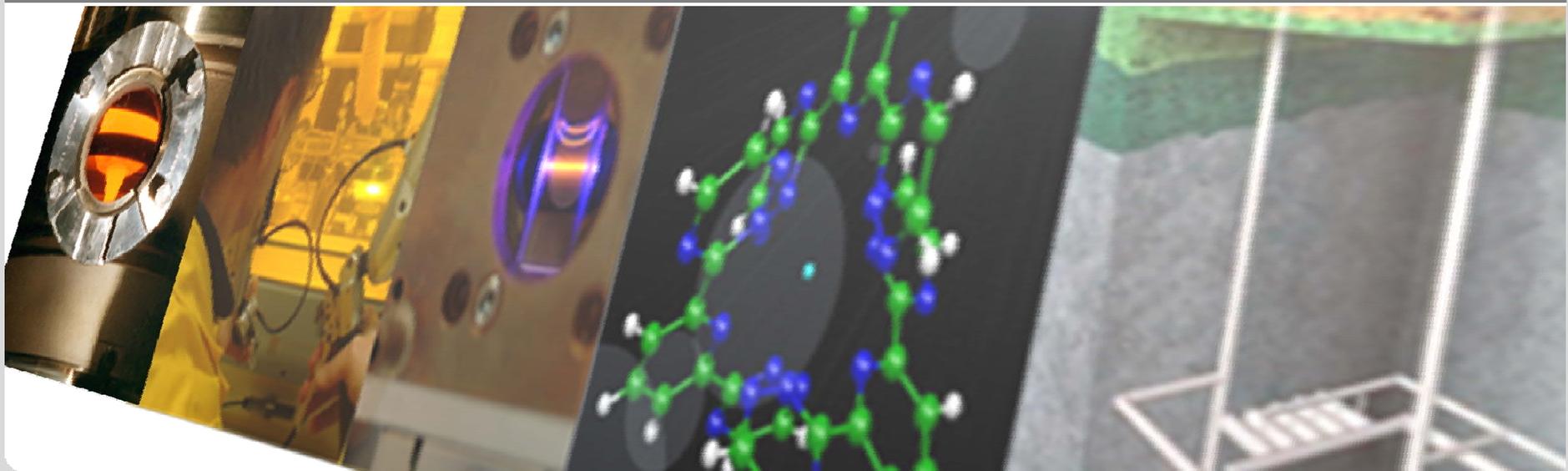


Endlagerung radioaktiver Abfälle: technisch gelöst oder Herausforderung an die Wissenschaft

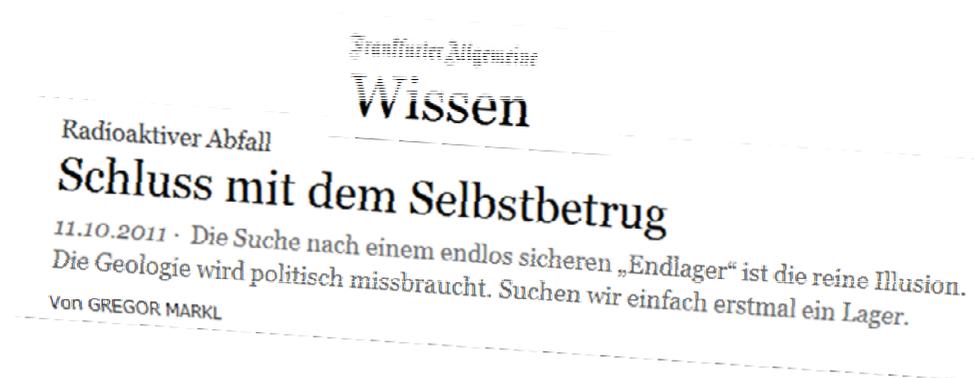
Horst Geckeis

INSTITUT FÜR NUKLEARE ENTSORGUNG (INE)



45 Jahre Forschung zur sicheren Endlagerung

- aber immer noch kein Endlager für hochradioaktive Abfälle



- *Unlösbares* Problem ?
- Forschung *am Bedarf vorbei* ?

#

- Brauchen wir überhaupt noch *Grundlagenforschung* zu diesem Thema ?
- ist Endlagerung naturwissenschaftlich/technisch gelöst, stellt aber ein *primär politisches, gesellschaftliches Problem* dar?

Fakten:

Der radioaktive Abfall ist da!

- 280.000 m³ schwach-, mittelradioaktiv
 - 29.000 m³ hochradioaktiver Abfall
- } in Deutschland
(BFS, 2012)

Breiter Konsens:

Der **Einschluss in einer tiefen geologischen Formation** gilt als **sicherster Entsorgungsweg** zur Isolation hochradioaktiver Abfälle von der Biosphäre.

- GRS/Öko-Inst., 247, 2008
- Radioactive Waste Management Committee-RWMC- der OECD/NEA
- EU-Direktive, 2011/70/EURATOM
- Eckpunktepapier zur Endlagerung, Umweltministerium Baden-Württemberg, Nov. 2011
- DFG Strategieschrift »Dynamische Erde – Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften«, 2010

Endlagerung hochradioaktiver Abfälle – Situation in Deutschland

- Sicherheit der Endlagerung liegt in der Verantwortung des Bundes
- EU-Direktive 2011/70/EURATOM
 - fordert einen Bericht bis August 2015 an die EU bzgl. eines konkreten Zeitplanes zur Implementierung eines Endlagers
- Entwurf eines Standortauswahlgesetzes
 - Gründung einer neuen Institution ('regulator')
"Bundesamt für kerntechnische Sicherheit" ?
"Institut für die Standortauswahl" ?
 - Regelung der Öffentlichkeitsbeteiligung
 - Standortauswahl bis 2027



*No host rock formation
excluded*

Sicherheitsanforderungen an die Nukleare Entsorgung - Im Wandel der Zeit

1955



**13. Juli 1955 W. Heissenberg, Vortrag
5. Treffen der Nobelpreisträger in Lindau am Bodensee.**

„... denn natürlich denkt niemand daran, diese Abwässer in die Erde oder in Flüsse zu leiten. Vielmehr werden die Abfallstoffe nach den in Ausland gewonnenen Erfahrungen sorgfältig gespeichert, nach Abschwächung ihrer radioaktiven Strahlung aufgearbeitet und schließlich verpackt **und weit vor Küste ins Meer versenkt.** An der Stelle ist die Entsorgung radioaktiv Abfälle **kein wirkliches Problem.**“
(wissen.dradi

1983

RS-Handbuch

Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk

vom 20. April 1983 (GMBI. 1983, Nr. 13, S. 220)

- RdSchr. d. BMI v. 20.4.1983 - RS - AGK 3 - 515 7

Der Fachausschuß Brennstoffkreislauf des Länderausschusses für Atomkernenergie hat in seiner Sitzung 24. März 1983 die als Anlage beigefügten "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" beraten und folgenden Beschluß gefaßt:

- **Schutzziele**
(Individualdosis < 0,3 mSv)
- **Standortanforderungen**
- **Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb eines Endlagers**
- **Standorterkundung**
- ...

2010



- **Schutzziele**

- Zulässige Individualdosis:
0,01 mSv/a (wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems)
- 0,1 mSv/a** (für weniger wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems)

- **Weitere Anforderungen**

- Einführung des **einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)**
- Behälterintegrität** für mdst. 500 Jahre (Möglichkeit der Rückholung/Bergung des Abfalls)
- Garantierte **Rückholbarkeit** bis zum Verschluss des Endlagers
(BMU, Sept. 2010)



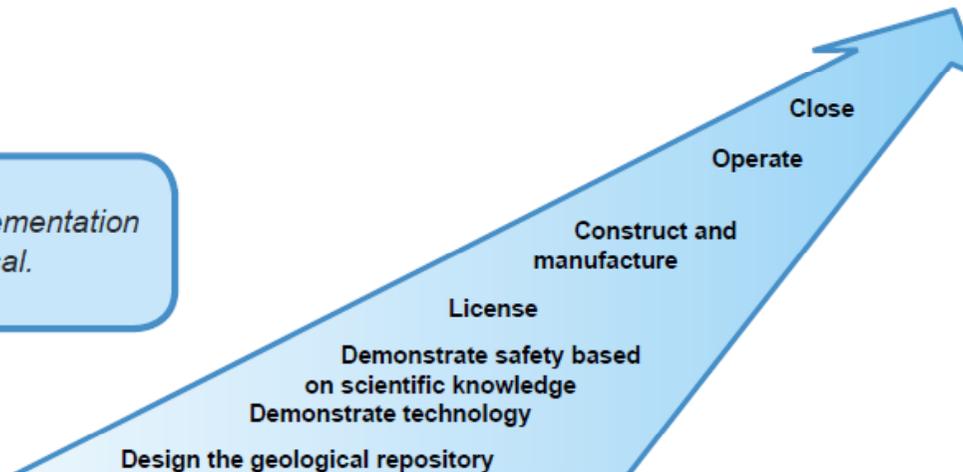
Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform



Our vision is that by 2025, the first geological disposal facilities for spent fuel, highlevel waste, and other long-lived radioactive waste will be operating safely in Europe.

(www.igdtp.eu)

Figure 2. Stepwise implementation of deep geological disposal.



Scientific challenges:

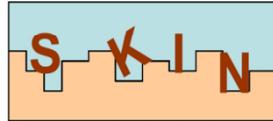
Reduce remaining **uncertainties** (review of safety case; identify uncertainties)

Technological challenges:

Transfer from research into industrial scale **deployment**

Social and political challenges:

Develop **dialogue** to the public and **participation** strategies for stakeholders



Slow solid-liquid interface reactions



Rapid radionuclide Release from spent fuel



Radionuclide migration In clay rock



Radionuclide retention in crystalline rock



Bentonite erosion



Long-term performance of engineered barrier systems



Gas behaviour in repository Systems



Large Underground Concept Experiments



Reducing Uncertainty in Performance Prediction



Monitoring developments For safe repository operation and staged closure



Sozio-technical challenges



Implementing public participation approaches



Sustainable network of independent technical expertise for radioactive waste disposal

Zuständigkeiten – Energie- und Entsorgungsforschung in Deutschland



Bundesregierung

Projekt-/Anlagenbezogene F+E

BMU
(BfS)

Projekt- /Standortunabhängige F+E

BMBF

BMWI
(BGR)



Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011 – 2014)

PTKa

(Asse)
Morsleben
Konrad
Gorleben

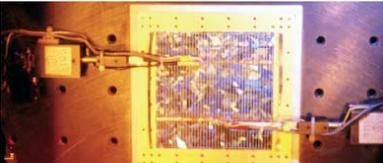
Hochschulen
Forschungseinrichtungen
Industrie
Consultants
(NGO)

HGF-Zentren

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Grundlagenforschung Energie 2020+
Die Förderung der Energieforschung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung

Hochschulen
Forschungseinrichtungen
Industrie
Consultants
(NGO)

Salz
Tonstein
Kristallin



(nach H. Pitterich, PtKa, KIT, 2013)

Forschungsarbeiten zur Endlagersicherheit im KIT – Institut für Nukleare Entsorgung



- Bereitstellung von fundierten Informationen, Daten, Technologien zu Problemstellungen der Nuklearen Entsorgung
- Quantifizierung und Abbau von Unsicherheiten (Modelldaten, -parameter, mögliche Endlagerentwicklungen)

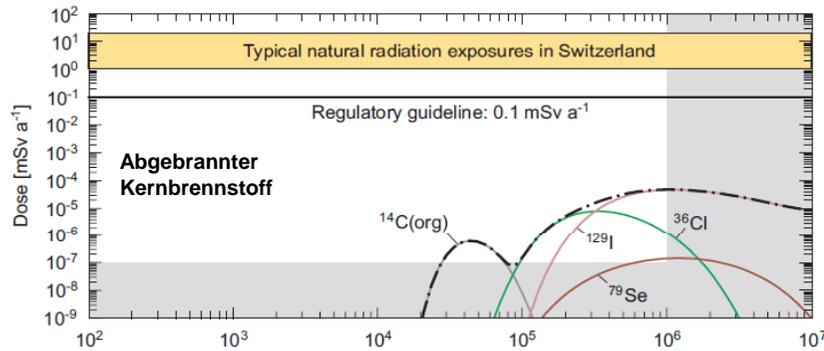
Themen:

- Langzeitsicherheit der Endlagerung
- Immobilisierung radioaktiver Abfälle
- Reduktion der Radiotoxizität (P&T)
- Strahlenschutz



<http://www.ine.kit.edu/>

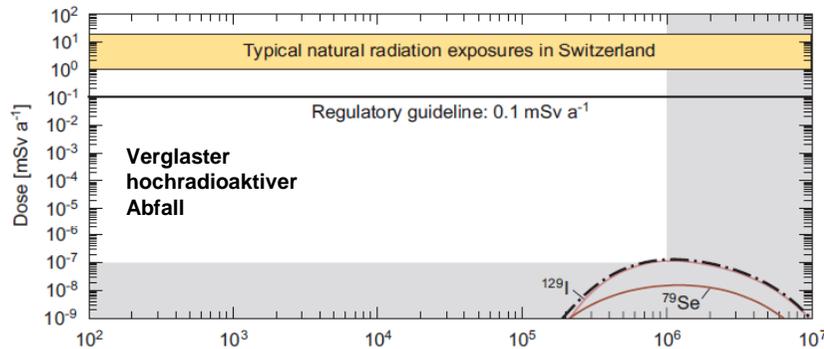
Als potentiell mobile relevante RN gelten:



Steinsalz: ^{14}C , ^{79}Se , ^{135}Cs , ^{129}I ,

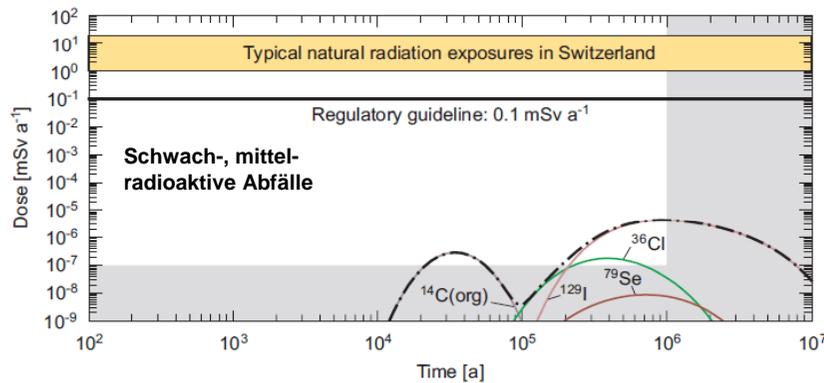
^{226}Ra , ^{233}U , ^{237}Np

Keesmann et al. GRS-206, 2005.



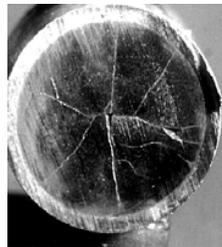
Tonstein: ^{14}C , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{129}I

Project Opalinus Clay, NTB 02-5, 2002.

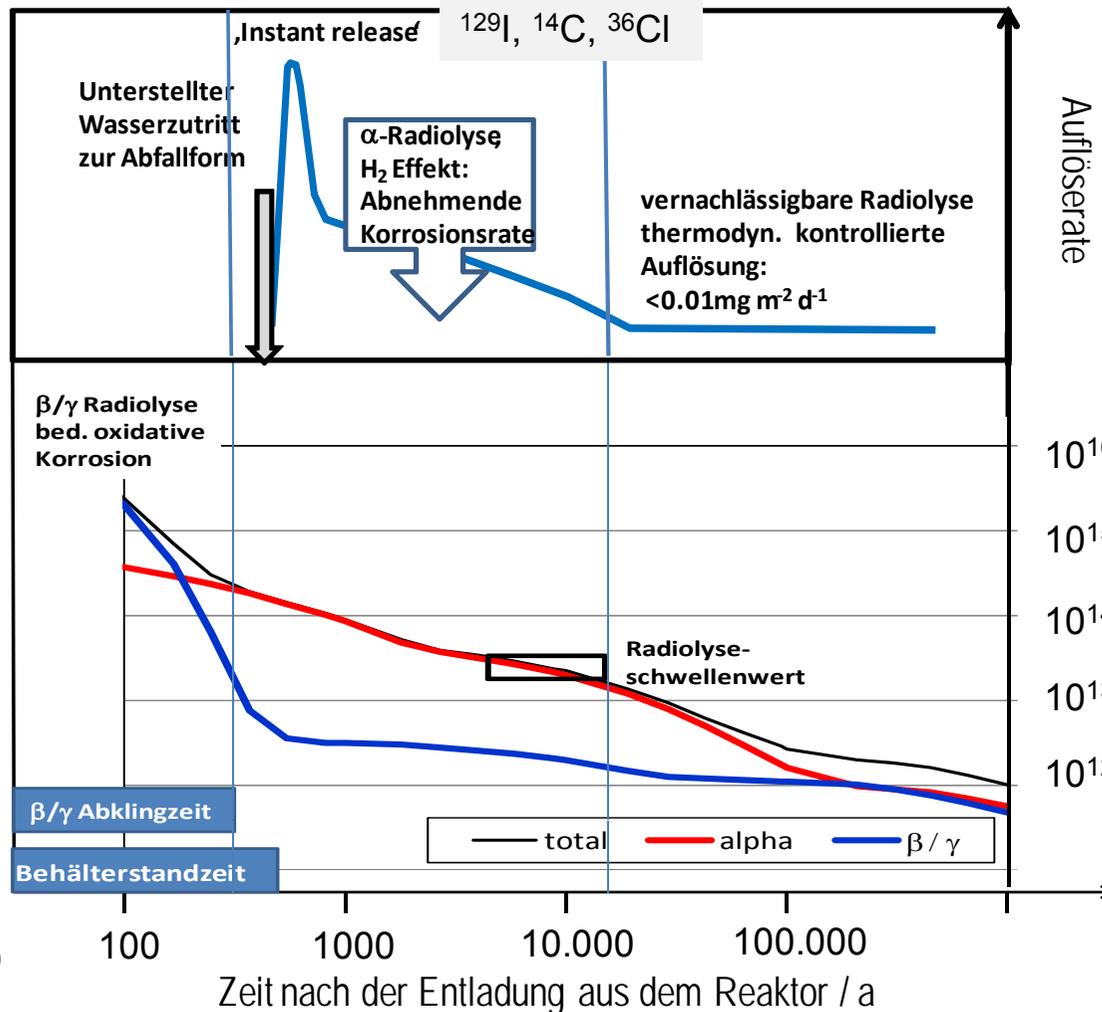


NTB 02-5, 2002

Wissensstand zur anaeroben Korrosion von abgebranntem Kernbrennstoff



10 mm
Fuel pellet

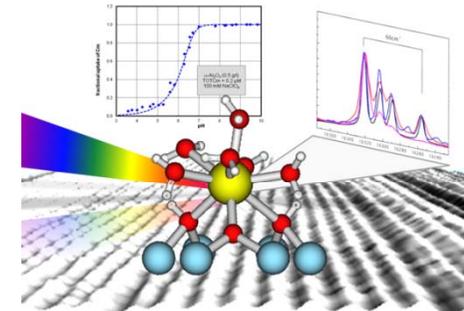


Grambow et al. 2010
Poinsot et al. 2009
Metz et al. 2012

Phänomenologische Beschreibung des Radionuklidtransports

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

$$K_d = \frac{c_{sorb}}{c_{gelöst}}$$



Geckeis, Lützenkirchen, Polly, Rabung,
Schmidt, *Chem. Rev.* 2013, 113, 1016

Prozessverständnis/ Mechanismen

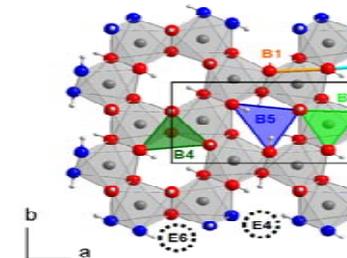
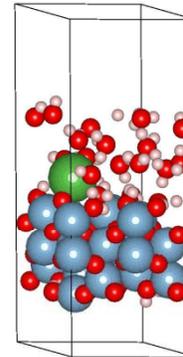
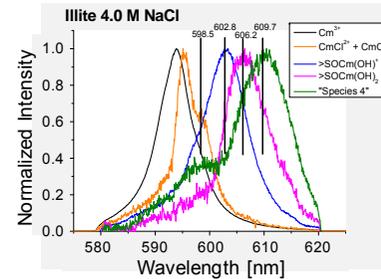
- Ionenaustausch/
Oberflächenkomplexierung
- Oberflächenausfällung
- Oberflächeninduzierte
Redox-Reaktionen
- Inkorporation
(Feste Lösungen, Entrapment)

Rückhalterreaktionen von Radionukliden in Endlagersystemen

Multiskaliger Ansatz

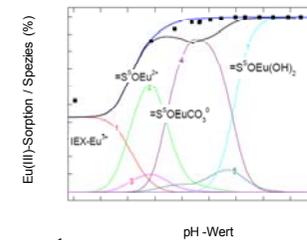
Spektroskopie, Quantenchemie, Struktur
(XAS, Laserspektr.)

Molekulare Skala



Sorptionsisothermen, Geochemische Modellentwicklung

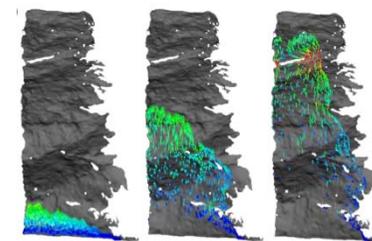
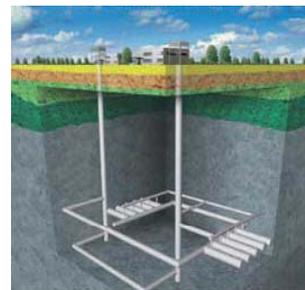
Mesoskala



Migration im Endlagersystem

(Modellierung des reaktiven Transports)

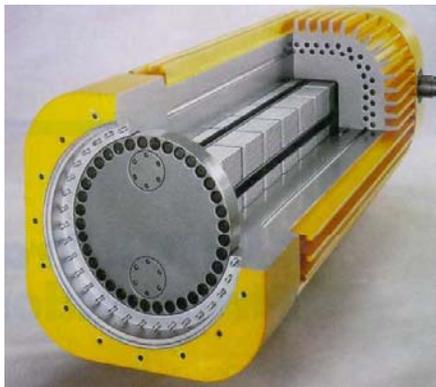
Makroskala



Endlagerbarriere:

Korrodiierende Endlagerkomponenten

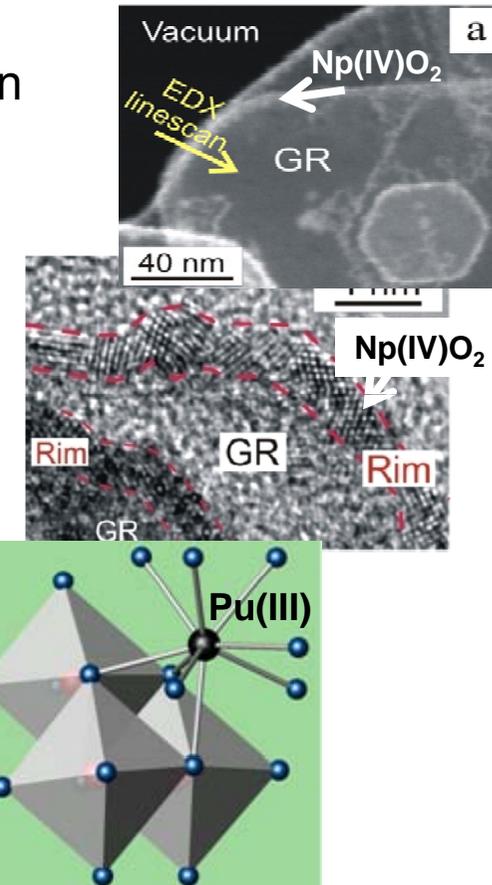
Bsp.: Endlager für hochradioaktive Abfälle mit dickwandigen Behältern



(www.gns.de)

Langsame anaerobe Behälterkorrosion

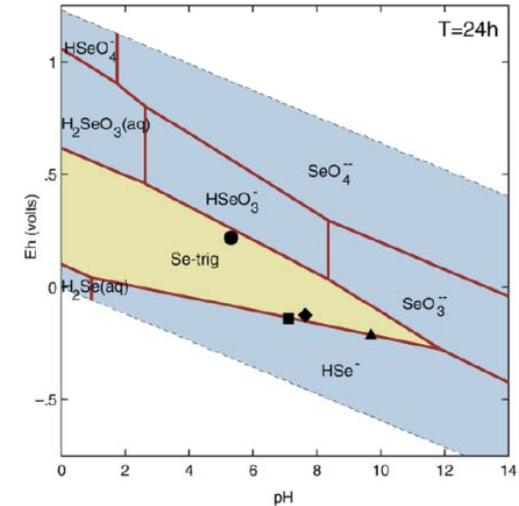
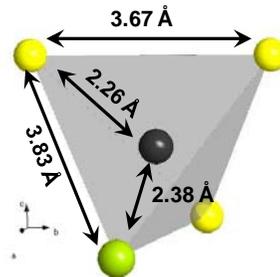
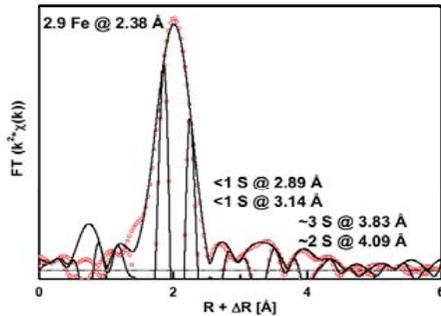
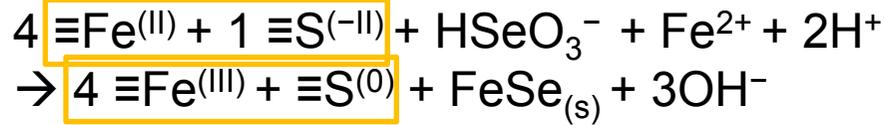
- Wasserstoffentwicklung reduziert radiolytische Brennstoffkorrosion signifikant
- Immobilisierung vieler Radionuklide (U, Pu, Np, Tc, Se) durch Redoxreaktionen
- Radionuklidrückhaltung an Eisenkorrosionsphasen (z.B. U, Pu, Np, Se ...)



B. Christiansen et al. GCA (2011)
D. Bach et al., Micr. Microanalys. (2010)
R. Kirsch et al., ES&T, (2011)

■ Retention of ⁷⁹Se by redox reactions

Mackinawite

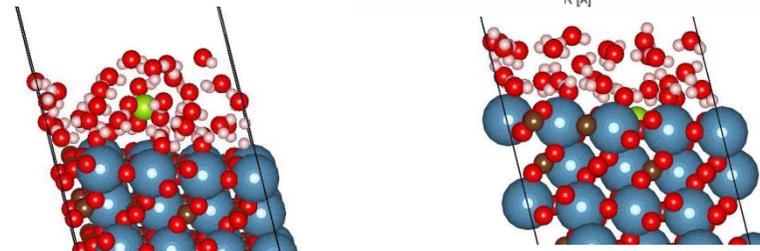
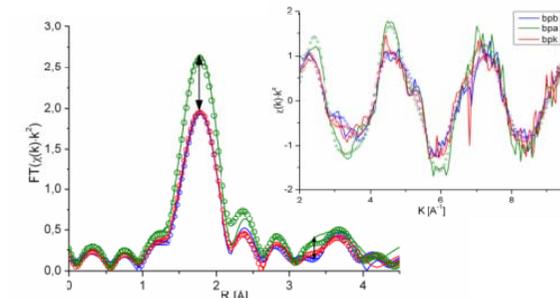
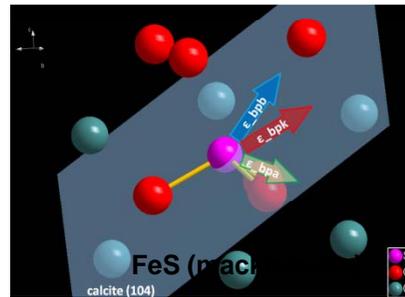


A. Scheinost et al. JCH (2008)
N. Finck et al. Min. Mag. (2012)

■ Retention of ⁷⁹SeO₃²⁻ in CaCO₃

Oversaturation conditions:
Se (IV) → ideal solid solution with Calcite
(hypothetical CaSeO₃ surface endmember, log₁₀(KSP) = -6.65 ± 0.4)

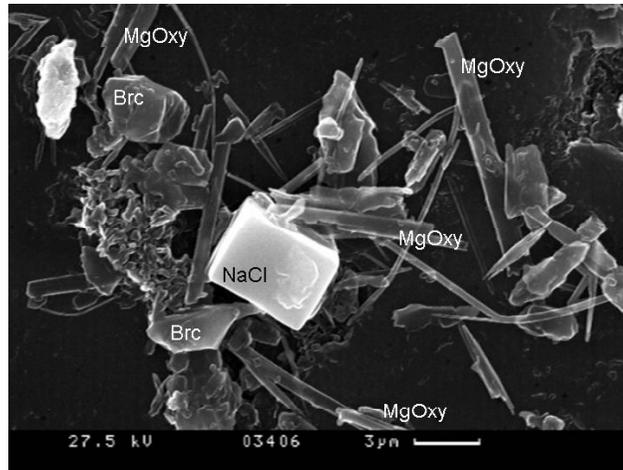
Equilibrium conditions:
surface monolayer Ca(SeO₃)_x(CO₃)_(1-x)
solid solution



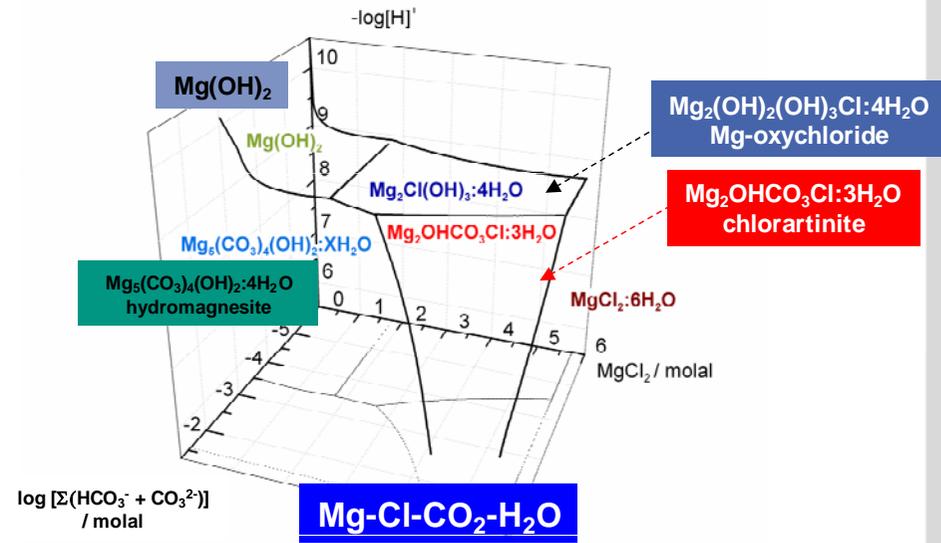
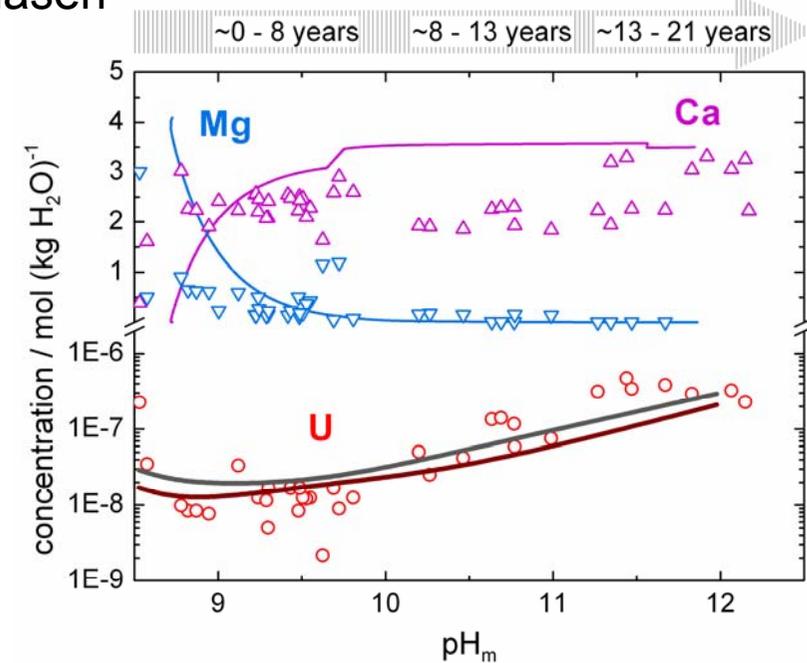
F. Heberling et al. (2013)

Radionuklidrückhaltung in Zementkorrosionsphasen

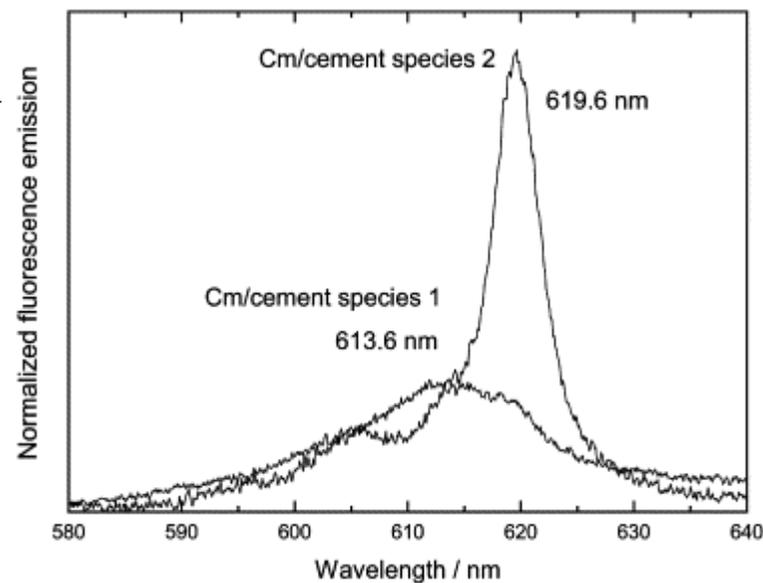
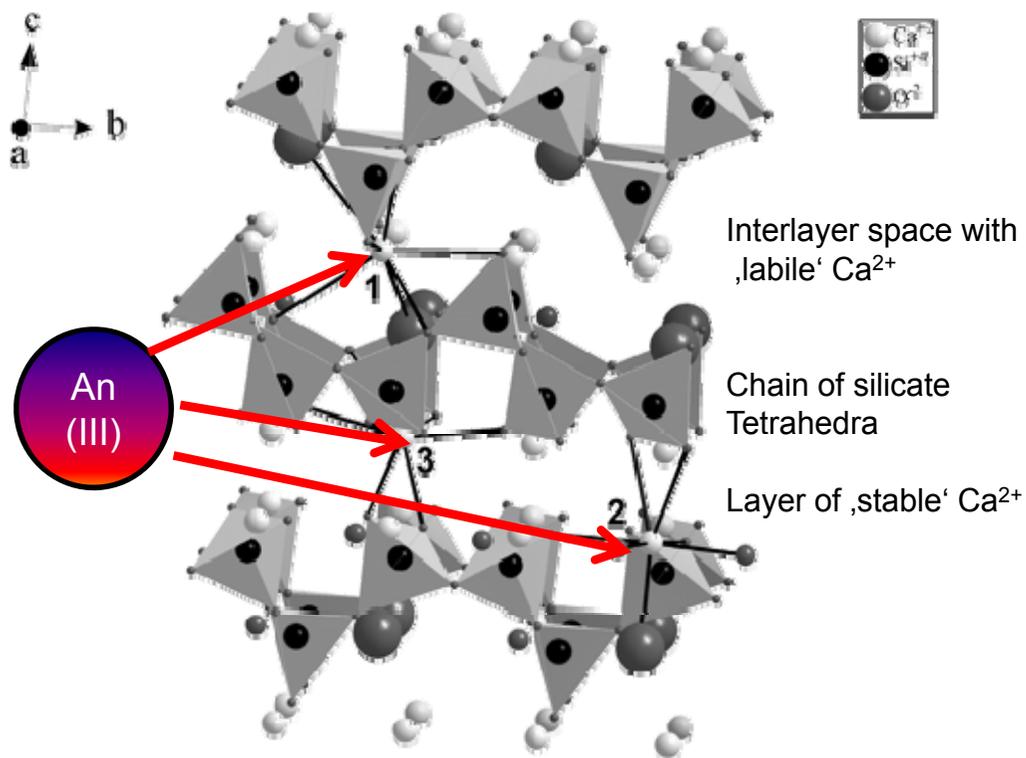
Konsistente geochemische Beschreibung der Zementkorrosion in Salzlaugen



Lützenkirchen et al., 2003
 Metz et al. 2004
 Kienzler et al. 2001
 Bube et al. 2012



Actinide incorporation into Calciumsilicatehydrate phases (CSH)



Stumpf et al., JCIS, 2004

Uptake of anionic radionuclides by cement paste

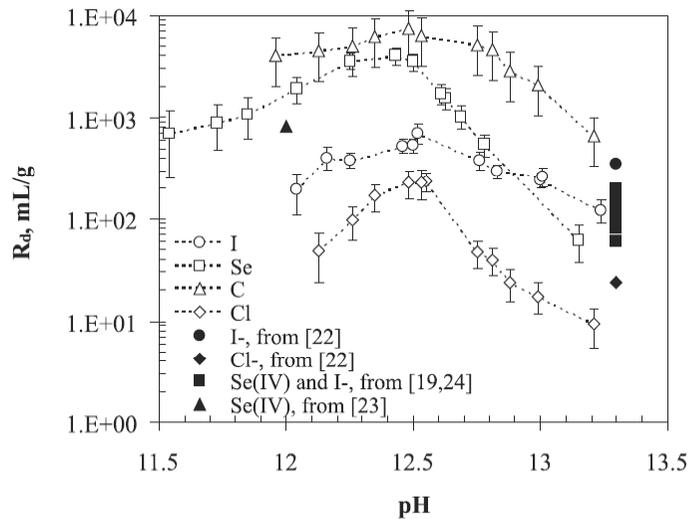
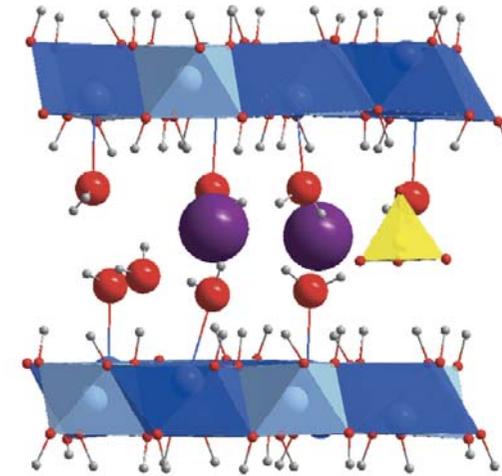


Fig. 3. Evolution of the R_d values of $^{125}\text{I}^-$, $^{14}\text{CO}_3^{2-}$, $^{75}\text{SeO}_3^{2-}$ and $^{36}\text{Cl}^-$ in degraded CEM-I HCP suspensions as a function of pH.

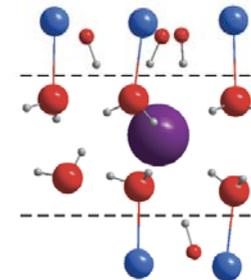
Solid solution formation of I⁻ with Afm-SO₄



hydroxide sheet

interlayer space

hydroxide sheet



Pointeau et al., Radiochim. Acta, 96, 2008

L. Aimoz et al., ES&T, 2012

Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)

Partner / Projektkonzept

80 Wissenschaftler / 9 Institutionen:

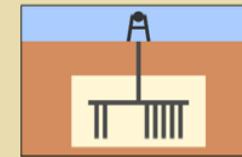


1. Grundlagen schaffen



2. Endlagerkonzeption

- Endlagerkonzept
- Endlagerauslegung
- Endlageroptimierung



3. Systemanalyse

- Szenarien entwickeln
- geolog. & geotechn. Barrieren prüfen
- vollständiger Einschluss?



4. Synthese

- Bewertung der Ergebnisse
- zukünftiger Forschungsbedarf
- Qualität der Ergebnisse

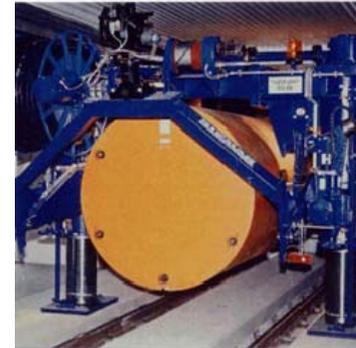


(nach K. Fischer-Appelt;
www.grs.de)

z.B. Endlagerkonzeption

Ziel:

Planung und Optimierung eines Endlagerkonzepts im Steinsalz unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen (u.a. Sicherheitsanforderungen des BMU)



(www.dbetec.de)

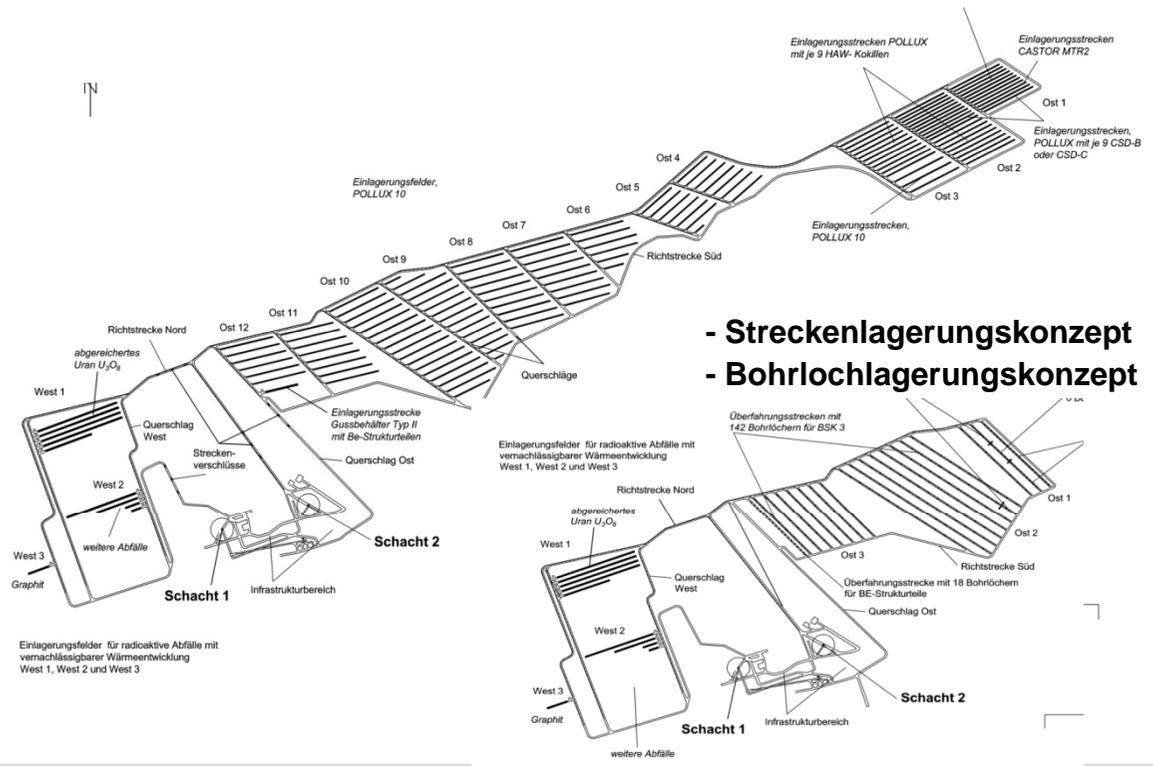


Einlagerungsstrecken, CASTOR THTRAVR, KNK

Aspekte:

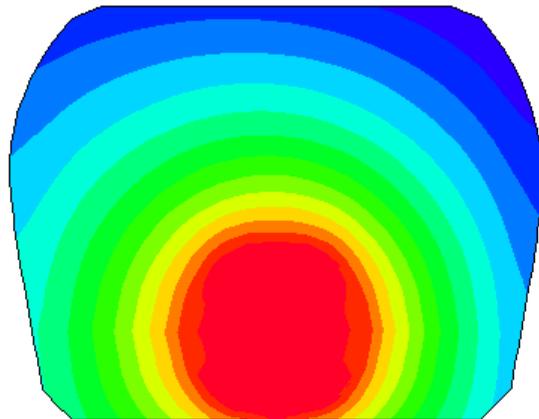
- Endlagergeometrie
- Techn. Anlagen und Behälter
- Einlagerungsbetrieb
- Betriebssicherheit
- Rückholbarkeit während der Betriebsphase
- Verschlusskonzept

(nach K. Fischer-Appelt; www.grs.de)

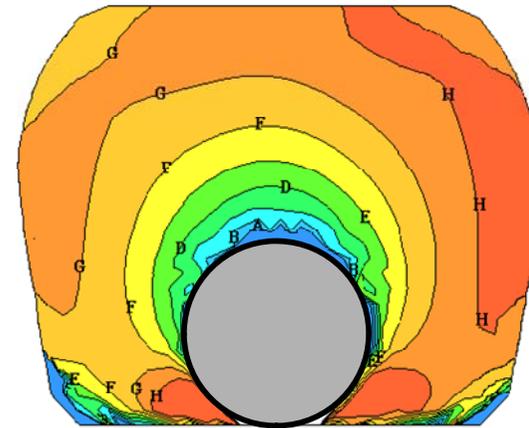
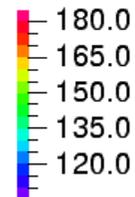


- Streckenlagerungskonzept
- Bohrlochlagerungskonzept

Versatzkompaktierung

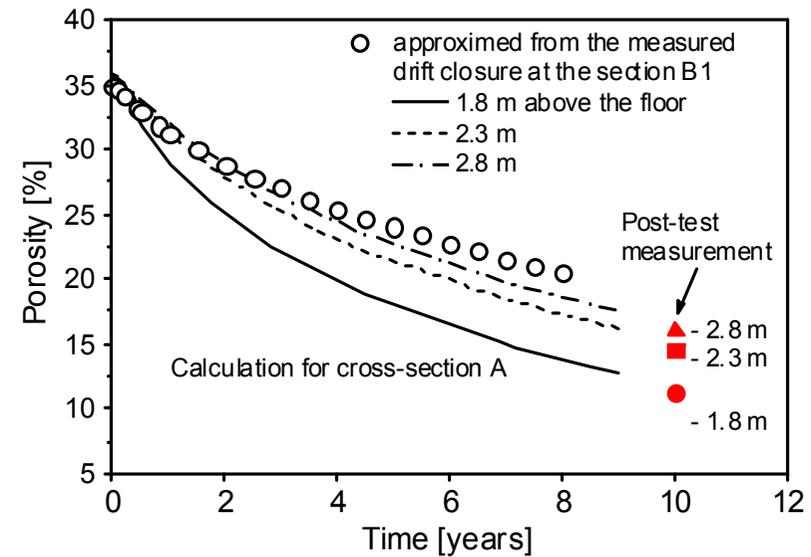


Temperature / ° C



Porosity (-)

H	.23
G	.22
F	.21
E	.20
D	.19
C	.18
B	.17
A	.16



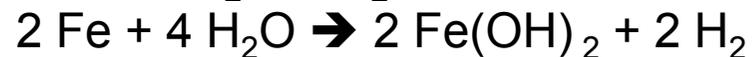
Development of measured and calculated backfill porosity in the heated area

Pudewills, Droste, Comp. and Struct. 81, 2003

Kohlenwasserstoffe im Steinsalz



Thermische Sulfatreduktion:



Yue et al. *Geochem. J.* 40, 2006, 87-94

Forschungsplattform Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen

■ K.-J. Röhlig, E. Brandt, C. Walther

www.nth-online.org





Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



risicare

Die Zielsetzungen

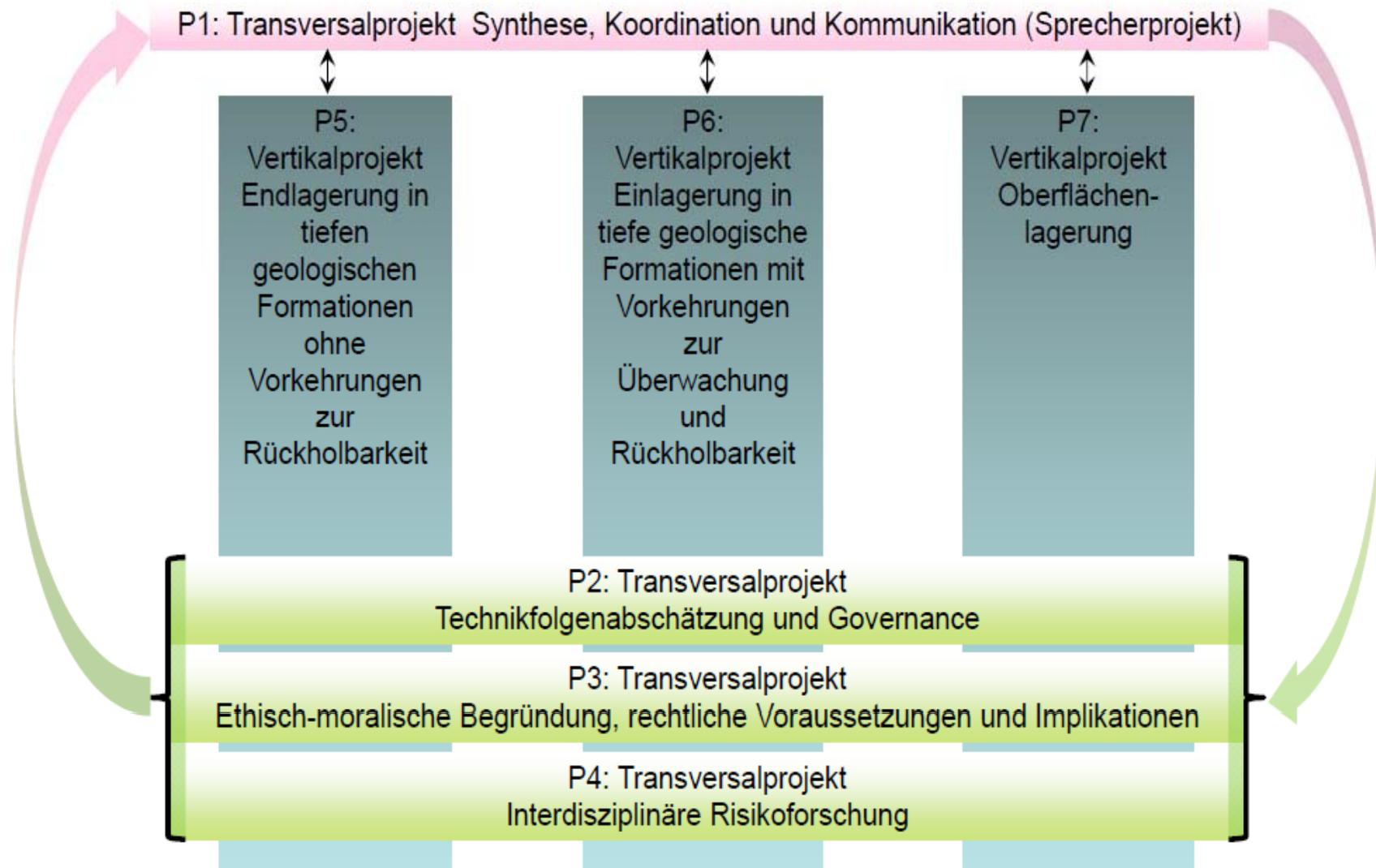


- Wissenschaftsplattform :
 - Forschung
 - Austausch, Tagungen, Symposien
 - Öffentlichkeitsarbeit in beide Richtungen:
Öffentlichkeit \Leftrightarrow Plattform, d. h.
(i) Zielgruppenorientierte Kommunikation der Arbeitsergebnisse
(ii) Orientierung der Arbeit der Plattform an regelmäßig zu erstellenden Meinungsbildern

- Thema:
Interdisziplinäre Analyse und Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe

(nach K. Röhlig, TU-Clausthal)

Konzeptioneller Ansatz



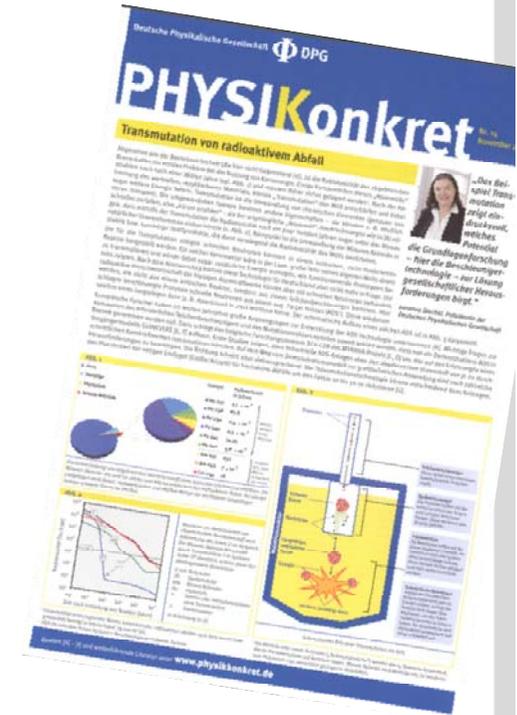
(nach K. Röhlig, TU-Clausthal)

Studie zu Partitioning & Transmutation

- Technische Realisierbarkeit erscheint möglich
- kann die Langzeitradiotoxizität des hochradioaktiven Abfalls um ca. 2 Größenordnungen vermindern.
- kann die Wärmeleistung des hochradioaktiven Abfalls nach ca. 50 Jahren verringern.

Aber

- erfordert den Aufbau kernchemischer und kern-technischer Anlagen (internationale Konzepte? gesellschaftliche Implikationen?)
- ein Endlager wird damit nicht überflüssig
 - Spaltprodukte
 - Verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bereits vorhanden
 - Verluste bei P&T Zyklen erzeugen Sekundärabfälle



Schlussfolgerungen

Ein sicheres Endlager für (hoch)radioaktiver Abfälle nach derzeitigem Wissens-Stand **notwendig** und **möglich**.

Endlagerforschung (international vernetzt) erforderlich:

- um Endlagerkonzepte und –auslegung an steigende Sicherheitsanforderungen anzupassen
- um die einem Sicherheitsnachweis zugrundeliegenden Annahmen zu überprüfen und Unsicherheiten/(Über)konservativitäten abzubauen
- zur Anpassung der in der Endlagerforschung angewandten Forschungsmethoden, –techniken, –strategien an den Stand von Wissenschaft und Technik
- um Entsorgungsstrategien naturwissenschaftlich und sozialwissenschaftlich *nachvollziehbar* bewerten zu können
- um geeignete Kommunikations-, Partizipationsstrategien zur Umsetzung eines Endlagersuchverfahrens zu entwickeln
- um Wissens-, Kompetenzerhalt zu gewährleisten

