

Die wissenschaftliche Basis für den Langzeitsicherheitsnachweis der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Stefan Neumeier, Dirk Bosbach

Institut für Energie- und Klimaforschung – Nukleare Entsorgung (IEK-6)

Die Frage „Ausstieg oder nicht?“ stellt sich beim Thema nukleare Entsorgung und Endlagerung nicht – **Deutschland muss seine radioaktiven Abfälle sicher entsorgen**. Dies liegt in der Verantwortung des Bundes.

Über 90% der Europäer meinen, dass eine Lösung für hoch-radioaktive Abfälle jetzt entwickelt und nicht zukünftigen Generationen überlassen werden sollte (EUROBAROMETER 2005, 2008).

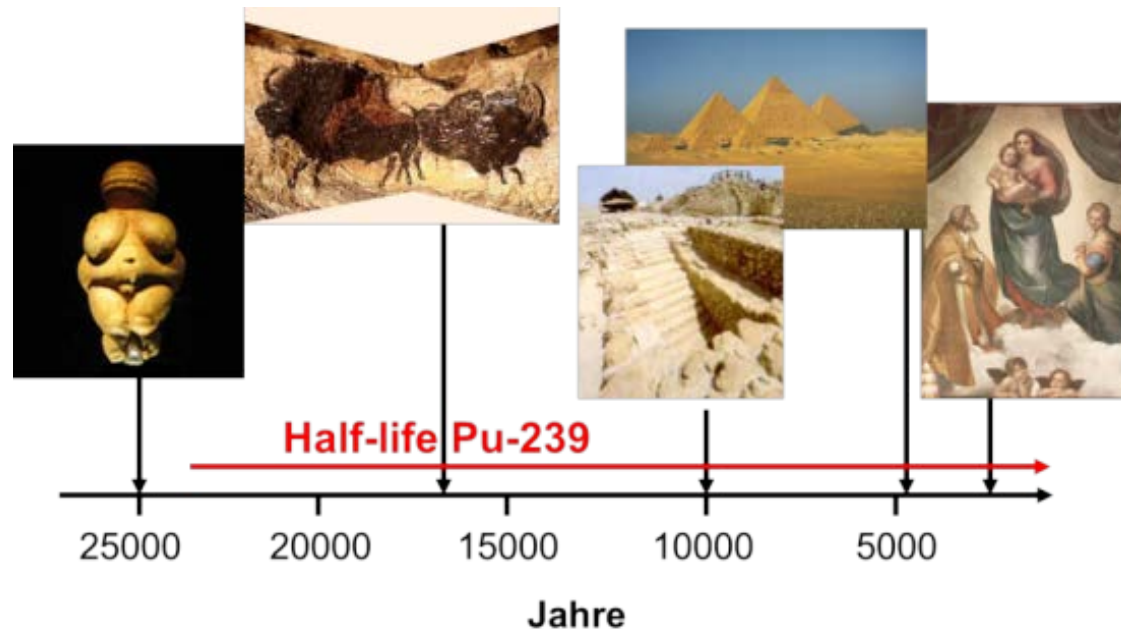
Ziel der Endlagerung in Deutschland

- Der sichere Einschluss der Abfälle und damit deren Isolation.
- Die Gewährleistung, dass langfristig eventuell nicht zu vermeidende Radionuklidfreisetzungen so gering sind, dass sie nicht zu einem erhöhten Risiko für Mensch und Umwelt führen.
- Einen langfristig wirksamen Schutz vor einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das Endlager zu gewährleisten.
- Überführen des hochradioaktiven Abfalls von einem langfristig risikoreicheren in einen risikoarmen Zustand.

Es besteht ein breiter Konsens, dass die Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation dafür die beste Option darstellt.

Langzeitsicherheit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Eine wissenschaftliche Herausforderung liegt im Nachweis der Sicherheit über geologische Zeiträume von mehreren Hunderttausend Jahren.



Die Langzeitsicherheit eines Endlagers kann nicht allein durch technische Maßnahmen nachgewiesen werden.

Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation ...

... wird heute weltweit als bester Entsorgungsweg für hochradioaktive Abfälle angesehen.

Langzeitsicherheit nicht mit technischen Maßnahmen nachweisbar.
Passive Sicherheit des geologischen Systems.

Derzeit werden Salz, Ton und Granit in verschiedenen Ländern intensiv im Zusammenhang mit einem Standort untersucht:

Tonstein: Schweiz, Frankreich, Belgien

Granit: Schweden, Finnland

Steinsalz: Deutschland

Darüber hinaus international intensive generische Endlagerforschung – ohne direkten Bezug zu einem Standort.

Endlagerforschung ist multidisziplinär

- Geologische Aspekte – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Geotechnik, Bergbau und Betrieb – Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)
- Sicherheitsnachweis – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
- Nukleare Themen – Helmholtz-Gemeinschaft (HGF)

Jülich – Materialwissenschaftliche Aspekte
HZDR – Radionuklide in Ökosystemen
KIT – Geochemie der Actiniden

Nukleares Abfallaufkommen

Schwach- und mittelradioaktive Abfälle (303 000 m³)

KKW inkl. Stilllegung (61,9%), Forschung (23,6%), Wiederaufarbeitung (7,0%),
Landessammelstellen (3,8%), kerntechnische Industrie (3,7%)

Volumenanteil: 92,2%
Anteil der Radioaktivität: 1%

Endlager Konrad – technisch gelöst und genehmigt

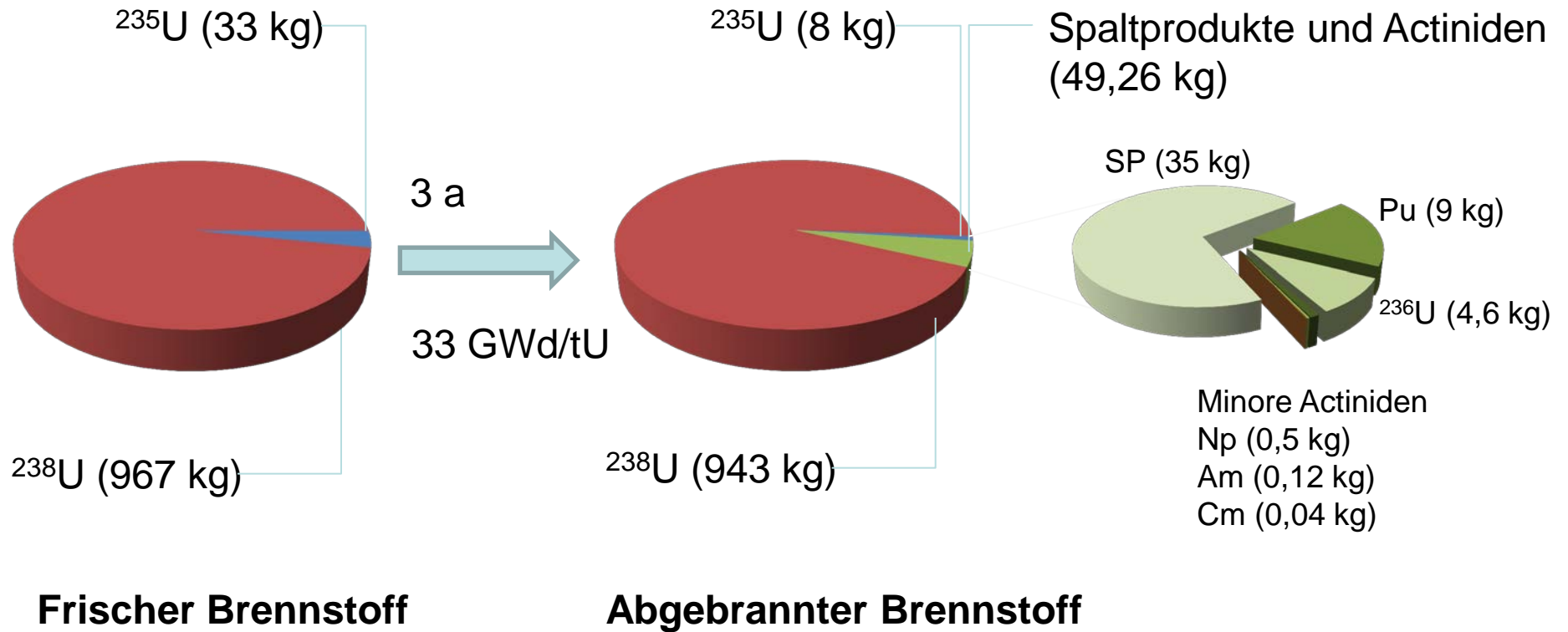
Hochradioaktive Abfälle (29 000 m³)

Brennelemente (83,7%), Wiederaufarbeitung (11,7%), verglaste Abfälle (3,6%),
Sonstige (1,0%)

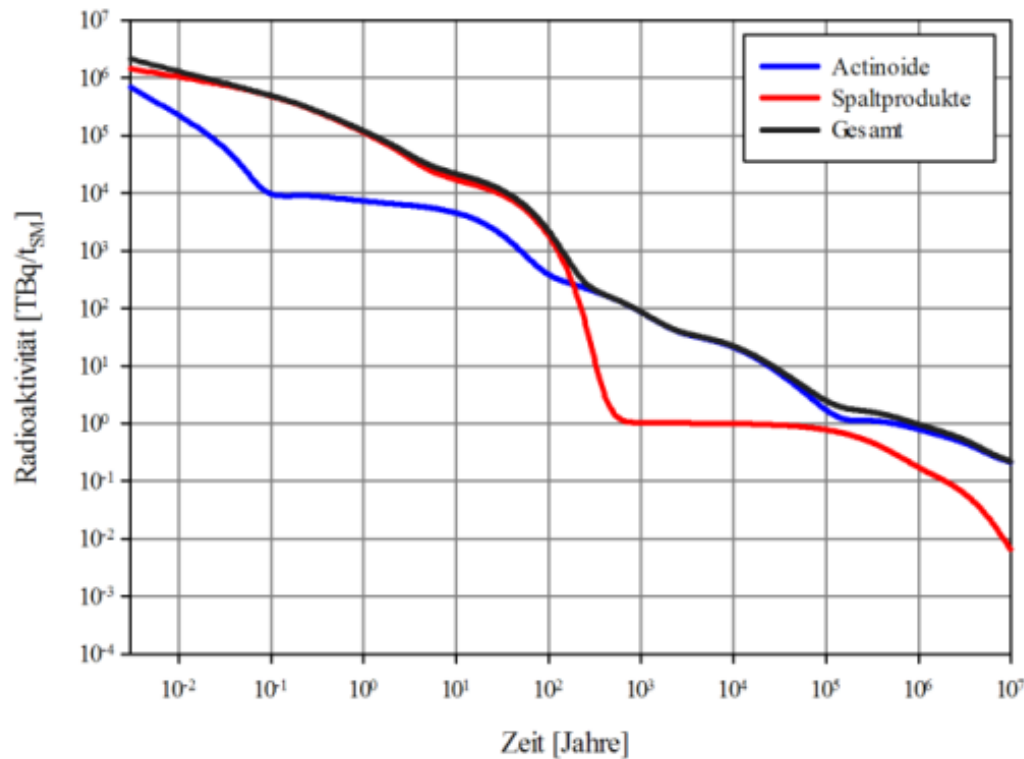
Volumenanteil: 7,8 %
Anteil der Radioaktivität: 99 %

Geologische Endlagerung und neue Entsorgungsstrategien

Abgebrannter Kernbrennstoff

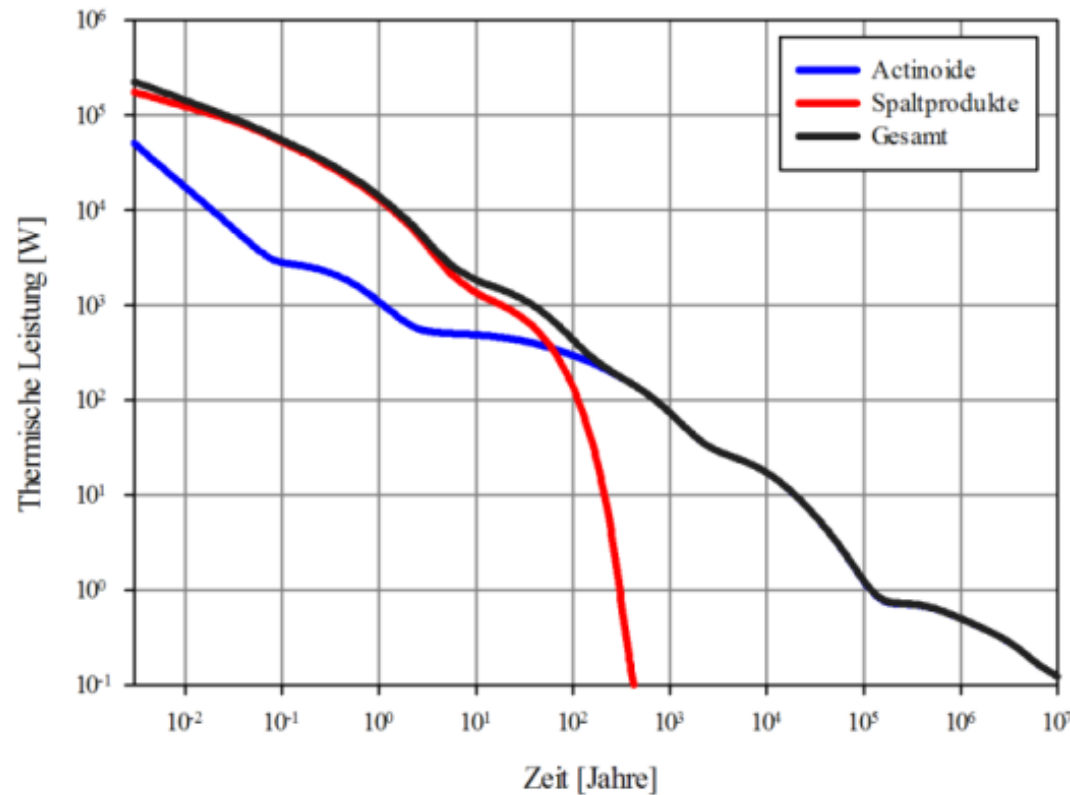


Radioaktivität von abgebranntem Kernbrennstoff



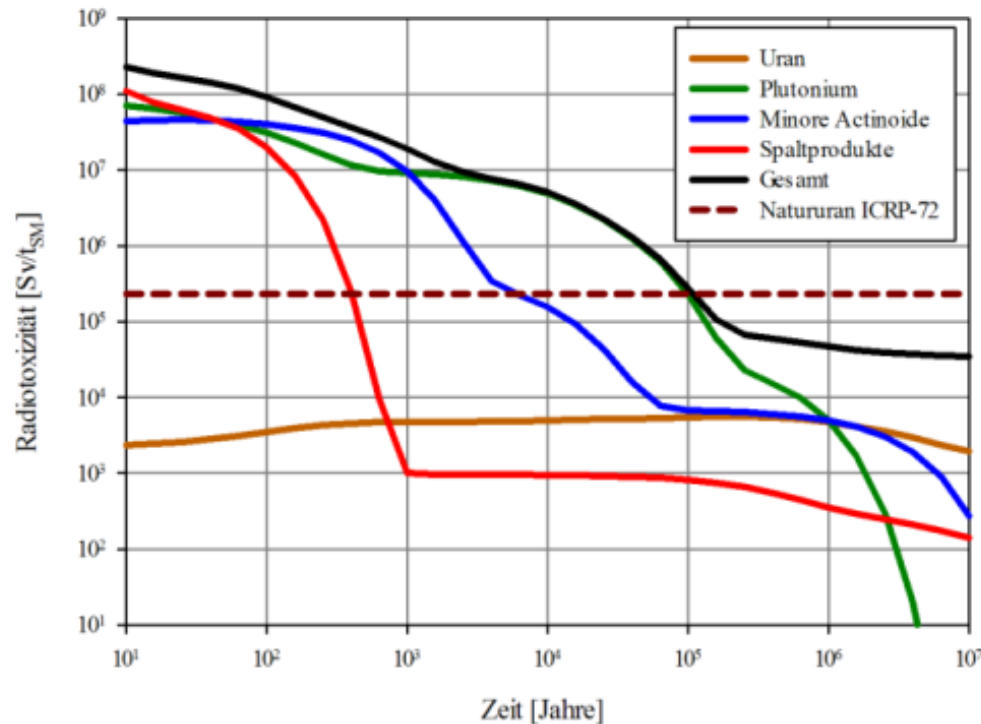
Brennelementtyp: Siemens 16x16
 Anreicherung: 4.0 [w.%]
 Abbrand: 50 [GWd/tSM]

Wärmeleistung von abgebranntem Kernbrennstoff



Brennelementtyp: Siemens 16x16
 Anreicherung: 4.0 [w.%]
 Abbrand: 50 [GWd/tSM]

Radiotoxizität von abgebranntem Kernbrennstoff



Brennelementtyp: Siemens 16x16
 Anreicherung: 4.0 [w.%]
 Abbrand: 50 [GWd/tSM]

Heat-generating radioactive waste in Germany

	Volume / <u>cask</u>	<u>Waste package volume [m³]</u>
HAW – <u>glass</u> (CSD-V)	3.719 <u>canisters</u>	ca. 670
MAW – <u>glass</u> (CSD-B)	600 <u>canisters</u>	ca. 110
<u>Compacted waste</u> (CSD-C)	4.104 <u>canisters</u>	ca. 740
<u>Spent fuel elements</u>		
<u>Power reactors</u>	11.133 tSM (in Pollux <u>casks</u>)	21.800
PKA/IKA	2.600 Mosaik II <u>casks</u>	3.400
THTR/AVR	4457 CASTOR <u>casks</u>	1.970
<u>Research reactors</u>	65 CASTOR <u>casks</u>	160
WAK Karlsruhe	ca. 900 200L <u>drums</u>	180
	Total	29.030

Source: Federal Office of Radiation Protection (Germany), Sep 2011

Langlebige Spalt- und Aktivierungsprodukte & Actinoide

Langlebige Spalt- und Aktivierungsprodukte (engl. MOFAPs)

C-14, Cl-36, Se-79, Tc-99, I-129, Cs-135

Wegen ihrer Mobilität in einem Endlagersystem (Vorsicht: konservative Annahmen).

Actinoide / Actiniden:

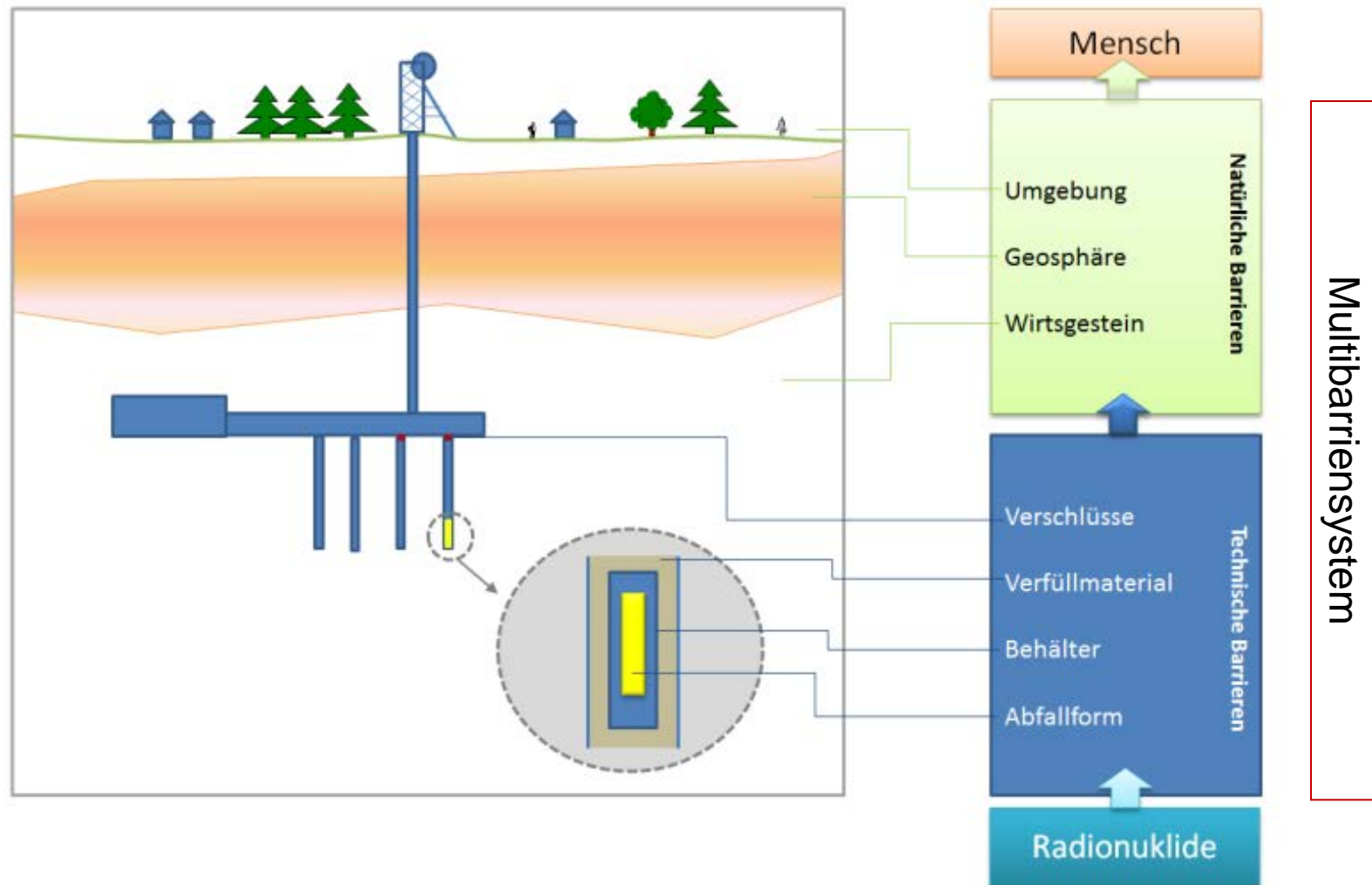
U, Np, Pu, Am, Cm

Wegen ihrer hohen Radiotoxizität.

Für bestimmte Szenarien:

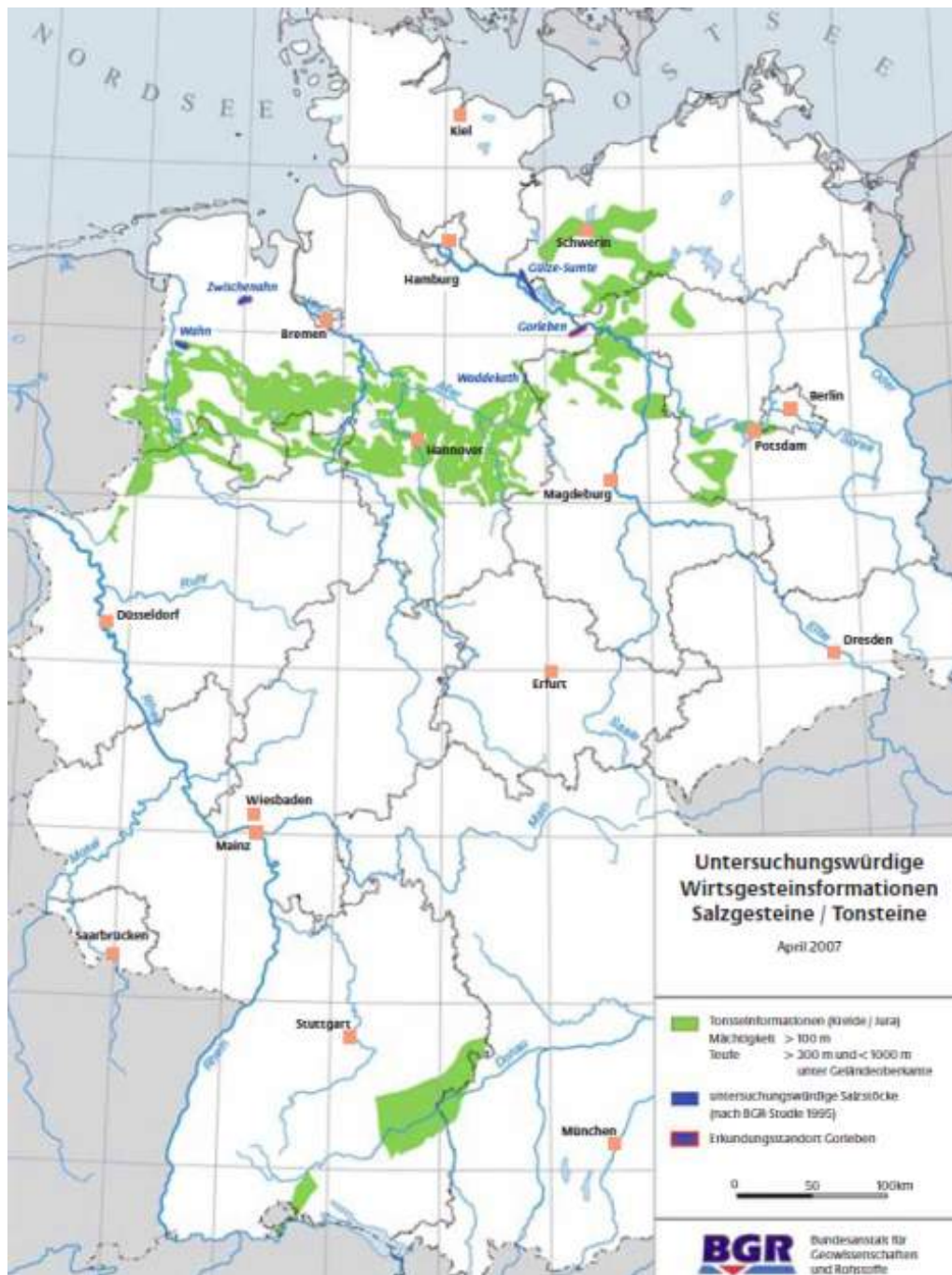
Ra

Nukleare Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation



Wichtige Voraussetzungen

- Stabile geologische Gesamtsituation (baltischer Schild ca. 2 Mrd. a; Gorleben ca. 250 Mio. a)
- Detaillierte Standorterkundung (Wasserwegsamkeiten, ...)
- Physikalisch-chemische Grundlagen zum Verhalten von Radionukliden in einem Multibarrierensystem eines Endlagers



Salzstöcke und Tonsteinvorkommen in Deutschland, die für die nukleare Endlagerung in Frage kommen könnten.

Endlagerrelevante Eigenschaften potentieller Wirtsgesteine in Deutschland

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein (z. B. Granit)
Wärmeleitfähigkeit	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	isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

Quelle: BMWi

Geologische Zeitskalen



Bildung der Erde
vor 4,6 Mrd Jahren

Sicherer Einschluß der
hochradioaktiven Abfälle

Salzstock (Gorleben)

Tonstein (Callovo Oxfordian, F, Opalinus, CH)

Skandinavischer Schild /Granit): Finnland, Schweden 1,2 – 3 Mrd. Jahre

300 Mio Jahre

200 Mio

100 Mio

0



Entstehung des Universums
vor 13,75 Mrd. Jahren



Australopithecus

Die Rolle von Wasser in einem Endlagersystem

- Ohne Wasser ist die Mobilität und die Freisetzung aus einem Endlagersystem in einer tiefen geologischen Formation praktisch ausgeschlossen.
- In Gegenwart von (Grund)wasser treten komplexe Korrosionsprozesse auf, die zur Freisetzung und Mobilisierung von Radionukliden führen können. Gleichzeitig treten Sorptionsreaktionen auf, die zu einer Rückhaltung der Radionuklide führen.

Belastbare Aussagen zur Mobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden erfordern detailliertes Prozessverständnis und validierte thermodynamische / kinetische Daten.

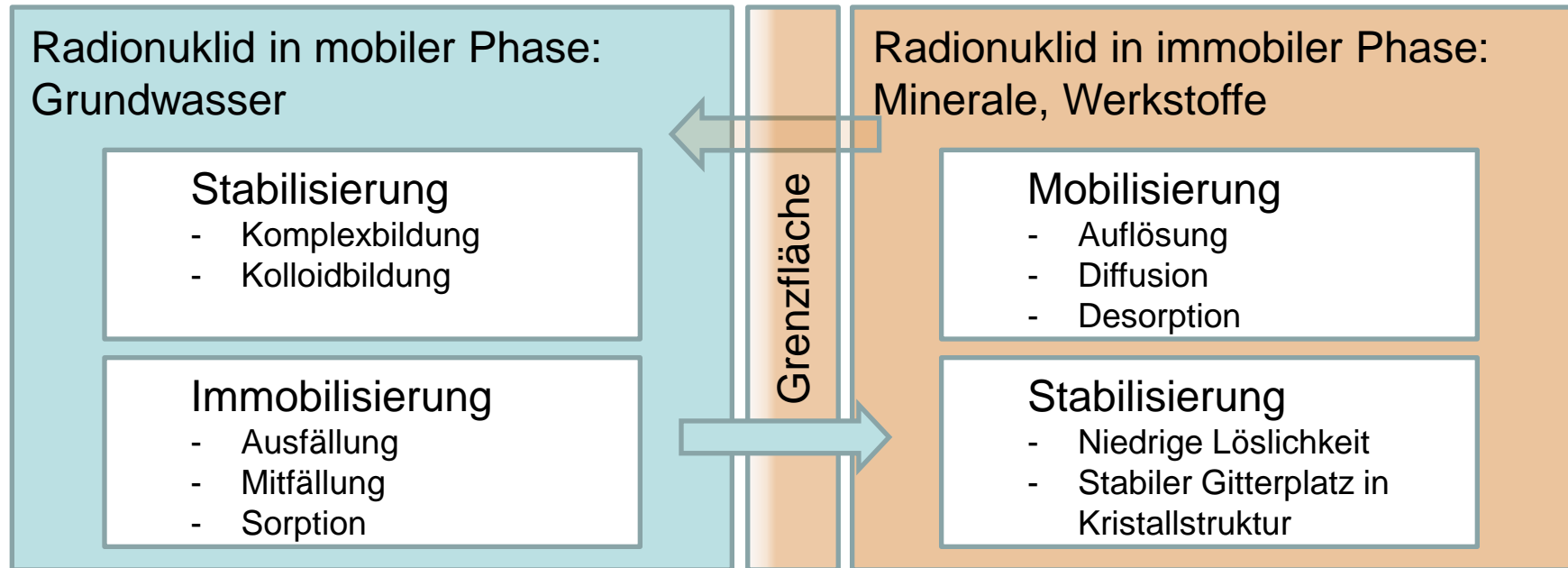
Die Rolle von Wasser in einem Endlagersystem

Die Wahrscheinlichkeit für die Präsenz von Wasser in einem Endlagersystem ist für die verschiedenen Endlagerprojekte in Europa sehr unterschiedlich:

- Steinsalz – Der Zutritt von Wasser zum Nahfeld* gilt als eher unwahrscheinlich.
- Granit – Der Zutritt von Wasser zum Nahfeld gilt als Regelfall. Ausbreitung von Radionukliden über Kluftsysteme.
- Tonstein – Geringe Wassermengen sind integraler Bestandteil von Tonstein. Ausbreitung von Radionukliden ausschließlich über Diffusion (SEHR LANGSAM!)

*Nahfeld: Abfallform plus technische und geotechnische Barriere.
Fernfeld: Geologische Formation.

RadioGeochemische Prozesse und Radionuklid-Mobilität



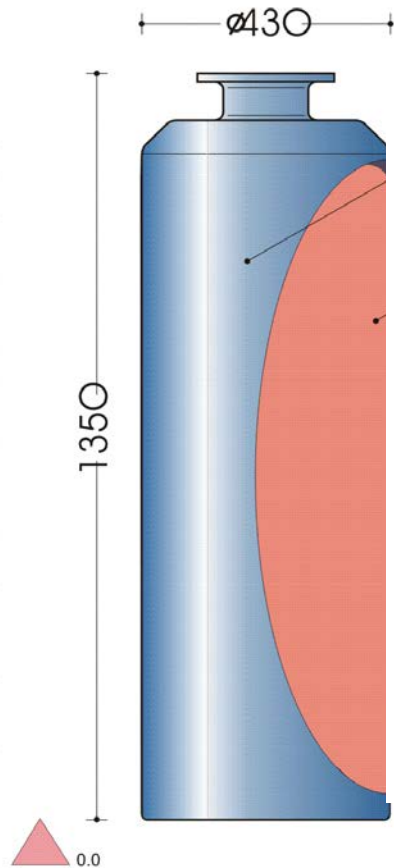
Systemverständnis auf molekularer Ebene ist ein zentrales Element des Langzeitsicherheitsnachweises

„Safety Case“

Beispiel: Korrosion von HAW-Glas unter Endlagerbedingungen

HAW glass composition

HAWC-WAK container

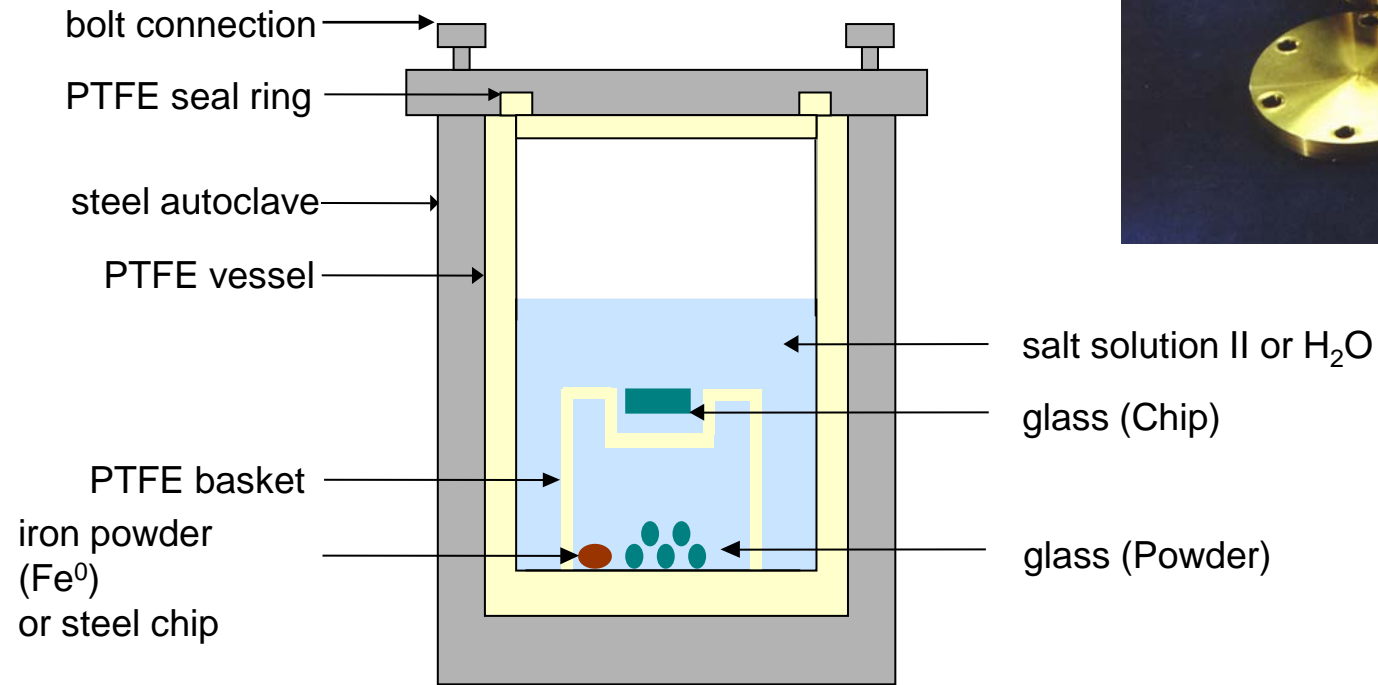


Oxide	BNFL (Blend 1)	GP WAK
SiO ₂	47.0	50.4
Al ₂ O ₃	1.9	2.6
B ₂ O ₃	17.2	14.8
CaO	-	4.5
MgO	2.1	1.8
Na ₂ O	8.5	10.3
Li ₂ O	4.0	2.9
ZnO	-	0.002
Cr ₂ O ₃	-	0.49
Fe ₂ O ₃	1.0	1.87
P ₂ O ₅	-	0.38
ZrO ₂	2.0	-
UO ₂	0.1	1.27
PuO ₂	<0.1	-
NpO ₂	0.1	-
AmO ₂	0.1	-
FP	16.0	-

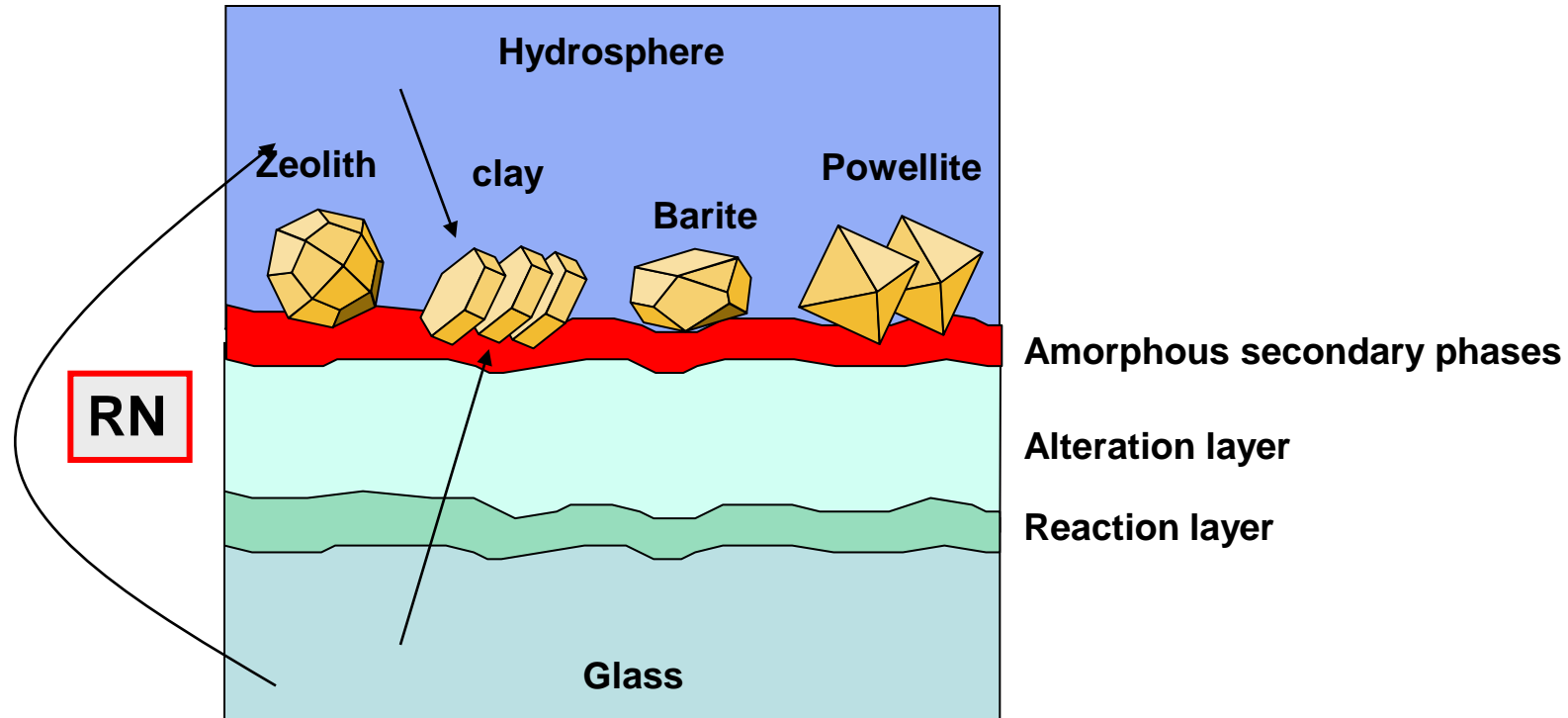
Fission products: (Apparent mobility in the geosphere)
Se, Cs, Sr, I, Cl

Actinides: (Long-term radiotoxicity) Pu, Np, Am, Cm

HAW glass corrosion experiments

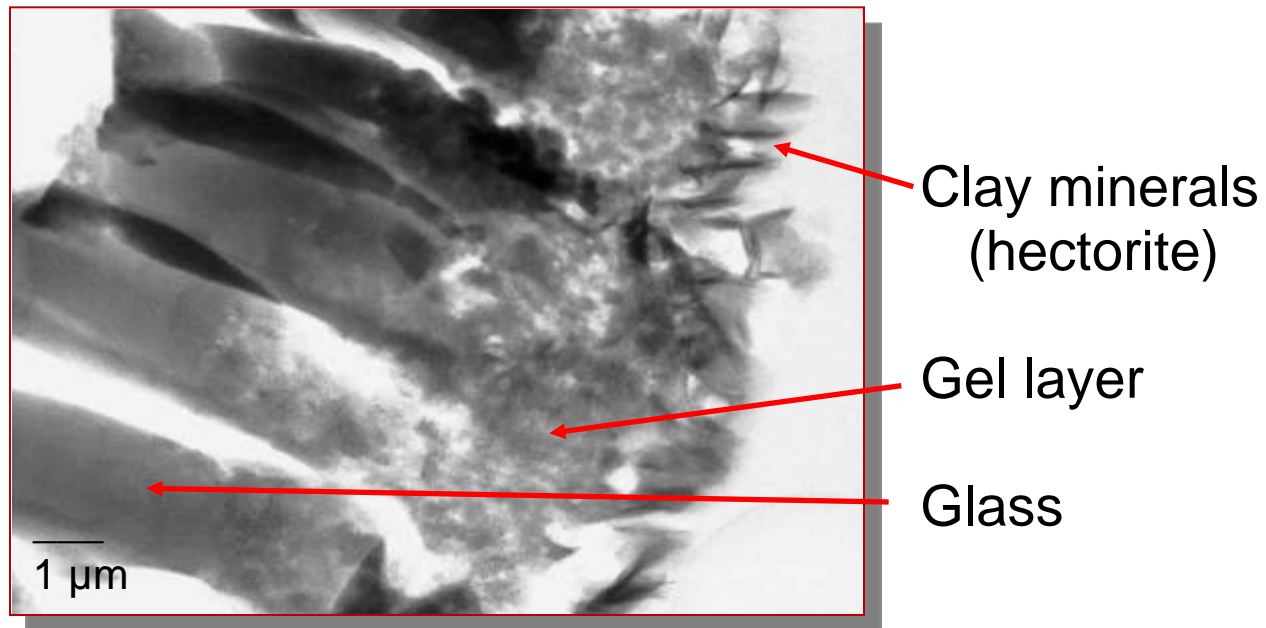


Glass – groundwater interactions



Secondary phases: Clay minerals

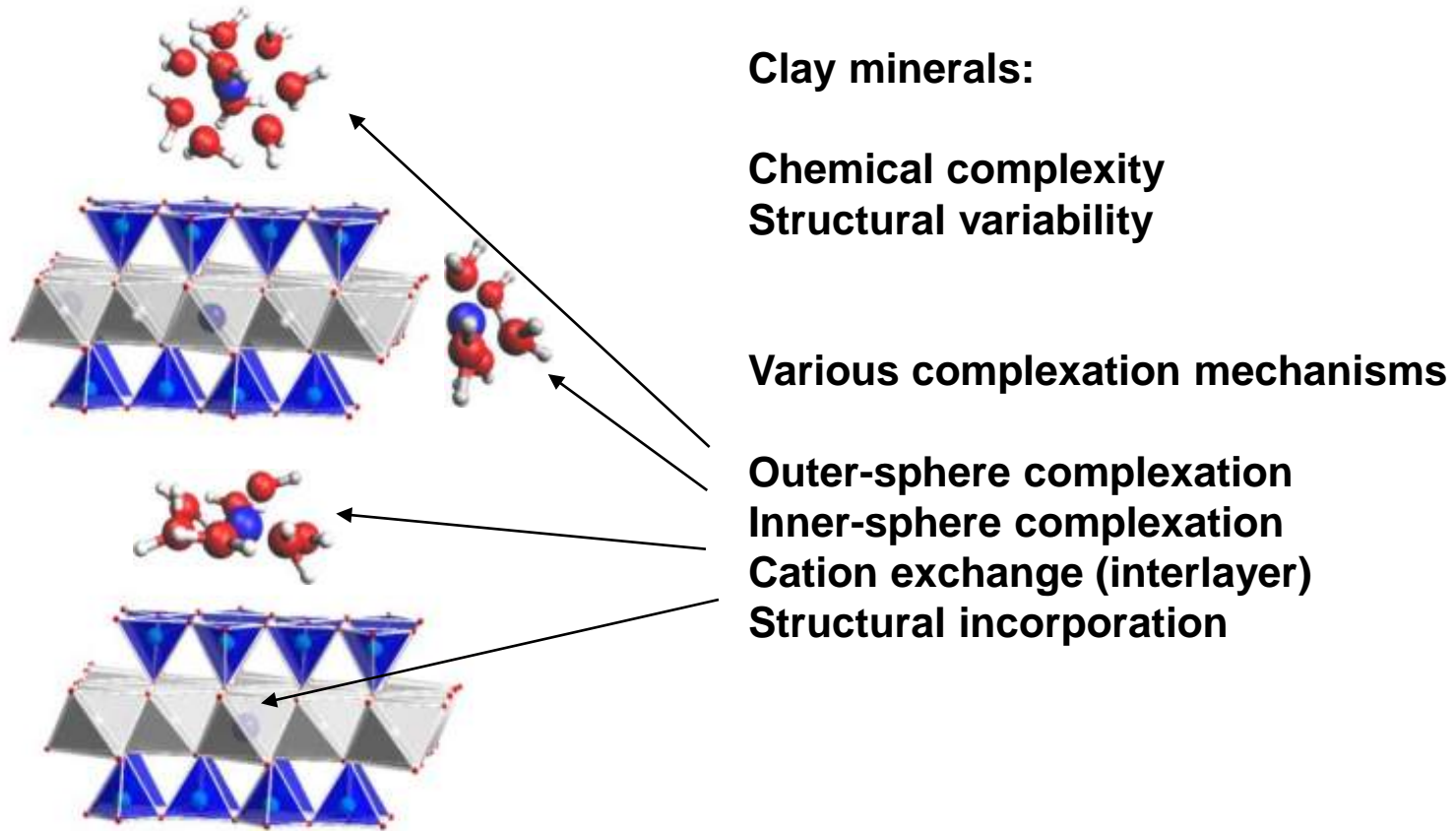
Corroded HAW glass (TEM cross-sectional view)



at.-%	glass	gel layer	clay
Nd_2O_3	2.06	3.5	3.0

Enzo Curti (PSI), J.-L.Crovisier (Uni Strasbourg)

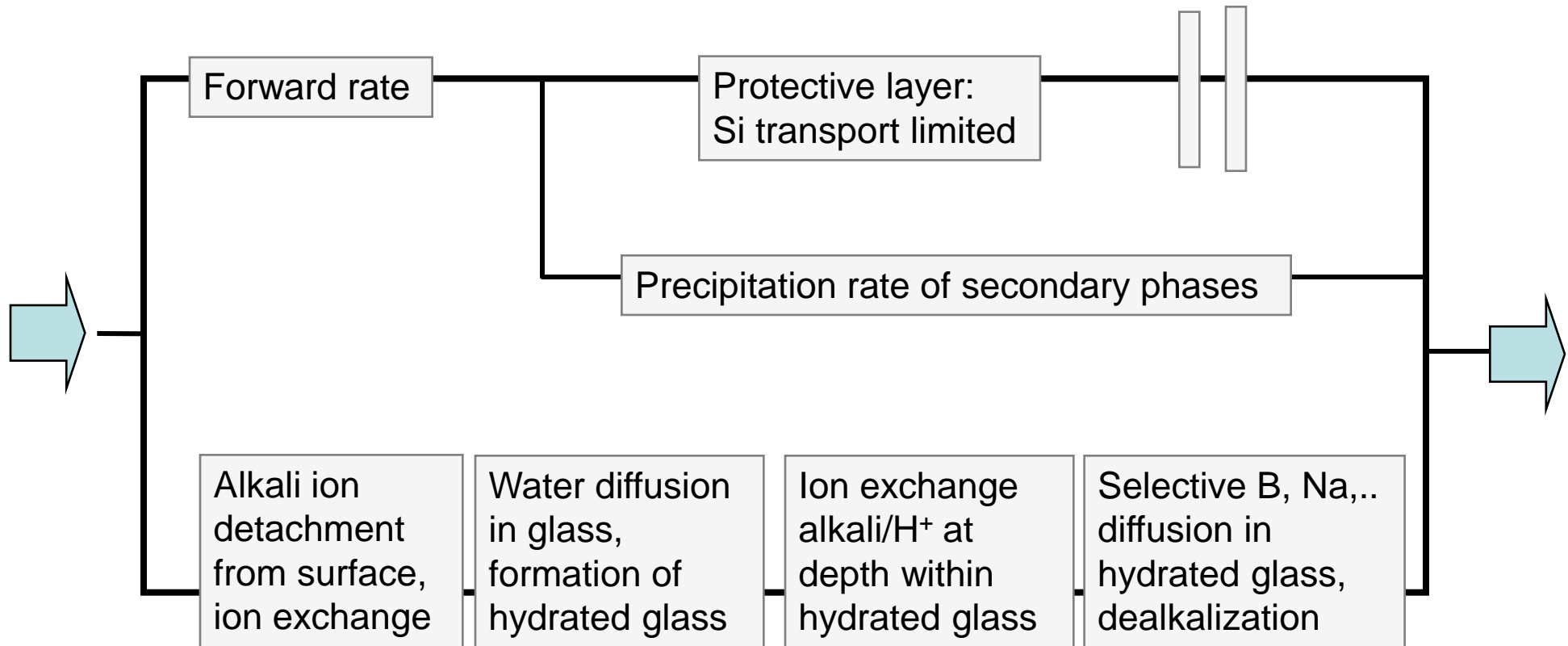
Secondary phases: Clay minerals



Molecular level binding mechanisms of trivalent actinides have been identified using state of the art spectroscopic techniques (EXAFS at INE beamline @ ANKA & ESRF, TRLFS) and molecular modelling (DFT calculations)

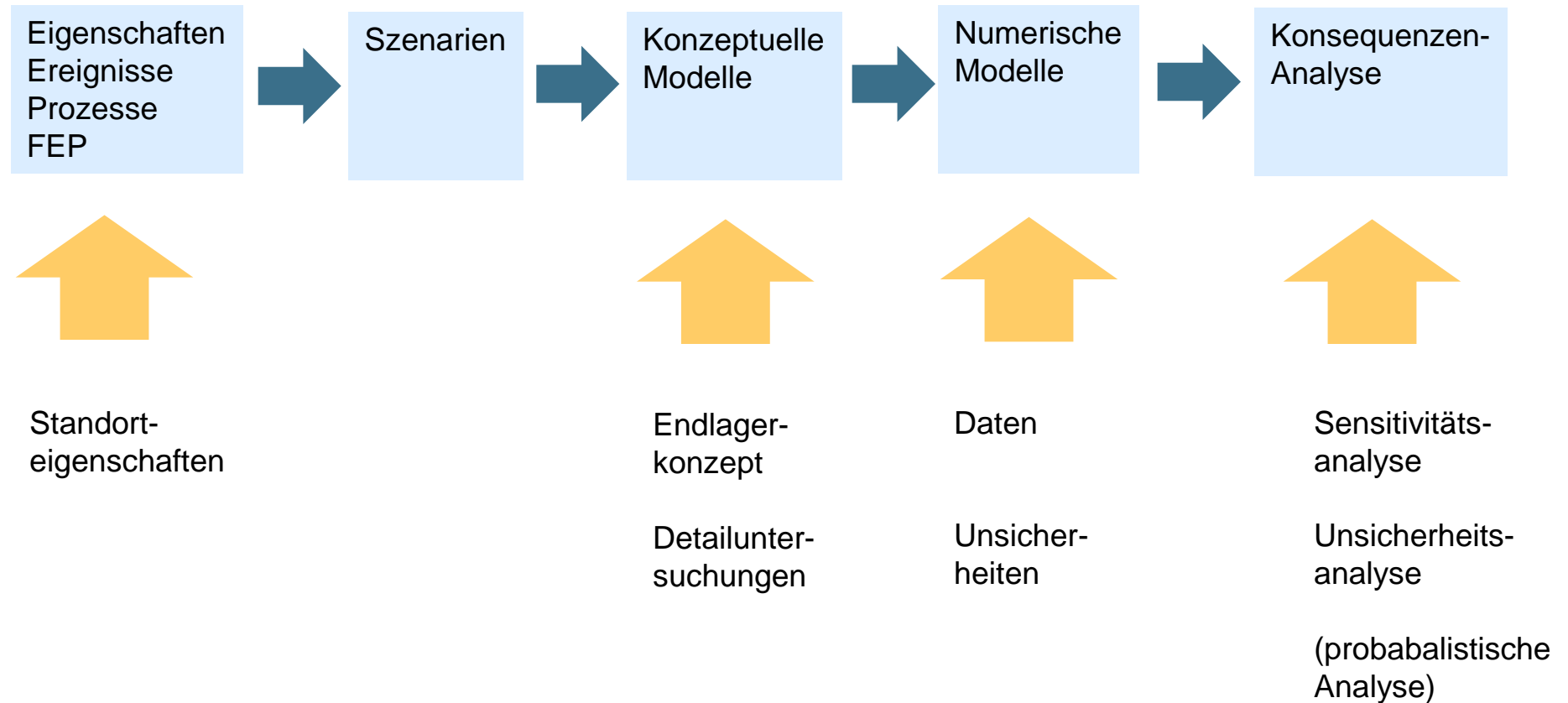
HAW glass corrosion

Corrosion rates – long term predictions (extrapolations) on the basis of *mechanistic* models



after B.Grambow (2006/2007)

Analyse der Langzeitsicherheit



Schutzziel: Risiko <math>< 10^{-4}</math> ($D < 0.026 \text{ mSv/a}</math>) nach BMU Entwurf <math>< 0.3 \text{ mSv/a}</math>
 (natürliche Strahlendosis: $2.4 \text{ mSv/a}</math>), Grundwasserschutz, Schutz der Biosphäre$$

How to test the applicability ...

... of current process understanding about future repository behaviour / evolution over extremely long (geological) time scales.

Tools, process understanding and available data can be tested on certain geological systems in nature which show specific aspects of a nuclear waste repository - **natural analogues**.

There is no natural analogue which shows all aspects of a nuclear waste repository. Only selected aspects can be studied.

Example: Oklo

Oklo: A natural fossil nuclear reactor

17 natural nuclear reactors within the uranium ore deposits in Oklo and Bangombe (Gabon) operated 2 billion years ago (for 500,000 years @ 100 kW).

High level radioactive waste was produced (such as 4 t Plutonium).

The behaviour of high level nuclear waste in the geosphere over 2 billion years can be studied. Long-term safety assessment procedures can be tested.

No migration of the radionuclides over 2 billion years – efficient retention of the radionuclides.



Bespiel Schweiz (2002)

Projekt Opalinuston

Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers –
Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle

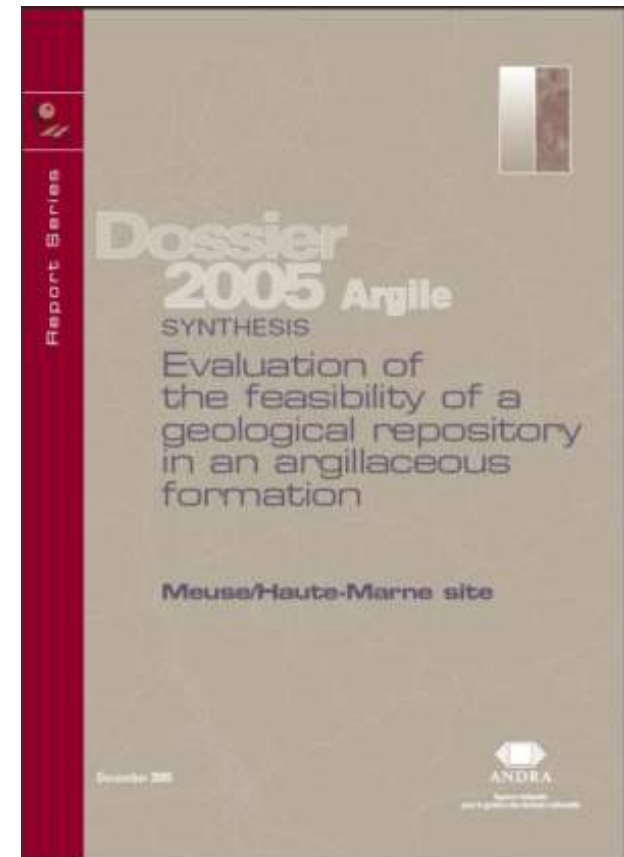


http://www.nagra.ch/documents/database/dokumente/%24default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%202001-2010/d_ntb02-02.pdf

Bespiel Frankreich (2005)

Dossier 2005 Argile

Evaluation of the feasibility of a repository in an argillaceous formation.



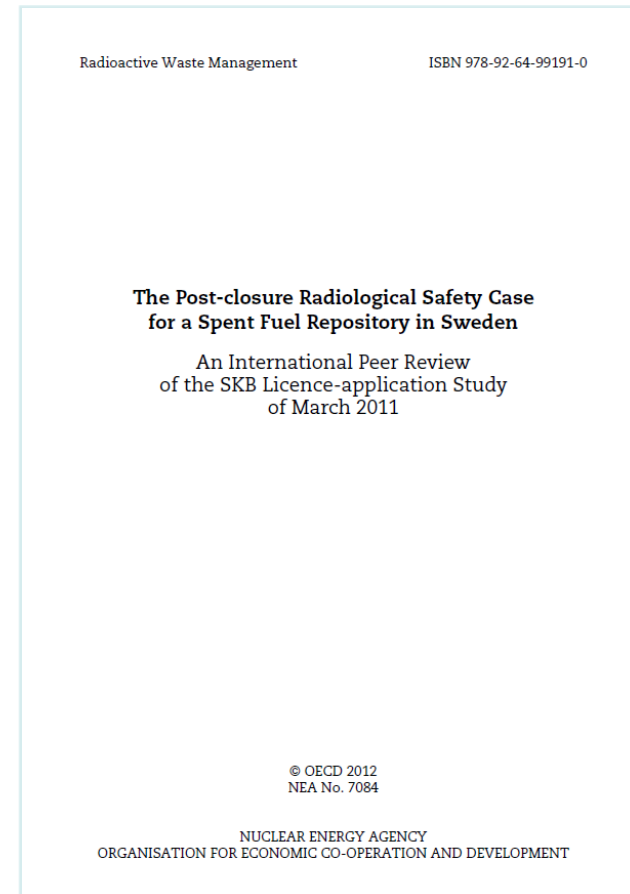
<http://www.andra.fr/international/pages/en/dossier-2005-1636.html>

Bespiel Schweden (2011)

Long-term safety for the final repository of spent nuclear fuel at Forsmark.



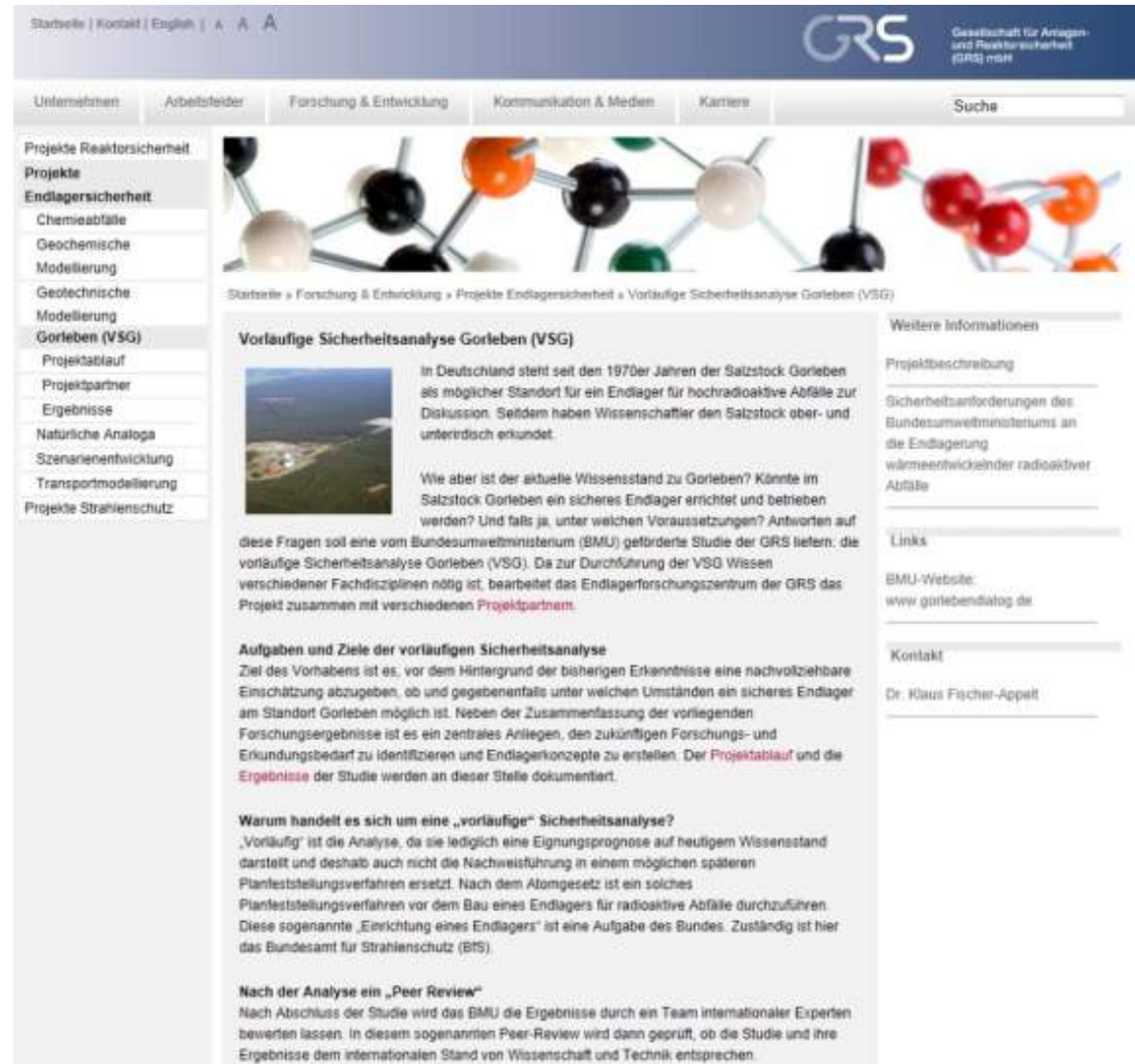
International review by OECD / NEA



Bespiel Deutschland (Stand 2012)

Vorläufige Sicherheitsanalyse
Gorleben.

Keine internationale
Begutachtung vorgesehen.



Startseite | Kontakt | English | A A A


GRS Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Unternehmen Arbeitsfelder Forschung & Entwicklung Kommunikation & Medien Karriere Suche

Projekte Reaktorsicherheit
Projekte
 Endlagersicherheit
 Chemieabfälle
 Geochemische Modellierung
 Geotechnische Modellierung
Gorleben (VSG)
 Projektlauf
 Projektpartner
 Ergebnisse
 Natürliche Analoga
 Szenarienentwicklung
 Transportmodellierung
 Projekte Strahlenschutz

Startseite > Forschung & Entwicklung > Projekte Endlagersicherheit > Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)

Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)



In Deutschland steht seit den 1970er Jahren der Salzstock Gorleben als möglicher Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zur Diskussion. Seitdem haben Wissenschaftler den Salzstock ober- und unterirdisch erkundet.

Wie aber ist der aktuelle Wissensstand zu Gorleben? Könnte im Salzstock Gorleben ein sicheres Endlager errichtet und betrieben werden? Und falls ja, unter welchen Voraussetzungen? Antworten auf diese Fragen soll eine vom Bundesumweltministerium (BMU) geförderte Studie der GRS liefern: die vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG). Da zur Durchführung der VSG Wissen verschiedener Fachdisziplinen nötig ist, bearbeitet das Endlagerforschungszentrum der GRS das Projekt zusammen mit verschiedenen [Projektpartnern](#).

Aufgaben und Ziele der vorläufigen Sicherheitsanalyse

Ziel des Vorhabens ist es, vor dem Hintergrund der bisherigen Erkenntnisse eine nachvollziehbare Einschätzung abzugeben, ob und gegebenenfalls unter welchen Umständen ein sicheres Endlager am Standort Gorleben möglich ist. Neben der Zusammenfassung der vorliegenden Forschungsergebnisse ist es ein zentrales Anliegen, den zukünftigen Forschungs- und Erkundungsbedarf zu identifizieren und Endlagerkonzepte zu erstellen. Der [Projektlauf](#) und die [Ergebnisse](#) der Studie werden an dieser Stelle dokumentiert.

Warum handelt es sich um eine „vorläufige“ Sicherheitsanalyse?

„Vorläufig“ ist die Analyse, da sie lediglich eine Eignungsprognose auf heutigem Wissensstand darstellt und deshalb auch nicht die Nachweisführung in einem möglichen späteren Planfeststellungsverfahren ersetzt. Nach dem Atomgesetz ist ein solches Planfeststellungsverfahren vor dem Bau eines Endlagers für radioaktive Abfälle durchzuführen. Diese sogenannte „Errichtung eines Endlagers“ ist eine Aufgabe des Bundes. Zuständig ist hier das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS).

Nach der Analyse ein „Peer Review“

Nach Abschluss der Studie wird das BMU die Ergebnisse durch ein Team internationaler Experten bewerten lassen. In diesem sogenannten Peer-Review wird dann geprüft, ob die Studie und ihre Ergebnisse dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

Weitere Informationen

Projektbeschreibung

Sicherheitsanforderungen des Bundesumweltministeriums an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle

Links

BMU-Website:
www.gorleben-dialog.de

Kontakt

Dr. Klaus Fischer-Appelt

Endlagerprojekte

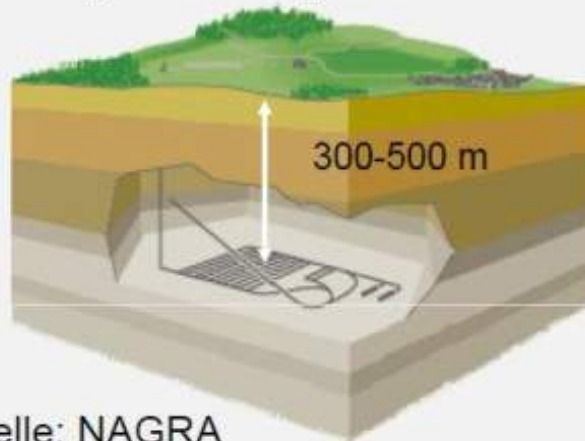
Weltweit erstes Endlager für hochradioaktive Abfälle im Bau!
Inbetriebnahme geplant für 2020 in Olkiluoto, Finnland



Endlagerprojekte



Geologisches Tiefenlager HAA



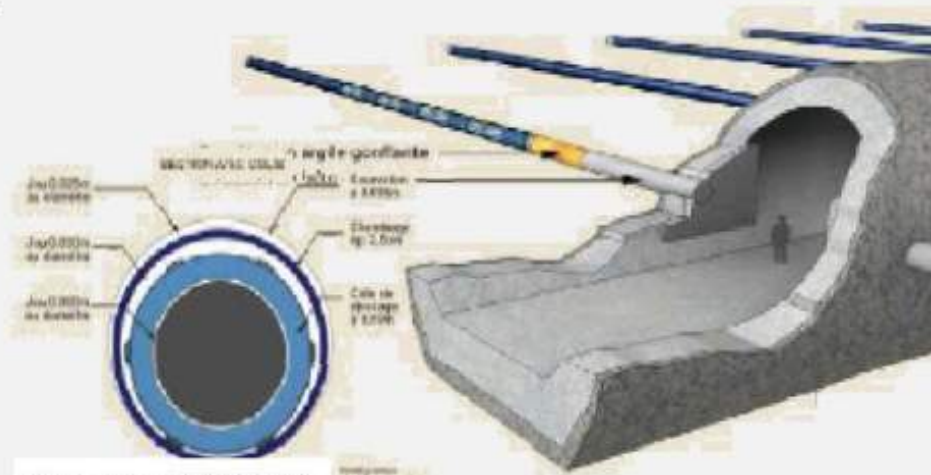
Quelle: NAGRA

Tongestein:

Opalinus Ton in der Schweiz

Callovo-Oxford-Ton in Frankreich

- Ca. 100 m mächtig und 400 – 900 m tief
- nanoporös (Grundwasser stagniert)
- plastisch



Quelle: ANDRA

Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)

Carlsbad, New Mexico (US Department of Energy)



**Endlagerung von Transuran-
abfällen, die bei der Waffen-
produktion angefallen sind
(650 m Tiefe, 180.000 m³ bis
2030).**

<http://www.wipp.energy.gov/>

Endlagerung in Deutschland



Endlager und Endlagerprojekte

- Asse (LLW/ILW)
(Forschungsbergwerk)
- Morsleben (LLW)
- Konrad (LLW/ILW)
- Gorleben (HLW)
(Projekt)

Zusammenfassende Perspektive

- Sicherheitsaussagen über lange Zeiträume hinweg (hunderttausende von Jahren) erfordern eine **vertrauenswürdige und abgesicherte Datengrundlage** und ein **möglichst umfassendes Prozessverständnis**.
- Grundsätzlich erscheint die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen (Salz, Ton, Granit) **technisch machbar und aus wissenschaftlicher Sicht verantwortbar**.
- Langzeitsicherheitsanalysen umfassen zahlreiche Aspekte eines Endlagersystems (Radiochemie, Geochemie, Geologie, Geotechnik, ...)
- Viele Daten zum Verhalten von Radionukliden in der Geosphäre konnten in den letzten Jahren wissenschaftlich erhärtet und untermauert werden.
- **Grundlagenforschung** ist ein wesentliches Element für die Langzeitsicherheitsbetrachtung eines nuklearen Endlagers.
- Wichtige Basis für die **gesellschaftliche Diskussion** und letztlich die **politische Entscheidung**.

Einige abschließende Bemerkungen ...

- Abfallmengen sind sehr gut bekannt (in Deutschland bei Ausstieg ca. 17.000 t, ca. 29.000 m³ = Würfel mit ~30 m Kantenlänge)
- Abfallzusammensetzung sehr genau bekannt (einschl. Qualitätsmanagement, Produktkontrolle)
- Die meisten Radionuklide in hochradioaktiven Abfällen haben rel. kurze Halbwertszeiten (Cs-137, Sr-90). Wärmeproduktion zeitlich begrenzt (ca. 300 Jahre)
- Physikalisch-chemische Grundlagen der rel. Prozesse im Endlager weitgehend bekannt - große Erkenntnisgewinne in den letzten 10 - 20 Jahren. Physikalisch-chemische Grundgesetze sind universell gültig und zeitlich extrapolierbar (auch über 1 Mio. Jahre).

Einige abschließende Bemerkungen ...

- Es gibt (Uran)Lagerstätten - Elemente werden durch geochemische Prozesse konzentriert
- Endlager in verschiedenen Gesteinsformationen realisierbar (alle Gesteine haben Vor- und Nachteile, Multibarrierensystem)
- WIPP – erfolgreicher Langzeitsicherheitsnachweis und sicherer Betrieb eines Endlagers mit Transuranabfällen seit 1995 in einer geologischen Salzformation.
- OKLO – Natur-Reaktor in Gabun (vor 2 Mrd. Jahren) ermöglicht den Test des verfügbaren Systemverständnis und der Werkzeuge an natürlichen Systemen mit geologischen Altern (z.B. 2 Mrd. Jahre)