller-Zyklus"					
	"Leine-Zyklus"					
	"Stäbfurt-Zyklus"					
	"Werra-Zyklus"					
	Oberrotliegend					
	Unterrotliegend					

Stratigrafische Position von Tongesteinsformationen in Deutschland



Formation mit hohem Ton-/Tonsteinanteil



regionale/lokale Verbreitung von Tongesteinen mit guter räumlicher Charakterisierbarkeit - besonders endlagerrelevant



regionale/lokale Verbreitung von Tongesteinen mit stark eingeschränkter räumlicher Charakterisierbarkeit



Formation mit höherem grobklastischen Anteil (Sandsteine, Siltsteine)

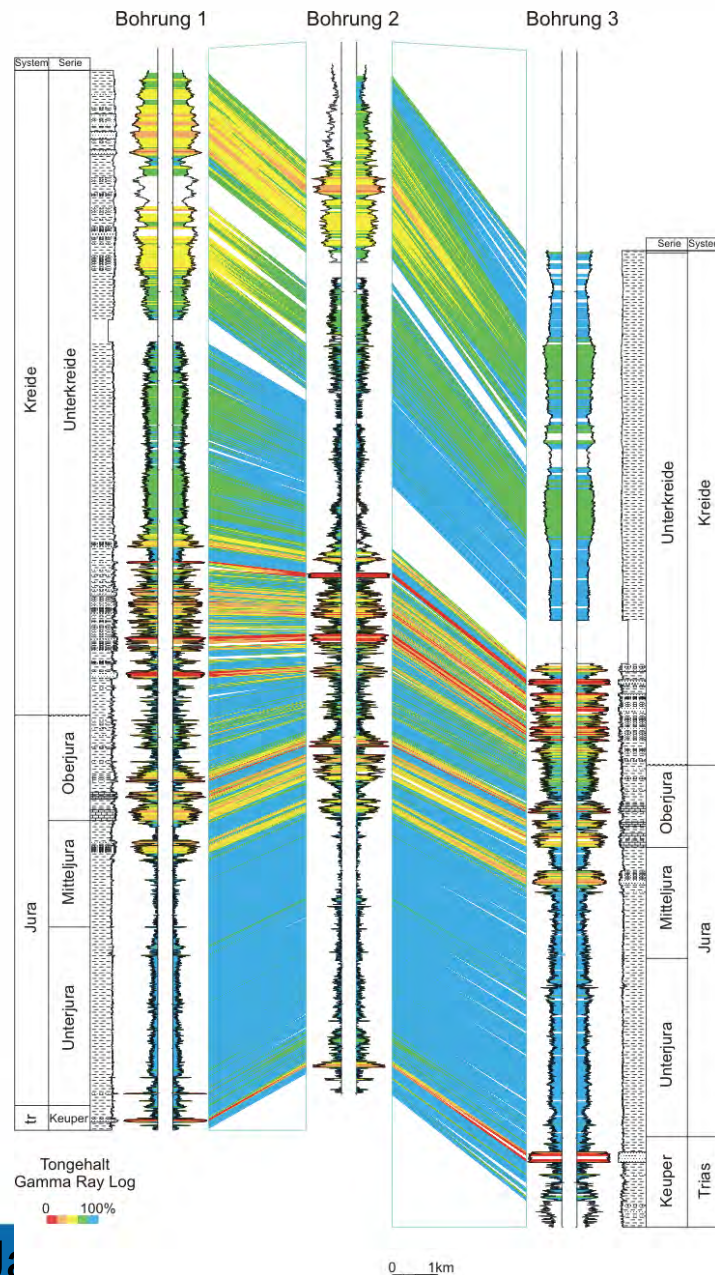
Inhomogenität von Tongesteinen



40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER



Korrelation von Bohrlochmessungen (Gamma Ray Log)

Farbige Kodierung des Ton-/Tonsteingehaltes

Ausschluss- und Auswahlkriterien

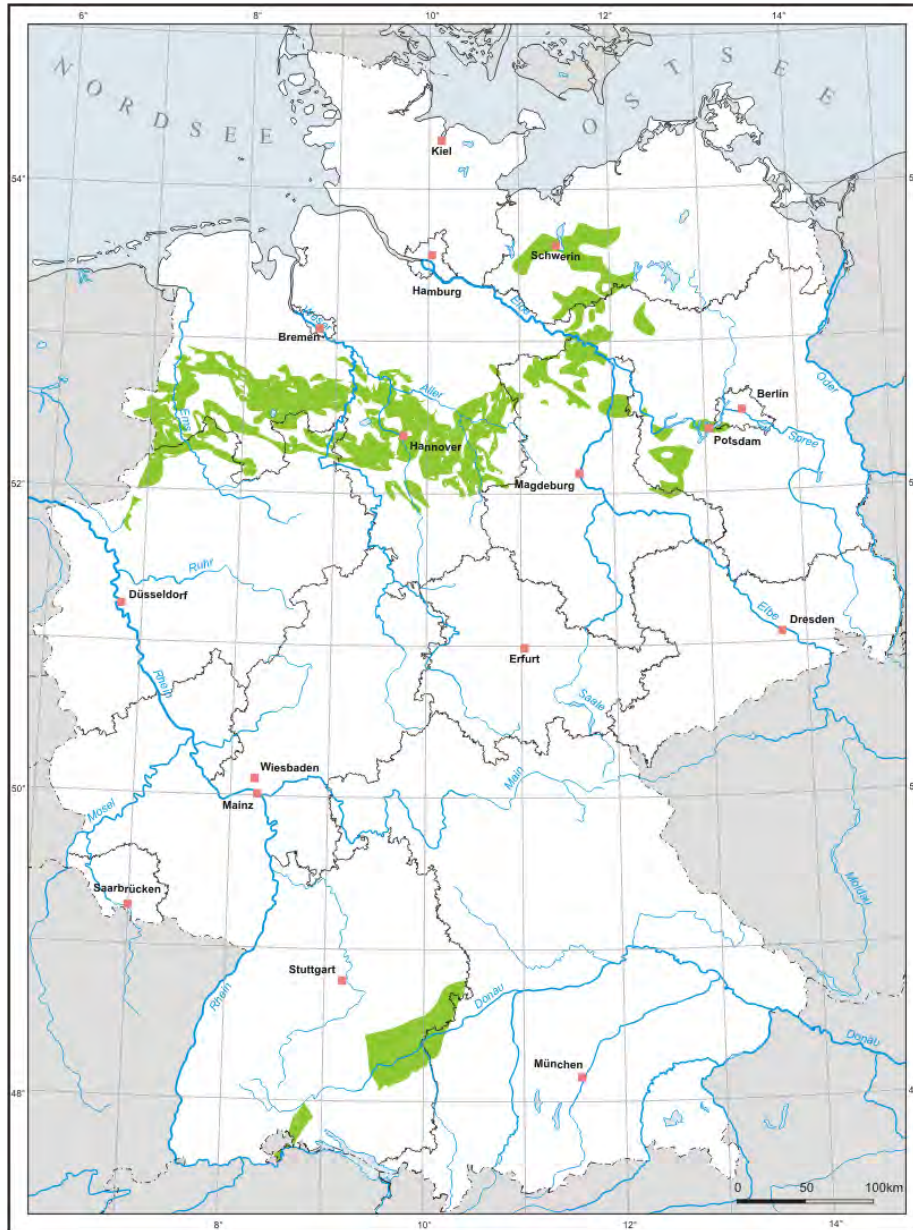
1. Internationale Grundanforderungen (IAEO, Nagra (CH), Andra (F))

- Geologische Langzeitstabilität
- Günstige Wirtsgesteinseigenschaften
- Genügende Ausdehnung der Gesteinsformation
- Robustheit gegenüber Störeinflüssen
- Gute Explorierbarkeit
- Gute Prognostizierbarkeit

2. Ausschlusskriterien/Mindestanforderungen (AkEnd 2002)

3. Regionale Einschränkungen in Deutschland

- Spezifische Kriterien für Tongesteine



Untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in Deutschland

BGR 2007

40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

SPIEGEL ONLINE WISSENSCHAFT

NACHRICHTEN | VIDEOS | ENGLISH | FORUM | SPIEGEL DIGITAL | ABE

Home | Politik | Wirtschaft | Panorama | Sport | Kultur | Netzwerk | **Wissenschaft** |

Nachrichten > Wissenschaft > Natur

18. April 2007 Drucken | Senden | Leserbrief | Bookmark

REGIERUNGSTUDIE Schrift: +

Große Teile Norddeutschlands als Atommüll-Endlager geeignet

Große Teile Norddeutschlands kommen einer Studie zufolge als Atommüll-Endlager in Frage. Forscher haben weit verbreitete Vorkommen an geeignetem Tongestein ausgemacht. Der politische Streit über das Endlager in Gorleben erhält damit neue Nahrung.

Berlin - Die Ergebnisse der Studie, die die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Auftrag der Bundesregierung angefertigt hat, dürften nicht überall im Land Freunde finden: Große Gebiete Norddeutschlands sind als Atommüll-Endlager geeignet. Vor allem in Niedersachsen, aber auch in Teilen Nordrhein-Westfalens, Mecklenburg-Vorpommerns und Brandenburgs befinden sich demnach Tongesteinsformationen, die für eine Endlagerung untersucht werden können.



Ein deutlich kleineres Gebiet mit "untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen" ist der Studie zufolge in Süddeutschland an der Grenze von Baden-Württemberg und Bayern zu finden. Mitautor Volkmar Bräuer betonte, die Studie mit dem Titel "Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands" liefere keine Darstellung von konkreten Standorten. Vielmehr würden als Übersichtskarte größere Regionen ausgewiesen, die für die Endlagerung untersucht werden könnten. Dazu wären aber aufwendige Bohrungen nötig.

Die neue Untersuchung ergänzt die beiden BGR-Studien über die Atommüll-Endlagerung in Steinsalz und Kristallingestein, die bereits 1994 und 1995 vorgestellt wurden. Eine

Potentielle Atommüll-Endlagergebiete: Die grünen Flächen zeigen Tongesteinsschichten, die mindestens 100 Meter dick sind und 300 bis 1000 Meter tief liegen

Weitere Argumente für Gorleben Einer neuen Studie zufolge scheint Atommüll am besten in Salzstöcken aufgehoben zu sein

Berliner Zeitung

Atompläne vom Tisch

SÜDKURIER

Neue Studie des Wirtschaftsministeriums gegen Endlager im Südwesten

Ein Atommülllager im Südwesten Deutschlands ist kaum noch wahrscheinlich. Nach einer Studie aus dem Bundeswirtschaftsministerium sollen die geologischen Voraussetzungen im niedersächsischen Gorleben deutlich besser sein als im Hegau oder nahe Sigmaringen.

Gorleben ohne Alternative?

NEUE OSNABRÜCKER OZ ZEITUNG

Studie heizt Streit über Endlager an

Atom-Studie verärgert Gabriel

Frankfurter Rundschau

Koalition streitet über Endlager für radioaktive Abfälle

ATOMENDLAGER: MINISTER GLOS ERHÄLT DIE ERWÜNSCHTE STUDIE

Ein Fall von Pseudowissenschaft

die tageszeitung

Salz statt Ton für Atommüll

sueddeutsche.de

Wissenschaftler legen Studie zu möglichen Endlagern vor

Eine Endlager-Studie, die nur Ängste schürt, aber keine Probleme löst

(BMU-Pressmeldung)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

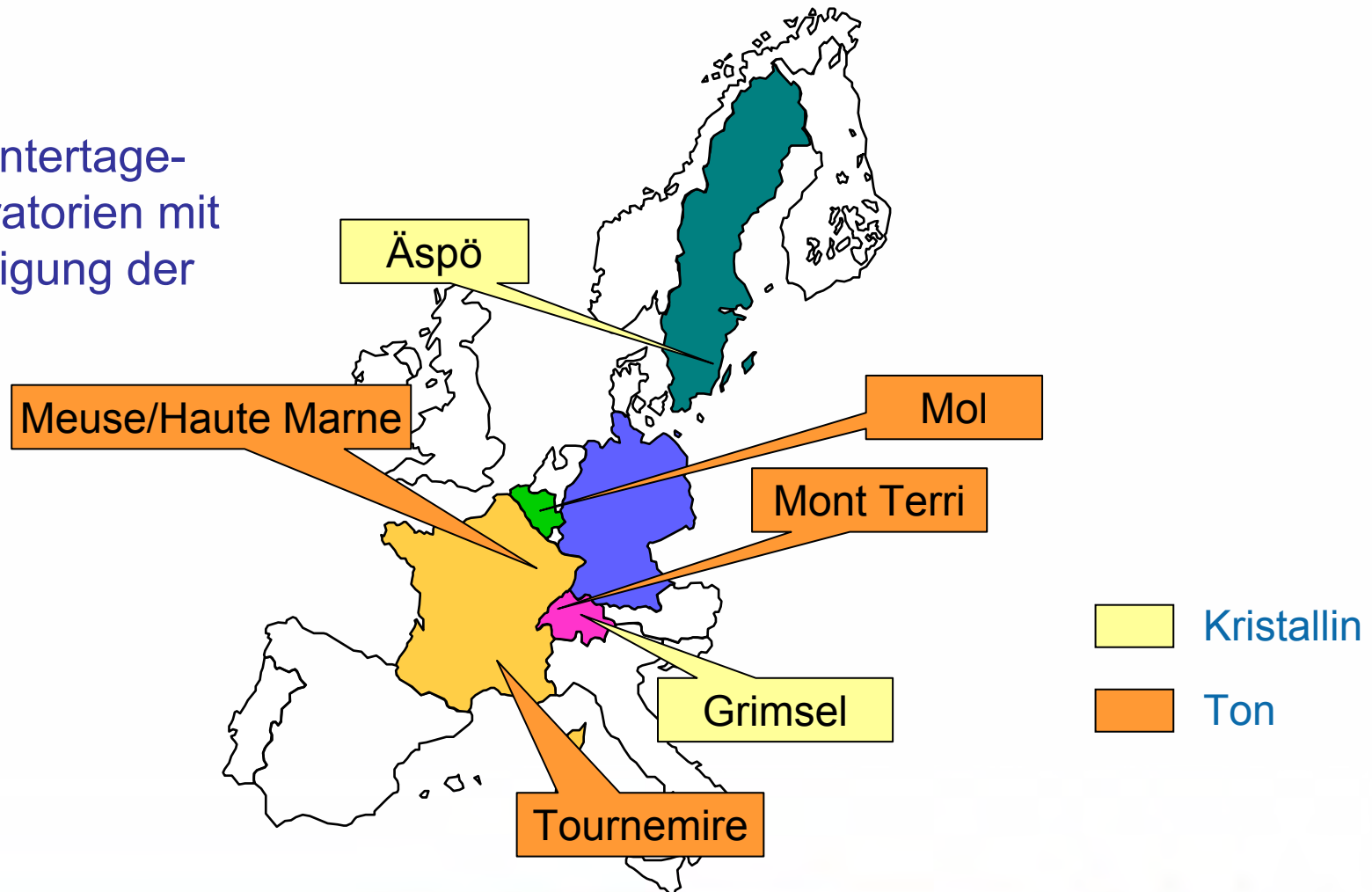
BGR und KONSTOTTE

GEOZENTRUM HANNOVER

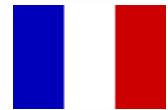
10 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

Internationale Zusammenarbeit

Die Untertage-
Laboratorien mit
Beteiligung der
BGR



40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008



Frankreich: Meuse/Haute-Marne (Ton)



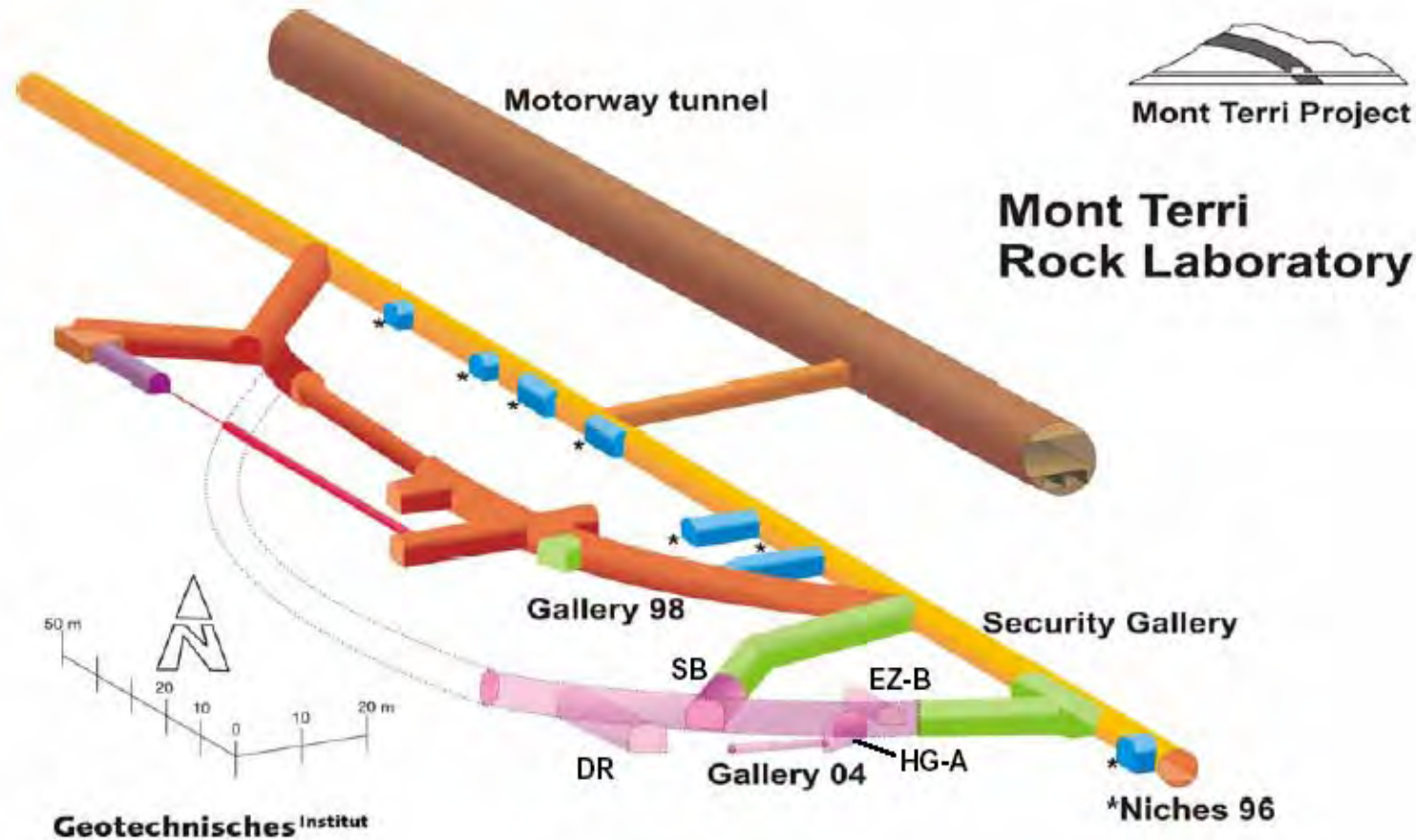
Schweiz: Mont Terri (Ton)



Zielsetzung:

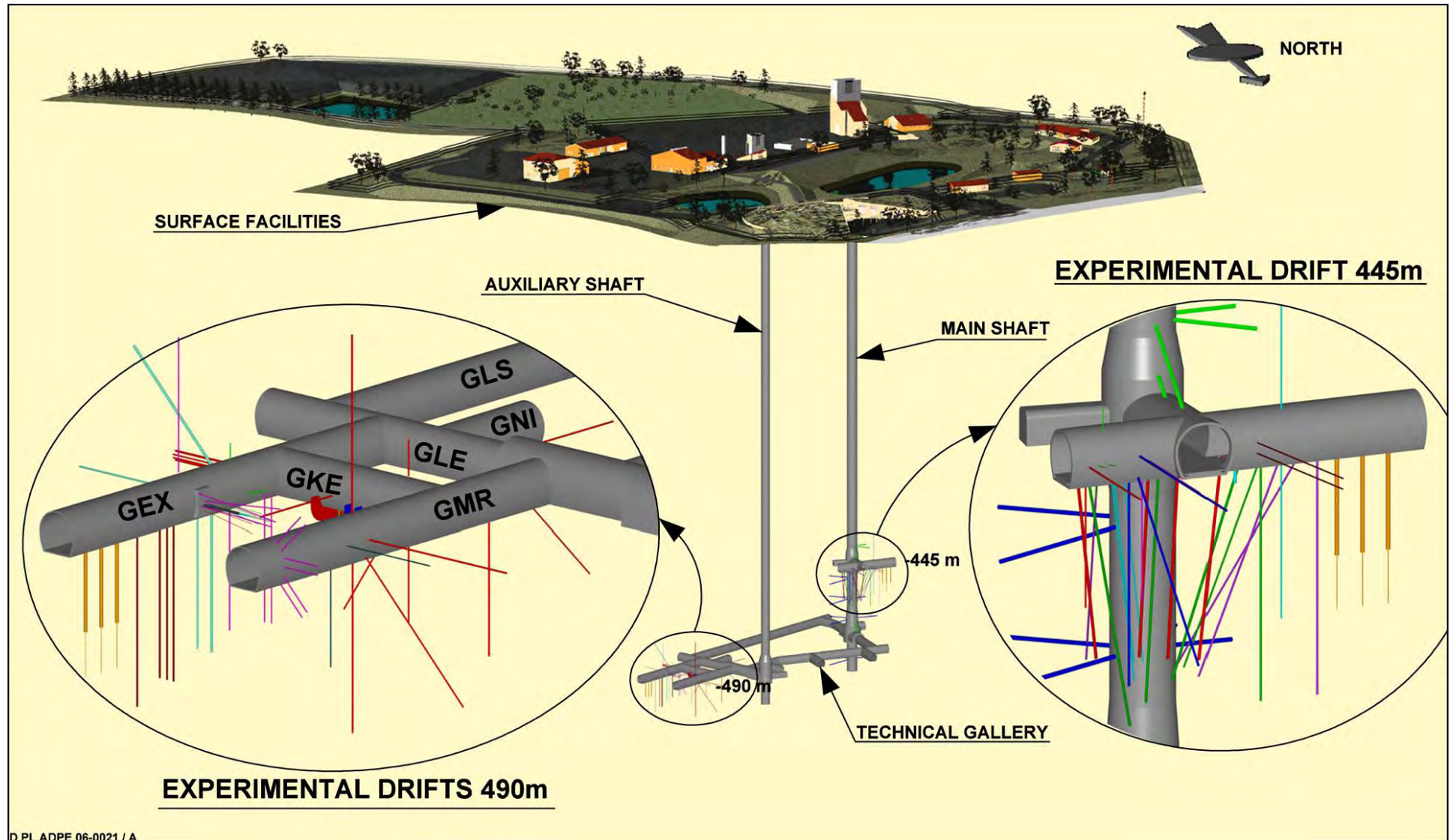
- Erprobung und Optimierung der Methoden und in situ-Messtechnik für Tongestein
- Know-how - Transfer auf Tongesteinsformationen in Deutschland
- Entscheidungsgrundlage für die Vorgehensweise in Deutschland

Mont Terri Projekt/Schweiz



40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

Plan des Untertagelabors Bure / Frankreich



D.PL ADPE 06-0021 / A

40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER



June 2004 - B2.2 in situ group
URL Meuse / Haute Marne, France

40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER



Quelle: NDBA
40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

Endlagerkonzept	Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein
Einlagerungssohle	ca. 900 m	ca. 500 m	500 – 1200 m
Lagerungstechnik	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher oder Strecken
Temperatur	max. 200° C	max. 100° C	max. 100° C
Versatzmaterial	Salzgrus	Bentonit	Bentonit
Zwischenlagerzeit (BE u. HAW-Kokillen)	min. 15 Jahre	min. 30 – 40 Jahre	min. 30 – 40 Jahre
Streckenausbau	nicht erforderlich	erforderlich, ggf. sehr aufwändig	in stark geklüfteten Bereichen erforderlich
Behälterkonzepte	vorhanden	für Deutschland neu zu entwickeln	für Deutschland neu zu entwickeln
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	groß (Erzbergbau)

Hohlraumstabilität in Tongestein



09.09.2003, 17:41



11.09.2003, 13:46



11.09.2003, 14:37



11.09.2003, 16:40



11.09.2003, 21:12



12.09.2003, 11:04

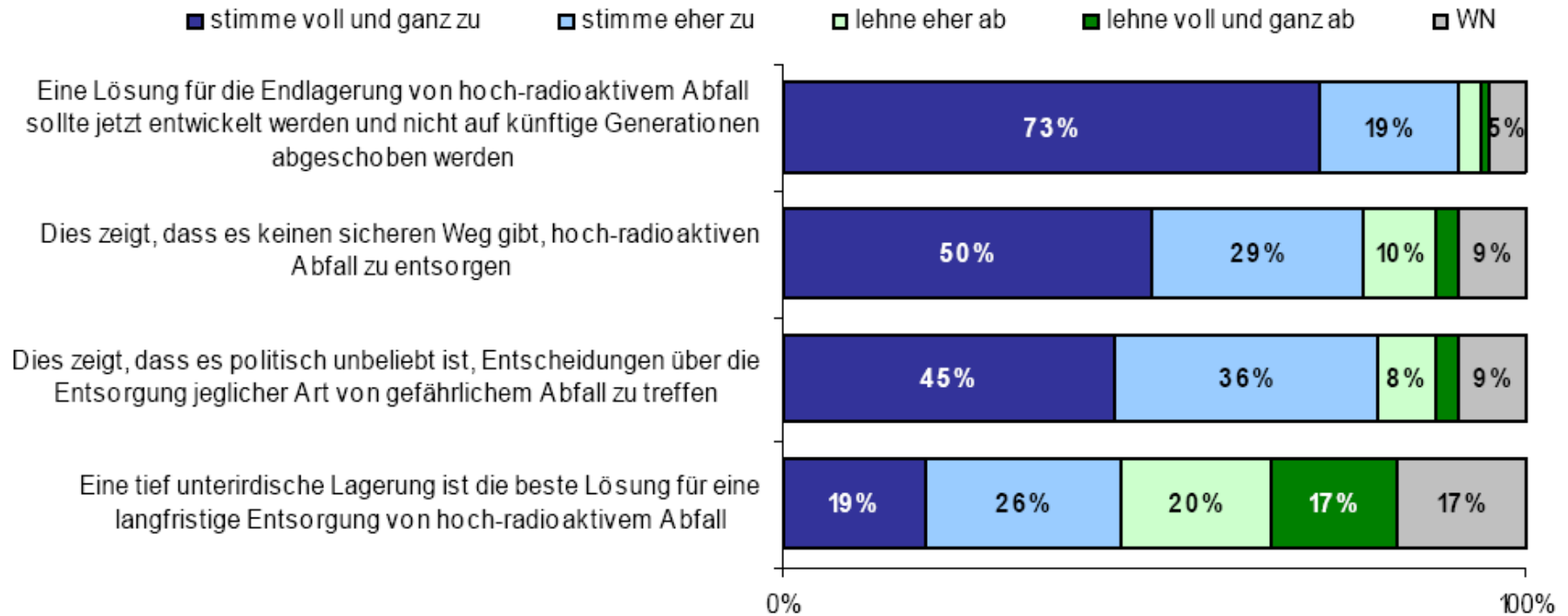
40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

Ausblick



„Es muss jetzt gehandelt werden.“

F 11. Von einigen Ausnahmen abgesehen haben die meisten Länder bisher noch keine Entscheidung über die Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle getroffen. % EU



Quelle: Eurobarometer 2005

40 Jahre Endlagerforschung – Peine 10./11. Juni 2008

Zukünftige Forschungsarbeiten

F&E	Wirtsgesteine		
	Salz	Tonstein	Kristallin
Wirtsgesteins- charakterisierung	x	X	(X)
Geotechnische Barriere	X	X	X
Standortauswahl	(x)	(x)	(x)
Langzeitsicherheit	X	X	--

Geochemische Grundlagenforschung als wichtiger Baustein für eine sichere Endlagerung

Horst Geckeis

Institut für Nukleare Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe, Postfach 3640,
76021 Karlsruhe, (E-mail: geckeis@ine.fzk.de)

Einleitung

Ein Sicherheitsnachweis für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle erfordert das Zusammenspiel einer Vielzahl von wissenschaftlich-technischen Disziplinen. Durch eine sorgfältige Untersuchung eines geeigneten Standorts werden erforderliche geologische Randbedingungen, wie z.B. geringe seismische Aktivität, Langzeitstabilität und geringe Durchlässigkeiten gegenüber fluiden Phasen überprüft. Geeignete bergbau- und ingenieurtechnische Verfahren müssen entwickelt werden, um eine sichere Einlagerung des Abfalls zu ermöglichen. Alle Arbeiten haben zum Ziel den hochradioaktiven Abfall über Zeiträume von mehreren 100 000 Jahren von der Biosphäre zu isolieren. Als nahezu einzig relevanter Pfad für eine Radionuklidfreisetzung wird in Sicherheitsanalysen der Transport mit dem Grundwasser angenommen. Daneben wird ein möglicher zukünftiger Eingriff durch menschliche Aktivitäten, wie z.B. das unwissentliche Anbohren des Einlagerungsbereichs in unbestimmter Zukunft, diskutiert. Zur Quantifizierung einer möglichen Dosisbelastung eines Individuums durch Radionuklide, die über den Wasserpfad aus dem Endlager in die Biosphäre gelangen könnten, mit Hilfe eines geeigneten Rechenmodells werden eine Reihe geochemischer Daten benötigt. Diese Daten sollen einerseits die mögliche Radionuklidfreisetzung aus dem im Endlager befindlichen Abfall und andererseits die komplexen Wechselwirkungsvorgänge beschreiben, die die Radionuklidmigration in der Geosphäre bestimmen. Voraussagen über die bereits genannten langen Zeiträume zur Radionuklidfreisetzung und -ausbreitung, wie sie für Langzeitsicherheitsanalysen gefordert werden, lassen sich jedoch nicht durch die zeitliche Extrapolation makroskopisch beobachteter Phänomene erhalten. Sie benötigen vielmehr das Verständnis der wirkenden Prozesse auf molekularem Niveau und daraus abgeleitete Daten. Dies erfordert grundlegende Untersuchungen zur aquatischen Radionuklidchemie als auch anwendungsorientierte Forschungsarbeiten an realen Systemen z.B. in Untertagelabors. Eine Überprüfung der Gültigkeit von Vorhersagen zur Endlagerentwicklung über lange Zeiträume hinweg, erfolgt durch die Betrachtung sogenannter ‚natürlicher Analoga‘. In geeigneten natürlichen Systemen, die der Situation eines Endlagerstandorts entsprechen, lässt sich z.B. das Verhalten natürlicher Radionuklide über geologische Zeiträume hinweg studieren. Erwartete Radionuklidkonzentrationen in natürlichen Grundwässern sind unter anderem wegen Löslichkeitsbeschränkungen gering. Die Untersuchung ihres chemischen Verhaltens erfordert daher eine konsequent betriebene Entwicklung und Anpassung von experimentellen Methoden zu ihrem Nachweis und ihrer Speziation in Spurenkonzentrationsbereichen.

Aquatische Chemie der Radionuklide

Eine Vielzahl möglicher geochemischer Reaktionen kann in den Barrieren eines Endlagers ablaufen und zur Mobilisierung oder zur Rückhaltung von Radionukliden führen (Abb. 1). Zu ihrer Beschreibung und Quantifizierung werden entsprechende Daten zur aquatischen Chemie der Radionuklide benötigt.

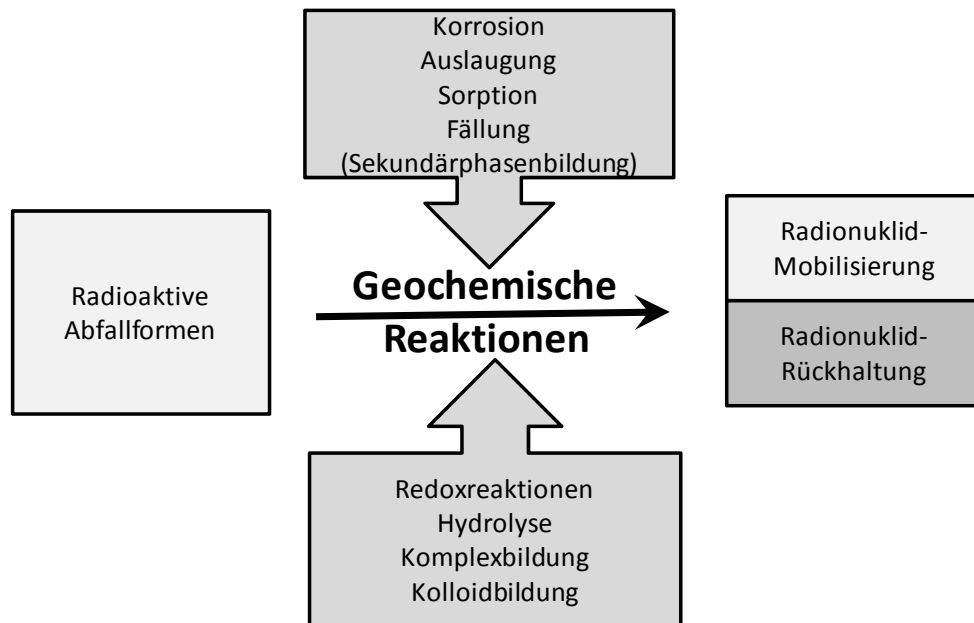


Abb. 1 Potenziell ablaufende geochemische Reaktionen im Umfeld eines Endlagers (nach Kim, 2006)

Auflösung und Löslichkeit

Bei Grundwasserzutritt zur Abfallform führen Korrosionsvorgänge zur teilweisen Auflösung der Abfallmatrix und damit zur Freisetzung von Radionukliden. Der zeitliche Verlauf und die dabei auftretenden Lösungskonzentrationen werden als Quellterm bezeichnet und gehen als Eingangsdaten in die Langzeitsicherheitsanalysen für eine potenzielle Radionuklidfreisetzung aus einem Endlager ein. Die Lösungskonzentrationen für die Actiniden, die über lange Zeiträume das Radiotoxizitätsinventar eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle bestimmen, werden begrenzt durch die vom geochemischen Milieu abhängige Löslichkeiten fester Phasen. Beispielhaft sind pH abhängige Löslichkeitsdaten für die Actiniden Am, Th, Pu, Np, U im Gleichgewicht mit den entsprechenden Hydroxiden in Abb. 2 gezeigt. Neben dem pH Wert der Lösung bestimmen die Anwesenheit anderer Grundwasserbestandteile und die Redoxbedingungen die Löslichkeit. Unter oxidierenden Bedingungen, wie sie in sauerstoffhaltigen Oberflächenwässern herrschen, können die Actiniden Np, Pu in der Oxidationsstufe V und Pu, U in der Oxidationsstufe VI vorliegen. Sie sind damit relativ gut löslich. Unter den reduzierenden Eigenschaften tiefer Grundwässer liegen sie dagegen in den Oxidationsstufe III und IV vor. Löslichkeiten für tetravalente Actiniden sind über einen

weiten pH-Bereich niedrig. Im Falle dreiwertiger Actinidionen steigt die Löslichkeit im pH Bereich < 8 deutlich an. Darüberhinaus wird die Radionuklidlöslichkeit beeinflusst durch die Bildung stabiler Komplexe in Lösung (z.B. Carbonatkomplexe) oder die Bildung verschiedener fester Phasen, deren Zusammensetzung durch die Grundwasserzusammensetzung bestimmt wird. Kürzlich veröffentlichte Arbeiten zeigen, dass Actinidpolymere bzw. Kolloide eine wesentliche Rolle für die thermodynamische Beschreibung der Löslichkeit tetravalenter Actiniden (Pu(IV), Th(IV)) spielen (Bundschuh et al., 2000, Neck et al., 2007, Rothe et al., 2004, Soderholm et al., 2007).

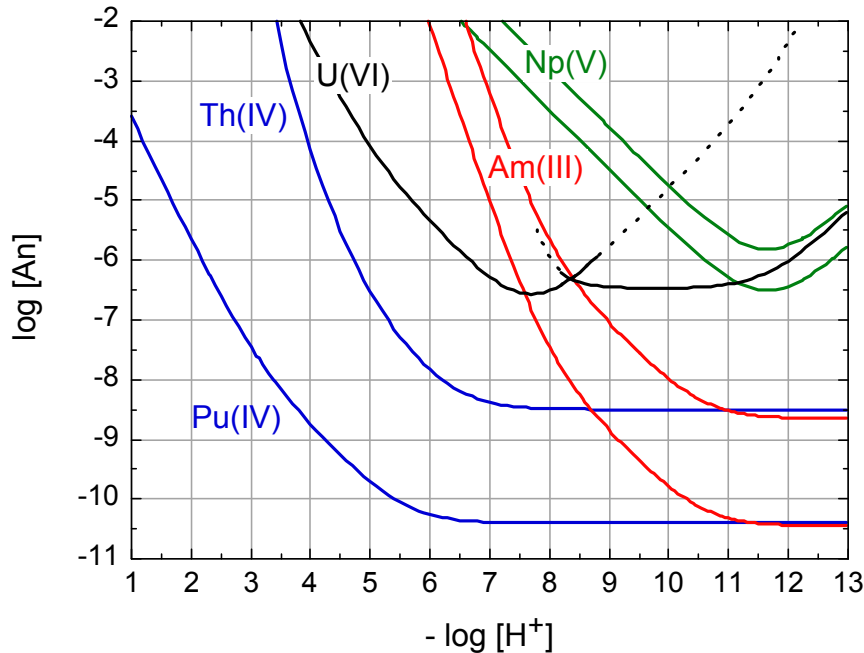


Abb. 2 pH abhängige Löslichkeiten für Actinidionen unterschiedlicher Oxidationsstufe; Ionenstärke: 0,1 mol/L NaCl, T=25°C (Neck et al., 2001).

In den letzten Jahren wurden deutliche Fortschritte bezüglich der Verfügbarkeit relevanter Löslichkeits- und Komplexbildungsdaten und ihre Qualität erzielt. Entsprechende Zusammenfassungen und Reviews sind in Sammelwerken, wie der thermodynamischen Datenbanken der NEA-OECD (z.B. NEA-OECD, 2003) sowie in einer Reihe von nationalen Datenbanken (z.B. NAGRA/PSI, 2001) verfügbar. Eine entsprechende Sammlung konsistenter Datensätze, die in Sicherheitsanalysen für Endlager in Deutschland verwendet werden sollen, befindet sich derzeit im Aufbau. Ziel des THEREDA Verbundprojekts (Thermodynamische Referenzdatenbasis) ist die Erstellung einer umfassenden und in sich konsistenten Datensammlung, wobei die Daten mit Qualitätsindikatoren versehen werden (weitere Informationen: www.thereda.de). Dabei wird insbesondere den Besonderheiten deutscher Endlagerkonzepte, die ein Endlager im Salzgestein vorsehen, Rechnung getragen. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Radionuklidlöslichkeit und -speziation in hochsalinen Lösungen gelegt. Damit können Löslichkeitsbegrenzungen und Lösungsspeziation für eine Reihe von Radionukliden in Abhängigkeit von der im Endlager erwarteten Grundwasserzusammensetzung vorhergesagt werden. Lücken werden im Rahmen

des Vorhabens identifiziert und entsprechende experimentelle und Modellierungsprogramme initiiert.

Bedingt durch das starke Strahlungsfeld der radioaktiven Abfälle werden in wässrigen Lösungen Radiolysereaktionen in Gang gesetzt, in deren Verlauf O_2 , Oxichloride und H_2O_2 sowie durch Rekombination H_2 entstehen. H_2 ist relativ reaktionsträge, so dass insgesamt ein oxidierendes Milieu entsteht, das zur Auflösung des UO_2 Brennstoffs und zur Bildung oxidierter Radionuklidspesies z.B. U(VI), Pu(V, VI), Np(V) mit relativ hohen Löslichkeiten führen kann (Grambow et al., 1997). In den letzten Jahren wurde in mehreren experimentellen Studien beobachtet, dass die Auflöseraten von abgebranntem Kernbrennstoff in Gegenwart von korrodierendem Behältermaterial deutlich abnehmen bzw. zum Stillstand kommen (Spahiu et al., 2000). Offensichtlich übt H_2 bei Partialdrucken, die bis zu ~50 bar betragen können, eine reduzierende Wirkung aus, die den oxidierenden Radiolyseeinfluss übertrifft. Die Gegenwart von Korrosionswasserstoff in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle könnte somit eine wichtige chemische Barrierefunktion gegen die Brennstoffkorrosion einnehmen und den Quellterm deutlich absenken. Der grundlegende Mechanismus dieser Reaktion wird derzeit noch untersucht. Katalytische Aktivierung des Wasserstoffs durch Metalleinschlüsse im Brennstoff oder radikalische Wasserstoffspaltung werden diskutiert (Shoesmith, 2000). Bisher wurde der Wasserstoffeffekt nur im Labor mit synthetischen Lösungen studiert. Der Einfluss von Spurenbestandteilen natürlicher Grundwässer ist weitgehend unbekannt. Jedoch zeigen Experimente, dass die Gegenwart von Br^- den schützenden Effekt des Wasserstoffs wieder aufheben kann (Metz et al. 2008). Das Beispiel zeigt sehr anschaulich, dass erst ein grundlegendes Verständnis aller Reaktionen es erlaubt, von einer chemischen/geochemischen Barrierewirkung für die Sicherheitsanalyse Kredit zu nehmen.

Sorption und Radionuklidrückhaltung

Neben der Bildung schwerlöslicher reiner Radionuklidphasen, führen Sorption und Bildung von Mischphasen zur Retardierung und Rückhaltung von Radionukliden in einem Endlagersystem. Sorption an Mineraloberflächen wird als wichtiger Rückhalteprozess für Radionuklide im Multibarrierensystem eines Endlagers angesehen und gehört damit zu den ‚pillars, performance assessment is based on‘ (NAGRA, 2002). Sorptionsreaktionen fließen in Form von K_d -Werten ($K_d = \text{Sorbierte Radionuklidkonzentration/gelöste Radionuklidkonzentration}$) in Ausbreitungsrechnungen ein, die im Rahmen von Sicherheitsanalysen durchgeführt werden. K_d -Werte, die in bestimmten Grundwasser/Sediment Systemen gemessen werden, liefern keinen Einblick in molekulare Reaktionsmechanismen und lassen sich nicht ohne weiteres auf andere geochemische Verhältnisse übertragen. Ein weitaus umfassenderes Konzept liefern mechanistische Sorptionsmodelle, bei denen die Radionuklidwechselwirkung mit Mineraloberflächen durch geochemische Sorptionsreaktionen beschrieben wird. Unterschiedliche mechanistische Sorptionsmodelle wurden in der Literatur vorgeschlagen (z.B. Schindler, Stumm, 1987, Dzombak, Morel, 1990,

Turner et al., 2006, Bradbury, Baeyens, 2006 van Riemsdijk, Hiemstra, 2006 etc.). In den letzten Jahren konnten durch neue leistungsstarke spektroskopische Techniken (Röntgenspektroskopie mit Synchrotronstrahlenquellen, laserspektroskopische Methoden) Radionuklidspezies an der Mineraloberfläche identifiziert und charakterisiert werden (Rabung et al., 2005, Hennig et al., 2002, Bargar et al., 2000, Simoni, 2002, Dähn et al., 2002, etc.). Solche Informationen lassen sich in Modelle einbauen. Publierte Sorptionsmodelle unterscheiden sich allerdings signifikant in der Art und Weise, wie die für die Sorption verantwortlichen Liganden an der Mineraloberfläche und der Einfluss der Oberflächenladung repräsentiert werden. Nach wie vor existiert darüber keine generelle Übereinstimmung in der Literatur und die existierenden Modellkonzepte sind daher als vorläufig zu betrachten. Existierende Sorptionsmodelle lassen sich nichtsdestoweniger auf natürliche Systeme anwenden, jedoch muss die Übertragbarkeit der Modellergebnisse in Labor- und Feldexperimenten überprüft werden (z.B. Hartmann et al. 2008). Die konsistente Beschreibung von Sorptionsreaktionen mit Hilfe spektroskopischer Methoden auf einer molekularen Ebene, mit in Batch-Experimenten ermittelten Sorptionsparametern (z.B. pH Abhängigkeit, Metallionenkonzentrationsabhängigkeit etc.) und den damit entwickelten Sorptionsmodellen stellt den derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik dar (Abb. 3). Mit Hilfe mechanistischer Sorptionsmodelle lassen sich für einen Bereich relevanter geochemischer Randbedingungen K_d -Werte berechnen, die in entsprechende Ausbreitungsmodelle einfließen können. Konsistente nach dem in Abb. 3 dargestellten Schema ermittelte Sorptionsdaten sind derzeit nicht umfassend vorhanden, werden jedoch in der Fachliteratur zunehmend verfügbar.

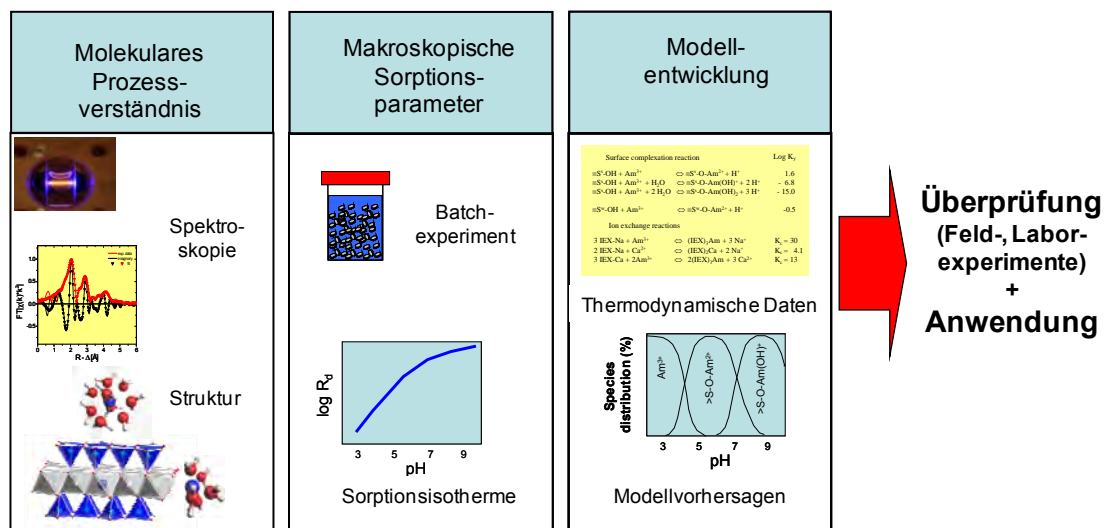


Abb. 3 Schematische Darstellung einer Methodik zur Ermittlung von Sorptionsdaten

Eine Besonderheit der Endlagersicherheitsforschung sind die langen Zeiträume, über die Aussagen zum Radionuklidverhalten gemacht werden müssen. In solchen Zeiträumen sind Mineralum- und -neubildungen im Nah- und Fernfeld zu erwarten. Die Rolle des Einbaus von Radionukliden in neugebildete Mineralphasen wird im Rahmen der Endlagersicherheit bislang nur wenig betrachtet. Löslichkeitsbetrachtungen beziehen sich in den meisten Fällen

auf reine Radionuklidfestphasen. Bei den in der Natur vorkommenden Mineralphasen handelt es sich dagegen fast nie um reine Phasen sondern um Mischphasen („solid solutions“) (NEA-OECD, 2007 etc.). Der Einbau von Actiniden in natürliche Minerale wie Calcit (Stumpf et al., 2006) und Smektit (Brandt et al., 2007) sowie in Sekundärphasen, die bei der Korrosion radioaktiver Abfallformen (Zement, Glas) entstehen können (CSH-Phasen: Tits et al., 2003, Powellit: Bosbach et al., 2004), wurde bereits beschrieben. Anwendbare thermodynamische Daten für die Bildung fester Lösungen fehlen für Radionuklide jedoch weitgehend. Die Bildung solcher festen Lösungen durch strukturellen Radionuklideinbau in Mineralphasen stellt jedoch eine weitere geochemische Barriere in einem Endlagersystem dar, die zur Immobilisierung von langlebigen Spalt-, Aktivierungsprodukten und Actiniden führen kann.

Radionuklidwechselwirkung mit Kolloiden und Mikroben

Als eine wichtige geochemische Reaktion, die zur Mobilisierung schwerlöslicher und stark sorbierender polyvalenter Actinidionen (z.B. Am(III), Np(IV), Pu(IV), U(IV)) beitragen kann, wird der kolloidgetragene Transport (z.B. Kim, 1991, Kersting et al., 1999) diskutiert. Zentrale Themen, die beantwortet werden müssen, um eine belastbare Aussage zur Relevanz des kolloidgetragenen Radionuklidtransports zu ermöglichen, sind:

- Stabilität der Kolloide in einem gegebenen geochemischen Milieu
- Kolloidwechselwirkung mit Oberflächen des umgebenden Gesteins
- Mechanismen der Kolloidbildungsreaktionen von Radionukliden

Kolloidagglomeration und anschließende Sedimentation bzw. Filtration wird i.allg. in Grundwassersystemen mit hohen Ionenstärken begünstigt (Ryan, Elimelech, 1996, Hauser et al., 2003). Kolloidtransport wird weiterhin erschwert in Gestein mit geringen Porenweiten, wie z.B. Tongestein. In solchen Systemen, in denen advektiver Grundwassertransport angenommen wird z.B. in geklüftetem Kristallingestein, können Kolloide eine wichtige Rolle für den Radionuklidtransport spielen. Der Mechanismus der Radionuklid-Kolloid Wechselwirkung hat jedoch auch hier einen wesentlichen Einfluss auf die Mobilität. Einen signifikanten Beitrag zur Radionuklidmigration wird bei einer schnell reversiblen Koordination mit Kolloidoberflächenhydroxylgruppen nicht erwartet (Ryan & Elimelech 1996, Contardi et al., 2001). Radionuklideinbau in die Kolloidstruktur kann jedoch die Dissoziation des Radionuklids über lange Zeiträume verhindern und damit – vorausgesetzt die Kolloide sind stabil und mobil – einen kolloidgetragenen Transport begünstigen. Radionuklideinbau wurde z.B. für Hydroxoalumosilikatkolloide beobachtet (Kim et al. 2003, Panak et al., 2003). Deutlich behinderte Dissoziationskinetiken wurden auch im Fall der Komplexierung polyvalenter Actinidionen mit kolloidalen organischen Grundwasserbestandteilen, bestehend aus Fulvin- und Huminsäuren, gefunden und durch Konformationsänderungen in der Makromolekülstruktur (Choppin, Clark, 1991) bzw. durch metallioneninduzierte Agglomeration erklärt (Geckeis et al., 2002). Für alle oben genannten Kolloidfragestellungen existieren derzeit keine allgemeingültigen Parameter, die eine

Vorhersage des kolloidgetragenen Radionuklidtransports für unterschiedliche Endlagersituationen erlauben. Wohl aber gibt es Ansätze, die relevanten Kolloidprozesse in ein Transportmodell zu integrieren (z.B. TRAPIC, Lührmann, 1999).

Der Einfluss mikrobieller Aktivitäten auf Radionuklidspeziation und –migration wurde in den letzten Jahren verstärkt untersucht. Hierbei handelt es sich um ein relativ neues Arbeitsgebiet. Art und Umfang bakterieller Population in einem gegebenen Endlagersystem sind derzeit nicht ausreichend bekannt. Schwerpunkte von Forschungsarbeiten liegen darin, Sorptions- und Redox-Eigenschaften von Mikroorganismen sowie den radionuklidmobilisierenden bzw. -immobilisierenden Einfluss von exozellulären Molekülen zu untersuchen (Boukhalfa et al., 2007, Moll et al., 2006, Pedersen, 2006, Neu et al., 2003).

Natürliche Analoga

Die Besonderheit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, liegt nicht zuletzt in der Forderung nach Einschlusszeiträumen von mehreren hunderttausend Jahren. Die Unsicherheit von Vorhersagen steigt mit zunehmenden Zeiträumen an. Ein Hilfsmittel, um auch über die genannten Zeitspannen hinweg belastbare Aussagen machen zu können, ist die Untersuchung sogenannter natürlicher Analoga (Miller et al., 2000). In der Vergangenheit wurden Uranlagerstätten mit unterschiedlichen geochemischen Randbedingungen untersucht. Die Aussagekraft solcher Untersuchungen wird kontrovers diskutiert, da die geochemischen und geologischen Randbedingungen nicht mit denen eines realen Endlagerstandorts identisch sind. Nichtsdestoweniger sind solche Studien hilfreich, da sie i.allg. eine geringe Mobilität vieler Spaltprodukte und Actiniden in unterschiedlichen natürlichen Systemen über lange Zeiträume belegen. Nachweisstarke spektroskopische Analysemethoden erlauben aber auch die Untersuchung des Langzeitverhaltens natürlicher Radionuklide bzw. von Radionuklidhomologen wie z.B. der Lanthaniden an einem beliebigen Endlagerstandort. Beispiele für solche Studien sind z.B. Arbeiten in Ruprechtov, Tschechische Republik, wo die Migration von Uran in einer tonreichen Schicht untersucht wurde (Denecke et al., 2005). Aus den ortsaufgelösten röntgenspektroskopischen Experimenten konnte der Mechanismus der Urananreicherung als Reduktion von U(VI) nach U(IV) durch Arsenopyritphasen rekonstruiert werden (Abb.4). Sogenannte in-situ Kd-Werte, die aus der Verteilung seltener Erdelemente und natürlicher Actiniden zwischen Sedimentoberfläche und Porenwasser erhalten werden, wurden zur Validierung von Laborsorptionsexperimenten herangezogen (Geckeis et al., 1999). Es wurde dabei versucht, die Übertragbarkeit der Gültigkeit von Labor-Kd-Werten auf lange Zeiträume zu belegen.

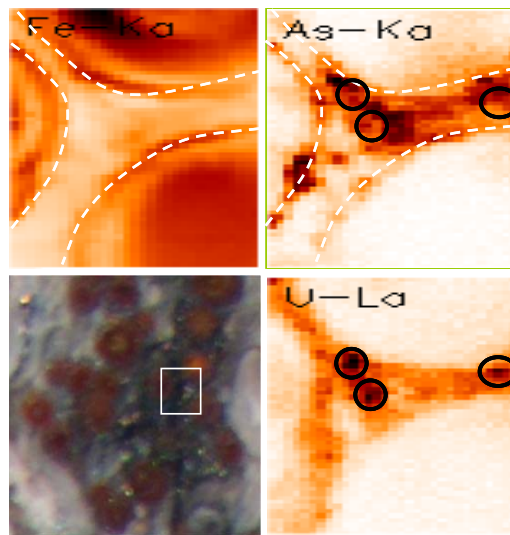


Abb. 4 Ortsaufgelöste röntgenspektroskopische Untersuchung einer Sedimentprobe aus Ruprechtov. Oben links: Fe-Verteilung, oben rechts: As-Verteilung, unten rechts: U-Verteilung, unten links: optisches Bild; Urananreicherungen korrelieren mit Arsenanreicherungen (Denecke et al., 2005).

Schlussfolgerung

Erkenntnisse aus geochemischer Grundlagenforschung stellen einen wesentlichen Bestandteil des Sicherheitsnachweises („safety case“) für die Endlagerung radioaktiver Abfälle dar. Ein grundlegendes Verständnis der in einem Endlagersystem aktiven geochemischen Prozesse hilft, Konservativitätsannahmen abzubauen und verringert damit die Unsicherheit von Modellvorhersagen. Ein Beispiel dafür, wie Erkenntnisse aus Forschungsarbeiten durch einen Abbau von Konservativitätsannahmen die Endlagerung sicherer machen können, ist in Abb. 5 gezeigt. Hier konnte gezeigt werden, dass K_d Werte für die Radionuklidsorption an Bentonit deutlich höher liegen als früher angenommen.

Wie bereits oben diskutiert zeigen neuere Untersuchungen, dass die Bildung radionuklidhaltiger Mineralmischphasen im Nah- und Fernfeld eines Endlagers zusätzlich zu Oberflächensorptionsreaktionen zur Radionuklidrückhaltung maßgeblich beitragen kann. Bisherige Ausbreitungsrechnungen nehmen mangels verfügbarer belastbarer Daten davon jedoch keinen Kredit. Die Forschungsarbeiten zeigen jedoch, dass in einem Endlagersystem bislang noch nicht berücksichtigte geochemische Barrierefunktionen vorhanden sind, die es zu quantifizieren gilt.

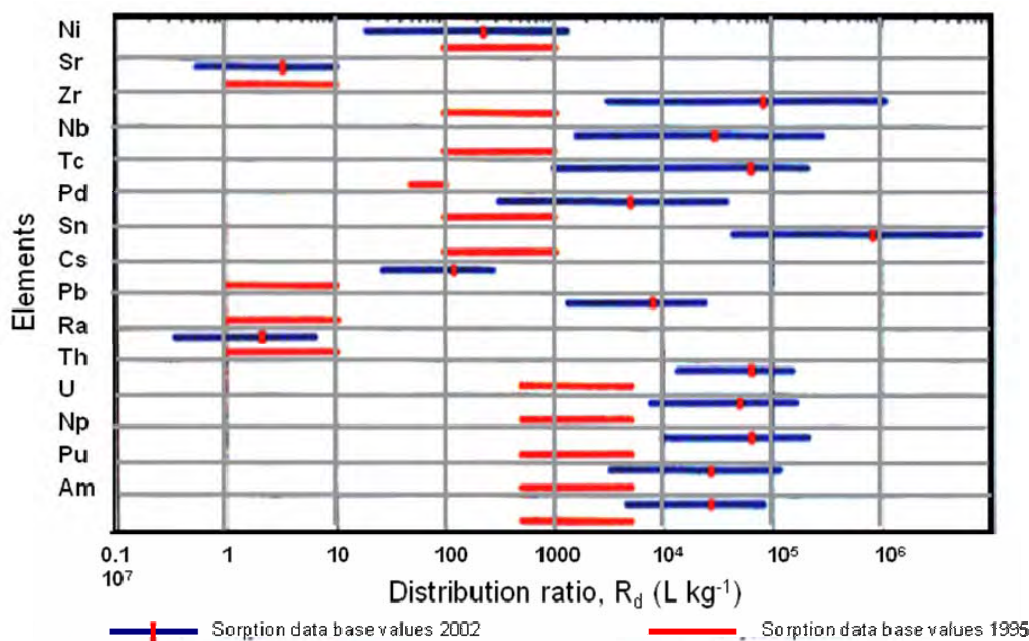


Abb. 5 Vergleich von Sorptionsdaten für MX-80 Bentonit, die derzeit und früher (1995) für Sicherheitsanalysen in der Schweiz verwendet werden (aus PSI-LES Progress Report September 2002 to September 2003).

Forschungsarbeiten zu umweltrelevanten geochemischen Themen, die Fragestellungen zur nuklearen Entsorgung mit einschließen, werden international intensiv verfolgt und regelmäßig in entsprechenden Publikationen dokumentiert. Die Relevanz solcher Arbeiten ist auch vor dem Hintergrund der Endlagerforschung in Deutschland immer wieder neu zu beurteilen und zu bewerten. Dies setzt jedoch auch voraus, dass in Deutschland auch in Zukunft die erforderliche Kompetenz vorhanden sein wird. Die Einbindung junger Wissenschaftler in attraktive Forschungsarbeiten zu nuklearen Themen ist dazu unabdingbar. Die Förderung grundlegender Forschungsarbeiten, wie sie teilweise auch im aktuellen Förderkonzept des BmWi (BmWi, 2007) beschrieben sind, ist daher eine wichtige Voraussetzung, um Kompetenzen in den nuklearen Wissenschaften auch für die Zukunft zu erhalten.

Literatur

Bargar, J.R., Reitmeyer, R., Lenhart, J.J., Davis, J.A., (2000) Characterization of U(VI)-carbonato ternary complexes on hematite: EXAFS and electrophoretic mobility measurements, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 2737-2749.

Bosbach, D., Rabung, Th., Brandt, F., Fanghänel, Th., (2004), Trivalent actinide coprecipitation with powellite (CaMoO₄): Secondary solid solution formation during HLW borosilicate-glass dissolution, *Radiochim. Acta*, 92, 639-643

BmWi (2007), Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007-2010), herausgegeben vom BmWi, Referat IIIB3

Bradbury, M.H., Baeyens, B., (2006), A quasi-mechanistic non-electrostatic modeling approach to metal sorption on clay minerals, in Lützenkirchen, J. (ed.), *Surface complexation modelling*, Interface Science and Technology, Vol. II, Academic Press, Elsevier, Amsterdam, p. 518-538

- Brandt, H., Bosbach, D., Panak, P.J., Fanghänel, Th., (2007), Structural incorporation of Cm(III) in trioctahedral smectite hectorite: A time-resolved laser fluorescence spectroscopy (TRLFS) study, *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 145–154
- Bundschuh T, Knopp R, Müller R, Kim JI, Neck V, Fanghänel, T (2000), Application of LIBD to the determination of the solubility product of thorium(IV)-colloids, *Radiochim Acta* 88, 625
- Choppin, G.R., Clark, S.B. (1991), The kinetic interactions of metal ions with humic acids, *Mar. Chem.* 36, 27-38
- Contardi, J.S., Turner, D.R., Ahn, T.M., (2001), Modelling Colloid Transport for performance assessment, *J. Cont. Hydrol.*, 47, 323-333
- Denecke, M.A., Janssens, K., Proost, K., Rothe, J., Noseck, U., (2005), Confocal Micrometer-Scale X-ray Fluorescence and X-ray Absorption Fine Structure Studies of Uranium Speciation in a Tertiary Sediment from a Waste Disposal Natural Analogue Site, *Env. Sci. Technol.*, 39, 2049-2058
- Dzombak, D. A., Morel, F. M., (1990), *Surface Complexation Modelling: Hydrous Ferric Oxide*, Wiley-Interscience, New York.
- Geckeis, H., Rabung, Th., Ngo Manh, Th., Kim, J.I., Beck, H.P. (2002), Humic Colloid-Borne Natural Polyvalent Metal Ions: Dissociation Experiment, *Env. Sci. Technol.* 36, 2946-2952
- Geckeis, H., Klenze, R., Kim, J.I., (1999), Solid-water interface reactions of actinides and homologues: Sorption onto mineral surfaces. *Radiochim. Acta*, 87, 13-21
- Grambow, B., Loida, A., Dressler, P., Geckeis, H., Gago, J., Casas, I., de Pablo, J., Gimenez, J., Torrero, M.E. (1997), Chemical reaction of fabricated and high burn-up spent UO₂ fuel with saline brines, EUR 17111 European Commission
- Hartmann, E., Geckeis, H. Rabung, Th., Lützenkirchen, J., Fanghänel, Th. (2008), Sorption of radionuclides onto natural clay rocks, *Radiochim. Acta*, in print
- Hauser, W., Götz, R., Geckeis, H., Kienzler, B., (2003), In-situ colloid detection in granite groundwater along the Äspö hard rock laboratory access tunnel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), report
- Hennig, C., Reich, T., Dähn, R., Scheidegger, A. M., (2002), Structure of uranium sorption complexes at monmorillonite edge sites, *Radiochim. Acta* 90, 653-657
- Kersting, A.B., Efurud, D.W., Finnegan, D.L., Rokop, D.J., Smith, D.K., Thompson, J.L. (1999). Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site, *Nature*, 397, 56-59
- Kim, J. I. (1991). Actinide colloid generation in groundwater. *Radiochim. Acta*, 52-53, 71-81
- Kim, M.A., Panak, P., Yun, J.I., Kim, J.I., Klenze, R., Köhler, K. (2003), . Interaction of actinides with aluminosilicate colloids in statu nascendi: Part I: generation and characterization of actinide(III)-pseudocolloids, *Coll. Surf.*, 216, 97-108
- Kim, J.I. (2006), Significance of actinide chemistry for the long-term safety of waste disposal, *Nucl. Eng. Technol.* 38, 459-482
- Lührmann, L., (1999), Modellierung des kolloidbeeinflussten Schadstofftransports mit dem Rechenprogramm TRAPIC. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

- Metz, V., Loida, A., Bohnert, E., Schild, D., Dardenne, K., (2008) Effects of hydrogen and bromide on the corrosion of spent nuclear fuel and γ -irradiated $\text{UO}_2(\text{s})$ in NaCl brine, *Radiochim. Acta* 96 (in print)
- Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, I., Smellie, J., (2000) Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues Pergamon Press, Elsevier Science, New York, 316pp.,
- Moll, H., Merroun, M., Hennig, C., Rossberg, A., Selenska-Pobell, S., Bernhard, G., (2006), The interaction of *Desulfovibrio äspöensis* DSM 10631T with plutonium, *Radiochim. Acta*, 94, 815-824
- NAGRA/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01 (2001), compiled by Hummel, W., Berner, U., Curti, E., Pearson, F.J., Thoenen, T., Universal Publishers, USA
- NAGRA (2002) Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility (Entsorgungsnachweis) for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste and NAGRA Technical Report NTB 02-05. Nagra, Wettingen, Switzerland
- NEA-OECD, (2003), Update on the chemical thermodynamics of uranium, neptunium, plutonium, americium and technetium, compiled by Guillaumont, R., Fanghänel, Th, Fuger, J., Grenthe, I., Neck, V., Palmer, D.A., Rand, M.H., edited by Mompean, F.J., Illemassene, M., Domenech-Orti, C., Ben Said, K., Elsevier, Amsterdam.
- NEA-OECD, (2007), Chemical Thermodynamics of Solid Solutions of interest in Nuclear Waste Management, compiled by Bruno, J., Bosbach, D., Kulik, D., Navrotsky, A., Elsevier, Amsterdam.
- Neck, V., Fanghänel, Th., Metz, V., Kienzler, B., (2001), Kenntnisstand zur aquatischen Chemie und der thermodynamischen Datenbasis von Actiniden und Technetium, FZK-INE 001/01
- Neck, V., Altmaier, M., Seibert, A., Yun, J.I., Marquardt, C.M., Fanghänel, Th. (2007), Solubility and redox reactions of Pu(IV) hydrous oxide : Evidence for the formation of $\text{PuO}_{2+x}(\text{s, hyd})$, *Radiochim. Acta*, 95, 193-207
- Neu P.M., Icopini, G.A., Boukhalfa, H. (2005), Plutonium speciation affected by environmental bacteria, *Radiochim. Acta*, 93, 705-714
- Panak, P.J., Kim, M.A., Yun, J.I., Kim, J.I., (1003), Interaction of actinides with aluminosilicate colloids in statu nascendi, Part II: Spectroscopic speciation of colloid-borne actinides(III); *Coll. Surf.*, 227, 93-103.
- Pedersen, K., (2006), Microbial life in deep granitic rock, *FEMS Microbiology Reviews*, 20, 399 – 414
- Paul-Scherrer-Institut, Laboratory for Nuclear Waste Management, Progress Report September 2002 to September 2003
- Rabung Th., Pierret M. C., Bauer A., Geckeis H., Bradbury M. H., Baeyens B. (2005) Sorption of Eu(III)/Cm(III) on Ca-montmorillonite and Na-illite. Part 1: Batch sorption and time-resolved laser fluorescence spectroscopy experiments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 5393–5402
- Rothe, J., Walther, C., Denecke, M.A., Fanghänel, Th., (2004), XAFS and LIBD investigation of the formation and structure of colloidal Pu(IV) hydrolysis products, *Inorg. Chem.*, 43, 4708-4718
- Ryan, J. N., Elimelech, M., (1996), Colloid mobilization and transport in groundwater, *Coll. Surf.*, 107, 1-56

Schindler, P. W., and Stumm, W., (1987) in "Aquatic Surface Chemistry" (Stumm, W., Ed.), pp. 83–107. Wiley-Interscience, New York.

Simoni, E. (2002), Radionuclides retention: from macroscopic to microscopic, *C. R. Physique* 3, 1–11

Soderholm, L., Almond, P.M., Skanthakumar, S., Wilson, R.E., Burns, P.C., (2007), The Structure of the Plutonium Oxide Nanocluster $[\text{Pu}_{38}\text{O}_{56}\text{Cl}_{154}(\text{H}_2\text{O})_8]^{14-}$, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 47, 298-302

Spahiu, K., Werme, L., Eklund, U.-B., (2000) The influence of near field hydrogen on actinide solubilities and spent fuel leaching, *Radiochim. Acta*, 88, 507

Shoesmith, D. W., (2000) *J. Nucl. Mat.* 282, 1-31.

Stumpf, Th., Marques Fernandes, M., Walther, C., Dardenne, K., Fanghänel, Th., (2006) Structural characterization of Am incorporated into calcite: A TRLFS and EXAFS study, *J. Colloid Interface Sci.*, 302, 240-245.

Tits, J., Stumpf, Th., Rabung, Th., Wieland, E., Fanghänel, Th., (2003), Uptake of Cm(III) and Eu(III) by Calcium Silicate Hydrates: A Solution Chemistry and Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy (TRLFS) Study, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 3568-3573

Turner, D.R., Bertetti, F.P., Pabalan, R.T., (2006), Applying Surface Complexation Modelling to Radionuclide Sorption, in Lützenkirchen, J. (ed.), *Surface complexation modelling, Interface Science and Technology, Vol. II*, Academic Press, Elsevier, Amsterdam, p. 553-604

van Riemsdijk, W.H., Hiemstra, T., (2006), The CD-MUSIC model as a framework for interpreting ion adsorption on metal (hydr) oxide surfaces, in Lützenkirchen, J. (ed.), *Surface complexation modelling, Interface Science and Technology, Vol. II*, Academic Press, Elsevier, Amsterdam

Geochemische Grundlagenforschung als wichtiger Baustein für eine sichere Endlagerung

Horst Geckeis

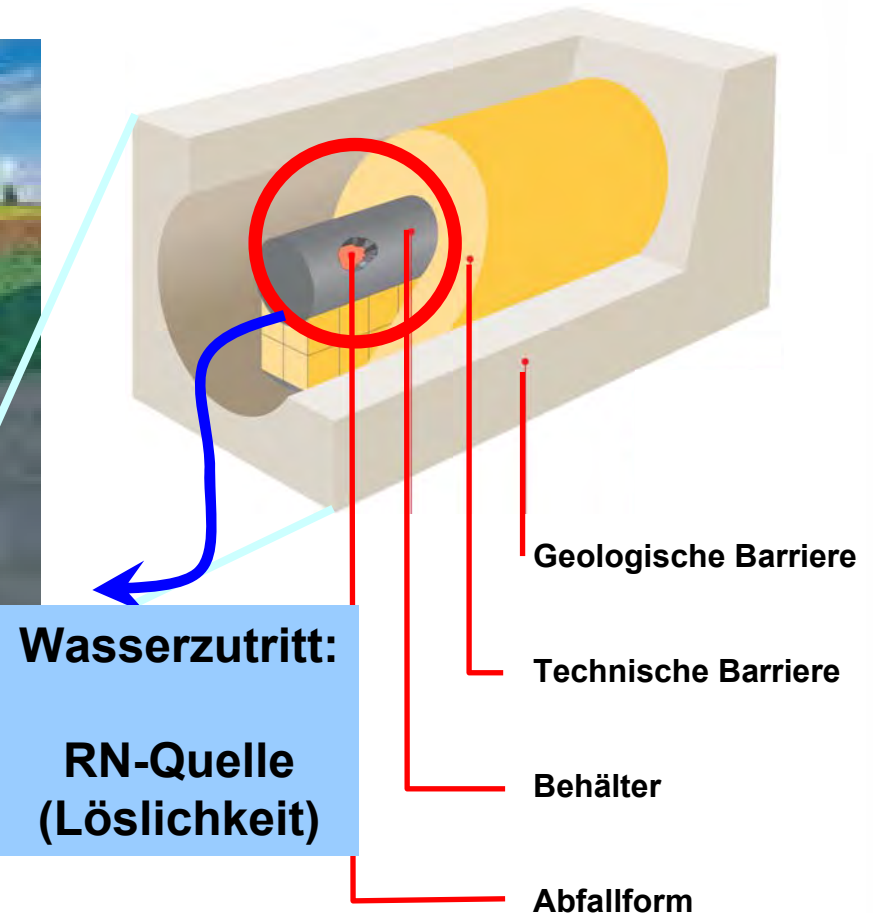
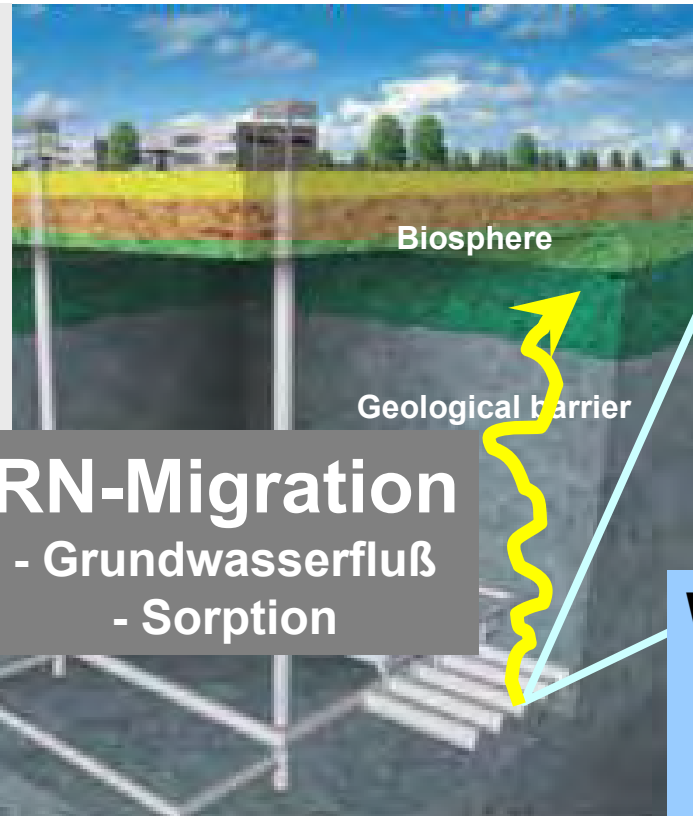
**40 Jahre Forschung und Entwicklung für die sichere Endlagerung
hochradioaktiver Abfälle:
Wo stehen wir?**

10.-11.Juni 2008, Peine

Langzeitsicherheit des Multibarrierensystems

- Chemische und geochemische Aspekte -

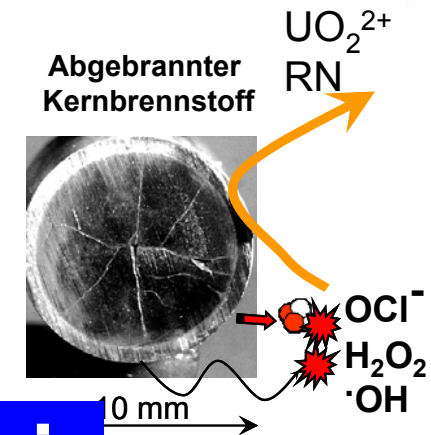
- Bewertung des Rückhaltepotentials
- Analyse des Isolationspotentials
- Bewertung der Radionuklidenausbreitung
- Konsequenzanalyse



Geochemische Endlagerforschung

$$r = k_0 \times A_{\min} \times e^{-E_a/R} \cdot a_{H^+}^{n_{H^+}} \cdot g(I) \cdot \prod_i a_i^{n_i} \cdot f(\Delta G_r)$$

Auflösung,
RN-Freisetzung



Quellterm

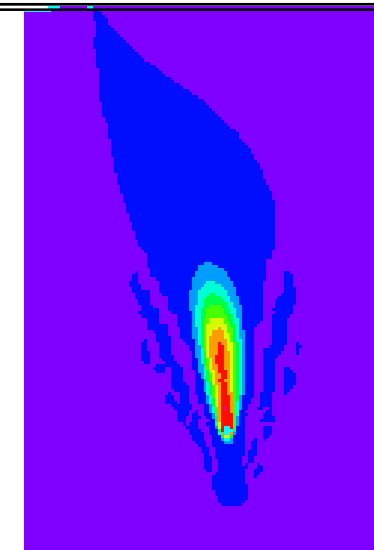
Geochemie

$$-u \frac{\partial c_i}{\partial t} + D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\theta} K_d \frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial c_i}{\partial t}$$

Advektion
Dispersion

$$D_a = \frac{D}{\varepsilon + \rho K_d}$$

Diffusion

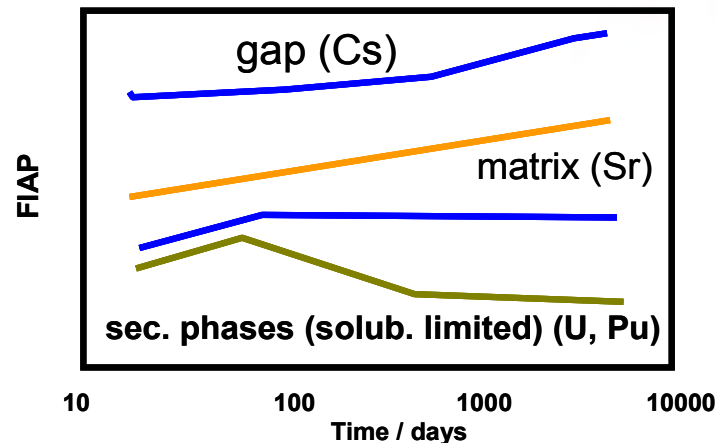
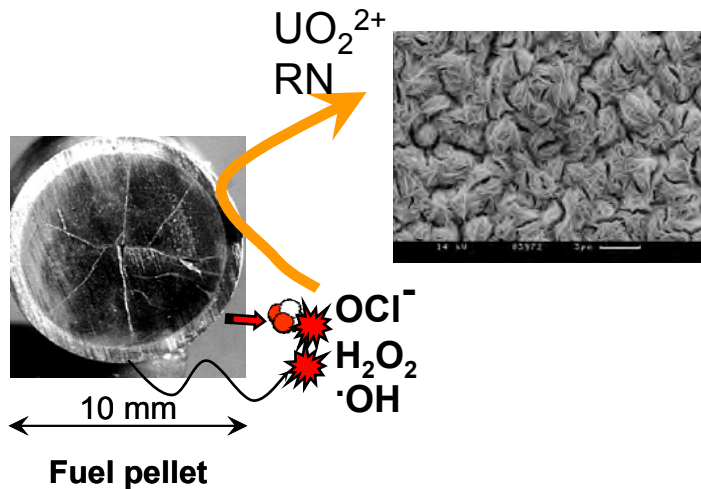


Migration
(Radionuklid-
ausbreitung)

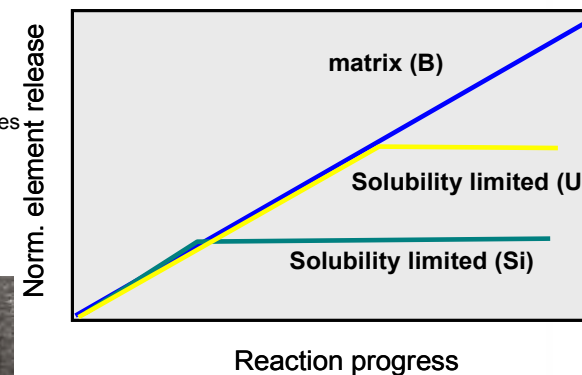
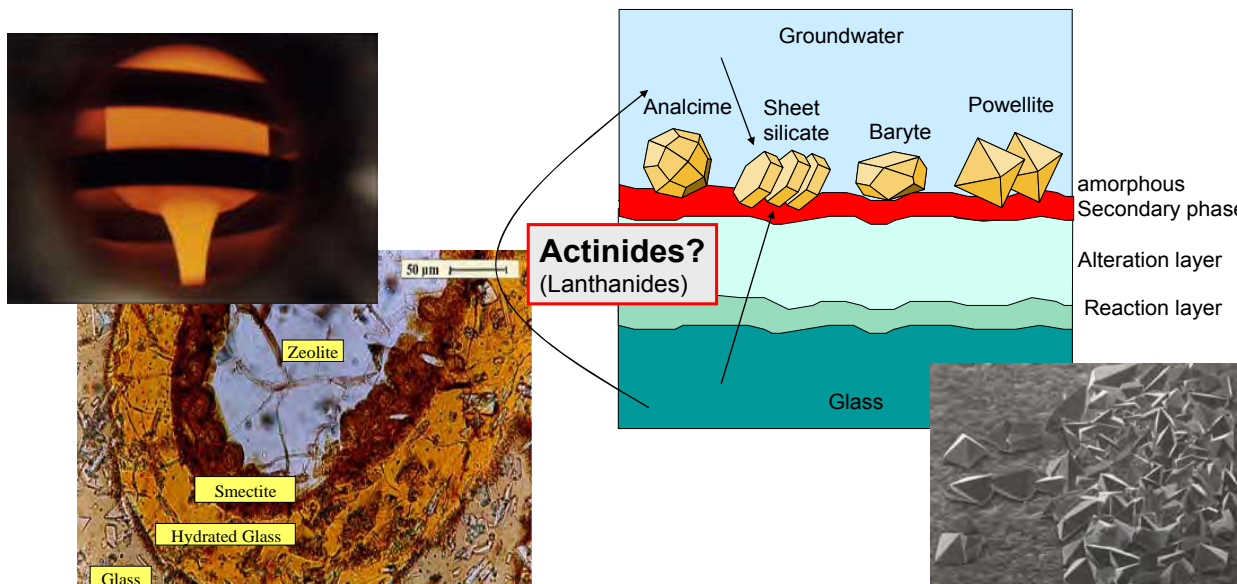
Thema: Löslichkeit und Auflösung

Thema: Löslichkeit und Auflösung

Kernbrennstoff



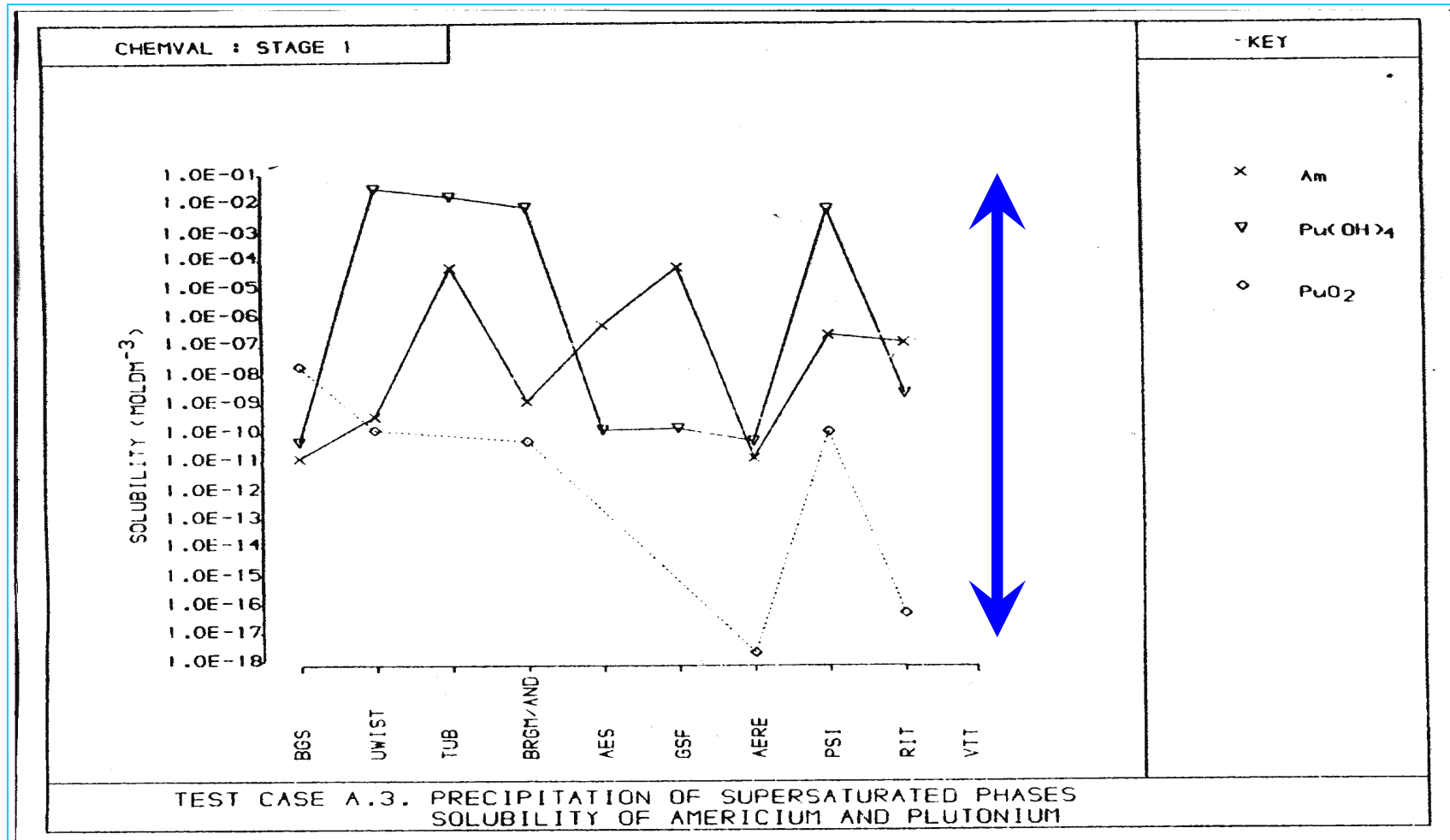
HAW Glas



- Abfallformen lösen sich nur langsam auf: Lebensdauern > 10.000 a
- Actinidenfreisetzung i.allg. bestimmt durch Löslichkeitslimite

Thema: Löslichkeit und Auflösung

Löslichkeit der Actiniden

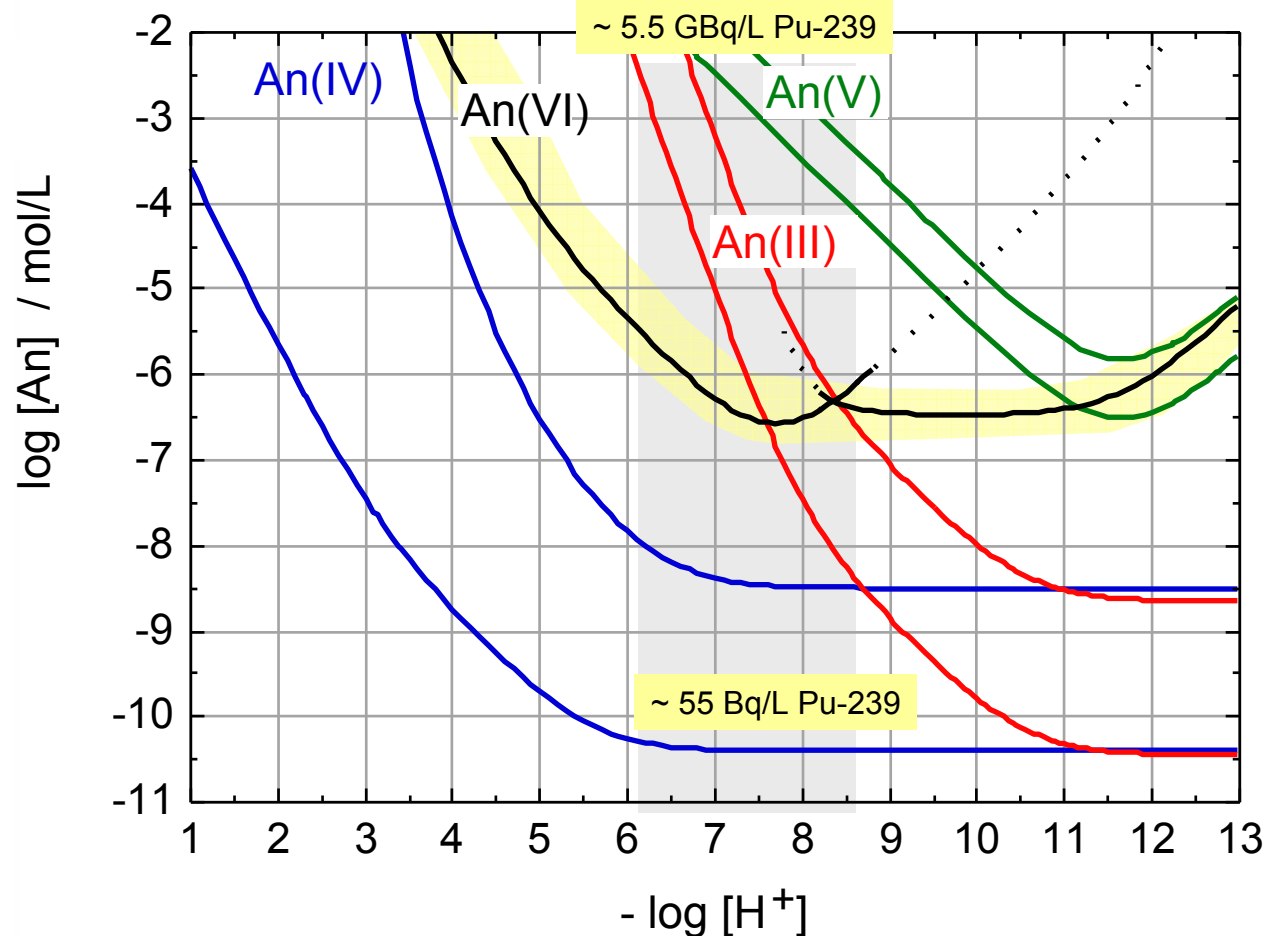


(From CEC Report EUR 12237 en (1989): CHEMVAL Project Stage 1: Verification of speciation models)

Thema: Löslichkeit und Auflösung

Löslichkeit der Actiniden

- I=0.1 M (NaCl); 25°C -



Oxidierende Bedingungen
(Radiolyse, Sauerstoff)

Reduzierende Bedingungen
(Fe-Korrosion, anoxisch)

Neck, Fanghänel et al. FZK-INE 001/01



Startseite

Freitag, 06. Juni 2008



Startseite →

THEREDA Projekt

THEREDA Partner

THEREDA Interaktiv

THEREDA Kontakte

FAQ

Downloads

Nachrichten

Links

Sitemap

Suche

Wer ist Online?

Aktuell 1 Gast online

Login Form

Benutzername

christian

Passwort

XXXXXXXXXX

 Angemeldet bleiben

Anmelden

[Passwort vergessen?](#)

Noch kein Benutzerkonto?

[Registrieren](#)

WILLKOMMEN BEI THEREDA

THEREDA (Thermodynamische Referenzdatenbasis) ist ein Forschungsprojekt, welches im Jahr 2006 gestartet wurde. Hauptziel ist die Erstellung einer umfassenden und intern konsistenten thermodynamischen Referenzdatenbasis für die geochemische Modellierung der Nah- und Fernfeld

Deutsch
Forschung
(chemo
Projekt

Entwicklung einer Thermodynamischen Referenzdatenbasis

Parallel zum Aufbau der potentiellen Nutzern der Diskussionsplattform zur [Kommentare und Anregungen](#)

Weitere Details zum THEREDA-Projekt sind auf der [Webseite](#) zu finden, wobei letzteres nach Fertigstellung der Datenbank,

**Geotechnische
Barriere
Silikatminerale
Al, Si**

**Abfallkomponenten:
Radionuklide,
Schwermetalle,
Fe, S, As, B**

**System der ozeanischen Salze
(H, Na, K, Mg, Ca, CO₃, OH, Cl, SO₄)**

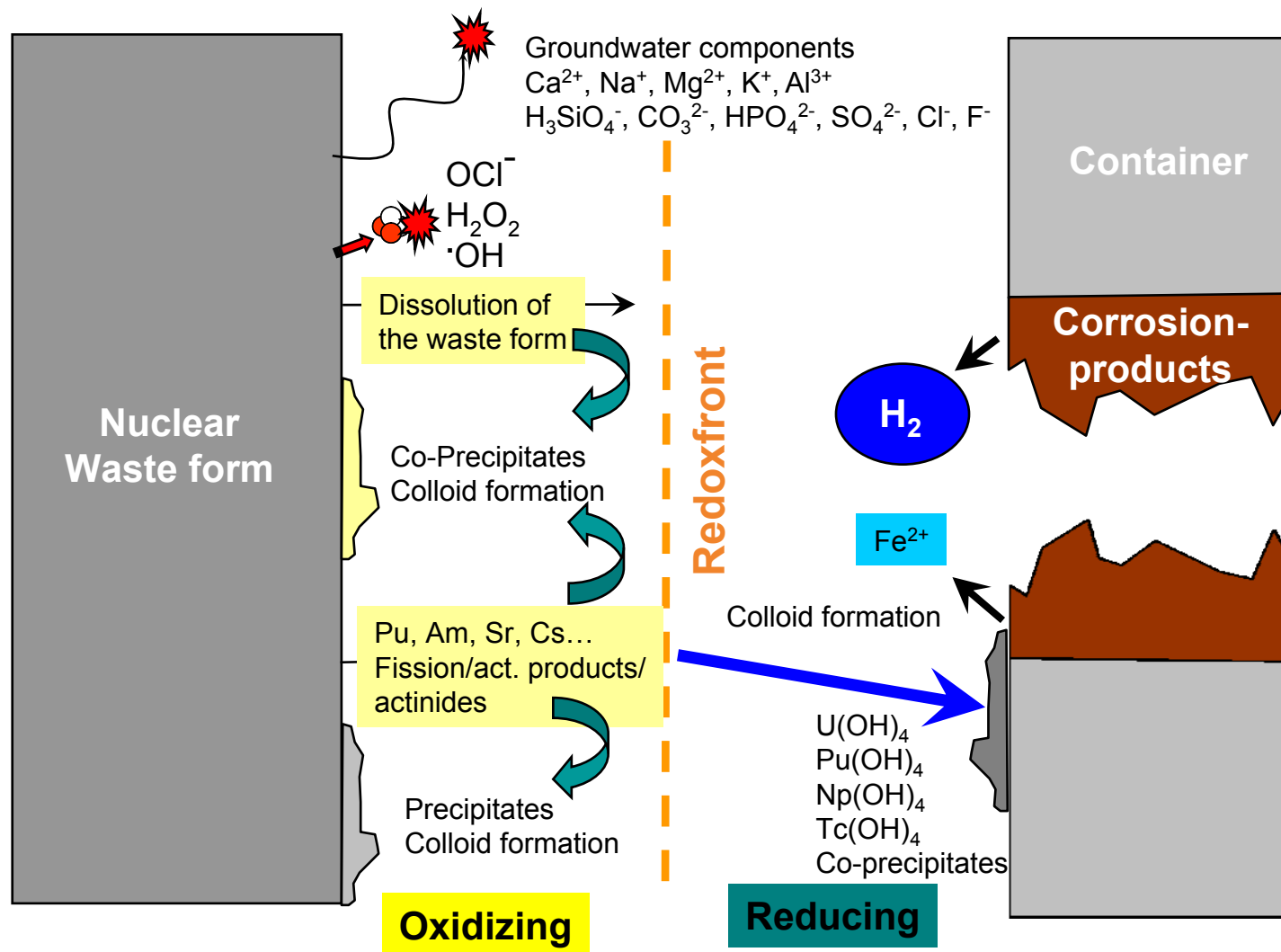
NEUIGKEITEN: VERÖFFENTLICHUNGEN & VORTRÄGE

In der Aprilausgabe 2008 ist ein Artikel der Projektpartner über die Entwicklung einer thermodynamischen Referenzdatenbasis für die geochemische Modellierung nuklearer und nichtnuklearer Abfälle in der [Veröffentlichungen & Vorträge](#).

Homepage: www.thereda.de

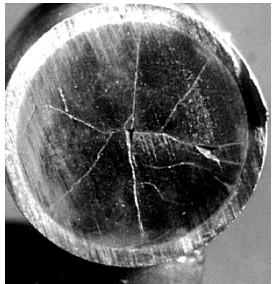


Thema: Löslichkeit und Auflösung

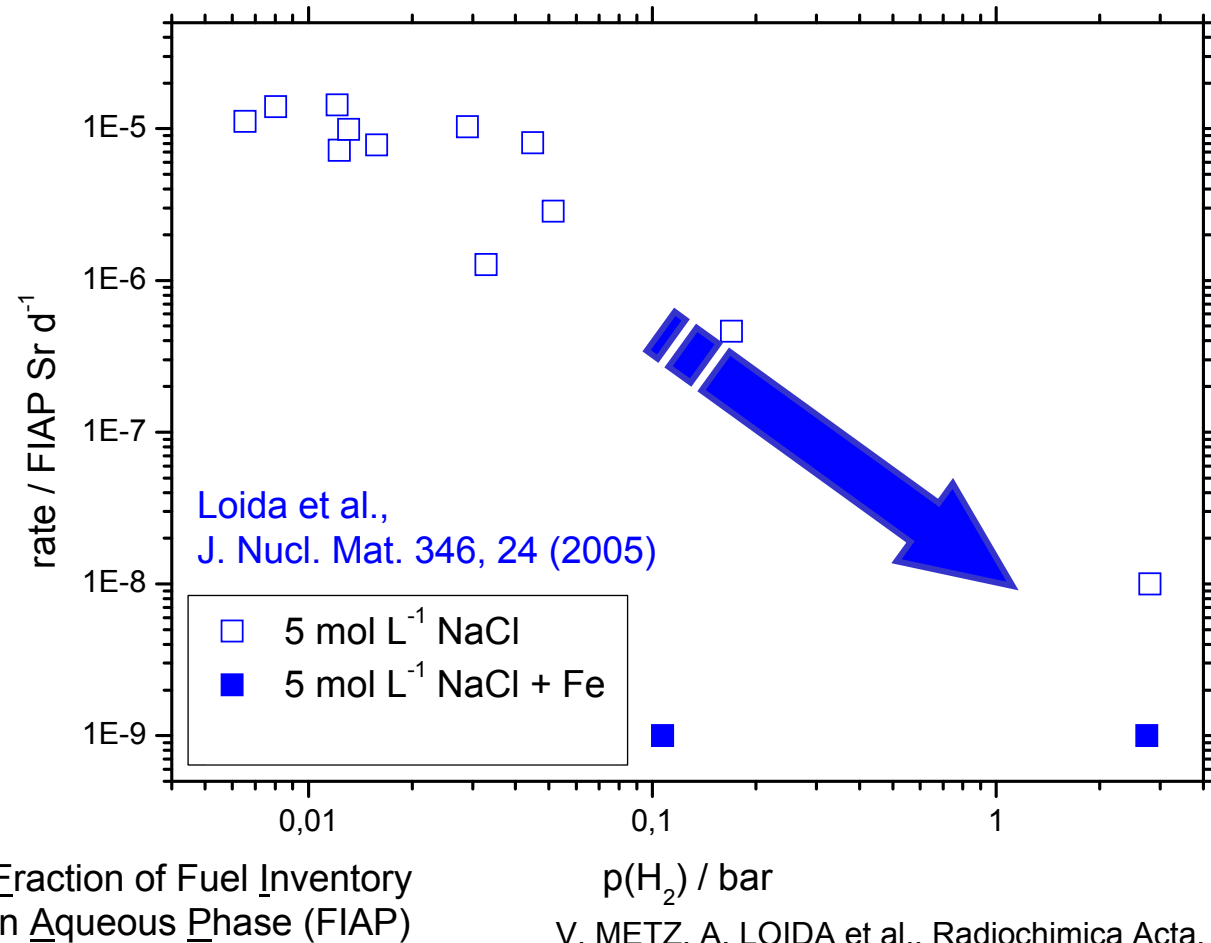


Thema: Löslichkeit und Auflösung

- Einfluss von H_2 auf die Auflöserate von abgebranntem Kernbrennstoff

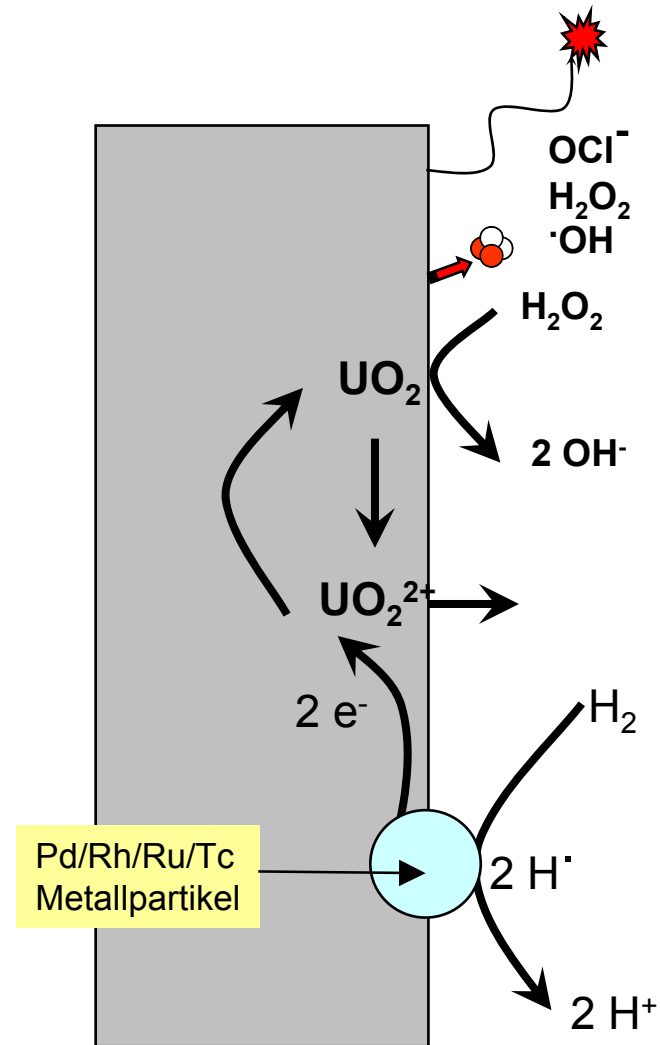


10 mm



Thema: Löslichkeit und Auflösung

Modellvorstellung zur Beschreibung des H₂-Effekts

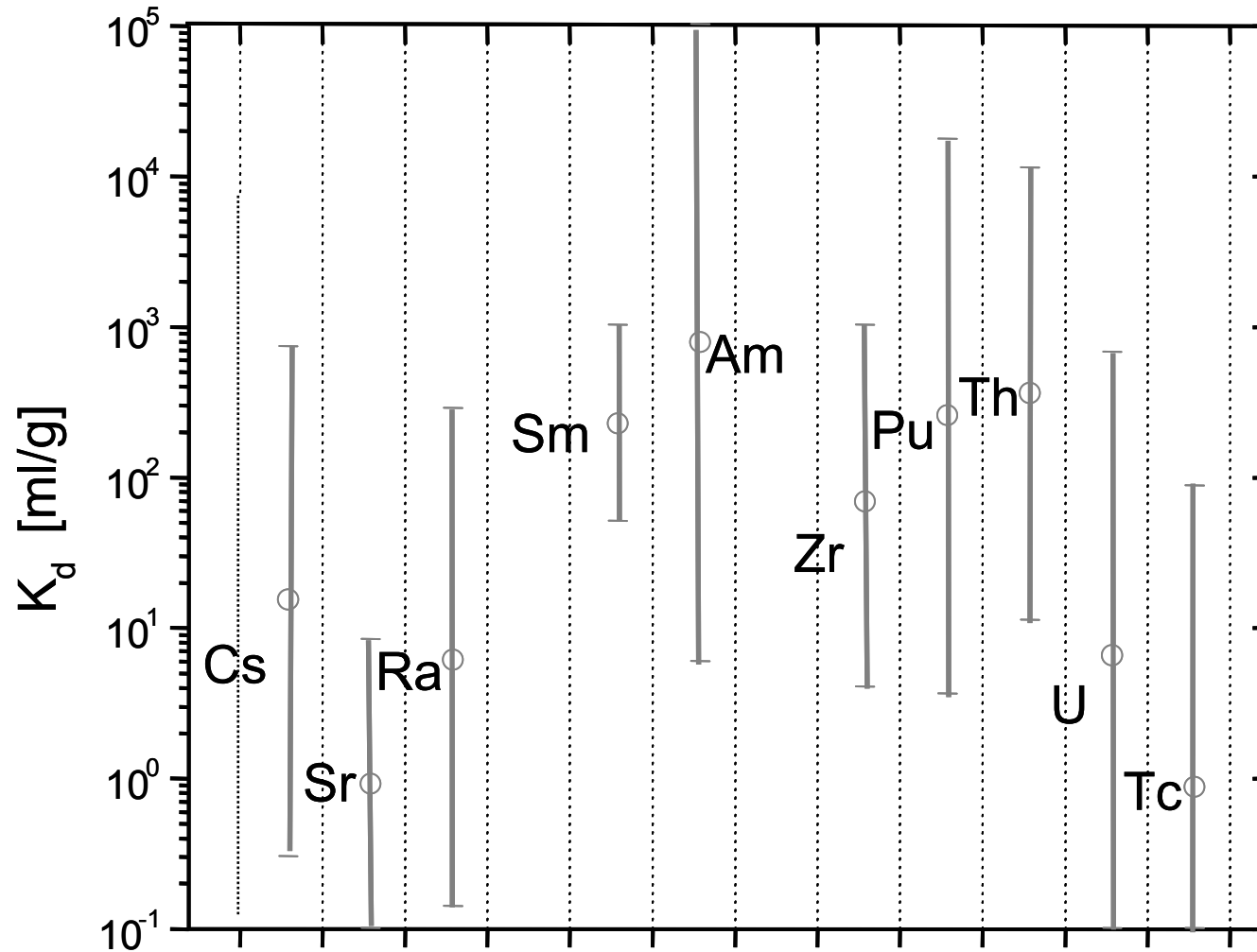


Jonsson et al., EST, 2007

Thema: Sorption und Rückhaltung

Thema: Sorption und Rückhaltung

K_d -Werte



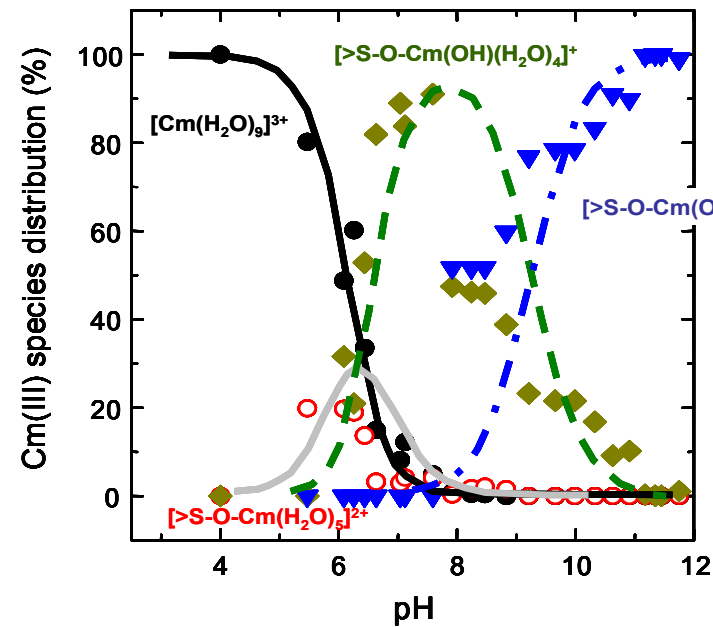
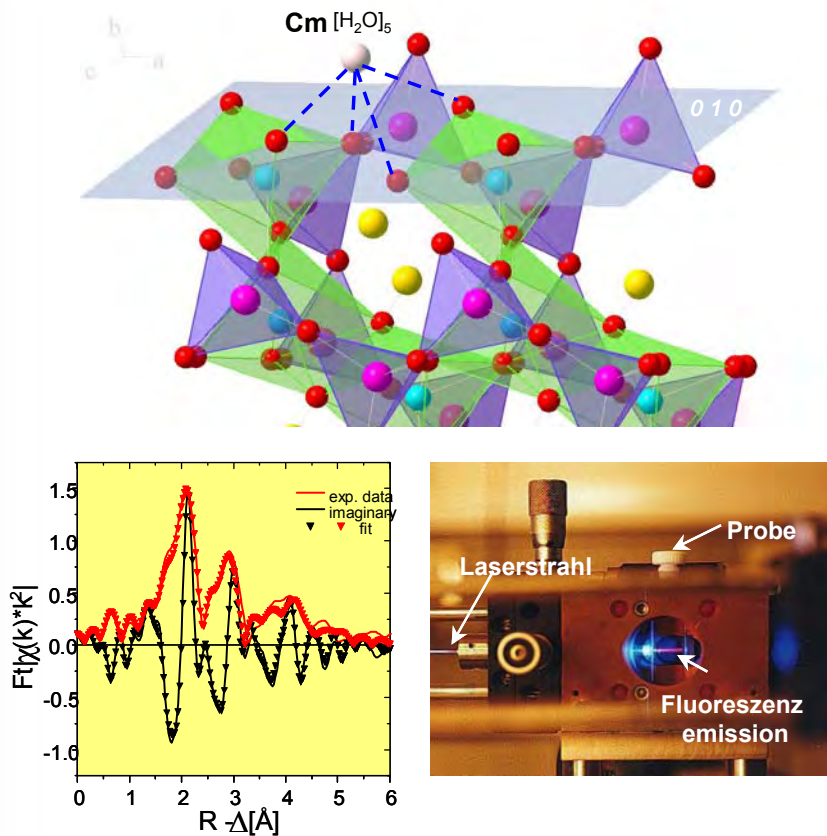
$$K_d = \frac{[RN]_{sorb}}{[RN]_{diss}}$$

Quelle: GRS

Thema: Sorption und Rückhaltung

Spektroskopie – Theorie – Batch-Experimente - Modellierung- P.A

Beispiel: Actinidsorption an Tonminerale



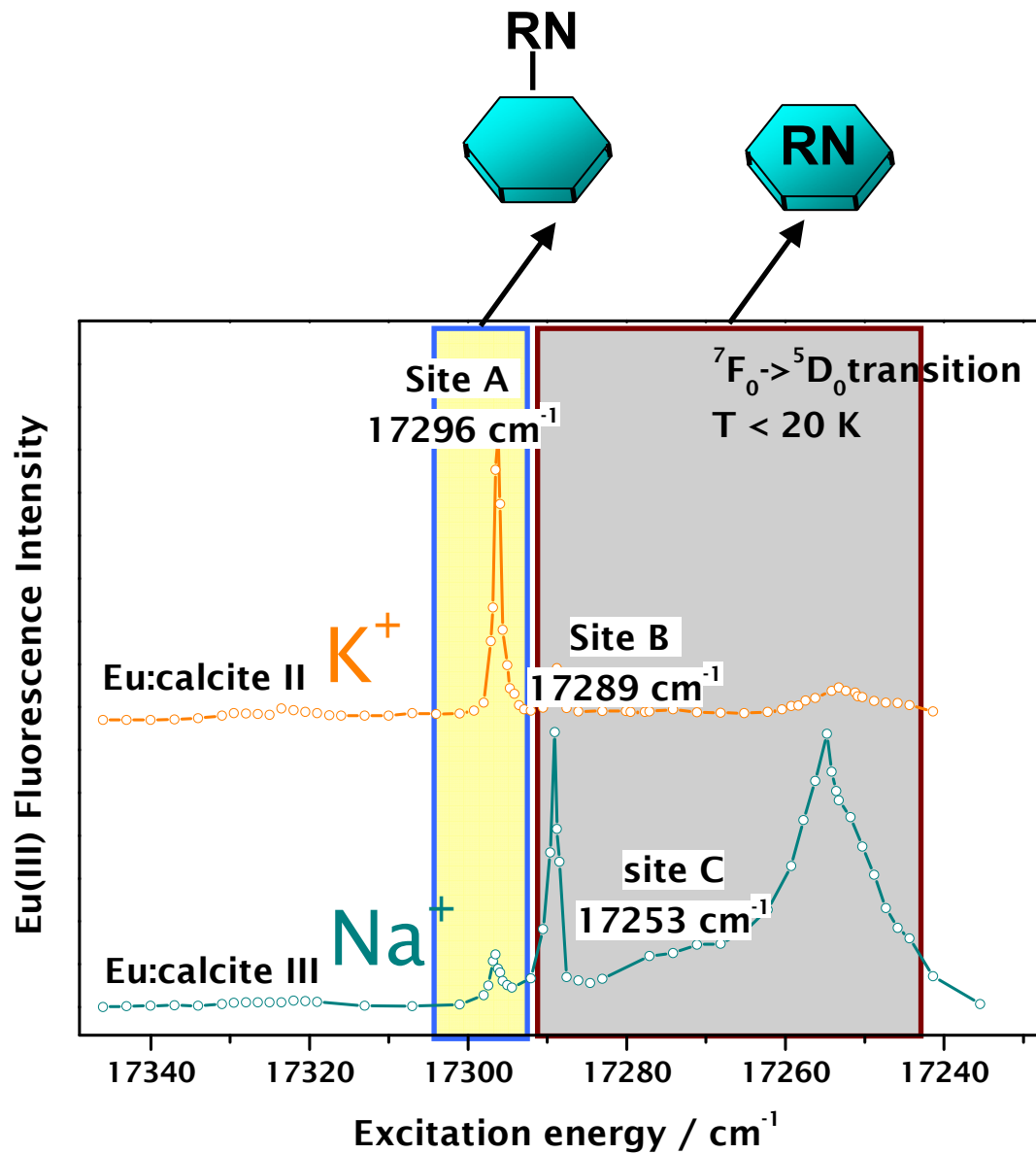
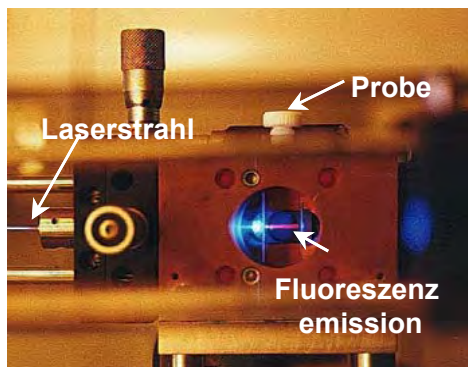
smart⁺-K_d

M. H. Bradbury, B. Baeyens, H. Geckeis, T. Rabung, GCA (2005)
Th. Rabung, M.C. Pierret, A. Bauer, H. Geckeis, M.H. Bradbury, B. Baeyens, GCA (2005)]

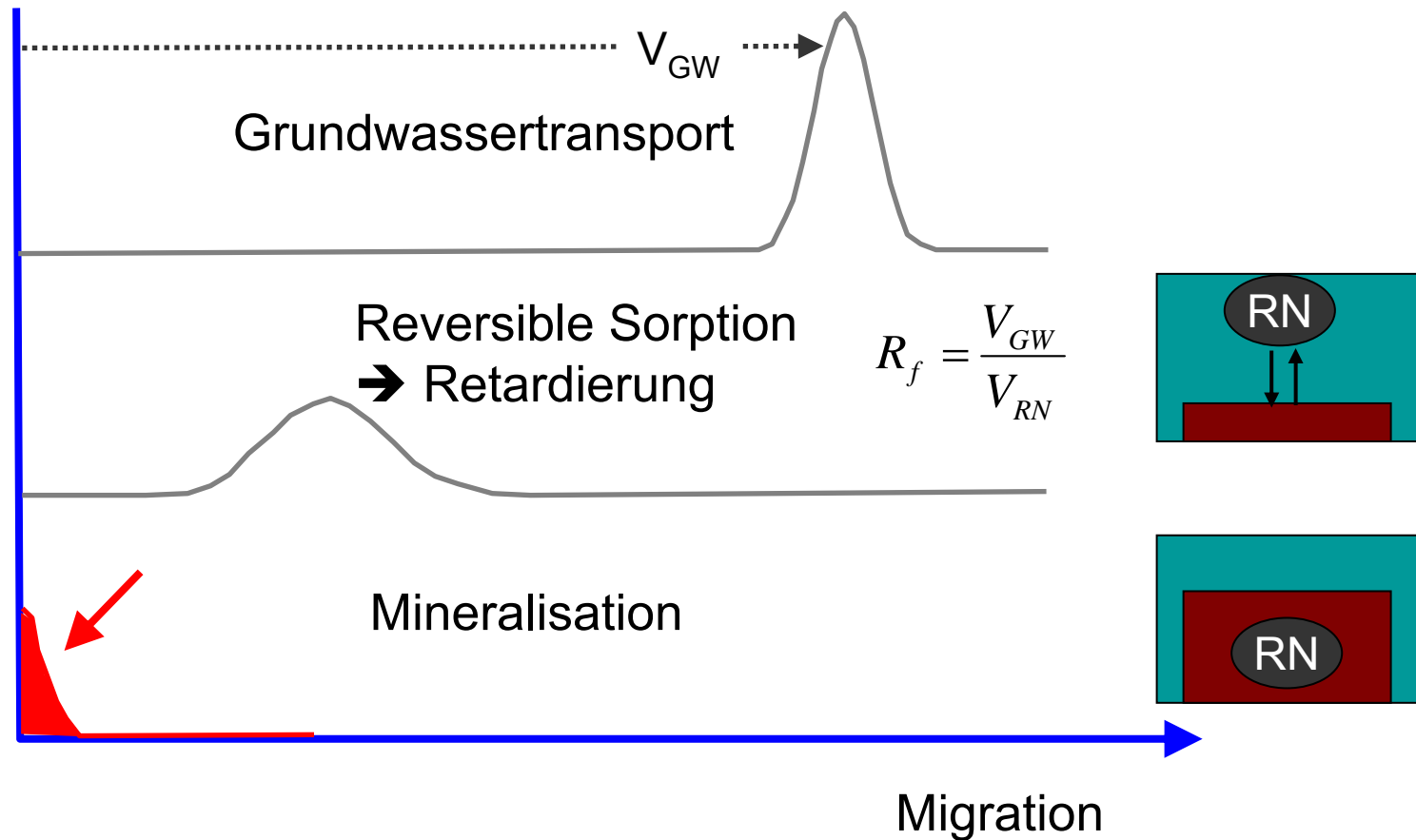
Thema: Sorption und Rückhaltung



Calcit



Thema: Sorption und Rückhaltung



(J.I. Kim, Nucl. Eng. Technol., 38, 2006)

Thema: Kolloidgetragene RN Migration

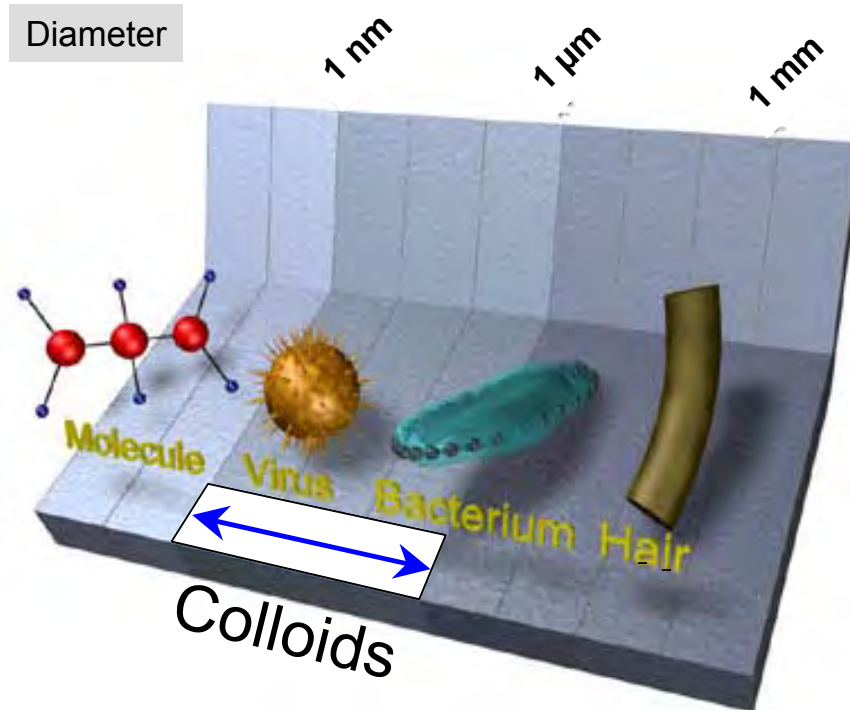
Kim, RCA, 1991
Kersting et al., Nature 1999
Novikov et al., Science, 2006

... one of the priority research directions identified by DOE!

[Basic Research Needs for Geosciences: Facilitating 21st Century Energy Systems, USDOE, 2007]

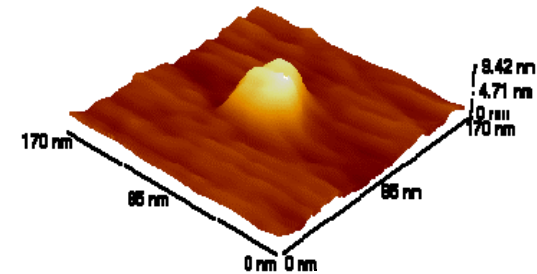
Thema: Kolloidgetragene RN Migration

Aquatic colloids



Possible groundwater colloids:

Mineral particles (FeOOH, Clay etc.)
 Humic matter, bacteria, virus
 Radionuclide-Oxyhydrates (e.g. PuO(OH)₂)



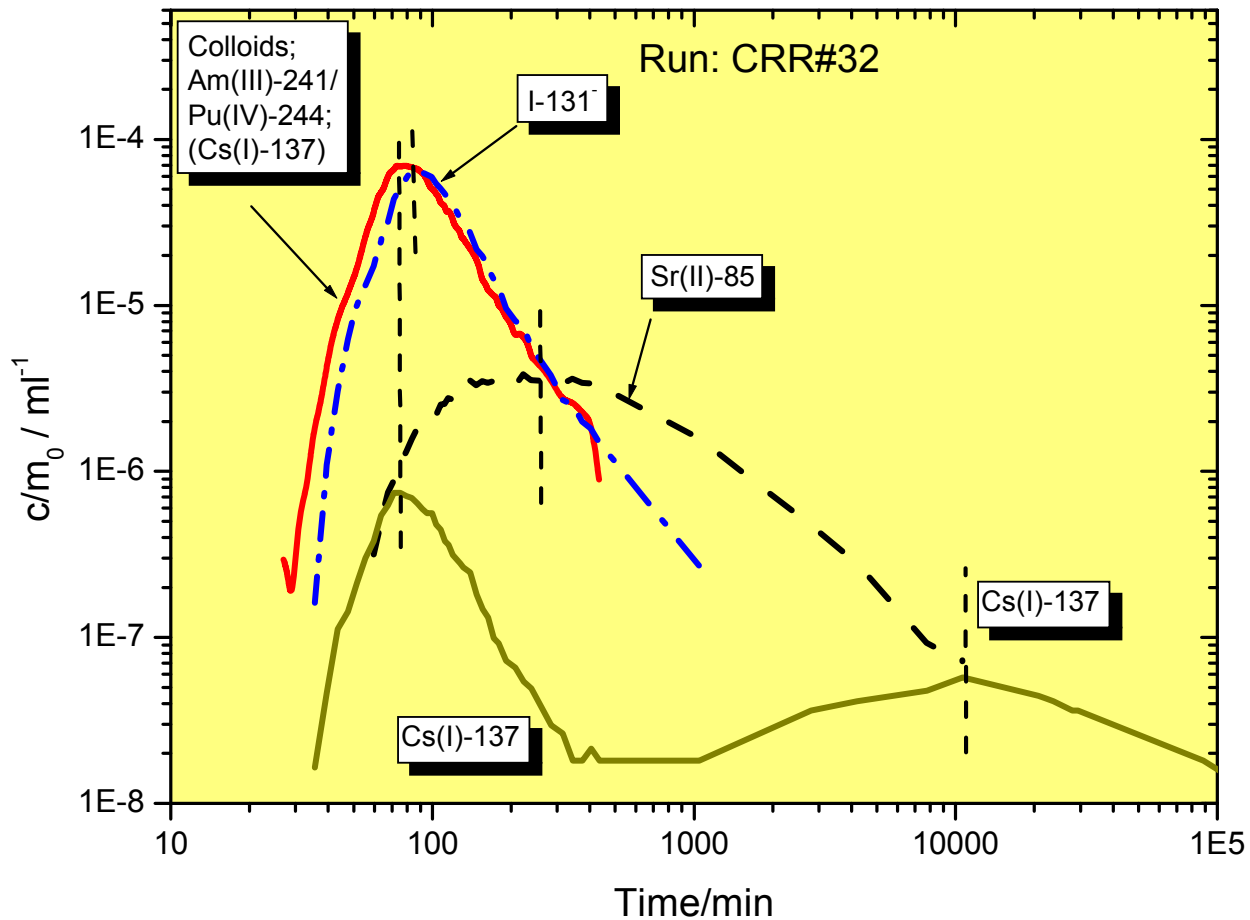
Humic colloids in a sandy aquifer (Gorleben, Germany)

[M. Plaschke et al, Environ. Sci. Technol. (2002)]

Colloidal Particles in a granitic groundwater (Grimsel, Switzerland)

[Degueldre et al., Appl. Geochem, (1996)]





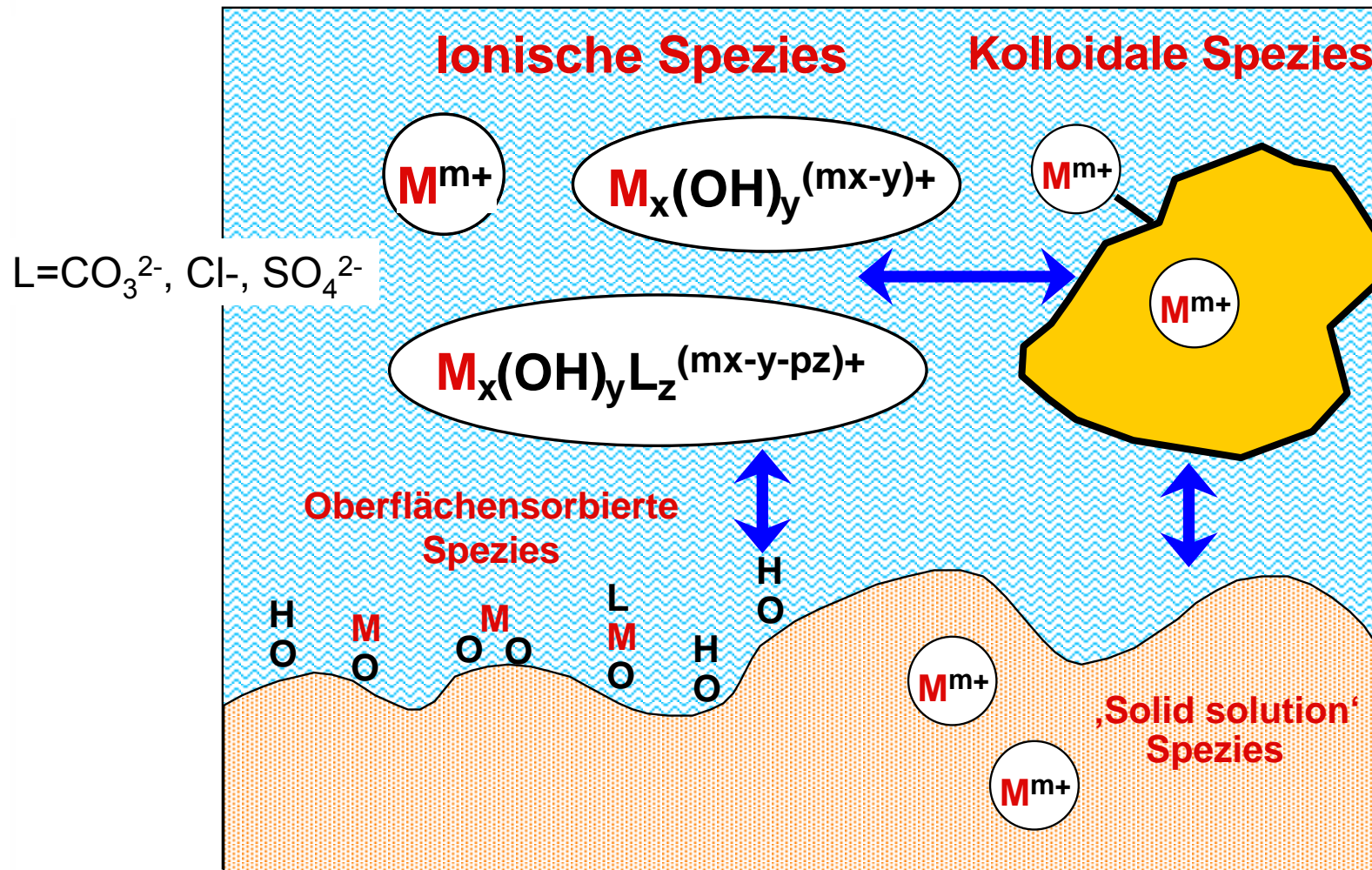
[A. Möri et al., Coll. Surf. 217 (2003), H. Geckeis et al., Radiochim. Acta, 92 (2004)]



Aim: Study the influence of clay colloids released from a bentonite barrier on radionuclide migration

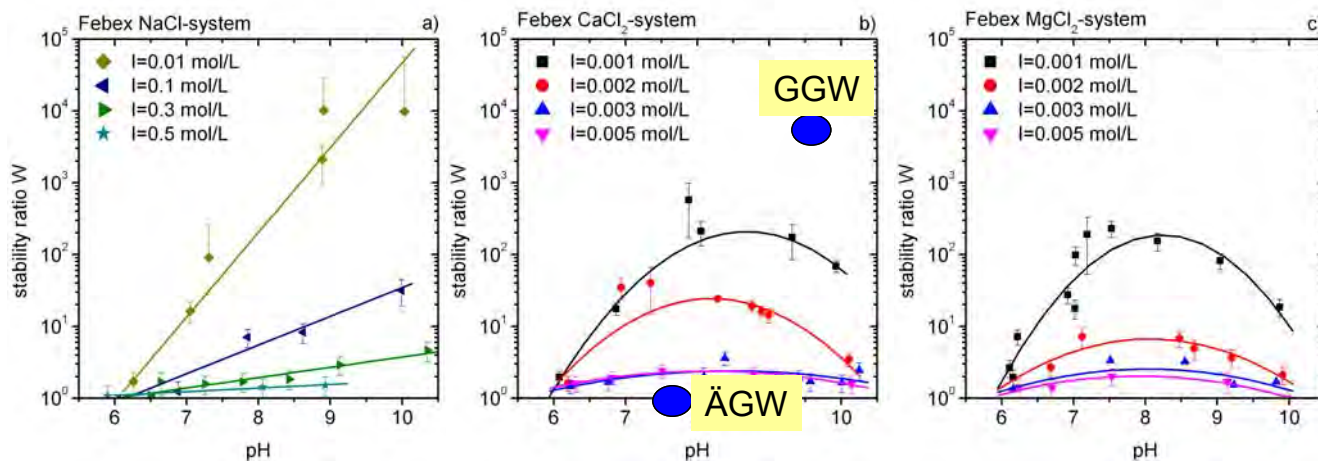
Thema: Kolloidgetragene RN Migration

Metallionenspezies in einem natürlichen Aquifer



Thema: Kolloidgetragene RN Migration

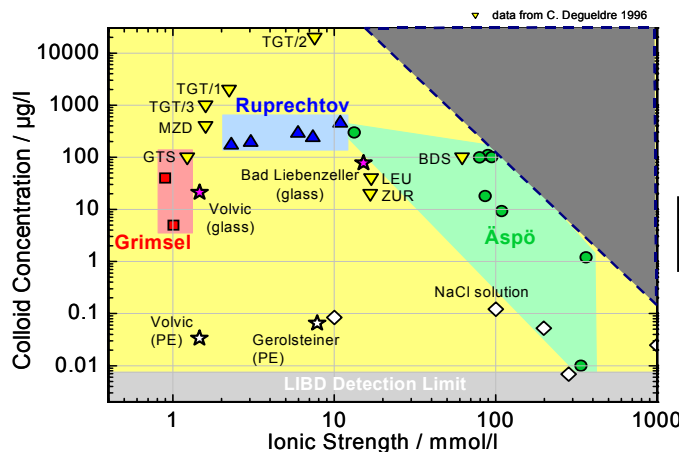
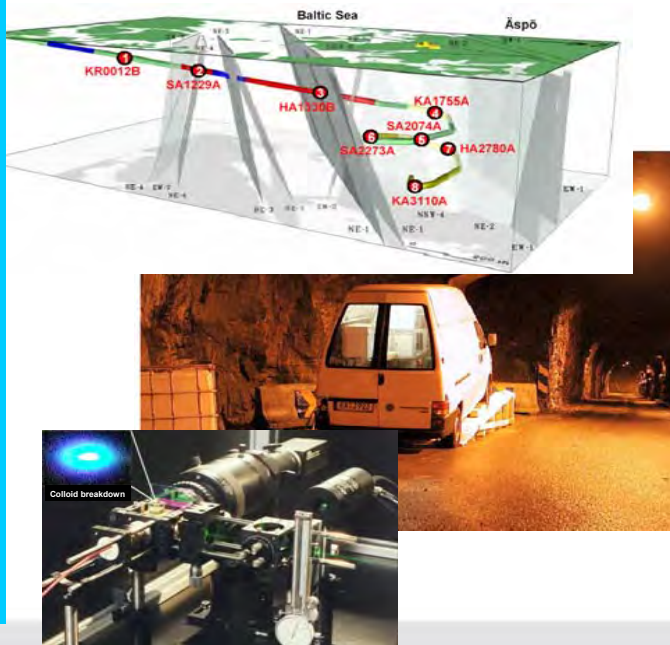
Laborexperimente



Kolloid-stabilitäts-modell

[Seher et al. 2008]

Feldexperimente



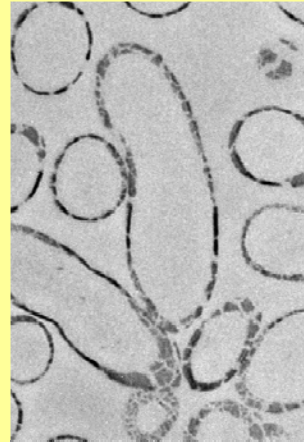
Validierung durch in-situ Experimente

[W. Hauser et al. 2002]

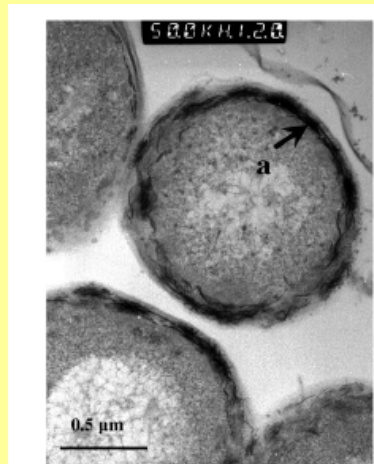
Thema: Kolloidgetragene RN Migration

Mikrobieller Einfluss

Sorption
Reduktion



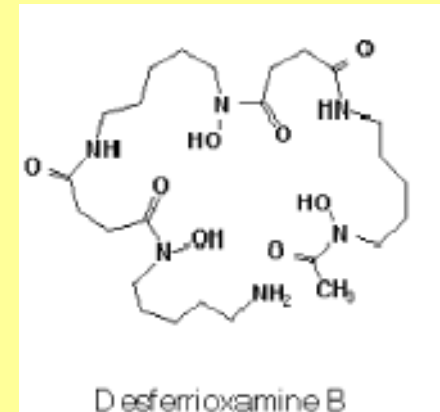
Komplexierung
(exozelluläre Liganden
Siderophore)



U(VI) enrichment

Merroun et al. Appl. Env.
Microbiol. 2005, 71, 5532

Boukhalfa et al. Appl. Env.
Microbiol., 2007, 73, 5897



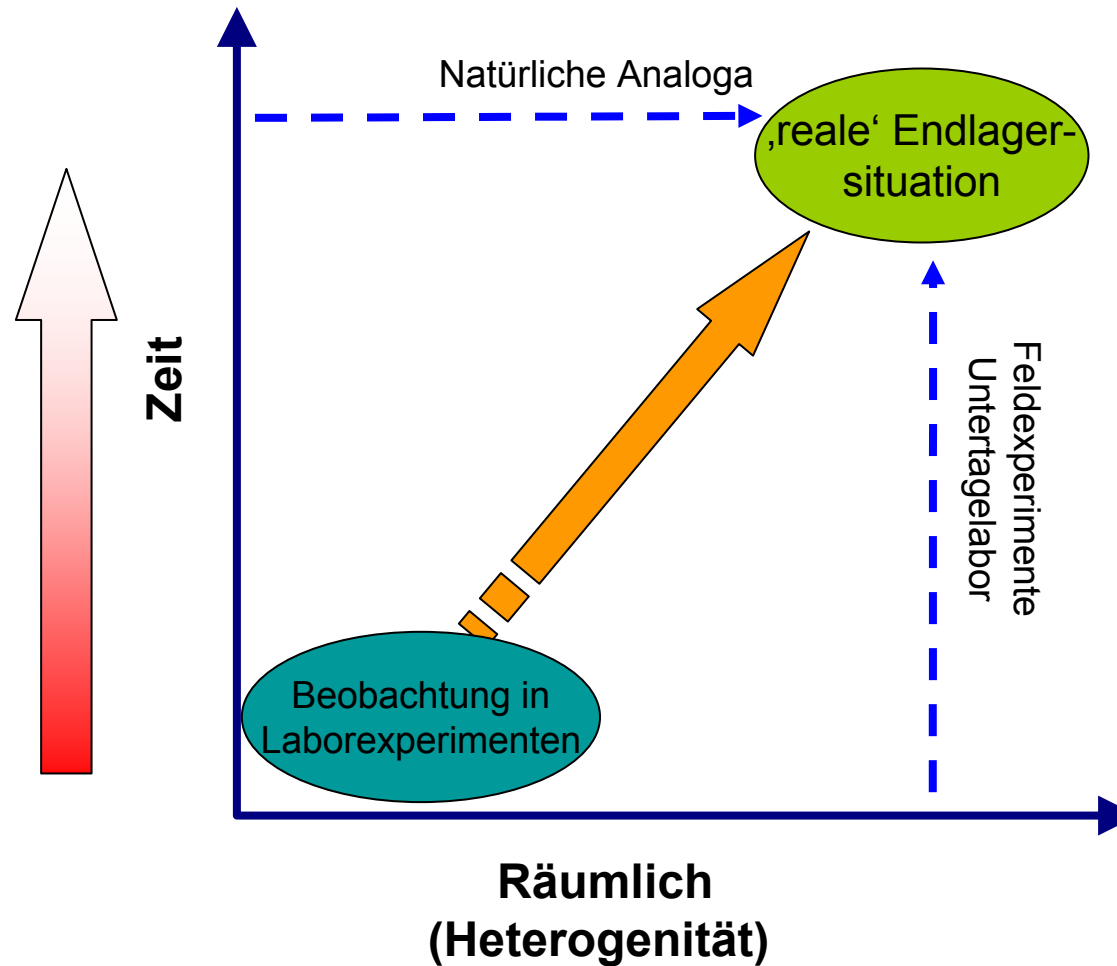
Pu(IV) - desferrioxamine B (DFB): $\log \beta \sim 30$

Jarvis et al. Inorg. Chim. Acta,
182 (1991) 229-232
John et al., EST 2001

Thema: Übertragbarkeit

Thema: Übertragbarkeit

Radionuklidverhalten in einem Endlagersystem



Thema: Übertragbarkeit

Das OKLO-Phänomen als Natürliches Analogon



U-235 Isotopenanteil = 0,6 - 0,7 %
(natürlich : $0,7202 \pm 0,0006 \%$)

Natürliche Kernspaltung vor ca. 2 Ga (3,68 % U-235)

**Isotopenanomalien zeigen Zerfall von Spaltprodukten
+ Actiniden z.B.**

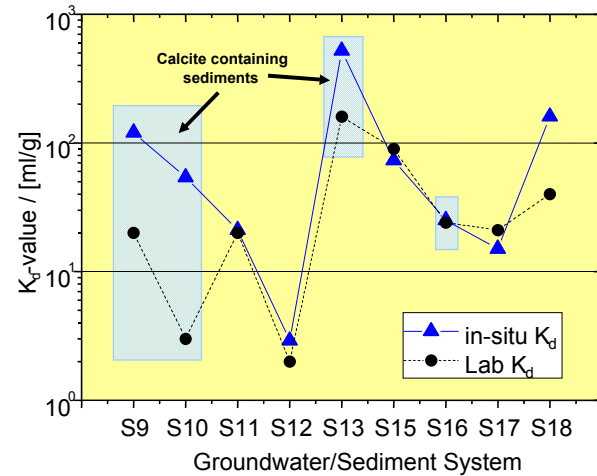
Sr-90	→ Zr-90
Tc-99	→ Ru-99
Np-237	→ Bi-209
Pu-239	→ U-235

Schlussfolgerung:

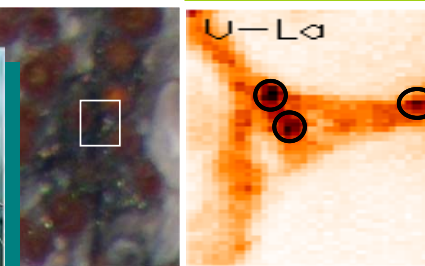
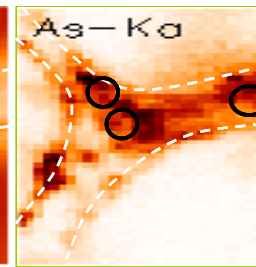
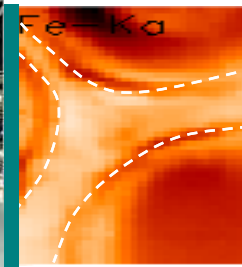
- Migration von Nb, Y, Zr, SEE, AN < 5 cm
- Sr, Tc zerfallen innerhalb der Reaktionszone
- I, Mo, Spaltgase sind mobiler

Thema: Übertragbarkeit

Untersuchungen zu ‚standortspezifischen Naturanaloga‘



Vergleich in-situ und Labor-K_d-Werte für Uran in Sedimentgestein aus ERAM Deckgebirge (BFS)



In-situ Uranspeziation mittels μ -XAS, μ -XRD, μ -XRF; Probe aus NA-Standort Ruprechtov (CR) (GRS-FZK)

Grundlagenforschung – Wo stehen wir ?

- Thermodynamische Datenlage zur Löslichkeit sowie der Komplexbildung von Radionukliden wesentlich belastbarer
- Quellterme für angebrannten Kernbrennstoff, HAW-Glas, Zement für Endlager im Salz verfügbar (wenn auch mechanistisch nicht alle Prozesse vollständig verstanden)
- Sorption:
 - Mechanistisches Verständnis von Sorptionsvorgängen nimmt zu
 - Effiziente Radionuklidrückhaltung durch Einbau in Mineralphasen (Bildung fester Lösungen); Datenverfügbarkeit gering
 - Chemische Barrierefunktion des Behälters bislang wenig berücksichtigt
- Einfluss von Kolloiden teilweise und von Mikroben nicht quantifiziert

Grundlagenforschung – Was brauchen wir ?

Fakt ist: Wissenschaftliche Erkenntnisse zu geochemischen Prozessen nehmen (auch durch Nutzung von Ergebnissen interdisziplinärer Grundlagenforschung) weltweit zu!

→ Wir brauchen:

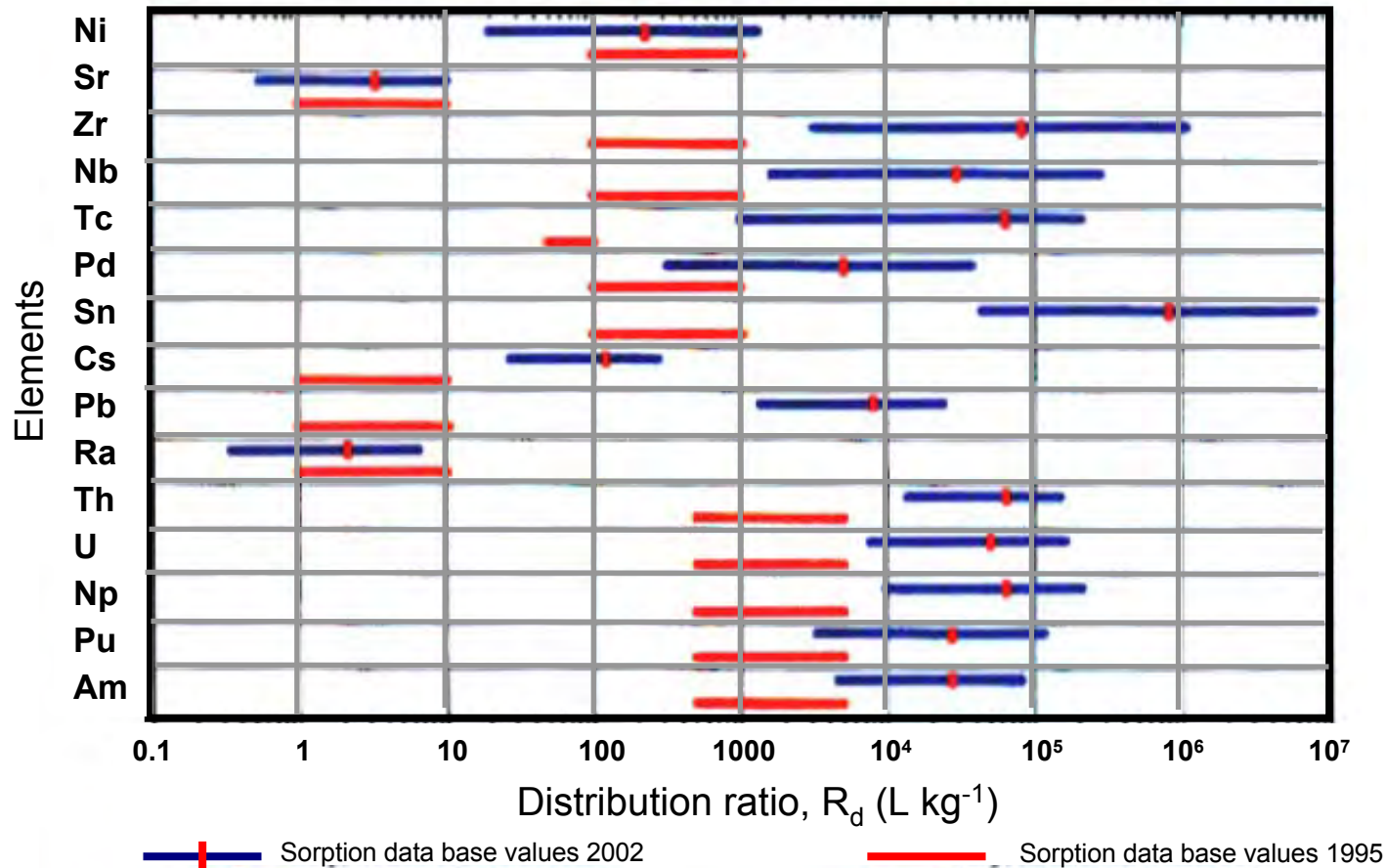
- International vernetzte Forschung
- Enge Kooperation WMO ↔ F+E
- Forschung + Lehre auf hohem Niveau (**Kompetenzerhalt**)
- Expertise zur Bewertung von publizierten F+E Arbeiten zur Endlagerung

Beispiele:

- oxo group silylation of the uranyl dication (Nature, Jan. 2008, "Pac-Man" molecule munches uranium)
- Reaction of PuO_2 with water (Science, 2000)
- Colloid mediated transport of Pu (Nature, 1999)

Grundlagenforschung macht die Endlagerung unsicher ?

MX-80 Bentonite Sorption Values



A comparison of sorption data selected for MX-80 bentonite in the current PA (Bradbury & Baeyens, 2003a) and the PA of 1995 (Stenhouse, 1995)

Taken from PSI-Progress Report September 2002 to September 2003

BMWI/PTKa geförderte F+E Arbeiten



Verbundprojekt: FZK, GRS	Kolloidgetragener Radionuklidtransport in geklüftetem Gestein
TU München	Wechselwirkung von Actiniden mit Anorgano-Huminkolloiden
FZD	Mobilisierung von Actiniden durch mikrobiell produzierte Liganden unter Berücksichtigung der Endlagerung von radioaktivem Abfall
Uni Hannover	Stabilität von Organotonen als Anionenadsorber unter Endlagerbedingungen
FZJ	Wechselwirkung mobilisierter Radionuklide mit sekundären Phasen in endlagerrelevanten Formationswässern
Verbundprojekt: FZD, Uni Mainz, IIF, TU München, Uni Saarbrücken, FZK, Uni Potsdam	Actinidenmigration im natürlichen Tongestein: Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses von Tonorganika auf die Wechselwirkung von U und Am im Ton
TU Dresden	Untersuchung zur Temperaturabhängigkeit der Komplexbildung und Sorption dreiwertiger Actiniden Am(III), Pu(III) im System Actinid-NOM-natürliches Tongestein-Aquifer
Verbundprojekt: FZK, FZD, GRS	Verbundvorhaben THEREDA: Entwicklung einer thermodynamischen Referenzdatenbasis
GRS	Thermodynamische Daten für Fe(II) in hochsalinaren Lösungen bei Temperaturen bis 90°C

BMW/PTKa geförderte F+E Arbeiten

GRS	Modellierung des großräumigen Schadstofftransports
Verbundvorhaben: Uni Bonn, Uni Freiburg, Uni Jena, Uni Heidelberg, GRS	Weiterentwicklung des Rechenprogramms d3f und r3t
ISTec	Beschreibung des reaktiven Stofftransports in einem salinaren Endlager mit dem Code TOUGHREACT

Safety Case: Definition

NAGRA 2002:

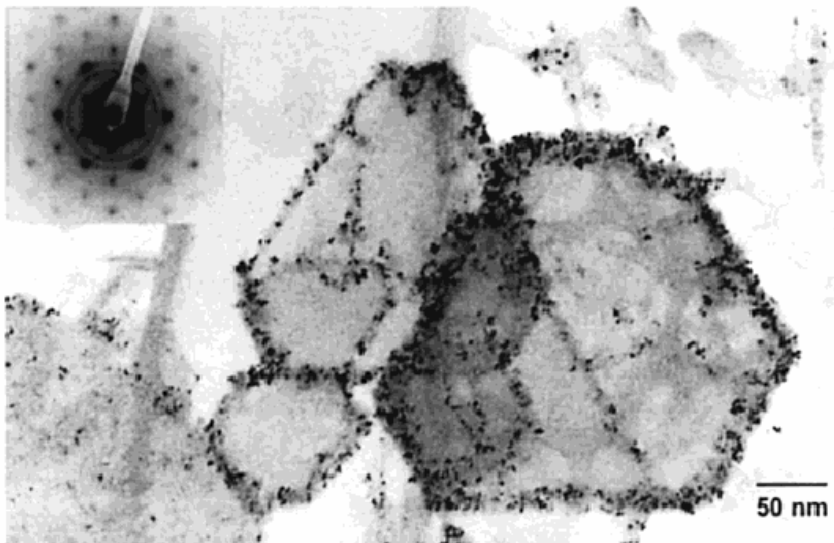
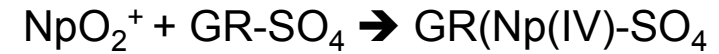
„Ein Sicherheitsnachweis besteht aus einer Reihe von Argumenten und Analysen, welche die Schlussfolgerung begründen, dass ein bestimmtes Endlagersystem sicher sein wird. Dazu gehört insbesondere der Nachweis, dass sämtliche behördlichen (relevanten) Schutzziele eingehalten werden können. Der Sicherheitsnachweis/Safety Case und die dazugehörigen Hintergrunddokumente beschreiben die Auslegung des Systems und seine Sicherheitsfunktionen und zeigen die Wirksamkeit der einzelnen Barrieren und der des Gesamtsystems auf. **Die aufgeführten Argumente und Analysen werden begründet, und die Bedeutung von Ungewissheiten und offenen Fragen im Hinblick auf das weitere Vorgehen bei der Realisierung des Endlagers wird diskutiert**“

Thema: Sorption und Rückhaltung

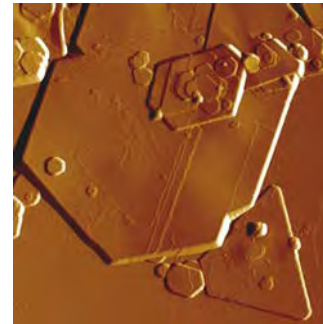
- ‚Grüner Rost‘ : $[\text{Fe(II)}_4\text{Fe(III)}_2(\text{OH})_{12}]\cdot[\text{CO}_3/\text{SO}_4/\text{OH} \cdot \text{X H}_2\text{O}]$ -

U(VI) Reaktion mit GR

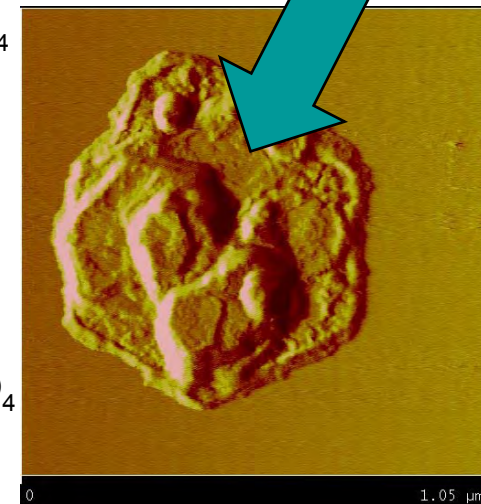
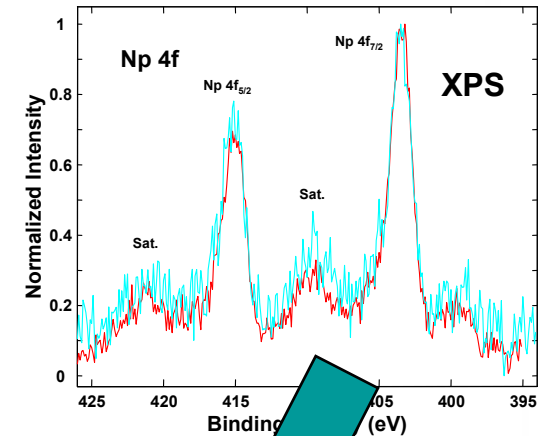
O’Loughlin et al. ES&T, 37 (2002), 721



TEM Aufnahme von GR-OH



AFM Aufnahme von GR-SO₄

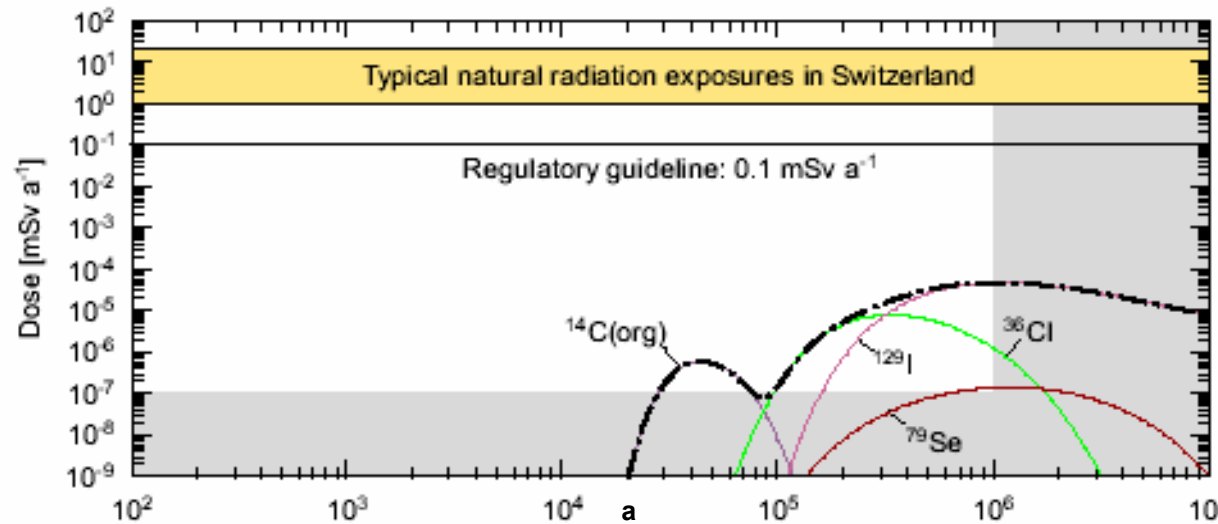


AFM Aufnahme von GR-SO₄
mit sorbiertem Np(V)

B. Christiansen et al. (2007)

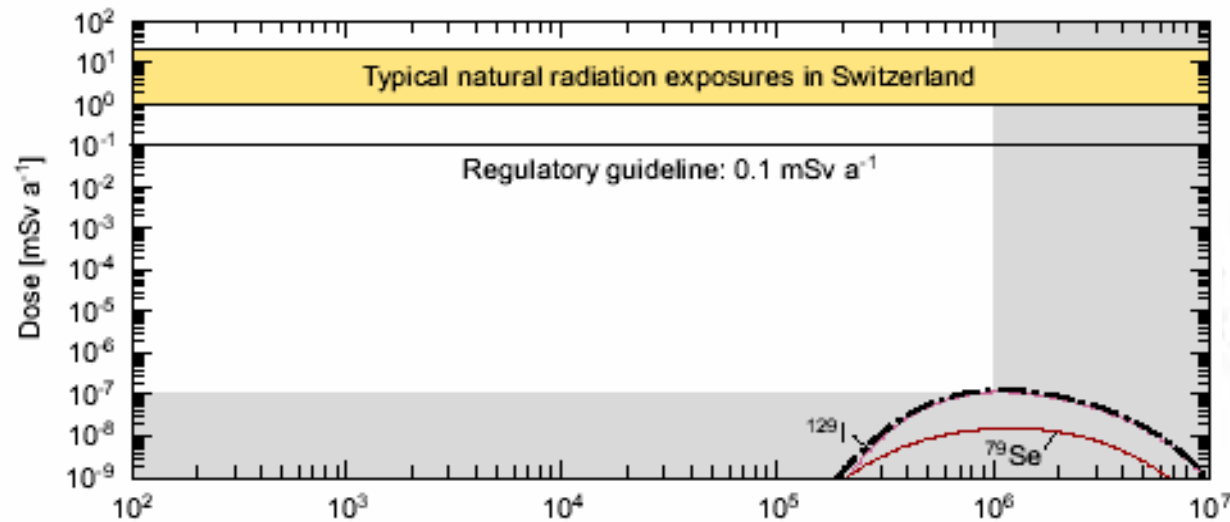
Impact of P&T strategies

-PA-calculations: doses -



**Deterministic analysis
(Reference Case)**

Spent Fuel

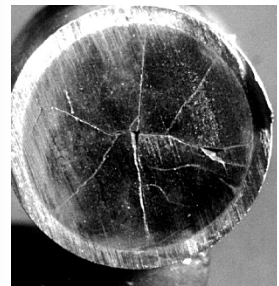


High-Level
Vitrified Waste

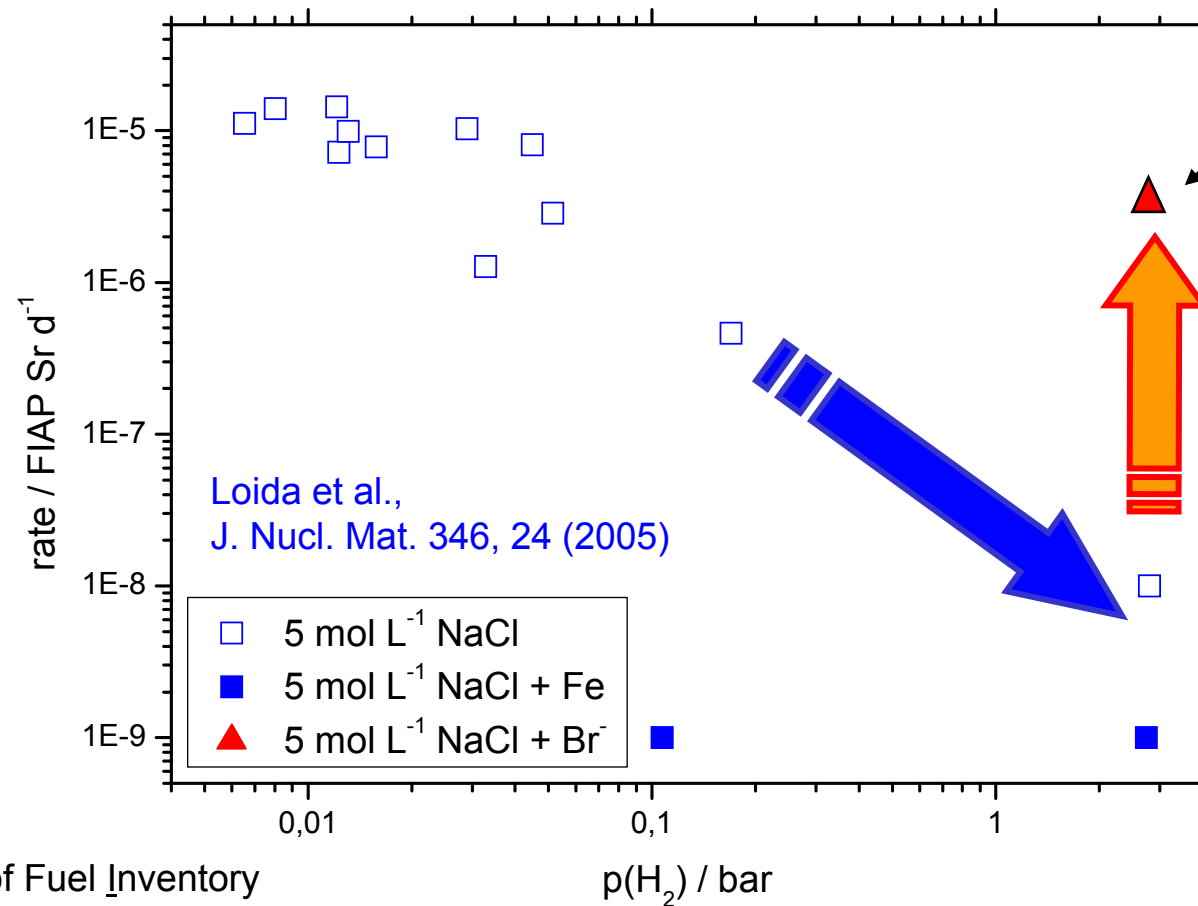
Opalinus Project, NAGRA Report,
2002, NTB 02-05

Thema: Löslichkeit und Auflösung

- Einfluss von Br^- auf die Auflöserate von abgebranntem Kernbrennstoff in Gegenwart von H_2



10 mm



Resultat in einer
 10^{-3} / 10^{-4} M Br^- -Lösung

V. METZ, A. LOIDA et al., Radiochimica Acta, *submitted*

Auswahl und Erkundung des Standortes für das Erkundungsbergwerk Gorleben

Hammer, J., Mingerzahn, G., Behlau, J., Schramm, M. & Fleig, S.
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2,
30655 Hannover (Email:joerg.hammer@bgr.de)

Die Präsentation gibt einen Überblick zum Ablauf und zu den Entscheidungsgrundlagen des Auswahlprozesses des Salzstocks Gorleben als Standort für die Errichtung eines Bergwerkes zur untertägigen Erkundung dieser Salzstruktur zwecks Endlagerung radioaktiver Abfälle. Anschließend werden die Vorgehensweise bei der über- und untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben und der aktuelle Kenntnisstand zu seiner äußeren Form und Genese, zum lithostratigraphischen Aufbau des Salzstocks sowie zu seinem Stoffbestand beschrieben. Auf der Grundlage dieser Informationen erfolgt eine vorläufige Bewertung seiner Eignung zur HAW-Endlagerung.

Im Zeitraum zwischen 1973 und 1977 wurden vom Bund (nach dem Atomgesetz zuständig für die Endlagerung) und vom Land Niedersachsen im Rahmen der Standortsuche für ein Nukleares Entsorgungszentrum (NEZ) Auswahlverfahren für einen Endlagerstandort für radioaktive Abfälle durchgeführt. Diese stützen sich auf Erfahrungen und Ergebnisse mehrerer wissenschaftlich begleiteter, kriteriengestützter Suchverfahren ab Mitte der 60-iger bis Anfang der 70-iger Jahre. Initiiert durch Empfehlungen und Forschungsarbeiten amerikanischer Institutionen sprachen sich bereits 1960 bzw. 1961 die Bundesanstalt für Bodenforschung (heutige BGR) und die Deutsche Atomkommission für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzlagerstätten des tieferen Untergrundes aus (Wager & Richter 1960). Diese Empfehlung basierte auf einer Analyse der Eigenschaften von Salzgesteinen sowie der Salzstockgenese und deren Auswirkungen auf die Salzzusammensetzung, den reichhaltigen Erfahrungen im Salzbergbau und der großen Anzahl von prinzipiell geeigneten Salzstrukturen (Standortalternativen) insbesondere im Norden Deutschlands. Im Mai 1963 legte die Bundesanstalt für Bodenforschung einen Bericht vor, der die besondere Eignung von Salzformationen zur Endlagerung unterstrich und eine erste Bestandsaufnahme des Kenntnisstandes zu den Salzstrukturen Deutschlands enthielt (Martini 1963). Ergänzt wurde der Bericht durch Einzeldarstellungen der Salzstrukturen Asse (bei Wolfenbüttel), Klein Kühren (ca. 75 km SE Hamburg) und Geesthacht (ca. 20 km SE Hamburg).

Auf Erlass des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung (BMwF) vom 12.12.1963 benannte die Bundesanstalt für Bodenforschung mehrere Salzvorkommen, die zur Aussolung von Kavernen zwecks Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet sein sollten (Richter-Bernburg & Hofrichter 1964). Für die Auswahl der Salzvorkommen und für die

vergleichende Bewertung ihrer Eignung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden folgende Kriterien genutzt:

- hinreichende Mächtigkeit (bei einer angenommenen Höhe der Speicherkavernen von 100 m sollte die Salzformation mindestens 400 – 500 m mächtig sein),
- „einigermaßen“ homogen zusammengesetztes, zur Aussohlung geeignetes Steinsalz, möglichst ohne mächtige Einschaltungen von Carnallit- oder Anhydritgestein,
- ausreichende Größe des Salzkörpers (notwendiger Abstand zum Deck- und Nebengebirge),
- Lage der Oberfläche des Salzkörpers zwischen 300 und 800 m unter Flur, damit neben der Sicherheit auch die Wirtschaftlichkeit (z. B. Bohrkosten, Pumpkosten beim Aussolen) gewahrt bleibt,
- Überlagerung des Salzgesteins durch möglichst wenig permeables Deckgebirge zwecks Senkung des Aufwandes zur Einbindung der Verrohrung von Bohrlöchern,
- Möglichkeit zur Entsorgung der bei der Solung anfallenden Salzwässer (naher Vorfluter),
- gute Verkehrslage sowie
- Nachbarschaft zu geplanten Reaktorstandorten.

Detaillierter bewertet wurden 7 Salzstrukturen. Neben den norddeutschen Salzstöcken Heide, Geesthacht, Harsefeld (12 km W Buxtehude), Bunde/Jemgum (Ostfriesland, an der Ems) und Bremen-Lesum wurden auch die flach lagernden Salzvorkommen Krummendeich (Untere Elbe, gegenüber Brunsbüttelkoog) und Leutesheim (80 km SSW Karlsruhe) betrachtet. Zu diesem Zeitpunkt lagen nur geringe Kenntnisse zur äußeren Form und zum inneren Aufbau einzelner Salzstrukturen vor. Da im Rahmen dieser Studie keine zusätzlichen Untersuchungen erfolgten, ist die vorgenommene Auswahl nicht auf eine systematische Bewertungen aller im Untergrund vorkommenden Salzlagerstätten zurückzuführen. Krummendeich und Bunde/Jemgum wurden als besonders geeignet eingestuft, dagegen erhielt Leutesheim aufgrund der erhöhten Erdbebengefährdung des Umfeldes eine negative Einschätzung.

Die Arbeiten zur Erkundung der Standorte wurden 1966 aufgrund von Problemen beim Grundstückskauf und infolge der Ablehnung der Projekte in den betroffenen Regionen gestoppt. Parallel dazu wurden durch den Kauf der Schachtanlage Asse Voraussetzungen für umfangreiche Untersuchungen zur Eignung von Salz als Endlagerwirtsgestein, zur Entwicklung von Einlagerungskonzepten und zur Optimierung der geotechnischen Barrieren geschaffen. Im Ergebnis dieser frühen Untersuchungen und nachfolgender Studien der BGR und des NLFb (z. B. Richter-Bernburg 1966, Hofrichter 1966) wurde deutlich, dass das Gebiet von Niedersachsen aus geologischer und raumordnerischer Sicht am besten als Endlagerregion geeignet ist.

Der Schwerpunkt des 1973 begonnenen Auswahlverfahrens des Bundes für ein NEZ lag auf der Suche nach einem Standort, der einen möglichst umweltschonenden Betrieb der

übertägigen Anlagen zur Wiederaufbereitung und Konditionierung der Abfälle garantieren sollte. Die Endlagerung stellte nur eine zusätzliche Option dar. Diese Besonderheit spiegelte sich in den Standortauswahlkriterien wider, die dem Auswahlverfahren zugrunde gelegt wurden. In den Phasen 1 (Großraumuntersuchungen) und 2 (Regionaluntersuchungen und Standortzwischenbewertungen) des als „KEWA-Studie“ bezeichneten Auswahlverfahrens des Bundes wurden folgende Auswahlkriterien angewendet:

- Ausschluss von Naturschutz-, Erholungs- und Fremdenverkehrsgebieten,
- Flächenbedarf 6 km²,
- Ausschluss von Flugschneisen, Trinkwasserschutz- und Erdbebengebieten,
- dünn besiedelte Gebiete,
- günstige meteorologische Verhältnisse (Abgase aus Wiederaufarbeitung und Konditionierung),
- keine bedeutende Milchwirtschaft,
- günstige Infrastruktur,
- günstige Ingenieur- und Hydrogeologie (Baugrund, Stauhorizonte, Grundwasser),
- Vorhandensein von geologischem Endlagerpotenzial,
- Vorhandensein von Porenspeichern (Speicherung von Tritium-reichen Wässern),
- Abflussrate des nächstgelegenen Flusses (Salzsole-Beseitigung) und
- Entfernung zur Staatsgrenze und zu kerntechnischen Anlagen.

Dabei lag der Schwerpunkt auf raumordnerischen Vorgaben und der Einhaltung von Naturschutzanforderungen. Aufgrund dieser, dem NEZ-Standortauswahlverfahren zugrunde gelegten Standortkriterien, die z. T. in einem Auswahlverfahren für Endlagerstandorte in tiefen geologischen Formationen nur eine untergeordnete Rolle spielen, schied der gesamte Landkreis Lüchow-Dannenberg infolge seiner Zuordnung zu einem Naherholungs- bzw. Feriengebiet bereits in Phase 1 des Auswahlverfahrens aus und wurde in den nachfolgenden geologischen Gutachten nicht betrachtet. Eine Besonderheit des Verfahrens bestand darin, dass erst in Phase 3 des Auswahlverfahrens bei der vergleichenden Analyse von 10 vorausgewählten Standorten detaillierte geologische Informationen aus speziell dafür in Auftrag gegebenen Gutachten (Lüttig & Wager 1974, KBB 1974) einbezogen wurden.

In der KEWA-Studie wurden unter Berücksichtigung der geologischen Gutachten die Standorte Ahlden (Salzstock Lichtenhorst), Börger (Salzstock Wahn) und Fassberg (Salzstock Weesen-Lutterloh) am besten bewertet. Damit wurde unterstrichen, dass Standorte mit Salzstöcken aus geologischer Sicht zu bevorzugen sind. Die 1975 durch den Bund an diesen 3 Standorten begonnenen geologischen Erkundungsarbeiten mittels Oberflächengeoelektrik sowie Flach- und Tiefbohrungen mussten aufgrund von Protesten im August 1976 abgebrochen werden.

Das 1976 durch die Einrichtung einer interministeriellen Arbeitsgruppe begonnene Standortauswahlverfahren Niedersachsens konnte sich bei der Festlegung der Vorgehensweise und der

Auswahlkriterien sowie bei der Bewertung einzelner Standorte auf die Ergebnisse der oben genannten Studien stützen. Im Unterschied zum Auswahlverfahren des Bundes wurde bereits zu Beginn der Standortsuche von einer Endlagerung in einem niedersächsischen Salzstock ausgegangen. Die in Phase 1 des Verfahrens aus der Überprüfung von ca. 140 Salzstöcken (analysiert wurde die Größe des Salzstocks und die Verfügbarkeit einer 3 x 4 km² großen Fläche zur Errichtung des NEZ) hervorgegangenen 23 potenziell geeigneten Salzstöcke wurden unter Einschluss der drei am besten bewerteten Standorte der KEWA-Studie unter Anwendung folgender Kriterien bewertet:

- Lage des 3 x 4 km² großen Standortgeländes im Vergleich zu Salzstockumrissen,
- Größe des Salzstockes (je größer, desto besser),
- Tiefe des Tops des Salzstockes (nicht tiefer als 800 m unterhalb der Geländeoberfläche),
- Bevölkerungsdichte im in Frage kommenden Gebiet des Salzstockes und
- Bestehen konkurrierender Nutzungsansprüche.

Aus den 13 danach noch verbliebenen Standorten wurden die Standorte Wahn, Lichtenhorst, Gorleben und Höfer (Mariagluck) ausgewählt. Der Auswahl lagen die nachfolgend genannten raumordnerischen Empfehlungen der Innenministerkonferenz des Bundes (Standortauswahl Energieanlagen) und der BMI-Bewertungsrichtlinien für Akw-Standorte und Kernenergieanlagen zugrunde:

- radiologische Sicherheit und Strahlenschutz,
- Bevölkerungsdichte und -verteilung,
- Beschaffenheit des Baugrundes,
- Risikobetrachtung bezüglich Erdbeben und Überflutungen,
- Geologie des Endlagerstandortes als entscheidende Kriteriengruppe,
- Tiefenlage des Tops des Salzstocks (möglichst nicht tiefer als 500 m unter Gelände),
- keine Gebiete, in denen Trinkwasserentnahmen stattfinden (oder geplant sind), keine Wasserwerke oder Grundwasservorranggebiete im Abstrom des Standortes,
- optimale Verbindung zu regionalen und überregionalen Verkehrssystemen (Bundesbahn, Autobahn, Wasserstrassen),
- Besiedlung sowie Abbau- und Eigentumsrechte in unmittelbarer Nachbarschaft und
- Wasserversorgung für das Entsorgungszentrum mit Grundwasser und Oberflächenwasser sowie Möglichkeit der Einleitung von Salzlösungen.

Eine Detailbewertung dieser Standorte ergab eine Empfehlung für den Salzstock Gorleben. Diese basierte auf der Größe des Salzstocks (13 x 3 x 2,6 km), der Tiefenlage der Salzstockoberfläche (rund 230 m unter Gelände) und seiner Unverritztheit sowie dem Fehlen einer konkurrierenden Nutzung des Salzstocks. Die übertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben zur Klärung seiner Eignung für die Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen begann 1979 nach der Ausarbeitung und Abstimmung des Erkundungsprogramms

sowie der Einholung der Zustimmung des Kreistages Lüchow-Dannenberg zu den geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten. 1980/1981 wurden vier, etwa 2000 m tiefe Erkundungsbohrungen in die Flanken des Salzstocks niedergebracht, dessen äußere Form durch umfangreiche seismische Erkundungsarbeiten im Zuge von Erdöl/Erdgas-Explorationsarbeiten in den 50-iger Jahren weitgehend bekannt war. Gemeinsam mit den Befunden aus den beiden Schachtvorbohrungen bildeten die geologischen Ergebnisse dieser Bohrungen die Grundlage für die Ausarbeitung einer detaillierten feinstratigraphischen Gliederung der am Salzstock-Aufbau beteiligten Zechstein-Folgen und für die Rekonstruktion des Internbaus der Salzstruktur. Parallel zu diesen Arbeiten erfolgten mittels 44 Salzspiegel- und ca. 470 hydrogeologischen Bohrungen (mit Teufen zwischen 10 und 275 m) detaillierte Untersuchungen des Übergangsbereiches zwischen Salzstockoberfläche und Deckgebirge bzw. der hydrogeologischen Bedingungen in den meso- bis känozoischen Sedimentschichten, die den Salzstock überlagern.

Ergänzend wurden Anfang der 80-iger Jahre umfangreiche reflexions- und refraktionsseismische Studien zur Präzisierung der Vorstellungen zur äußeren Form des Salzstocks und zum geologischen Aufbau des Deck- und Nebengebirges durchgeführt. Tiefenseismische Sondierungen in zahlreichen Erkundungsbohrungen ermöglichten eine detaillierte Auswertung der auf 16 Profilen mit einer Gesamtlänge von ca. 150 km realisierten seismischen Profilmessungen. Zum heutigen Zeitpunkt liegen dadurch genaue Vorstellungen zur Form und räumlichen Lage des Salzstocks (es handelt sich um einen, sich in SW-NE-Richtung erstreckenden ovalen Salzstock mit einem Überhang auf der SE-Seite) sowie zum strukturellen Aufbau seiner Umgebung vor.

Die auf diesen Daten basierenden geologischen Modellvorstellungen und die auf der Grundlage der positiv bewerteten Erkundungsergebnisse vorgenommenen vorläufigen Aussagen zur Eignung des Salzstocks für die Endlagerung radioaktiver Abfälle führten 1985 zur Entscheidung, die Erkundung der Salzstruktur unter Tage fortzusetzen. 1986 begann das Abteufen der beiden Schächte, der Schachtinnenausbau wurde 1994 abgeschlossen. Danach wurden die ca. 400 m voneinander entfernten Schächte untertage verbunden, der Infrastrukturbereich aufgefahren und die Erkundung des ersten Einlagerungsbereiches auf der 840 m-Erkundungssohle vorangetrieben. Bis zum Gorleben-Moratorium im Oktober 2000 wurden etwa 7 km Strecken bzw. Querschläge aufgefahren, detailliert geologisch kartiert und dokumentiert sowie ca. 11 km Bohrungen untertage gestoßen.

Ziel der untertägigen geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten ist es, präzise Angaben zur Lage und Größe von Steinsalzbereichen der Staßfurt-Folge, die nach derzeitigem Kenntnisstand zur Endlagerung radioaktiver Abfälle am besten geeignet sind, zu liefern. Außerdem müssen im Ergebnis der Arbeiten alle für die Durchführung eines standortbezogenen Langzeitsicherheitsnachweises benötigten geologisch-geotechnischen Standortdaten zur Verfügung stehen. Dies gilt insbesondere für den Nachweis fehlender

Lösungspfade, um Grundwasserzutritte in den Einlagerungsbereich sowie das Austreten von belasteten Wässern aus dem Endlagerbereich in der Betriebs- und Nachbetriebsphase auszuschließen. Zudem muss die Standsicherheit des geplanten Endlagerbergwerkes bei Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle gewährleistet sein. Zur Klärung dieser Fragestellungen und Lieferung der für den Langzeitsicherheitsnachweis erforderlichen Daten wurden umfangreiche geologische Kartierungsarbeiten in den Auffahrungen bzw. unter-Tage-Bohrungen und detaillierte strukturgeologische Auswertungen der Erkundungsdaten durchgeführt. Auf der Grundlage aller Untersuchungsergebnisse wurde ein detailgetreues, koordinatentreues geologisches 3D-Modell zum Internbau des Salzstocks erstellt, das für vorläufige Aussagen bezüglich der Eignung des Salzstocks für die HAW-Endlagerung sowie zur Auswertung neuer Erkundungsdaten und zur Planung weiterführender Erkundungsarbeiten dient. Neben den geologischen Untersuchungsverfahren kamen umfangreiche mineralogisch-geochemische Analysen (Mineralbestand, petrographische Untersuchungen, Bromid-Verteilung) und geophysikalische Messungen (Georadar) in den Auffahrungen und in den Bohrungen zum Einsatz.

Die bisher durchgeführten Erkundungsarbeiten ergaben, dass der Zentralteil des Salzstocks im Wesentlichen aus Steinsalzschiefern der Staßfurt-Folge (z2) zusammengesetzt ist, die einen Hauptsalzsattel bilden und durch den Salzaufstieg homogenisiert wurden sowie weitgehend lösungsfrei sind. Die nördlichen und südlichen Flanken dieses Sattels bestehen aus Gesteinen der Leine- und Aller-Folge (z3 und z4). Im Bereich des Salzstocküberhangs werden wieder Schichten der Staßfurt-Folge (z2) angetroffen. Die Ausdehnung des für die HAW-Einlagerung geeigneten Staßfurt-Hauptsalzes (z2HS) ist im Erkundungsbereich 1 (EB 1) nach den Ergebnissen der untertägigen Erkundung im Vergleich zu den Daten aus der übertägigen Standortuntersuchung größer. Nach den bisherigen geologischen Modellvorstellungen und geophysikalischen Nahfelderkundungen setzt sich der Bereich des ungestörten Hauptsalzes nach Osten (geplante Richtung für weitere Einlagerungsbereiche) und in die Tiefe fort.

Wie prognostiziert, wurden im vorgesehenen Einlagerungsbereich des Staßfurt-Steinsalzes keine nennenswerten Lösungs-, Gas- und Kondensateinschlüsse angetroffen. Die im Erkundungsbergwerk und in den Bohrungen festgestellten Lösungs- und Gasvorkommen sind volumenmäßig stark begrenzt und mehrheitlich an anhydrithaltige Gesteinsschichten der Leine-Folge (Hauptanhydrit, Gorleben-Bank, Anhydritmittelsalz) gebunden, in denen keine Abfälle eingelagert werden und die zu den Einlagerungsbereichen entsprechend große Sicherheitspfeiler aufweisen. Durch Bohrungen und Radar-Messungen wurde nachgewiesen, dass, wie im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes, auch an der Nordflanke des für die HAW-Einlagerung vorgesehenen Hauptsalzsattels (z2) aufgrund des Salzaufstiegs nur einzelne isolierte z3-Hauptanhydrit-Schollen existieren. Durch die bei der Salzbewegung erfolgte Hauptanhydrit-Zerblockung (Boudinage) bestehen über diesen keinerlei hydraulische Verbindungen bzw. Fließpfade zwischen den Gesteinen im geplanten Einlagerungsniveau und den Grundwasserleitern im Deckgebirge.

Die Wassergehalte des für die HAW-Endlagerung vorgesehenen Staßfurt-Hauptsalzes liegen aufgrund des Abpressens der ursprünglich in den Salzgesteinen vorhandenen Lösungsvorkommen während des Salzaufstiegs im Mittel bei unter 0,014 %. In Bohrungen durchgeführte Permeabilitätsmessungen bestätigen die bisherige Annahme eines dichten Gebirges und damit die intakte Barrierefunktion des Salzes. Die im Staßfurt-Steinsalz im Bereich des EB 1 nachgewiesenen hohen Konvergenzen lassen einen relativ schnellen und dichten Einschluss der Abfälle durch das Hauptsalz erwarten. Die strukturgeologischen Standortuntersuchungen ermöglichten eine Abschätzung der Salzaufstiegsgeschwindigkeiten. Durch abnehmende Restsalzmächtigkeiten in den Randsenken des Salzstocks verringerte sich die Aufstiegsgeschwindigkeit seit etwa 25 Mio. Jahren deutlich und beträgt für die letzten ca. 25 000 Jahre der Erdgeschichte im Mittel 0,017 mm/a.

Die 3D-Modell-gestützte komplexe Interpretation der Erkundungsergebnisse liefert zuverlässige quantitative Angaben über die für die Endlagerung nutzbaren Flächen bzw. Volumina sowie belastbare Daten zur Verbreitung von nicht für die Endlagerung geeigneten Salzschieben (z. B. Kaliflöz Staßfurt, Hauptanhydrit). Dies ermöglicht eine bessere Einhaltung von Sicherheitsabständen bei der Planung der weiteren Auffahrungen bzw. Bohrungen. Nach den bisherigen Erkenntnissen ist von einer ca. 600 m mächtigen dichten Salzbarriere in Richtung zum Deckgebirge auszugehen.

Die Erkundungsarbeiten mussten im Oktober 2000 eingestellt werden. Aus diesem Grund ist eine abschließende Aussage zur Eignung des Salzstocks zur Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle noch nicht möglich. Aus geowissenschaftlicher Sicht liegen bisher keine Erkenntnisse vor, die gegen eine langzeitsicherheitliche Eignung des Salzstocks sprechen.

Literaturzitate:

Hofrichter, E. (1966): Bericht zur Tagung „Endbeseitigung und Tieflagerung radioaktiver Rückstände“, 15.03.1966, Essen, unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung, 7 S., Archiv-Nr. 0023224

KBB (1974): Geologisch-topographische Vorstudie zur Standortvorauswahl für ein Speicherprojekt der KEWA - Zusammenstellung und Bewertung geologischer und topographischer Daten von Salzstöcken in Norddeutschland für den Bau von Kavernen. Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft mbH, Hannover, 44 S., 1 Anl.

Lüttig, G. & Wager, R. (1974): Feasibility-Studie über präsumtive Standorte einer Wiederaufbereitungsanlage für Kernbrennstoffe. unveröff. Studie, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLFb, Hannover, 40 S., 18 Anl.

Martini, H.J. (1963): Möglichkeiten der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung im Auftrag des BMwF, 15.05.1963, 24 S., 6 Einzeldarstellungen, 4 Anl., Archiv-Nr. 0023217

Richter-Bernburg, G. (1966): Vermerk zur Frage der unterirdischen Einlagerungsmöglichkeiten von Energieträgern oder Abfallstoffen im Bereich der unteren Weser. unveröff. Bericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLFb, Hannover, 2 S., 1 Anl., Archiv-Nr. 0010407

Richter-Bernburg, G. & Hofrichter, E. (1964): Projekte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in ausgesolten Kavernen. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover, 14 S., 7 Einzeldarstellungen, 12 Anl., Archiv-Nr. 0023216

Wager, R. & Richter, W. (1960): Disposal of radioactive waste in the Federal Republic of Germany. Geological and hydrogeological problems. In: Proceedings of the Scientific Conference on the disposal of radioactive wastes sponsored by the IAEA and the UN Educational, Scientific and Cultural Organisation with the cooperation of the Food and Agricultural Organisation of the UN. Monaco, Oceanographic Museum, 16.-21.12.1959, Wien (1960), S. 368-384

Auswahl und Erkundung des Standortes für das Erkundungsbergwerk Gorleben

**Jörg Hammer, Gerhard Mingerzahn, Joachim
Behlau, Michael Schramm, Stephanie Fleig**

joerg.hammer@bgr.de

Tel.: 0511-643-2449

Kritik an Standortauswahl Gorleben

- der Standort Gorleben war nicht erste Wahl – andere, günstiger eingeschätzte Standorte wurden Anfang der 70-iger Jahre nicht wegen ihrer Ungeeignetheit, sondern aufgrund von Bürgerprotesten nicht weiter verfolgt
- es gab keine Kriterien für die Festlegung des Standortes Gorleben
- die Kriterien wurden nach der Standortfestlegung “verabredet”
- die Sicherheitsanforderungen an ein Endlager sind erst in dieser Legislaturperiode verabredet worden (Bundesumweltminister Gabriel, 02.11.2007, Lüchow)
- die Auswahl des Standortes Gorleben war eine politische Entscheidung.

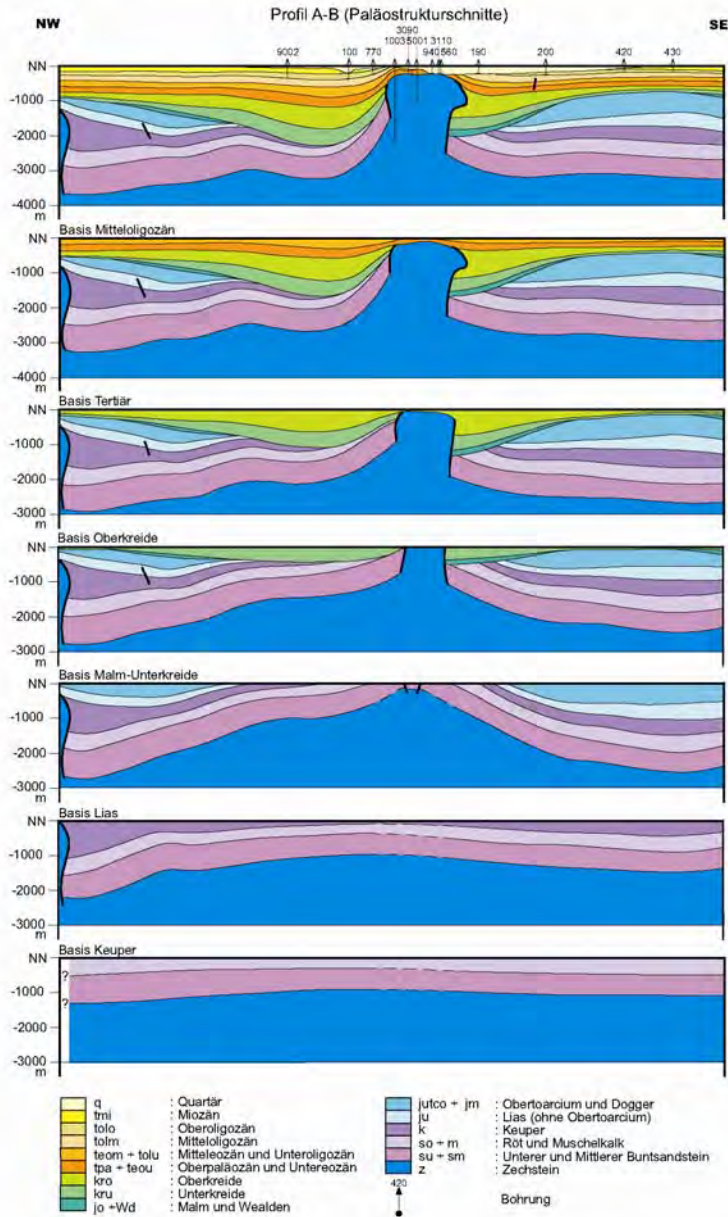
Standortauswahl Gorleben

Chronologie der Standortauswahl (1)

- 1955: Genfer UN-Konferenz zur friedlichen Nutzung der Kernenergie – Vorschlag zur Nutzung von Salzformationen zur Endlagerung (Theis 1956)
- 1957: Amerikanische Akademie der Wissenschaften – Salzformationen besonders für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet; Start umfangreicher Forschungsprogramme
- 1959 – Bundesanstalt für Bodenforschung Hannover empfiehlt die Einlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen (Wager & Richter 1960)

Gründe für Empfehlung von Salz als Endlager-Wirtsgestein (1)

- sehr geringe Wassergehalte im Salz, insbesondere im Zentralbereich von Salzstöcken
- Homogenität des Zentralbereiches von Salzstöcken durch Salzaufstieg (gute Prognostizierbarkeit)
- plastisches Verhalten und Kriechen von Steinsalz gewährleisten Verheilen von Klüften und dichten Abschluss der Abfälle (kein Wasserzutritt von außen)
- bis in das 19. Jhd. zurückreichende Erfahrungen in Salz-Erkundung und -Bergbau
- hohe Standsicherheit untertägiger Hohlräume (ohne speziellen Ausbau)
- hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes (kein Wärmestau, geringerer Volumenbedarf für Endlager-Bergwerk)



Entwicklungsschema der Salzstruktur Gorleben

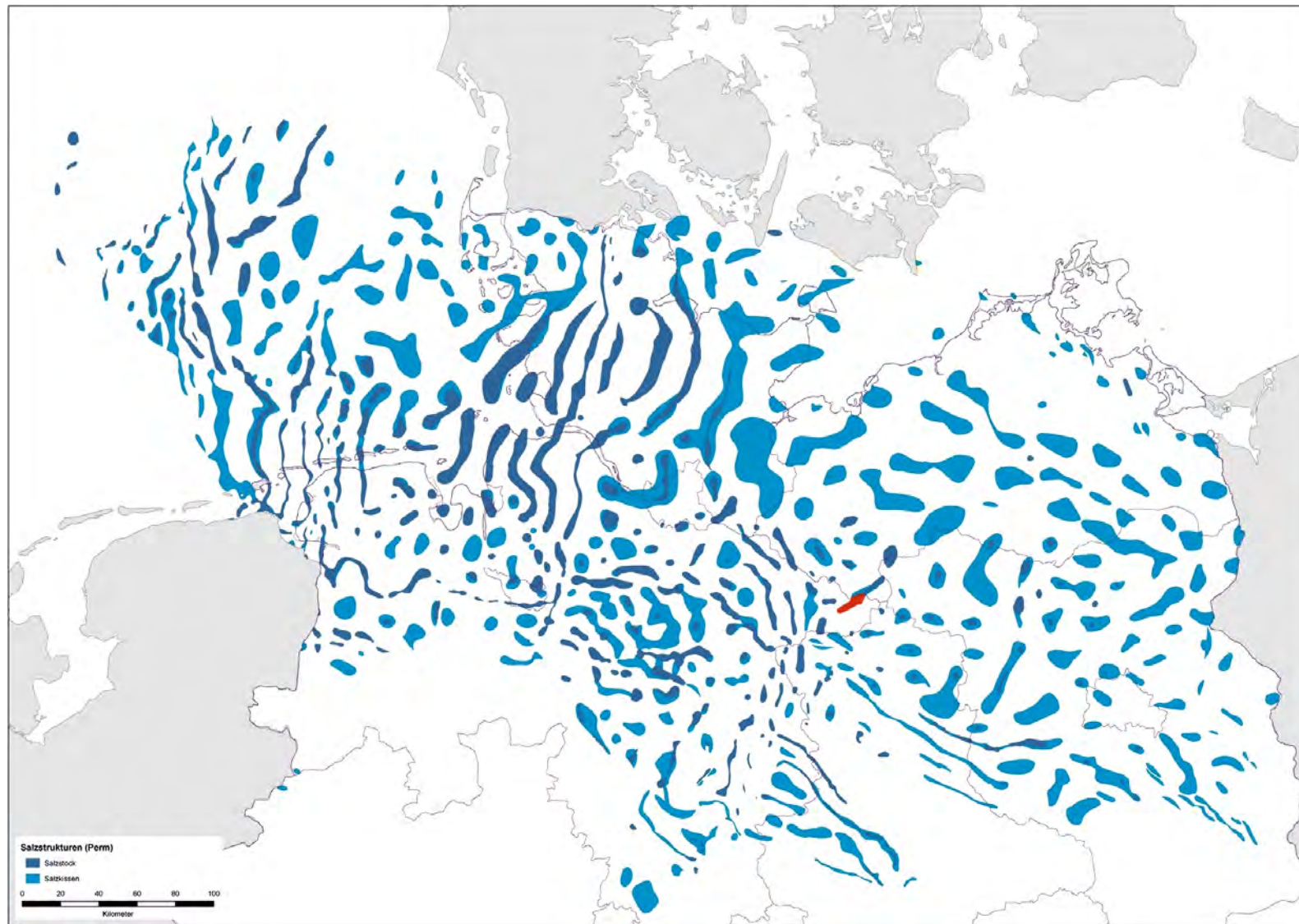
Gründe für Empfehlung von Salz als Endlager-Wirtsgestein (1)

- sehr geringe Wassergehalte im Salz, insbesondere im Zentralbereich von Salzstöcken
- Homogenität des Zentralbereiches von Salzstöcken durch Salzaufstieg (gute Prognostizierbarkeit)
- plastisches Verhalten und Kriechen von Steinsalz gewährleisten Verheilen von Klüften und dichten Abschluss der Abfälle (kein Wasserzutritt von außen)
- bis in das 19. Jhd. zurückreichende Erfahrungen in Salz-Erkundung und -Bergbau
- hohe Standsicherheit untertägiger Hohlräume (ohne speziellen Ausbau)
- hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes (kein Wärmestau, geringerer Volumenbedarf für Endlager-Bergwerk)

Gründe für Empfehlung von Salz als Endlager-Wirtsgestein (2)

- **Vorhandensein vieler Salzstöcke (viele Standortalternativen bei der Standortauswahl)**
- Ergebnisse umfangreicher in-situ- und Laborexperimente zur Endlagerung im Salz
- hohe Beständigkeit der Salzlagerstätten im Erdinnern (ca. 250 Mio. a alt) – alle im Erkundungsbergwerk Gorleben angetroffenen Lösungen stammen aus dem Salz, kein Grundwasserzufluss von außen; Absaufen von Salzbergwerken hat bergmännische Gründe oder Nichtbeachtung geologischer Rahmenbedingungen als Ursache; Bsp.: Staßfurt)
- Endlagerung im Ton und Kristallingestein ist problembeladen: Störungszonen, sehr hoher Erkundungsaufwand, hohe Anforderungen an geotechnische Barrieren, Ton – geringe Standfestigkeit, Ausbau erforderlich, z. T. hohe Klüftigkeit und Heterogenität,...)

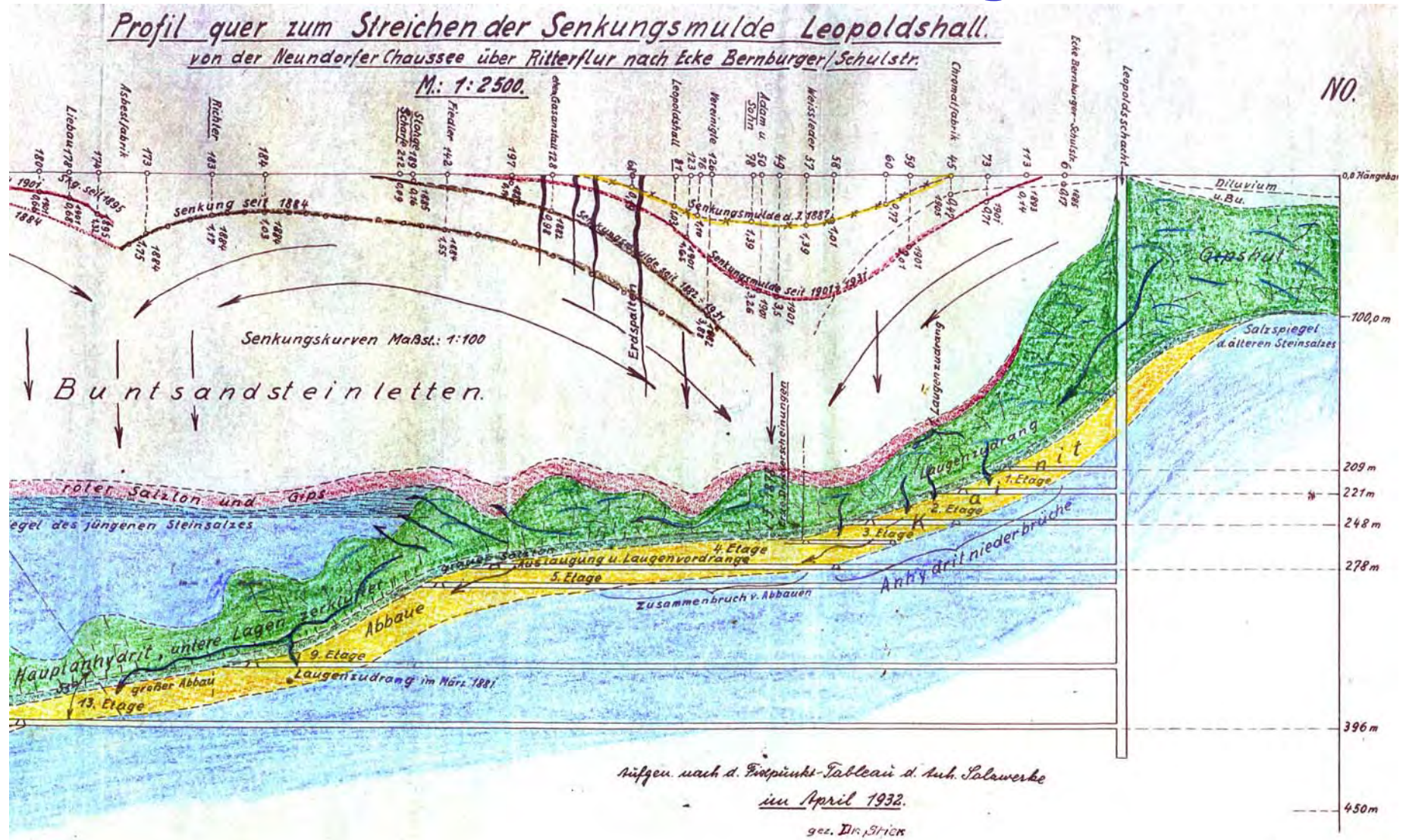
Salzstrukturen in Norddeutschland



Gründe für Empfehlung von Salz als Endlager-Wirtsgestein (2)

- Vorhandensein vieler Salzstöcke (viele Standortalternativen bei der Standortauswahl)
- Ergebnisse umfangreicher in-situ- und Laborexperimente zur Endlagerung im Salz
- Endlagerung im Ton und Kristallingestein ist problembeladen: Störungszonen, sehr hoher Erkundungsaufwand, hohe Anforderungen an geotechnische Barrieren, Ton – geringe Standfestigkeit, Ausbau erforderlich, z. T. hohe Klüftigkeit und Heterogenität,..)
- hohe Beständigkeit der Salzlagerstätten im Erdinnern (ca. 250 Mio. a alt) – alle im Erkundungsbergwerk Gorleben angetroffenen Lösungen stammen aus dem Salz, kein Grundwasserzufluss von außen; Absaufen von Salzbergwerken hat bergmännische Gründe oder Nichtbeachtung geologischer Rahmenbedingungen als Ursache; Bsp.: Staßfurt)

Absaufen von Salzbergwerken



Standortauswahl Gorleben

Chronologie der Standortauswahl (2)

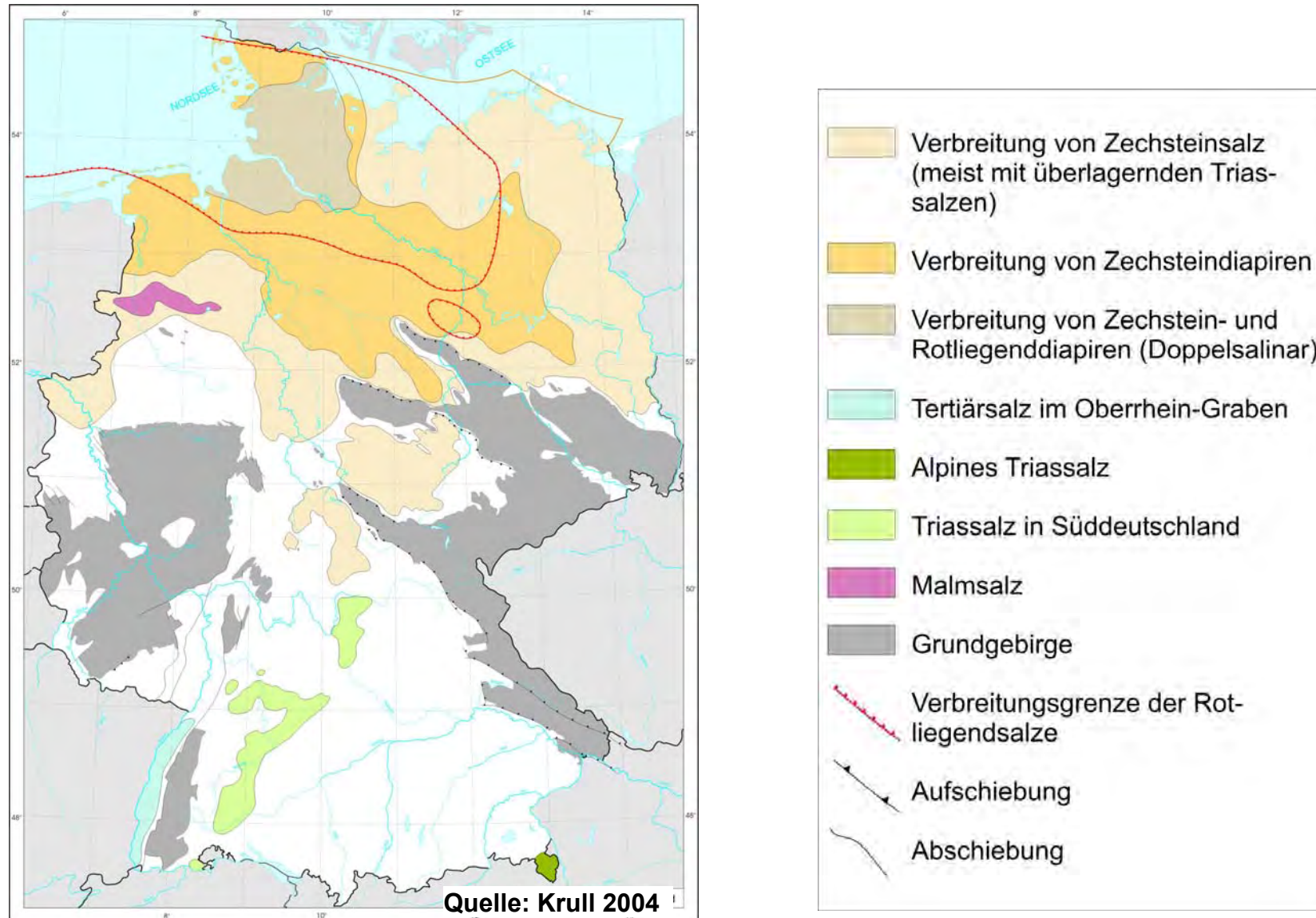
- 1961 – Deutsche Atomkommission legt fest, dass Endlagerung untertägig erfolgen soll und empfiehlt dafür Salzlagerstätten, beschließt Bau einer Prototypkaverne und vergibt umfangreiche Forschungsaufträge
- 1963 – Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung beauftragt die Bundesanstalt für Bodenforschung mit der Ausweisung von Salzvorkommen, die zur Aussolung von Kavernen zwecks Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet sind
- 1964 – Studie der Bundesanstalt für Bodenforschung zu geeigneten Salzvorkommen (Richter-Bernburg & Hofrichter 1964)

Standortauswahl-Kriterien

Richter-Bernburg & Hofrichter (1964)

- 400 – 500 m Mächtigkeit der Salzformation
- „einigermaßen“ homogenes Steinsalz (ohne mächtige Einschaltungen von Carnallit oder Anhydrit)
- ausreichende Größe (horizontale Erstreckung)
- Oberfläche des Salzkörpers 300 bis 800 m unter Flur
- wenig permeables Deckgebirge (bessere Einbindung der Verrohrung)
- naher Vorfluter (Entsorgung Salzsole)
- gute Verkehrsanbindung
- Nachbarschaft zu geplanten Reaktorstandorten.

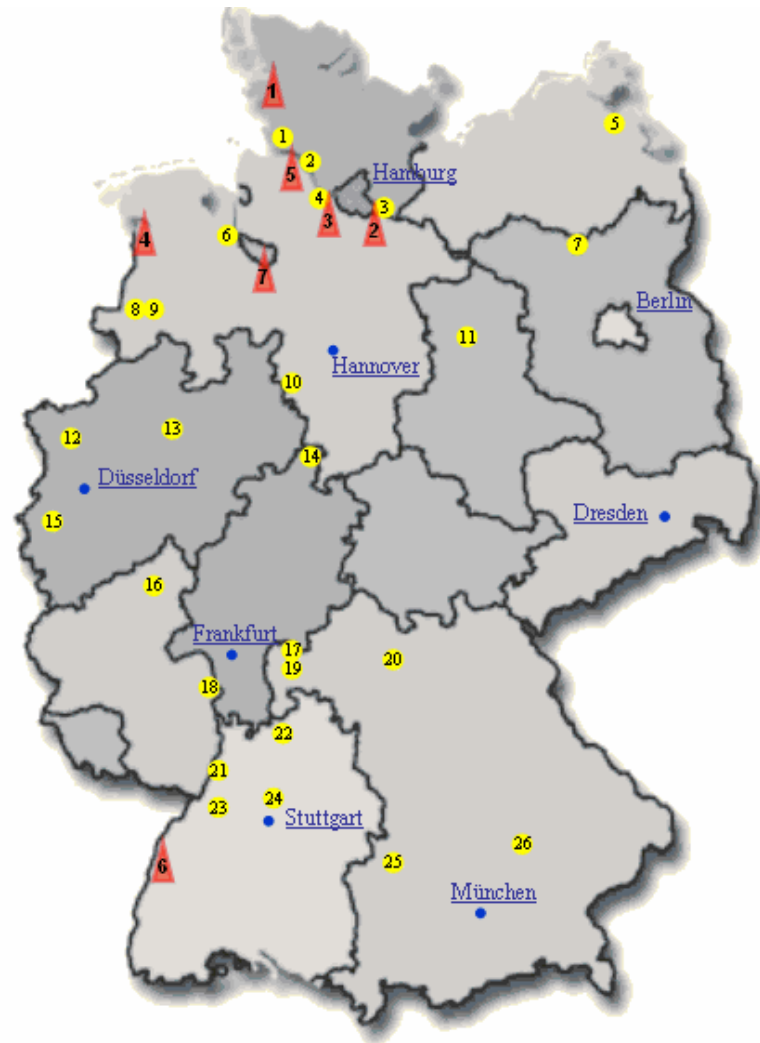
Verbreitung von Salzformationen in Deutschland



Standortauswahl-Ergebnisse

Richter-Bernburg & Hofrichter (1964)

- **detaillierte Bewertung von 7 Salzstrukturen**
- **keine systematische Analyse aller im Untergrund vorkommenden Salzlagerstätten**
- **besonders geeignet: Krummendeich und Bunde/Jemgum**
 1. Projekt Heide
 2. Projekt Geesthacht
 3. Projekt Harsefeld
 4. Projekt Bunde-Jemgum
 5. Projekt Krummendeich
 6. Projekt Leutesheim
 7. Projekt Bremen-Lesum



Standortauswahl Gorleben

Chronologie der Standortauswahl (3)

- 1965 – Kauf der Asse (bei Wolfenbüttel) als Forschungsbergwerk, u.a. zur Errichtung einer Prototypkaverne
- 1966 – endgültige Aufgabe des Standortes Bunde/Jemgum
- 1967 – Start des Versuchsprogramms zur Einlagerung schwach radioaktiver Abfälle in die Asse
- Ende der 60-iger/Anfang der 70-iger Jahre – mehrere Gutachten der BGR und des NLFB - Niedersachsen aus geologischer und raumordnerischer Sicht am besten als Endlagerstandort geeignet

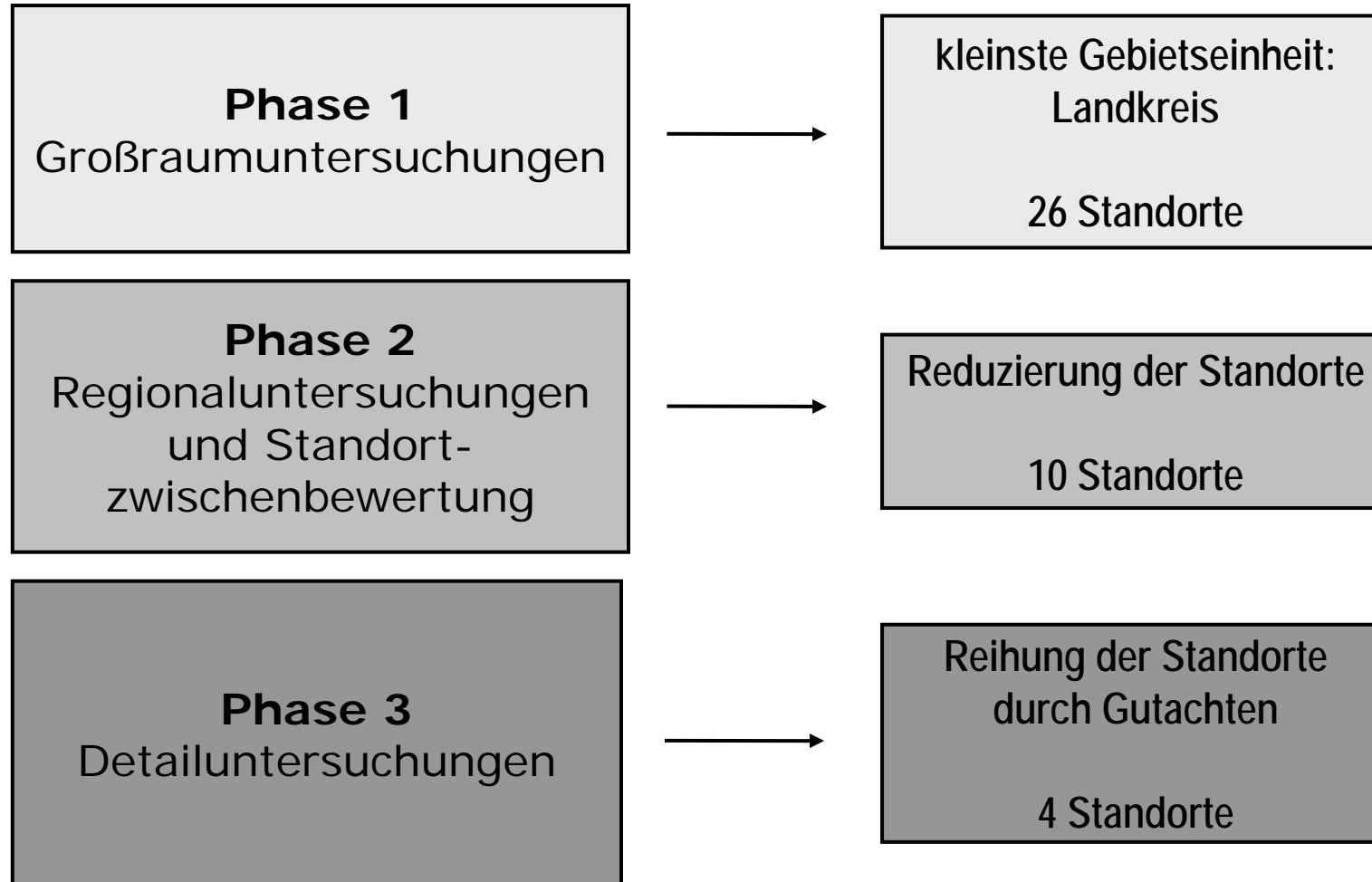
Standortauswahl Gorleben

Chronologie der Standortauswahl (4)

- 1973 – Start des Standortauswahlverfahrens des Bundes für ein „**Nukleares Entsorgungszentrum**“ (Wiederaufarbeitung, Konditionierung und Endlagerung)
- 1973 – Auftragsvergabe durch BMFT an „Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungs-Gesellschaft (KEWA)“; Schwerpunkt: möglichst umweltschonender Betrieb der (übertägigen) Wiederaufbereitungs- und Konditionierungsanlagen; Endlager – zusätzliche Option, d. h. auch Berücksichtigung von Standorten ohne Endlagerpotenzial
- Winter 1973/74 – Zusage des niedersächsischen Ministerpräsidenten (Kubel, SPD) für „Integriertes Nukleares Entsorgungszentrum“ in Niedersachsen

KEWA-Auswahlverfahren

Stadien der **NEZ**-Standortauswahl



KEWA-Auswahlverfahren

Auswahlkriterien Phasen 1 und 2

- Dominanz raumordnerischer Auswahlkriterien
- **Auswahlkriterien:**
 - Ausschluss von Naturschutz-, Erholungs- und Fremdenverkehrsgebieten
 - Flächenbedarf 6 km²
 - Ausschluss von Flugschneisen, Trinkwasserschutz- und Erdbebengebieten
 - dünn besiedelte Gebiete
 - günstige meteorologische Verhältnisse (Abgase aus Wiederaufarbeitung und Konditionierung)
 - keine bedeutende Milchwirtschaft
 - günstige Infrastruktur
 - günstige Ingenieur- und Hydrogeologie (Baugrund, Stauhorizonte, Grundwasser)
 - Vorhandensein von geologischem Endlagerpotenzial
 - Vorhandensein von Porenspeichern (Speicherung von Tritium-reichen Wässern)
 - Abflussrate des nächstgelegenen Flusses (Salzsole-Beseitigung)
 - Entfernung zur Staatsgrenze und zu kerntechnischen Anlagen
- größter Teil der Auswahlkriterien gilt für NEZ, nicht für Endlager in tiefen geologischen Formationen

KEWA-Auswahlverfahren

Ergebnisse Phasen 1 und 2

- Reduzierung der Anzahl der Standorte von 26 auf 10
- Mehrheit der Standorte in Nähe von Salzlagerstätten
- einige Standorte aus geologischer oder raumordnerischer Sicht ungeeignet (Friedrichskoog – Ferienzentrum, WAK Karlsruhe und Mahlberg – Erdbebengefahr im Bereich Oberrheintalgraben, Oberwesel – nur klastische Sedimente, Lüttau – zu tief gelegener Salzstock)
- Ausschluss Salzstock Gorleben – aufgrund von raumordnerischen Kriterien, die für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen nicht relevant sind

KEWA-Auswahlverfahren

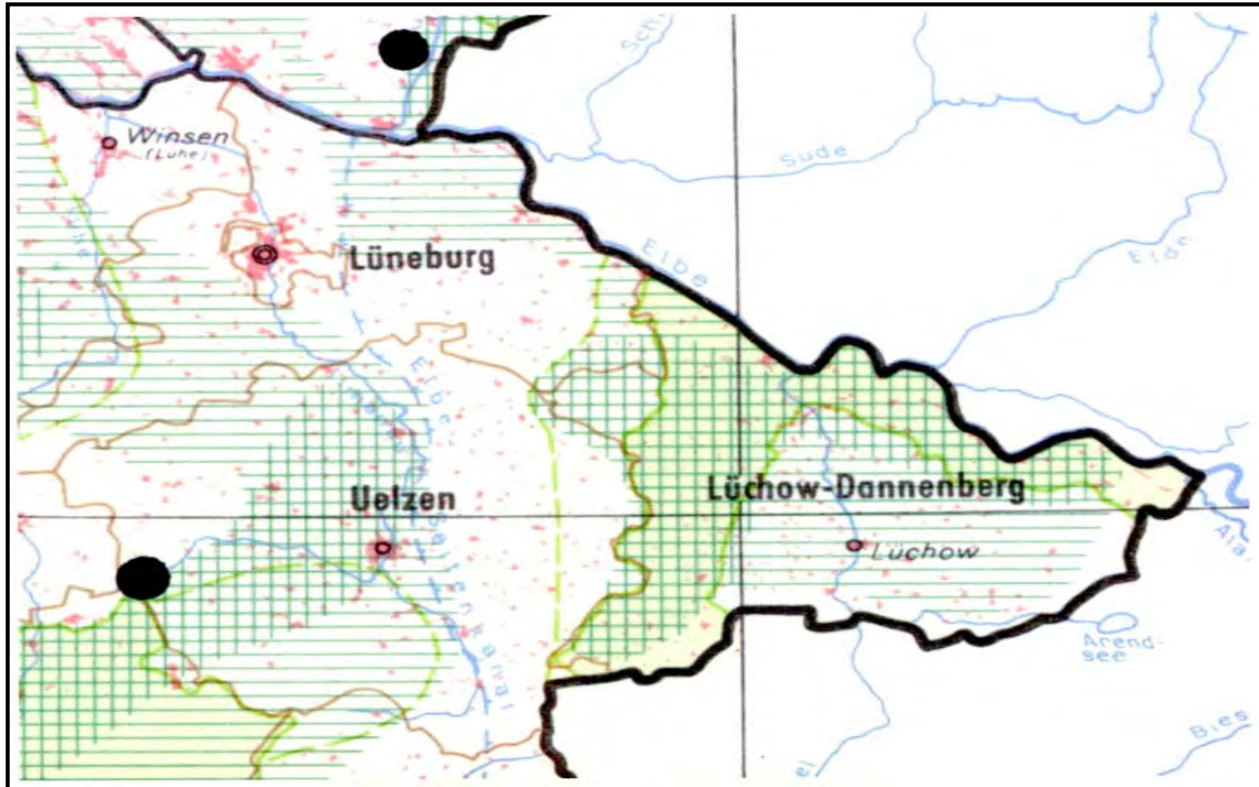
Ergebnisse Phase

- 1 **Ahlden (Salzstock Lichtenhorst**, Niedersachsen)
- 2 **Börger (Salzstock Wahn**, Niedersachsen)
- 3 **Faßberg (Salzstock Weesen-Lutterloh**, Niedersachsen)
- 4 Friedrichskoog (Küstenstandort, Schleswig-Holstein)
- 5 WAK Karlsruhe
- 6 Lüttau (Salzstock Juliusburg, Ostholstein, grenznal zu DDR)
- 7 Uchte (dünne Besiedlung, nahe Loccum, Niedersachsen)
- 8 Mahlberg (tertiäre Kalilagerstätten im Oberrheinischen Graben)
- 9 Sohlhöhe (im Spessart, Natur- und Erholungsgebiet)
- 10 Oberwesel (Südwestliches Rheinisches Schiefergebirge)



KEWA-Auswahlverfahren

Ausschluss Gorleben in Phase 1



Ausschluss-
kriterium:
raumordnerische
Gründe

- Kurzerholungsgebiete
(Naherholung einschl. Wochenenderholung)
- Ferienerholungsgebiete
- Bestehende Naturparke

KEWA-Auswahlverfahren

Gutachten Lüttig & Wager (1974), Phase 3

- Beauftragung durch KEWA - Gorleben taucht in Gutachten der Phase 3 nicht mehr auf
- Bewertung der 8, nach Phase 2 verbliebenen Standorte, keine Bewertung aller in Frage kommenden Salzstrukturen
- **Kriterien:**
 - Hydrologie (Nähe zu Vorfluter)
 - Hydrogeologie (Grundwasserentnahme ca. 6 Mio. m³/a)
 - Erdbebengefährdung
 - Baugrundbeschaffenheit
 - Geologie (Stauhorizonte)
 - Möglichkeit zur Anlage von Salzkavernen
 - Vorhandensein von Porenspeichern
- günstigste Standorte: Ahlden (Salzstock Lichtenhorst), Börger (Salzstock Wahn), Faßberg (Salzstock Weesen-Lutterloh)
- Fazit: weitere Standortuntersuchungen erforderlich

KEWA-Auswahlverfahren

Gutachten KBB (1974), Phase 3

- Beauftragung durch KEWA
- Bewertung von 6 Gebieten Norddeutschlands unter Einschluss der 3 Standorte aus Lüttig & Wager (1974), Detailbewertung von insgesamt 17 Salzstöcken
- **Bewertungskriterien:**
 - Größe bzw. Längen- und Breitenerstreckung des Salzstockes
 - Tiefenlage der Salzstockoberkante
 - Informationen zur Zusammensetzung und zum Bau der Salzformationen aus Bohrungen und Geophysik
 - Deckgebirgsaufbau
 - Nutzung des Salzstockes
 - Lage zum Wasser (Entnahme und Soleableitung)
 - Topographie und Besiedlung.
- zahlreiche Einschränkungen bei Standortauswahl (konkurrierende Nutzung, Solebeseitigung, Tiefe, ...)
- gute Grundlage für Standortauswahlverfahren des Landes

Beispiel für fehlende Eignung eines Salzstocks

- Fläche in 1000 m Tiefe – 11 km² (Gorleben ca. 45 km²)
- äußere Form/innerer Bau – kreisrunde Form lässt äußerst komplizierten Internbau erwarten, keine hinreichend großen z2-Einlagerungsflächen
- Entwicklungsstadium des Salzstocks, Restmächtigkeiten in Randsenken, Aufstiegs geschwindigkeiten – starker Aufstieg, da Übergang von Salzkissen zu Salzstock
- Konkurrierende Nutzung - Kavernenbau

KEWA-Auswahlverfahren

Standortuntersuchungen

- 1975 stellt BMFT 8 Mio. Mark für detaillierte Untersuchungen der Salzstöcke Wahn, Lichtenhorst und Weesen-Lutterloh zur Verfügung
- 1975/1976 – Standortuntersuchungen mittels Flachbohrungen, Geoelektrik, 1 Tiefbohrung („Lutterloh 1001“ bis in Tiefe von 1531 m)
- 10.08.76 – Einstellung der Arbeiten auf Weisung des BMFT (Kosten: ca. 4,48 Mio. Mark)
- KEWA-Bericht (1977) – durch Entscheidung, keine Wiederaufarbeitungsanlage am Endlagerstandort zu errichten, sind Teil der angewendeten Auswahlkriterien nicht mehr aktuell
- KEWA-Bericht (1977) – die ursprünglich gewählten Standorte sind nach wie vor als sehr günstig anzusehen, aber aus dem Auswahlverfahren wurden perspektivische Standorte allein aus raumordnerischen Gründen ausgeschlossen (z. B. Gorleben)

Standortauswahl Gorleben

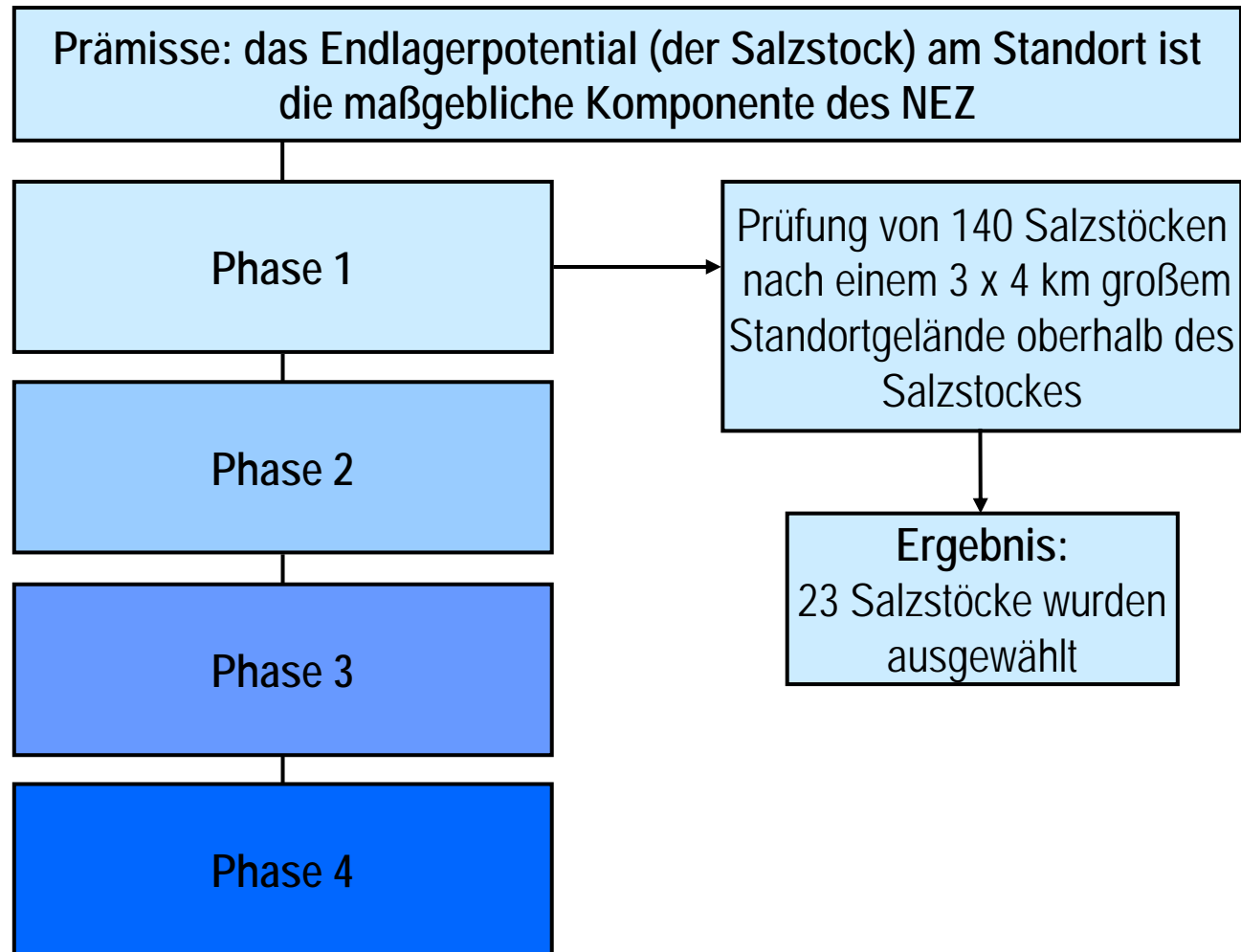
Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen

- 1976 – Einrichtung einer interministeriellen Arbeitsgruppe (Vertreter der Ministerien für Wirtschaft, Soziales, Inneres und Landwirtschaft plus Staatskanzlei plus Vertreter Fachbehörden)

- Ausgangssituation:
 - Endlagerung erfolgt in einem Salzstock
 - Endlagerstandort bestimmt NEZ-Standort
 - Veränderungen in Auswahlkriterien und ihrer Wichtung
 - umfangreiche Erfahrungen aus Auswahlverfahren des Bundes
 - umfangreichere Kenntnisse zu Salzstrukturen

Standortauswahl Gorleben

Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen – Phase 1



Standortauswahl Gorleben

Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen – Phase 2

- Reduzierung der 23 Standorte (Phase 1) auf 13 Standorte
- Standorte aus KEWA-Studie (Auswahlverfahren des Bundes) wurden in das Auswahlverfahren des Landes mit einbezogen
- **Auswahlkriterien:**
 - Lage des 3 x 4 Kilometer großen Standortgeländes im Vergleich zu den Salzstockumrissen
 - Größe des Salzstockes (je größer, desto besser)
 - Tiefe des Salzstockes (nicht tiefer als 800 m unterhalb der Geländeoberfläche)
 - Bevölkerungsdichte im in Frage kommenden Gebiet des Salzstockes
 - Bestehen konkurrierender Nutzungsansprüche (Gerichtsbarkeit/Zuständigkeit und Nutzungsrechte)

Standortauswahl Gorleben

Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen – Phase 3

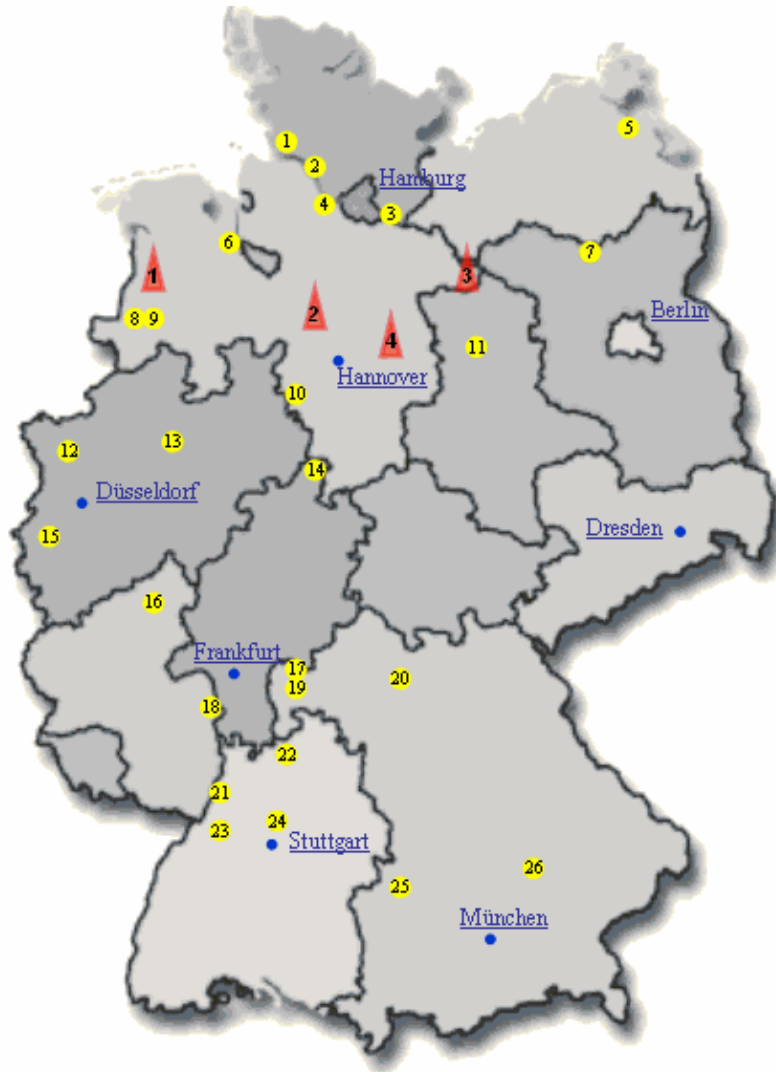
- Reduzierung der 13 Standorte (Phase 2) auf 4 Standorte
- Grundlage: raumordnerische Empfehlungen Innenministerkonferenz (Standortauswahl Energieanlagen) und Bewertungsrichtlinien BMI für KKW-Standorte und Kernenergieanlagen
- **Auswahlkriterien:**
 - Radiologische Sicherheit und Strahlenschutz
 - Bevölkerungsdichte und -Verteilung
 - Beschaffenheit des Baugrundes
 - Risikobetrachtung bezüglich Erdbeben und Überflutungen
 - Geologie des Endlagerstandortes als entscheidende Kriteriengruppe
 - Tiefenlage des Tops des Salzstocks (möglichst nicht tiefer als 500 m unter Gelände)
 - Ausschluss von Gebieten, in denen Trinkwasserentnahmen stattfinden (oder geplant sind), keine Wasserwerke oder Grundwasservorranggebiete im Grundwasserabstrom des Standortes
 - Standorte mit einer optimalen Verbindung zu regionalen und überregionalen Verkehrssystemen (Bundesbahn, Autobahn, Wasserstrassen) wurden bevorzugt
 - Besiedlung sowie Abbaurechte und Eigentumsrechte in der unmittelbaren Nachbarschaft des Standortes
 - Wasserversorgung für das Entsorgungszentrum mit Grundwasser und Oberflächenwasser sowie Möglichkeit der Einleitung von Salzlösungen.

Geowissenschaftliche Kriterien (z.B. BGR 1995-2003, AkEnd 2003)

- Teufe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300m (200m) betragen.
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1500m (ca. 1200m) liegen
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung von mindestens $>3\text{km}^2$ (9km^2) im Steinsalz
- Einschlusswirksame Bereich muss mindestens 100m (500m) mächtig sein
- Das Wirtsgestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss möglichst homogen und die wesentlichen Eigenschaften gut prognostizierbar sein.

Standortauswahl Gorleben

Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen – Phase 3



Phase 3: vier Standorte

- 1 Wahn
- 2 Lichtenhorst
- 3 Gorleben
- 4 Mariagluck

Standortauswahl Gorleben

Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen – Phase 4

- Detailbewertung der Salzstöcke Wahn, Lichtenhorst, Gorleben und Höfer (Mariagluck)

- **Ausschlusskriterien:**
 - Wahn: Nähe Truppenübungsplatz Bundeswehr
 - Lichtenhorst: Grundwasservorranggebiet von Hannover
 - Höfer: zu klein, zu oberflächennah, konkurrierende Nutzung als Gewinnungsbergwerk

- **Empfehlung für Gorleben:**
 - Keine konkurrierende Nutzung
 - Größe ca. 40 km²
 - Tiefenlage zwischen ca. 300 und 3500 m unter GOK
 - Unverritztheit

Standortauswahl Gorleben

Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen

22.02.1977 Die Landesregierung Niedersachsens erklärt ihre Bereitschaft, Anträge zur Errichtung des NEZ am Standort Gorleben zu prüfen.

05.07.1977 Die Bundesregierung akzeptiert die Vorauswahl des Standortes Gorleben für das NEZ und beauftragt die PTB, ein Planfeststellungsverfahren für die Endlagerung radioaktiver Abfälle am Standort Gorleben einzuleiten.

28.07.1977 Antrag auf Einleitung des Planfeststellungsverfahrens

Zusammenfassung Standortauswahl Gorleben

Das in den 70-iger Jahren durchgeführte Endlager-Standortauswahlverfahren basierte auf Erfahrungen und Ergebnissen von mehreren, wissenschaftlich begleiteten Suchverfahren in den 60-iger und 70-iger Jahren.

Die verschiedenen Auswahlverfahren bauten z. T. inhaltlich und methodisch aufeinander auf. Ergebnisse früherer Auswahlverfahren wurden in nachfolgenden Studien z. T. weitergenutzt.

Alle Auswahlverfahren stützten sich auf vorab festgelegte, z. T. unterschiedliche Auswahlkriterien, wobei neben geologischen auch sozialwissenschaftliche Standortanforderungen zum Einsatz gekommen sind.

Geologische Erkundung des Salzstocks Gorleben

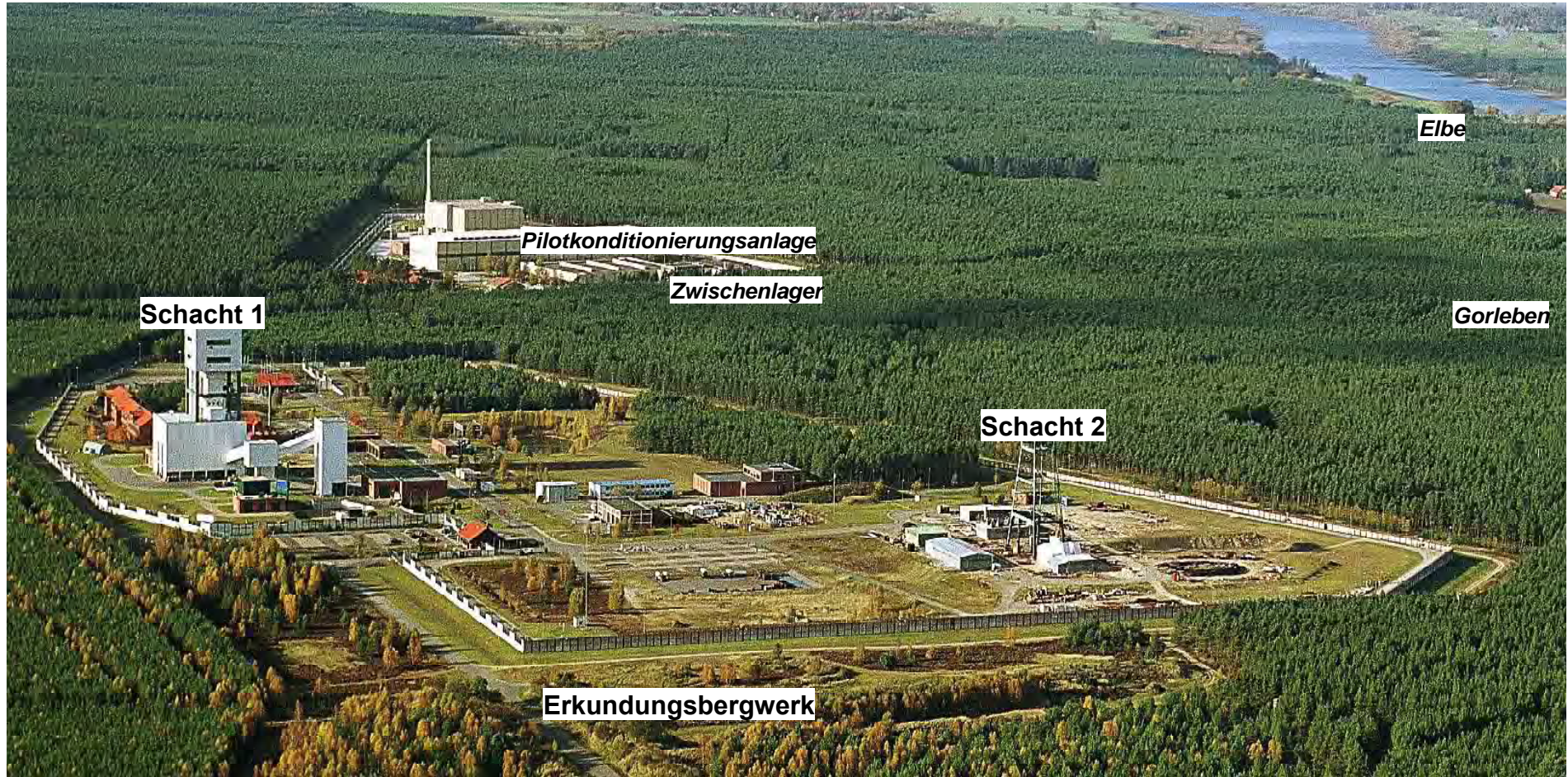


Foto DBE

Geologische Erkundung des Salzstocks Gorleben

Ablauf der Standorterkundung (1)

- Erkundung ab 1979 zur Klärung der Eignung der Salzstruktur für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
- 1979 – Beginn der übertägigen Erkundung
- 1979 – Kreistag Lüchow-Dannenberg stimmt Salzspiegelbohrungen im Salzstock zu
- 1980/1981 – Niederbringen von 4 Tiefbohrungen bis etwa 2000 m (Zustimmung des Kreistages Lüchow-Dannenberg im März 1980)

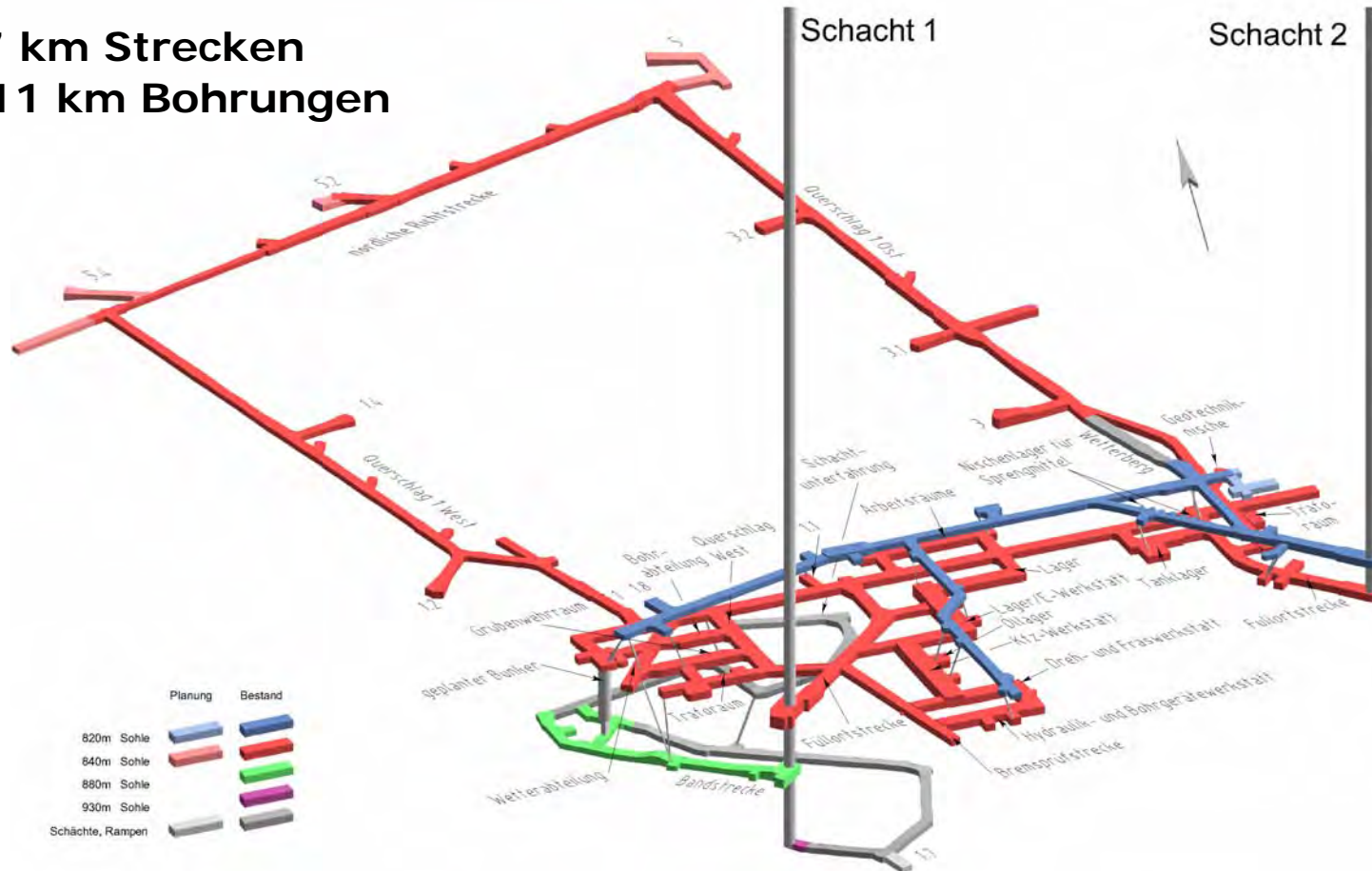
Geologische Erkundung des Salzstocks Gorleben

Ablauf der Standorterkundung (2)

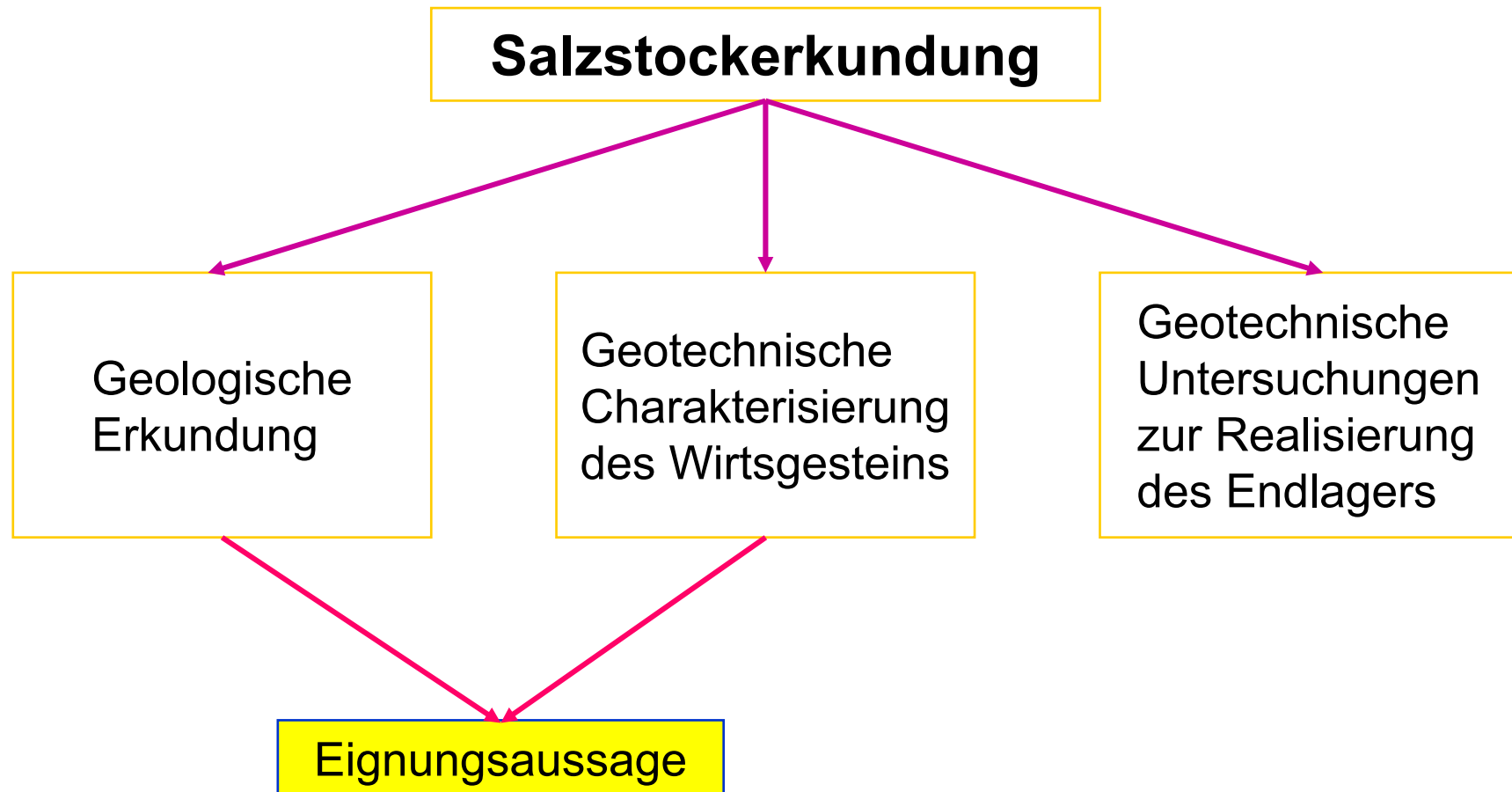
- 1982 – Niederbringen der beiden Schachtvorbohrungen
- 1986 – Beginn des Schachtabteufens im Gefrierverfahren (Gorleben 1 – 933 m, Gorleben 2 – 840 m)
- 1994 – Fertigstellen Schachtinnenausbau
- 1996 – Durchschlag zwischen Schächten auf 840 m-Sohle
- 2000 – Streckensystem untertage ca. 7 km

Grubengebäude Erkundungsbergwerk

- 7 km Strecken
- 11 km Bohrungen



Geologische Erkundung des Salzstocks Gorleben als Grundlage für die Eignungsaussage



Ziele der geologischen Standorterkundung

- Gibt es ausreichend große Partien homogenen Steinsalzes für die Erstellung von Einlagerungshohlräumen?
- Ist ein Endlagerbergwerk in der Betriebs- und Nachbetriebsphase sicher vor Grundwassereinwirkung?
- Ist der Salzstock auch in der Nachbetriebsphase standfest, insbesondere im Hinblick auf die mögliche Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen?

Ziele der geologischen Standorterkundung - Konkret -

Im Ergebnis der Erkundung müssen folgende Themenfelder abgedeckt werden:

- Größe und Form der Salzstruktur (top, bottom, flanks)
- stratigraphische Gliederung und Verteilung der stratigraphischen Einheiten
- Subrosion (Langzeitsicherheit)
- petrographische Ausbildung der Salinargesteine
- Geochemie der Gesteine (sedimentary or recrystallised)
- Gas- und Lösungsvorkommen
- Internbau der Salzstruktur

- **geologisches 3D-Modell der Salzstruktur als Auswerte- und Planungstool**

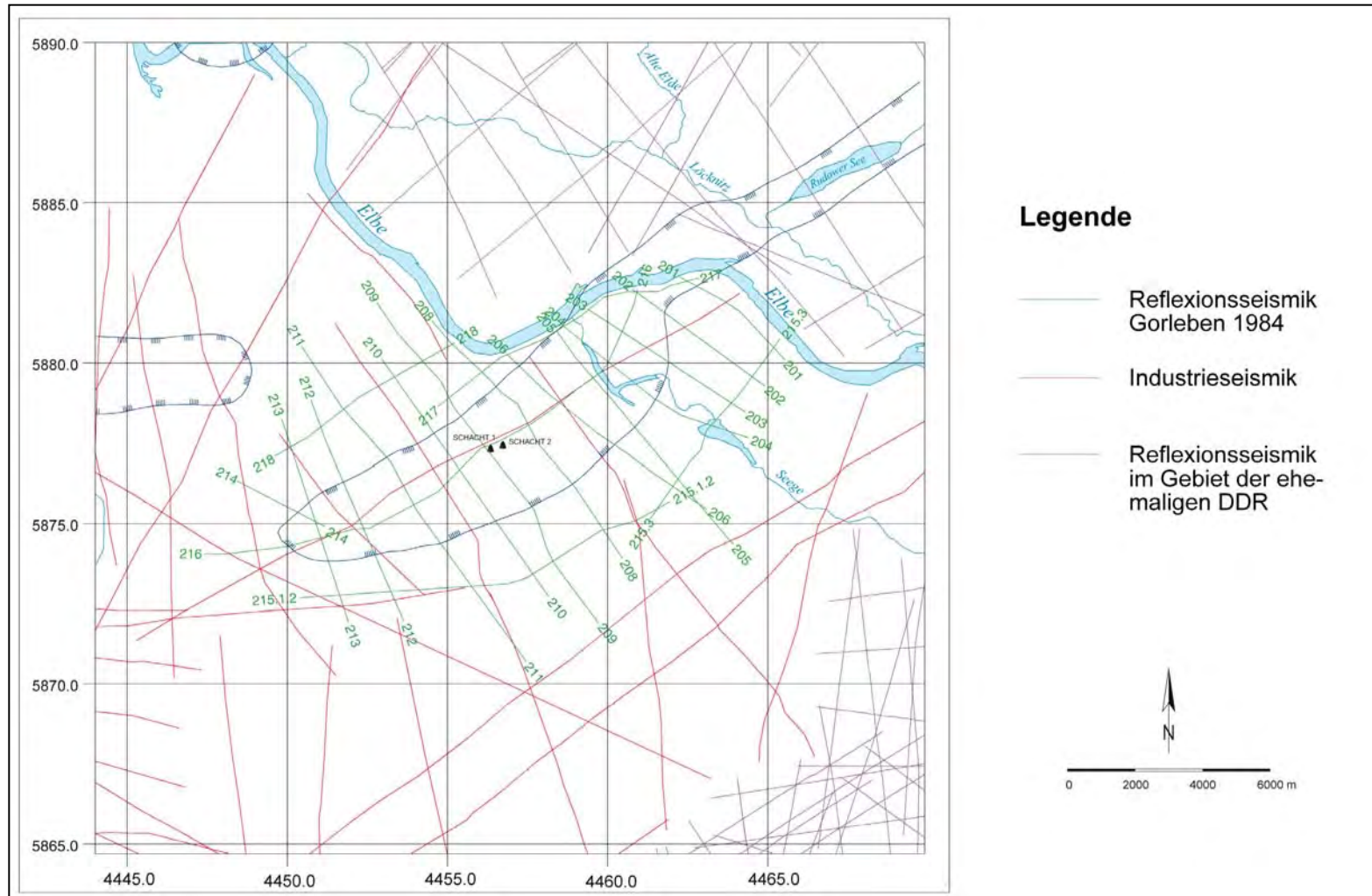
Methoden der Standorterkundung

- 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 to 100 m;
orientierte Kerne, wenn möglich Dip-Log)
- richtungssensitive Radarmessungen
- geochemisch-mineralogische Untersuchungen (Mineralbestand,
Br, Rb, Sr, $d^{34}\text{S}$, $d^{18}\text{O}$; thermodynamic modelling of brine-rock
interaction, hydrocarbon analyses and genetic interpretation)

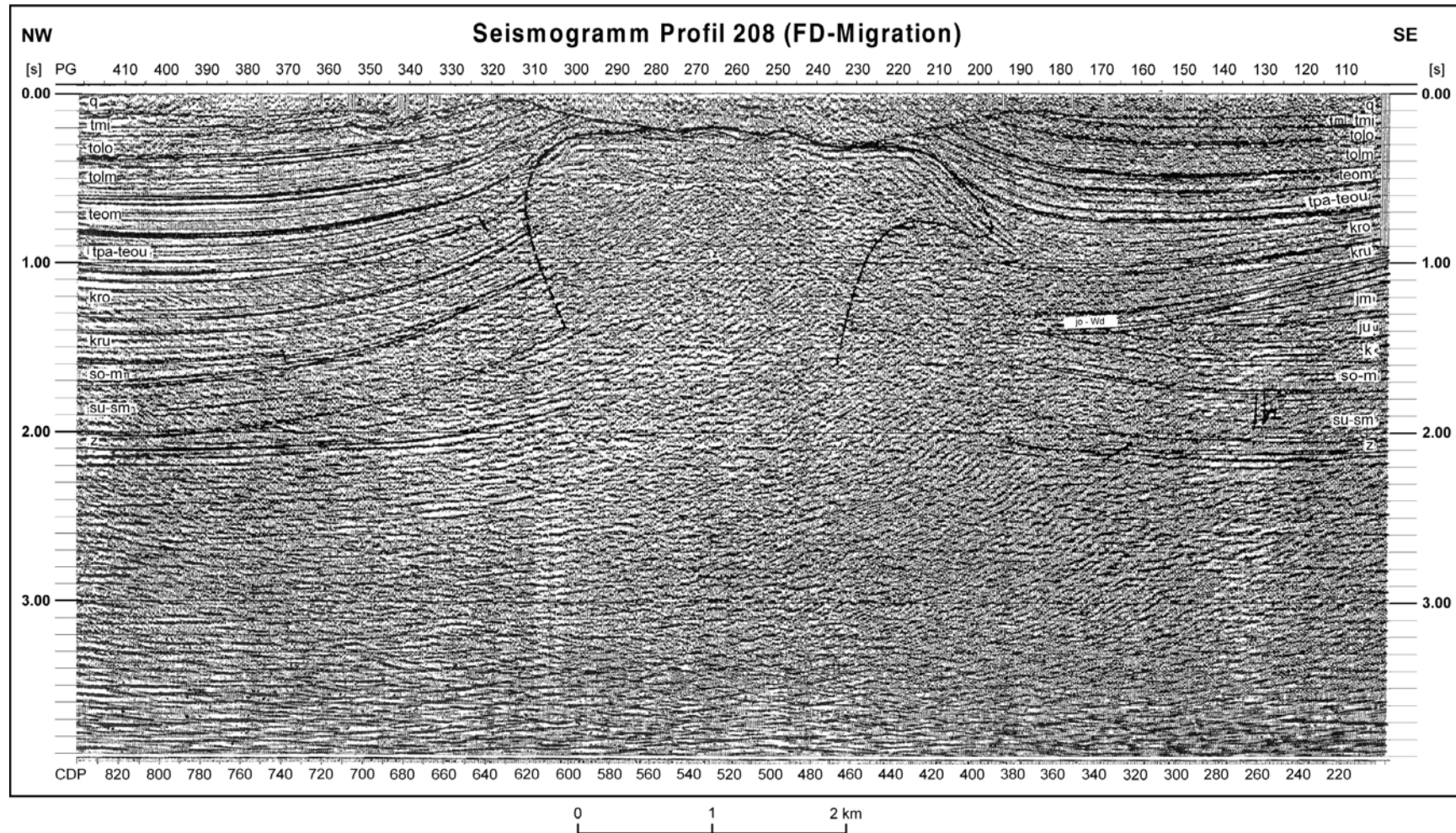
Untersuchungen der Auswirkungen der Subrosion auf die Salzstruktur:

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

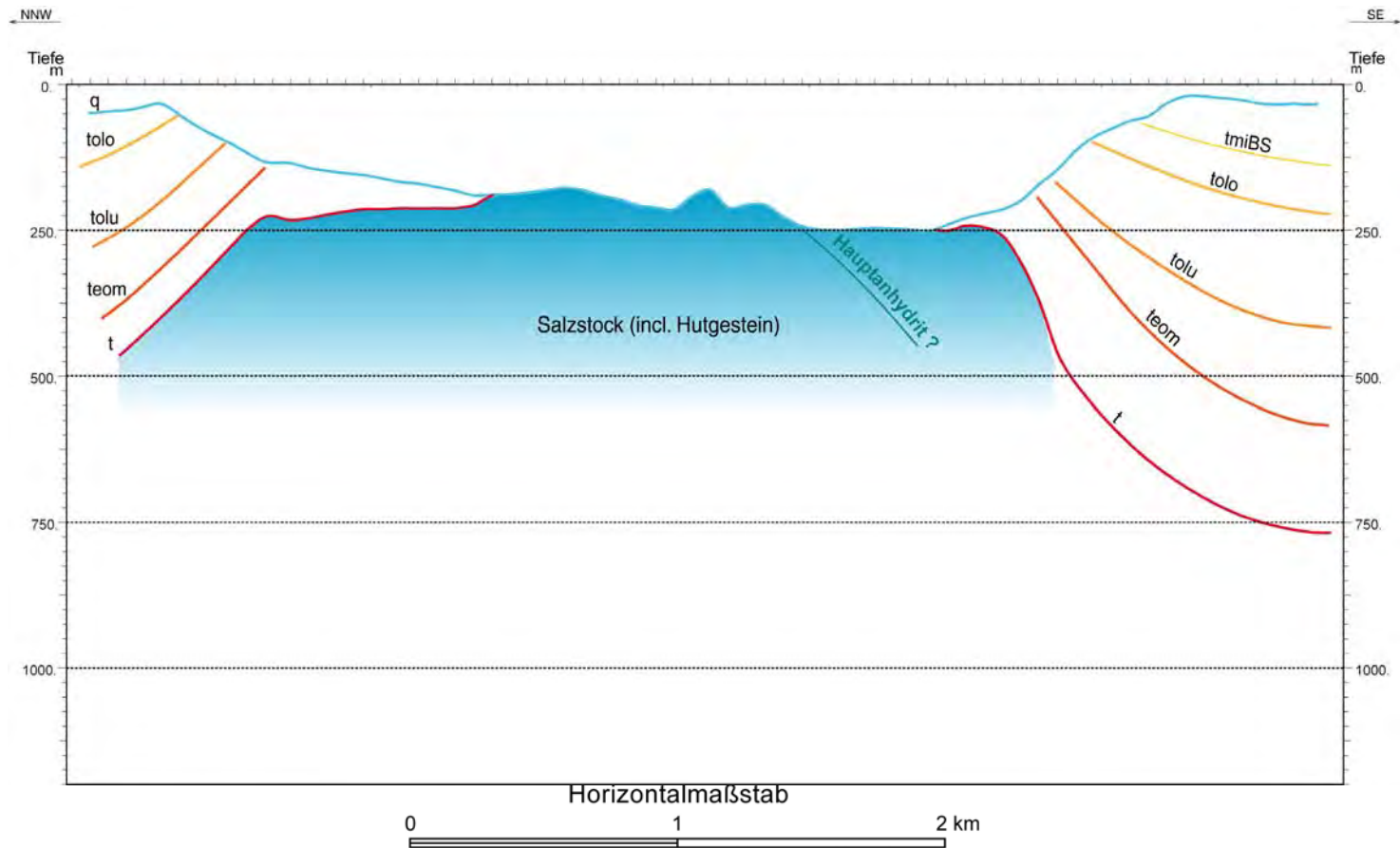
übertägige Standorterkundung



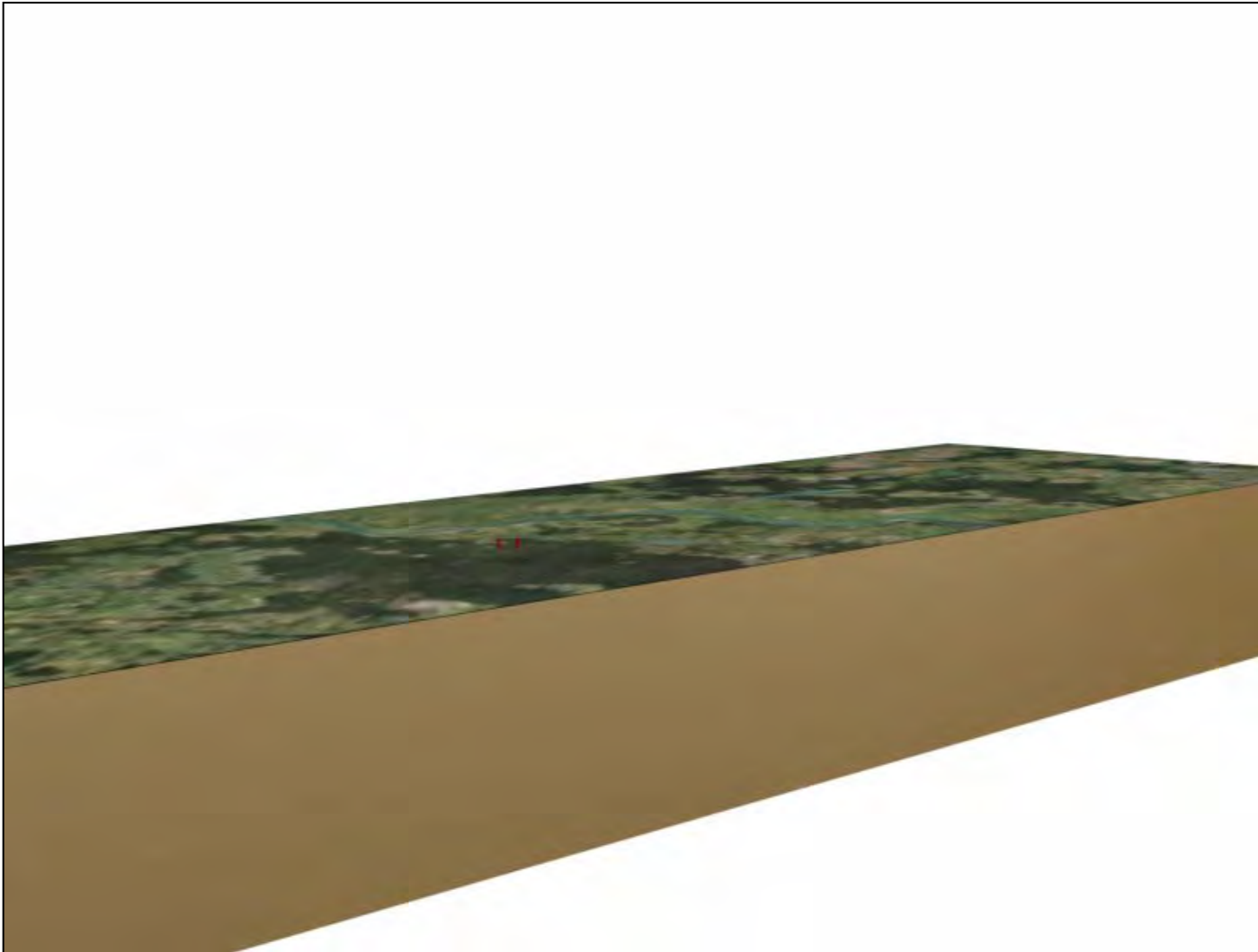
übertägige Standorterkundung



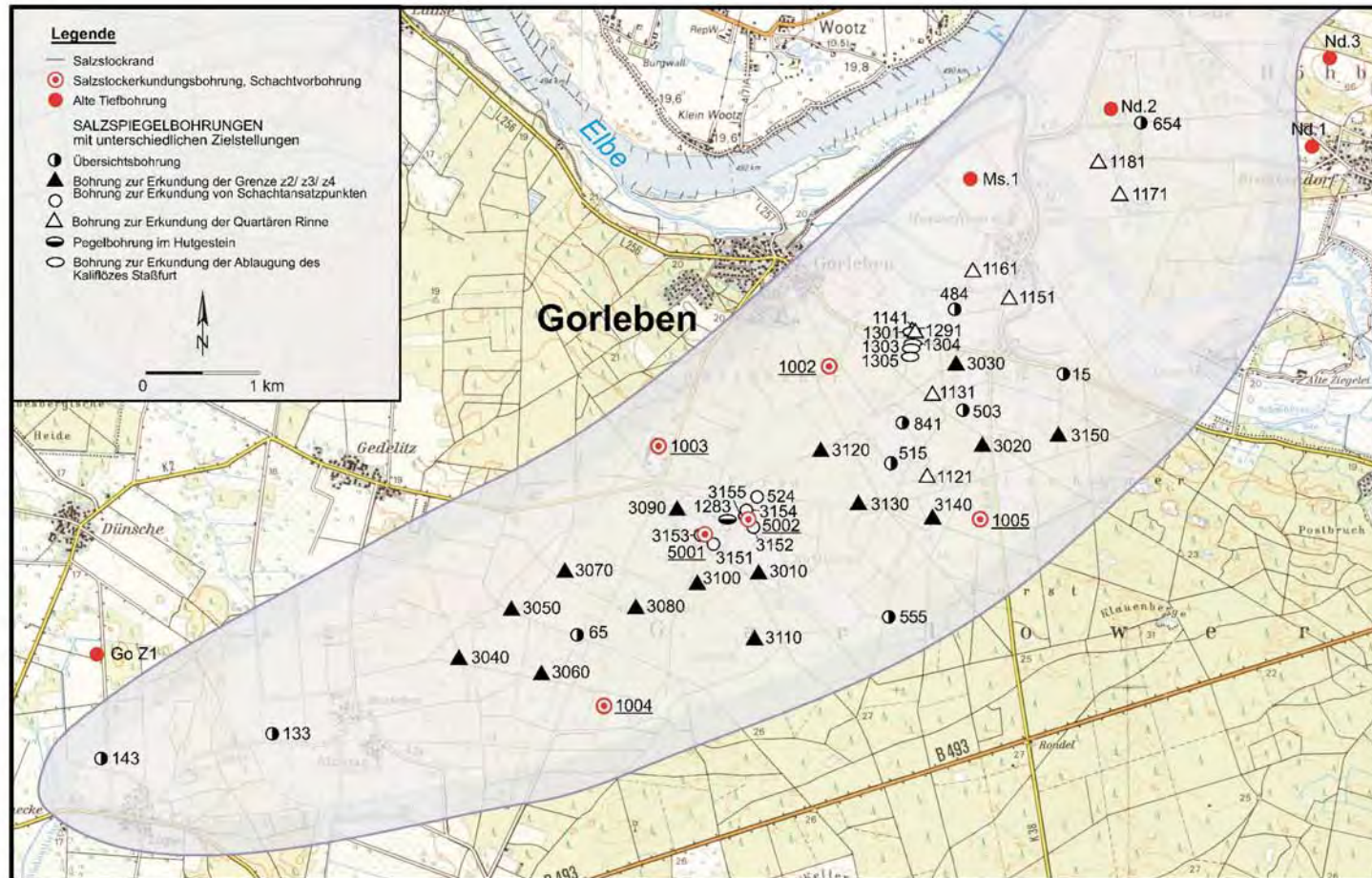
übertägige Standorterkundung



übertägige Standorterkundung



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

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		

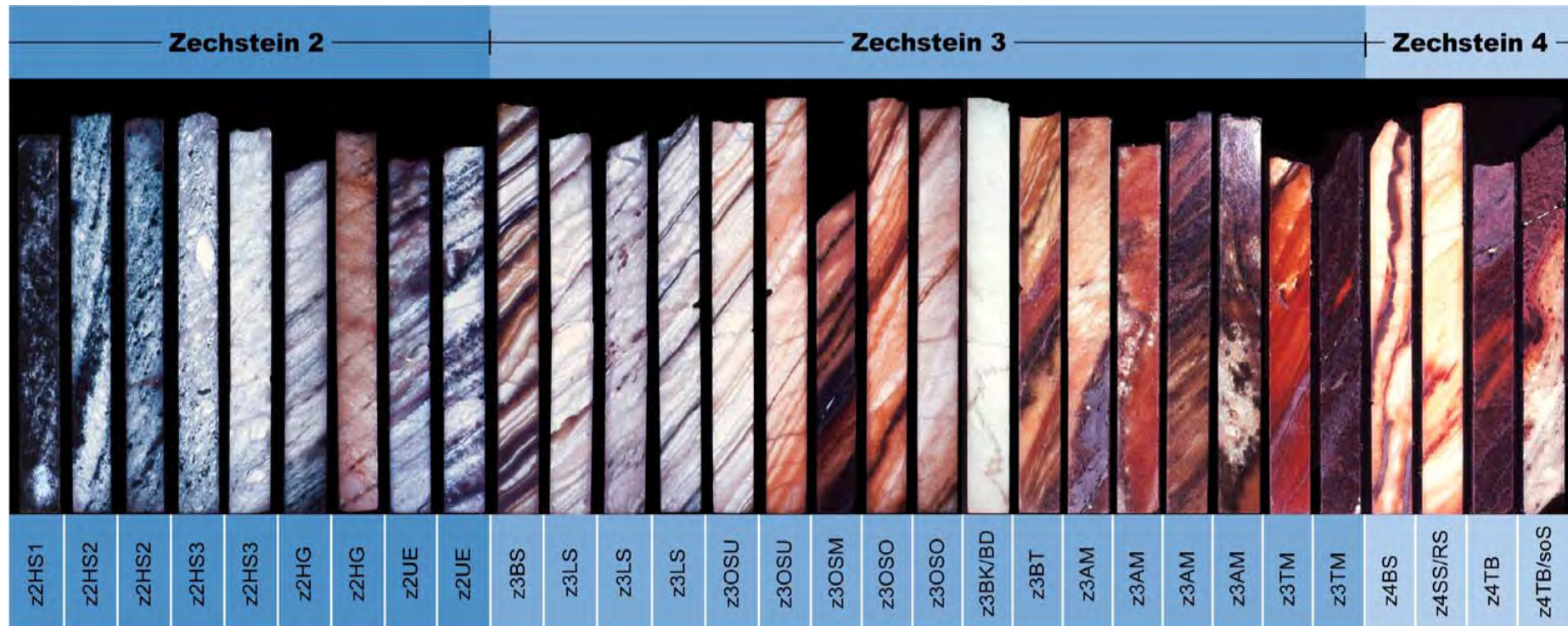
Oberer Staßfurt-Ton	z2STO
Gebänderter Deckanhydrit	z2DA
Decksteinsalz	z2DS
Kaliflöz Staßfurt	z2SF
Kieseritische Übergangsschichten	z2UE
Tonliniensalz	z2TS
Polyhalitbänkchensalz	z2PS
Speisesalz	z2SP
Hangendsalz	z2HG
Hauptsalz	z2HS
Basissalz	z2BS
Basalanhydrit	z2BA
Staßfurt-Karbonat	z2SK
Staßfurt-Ton	z2ST

übertägige Standorterkundung

Kristallbrockensalz	z2HS3
Streifensalz	z2HS2
Knäuelsalz	z2HS1

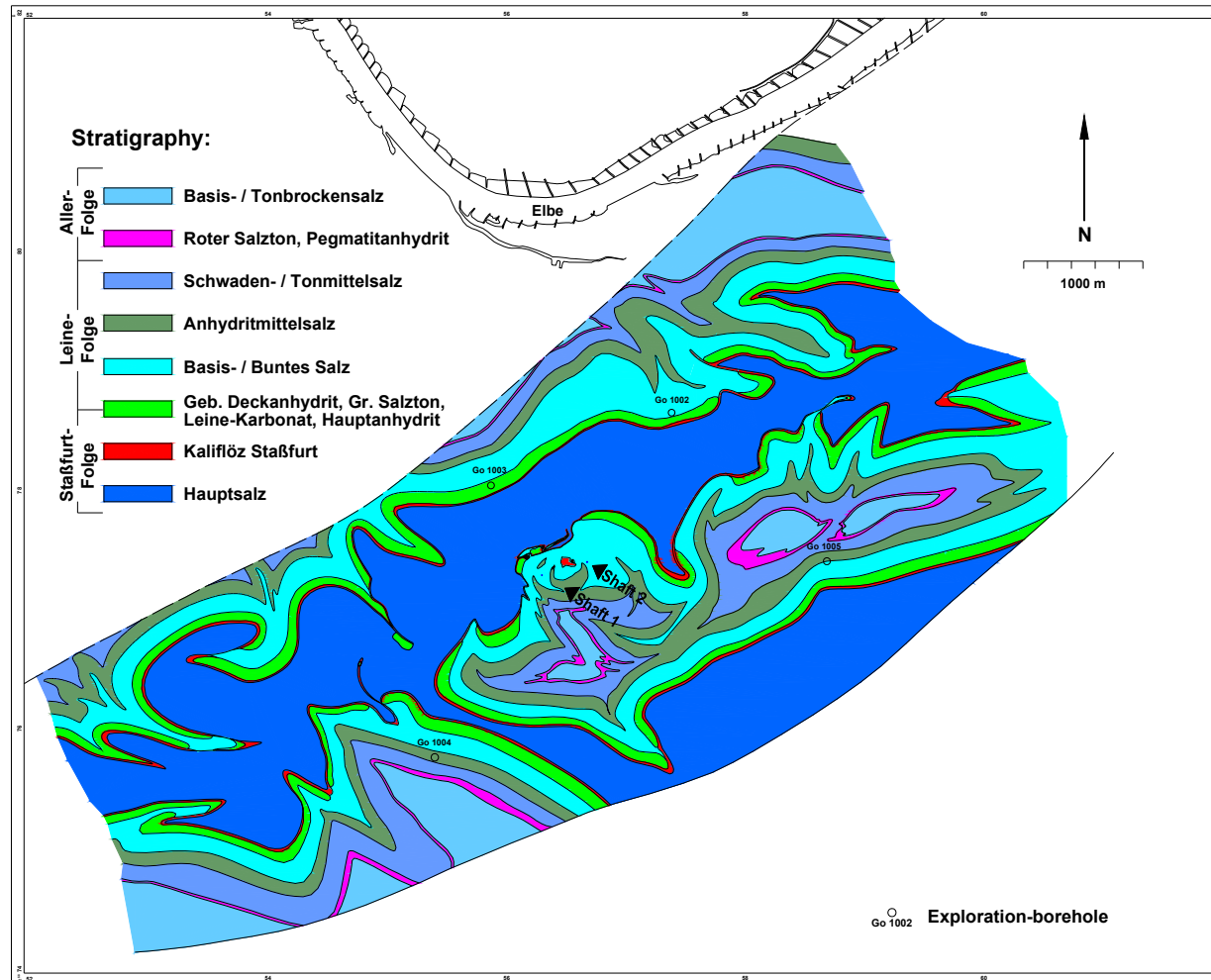
Oberer Staßfurt-Ton	z2STO
Gebänderter Deckanhydrit	z2DA
Decksteinsalz	z2DS
Kaliflöz Staßfurt	z2SF
Kieseritische Übergangsschichten	z2UE
Tonliniensalz	z2TS
Polyhalitbänkchensalz	z2PS
Speisesalz	z2SP
Hangendsalz	z2HG
Hauptsalz	z2HS
Basissalz	z2BS
Basalanhydrit	z2BA
Staßfurt-Karbonat	z2SK
Staßfurt-Ton	z2ST

Geologische Erkundung des Salzstocks Gorleben übertägige Standorterkundung



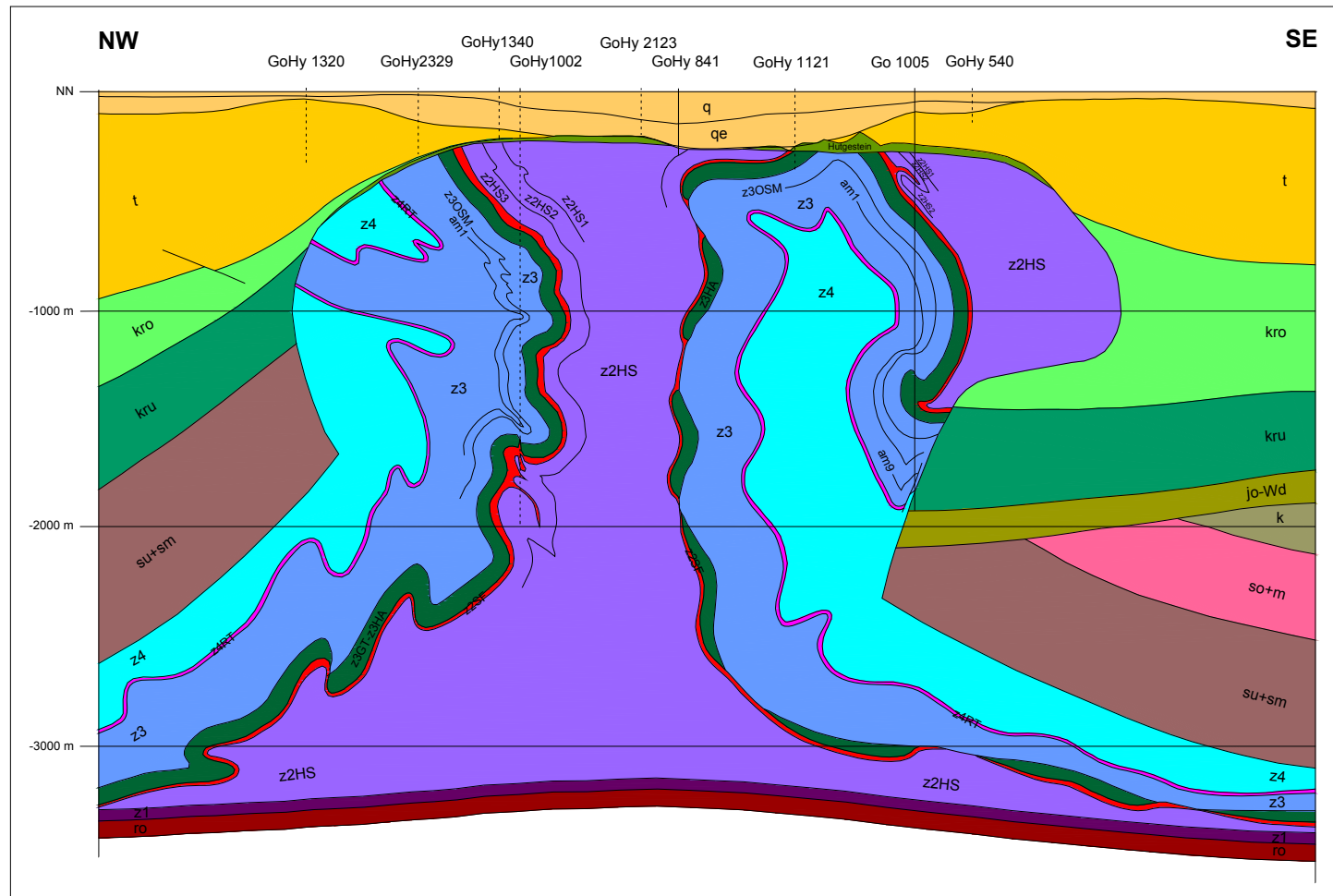
Lithological standard profile of the halit beds (Gorleben)

übertägige Standorterkundung



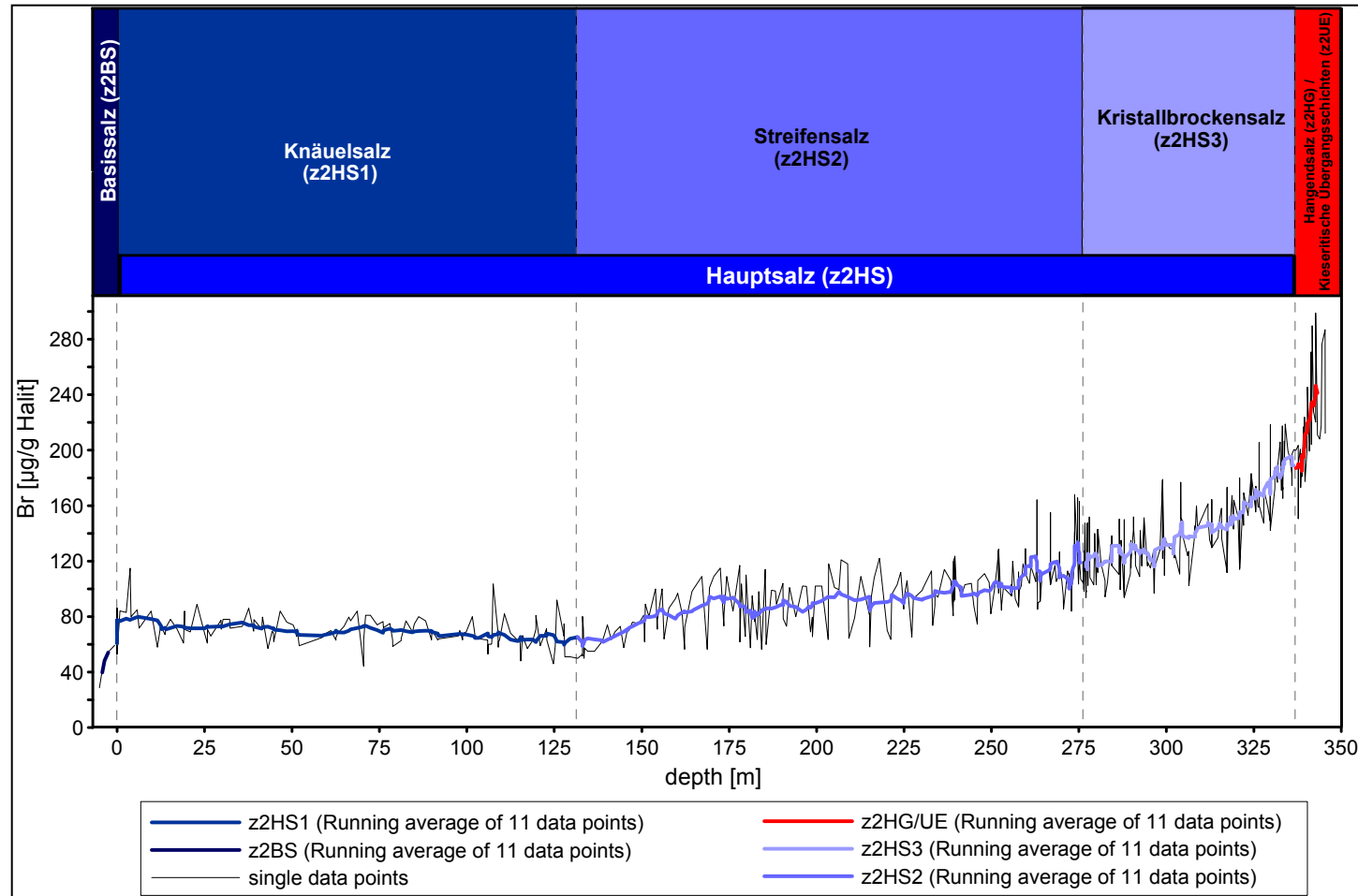
Prognostic geological map of 840 m level

übertägige Standorterkundung



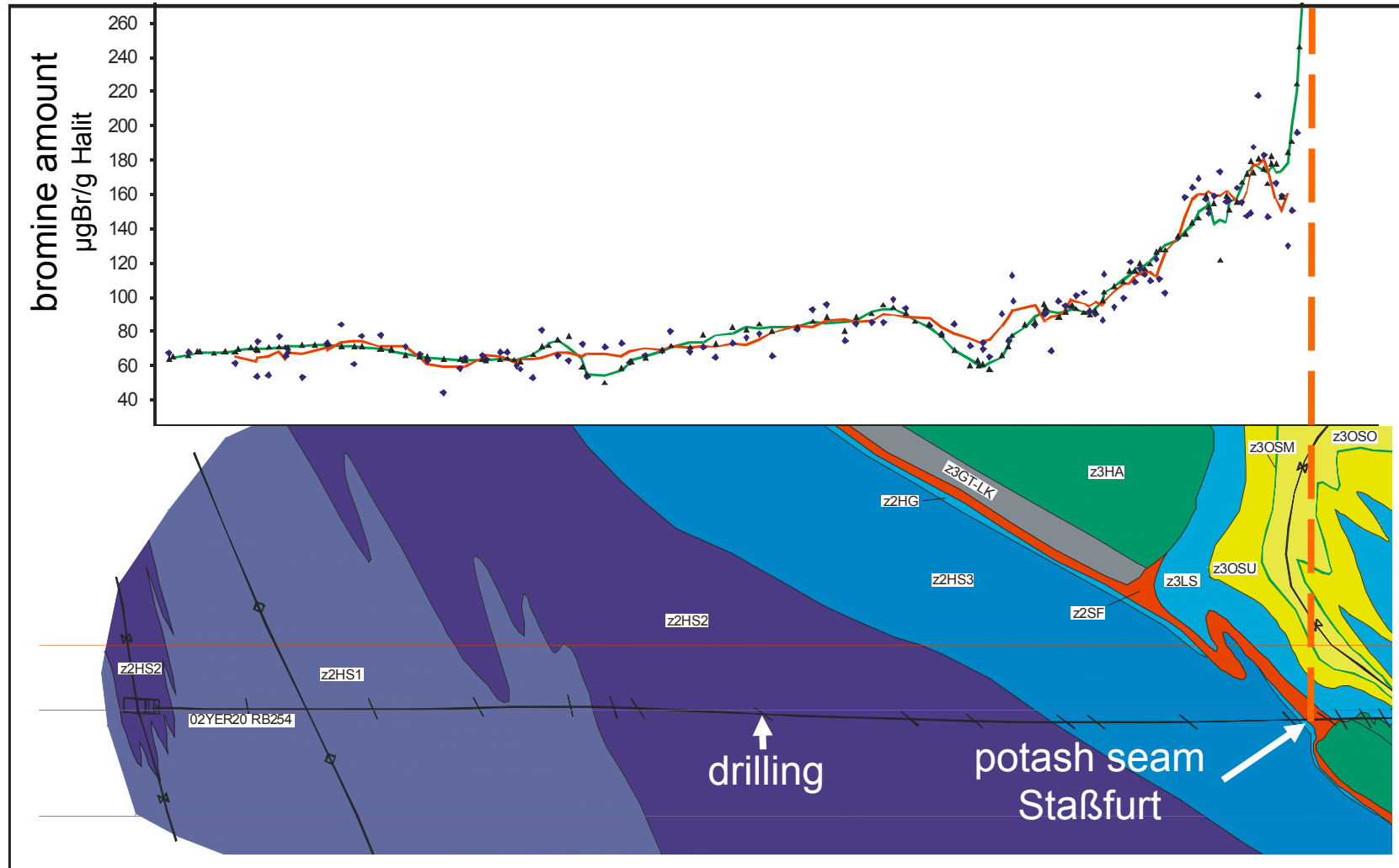
Geological cross-section of the salt dome

untertägige Standorterkundung

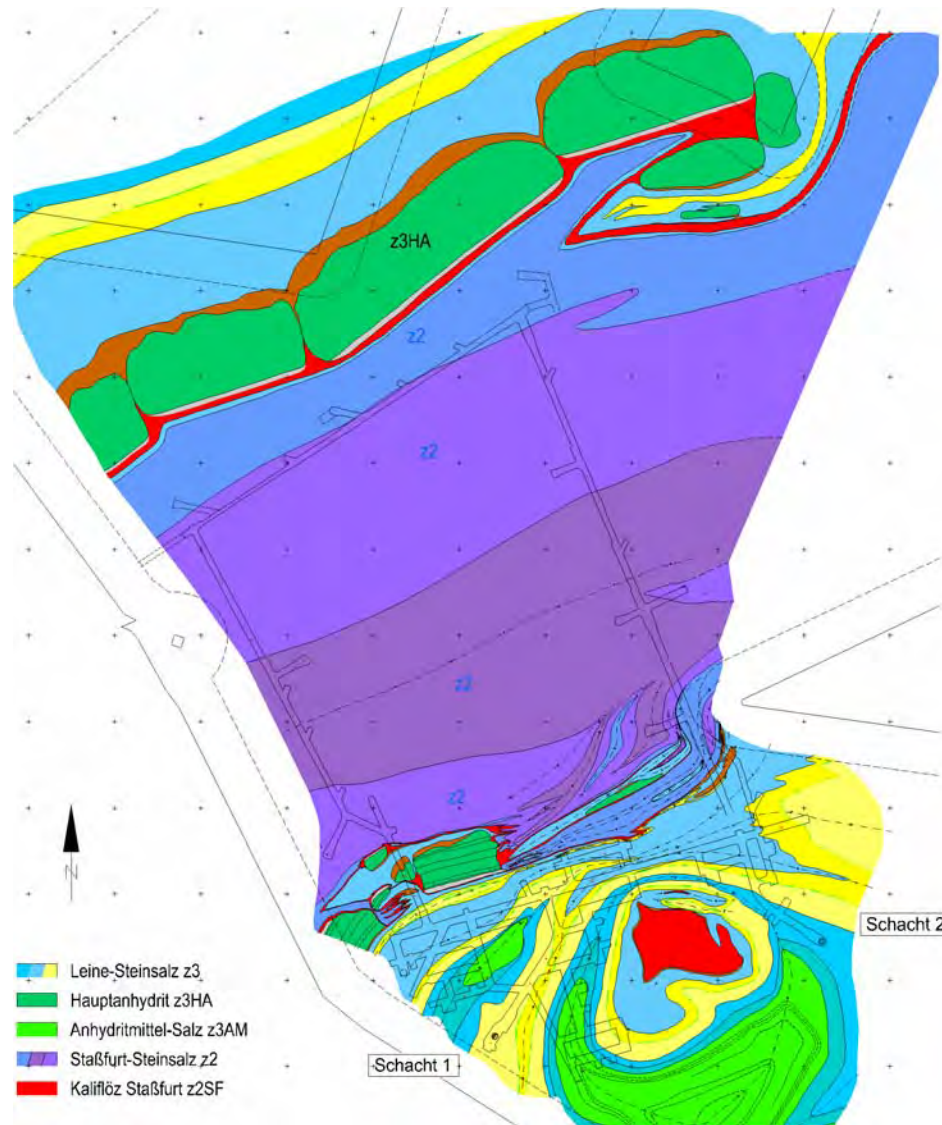


Bromine standard curve of Zechstein 2

untertägige Standorterkundung

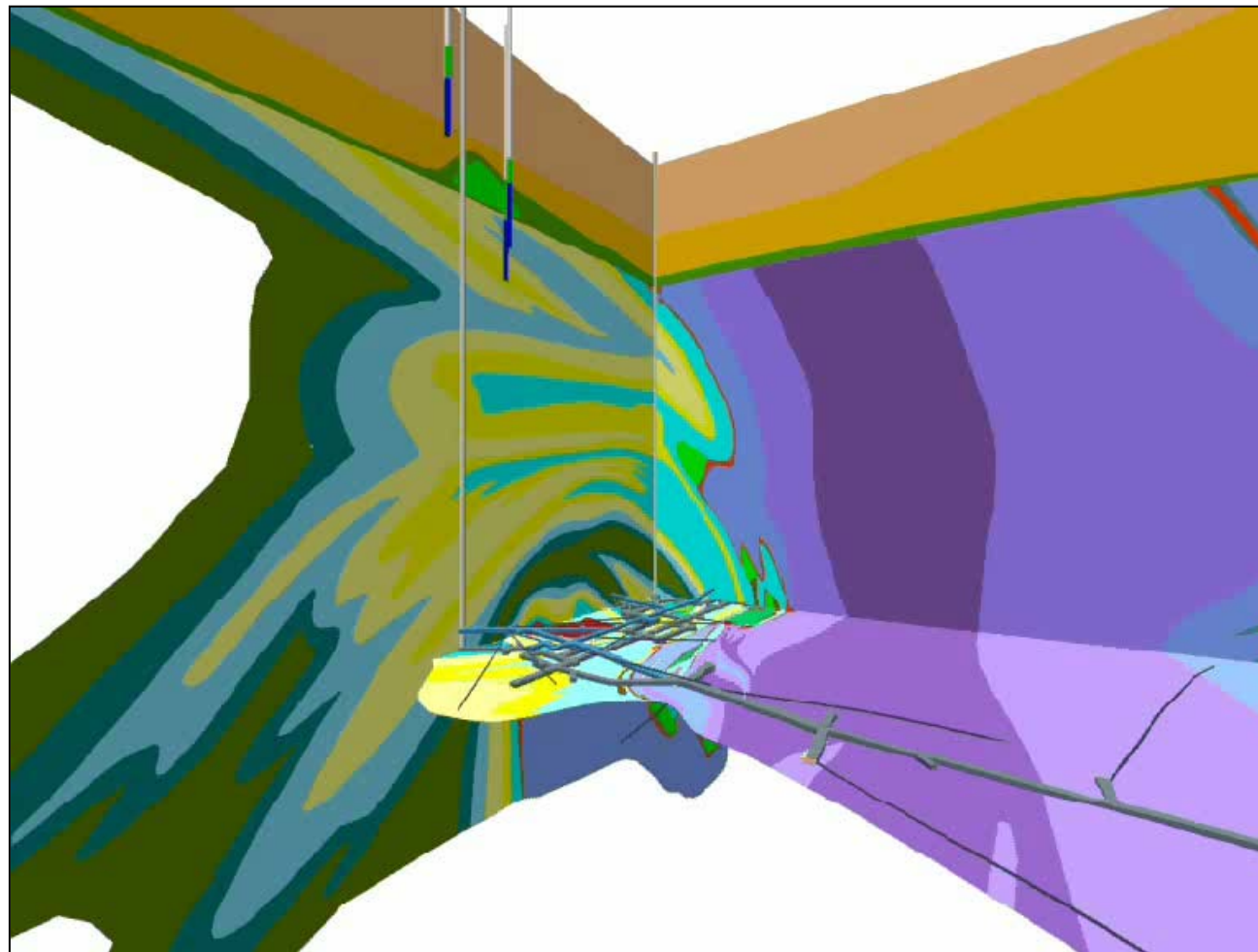


untertägige Standorterkundung



Horizontalschnitt
840 m-Sohle, EB 1

untertägige Standorterkundung

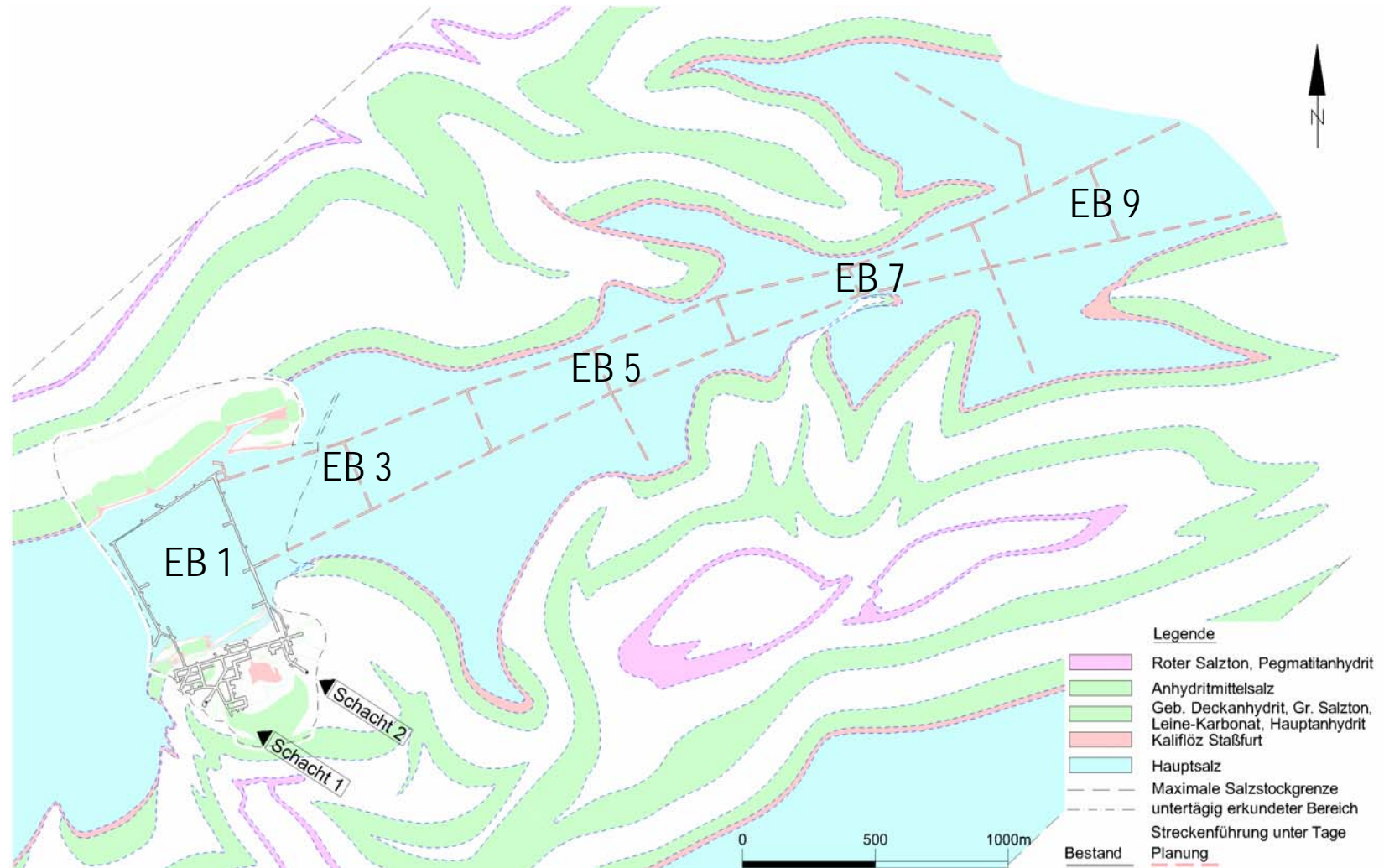


Stratigraphische Abfolge:

Deck- gebirge		Quartär	
		Tertiär	
Leine-Folge		Hutgestein	
		z3AM Anhydritmittelsalz	
		z3BT Buntess Salz	
		z3BK/BD Bank/Bändersalz	
		z3OSO Oberes Orangesalz	
		z3OSM Mittleres Orangesalz (Gorleben-Bank)	
		z3OSU Unteress Orangesalz	
Salinar		z3LS Liniensalz	
		z3BS Basissalz	
		z3HA Hauptanhydrit	
		z3LK Leine-Karbonat	
		z3GT Grauer Salztön	
		z2DA Deckanhydrit	
		z2DS Decksteinsalz	
	Staßfurt-Folge		z2SF Kaliflöz Staßfurt
			z2UE Kieserit, Übergangsschichten
			z2HG Hangendsalz
		z2HS3 Kristallbrockensalz	
		z2HS2 Streifensalz	
		z2HS1 Knäuelsalz	

Geological Model of Exploration Area 1 (EB1)

untertägige Standorterkundung



Map of the planned exploration areas

Zusammenfassung der Erkundungsergebnisse

- Der Hauptanhydrit des z3 ist in einzelne Schollen zerbrochen. Es bestehen keine hydraulischen Verbindungen zwischen den Schollen.
- Es gibt keine hydraulischen Verbindungen bzw. Fließpfade zwischen dem Erkundungsniveau und dem Salzspiegel.
- Die Ausdehnung des Staßfurt-Steinsalzes im Zentralbereich des Salzstocks ist größer als prognostiziert.
- Lösungsvorkommen sind volumenmäßig stark begrenzt und an bestimmte Gesteinstypen gebunden.
- Die geologische Barriere zum Deckgebirge beträgt ca. 600 m.

Aussagen zur Eignung des Salzstocks Gorleben als Endlagerstandort für hoch radioaktive Abfälle

- Die Erkundung des Salzstocks Gorleben hinsichtlich seiner Eignung als Endlagerstandort ist noch nicht abgeschlossen.
- Die Eignung der Salzstruktur zur Endlagerung muss der Genehmigungsbehörde durch langwierige und aufwändige Langzeitsicherheitsnachweise bewiesen werden.
- Aus geowissenschaftlicher Sicht liegen bisher keine Erkenntnisse vor, die gegen eine langzeitsicherheitliche Eignung des Salzstocks sprechen.
- Ungeklüftetes, praktisch lösungsfreies Hauptsalz der Staßfurt-Folge liegt in ausreichendem Maße vor.

weitere Informationen erhalten Sie:



joerg.hammer@bgr.de

Tel.: 0511-643-2449

Geologie der Barrieren und Wirtsgesteine

Entwicklung von Konzepten für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Tongestein

Dr. Matthias Pöhler
DBE TECHNOLOGY GmbH

1 Einleitung

Für die Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen insbesondere aber von wärmeentwickelnden Abfällen wurden in den vergangenen 20 Jahren verschiedene Konzepte zur Endlagerung im Salz entwickelt. Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes zur „Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente“ wurden systemanalytische Arbeiten (1987: Systemanalyse Mischkonzept und 1990: Systemanalyse Endlagerkonzepte) durchgeführt. Für das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) wurde darauf aufbauend für den potenziellen Endlagerungsstandort Gorleben 1997/98 die so genannte „Aktualisierung des Konzeptes - Endlager Gorleben“ erarbeitet. Damit liegen grundlegende an einem Standort ausgerichtete Planungsergebnisse vor.

Nachdem seitens der Bundesregierung Ende der 90er Jahre entschieden wurde, auch alternative Wirtsgesteine mit in die Betrachtung für ein HAW-Endlager einzubeziehen, traten Überlegungen zur Endlagerung in Tonformationen weiter in den Vordergrund. Mit dem nachfolgend beschriebenen Vorhaben sollen weitere Grundlagen für eine Endlagerauslegung im Tonstein entwickelt und ein Referenzkonzept geplant werden. Dabei werden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Ermittlung von Stand von Wissenschaft und Technik zu Methoden und Verfahren zur Suche und Erkundung eines Endlagerstandortes im Tonstein.
- Ermittlung von Stand von Wissenschaft und Technik zur Herstellung von Schächten, Strecken und Einlagerungsbohrungen im Tonstein.
- Entwicklung eines Referenzkonzeptes für ein Endlager im Tonstein auf der Basis modellhafter Standortdaten unter Berücksichtigung von thermischen Berechnungen, Grubengebäudeplanungen, Transport- und Einlagerungstechnologien sowie Verfüll- und Verschlusskonzepten.
- Abschätzung von Zeitdauern und Kosten für Planung, Herstellung und Betrieb des Referenzendlagers im Tonstein.

Nachfolgend werden die bisherigen Zwischenergebnisse des auf 24 Monate angelegten und Ende 2006 begonnenen FuE-Vorhabens „Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein – ERATO“ beschrieben.

2 Referenzstandortregion

Durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurden verschiedene potenziell geeignete Standortregionen für die Errichtung eines HAW-Endlagers im Tonstein /1/ ausgewiesen – Folien 4 und 5 /1; 2/.

Als Referenzstandortregion in Deutschland für das generische Endlager wurde im Rahmen dieses FuE-Vorhabens die Standortregion Nord 1 nordöstlich von Hannover ausgewählt.

Vorteile gegenüber den Alternativstandorten sind im Wesentlichen:

- ausgedehnte Einlagerungsschicht (Hedbergellen-Mergel) mit einer Mächtigkeit von 200 m in einer geschlossenen Tonformation von 1200 m Mächtigkeit, flächige Ausdehnung über mehrere 100 km²
- geringe Teufe: ca. 350 m
- Erdbebenzone 0

3 Variantenbetrachtung zu Einlagerungskonzepten für ausgediente Brennelemente

Basierend auf entwickelten Einlagerungskonzepten für ausgediente Brennelemente und für WA-Abfälle in einer Salzformation wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens GEIST /3/ und darauf aufbauend im FuE-Vorhaben GENESIS /2/ erste Überlegungen hinsichtlich einer Übertragung auf eine Tonformation vorgenommen. Dabei wurden analog zur Salzformation für die Einlagerung der Brennelemente 2 Varianten in Betracht gezogen:

- Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (Folie 7)
- Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen in vertikalen, ca. 50 m tiefen Bohrlöchern (Folie 7)

Im Gegensatz zur Einlagerung in einer Salzformation wurde angenommen, dass sämtliche Endlagerbehälter mit einer 30 cm dicken Barriere aus Bentonitformteilen zu ummanteln sind. Diese geotechnische Barriere hat die Aufgabe, mögliche Lösungszutritte zu den Behältern zu verzögern und umgekehrt einen Rückhalteeffekt für in Lösung gegangene Radionuklide zu gewährleisten. Bei den Endlagerbehältern für die Brennelemente wurde im Vorhaben GEIST im Hinblick auf die Temperaturempfindlichkeit des Bentonits (maximal zulässige Temperatur 100°C) beim POLLUX-Behälter die maximale Beladung mit Brennstäben von 10 DWR-Brennelementen auf 3 Brennelemente und bei der Brennstabkokille von 3 auf 2 Brennelemente reduziert. Im Vorhaben GENESIS wurde für beide Behälter eine zusätzliche, wärmeverteilende Zwischenschicht aus Sand (sogenannter heat spreader) mit 20 cm Dicke vorgesehen, wodurch bei beiden Behältern die Zwischenlagerzeiten und Behälterabstände verringert und bei der Brennstabkokille zusätzlich die Beladung wieder auf 3 Brennelemente erhöht werden konnte – Folie 8.

Diese, mit dem heat spreader „optimierten“ Einlagerungskonzepte wurden in diesem Vorhaben der weiteren Planung zugrunde gelegt.

Für diese Einlagerungskonzepte sind jeweils verschiedene Einlagerungsvarianten denkbar. Mit dem Ziel, eine Vorzugsvariante für die Endlagerung von Brennelementen im Tonstein zu ermitteln, wurden zunächst die jeweiligen Einlagerungsvarianten untersucht und bewertet, um darauf aufbauend die sich ergebenden Vorzugsvarianten für die Strecken- und die Bohrlochlagerung gegenüberstellen zu können.

Für die Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern wurden folgende Einlagerungsvarianten untersucht:

- Variante 1 - POLLUX-Behälter, Bentonitummantelung und Sand einzeln (Folie 9)
- Variante 2 - POLLUX-Behälter mit Sand in Container, Bentonitummantelung einzeln (Folie 10)
- Variante 3 - Bentonitummantelung mit Sand in Büchse, POLLUX-Behälter einzeln (Folien 11 und 12)
- Variante 4 - POLLUX-Behälter mit Sand und Bentonitummantelung in Supercontainer (Folie 13)
 - Untervariante 4/1 - Transport und Einlagerung Supercontainer mit verfahrbarem Scherenhubportal (Folie 14)
 - Untervariante 4/2 - Transport und Einlagerung Supercontainer auf verlorenem Einlagerungswagen (Folie 15)
 - Untervariante 4/3 - Transport und Einlagerung Supercontainer mit Einlagerungsfahrzeug in rechtwinklig zur Streckenachse hergestellten Großbohrlöchern (Folien 16 und 17)

Anhand betrieblicher und sicherheitlicher Kriterien erfolgte eine Bewertung der Varianten. Danach ergab sich als Vorzugsvariante für die Streckenlagerung die Variante 4/2 (Folie 18). Gründe dafür sind im Wesentlichen:

- Geringer Einlagerungsstreckenquerschnitt (14 m²)
- Geringe Offenstandszeiten der Strecken (ca. 1 Jahr bei Streckenlänge von ca. 400 m (17 Gebinde))
- Hoher Einlagerungsfortschritt (ca. 7 Schichten pro Gebinde incl. Versetzen)
- Einfache Betriebsabläufe
- Geringe Störanfälligkeit

Für die Bohrlochlagerung von BSK3 wurden basierend auf der für eine Einlagerung in einer Salzformation vorgesehenen Einlagerungsvorrichtung (Folie 19) folgende Einlagerungsvarianten untersucht:

- Variante 1 - BSK3 mit Sand und Bentonitummantelung in Supercontainer (Folie 20)

- Variante 2 - BSK3 mit Sand in Container, Bentonitummantelung einzeln (Folie 21)
- Variante 3 - Bentonitummantelung mit Sand in Büchse, BSK3 einzeln (Folie 22)
- Variante 4 - BSK3, Bentonitummantelung und Sand einzeln (Folie 23)

Anhand verschiedener betrieblicher und sicherheitlicher Kriterien erfolgte eine Bewertung der Varianten. Danach ergab sich als Vorzugsvariante für die Bohrlochlagerung die Variante 4 (Folie 24). Gründe dafür sind im Wesentlichen:

- Relativ geringer Einlagerungsstreckenquerschnitt (ca. 50 m²)
- Geringe Offenstandszeiten der Strecken (ca. 2,3 Jahre bei Streckenlänge von ca. 400 m (40 Gebinde))
- Geringe Massen (51,4 t für beladenen Transferbehälter)
- Geringe Spurweite und Gleisradien (ca. 2 m und 25 m)

4 Grubengebäudeplanung

Für einen möglichen Vergleich der Vorzugvarianten wurden basierend auf dem Zuschnitt einzelner Einlagerungsfelder die Grubengebäude geplant (Folien 25 bis 29).

Die Zuschnitte sind sowohl bei der Streckenlagerung als auch bei der Bohrlochlagerung dadurch gekennzeichnet, dass jedes Einlagerungsfeld an drei Richtstrecken angeschlossen ist, von denen zwei der Frischwetterversorgung dienen und eine als gemeinsame Abwetterstrecke fungiert (Folien 28 und 29). Die Richtstrecken für den Haufwerkstransport (gelb) sind dem Überwachungsbereich zugeordnet, in dem sämtliche Auffahraktivitäten einschließlich Bohrlochherstellung und -herrichtung stattfinden. Die Richtstrecken für den Gebindettransport (rot) sind dem Kontrollbereich zugeordnet, in dem die Einlagerung erfolgt. Die der Abwetterführung dienenden Strecken (blau) sind ebenfalls Bestandteil des Kontrollbereichs. An Kreuzungspunkten außerhalb der Einlagerungsfelder sind die Strecken nicht niveaugleich, sondern so angeordnet, dass Abwetter- oder Haufwerkstransportstrecken oberhalb der söhligen Gebindettransportstrecken und Abwetterstrecken oberhalb Haufwerkstransportstrecken verlaufen.

Getrennt durch eine umsetzbare, temporäre Absperrung zur Trennung des Überwachungsbereiches vom Kontrollbereich in den Querschlägen und zusätzlich in den Einlagerungsstrecken bei der Bohrlochlagerung ermöglichen die Zuschnitte eine in Bezug zur Einlagerung spätestmögliche Auffahrung und Herrichtung von Strecken und Bohrlöchern und damit geringe Offenstandszeiten. Aus diesem Grund sind die Einlagerungsstrecken bei der Bohrlochlagerung im Gegensatz zur Streckenlagerung auch durchschlägig. Getrennt durch die temporäre Absperrung erfolgt im Überwachungsbereich sukzessive die Herstellung und Herrichtung der Einlagerungsbohrlöcher und im Kontrollbereich derselben Strecke die Einlagerung.

Im Vergleich der Grubengebäudezuschnitte ergibt sich folgendes Bild:

Berücksichtigt man nur die Einlagerungsabteilungen ohne deren Streckenanbindung an die Schächte, ist der Flächenbedarf für die Streckenlagerung mit ca. 6,9 km² um den Faktor von ca. 1,7 höher als für die Bohrlochlagerung. Die Auffahrlängen bei der Streckenlagerung (einschließlich Richtstrecken im Bereich der Einlagerungsabteilungen) liegen mit ca. 210 km etwa um den Faktor 2 höher als bei der Bohrlochlagerung. Die Ausbruchvolumina sind mit ca. 700 m³/Gebinde (Streckenlagerung) und mit ca. 740 m³/Gebinde (Bohrlochlagerung) in vergleichbarer Größenordnung.

5 Vorzugsvariante für die Einlagerung ausgedienter Brennelemente

Neben diesen Vorteilen, die für die Bohrlochlagerung sprechen, ergeben sich weitere im Hinblick auf den auf den im Vergleich zur Streckenlagerung nur geringen Stahlaufwand (BSK3 mit Außenliner gegenüber POLLUX-Behälter mit Stahlblechmantel, Schienenabschnitt und verlorenem Einlagerungswagen), der gegenüber der Streckenlagerung nur bei ca. 1/7 liegt, sowie hinsichtlich der quasi gebirgsverbundenen Einbettung der BSK3 im Bohrloch und in der Realisierung des Bohrlochverschlusses. Darüber hinaus sind die zu handhabenden Massen der Transporteinheiten mit ca. 51 t (Transferbehälter mit BSK3) erheblich geringer als bei der Streckenlagerung (Masse Supercontainer: ca. 86 t). Insofern wird für die Einlagerung von ausgedienten Brennelementen in einer Tonformation die Bohrlochlagerung (Variante 4) favorisiert – Folie 30.

Stellt man einen Vergleich zu der Bohrlochlagerung von BSK3 in einer Salzformation unter der Prämisse her, dass dort die Einlagerung in ca. 300 m tiefen Bohrlöchern möglich ist, ergibt sich unter ausschließlicher Berücksichtigung der Bohrlochabstände für den Flächenbedarf der BSK3-Felder und für die Gesamtaufahrlänge der Einlagerungsstrecken bzw. deren Ausbruchvolumen in der Tonformation in der Standortregion Nord 1 etwa der 10fache Aufwand (Folie 31).

6 Herstellung der Grubenbaue

Um zusätzliche Auflockerungen des Streckenmantels zu vermeiden sind die Strecken gebirgschonend herzustellen. Dies bedeutet, dass die Auffahrung nicht durch Bohr- und Sprengtechnik sondern maschinell erfolgt. Dazu kommen in erster Linie Teilschnittmaschinen in Frage – Folie 32.

Aufgrund des gebrächen Gebirges sind die Strecken auszubauen. Für die kurzlebigen Einlagerungsstrecken ist ein Anker- Spritzbeton- Verbundausbau vorgesehen – Folie 33. Für die langlebigen Richtstrecken und Querschläge wird zusätzlich ein Stahlbogenausbau eingebracht, der mit Beton hinterfüllt wird – Folie 33.

Zum mechanisierten Einbringen des Ankerausbaus werden Ankerbohr- und -setzeinrichtung eingesetzt. Diese können z. B. auf Teilschnittmaschinen angeordnet sein oder an Schienen aufgehängt sein, wie das in Folie 34 dargestellt ist.

Der Spritzbeton wird mit Hilfe eines Spritzmanipulators aufgebracht. Bei kleinen Streckenquerschnitten bietet sich ein kleinbauendes Fahrzeug mit Spritzmanipulator an, wie das am Beispiel des Meyco Oruga in Folie 35 dargestellt ist. Bei größeren Streckenquerschnitten ist vorgesehen, den Spritzmanipulator auf einer an Schienen aufgehängten Ausbaubühne anzuordnen, die die Teilschnittmaschine überfahren kann.

Für das Einbringen des Unterstützungsausbaus bei den langlebigen Infrastrukture Strecken ist bei geringeren Streckenquerschnitten ebenfalls der Einsatz eines kleinbauenden Fahrzeugs mit Ausbaumanipulator vorgesehen – Folie 35. Bei größeren Streckenquerschnitten können Ausbaubühnen mit einer Ausbausetzvorrichtung eingesetzt werden, die das Einbringen von Kappen oder eines vormontierten Kappendachs ermöglichen. Die Hinterfüllung des Ausbaus erfolgt ebenfalls von der Ausbaubühne.

Die Herstellung der Bohrlöcher mit Durchmessern von ca. 1,5 m und Bohrlochteufen von ca. 50 m für die Einlagerung der BSK3 ist durch folgende Besonderheiten gekennzeichnet, die die in Frage kommenden Bohrverfahren stark einschränken:

- Die Bohrlöcher sind blind von oben ohne ein durchschlägiges Vorbohrloch herzustellen.
- Die Platzverhältnisse am Bohrlochkopf sind begrenzt und lassen nur kleinbauende Maschinen zu.
- Tonstein ist feuchtigkeitsempfindlich und neigt zum Nachbrechen.

Insofern kommen nur Bohrverfahren mit pneumatischer Bohrkleinabförderung und indirekter Spülung (Bohrkleinabförderung durch Bohrgestänge) in die engere Wahl, wobei hinsichtlich der Bohrkleinabförderung folgende zu unterscheiden sind:

- Druckluftzufuhr über den Ringraum zwischen Bohrlochwand und Bohrgestänge mit Abdichtung des Bohrlochs mittels Ringraumpreventer und Abförderung des Bohrkleins durch Bohrgestänge
- Druckluftzufuhr über separates Rohr oder durch Ringraum eines doppelwandigen Bohrgestänges mit Abförderung des Bohrkleins im Zentrum des Bohrgestänges (mit Zellenradschleuse am Bohrkopf zum Einschleusen des Bohrkleins in den Luftstrom)
- Abförderung des Bohrkleins durch Absaugen über Rohr

Von diesen sind aufgrund des Bohrlochdurchmessers nur die beiden letzten denkbar. Das erste ist wegen der großen Ringraumfläche und der großen auf den Ringraumpreventer wirkenden Kräfte praktisch nicht möglich.

Die Pneumatische Bohrkleinabförderung mit indirekter Spülung und Zellenradschleuse wurde für die Herstellung von Einlagerungsbohrlöchern in einer Salzformation auf dem Forschungsbergwerk ASSE von GSF und Turmag entwickelt und gab es in verschiedenen Varianten (Folie 37). Der Schleusenbohrkopf SBK1000 war für die Herstellung von bis zu 300 m tiefen Einlagerungsbohrungen mit einem Durchmesser von 1 m vorgesehen. Die erreichte Teufe betrug 212 m. Die Bohrung wurde aufgrund zu großer Bohrlochabweichungen abgebrochen. Der später entwickelte SBK600 wurde aus diesen Gründen mit einer Steuereinheit ausgestattet und war für die Herstellung von bis zu 600 m tiefen Einlagerungsbohrlöchern bei einem Durchmesser von 0,6 m konzipiert. Die mit diesem Gerät erreichte Teufe betrug 347 m und wurde aufgrund starker Bohrlochkonvergenz abgebrochen. Die Bohrlochabweichungen waren minimal. Vom Prinzip waren beide Maschinen ähnlich aufgebaut. Die Antriebsenergie wurde über das Gestänge in den Bohrlochkopf eingeleitet, wobei Pilotbohrkopf und Erweiterungsbohrkopf gegenläufig rotieren. Über die Wendel am Pilotbohrkopf erfolgt die Zufuhr des Bohrkleins zur Zellenradschleuse, die das Bohrklein in den Luftstrom einschleust.

Das zweite denkbare Verfahren besteht in der Absaugung des Bohrkleins mit Hilfe einer Vakuumpumpe. Ein Einlagerungskonzept in Schweden sieht vor, die Brennelementbehälter zusammen mit einer geotechnischen Barriere aus Bentonit in vertikalen, etwa 8 bis 9 m tiefen Bohrlöchern ($D = 1,75$ m) in einer Granitformation einzulagern. Als Bohrverfahren werden sowohl das gestängelose Bohren mit einer umgebauten Tunnelvortriebsmaschine Robbins SBM 1.8 als auch das umgekehrte Raisebohrverfahren (reverse raise boring) diskutiert – Folie 38. Die Effektivität einer Vakuumsauganlage für das Bohrklein auch bei 50 m tiefen Bohrlöchern ist zu prüfen. Die maximale Bohrlochtiefe und damit die Saughöhe wird durch die realisierbare Strömungsgeschwindigkeit der Luft in der Steigleitung bestimmt. Sie muss größer sein als die Schwebegeschwindigkeit der Bohrkleinteilchen, damit diese im Luftstrom nach oben ausgetragen werden können.

Für die Herstellung der Erkundungs- und Erweiterungsbohrungen sowie für die Einlagerung der BSK 3 sind in der Streckensohle Bohrlochkeller anzulegen. Die Herstellung der Bohrlochkeller kann maschinell unter Verwendung einer Kettenschrämmaschine erfolgen – Folie 39. Im Gegensatz zum Bohr- und Sprengverfahren oder anderen maschinellen Verfahren (Baggeranbaufräse, Schlagkopfmaschine) ist dadurch eine profilgenaue Herstellung des Bohrlochkellers möglich. Darüber hinaus werden durch das gebirgsschonende Lösen des Gesteins Auflockerungen und/oder Abböschungen der Randzonen vermieden.

Insgesamt betrachtet sind die Vorleistungsarbeiten (Vortrieb, Herstellung der Bohrlochkeller, Gleisverlegung, Herstellung der Erkundungs- und Erweiterungsbohrungen sowie Einbau von Außenlinern und Bentonitringen) mit hohem Aufwand und einer hohen Anzahl von Betriebspunkten verbunden. In den Folien 40 und 41 sind beispielhaft Momentaufnahmen der Betriebsabläufe für einen durchschnittlichen Einlagerungsfortschritt von 0,5 BSK3 pro Ar-

beitstag dargestellt. Folie 40 geht von dem günstigen Fall aus, dass im Überwachungsbereich mehrere Betriebspunkte gleichzeitig belegt sein können, ohne dass es zu gegenseitigen Behinderungen kommt. In Folie 41 ist im Überwachungsbereich nur jeweils ein Betriebspunkt pro Strecke belegt. Damit verbunden erhöhen sich die Offenstandszeiten der Strecken und zeitweise die Anzahl gleichzeitig belegter Betriebspunkte.

Zusammenfassung

In den kommenden Jahrzehnten sind in Deutschland hochradioaktive Abfälle aus dem Betrieb von Kernkraftwerken in einem geologischen HAW-Endlager nicht rückholbar endzulagern. Dabei handelt es sich um ausgediente Brennelemente, für die die direkte Endlagerung vorgesehen ist, sowie um Wiederaufarbeitungs-(WA)-Abfälle (HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C). Im FuE-Vorhaben ERATO wird alternativ zu einer Endlagerung in einer Salzformation ein Konzept für die Endlagerung im Tonstein entwickelt. Basierend auf ersten Überlegungen im Rahmen anderer FuE-Vorhaben, wie eine Endlagerung in einer Tonformation aussehen könnte, wurden für die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen, für die analog zur Salzformation sowohl die Streckenlagerung in POLLUX-Behältern als auch die Bohrlochlagerung in Brennstabkokillen in Betracht kommt, verschiedene Einlagerungskonzepte untersucht und bewertet. Danach ergab sich, dass die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (Variante 4) insgesamt die meisten Vorteile aufweist.

Literaturverzeichnis:

- /1/ Hoth, P. et alias: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), April 2007
- /2/ M. Jobmann et alias: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein (GENESIS), Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2007
- /3/ Filbert, W. et alias: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST), Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2004
- /4/ Bollingerfehr, W.; Filbert, W.: Optimierung der Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern; atw: Internationale Zeitschrift für Kernenergie, 52. Jg. (2007), Heft 3, März (Deutsche Fassung)

Entwicklung von Konzepten für die Endlagerung von
hochradioaktiven Abfällen in Tongestein

Dr. Matthias Pöhler

DBE TECHNOLOGY GmbH
31224 PEINE

**40 Jahre Forschung und Entwicklung für die sichere
Endlagerung hochradioaktiver Abfälle: Wo stehen wir?**

FuE-Arbeiten von DBE TECHNOLOGY zur Endlagerauslegung in Tonformationen

2001-2004 GEIST

Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein

2003-2006 GENESIS

Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein

2006-2008 ERATO

Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein

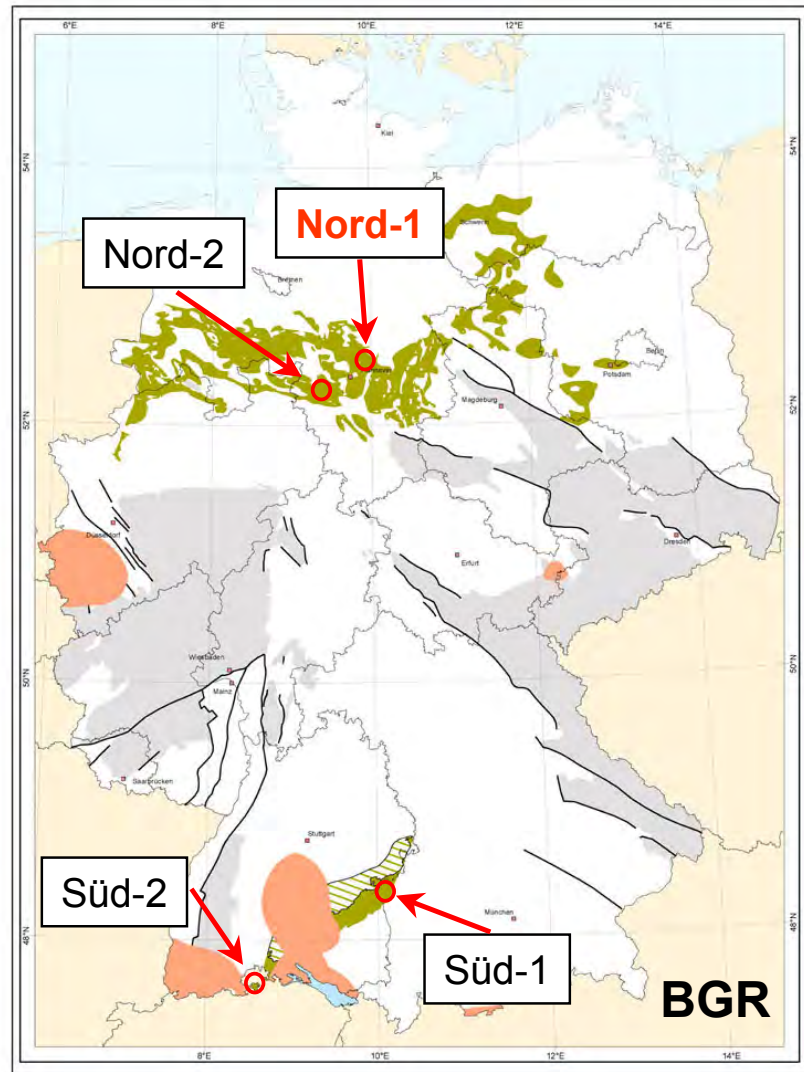
Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein

Vorhabensziel: Konzeption eines HAW-Endlagers im Tongestein in Deutschland

Arbeitsprogramm:

- AP1: Ermittlung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik zur Standortsuche und - erkundung im Tonstein**
- AP2: Methoden und Verfahren zur Herstellung von Grubenbauen im Tonstein (Schächte, Strecken und Bohrlöcher sowie Ausbau)**
- AP3: Konzeptionelle Planung eines Endlagers auf der Basis des Abfallmengengerüsts**
- AP4: Safeguards**
- AP5: Abschätzen des Aufwandes für die Planung, Genehmigung und Realisierung eines Endlagers im Tonstein**

Referenzstandortregion für Endlager im Tonstein: Nord 1



Zwischenergebnisse der
"Regionalen Tonstudie"
der BGR

- Aussichtsreiche Tonformationen
Mächtigkeit > 100 m
Tiefenlage > 300 m / < 1000m
- Erdbebenzone > 1 (DIN 4149)
- Modellregionen

www.bgr.bund.de

Referenzstandortregion für Endlager im Tonstein: Nord 1

Gründe:

- ausgedehnte Einlagerungsschicht (Hedbergellen-Mergel) mit Mächtigkeit von 200 m in einer geschlossenen Tonformation von 1200 m, flächige Ausdehnung mehrere 100 km²
- geringe Teufe: ca. 350 m (Vorteile hinsichtlich Schachtabteufen, Gebirgstemperatur, potenzieller Wärmeeintrag, Ausbau)
- Erdbebenzone 0

ERATO

Schwerpunkte dieser Präsentation: AP2 und AP3

- **Variantenbetrachtung zu Einlagerungskonzepten für ausgediente Brennelemente**
- **Grubengebäudeplanung**
- **Vorzugsvariante für die Einlagerung ausgedienter Brennelemente**
- **Herstellung Grubenbaue**

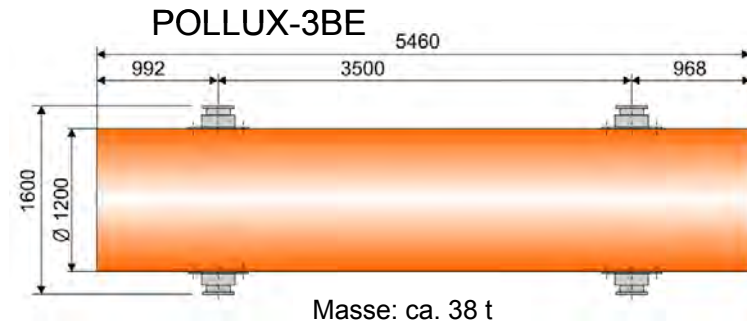
ERATO

Variantenbetrachtung: Einlagerungskonzepte für ausgediente Brennelemente

Ausgangsbasis für ERATO: FuE-Vorhaben GEIST und GENESIS

Hauptvariante 1

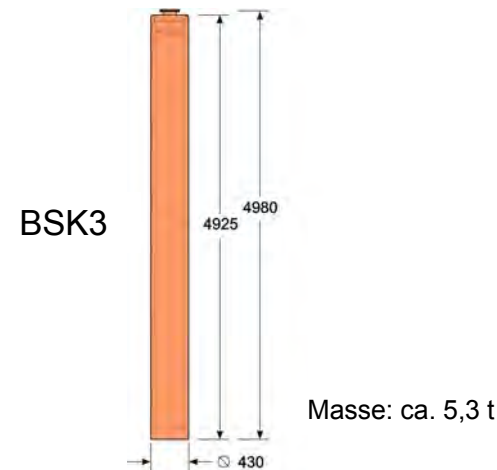
Streckenlagerung für ausgediente Brennelemente in POLLUX-3BE



oder

Hauptvariante 2

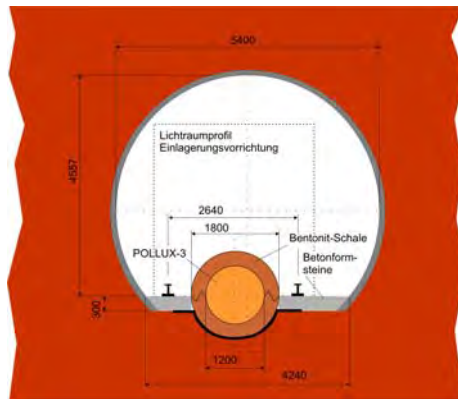
Bohrlochlagerung für ausgediente Brennelemente in Brennstabkokillen in 50 m tiefen Bohrlöchern



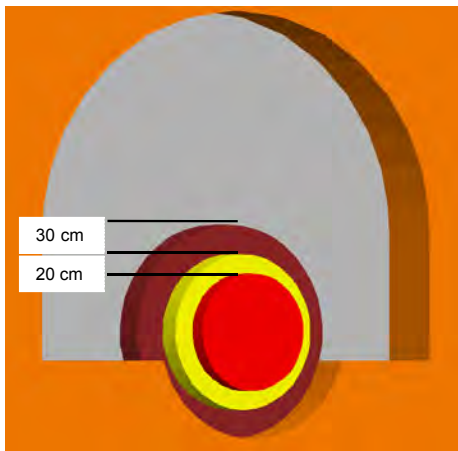
ERATO

Einlagerungskonzepte für ausgediente Brennelemente (GEIST u. GENESIS)

Streckenlagerung

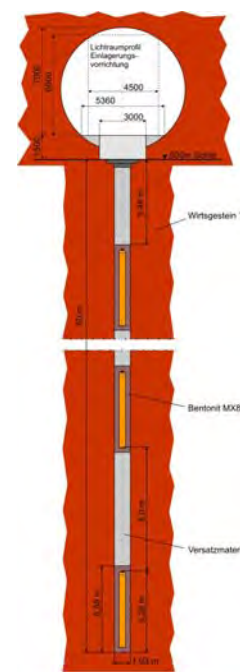


GEIST
(nur Bentonit)

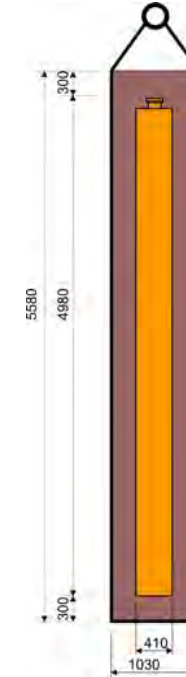


GENESIS
(B. mit Sand)

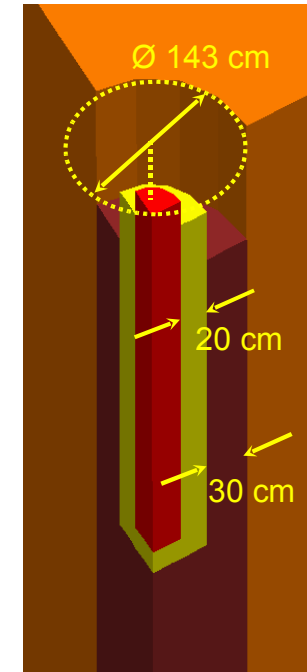
Bohrlochlagerung



GEIST: BSK2 (nur Bentonit)



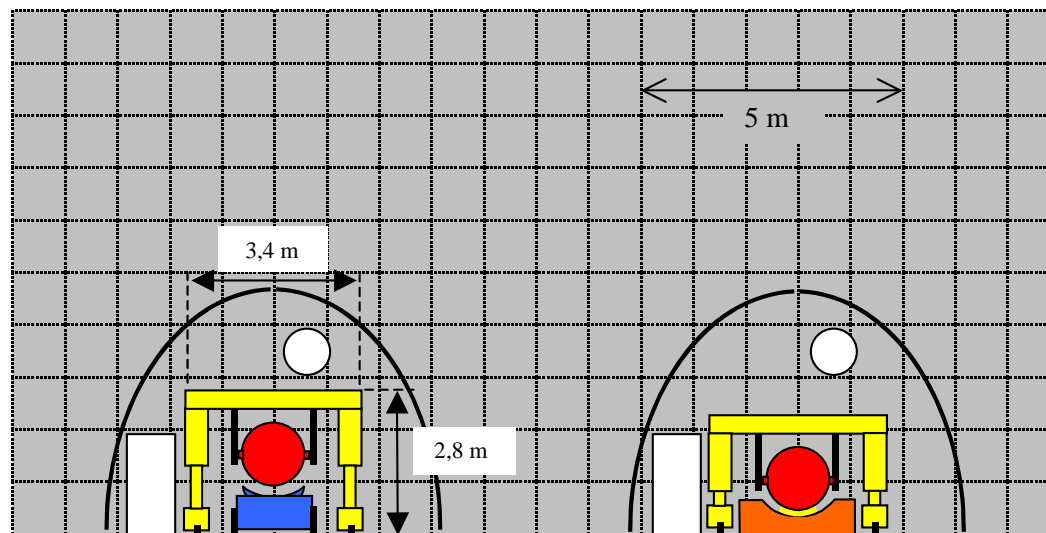
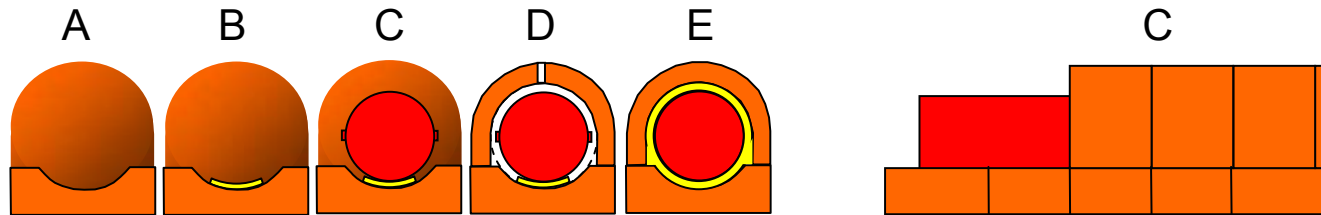
GENESIS: BSK3 (B. mit Sand)



ERATO

Varianten für die Streckenlagerung

Variante 1 - POLLUX, Bentonitummantelung und Sand einzeln

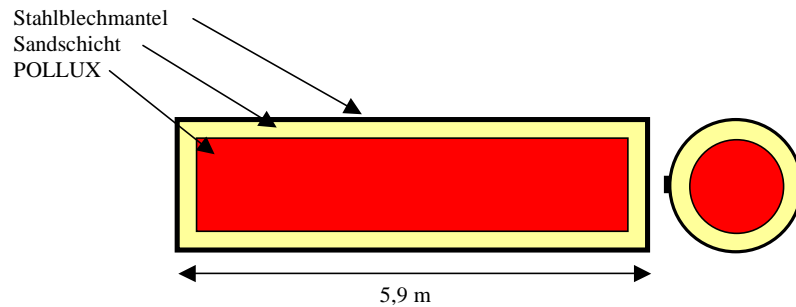


lichter Streckenquerschnitt: ca. 22 m² bis 24 m²

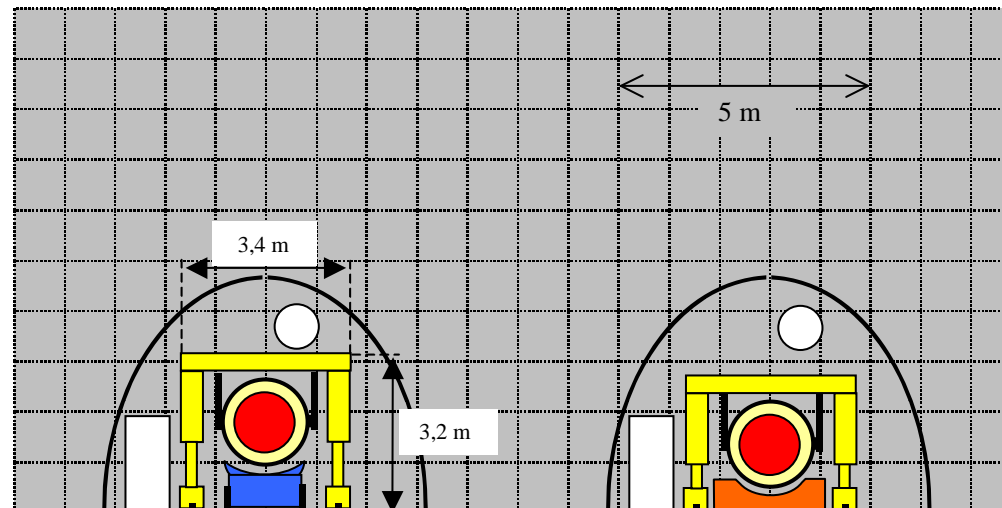
ERATO

Varianten für die Streckenlagerung

Variante 2 - POLLUX mit Sand in Container, Bentonitummantelung einzeln



Masse: ca. 56 t
Länge: ca. 5,9 m
Durchmesser: ca. 1,66 m

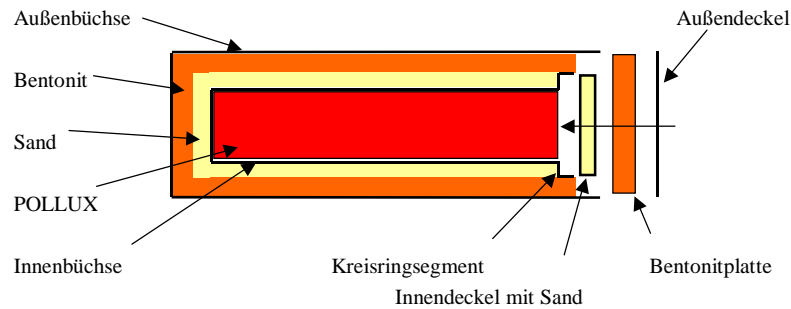


lichter Streckenquerschnitt: ca. 22 m² bis 24 m²

ERATO

Varianten für die Streckenlagerung

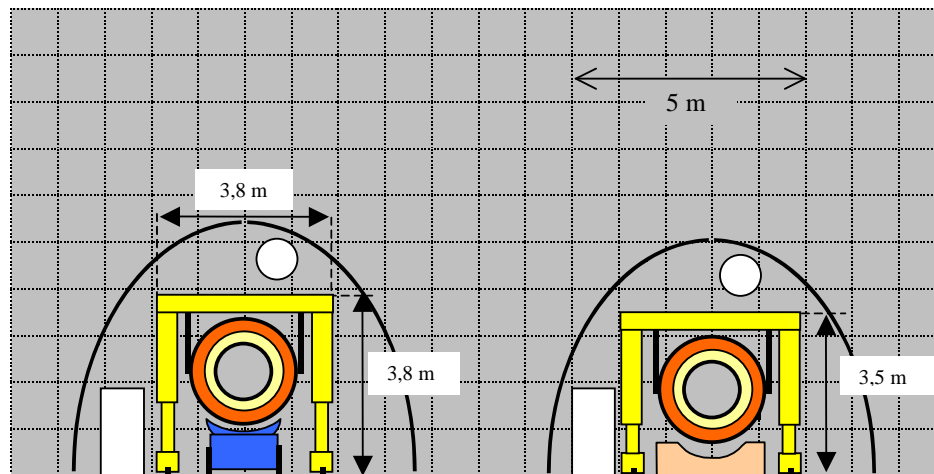
Variante 3 - Bentonitummantelung mit Sand in Büchse, POLLUX einzeln



Masse (Büchse): ca. 47 t

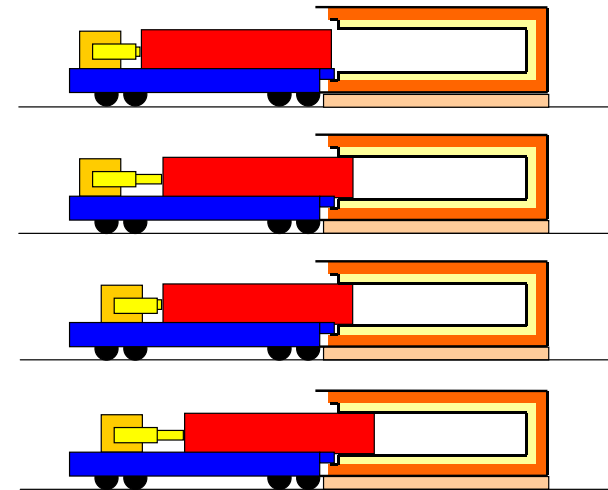
Länge: ca. 6,5 m

Durchmesser: ca. 2,25 m



lichter Streckenquerschnitt Übergabe: ca. 30 m²

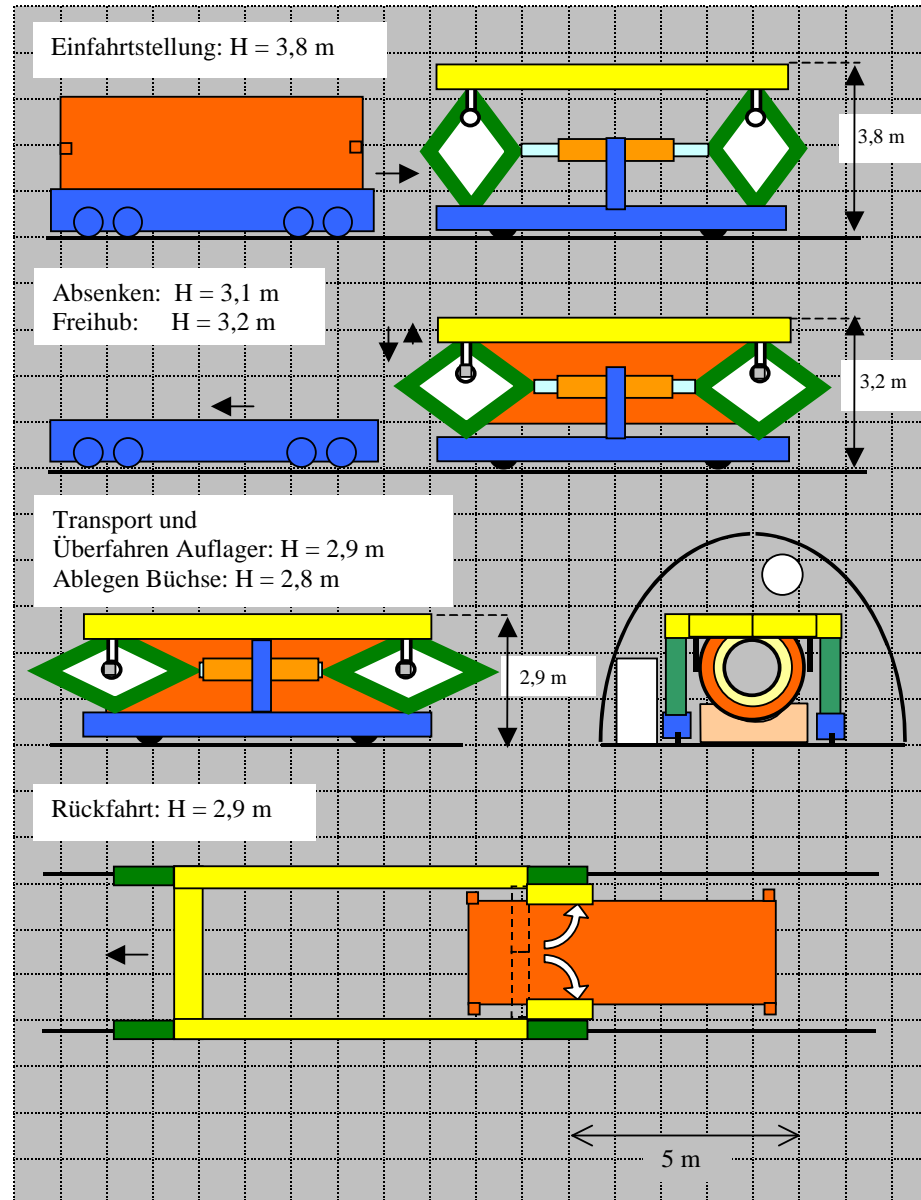
lichter Streckenquerschnitt Einl.-Str: ca. 28 m²



ERATO

noch Variante 3

Hubportal mit Scherenhubeinrichtung

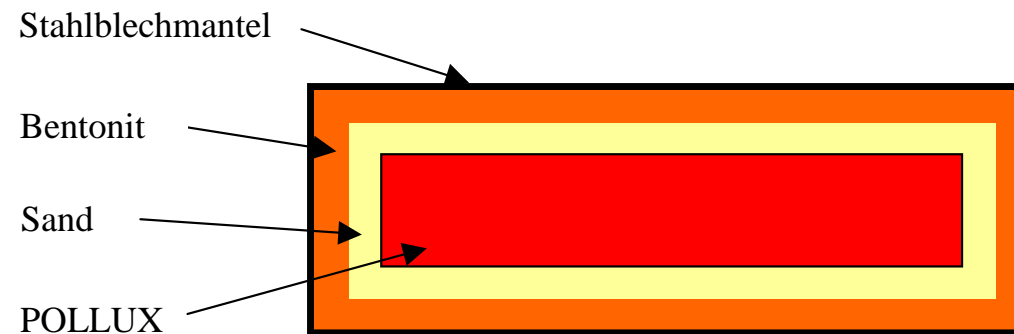


lichter Streckenquerschnitt: ca. 23 m²

ERATO

Varianten für die Streckenlagerung

Variante 4 - POLLUX mit Sand und Bentonitummantelung in Supercontainer

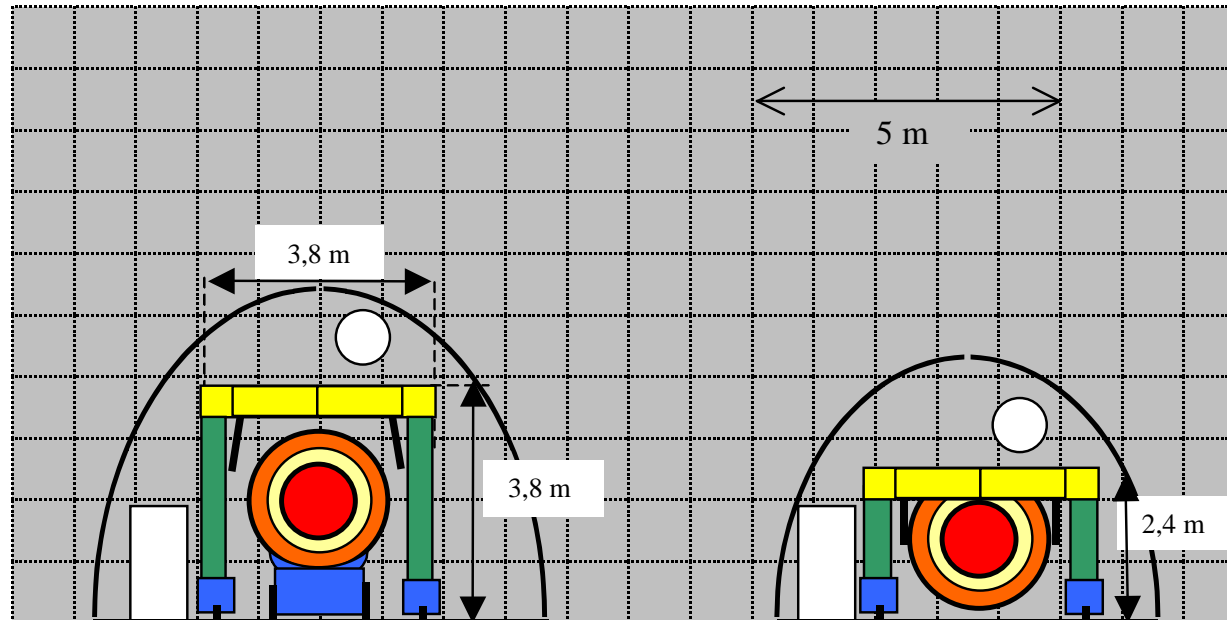


Masse: ca. 86 t
Länge: ca. 6,5 m
Durchmesser: ca. 2,25 m

→ 3 Untervarianten

ERATO

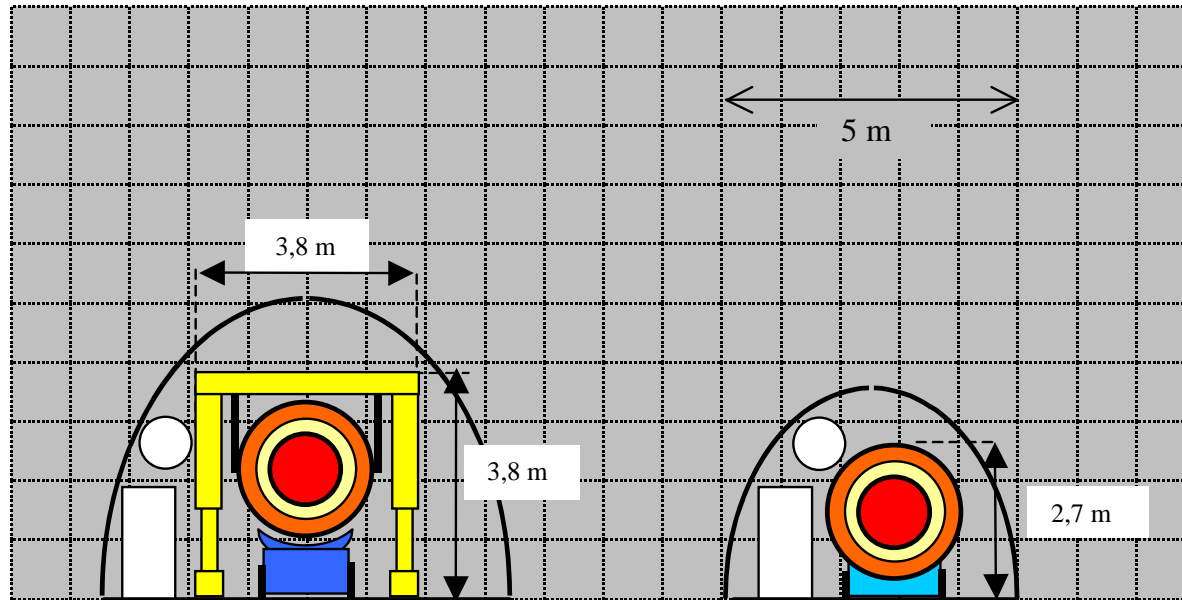
Untervariante 4/1 - verfahrbares Hubportal mit Scherenhubvorrichtung



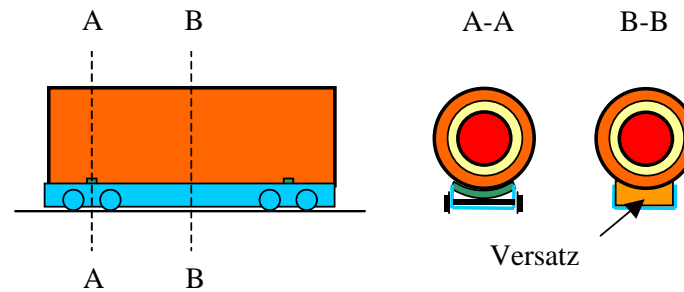
lichter Streckenquerschnitt Übergabe: ca. 30 m²
lichter Streckenquerschnitt Einl.-Str: ca. 21 m²

ERATO

Untervariante 4/2 - ortsfestes Hubportal und verlorener Einlagerungswagen

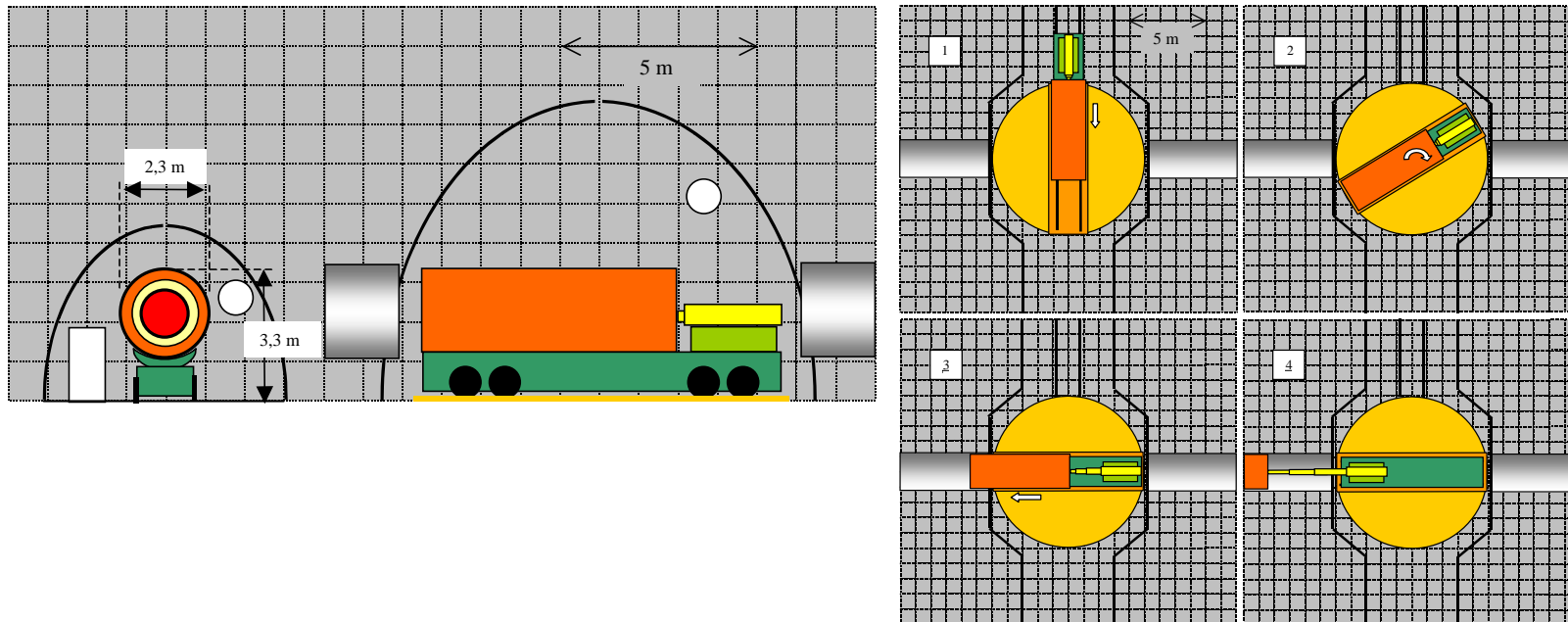


lichter Streckenquerschnitt Übergabe: ca. 30 m²
 lichter Streckenquerschnitt Einl.-Str: ca. 14 m²



ERATO

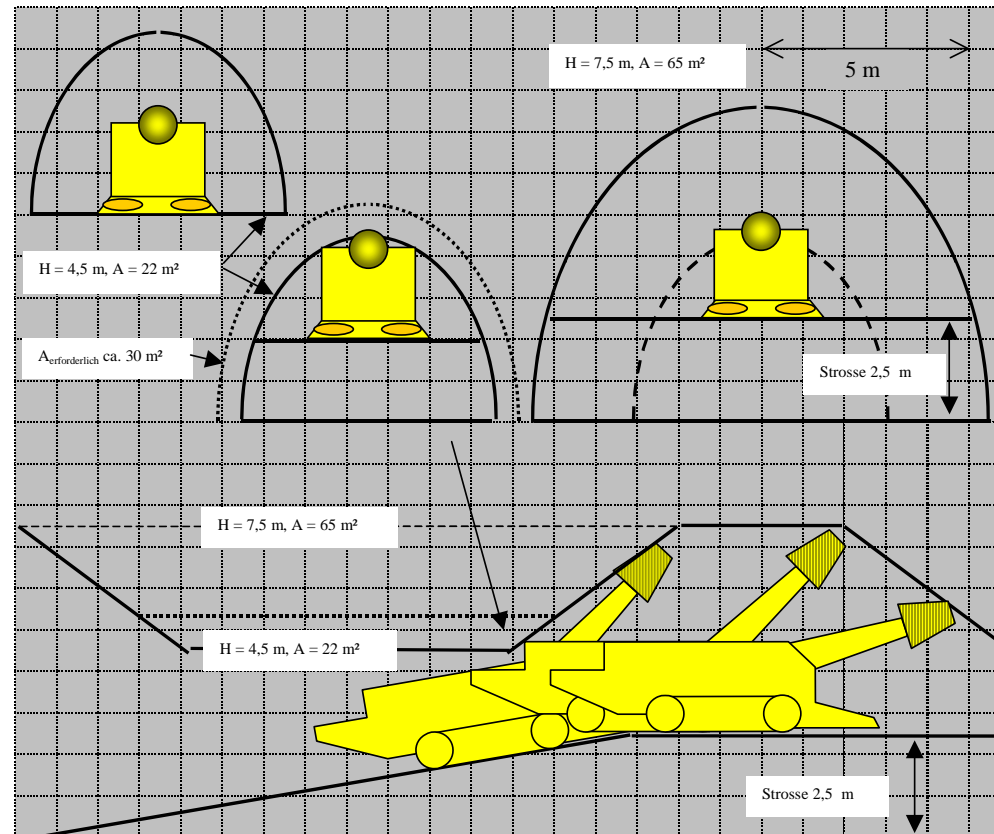
Untervariante 4/3 - Einlagerungsfahrzeug mit Horizontalvorschubeinrichtung und Drehbühne



lichter Streckenquerschnitt Einl.-Str. zw. Einlagerungspositionen: ca. 22 m²
 lichter Streckenquerschnitt Einl.-Str. an Einlagerungspositionen: ca. 65 m²

ERATO

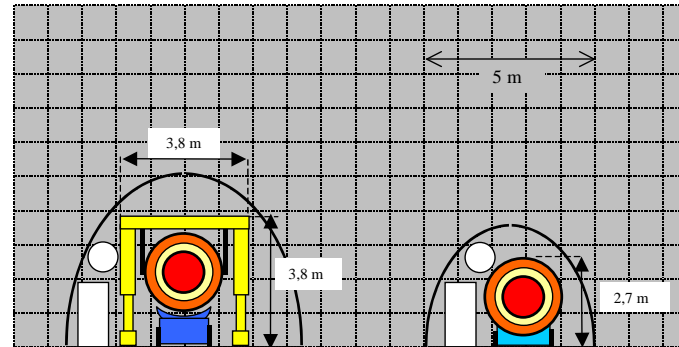
noch Untervariante 4/3 - Einlagerungsfahrzeug mit Horizontalvorschubeinrichtung und Drehbühne



lichter Streckenquerschnitt Einl.-Str. zw. Einlagerungspositionen auch bei kleiner TSM: $> 30 \text{ m}^2$
 lichter Streckenquerschnitt Einl.-Str. an Einlagerungspositionen: ca. 65 m^2

Auswahl Vorzugsvariante für die Streckenlagerung

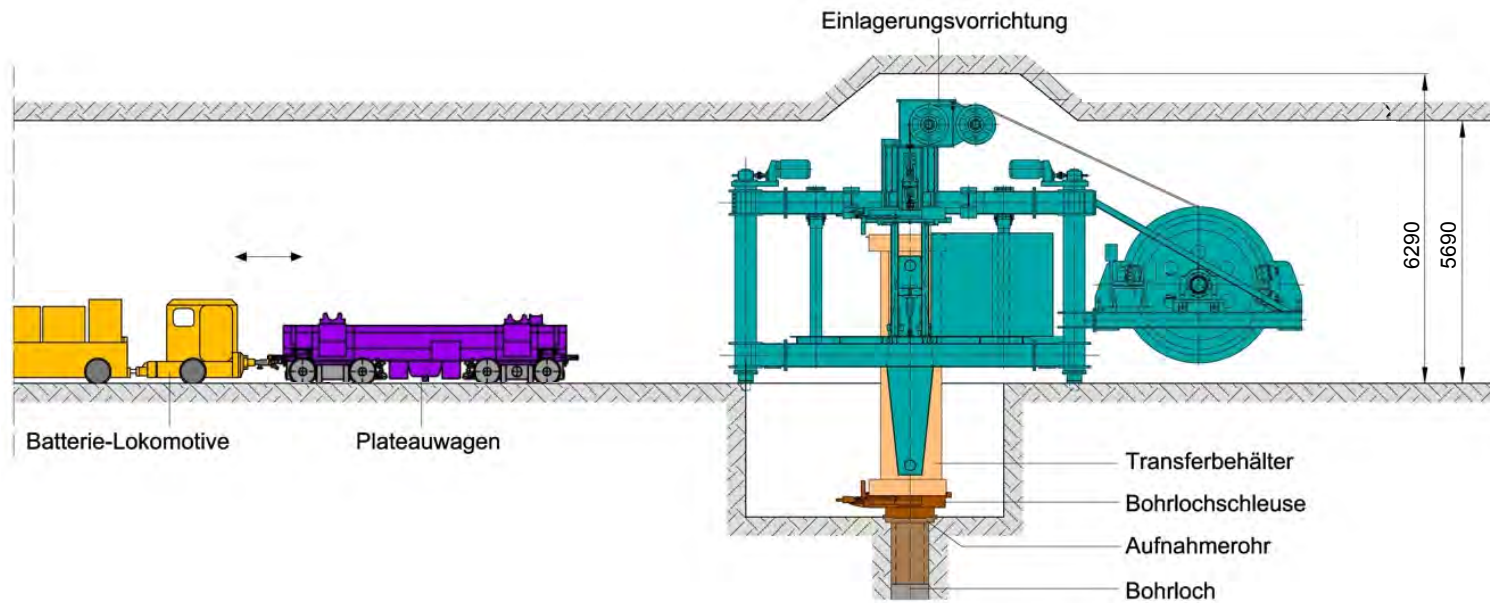
Untervariante 4/2



Gründe:

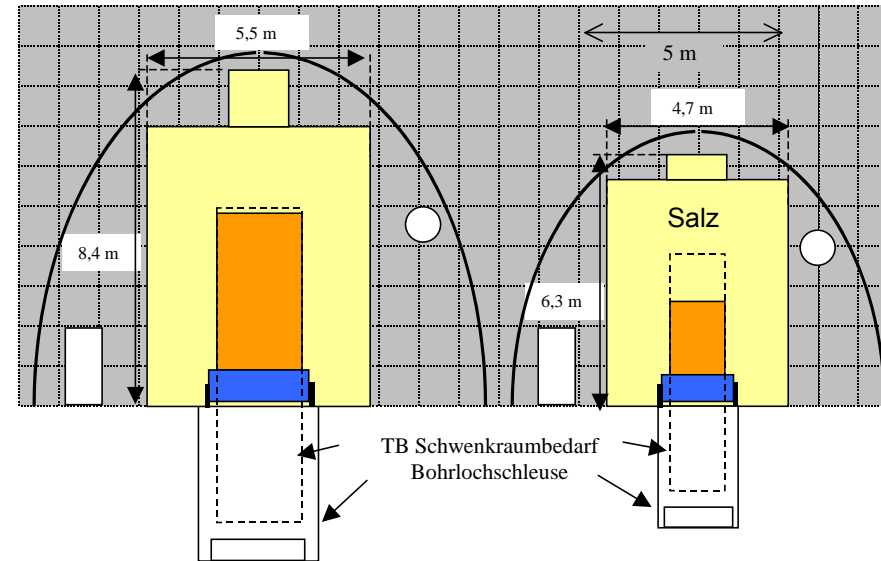
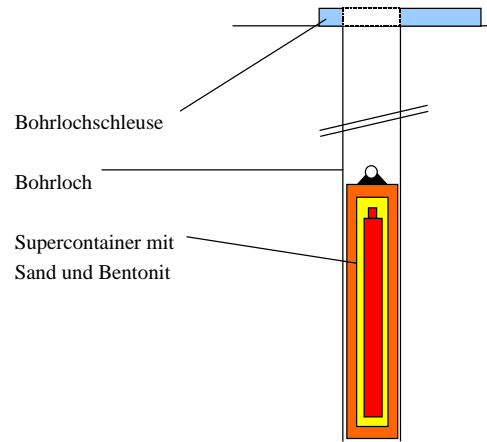
- Geringe Streckenquerschnitte (14 m²)
- Geringe Offenstandszeiten der Strecken (ca. 1 Jahr bei Streckenlänge von ca. 400 m (17 Gebinde))
- Hoher Einlagerungsfortschritt (ca. 7 Sch pro Gebinde incl. Versetzen)
- Einfache Betriebsabläufe
- Geringe Störanfälligkeit

Bohrlochlagerung BSK3 – Salzformation (DENKMAL)



Varianten für die Bohrlochlagerung

Variante 1 - BSK3 mit Sand und Bentonitummantelung in Supercontainer



- Lichter Streckenquerschnitt

- Massen

- o Supercontainer: 27,4 t
- o Transferbehälter: 99,1 t
- o Transferbehälter incl. Supercontainer: **126,5 t**

- Abmessungen

- o Länge Supercontainer: 6,32 m
- o Durchmesser Supercontainer: 1,47 m
- o Länge Transferbehälter: 6,9 m
- o Breite Transferbehälter: 2,11 m
- o Höhe Transferbehälter: 4,0 m

ca. 80 m²

(ca. 50 m²)

27,4 t

(5,3 t)

99,1 t

(46 t)

126,5 t

(51,4 t)

6,32 m

(4,98 m)

1,47 m

(0,43 m)

6,9 m

(5,57 m)

2,11 m

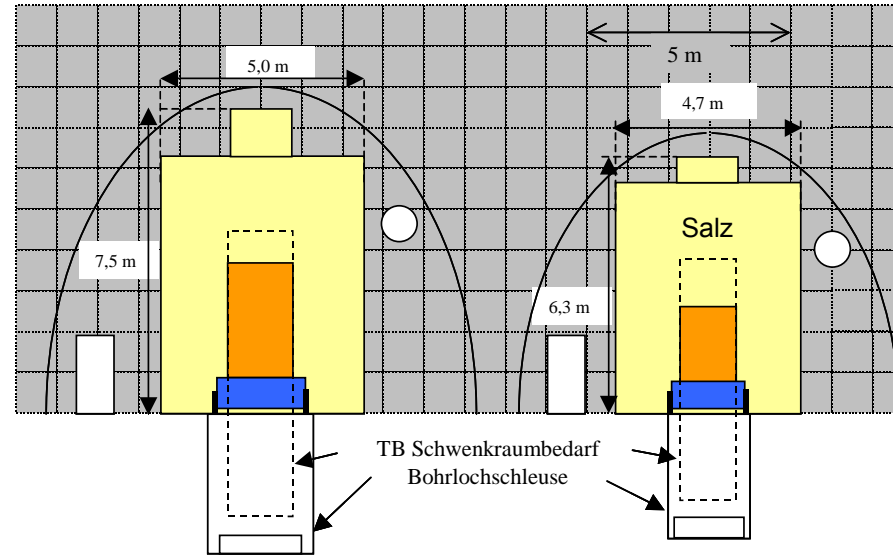
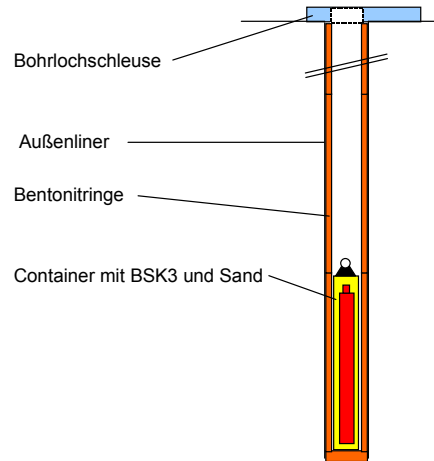
(1,33 m)

4,0 m

(1,89 m)

Varianten für die Bohrlochlagerung

Variante 2 - BSK3 mit Sand in Container, Bentonitummantelung einzeln



- lichter Streckenquerschnitt

- Massen

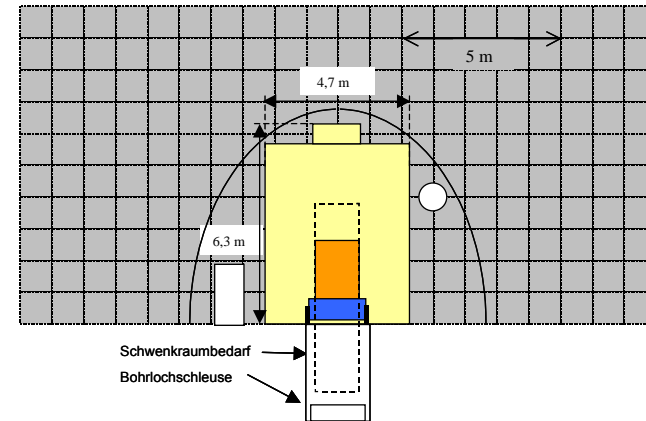
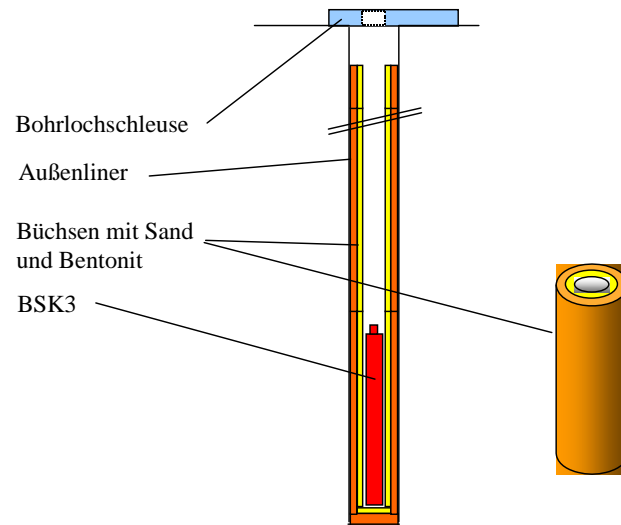
o Container:	12,1 t	(5,3 t)
o Transferbehälter:	67,5 t	(46 t)
o Transferbehälter incl. Container:	79,6 t	(51,4 t)

- Abmessungen

o Länge Container:	5,72 m	(4,98 m)
o Durchmesser Container:	0,87 m	(0,43 m)
o Länge Transferbehälter:	6,31 m	(5,57 m)
o Breite Transferbehälter:	1,63 m	(1,33 m)
o Höhe Transferbehälter:	2,76 m	(1,89 m)

Varianten für die Bohrlochlagerung

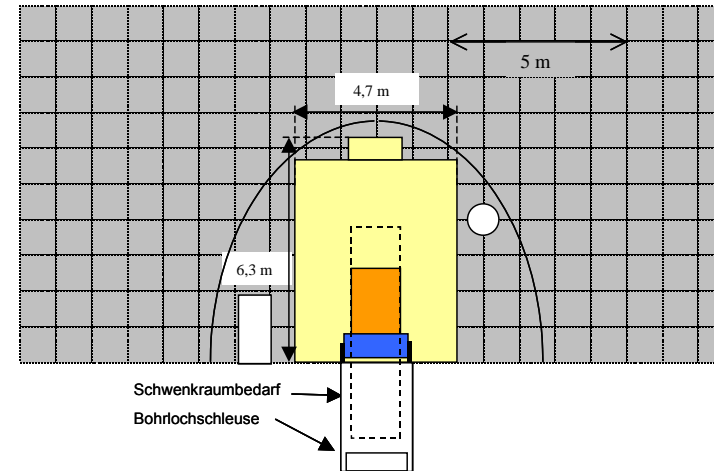
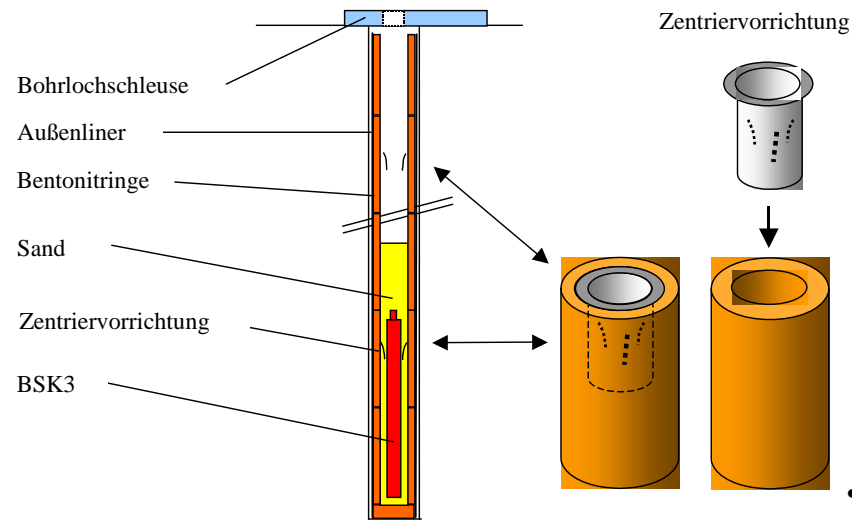
Variante 3 - Bentonitummantelung mit Sand in Büchse, BSK3 einzeln



- lichter Streckenquerschnitt ca. 50 m²
- Massen
 - o BSK3: 5,3 t
 - o Transferbehälter: 46 t
 - o Transferbehälter incl. BSK3: 51,4 t
- Abmessungen
 - o Länge BSK3: 4,98 m
 - o Durchmesser BSK3: 0,43 m
 - o Länge Transferbehälter: 5,57 m
 - o Breite Transferbehälter: 1,33 m
 - o Höhe Transferbehälter: 1,89 m

Varianten für die Bohrlochlagerung

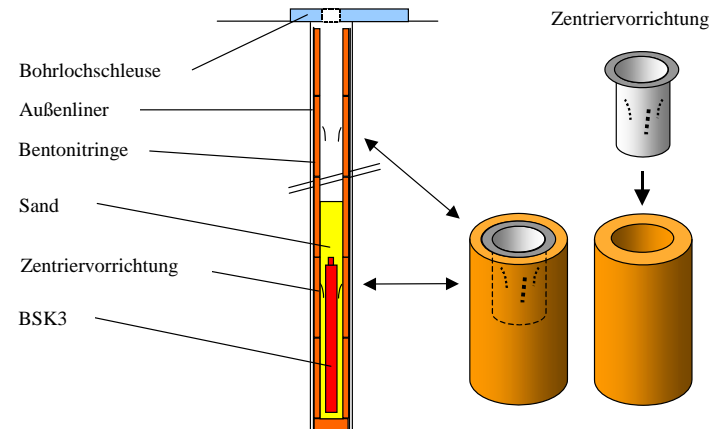
Variante 4 - BSK3, Bentonitummantelung und Sand einzeln



- lichter Streckenquerschnitt ca. 50 m²
- Massen
 - o BSK3: 5,3 t
 - o Transferbehälter: 46 t
 - o Transferbehälter incl. BSK3: 51,4 t
- Abmessungen
 - o Länge BSK3: 4,98 m
 - o Durchmesser BSK3: 0,43 m
 - o Länge Transferbehälter: 5,57 m
 - o Breite Transferbehälter: 1,33 m
 - o Höhe Transferbehälter: 1,89 m

Auswahl Vorzugsvariante für die Bohrlochlagerung

Variante 4



Gründe:

- Geringe Streckenquerschnitte (ca. 50 m²)
- Geringe Offenstandszeiten der Strecken (ca. 2,3 Jahre bei Streckenlänge von ca. 400 m (40 Gebinde))
- Geringe Massen (51,4 t für beladenen Transferbehälter)
- Geringe Spurweite und Gleisradien (ca. 2 m und 25 m)

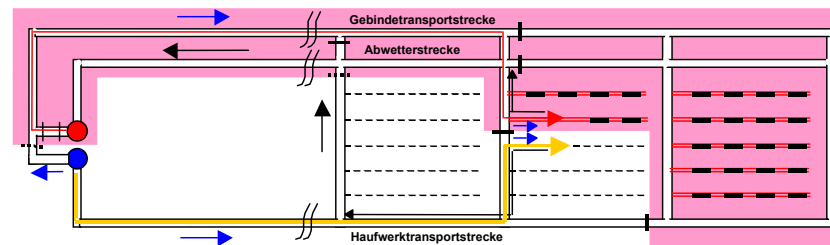
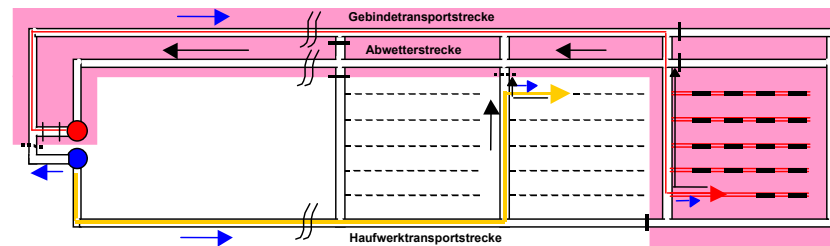
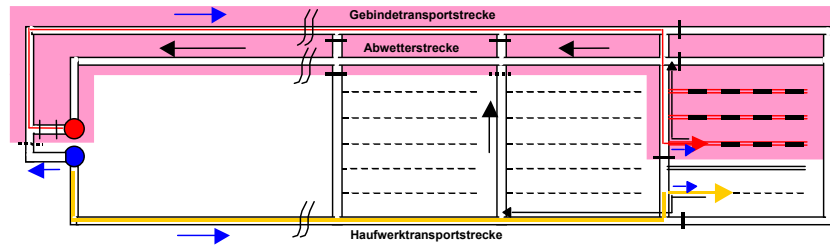
Grubengebäudeplanung

Randbedingungen:

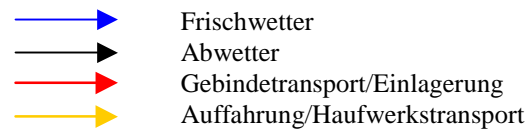
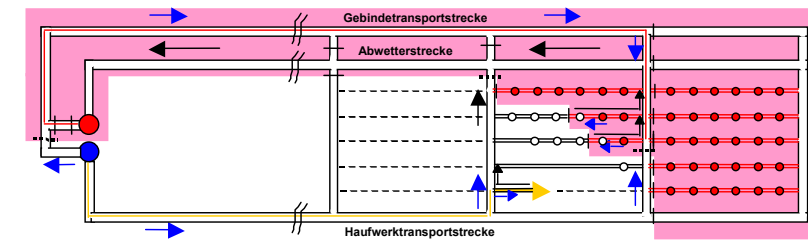
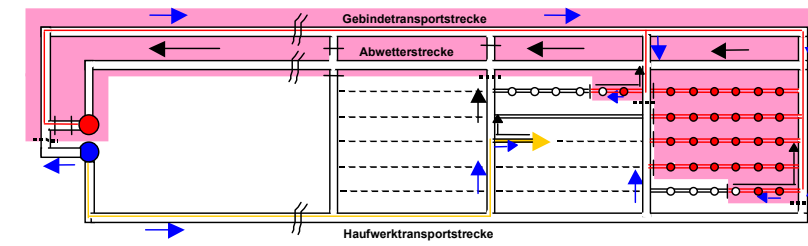
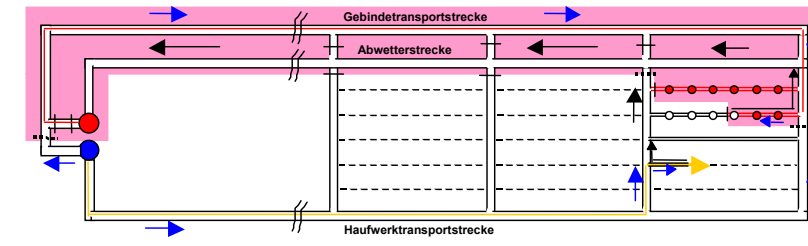
- Einsöhlige Ausrichtung des Endlagers
- Trennung Grubengebäude in Überwachungs- (ÜB) und Kontrollbereich (KB)
- Auffahraktivitäten im ÜB und Einlagerung im KB
- 2 Schächte
 - o Frischwetterschacht (ÜB): Förderschacht Haufwerk sowie Personal- und Materialtransport
 - o Abwetterschacht (KB): Gebindetransportschacht sowie Personal- und Materialtransport
- Zentrale Schachtanlage mit 2 Schächten
- Ermöglichung einer rückbauartigen Einlagerung von den Grubenfeldgrenzen zu den Schächten hin mit Abwurf bereits belegter Einlagerungsfelder
- Anordnung Einlagerungsfelder zwischen Richtstrecken (Erkundung)

ERATO

Vorzugsvariante Streckenlagerung



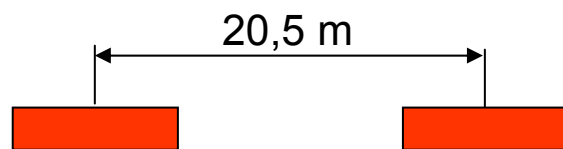
Vorzugsvariante Bohrlochlagerung



ERATO

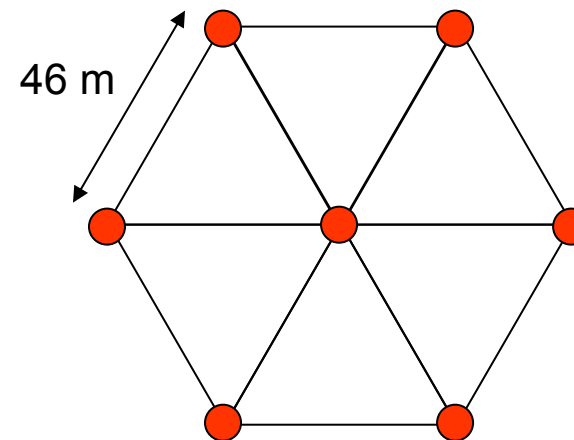
Behälterabstände/Bohrlochabstände/Streckenabstände für Standortregion Nord 1 (GENESIS)

Streckenlagerung POLLUX



Streckenmittenabstand: 34 m

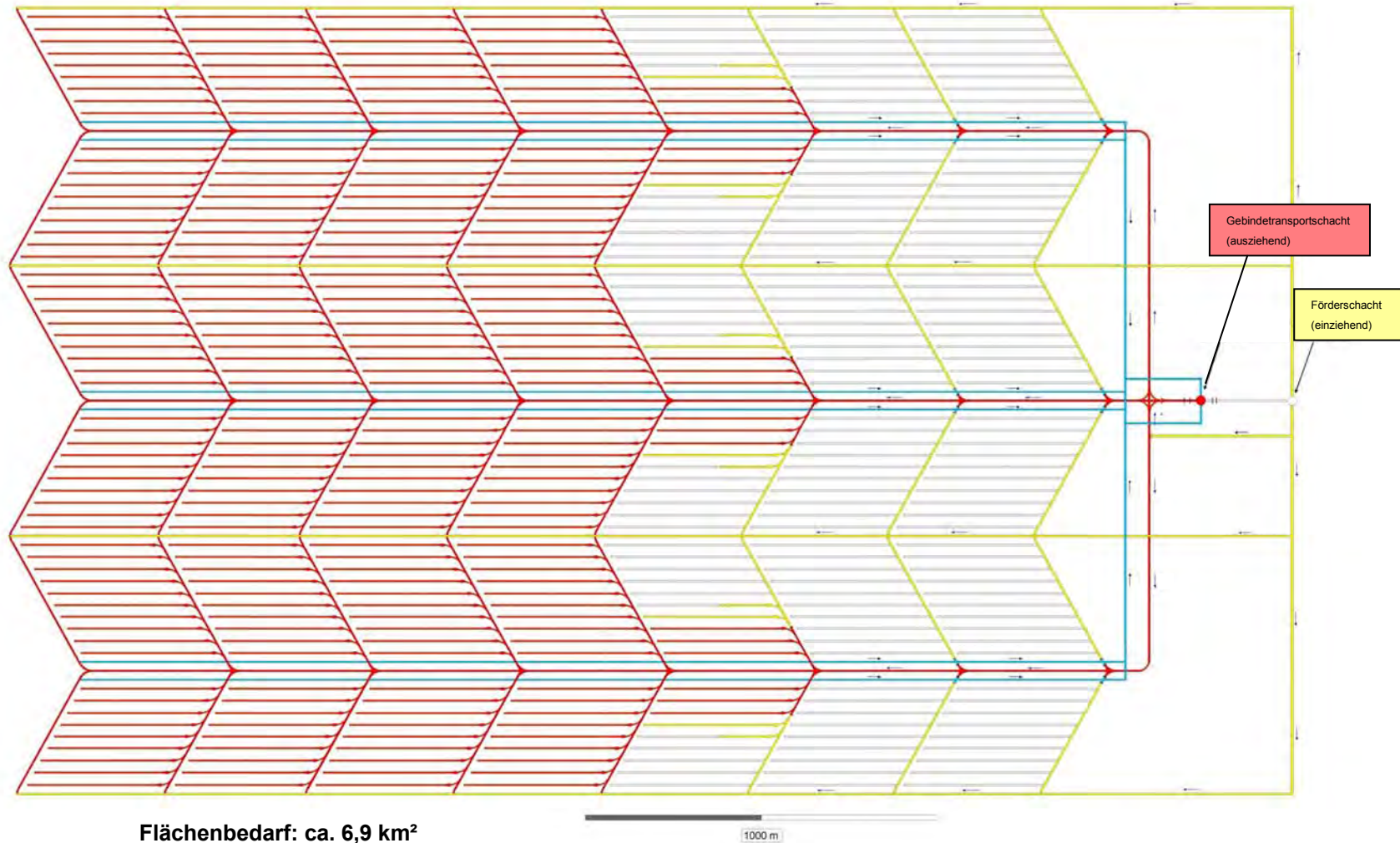
Bohrlochlagerung BSK3 (hexagonal)



Streckenmittenabstand: 40 m

ERATO

Grubengebäudeplanung - Streckenlagerung (6818 POLLUX-3BE)

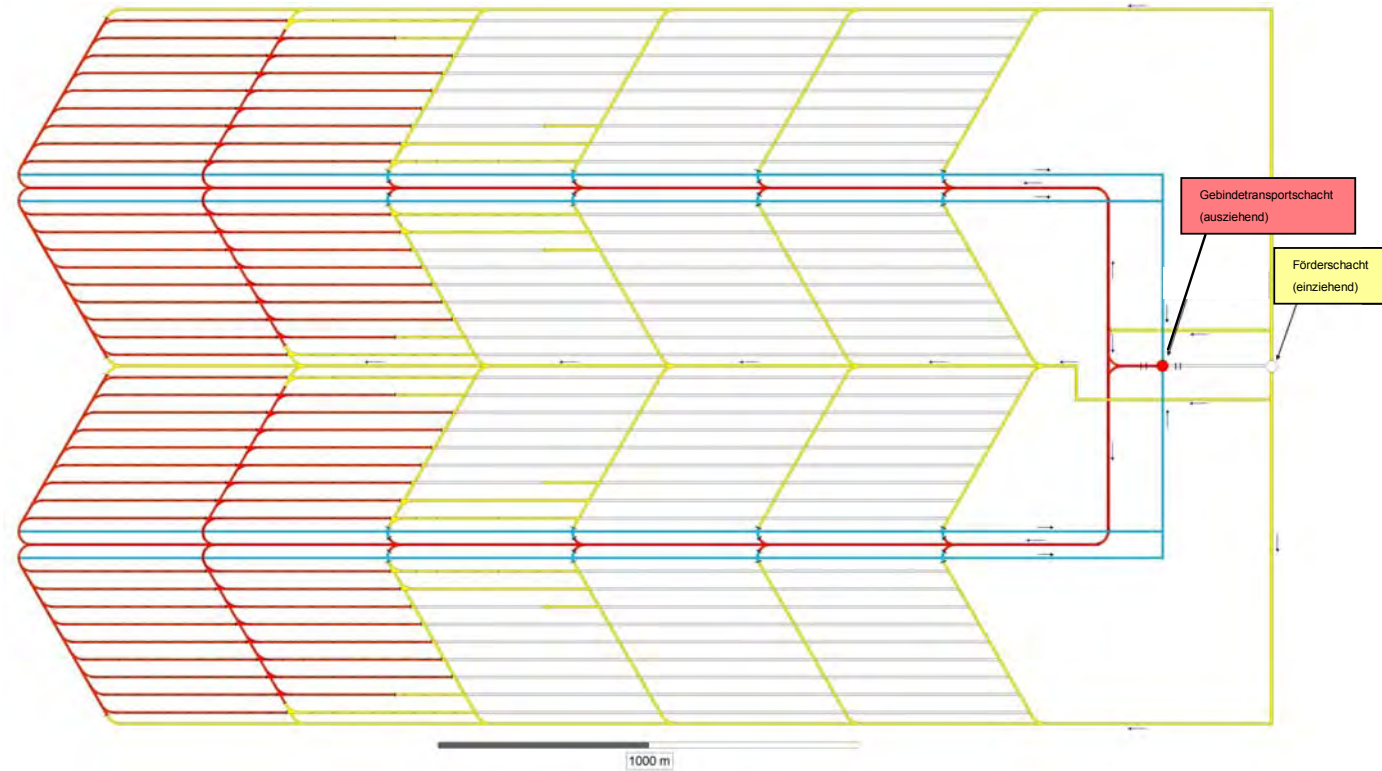


Flächenbedarf: ca. 6,9 km²

Streckenlänge: ca. 210 km

Gebindespezifisches Ausbruchvolumen: ca. 700 m³/Gebinde

Grubengebäudeplanung - Bohrlochlagerung (6818 BSK3)



Flächenbedarf: ca. 3,8 km²

Streckenlänge: ca. 100 km

Gebindespezifisches Ausbruchvolumen: ca. 740 m³/Gebinde

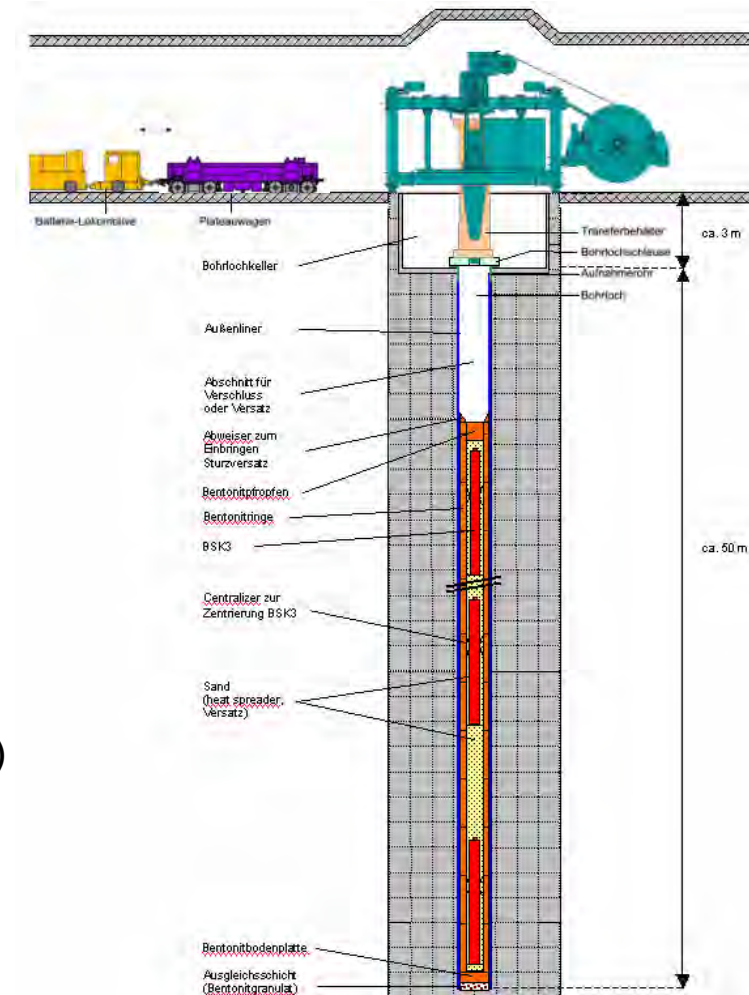
ERATO

Auswahl Vorzugsvariante für die Einlagerung ausgedienter Brennelemente

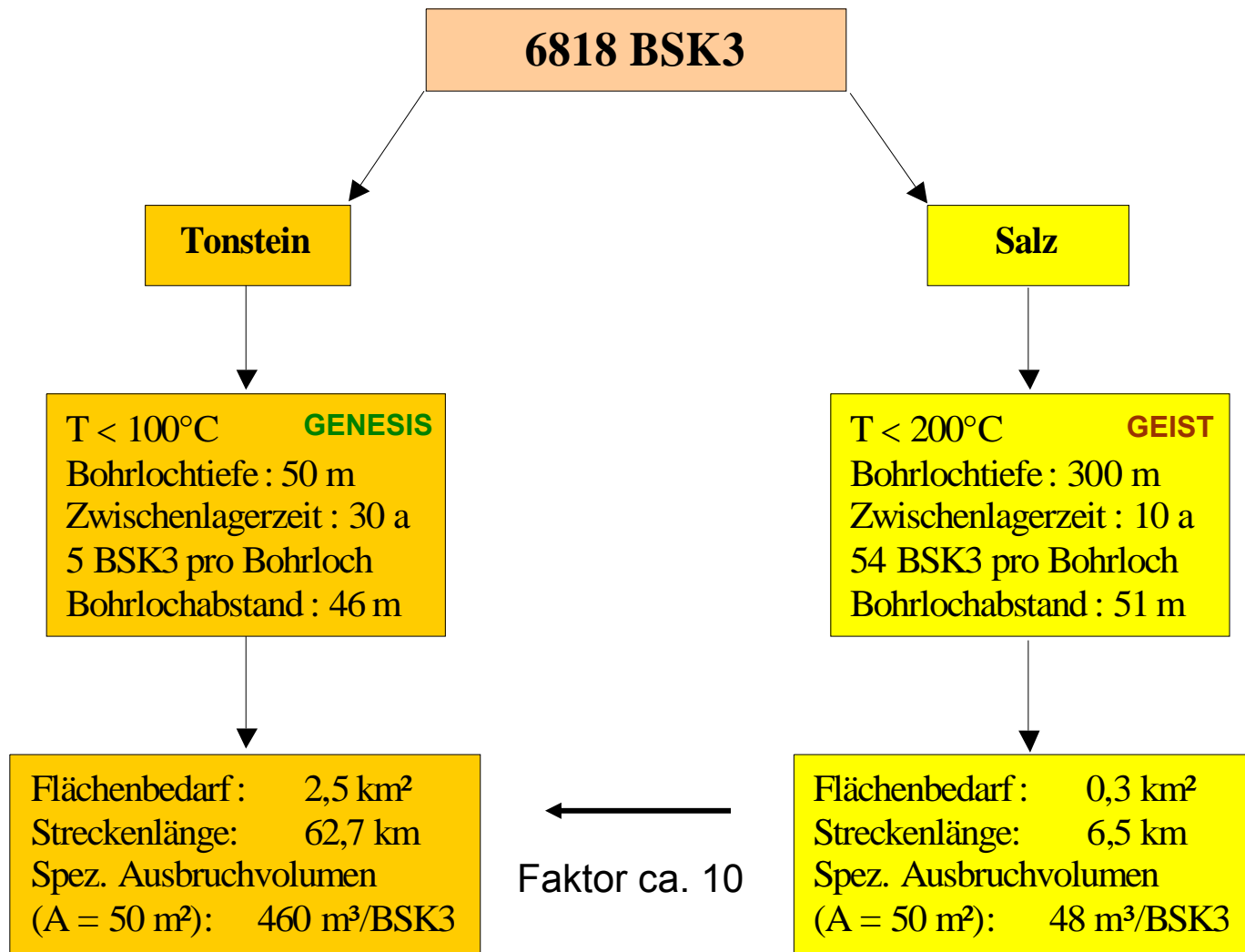
Bohrlochlagerung (Variante 4)

Gründe:

- Geringerer Flächenbedarf (ca. 3,8 km² statt 6,9 km²)
- Geringere Streckenlängen (ca. 100 km statt 210 km²)
- Geringere Massen der Transporteinheiten (ca. 51 t statt 86 t)
- Geringerer Stahlaufwand (Wasserstoffbildung durch Korrosion) (ca. 7 t statt 50 t)
- Gebirgsverbundene Einbettung von BSK3 und Bentonitbarriere



ERATO



ERATO

Herstellung der Grubenbaue

Streckenauffahrung:

Querschnittsform: bogenförmig

Auffahrung: maschinell mit TSM



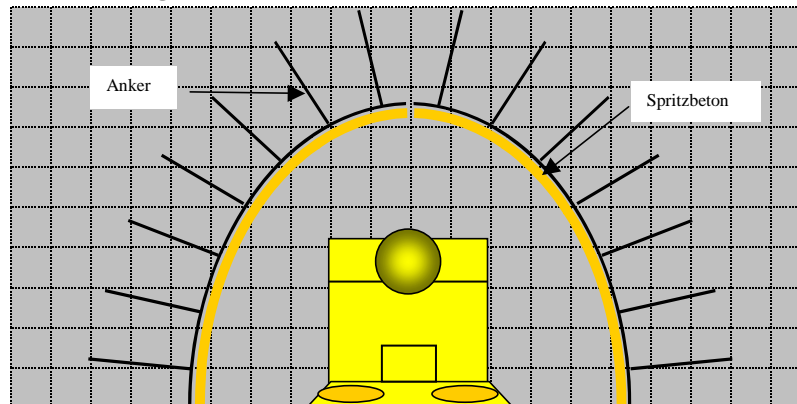
MT 300 der Fa. Sandvik Mining and Construction Central Europe GmbH

ERATO

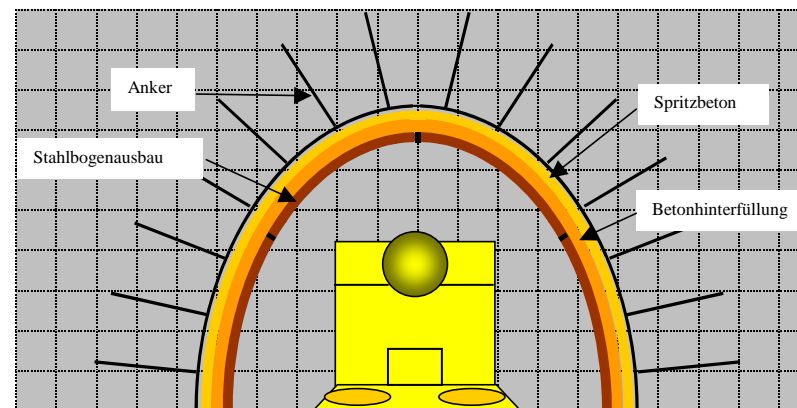
Herstellung der Grubenbaue

Streckenausbau:

kurzlebige Strecken: Anker-Spritzbeton-Ausbau



langlebige Strecken: Anker-Spritzbeton-Ausbau mit Stahlbogenausbau und Betonhinterfüllung



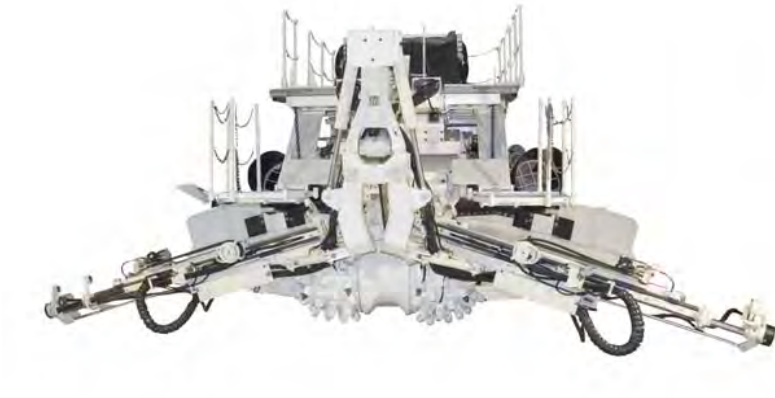
ERATO

Herstellung der Grubenbaue

Streckenausbau:

Ankerbohr- und -setzeinrichtung

auf TSM (Sandvik)



an Schienen (GTA)



ERATO

Herstellung der Grubenbaue

Streckenausbau:

Spritzbetonmanipulator Meyco Oruga



Ausbaumanipulator/-bühne GTA



ERATO

Herstellung der Grubenbaue

Herstellung der Einlagerungsbohrlöcher mit Durchmesser von 1 bis 1,5 m:

Besonderheiten:

- Bohrlöcher sind blind von oben ohne ein durchschlägiges Vorbohrloch herzustellen
- Platzverhältnisse am Bohrlochkopf sind begrenzt
- Tonstein ist feuchtigkeitsempfindlich und neigt zum Nachbrechen

Bohrverfahren mit pneumatischer Bohrkleinabförderung und indirekter Spülung

- Druckluftzufuhr über den Ringraum zwischen Bohrlochwand und Bohrgestänge mit Abdichtung des Bohrlochs mittels Ringraumprenter und Abförderung des Bohrkleins durch Bohrgestänge ==> nicht möglich (Ringraumfläche, Kräfte)
- Druckluftzufuhr über separates Rohr oder durch Ringraum eines doppelwandigen Bohrgestänges mit Abförderung des Bohrkleins im Zentrum des Bohrgestänges (mit Zellenradschleuse am Bohrkopf zum Einschleusen des Bohrkleins in den Luftstrom)
- Abförderung des Bohrkleins durch Absaugen über Rohr

ERATO

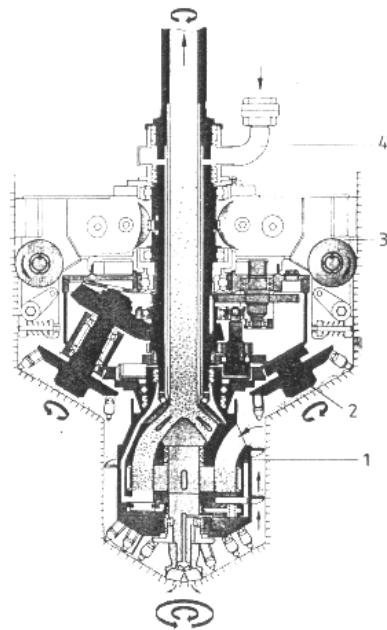
Herstellung der Grubenbaue

Herstellung der Einlagerungsbohrlöcher:

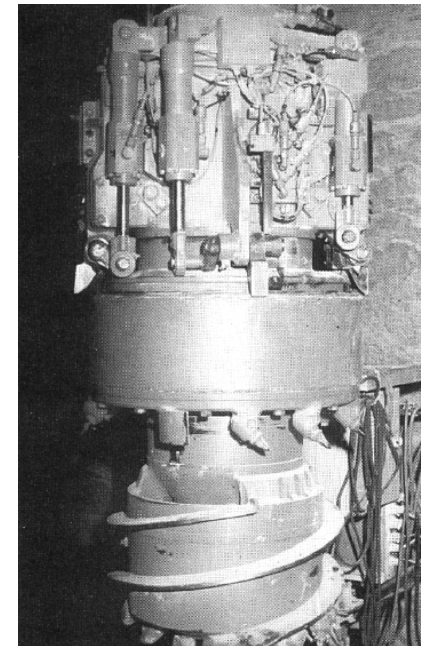
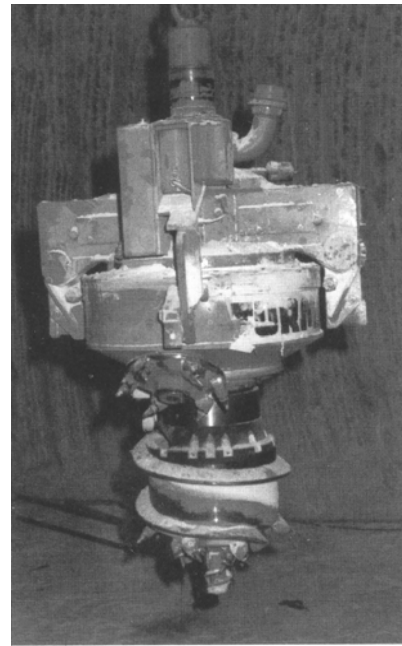
Pneumatische Bohrkleinabförderung mit indirekter Spülung und Zellenradschleuse für Herstellung Einlagerungsbohrlöcher in Salzformation auf FB ASSE (GSF -Turmag):

SBK 1000: D = 1,0 m, T = 300 m
T_{err} = 212 m

SBK 600: D = 0,6 m, T = 600 m
T_{err} = 347 m



1. Zellenradschleuse
2. Planeten -Erweiterungsbohrkopf
3. Fräsergetriebe
4. Hauptwelle mit Spülkopf



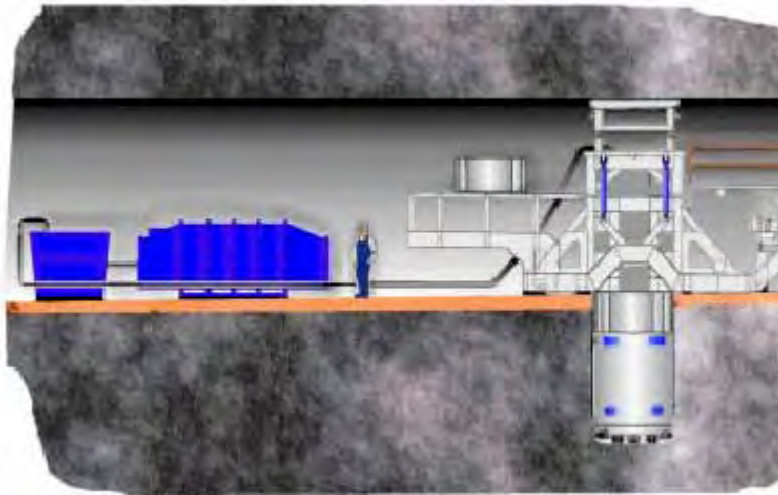
ERATO

Herstellung der Grubenbaue

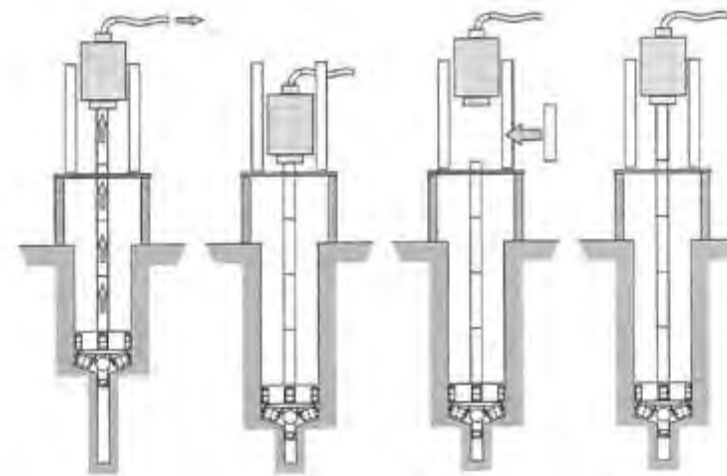
Herstellung der Einlagerungsbohrlöcher:

Pneumatische Bohrkleinabförderung mit indirekter Spülung und Absaugung für Herstellung Einlagerungsbohrlöcher (T = 9 m, D = 1,75 m) in Granitformation (Untertagelabor Äspö, Schweden):

Robbins SBM 1.8



Reverse Raise Boring



Bohren

Stopp

Verlängern
Gestänge

Bohren

ERATO

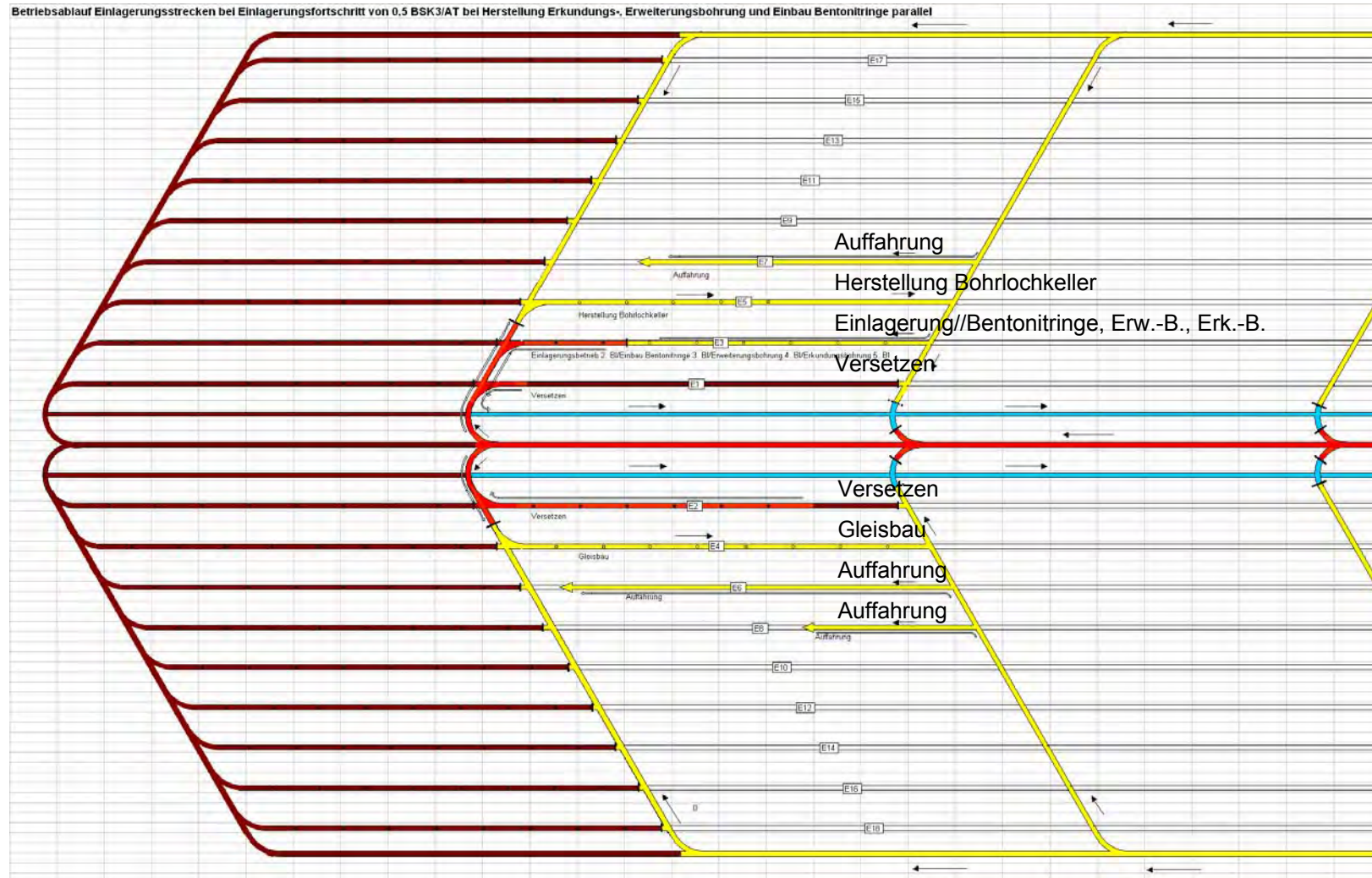
Herstellung der Grubenbaue

Herstellung der Bohrlochkeller:

Kettenschrämmaschine - Korfmann Schrämmaschine HSTK 60 NS



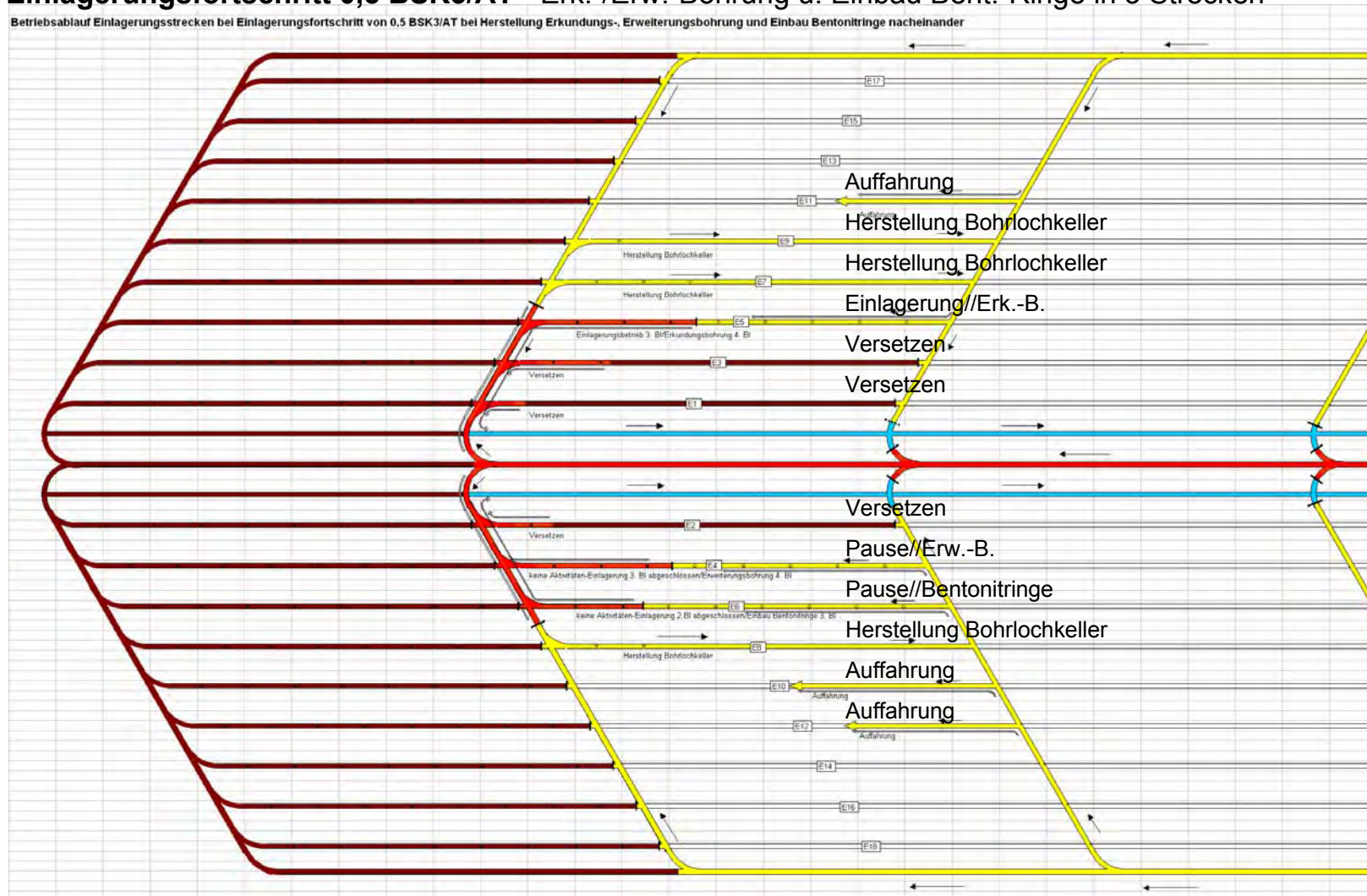
Einlagerungsfortschritt 0,5 BSK3/AT - Erk.-/Erw.-Bohrung u. Einbau Bent.-Ringe in 1 Strecke



11 Betriebspunkte in 8 Strecken

Einlagerungsfortschritt 0,5 BSK3/AT - Erk.-/Erw.-Bohrung u. Einbau Bent.-Ringe in 3 Strecken

Betriebsablauf Einlagerungsstrecken bei Einlagerungsfortschritt von 0,5 BSK3/AT bei Herstellung Erkundungs-, Erweiterungsbohrung und Einbau Bentonitringle nacheinander



13 Betriebspunkte in 12 Strecken

ERATO

DANKE



Erato - Simon Vouet (1590 – 1649)

Vom Anhydritszenario zum sicheren Einschluss

Evolution des Sicherheitsnachweises für Endlager im Steinsalz

K.-J. Röhlig, Institut für Endlagerforschung, Technische Universität Clausthal
J. Krone, DBE TECHNOLOGY GmbH

1 Einführung

Die Methodik des Langzeitsicherheitsnachweises für die Tiefenlagerung (geologische Endlagerung) radioaktiver Abfälle hat in den vergangenen 40 Jahren tief greifende Entwicklungen und Veränderungen durchlaufen. Nach Auffassung der Autoren ist es durchaus gerechtfertigt, von einem Paradigmenwechsel zu sprechen: Während die frühe Phase der Entwicklung durch eine besondere Rolle numerischer Nuklidfreisetzungs- und –migrationsrechnungen und der damit einhergehenden Ermittlung potenzieller radiologischer Konsequenzen gekennzeichnet war, werden solche Rechnungen heute in das viel breitere Konzept des *Safety Case* (im deutschen Sprachraum häufig als Sicherheitsnachweis bezeichnet) eingebettet: Die numerische Modellierung ist nunmehr nur eine in einer Reihe von Argumentationslinien, mit denen die Langzeitsicherheit belegt wird. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass sich diese Argumentationslinien – und damit auch die Modellrechnungen – viel eingehender mit den vom Endlager-system wahrzunehmenden Sicherheitsfunktionen (z. B. Stabilität, Einschluss, Behinderung/Verzögerung von Migrationsvorgängen) befassen und die Bedeutung reiner Nuklidfreisetzungs- und –migrationsrechnungen abnimmt. Diese Weiterentwicklung der Nachweiskonzepte steht in einem engen Zusammenhang mit den Fortschritten bei der Endlagerentwicklung, wie sie in allen wichtigen Endlagerprogrammen zu beobachten ist.

Nachfolgend sollen diese Entwicklungen anhand von Beispielen aus dem In- und Ausland und aus internationalen Organisationen beschrieben und belegt und im Hinblick auf das Konzept einer Endlagerung bestrahlten Kernbrennstoffs und verglasten hoch radioaktiver Abfälle im Steinsalz eingeordnet werden.

2 Von der isolierten Sicherheitsanalyse zum Safety Case

Bis in die 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts hinein galt als zentrales Element der Nachweisleitung eine Form der Sicherheitsanalyse, die im Wesentlichen auf der Ableitung und anschließenden numerischen Modellierung von Freisetzungsszenarien beruhte. Berechnete Konsequenzen wurden mit radiologischen Kriterien (meist jährliche Individualdosis oder Individualrisiko) verglichen und anhand dieses Vergleichs Schlüsse hinsichtlich der Langzeitsicherheit gezogen. Dieses – sicher auch Traditionen aus der Analyse der Sicherheit anderer nuklearer Einrichtungen im Hinblick auf den konventionellen Strahlenschutz geschuldete – Konzept

war nach Auffassung der Autoren von vornherein nicht ganz schlüssig: Das Erreichen eines Ziels (Einschluss der Abfälle) sollte anhand der Nichteinhaltung dieses Ziels (Radionuklidfreisetzung) gemessen werden.

Die Modellierung konzentrierte sich dabei auf die Migration in der Geosphäre (einschließlich oberer Aquifersysteme) und Prozesse wie Rückhaltung und Verdünnung. Ein entsprechend hoher Aufwand wurde in Übungen zur Kalibrierung, Verifizierung und Validierung der verwendeten Modelle investiert [1][2][3][4][5]. Deren Wert wurde jedoch u.a. durch die Polemik von Konikow und Bredehoeft "Groundwater models cannot be validated" (1992) [6] ernsthaft infrage gestellt. Über die in dieser Polemik und den daran anschließenden Diskussionen [7][8][9] aufgeworfenen Fragestellungen hinausgehend sei hier auch angemerkt, dass sich die Modellierung von teilweise relativ oberflächennahen Systemen über Zeiträume erstreckte, für die die zugrunde liegenden Annahmen u.U. nicht mehr gültig waren (etwa wegen einer Veränderung von Aquifersystemen aufgrund von Eiszeiten).

Auch für das in Deutschland betrachtete Konzept einer Endlagerung im Steinsalz wurde im Wesentlichen dieser Weg verfolgt: Zwar wurde einerseits der Einschluss der Abfälle durch das konvergierende Steinsalz und die sich mit der Konvergenz verdichtenden Versatzmaterialien reklamiert, andererseits diese Behauptung aber nicht ausreichend belegt und statt dessen Analysen auf der Basis von konservativen Freisetzungsszenarien durchgeführt [10][11][12][13][14][15][16]. Die pessimistischen Annahmen, die diesen Szenarien zugrunde lagen (durchgehende Anhydritbänder, große unentdeckte Laugennester in der Nähe der Einlagerungsorter, frühzeitiges Versagen von Verschlüssen) haben sich nicht in jedem Fall bestätigt und stehen im Widerspruch zum vorrangigem Sicherheitsziel, dem langfristigen Einschluss der Abfälle.

Angesichts der oben erwähnten Probleme hinsichtlich der Verifizierung und Validierung und damit der Vertrauensbildung in die bei Analysen verwendeten Modelle, aber auch wegen der Schwierigkeiten, eine gesellschaftliche Akzeptanz für Endlagerprojekte zu erhalten, und der damit verbunden Rückschläge bildete sich seit den 90er Jahren insbesondere aufgrund von Arbeiten im Rahmen der OECD/NEA das Konzept des *Safety Case* heraus [17][18][19][20]. Dieses Konzept beruht im Wesentlichen auf zwei Elementen:

- **Integrierendes Element.** Ein *Safety Case* entsteht durch die Zusammenführung der sicherheitsrelevanten Elemente und Argumente aus Standorterkundung, Forschung, Endlagerentwicklung- und -auslegung, Sicherheitsanalyse u.v.m. Im Unterschied zur eher isolierten Stellung der Sicherheitsanalyse wird damit dem Gedanken Rechnung getragen, dass Sicherheit kein im engen Sinne normier- und berechenbares Konzept ist, ihr Nachweis erst aus der Gesamtheit von Schutzgedanken, Erkenntnissen, Konzepten, Analysen und dem damit verbundenen Vertrauen entsteht.

- **Dynamisches Element:** Der *Safety Case* bildet eine Basis für Entscheidungen, die an bestimmten Haltepunkten in einem schrittweisen Entwicklungsprozess (z.B. Übergang von über- zu unterirdischer Standorterkundung, Feststellung der Standorteignung, Beginn der Errichtung), zu treffen sind. Hierfür ist es notwendig, dass der *Safety Case* schrittweise weiterentwickelt wird und das Erreichte wie auch das noch zu Erreichende (z.B. offene wissenschaftliche Fragen und Pläne, wie diese zu lösen sind) darstellt. Je nach nationaler Situation, Regelwerk, Konzeption und Stadium des Endlagerprogramms erfolgen die genannten Entscheidungen entweder durch den Betreiber / Entwickler oder in Form einer Genehmigungserteilung, ggf. auch als legislativer Akt.

Inzwischen wurden einige Sicherheitsberichte erstellt, die diesen Gedanken gerecht werden [21][22][23]. Dabei hat sich gezeigt, dass als integrierendes Element von Sicherheitsberichten der Formulierung und Handhabung so genannter Sicherheitsfunktionen eine besondere Bedeutung zukommt. Im allgemeinsten Fall sind dies z.B. die Isolation und der Einschluss der Abfälle, die mechanische, hydraulische und chemische Stabilität und die Behinderung und/oder Verzögerung von Migrationsvorgängen [19]. Je nach Wirtsgestein und Endlagerkonzept werden diese Funktionen unterschiedlich verfeinert und über unterschiedliche Zeiträume von verschiedenen Komponenten des Systems wahrgenommen. Beispiele sind etwa die Funktionen „Kolloidfilterung“ oder „Dämpfung von Scherbewegungen“, die im schwedischen KBS-3-Konzept durch den Bentonitpuffer wahrgenommen werden sollen [23]. Es hat sich gezeigt, dass Sicherheitsfunktionen

- das eigentliche Abbild des Ziels eines Endlagerprojekts sind,
- durch die Schaffung einer gemeinsamen Sprache eine integrierende Wirkung auf die an der Endlagerentwicklung beteiligten Fachleuten verschiedener Disziplinen (Geowissenschaftler, Ingenieure, Analysten, ...) ausüben und
- ein grundlegendes Werkzeug der Sicherheitsanalyse, insbesondere im Hinblick auf die Ableitung von Szenarien, sein können.

3 Entwicklungen der letzten Jahre in Deutschland

In den vergangenen Jahren sind in Deutschland – parallel zu den oben beschriebenen Entwicklungen im Ausland bzw. in internationalen Organisationen – folgende wichtige Fortschritte zu verzeichnen:

1. Die Erkundung des Standortes Gorleben ergab u.a. Erkenntnisse über die geologische Integrität der potenziellen Hauptbarriere. Es existieren genügend große Homogenbereiche in den Steinsalzen der Staßfurt-Folge, die nahezu frei von Lösungsvorkommen sind. Da außer-

dem der Hauptanhydrit in isolierte Schollen zerbrochen ist, fehlen wesentliche Voraussetzungen für die oben beschriebenen Freisetzungsszenarien [24].

2. Im Hinblick auf das Verhalten technischer und geotechnischer Barrieren wurden wesentliche Fortschritte beim Verständnis der Salzgruskompektion erzielt und ingenieurtechnische Nachweiskonzepte für Strecken- und Schachtverschlüsse entwickelt [25].

3. Im Rahmen der Formulierung von Kriterien und Verfahren für eine Standortauswahl wurden durch den „Arbeitskreis Endlagerstandorte“ (AKEnd) das Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eingeführt, Anforderungen an diesen Bereich formuliert und damit grundlegende Vorstellungen für die Zuordnung von Sicherheitsfunktionen zu den geologischen Komponenten etabliert: Die Funktionen des Einschlusses bzw. der Behinderung der Migration sind durch die Geologie im Verbund mit den technischen und geotechnischen Barrieren und nicht – wie im KBS-3-Konzept – durch technische Barrieren zu leisten [26].

4. In die noch andauernde Entwicklung von Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wurden die oben skizzierten Gedanken eines integrierten *Safety Case* eingebracht. Es wurden Anforderungen entworfen, die vom Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgehen und auf Kriterien basieren, die sich nicht vorrangig an Freisetzungsberechnungen orientieren, sondern die Demonstration des Einschlusses der Abfälle und damit auch die Einhaltung der Schutzziele zum Gegenstand haben. Im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit steht weniger die über lange Zeiträume ohnehin nicht belastbare Modellierung radiologischer Konsequenzen, sondern der viel besser prognostizierbare und sicherheitsrelevante einschlusswirksame Gebirgsbereich [27][28].

5. Im Rahmen des FUE-Projekts ISIBEL wurde ein Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Steinsalz erarbeitet, das auf dem systematischen Nachweis des langfristigen Einschlusses der Abfälle beruht. Über den Integritätsnachweis für die geologische und für die geotechnischen Barrieren und aus der Prognose der Kompaktion des Salzgrusversatzes wird die Annahme des Einschlusses als Szenario der erwarteten Entwicklung gerechtfertigt. Gestörte Entwicklungen und evtl. damit verbundene Radionuklidfreisetzungen) können sich lediglich bei einer Verletzung der Integrität ergeben. Die Bewertung daraus resultierender radiologischer Konsequenzen erfolgt dann komplementär zum Nachweis des langfristigen Einschlusses [29].

4 Perspektiven

Die Stärken des Konzepts der Einlagerung im Steinsalz werden nur sichtbar, wenn die Sicherheitsfunktion „Einschluss“ in den Sicherheitsberichten und Analysen gewürdigt und belegt wird. Das Konzept des *Safety Case* bietet hierzu den geeigneten Rahmen. In einem sol-

chen *Safety Case* ist es aber erforderlich, das Funktionieren der geologischen Barriere Salzstock wie auch der der technischen und geotechnischen Barrieren (Versatz, Verschlüsse) aufzuzeigen. Diesbezüglicher FUE-Bedarf besteht insbesondere hinsichtlich der technischen Barrieren. Schwerpunkte künftiger FUE-Arbeiten zum weiteren sicherheitstechnischen Durchdringen und zur Optimierung des Konzeptes sollten

- die langfristige quantitative Prognose der Kompaktion von Salzgrus als Versatz,
- der Nachweis der Langzeitintegrität von Verschlussbauwerken und
- die Verheilung bzw. Vergütung der Auflockerungszone

sein.

Literatur

- [1] Larsson A. 1992. The international projects INTRACOIN, HYDROCOIN and INTRAVAL. *Advances in Water Resources*, vol. 15, 85-87.
- [2] SKI and NEA, 1987. The International INTRACOIN Project, Background and Results. OECD, Paris.
- [3] SKI and NEA, 1992. The International HYDROCOIN Project, Summary Report. OECD, Paris.
- [4] SKI and NEA, 1996. The International INTRAVAL Project, Final Results. OECD, Paris.
- [5] NEA, 1995. GEOVAL '94: Validation through model testing, Proceedings of an NEA/SKI Symposium, Paris, France, 11-14 October 1994.
- [6] Konikow L.F. & Bredehoeft J.D. 1992. Ground-water models cannot be validated. *Advances in Water Resources*, vol. 15, 75-83.
- [7] de Marsily G., Combes P. & Goblet P. 1992. Comment on 'Ground-water models cannot be validated', by L. F. Konikow & J. D. Bredehoeft. *Advances in Water Resources*, vol. 15, 367-369.
- [8] Bredehoeft J.D. & Konikow L. F. 1992. Reply to Comment. *Advances in Water Resources*, vol. 15, 371-372.
- [9] Oreskes N., Shrader-Frechette K. & Belitz K. 1994. Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, New Series, vol. 263, No. 5147, 641-646.
- [10] KFK 1984. Systemstudie Andere Entsorgungstechniken (SAE), Kurzfassung, KWA Nr. 2190/1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH.

- [11] KFK 1989. Systemanalyse Mischkonzept (SAM), Abschlussbericht Hauptband, KWA Nr. 2190A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- [12] DBE 1996. Systemanalyse Endlagerkonzepte (SEK) , Abschlussbericht - BMFT FE-Vorhaben FKZ 02E820, Hauptband, DEAB T59.
- [13] Storck, R., Aschenbach J., Hirsekorn, R.-P., Nies, A. & Stelte, N. 1988. Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste (PAGIS): Disposal in Salt Formations. EUR 11 778 EN, GSF-Bericht 23/88. Commission of the European Communities, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Brussels-Luxembourg.
- [14] Hirsekorn R.-P., Nies A., Rausch H. & Storck R. 1991. Performance Assessment of Confinements for medium-level and -contaminated Waste (PACOMA Project). Rock Salt Option. Final Report. EC, EUR 16634 EN, Luxembourg.
- [15] Becker A., Fischer H., Hofer E., Kloos M., Krzykacz B., Martens K.-H. & Röhlig K.-J. 1997. **E**valuation of **E**lements **R**esponsible for the effective **E**ngaged dose rates associated with the final **S**Torage of radioactive waste: EVEREST project, Volume 3a: Salt Formation, site in Germany. EC, EUR 17449/3a EN, Luxembourg.
- [16] Martens K.-H., Fischer, H., Hofer, E. & Krzykacz-Hausmann, B. 2000. Stochastic and deterministic analyses for a generic repository in rock salt in the EU Project SPA "Spent Fuel Performance Assessment". BMU-Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-2000-550.
- [17] NEA, 2002. Establishing and Communicating Confidence in the Safety of Deep Geologic Disposal ("Confidence Paper"). OECD, Paris.
- [18] NEA, 2004. Post-closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purpose ("Safety Case Brochure"). OECD, Paris.
- [19] IAEA, 2006. Safety Standards WS-R-4 „Geological disposal of radioactive waste“. Safety Requirements. Vienna.
- [20] NEA, 2008. "Safety cases for the deep disposal of radioactive waste: Where do we stand?" Symposium Proceedings, 23-25 January 2007, Paris, France. OECD, Paris.
- [21] NAGRA 2002. Project Opalinus Clay, Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Wetztingen/Switzerland.
- [22] ANDRA, 2005. Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation ("Dossier 2005 Argile"). Châtenay-Malabry.
- [23] SKB, 2006. Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. TR-06-09, Stockholm.
- [24] Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Steinsalz; Geologisches Referenzmodell für ein HAW-Endlager im Salz; Technischer Bericht: Beitrag für das Projekt ISIBEL, BGR, Hannover, Juli 2007

- [25] Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine **sicherheitliche Bewertung** von **Endlagern** für HAW - ISIBEL, AP5: Nachweis der Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren, DBE TECHNOLOGY GmbH, April 2008
- [26] Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte 2002. Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Köln.
- [27] Röhlig K.-J., Baltés B., Becker A. & Kindt A., 2008. Focus on Isolation and Containment Rather than on Potential Hazard: An Approach to Regulatory Compliance for the Post-Closure Phase. in [20]
- [28] Bundesamt für Strahlenschutz, 2007. Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Dokumentation und Ergebnisse des Workshops am 6.7. März 2007, BfS Salzgitter.
- [29] Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine **sicherheitliche Bewertung** von **Endlagern** für HAW - ISIBEL, DBE TECHNOLOGY GmbH, April 2008

Vom Anhydritszenario zum sicheren Einschluss

Evolution des Sicherheitsnachweises für Endlager im Steinsalz

K.-J. Röhlig, Institut für Endlagerforschung

J. Krone, DBE Technology

11.06.2008

Themen

- Von der isolierten Sicherheitsanalyse zum Safety Case: internationale und nationale Entwicklungen
 - Vorgeschichte: Die Bedeutung von Freisetzungsrechnungen für den Nachweis – das Beispiel “Anhydritszenario”. Die “Krise der Sicherheitsanalyse”.
 - Das Konzept “Safety Case”
 - Sicherheitsfunktionen

- Entwicklungen der letzten Jahre in Deutschland
 - System- und Sicherheitsanalysen
 - Standorterkundung
 - F&E zur Barrierenwirksamkeit
 - AKEnd
 - Sicherheitskriterien / -anforderungen
 - ISIBEL und der sichere Einschluss

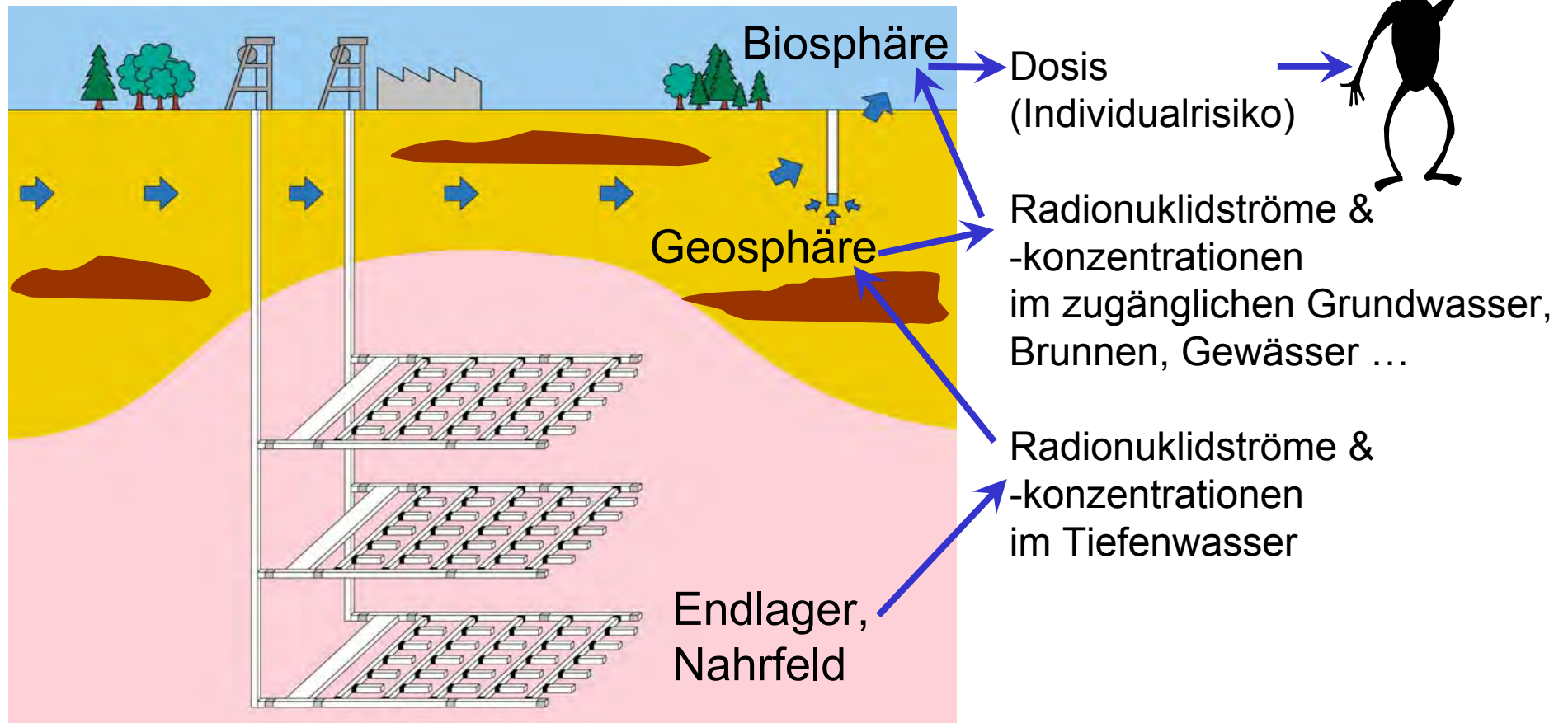
- Perspektiven

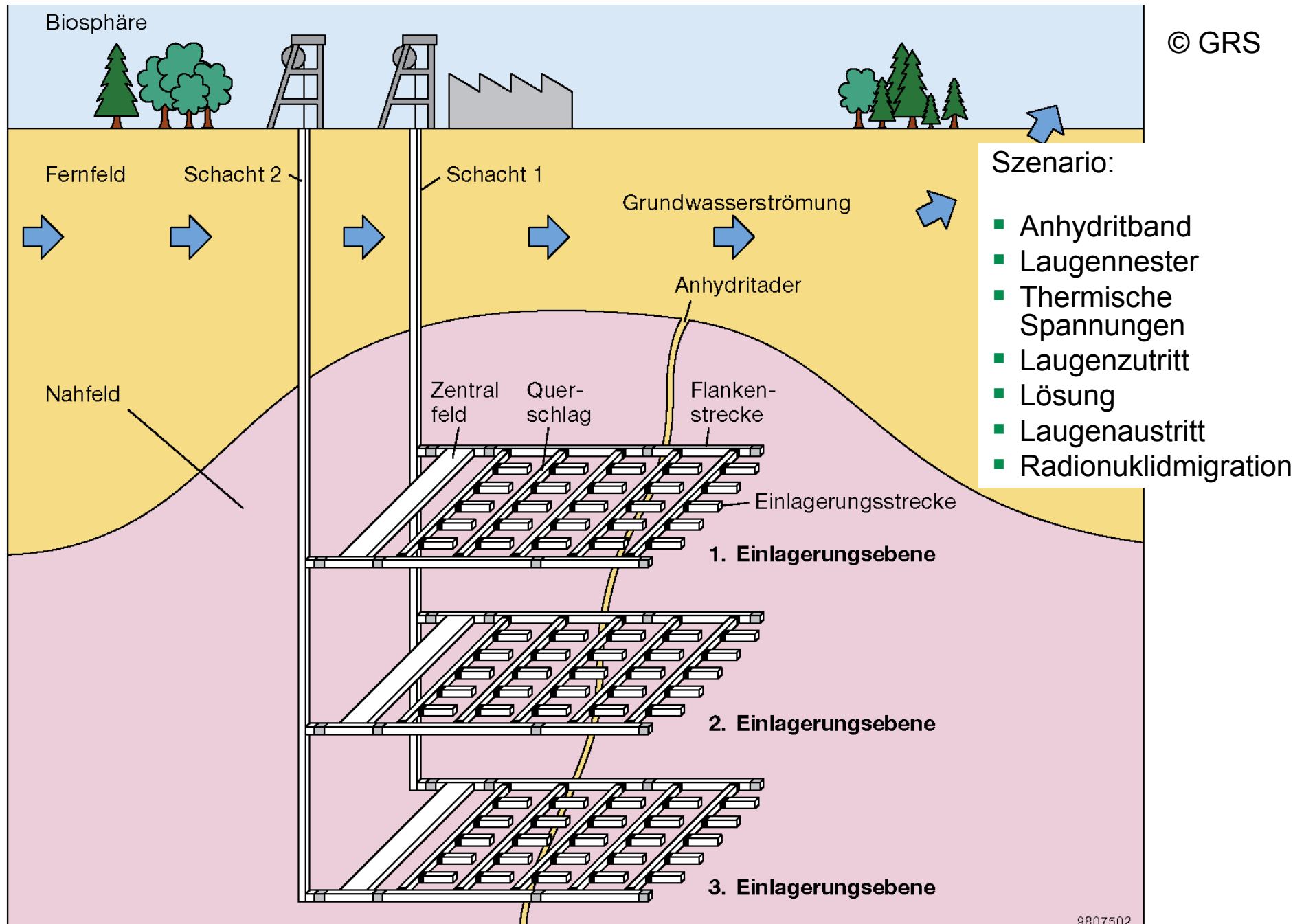
Der vielbeschworene “Safety Case”: Vorgeschichte

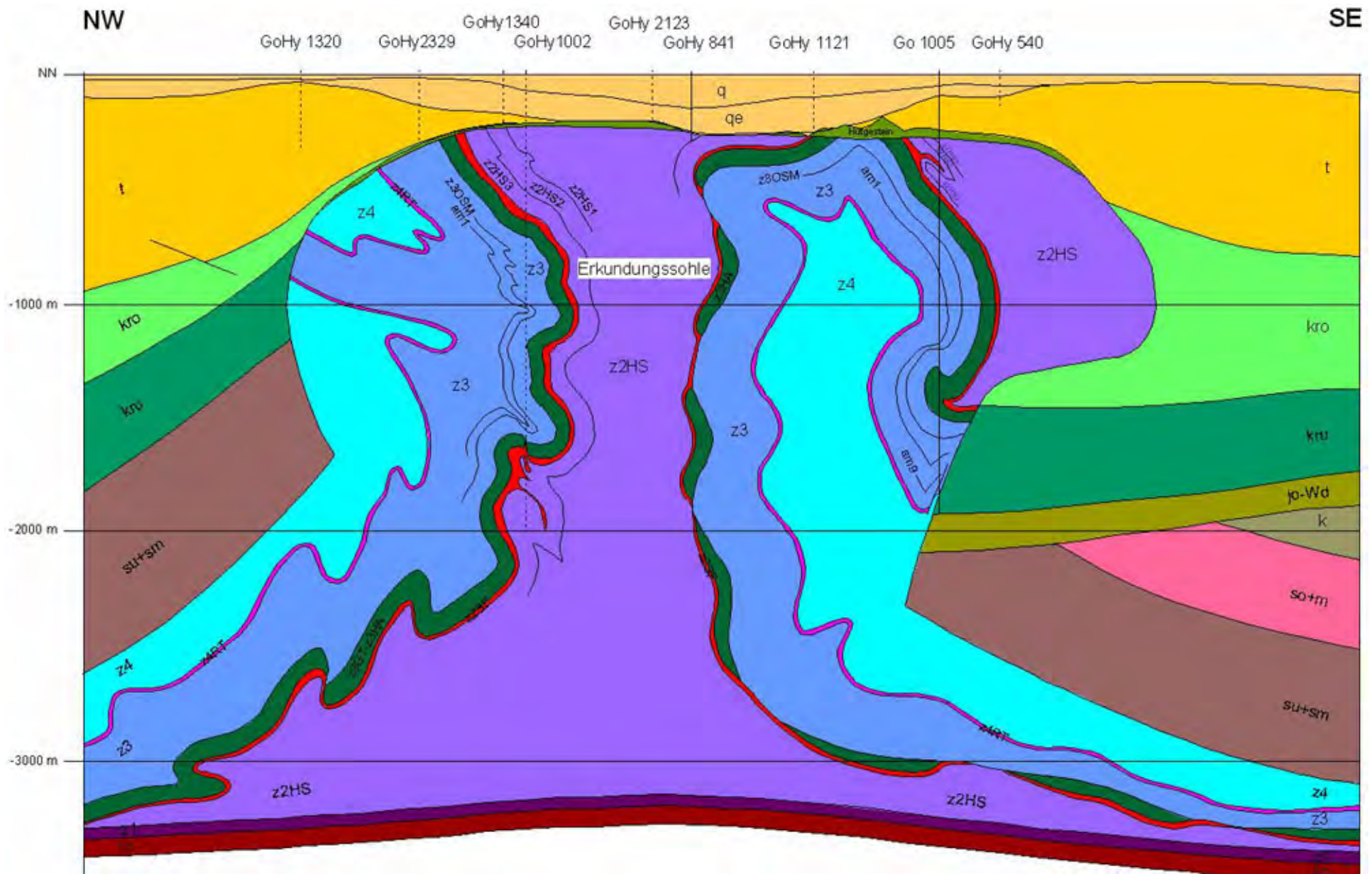
Bis in die 90er Jahre hinein:

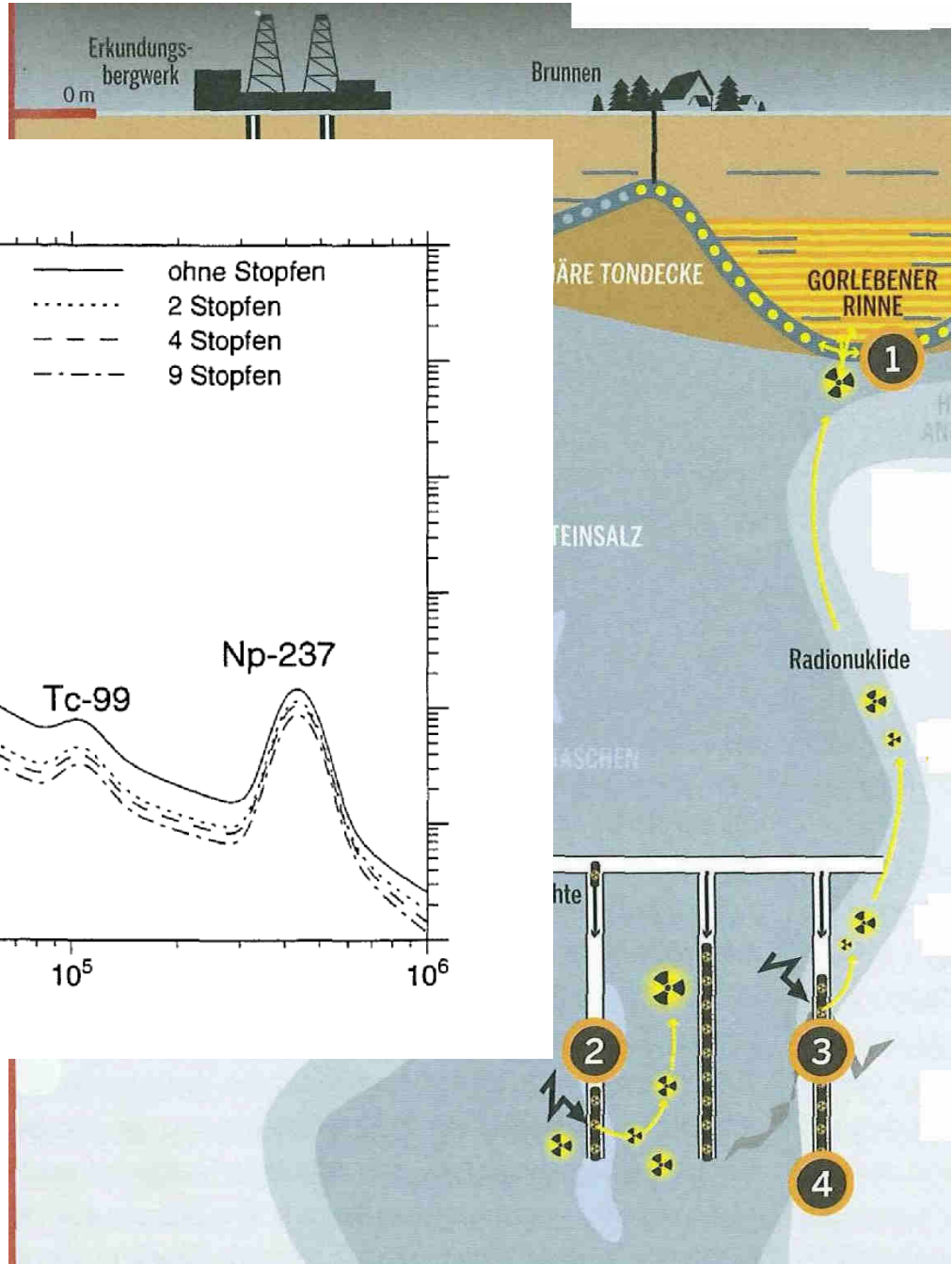
- Sicherheitsanalyse als zentrales Element der Nachweisführung.
Nur lose Verbindung mit Standorterkundung, F&E, Endlagerentwicklung
- Freisetzungsberechnungen als zentrales Element der Sicherheitsanalyse
 - Schwerpunkte: Migration im Deckgebirge, Transferprozesse in der Biosphäre
 - Einhaltung von Grenzwerten
 - Widerspruch: Sicherheitsziel (Isolation) vs. Kriterium (Freisetzung)
- Entwicklung von Freisetzungsszenarien (“Szenarienanalyse”) als Voraussetzung und Rechtfertigung für dieses Vorgehens
- Deutschland (HAW-Endlagerung im Steinsalz)
 - Ziel: Einschluss der Abfälle im Wirtsgestein
 - Trotzdem: auch hier Analyse hauptsächlich anhand von Freisetzungsberechnungen

Freisetzungsrechnung

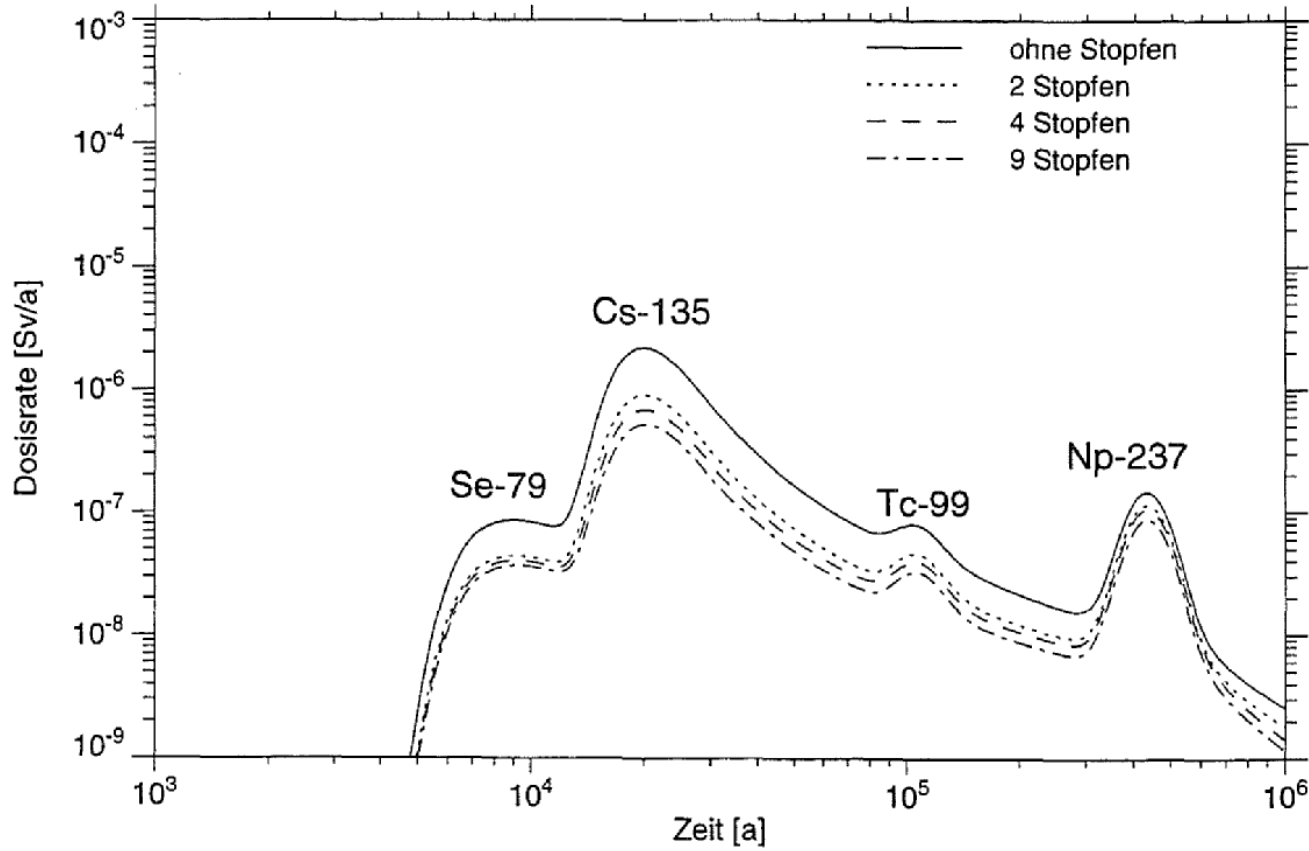








Dosisberechnungen
(Quelle: GRS)



Stilisiertes Anhydritszenario
(Quelle: Petermann)

Historie ... Voraussetzungen für Freisetzungsrechnungen:

- Migrationsmodelle (für Gorleben: Endlagerbergwerk, Deckgebirge)
- Verifizierung & Validierung - Konikow & Bredehoeft 1992:
 - Verifizierung: zeigen, dass das generische Modell die Differentialgleichungen lösen kann
 - Validierung: zeigen, dass das standortspezifische Modell die Ursachen-Wirkungs-Beziehungen am Standort darstellen kann
- NEA-Projekte
(die ...COINs und die ...VALs – HYDROCOIN, INTRACOIN, INTRAVAL, GEOVAL)
- **ABER:** “Groundwater models cannot be validated”
(Konikow & Bredehoeft 1992):
 - Verification, validation, and calibration does not insure effective and reliable predictions.
 - Conceptual model significantly affects predictions.
 - Same empirical data can support many conceptual models.
 - Different models calibrated to the same data over time may reveal dramatic differences in predictions.
 - We believe the terms validation and verification have little or no place in ground-water science; these terms lead to a false impression of model capability.

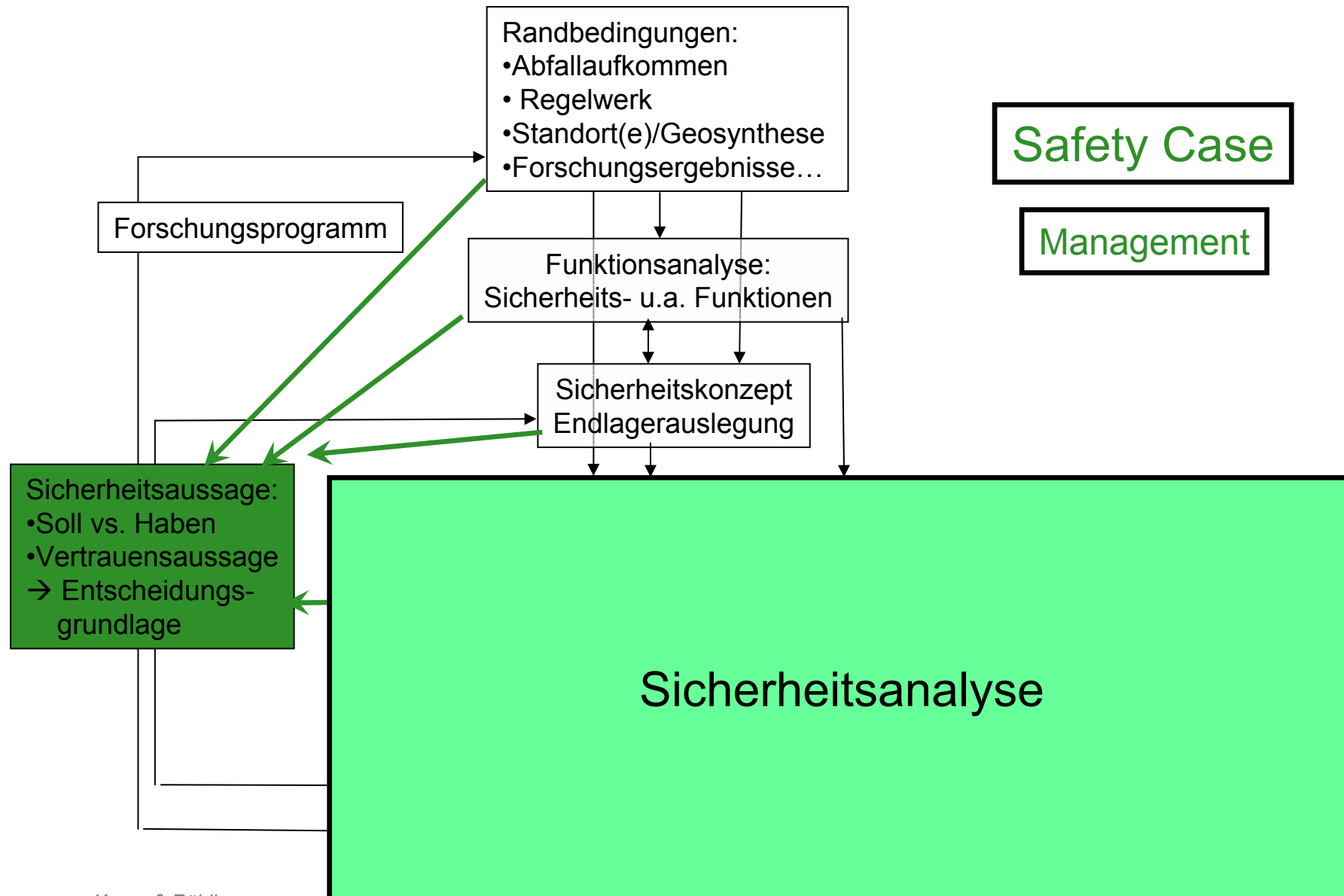
Historie ...

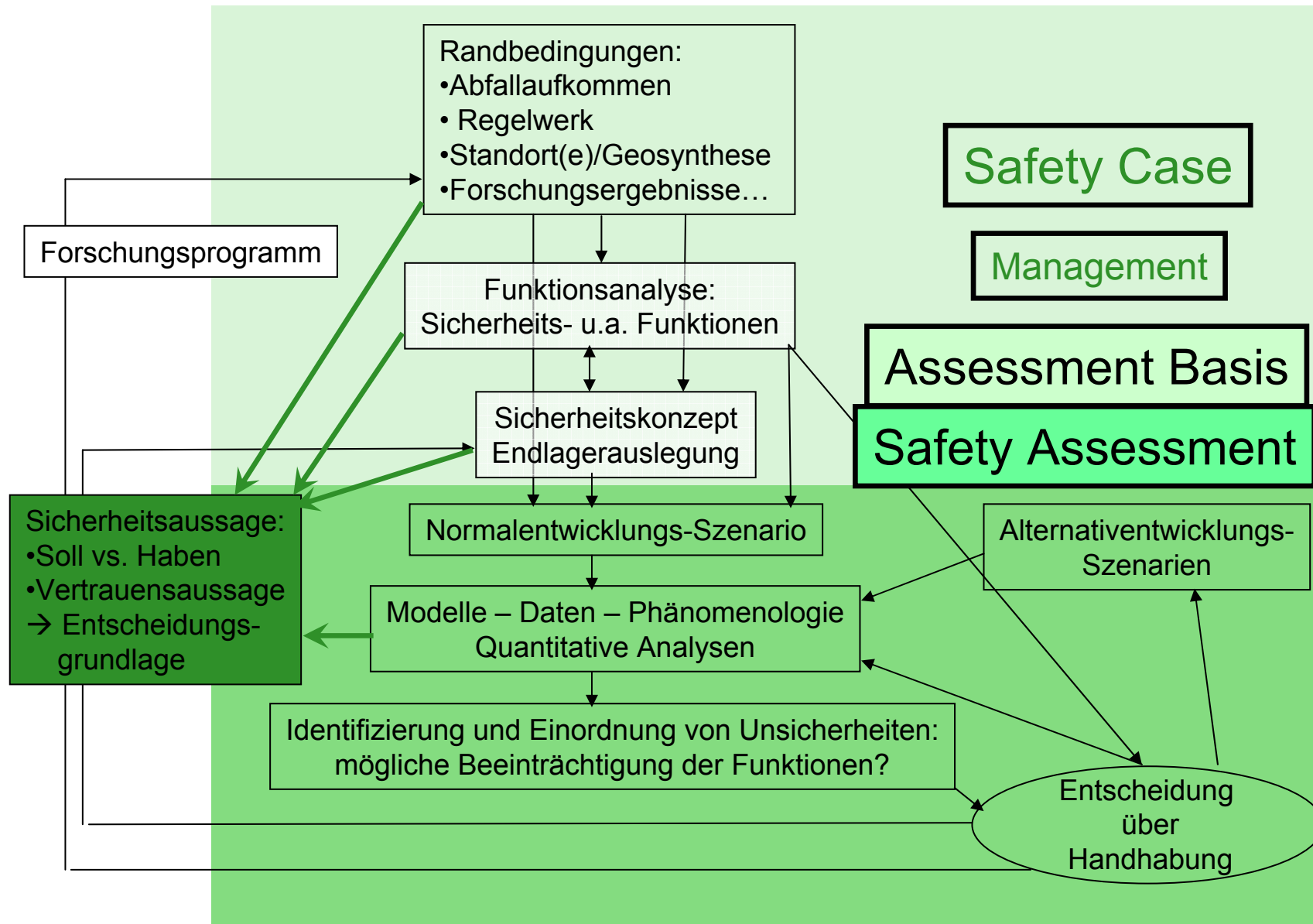
- Auf die Konikow-Polemik folgen heftige Diskussionen ...
- Eine “Krise der Methodik der Sicherheitsanalyse”?

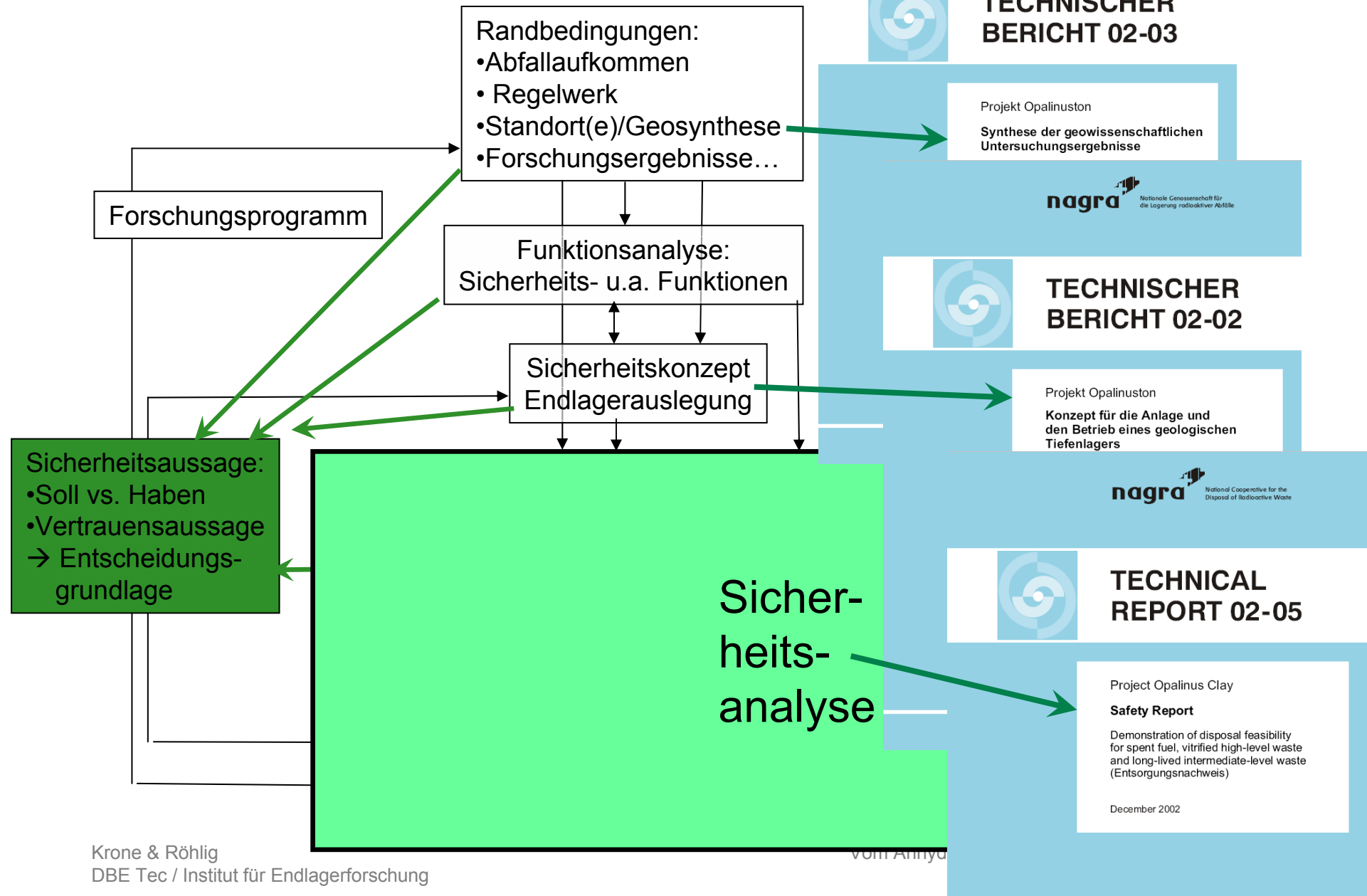
- Gleichzeitig: (Akzeptanz-)Probleme und Rückschläge in einigen großen Endlagerprogrammen (Frankreich, UK, Kanada, Deutschland)

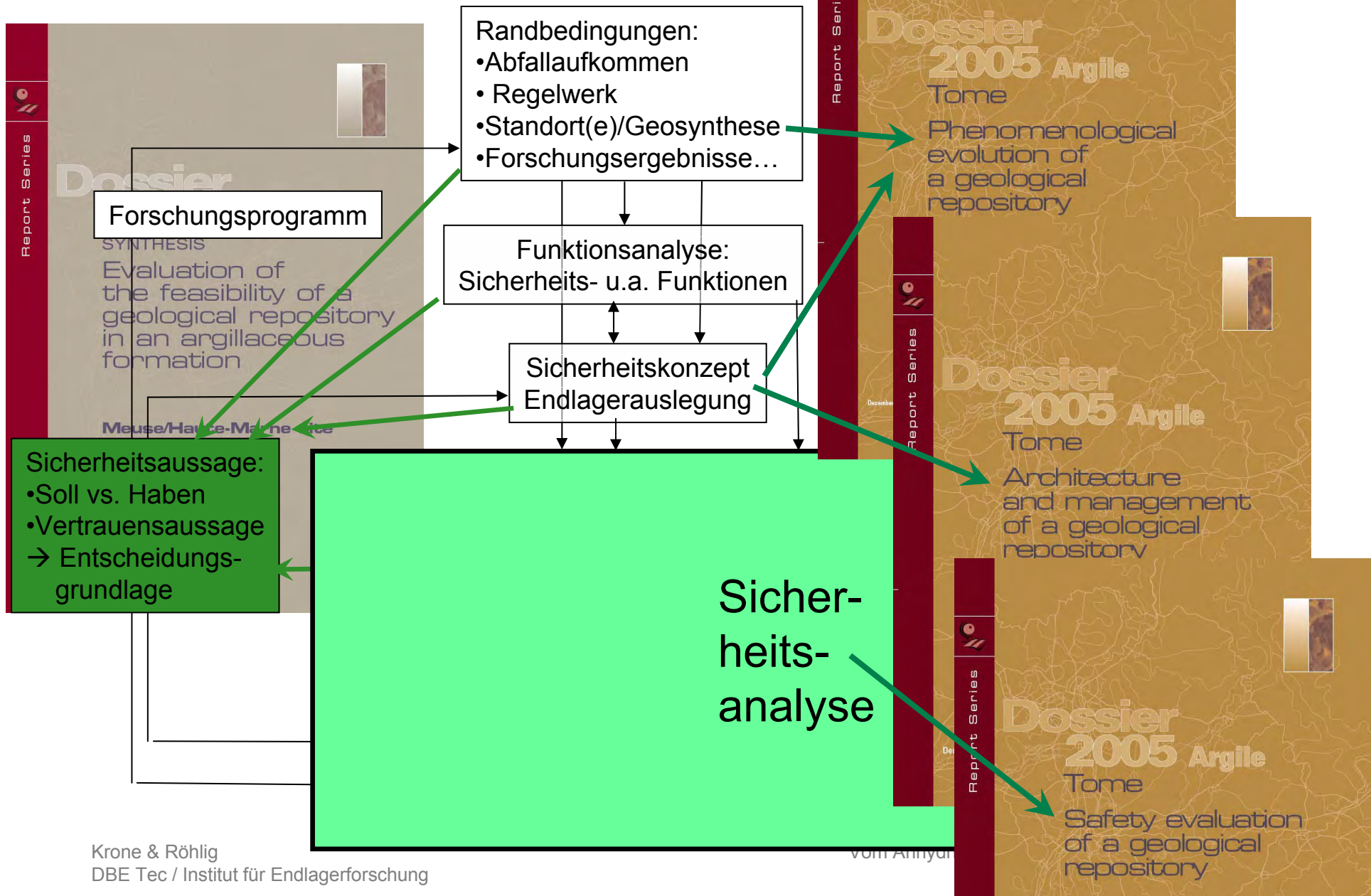
- Lehren aus dieser Situation:
 1. Komponenten des Nachweises besser verbinden:
 - Standorterkundung
 - F&E
 - Sicherheitskonzept und Endlagerentwicklung und -auslegung
 2. Entscheidungsprozess besser organisieren und straffen! Transparenz!
 3. Betroffene besser informieren und ggf. beteiligen!

- Konzept „**Safety Case**“: Entwicklung in nationalen Programmen und bei OECD/NEA → IAEA:
 - Integrierendes Element (Zusammenfassung aller Argumente ...)
 - Dynamisches Element (Entscheidungsgrundlage in einer bestimmten Phase beim schrittweisen Vorgehen, Weiterentwicklung des SC)









Sicherheitsfunktionen – Wirtsgestein – Endlagerkonzept

	Isolation von Biosphäre, Behinderung d. menschlichen Eindringens	Stabilität (mechanisch, hydraulisch, chemisch)	Einschluss der Abfälle	Behinderung von Migrationsvorgängen
Granit	Wirtsgestein	Behälter, Bentonitpuffer	langlebiger Brennstoffbehälter	Brennstoffmatrix, Bentonitpuffer,
	Deckgebirge	Wirtsgestein		Wirtsgestein
Tonstein	Wirtsgestein	Wirtsgestein	[Abfallbehälter] – zeitlich begrenzt!	Wirtsgestein [Deckgebirge] Verschlüsse
	Deckgebirge			
Salz	Wirtsgestein	Wirtsgestein	Wirtsgestein Verschlüsse	Wirtsgestein [Deckgebirge] Verschlüsse
	Deckgebirge			

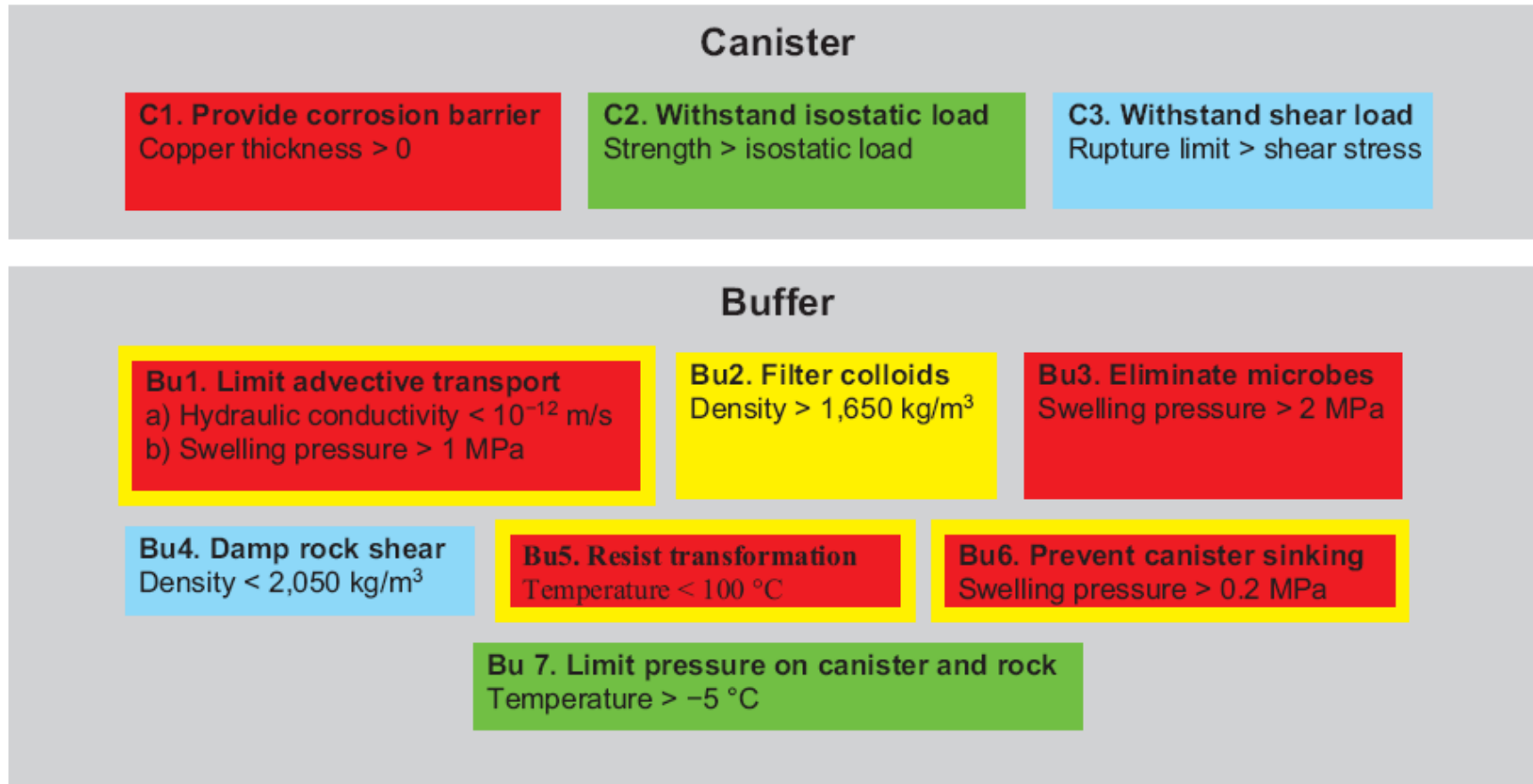
Sicherheitsfunktionen als Bindeglied und Analysewerkzeug

- Die Funktionen sind das eigentliche Abbild des Ziels eines Endlagerprojekts!
- Beispiel Frankreich: integrierende Wirkung zwischen beteiligten Disziplinen (gemeinsame Sprache):
 - "limiting water circulation"
 - "limiting the release of radionuclides and immobilising them in the repository"
 - "delay and attenuate radionuclide migration"
- Beispiel Schweden: Funktionsindikatoren als grundlegendes Analysewerkzeug → nachfolgende Folien

Definitionen – Begriffe (SR-Can)

- A safety function is a role through which a repository component contributes to safety.
- A safety function indicator is a measurable or calculable property of a repository component that indicates the extent to which a safety function is fulfilled.
- A safety function indicator criterion is a quantitative limit such that if the safety function indicator to which it relates fulfils the criterion, the corresponding safety function is maintained.

Sicherheitsfunktionen (SR-Can)



Farben: Funktionen mit Beitrag zu den Kanister-Sicherheitsfunktionen C1 (rot), C2 (grün), C3 (blau) oder zur Retardation (gelb).

Viele Funktionen tragen sowohl zu C1 als auch zur Retardation bei (rot mit gelbem Rand).

Analysen und F&E in Deutschland (Endlager im Steinsalz)

- Systemanalysen SEA (1984), SAM (1989), SEK (1996)
- EU-„Übungen“: PAGIS (1989), PACOMA (1991), EVEREST (1996), SPA (1999)
 - Normalentwicklung (Einschluss) wird **postuliert** und nicht **demonstriert**
 - Schwerpunkt der numerischen Analysen: **Freisetzung**
 - Vervollkommnung des Verständnisses und der Tools zur Radionuklidmigration, aber mangelhafte Bindung der numerischen Analysen an F&E
- F&E:
 - Detailkenntnisse zur Salzstockgeologie (Gorleben)
 - Nachweisverfahren zur Integrität der Salzbarriere
 - Verständnis Salzgruskompaktion (BAMBUS)
 - Ingenieurtechnische Nachweiskonzepte für Strecken- und Schachtverschlüsse (ERAM/Asse)

Detailkenntnisse zur Salzstockgeologie (Gorleben)

Quellen:

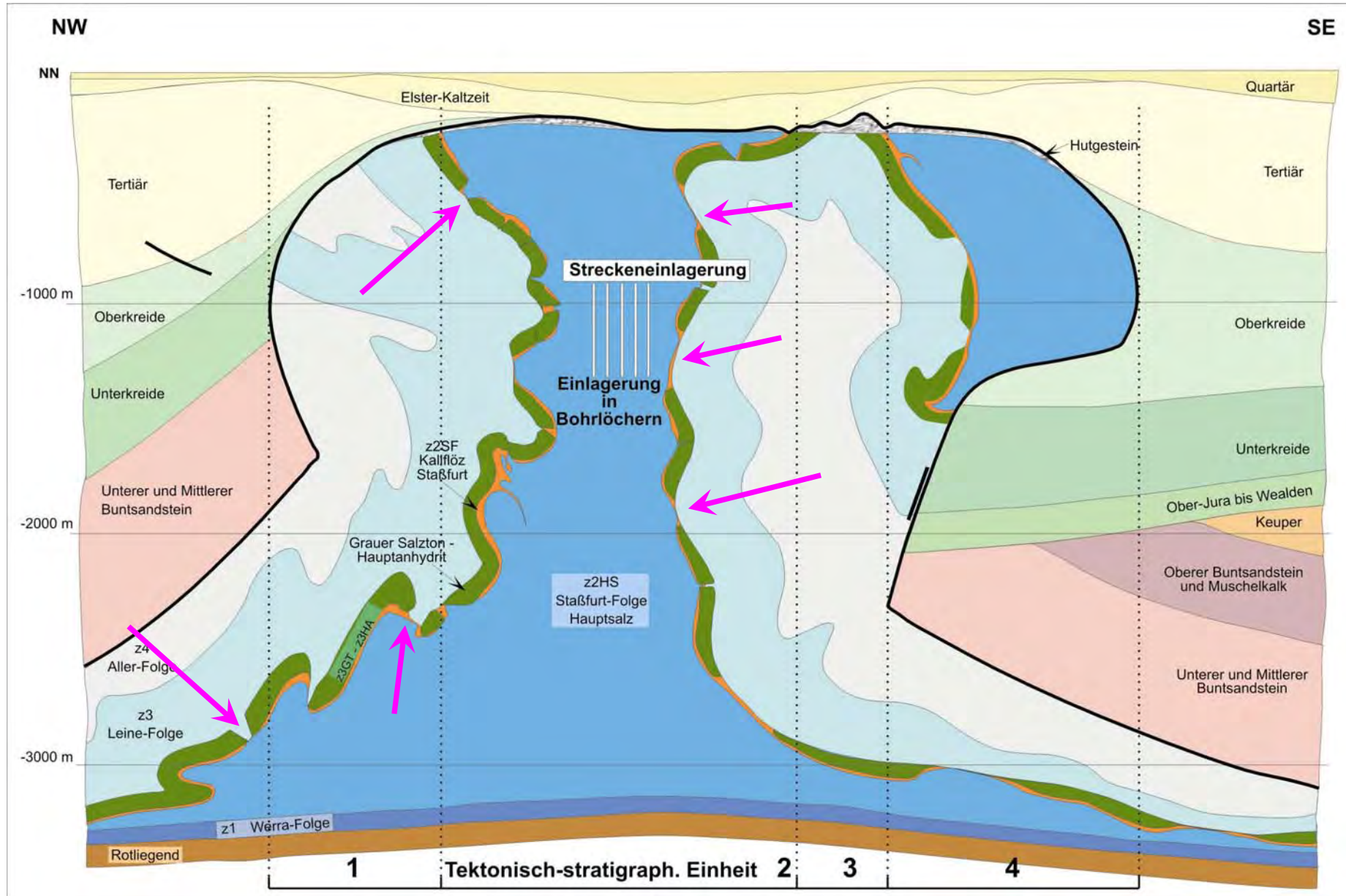
- tiefe Salzstockerkundungsbohrungen
 - seismischen Untersuchungen
 - geochemisch-petrographische Bearbeitung der gewonnenen Bohrproben
 - Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2
 - aufgefahrenes Grubengebäude → EB 1
 - anschließende geophysikalische Messungen (Elektromagnetische Reflexionsmessungen EMR) und geochemische Untersuchungen
- neue feinstratigraphische Gliederung der Zechstein-Folgen → Barrieren schonende Auffahrung geplanter Endlagerstrecken möglich

Detailkenntnisse zur Salzstockgeologie (Gorleben)

Ergebnisse:

- Ausreichende Homogenbereiche im Z2 (Steinsalze der Staßfurt-Folge), nur räumlich begrenzte Kluftsystemen
- Hauptsalz Z2 nahezu frei von Lösungsvorkommen (nur jeweils wenige cm^3) → die in den Freisetzungsszenarien angenommenen Laugennester existieren so nicht
- Hauptanhydrit Z3HA in isolierte Schollen zerbrochen → keine durchgehende Wegsamkeit
- Salzstockaufstieg nahezu abgeschlossen
- Langfristig geringe Subrosionsraten (Größenordnung 10^{-2} mm/a)

➤ geologische Integrität der Hauptbarriere





Weitere Entwicklungen in Deutschland: AKEnd und einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugewiesen werden kann.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.

Die Tiefe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.

Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 300 m liegen.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die die Verinselung des Endlagers zulässt (z. B. ca. 3 km² in Salz bzw. von 1 km² in Ton oder Granit).

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlagartig sein.

Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

Granitformationen in Deutschland bieten keinen ewG!

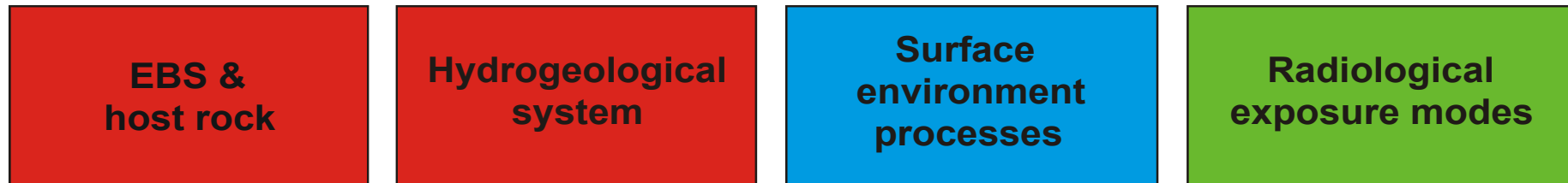
Weitere Entwicklungen in Deutschland: Sicherheitskriterien / Sicherheitsanforderungen

Ausgangspunkte:

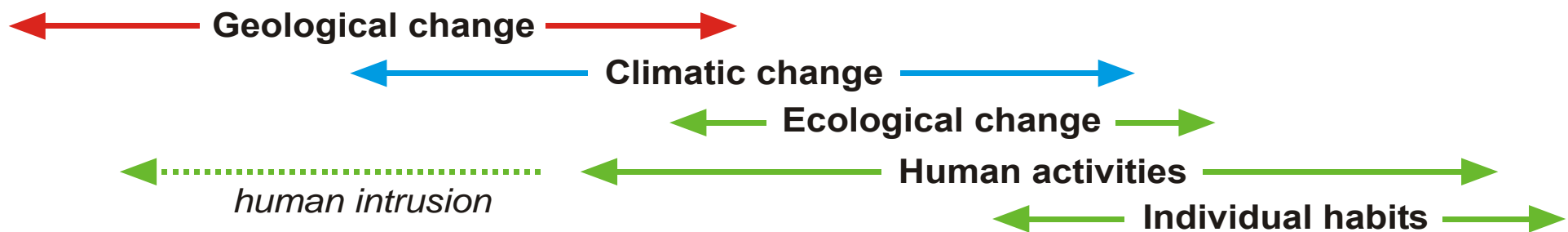
- Internationale / ausländische Entwicklungen zum Safety Case
- AKEnd – ewG: Einschluss und/oder Behinderung der Migration durch geologische Barriere
- Widerspruch: Sicherheitsziel (Isolation) vs. Kriterium (Freisetzung)
- Und schließlich: das sogenannte “regulatorische Dilemma”:
Bestimmung (Berechnung) von Indikatoren, die “in der Nähe” des Schutzgutes (Mensch, Biosphäre) erfasst werden (z.B. Dosis, Risiko),
beruht auf Annahmen und Modellen, die nur für vergleichsweise kurze Zeiträume belastbar sind. ...
(vgl. nächste Folie)



Elements to be represented



Changes acting on these elements

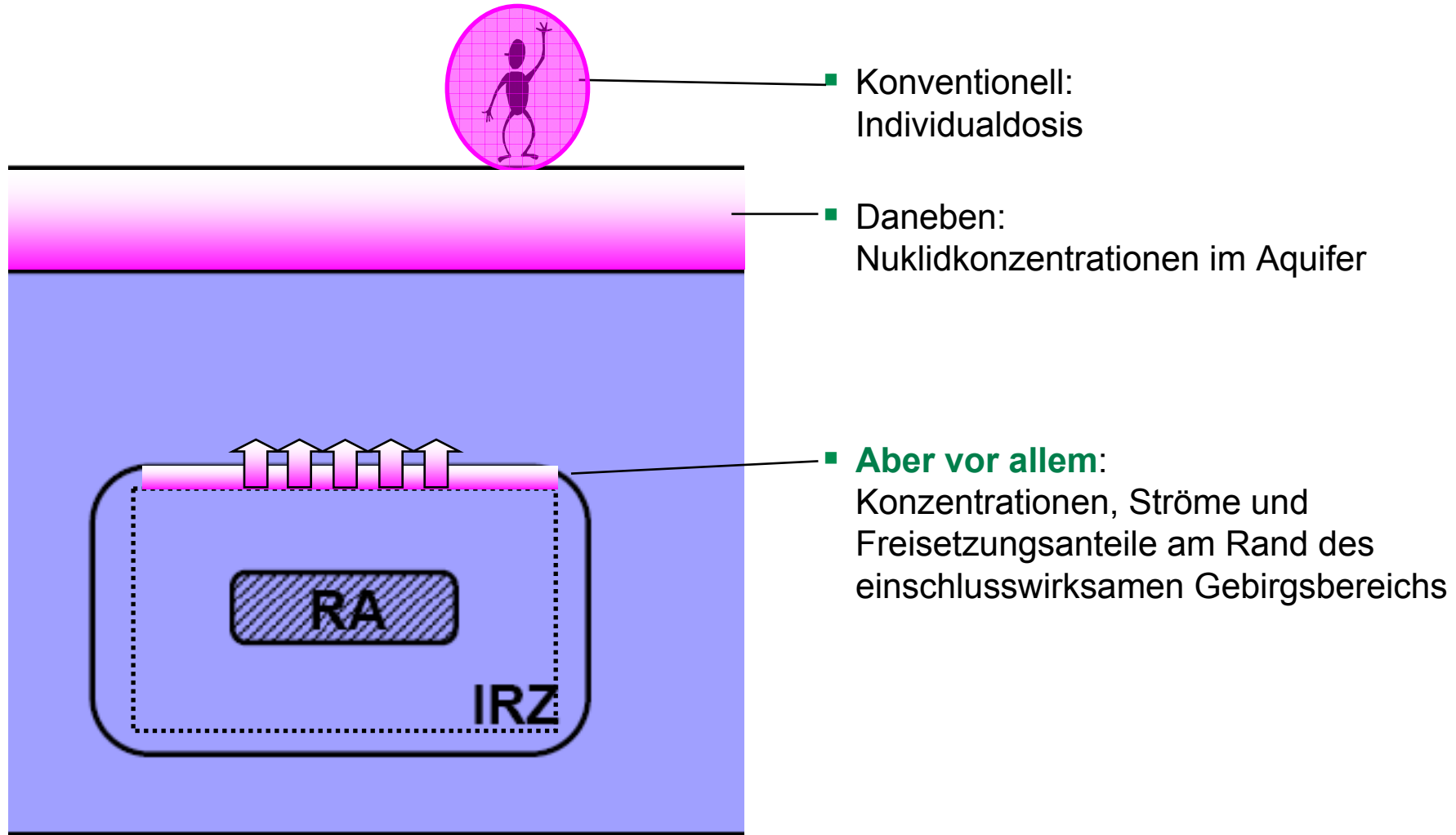


GRS-Entwurf Sicherheitsanforderungen

- u.a.: Gewährleistung des Einschlusses. Der Einschluss gilt als vollständig, wenn für die wahrscheinlichen Szenarien (also: die erwartete Entwicklung / die Normalentwicklung) ggf. Freigesetzten Radionuklide die natürlichen Bedingungen nicht wesentlich verändern.
- Versuch der Entwicklung eines Systems von Indikatoren (zunächst für die wahrscheinlichen Szenarien), das den Einschluss der Abfälle belegt und an dieser Sicherheitsfunktion orientiert ist.
- Satz von Indikatoren, deren Aufpunkte unterschiedlich gewählt sind – 4 von 6 am einschlusswirksamen Gebirgsbereich orientiert



Indikatoren (GRS-Vorschlag)



Damit:

- Berechnungsergebnisse (als eins einer Vielzahl von Argumenten) mit Orientierung an Sicherheitsfunktion “Einschluss / Isolation”
- Argumentation
 - Wenn Einschluss gewährleistet ist, werden die Schutzziele eingehalten
 - Einschluss ist gewährleistet, wenn die Störung natürlicher Verhältnisse unerheblich ist
- So weit wie möglich: Orientierung an Indikatoren, die durch die Modellierung solcher Komponenten des Systems berechnet werden, ...
 - ... deren Entwicklung prognostizierbar ist
 - ... die sicherheitsrelevant sind
- Allerdings:
 - Probleme mit der Bewertung künstlicher Radionuklide
 - Bewertung weniger wahrscheinlicher Szenarien?
 - Kritik: Orientierung am Schutzgut
 - Sind regulatorische Vorgaben für die vorgeschlagenen Indikatoren sinnvoll?

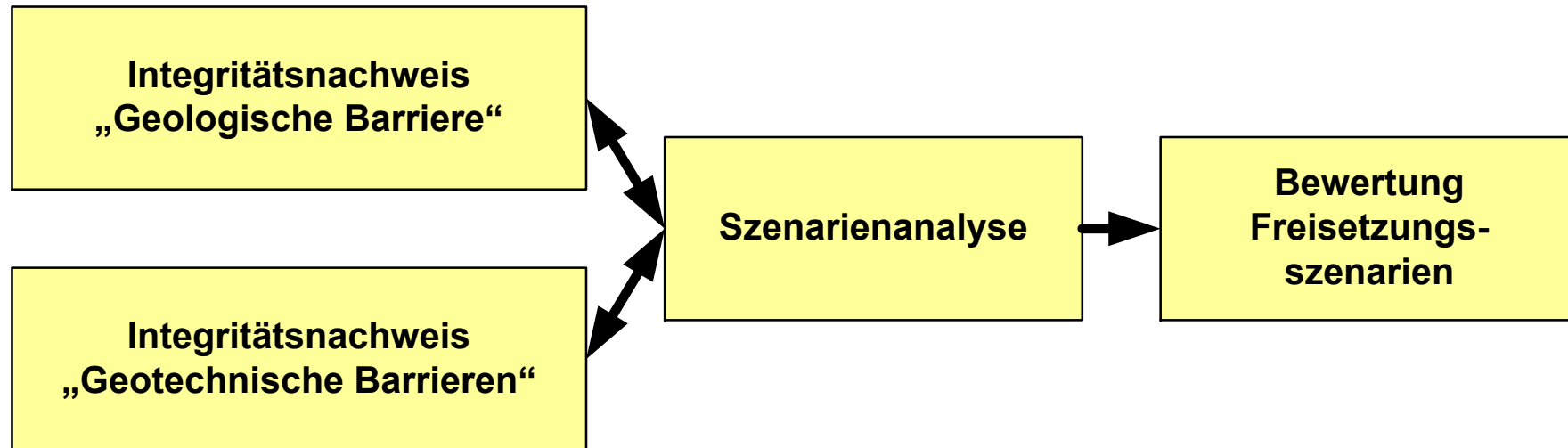
Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine Sicherheitliche Bewertung von HLW-Endlagern - ISIBEL

**Nachweis
„Sicherer Einschluss“**

**Bewertung
von Freisetzungen**

Primär

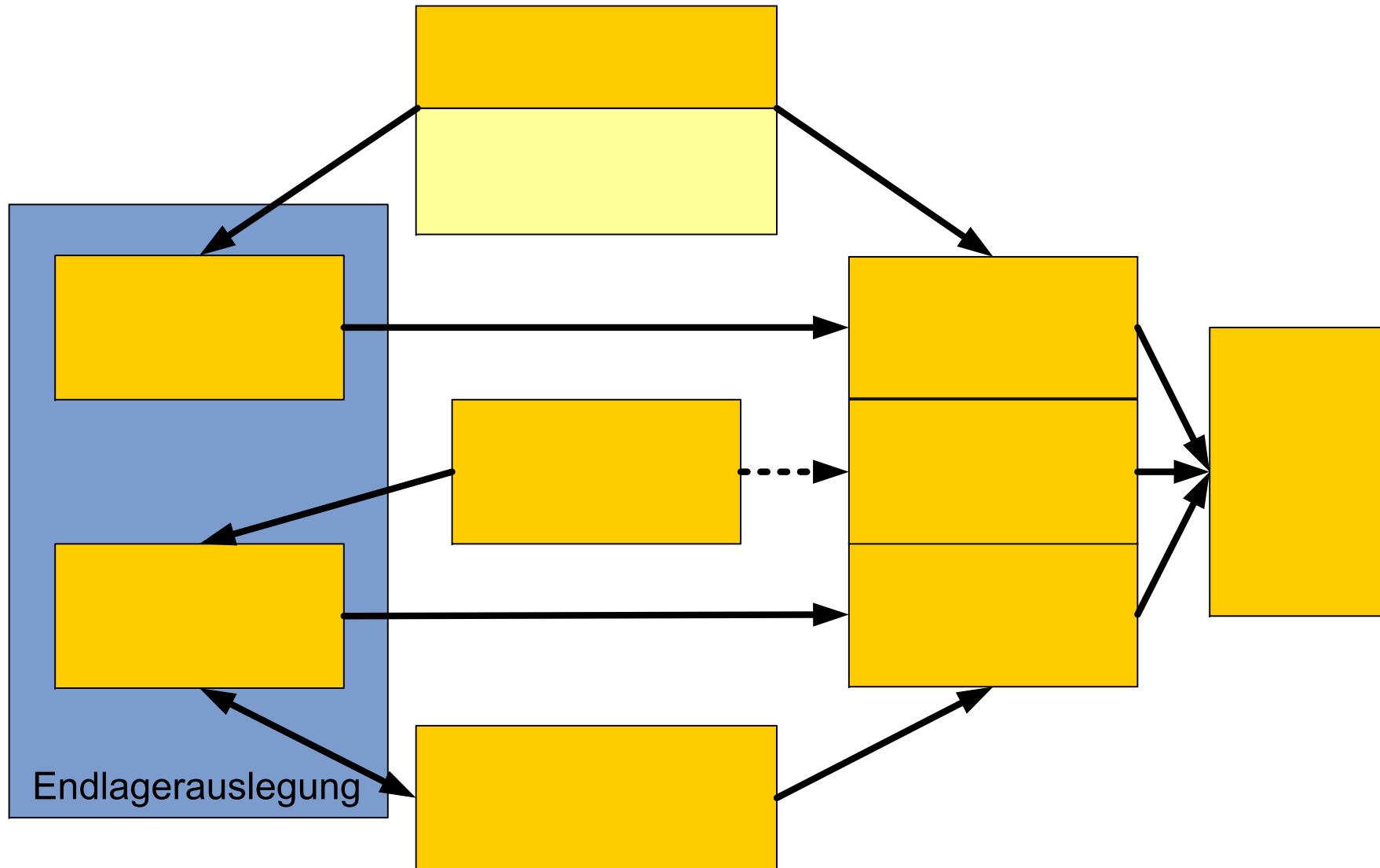
Komplementär



Ungestörte Entwicklung

Gestörte Entwicklung

Konzept „Sicherer Einschluss“



Ausblick

- Die Stärken des Konzepts der Einlagerung im Steinsalz werden nur sichtbar, wenn die Sicherheitsfunktion “Einschluss” in den Sicherheitsberichten
 - gewürdigt und
 - belegtwird. Der Safety Case bietet hierzu den geeigneten Rahmen, aber ...

- Hierzu ist das Funktionieren
 - der geologischen Barriere Salzstock und
 - der technischen Barrieren (Versatz, Verschlüsse)aufzuzeigen.

- Diesbezüglicher F&E-Bedarf besteht insbesondere hinsichtlich der technischen Barrieren:
 - Langfristige Prognose der Kompaktion von Salzgrus als Versatz
 - Nachweis der Langzeitintegrität von Verschlussbauwerken (Anforderungen ergeben sich aus Langzeitprognose Versatzkompaktion), u.a. Verheilung bzw. Vergütung der Auflockerungszone

Sicherheitsnachweis für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tongestein

André Rübel

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

1 Einführung

In einer Langzeitsicherheitsanalyse werden für das Szenario einer möglichen Freisetzung von Schadstoffen aus den endgelagerten Abfällen, der Transport der Schadstoffe durch Nahbereich und Geosphäre, sowie die Konsequenzen für den Menschen berechnet. Dabei bedient sich die GRS verschiedener Rechenprogramme des Programmpakets EMOS [1], dessen Komponenten untereinander weitgehend austauschbar sind, um den Anforderungen, die unterschiedliche Endlagergesteine und Endlagerkonzeptionen stellen, gerecht werden zu können.

Zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salzgestein gibt es in Deutschland umfangreiche Erfahrungen in Theorie und Praxis. Die wesentlichen Prozesse sind gut verstanden und werden modelltechnisch beherrscht. Für die Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager im Salzgestein stehen die Rechenprogramme LOPOS und REPOS [2, 3] und für ein Endlager im Granitgestein das Rechenprogramm GRAPOS zur Verfügung [4].

Für Endlager im Tongestein konnte aus deutscher Sicht bislang lediglich auf Erfahrungen in anderen europäischen Ländern zurückgegriffen werden, siehe z.B. [5]. Unter dem Aspekt einer verstärkten Berücksichtigung anderer Wirtsgesteine als Salz war es erforderlich, im nationalen Rahmen vorhandene Kenntnisse bezüglich der sicherheitsrelevanten Prozesse im Tongestein zu vertiefen und zu erweitern. Insbesondere existierte in Deutschland kein umfassendes langzeitsicherheitsanalytisches Modell zur Berechnung des Radionuklidtransports in Tongesteinen. Dieses wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung eines Instrumentariums zur Berechnung des Radionuklidtransports in Tonformationen (Kurztitel TONI)“ entwickelt und im Rahmen einer generischen Sicherheitsanalyse für ein Endlager im Tongestein getestet

2 Modellkonzept

Das Endlagersystem und das Referenzszenario für ein generisches Endlager in einer Tongesteininformation ist in Folie 4 dargestellt. Der Hohlraum um die Behälter kann entweder mit Bentonit oder Bentonit-Sandgemischen verfüllt werden. Das Szenario unterstellt, dass der Bentonit und jene Teile der Wirtsgesteininformation, die während der Konstruktion des Endlagers entsättigt wurden, innerhalb weniger Jahrzehnte bis Jahrhunderte nach dem Verschluss wieder aufgesättigt werden. Alle Wegsamkeiten im Bentonit

und der Auflockerungszone (EDZ) schließen sich durch Quellung bevor Behälter korrodieren. Für den Bentonit werden Durchlässigkeitsbeiwerte vergleichbar mit denen des ungestörten Tongesteins angenommen.

Solange die Behälter nicht versagen ändert sich die Aktivität des Abfalls nur durch Zerfall der Radionuklide. Bei einem Ausfall der Behälter werden die Radionuklide mobilisiert und transportiert. Ein Teil der Radionuklide wird bei Überschreiten der Löslichkeitsgrenzen im Nahfeld wieder ausgefällt. Die mobilisierten Radionuklide werden im Referenzszenario ausschließlich durch Diffusion durch die technischen Barrieren, das eigentliche Wirtsgestein und eventuell darüber lagernde ähnlich undurchlässige Gesteine bis in das wasserführende Deckgebirge transportiert. Eine Rückhaltung erfolgt durch Sorption in allen Bereichen. Kommt es zu einer Kontamination des Grundwassers wird bei dessen Nutzung als Trinkwasser oder zur Erzeugung von Lebensmitteln die Bevölkerung einer Strahlenexposition ausgesetzt.

3 Abstraktion in der Langzeitsicherheitsanalyse

Bei der Langzeitsicherheitsanalyse wird im Rahmen von Variations- oder probabilistischen Untersuchungen eine große Anzahl numerischer Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Damit dies in einem überschaubaren zeitlichen Rahmen möglich ist werden die den Rechnungen zu Grunde liegenden Modelle so wie möglich abstrahiert und für die Ausbreitung vernachlässigbare Prozesse entweder vernachlässigt oder durch konservative Annahmen abgedeckt. Die Vereinfachung der in der Langzeitsicherheitsanalyse betrachteten Prozesse muss aber in jedem einzelnen Fall begründet und die Gültigkeit der Vereinfachung standortspezifisch nachgewiesen werden. Bereiche bei denen in der Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager im Ton Vereinfachungen vorgenommen werden, zeigen die folgenden Beispiele.

Bei der Modellierung des Radionuklidtransports in Tonformationen wird für die Normalentwicklung des Endlagers von einem rein diffusiven Transport mit Rückhaltung in der Formation durch Sorption ausgegangen. Ein advektiver Transport kann auf Grund der geringen Permeabilität der Tonformationen als nicht relevant angesehen werden. Dies ist auch beim Transport von natürlichen Spurenstoffen in den Tonformationen zu beobachten.

Die Einflüsse des Wärmeeintrags in die Formation durch die radioaktiven Abfälle, der Wiederaufsättigung und der Verheilung der „Excavation Disturbed Zone“ (EDZ) auf den Radionuklidtransport werden für die Normalentwicklung ebenfalls nicht betrachtet. Auf Grund der langen Behälterlebensdauer sind diese drei Prozesse bereits abgeschlossen, bevor die Radionuklide in die Formation freigesetzt werden. Bei gestörten Entwicklungen hingegen, wie z.B. bei einem frühen Behälterausfall müssen diese Prozesse jedoch in der Langzeitsicherheitsanalyse mit berücksichtigt werden.

4 Systemstudie

Für ein generisches Endlager in einer Tongesteinsformation wurde eine Systemstudie durchgeführt. Dieser Studie wurde das Endlagerkonzept zu Grunde gelegt, das im Rahmen der BMWi Forschungsvorhaben GEIST und GENESIS von der DBE für die Endlagerung von HAW im Tonstein entwickelt wurde und wird [6]. Dabei wurden zum einen der Opalinuston in Süddeutschland und zum anderen die Unterkreidetone in Norddeutschland betrachtet.

Die Auslegungsdaten und geologischen Informationen für die einzelnen Modelle wurden soweit vorhanden aus den genannten Forschungsvorhaben übernommen. Die Annahmen für die Transportparameter basieren auf Literaturdaten. Für den Opalinuston ist das vor allem die Studie der Nagra zum Züricher Weinland [5]. Für die Unterkreidetone ist die Verfügbarkeit von Daten allerdings sehr begrenzt, und auch die Übertragbarkeit der Daten des Opalinustons ist auf Grund der unterschiedlichen Geologie nur sehr eingeschränkt möglich. Die sicherheitsanalytischen Untersuchungen dienen vorrangig einem verbesserten Verständnis über das Zusammenspiel der verschiedenen Parameter. Es wurden Parametervariationen durchgeführt, um die relevanten Prozesse und Effekte, die die Freisetzung und den Transport von Radionukliden beeinflussen, besser quantifizieren zu können.

Als Beispiel wird im Folgenden die Variation der Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation aufgezeigt. Für diese Rechnungen wurden die von der Nagra für den Opalinuston in Benken verwendeten Transportparameter verwendet.

Die Ergebnisse der Rechnungen sind auf Folie 22 als Zeitverlauf der potenziellen Strahlenexposition dargestellt. Die Kurve der berechneten Strahlenexposition für den Opalinuston durch zwei Maxima geprägt. Das erste Maximum wird durch C-14 und das zweite Maximum durch I-129 hervorgerufen, wobei das zweite Maximum erst nach einer Million Jahren auftritt. Bei einer großen Mächtigkeit der Tonformation wie den Unterkreidetonen spielt C-14 für die Strahlenexposition überhaupt keine Rolle mehr. Die Höhe des zweiten Maximums ändert sich jedoch nur vergleichsweise wenig. Dies ist auf die große Halbwertszeit von I-129 zurückzuführen.

Für den Referenzfall ergeben sich für beide Formationen niedrige jährliche Strahlenexpositionen, die unter dem Schutzziel von $3 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ liegen. Ein Vergleich für die Referenzfälle, Parametervariationen und probabilistischen Rechnungen zeigen einige bemerkenswerte Ergebnisse:

- Der Diffusionskoeffizient ist im Bezug auf das Maximum der Strahlenexposition und dem Zeitpunkt der Ankunft der Radionuklide in der Biosphäre der wichtigste Parameter.
- Eine große Mächtigkeit der Tongesteinsformation kann zu einem praktisch vollständigen Einschluss der Radionuklide in der Tonformation innerhalb des Betrachtungszeitraums von einer Million Jahren führen.

- Die maximale Strahlenexposition wird für sehr große Zeiträume jenseits von einer Million Jahren bei beiden Formationen durch I-129 bestimmt. Erstaunlicherweise ist der Wert des Maximums der Strahlenexposition durch I-129 in beiden Fällen ähnlich - trotz des großen Unterschieds in der Formationsmächtigkeit.
- Der Einfluss der Parameterunsicherheit auf das Maximum der jährlichen Strahlenexposition ist geringer, je mächtiger die Formation ist. Bei Tonformationen mit einer Mächtigkeit wie jener bei den Unterkreidetonen ist der Diffusionskoeffizient der einzige Parameter, der einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der jährlichen Strahlenexposition hat. Alle anderen Parameter haben demgegenüber nur eine untergeordnete Bedeutung.

Der bisher erreichte Wissensstand zur Durchführung von Sicherheitsanalysen für Endlager im Ton ist insbesondere durch die Möglichkeit des Rückgriffs auf Forschungsarbeiten in anderen europäischen Ländern gut. Die internationalen Forschungsarbeiten und die hier vorgestellten Entwicklungen bedeuten für Deutschland eine gute Basis auf generischer Ebene für zukünftige weitere Untersuchungen.

5 Literatur

- [1] Buhmann, D.: Das Programmpaket EMOS. Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-159, Braunschweig 1999.
- [2] Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF-Bericht 27/91. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig 1991.
- [3] Keesmann, S.; Noseck, U.; Fein, E.; Schneider, A.; Buhmann, D.: Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern für abgebrannte Brennelemente in Salz- und Granitformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-206, Braunschweig, 2005.
- [4] Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R.: Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Braunschweig 2000.
- [5] Nagra: Projekt Opalinus Clay: The long-term safety of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of the Züricher Weinland. Nagra, NTB 02-05, Wettingen, 2002.
- [6] PTKA-WTE: Untertägige Entsorgung. Siebtes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 9, Karlsruhe, 2006.

Sicherheitsnachweis für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tongestein

André Rübel

Einführung

Eine kurze Geschichte der Sicherheitsanalysen

- Salz

Generische Studien

- **PSE** 1984
- **PAGIS** 1987
- **PACOMA** 1990
- **SAM** 1992

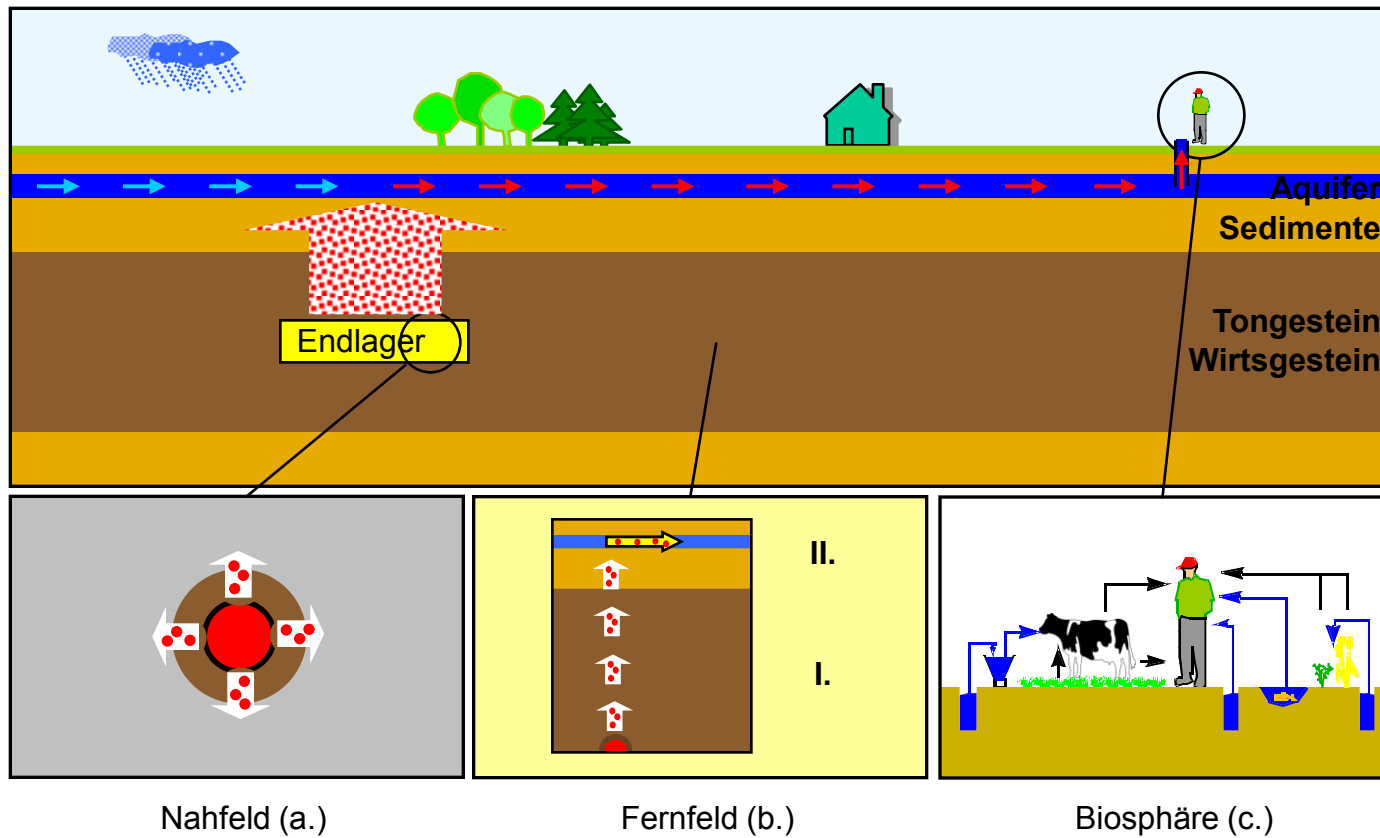
Standorte

- **ERAM** 2006
- **Asse** 2007

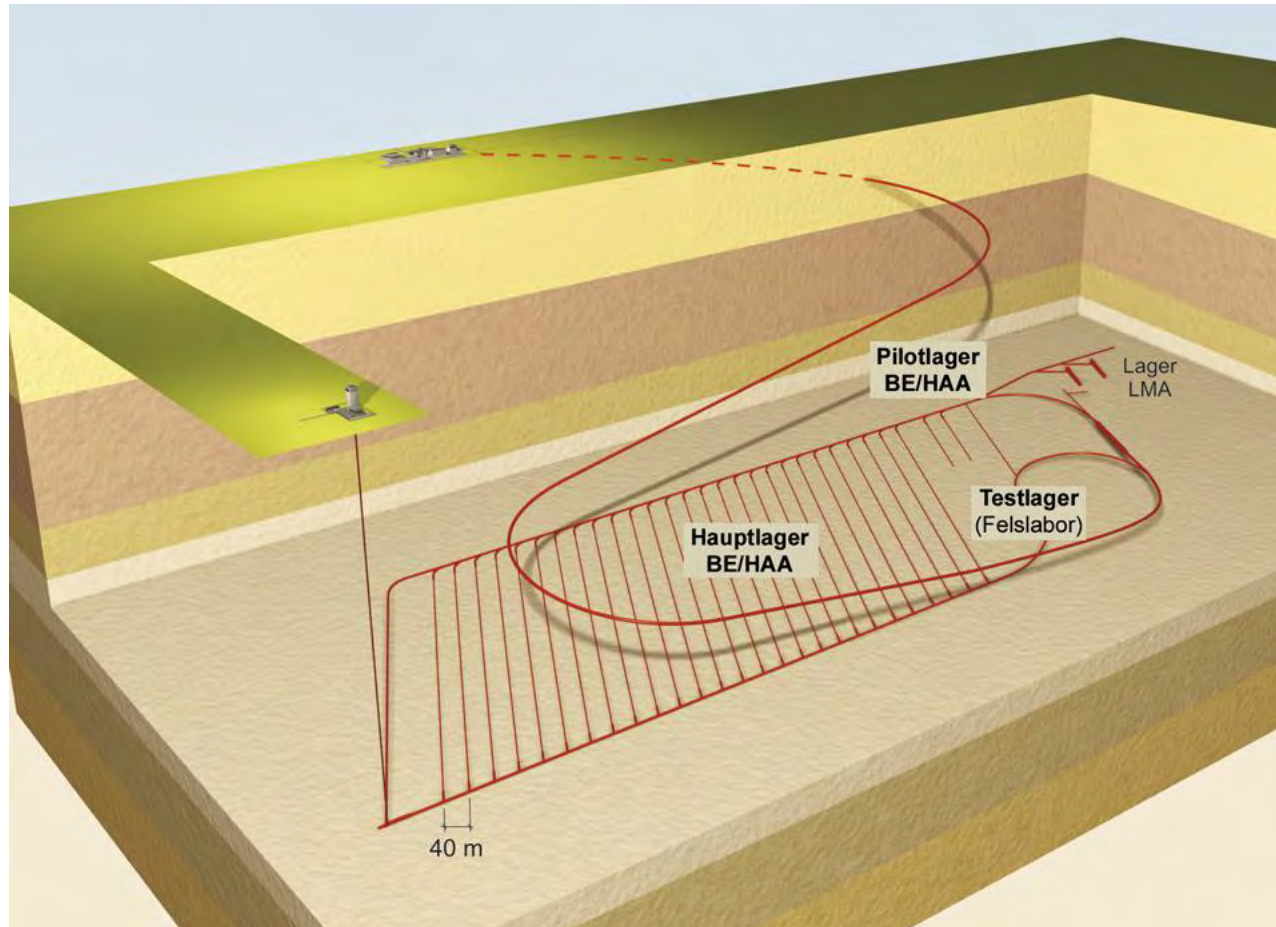
- Ton

- **TONI** - Entwicklung eines Instrumentariums zur Berechnung des Radionuklidtransports in Tonformationen
GRS-228 (2007)

Endlager in Tonformationen



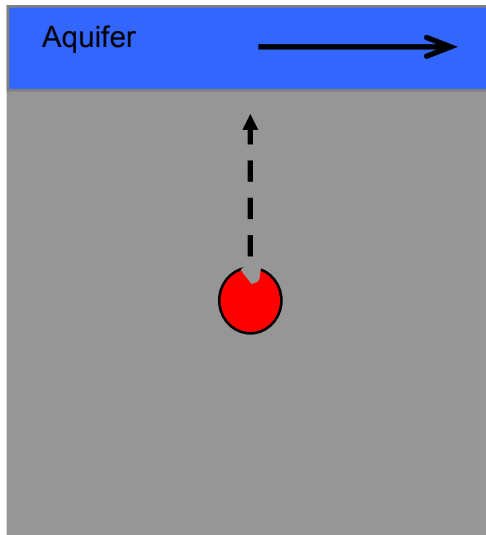
Endlager im Tongestein



Nagra 2002

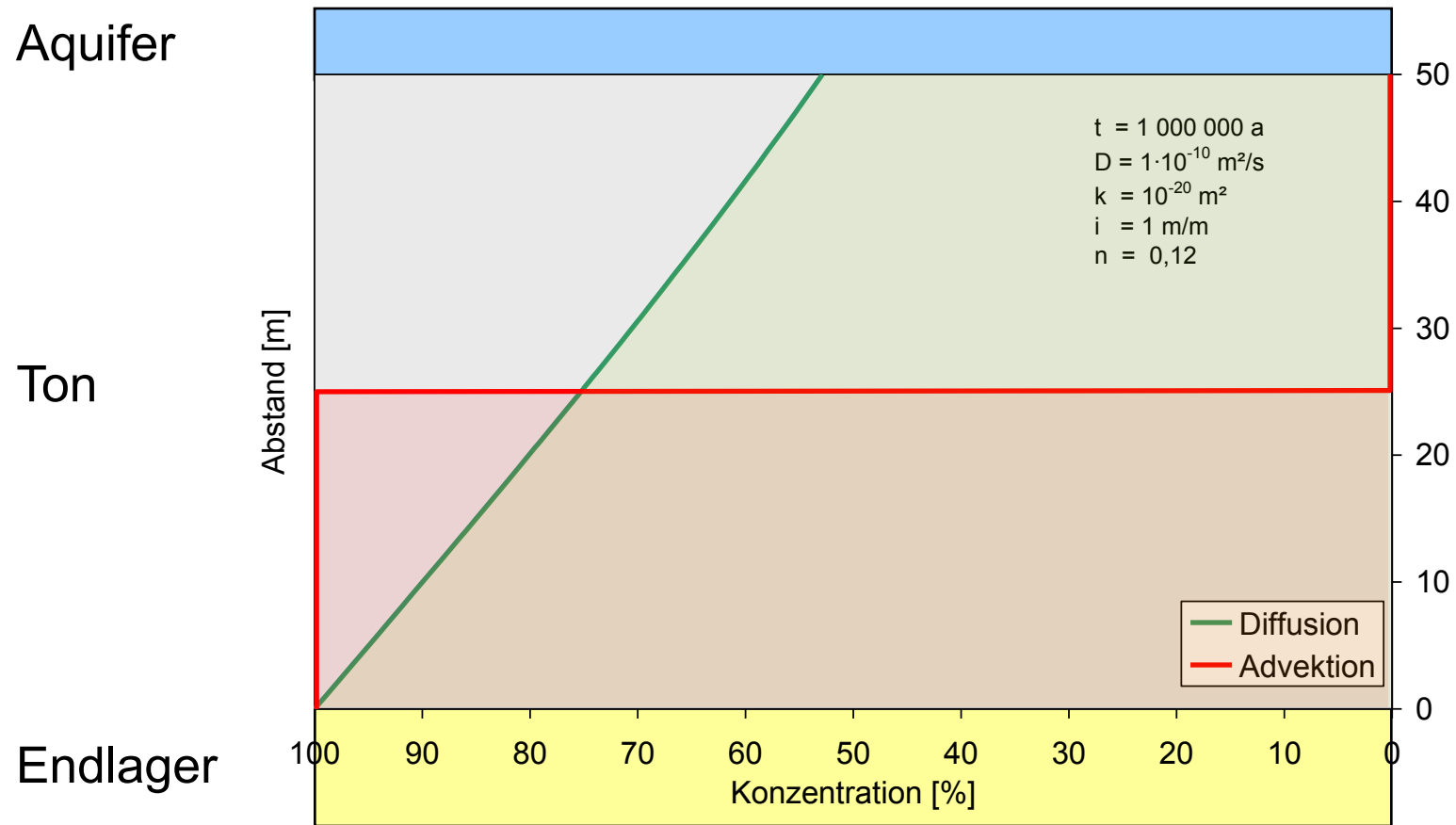
Abstraktion in der Langzeitsicherheitsanalyse

Abstraktion in der Langzeitsicherheitsanalyse

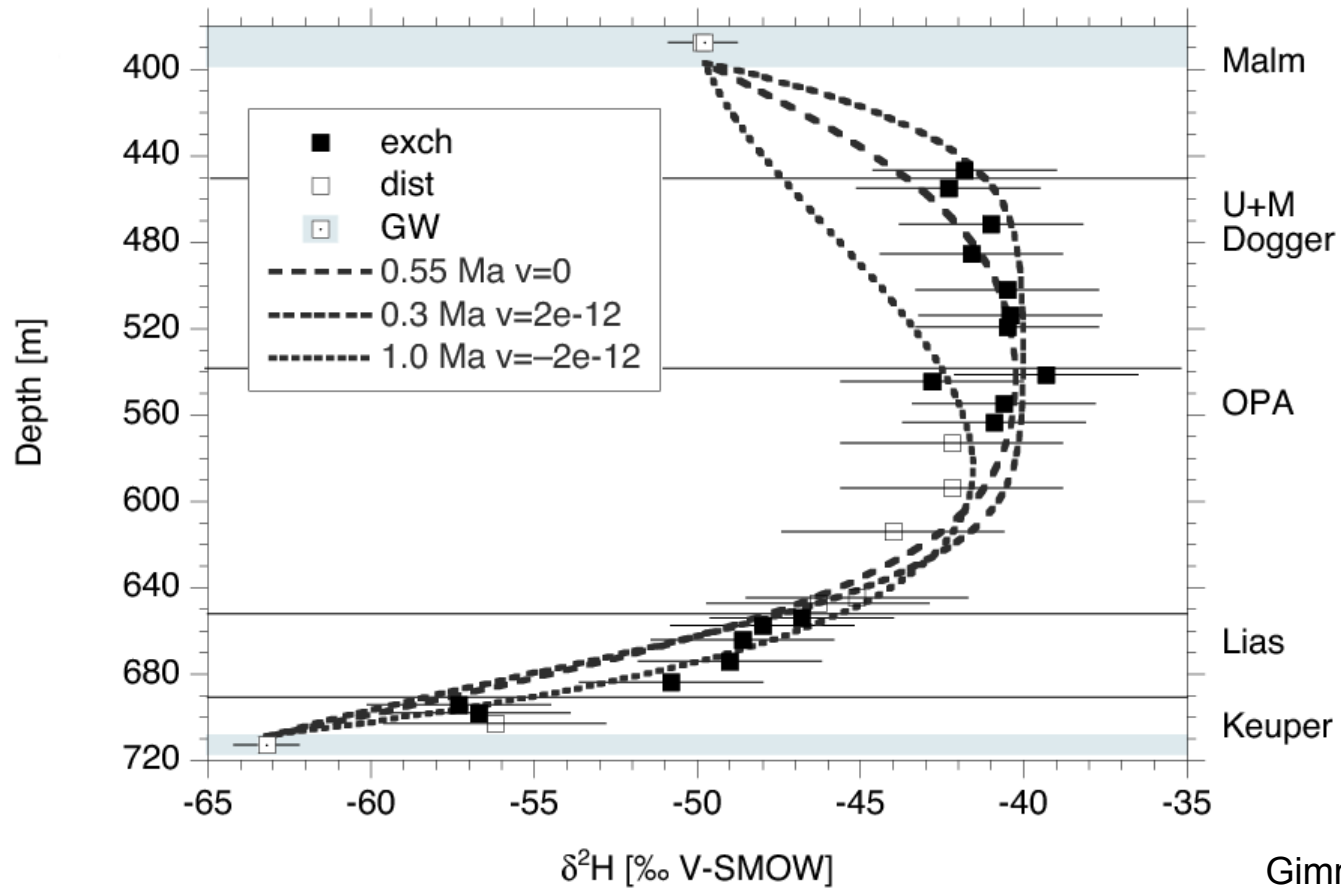


- Betrachtet werden in der LZSA
 - Transport durch Diffusion
 - Rückhaltung durch Sorption und Löslichkeitsgrenzen
- Nicht betrachtet werden
 - Transport durch Advektion
 - Einfluss der thermischen Phase und der Aufsättigung
 - Einfluss der EDZ (kein Transport längs der Strecken)
 - Schädigung der Formation durch Gastransport
 - ...

Transportprozesse in Tonformationen

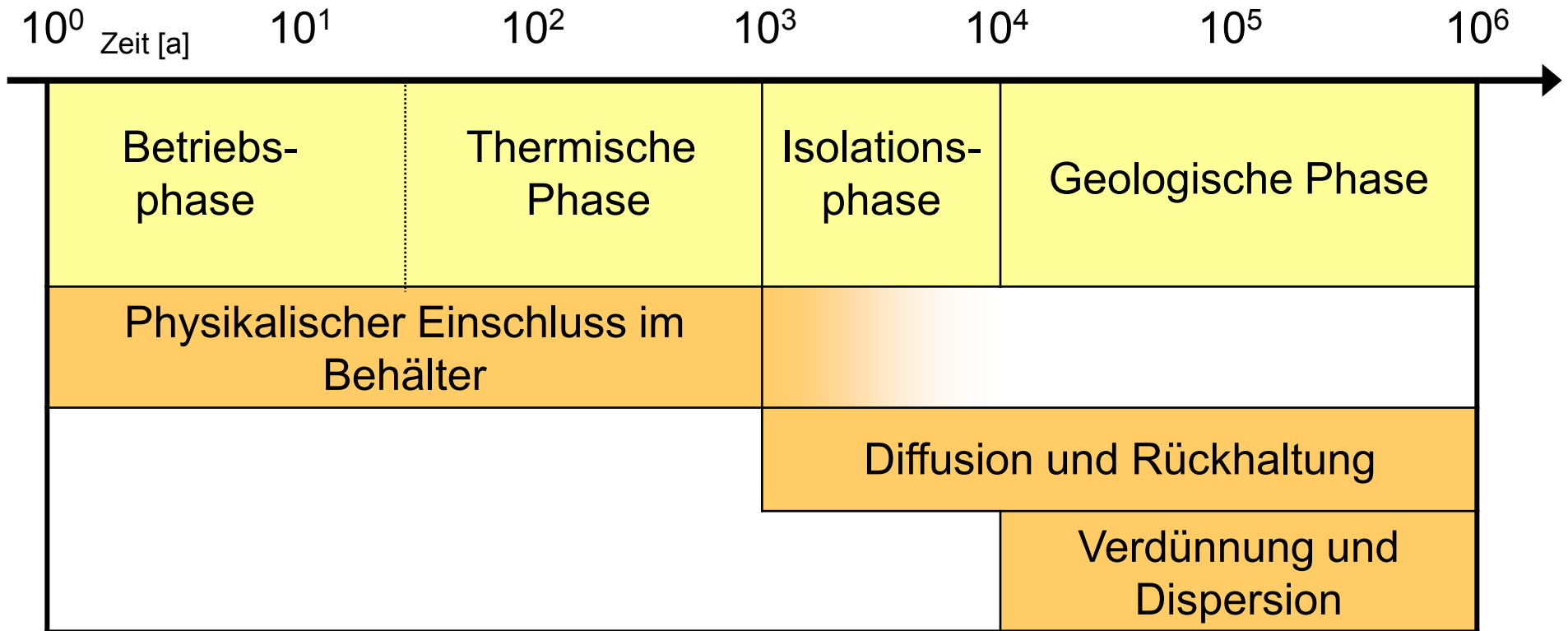


Natürliches Analogon für den Stofftransport im Ton



Gimmi et al. 2007

Phasen und Sicherheitsfunktionen bei der Normalentwicklung



nach NIRAS 2001

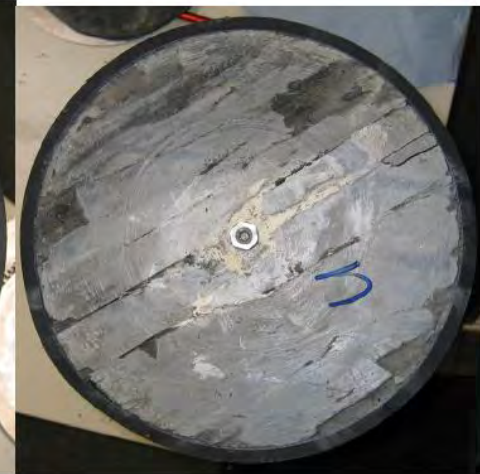
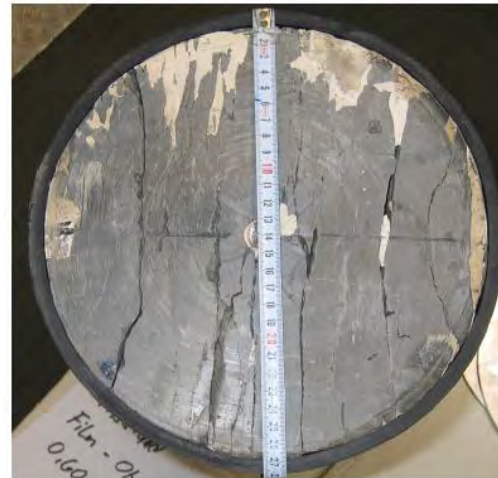
Verheilung der EDZ



Marschall 2005

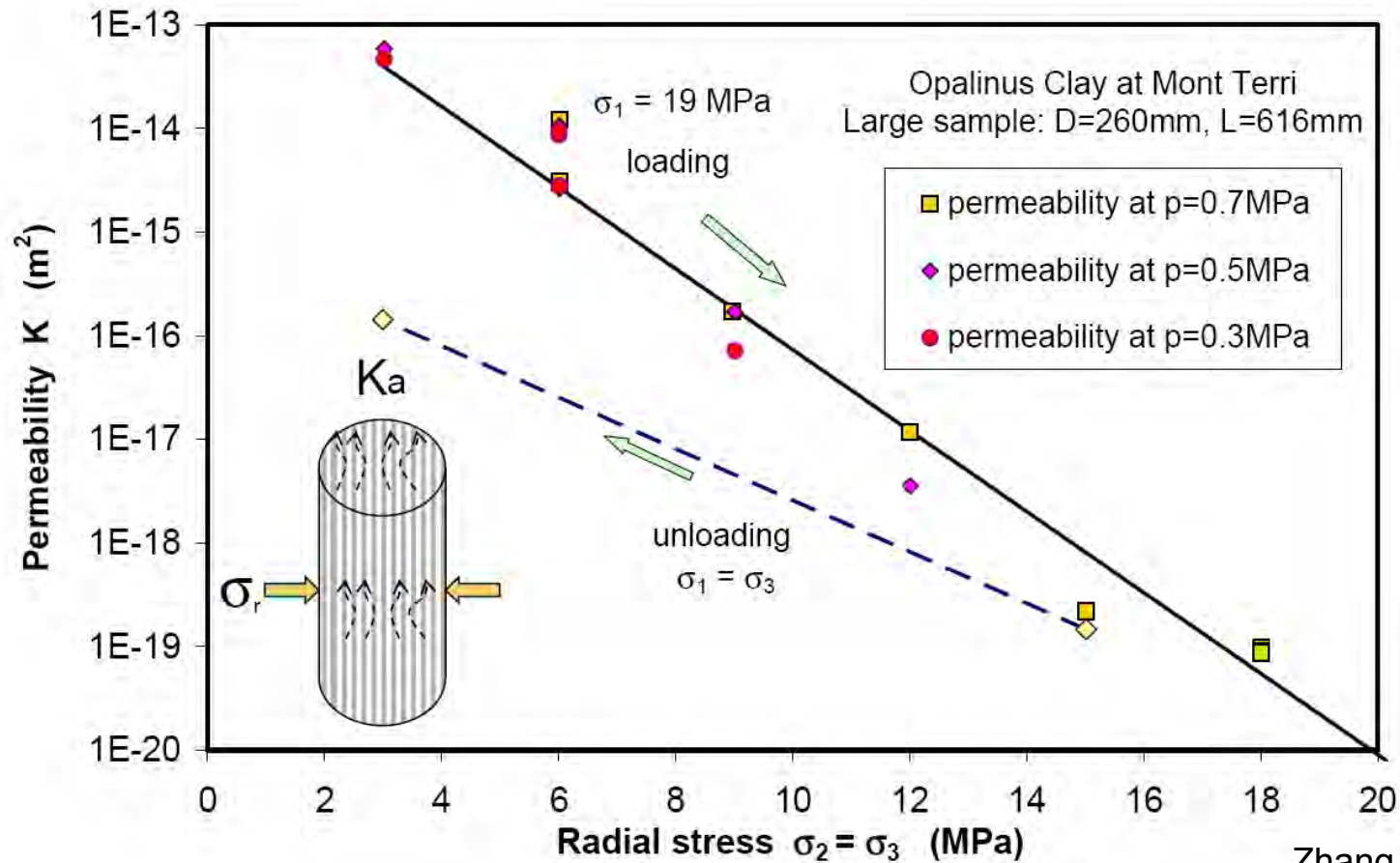
Abstraktion in der LZSA - EDZ

Verheilung der EDZ



Zhang et al. 2008

Verheilung der EDZ



Zhang et al. 2008

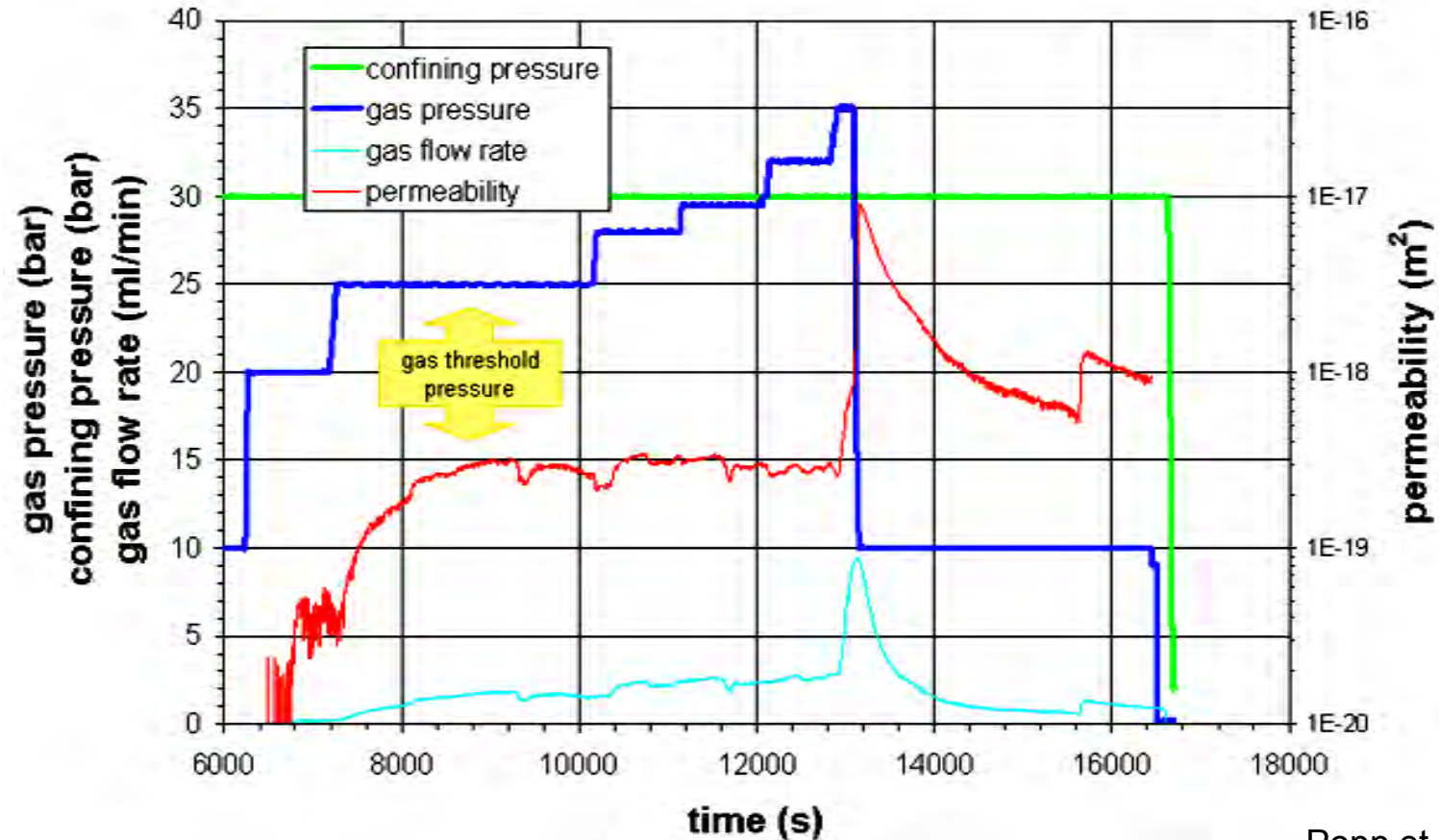
Abstraktion in der LZSA - EDZ

Einfluss des Gastransports auf die Permeabilität

Gastransportmechanismen

- Diffusion gelöster Gase $p > 0$
- Zweiphasenfluss $p > \text{Gaseindringdruck}$
- Dilatanzgesteuerter Fluss $p \approx \text{minimale Hauptspannung}$
- Bildung von Fracs $p \gg \text{minimale Hauptspannung}$

Einfluss des Gastransports auf die Permeabilität

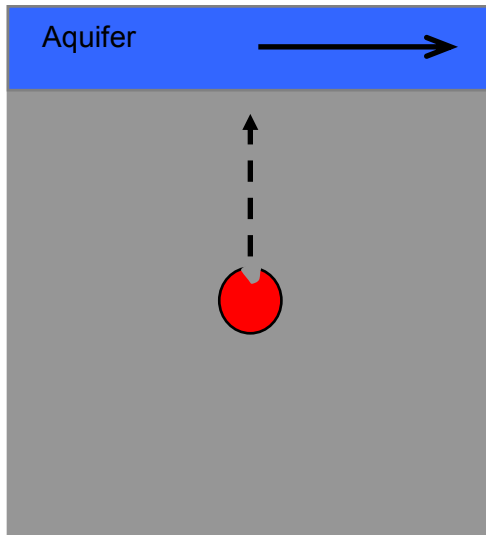


Popp et al. 2007

Abstraktion in der LZSA - Gastransport

Abstraktion in der Langzeitsicherheitsanalyse

- Die Vereinfachungen in der Langzeitsicherheitsanalyse sind begründet



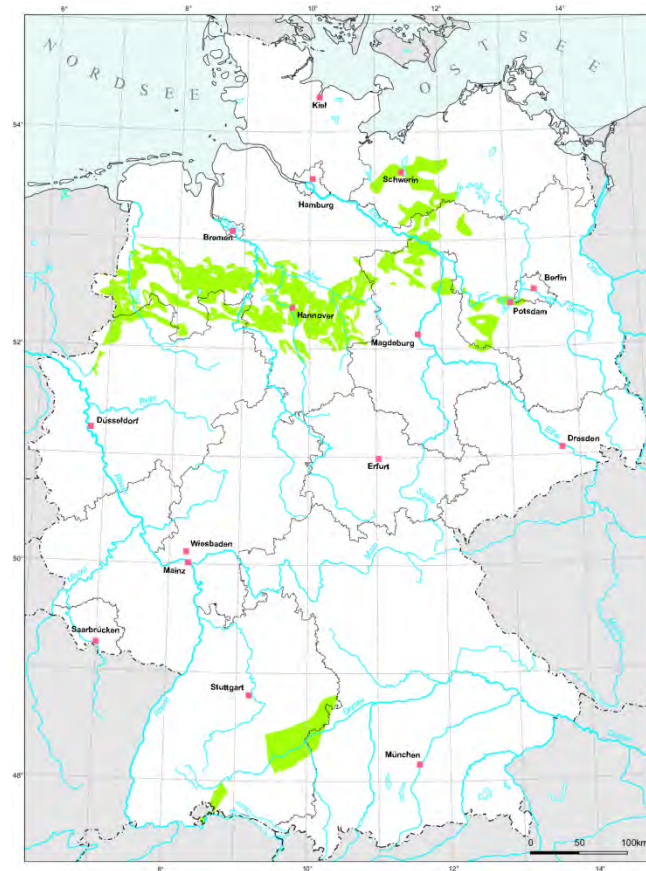
Aber

- Die Gültigkeit der Annahmen muss standortspezifisch gezeigt werden

⇒ Sicherheitsnachweis

Systemstudie

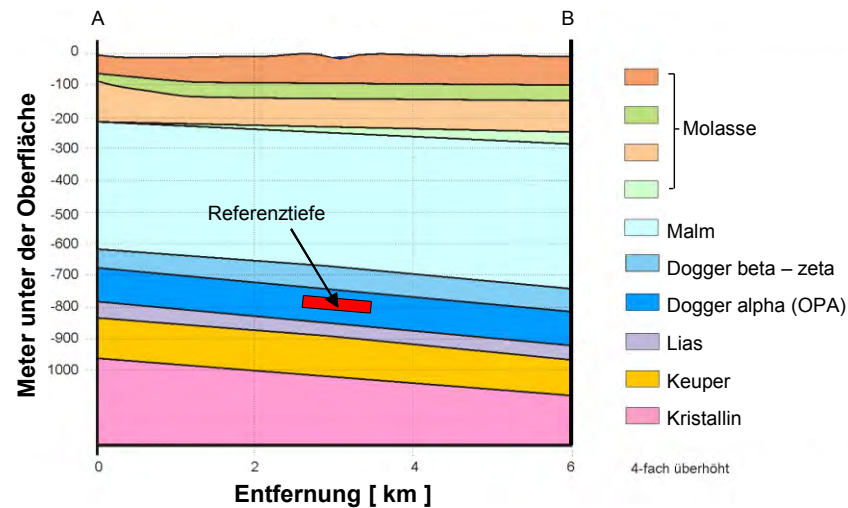
Untersuchungswürdige Tonformationen in Deutschland



BGR 2007

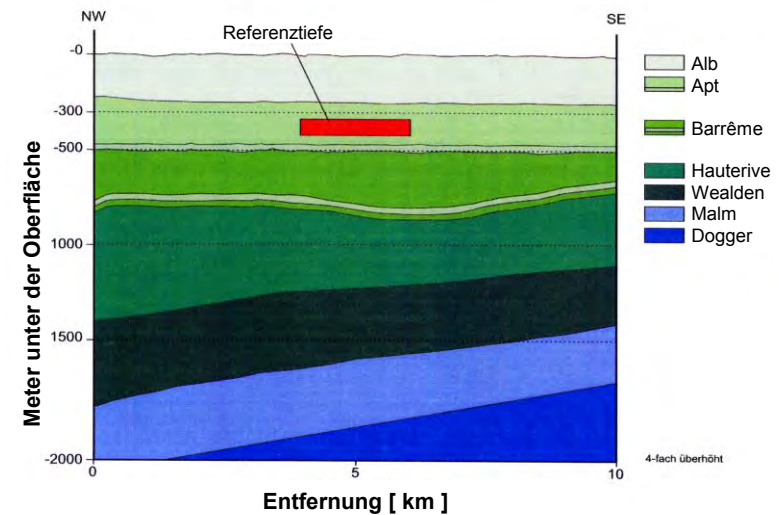
Opalinuston

- Süddeutschland
 - 180 Mio. Jahre (Jura)
 - 756 bis 877 m Tiefe
 - 121 m Mächtigkeit

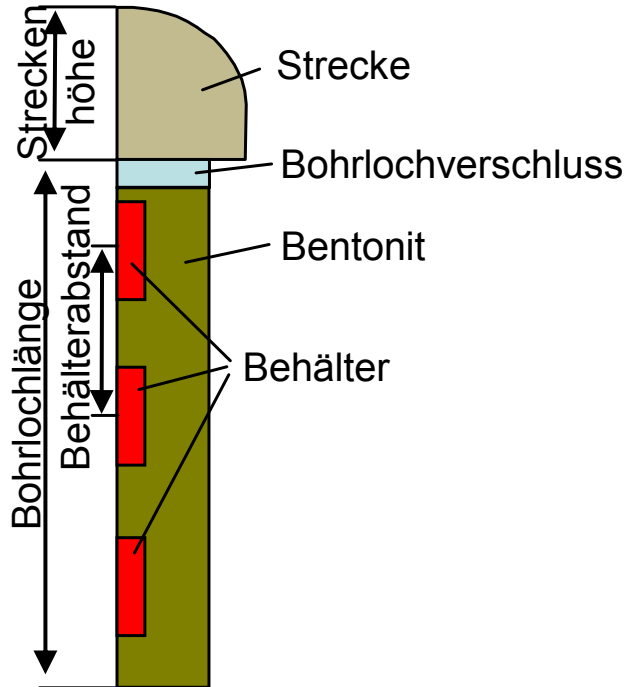


Unterkreidetone (Apt)

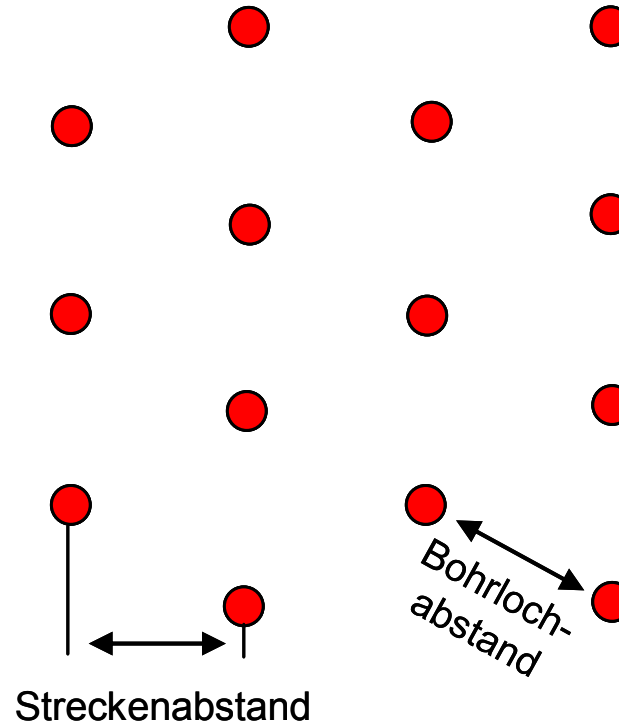
- Norddeutschland
 - 120 Mio. Jahre (Kreide)
 - 250 bis 470 m Tiefe (Apt)
 - 220 m Mächtigkeit (Apt)
 - 250 m Mächtigkeit (Alb)



Endlagerkonzept



Seitenansicht



Aufsicht

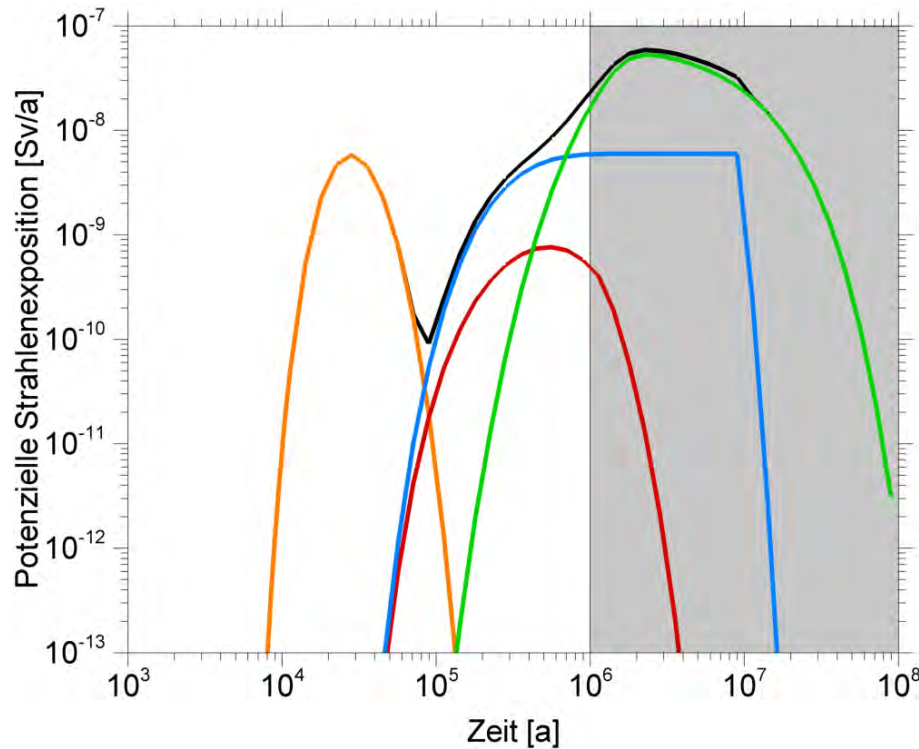
DBE 2007

Transportparameter

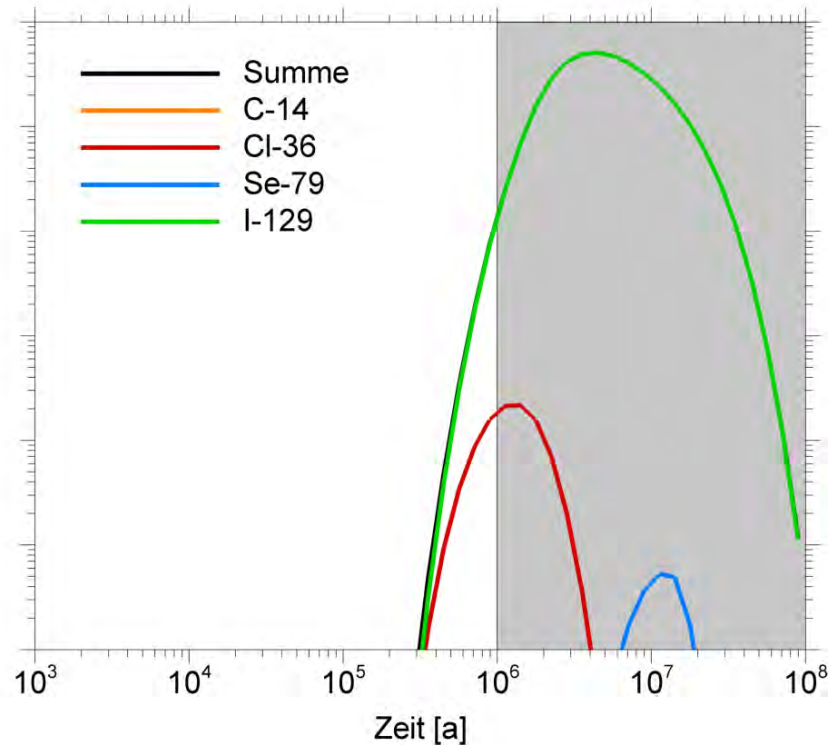
- Opalinuston
 - Nagra Studie
NTB 02-05
„Entsorgungsnachweis“
Standort Benken
 - Unterkreidetone
 - Untersuchungsprogramm
Planfeststellungsverfahren
Konrad
 - Weitere Literaturdaten
-
- Übertragbarkeit der Daten auf andere Standorte fraglich

Referenzfall: Strahlenexposition

- Opalinuston



- Unterkreidetone

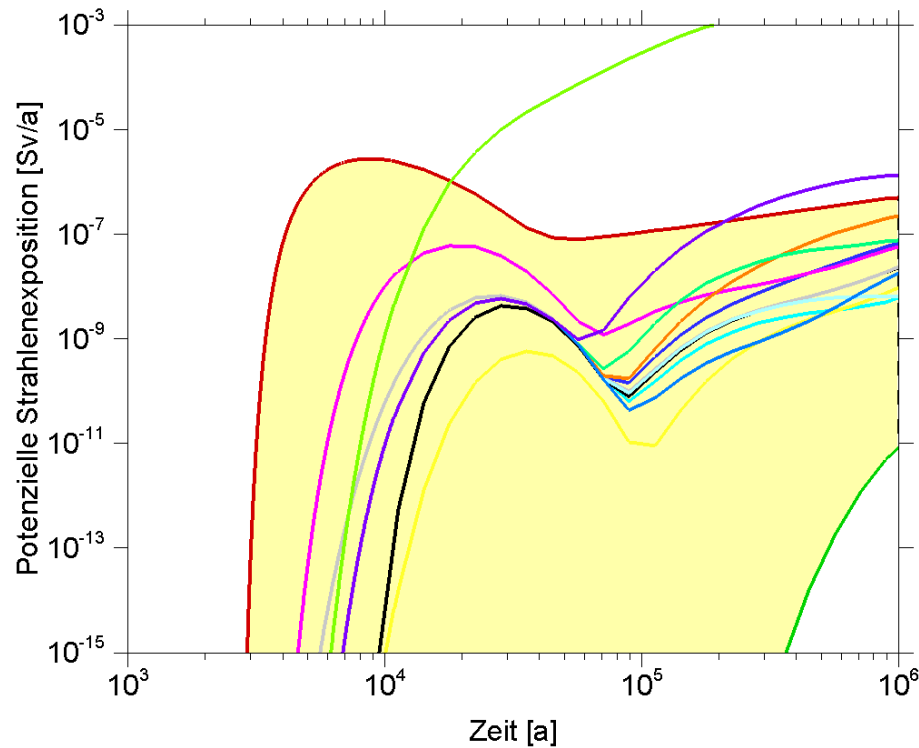


Parametervariationen

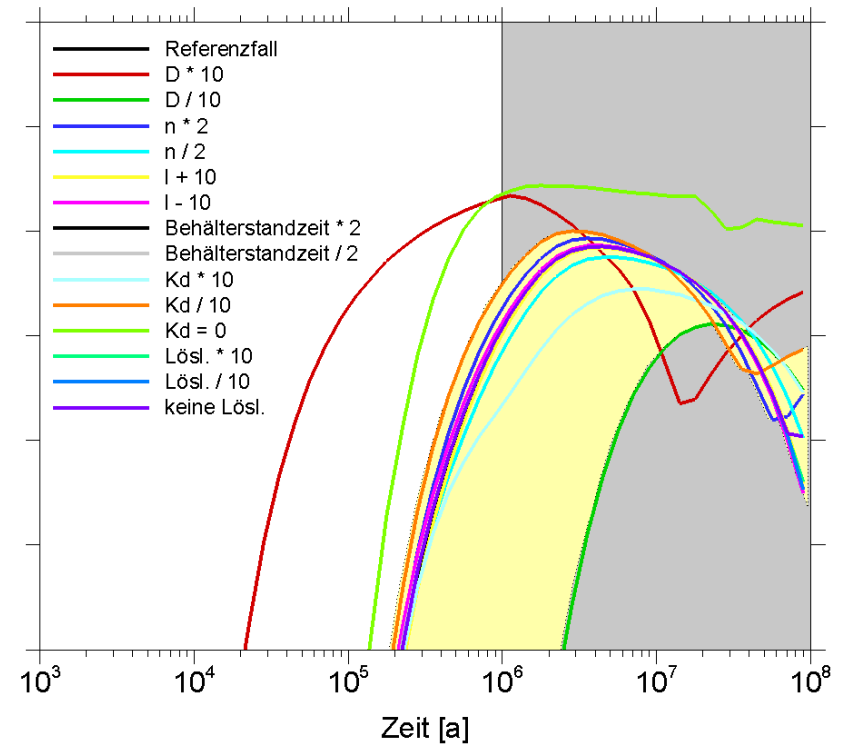
- Behälterstandzeit instantan / Faktor 2
- Transportstrecke ± 10 m
- Löslichkeit Faktor 10
- Diffusionskoeffizienten Faktor 10
- Diffusionszugängliche Porosität Faktor 2
- Verteilungskoeffizienten keine Rückhaltung / Faktor 10

Parametervariationen

● Opalinuston



● Unterkreidetone



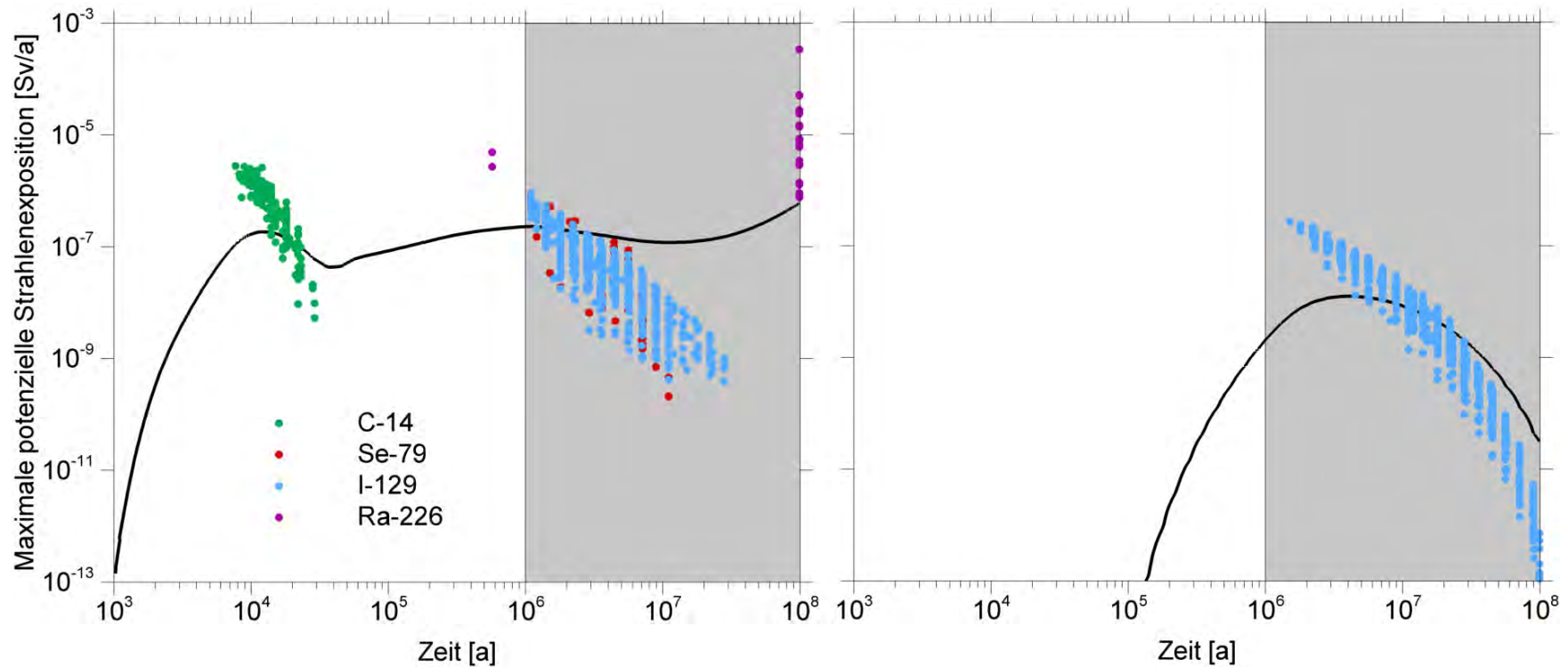
Probabilistik mit 1000 Simulationen

- Opalinuston
 - 7% der Spiele ohne Exposition bei 10 000 Jahren
- Unterkreidetone
 - Kein Spiel mit Exposition bei 10 000 Jahren
 - 55% der Spiele ohne Exposition bei 100 000 Jahren
 - 5% der Spiele ohne Exposition bei 1 000 000 Jahren

Unsicherheitsanalyse – Wichtigste Nuklide

● Opalinuston

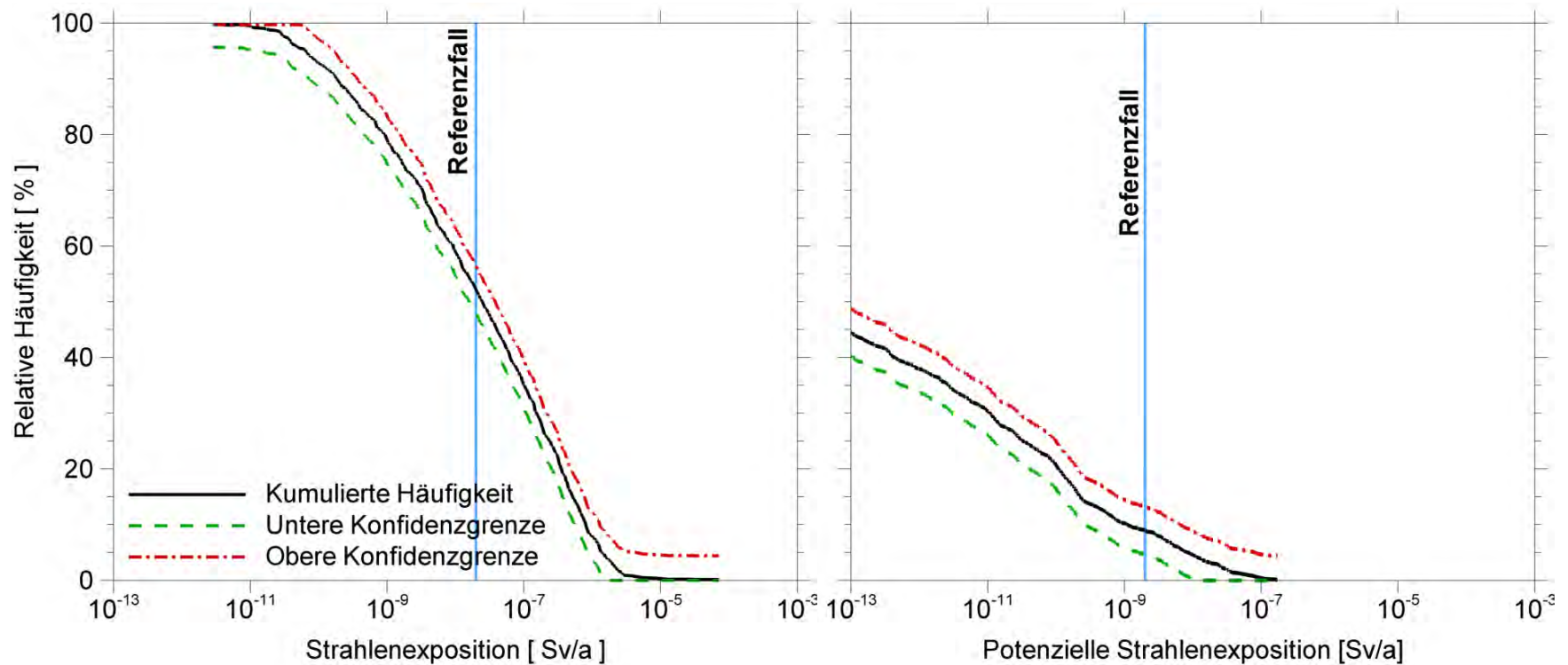
● Unterkreidetone



Unsicherheitsanalyse – Kumulierte Häufigkeit (1 Mio. a)

- Opalinuston

- Unterkreidetone



Sensitivitätsanalyse

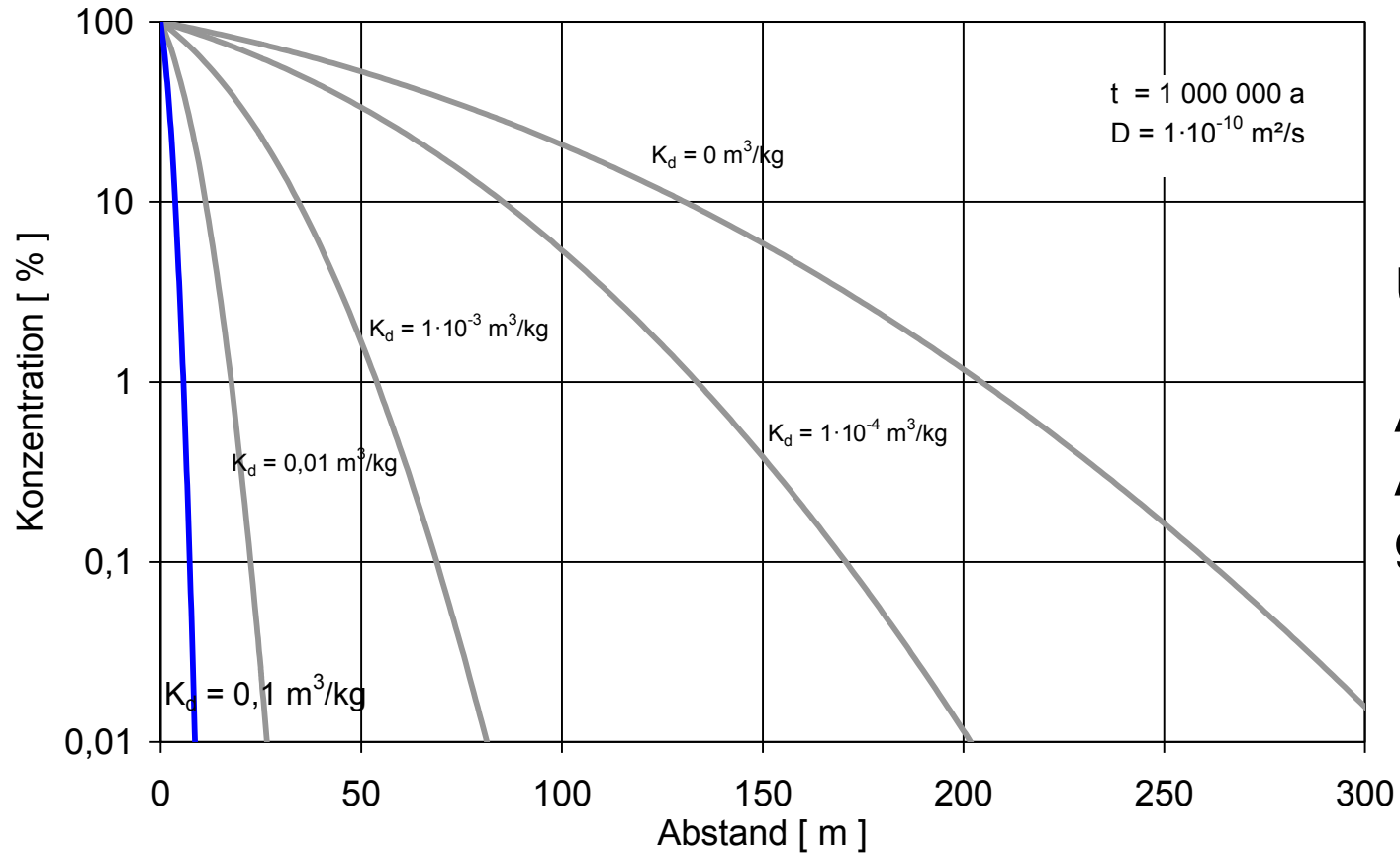
- Opalinuston

Parameter		10 ⁴ y	10 ⁵ y	10 ⁶ y	10 ⁷ y	Max
Nahfeld	Behälterstandzeit					
	Löslichkeitsgrenzen		3	3		4
	Diffusionskoeffizienten	2	2	4		5
	Verteilungskoeffizienten			2	3	2
	Porositäten					
Fernfeld	Diffusionskoeffizienten	1	1	1	1	1
	Verteilungskoeffizienten			5	2	6
	Porositäten				4	3

- Unterkreidetone

10 ⁵ y	10 ⁶ y	10 ⁷ y	Max
		3	3
1	1	1	1
		2	2
		4	4

Einfluss der Sorption auf den Transport



U

Alle weiteren
Aktiniden
größer

Ergebnisse der LZSA für ein Endlager im Tongestein

- Niedrige Strahlenexposition verglichen mit dem Schutzziel
- Vollständiger Einschluss der meisten Radionuklide
- Diffusionskoeffizient im Wirtsgestein ist der wichtigste Parameter in Bezug auf die Strahlenexposition
- Einfluss der Parameterunsicherheit auf das Maximum der Strahlenexposition ist geringer, je mächtiger die Formation ist

Wo stehen wir?

- Hoher internationaler Wissensstand über Prozesse in Ton
 - Intensiver Forschungsaufwand in den Untertagelabors Mont Terri (CH), Bure (F), Mol (B) für die nationalen Programme
 - Basis für Endlagerkonzept und Sicherheitsanalyse in Deutschland wurde und wird zur Zeit geschaffen
- ⇒ Guter generischer Wissensstand
-

Wo sollten wir hin?

- Übergang von generischen zu realen Untersuchungen
 - Kernbohrung in einer relevanten Tonformation (Unterkreide)
 - Messung von Isotopenprofilen
 - Bohrlochtests zur Bestimmung der Druckverteilung und der Permeabilität
 - Messung von Diffusionskoeffizienten
 - Messung von Verteilungskoeffizienten
-