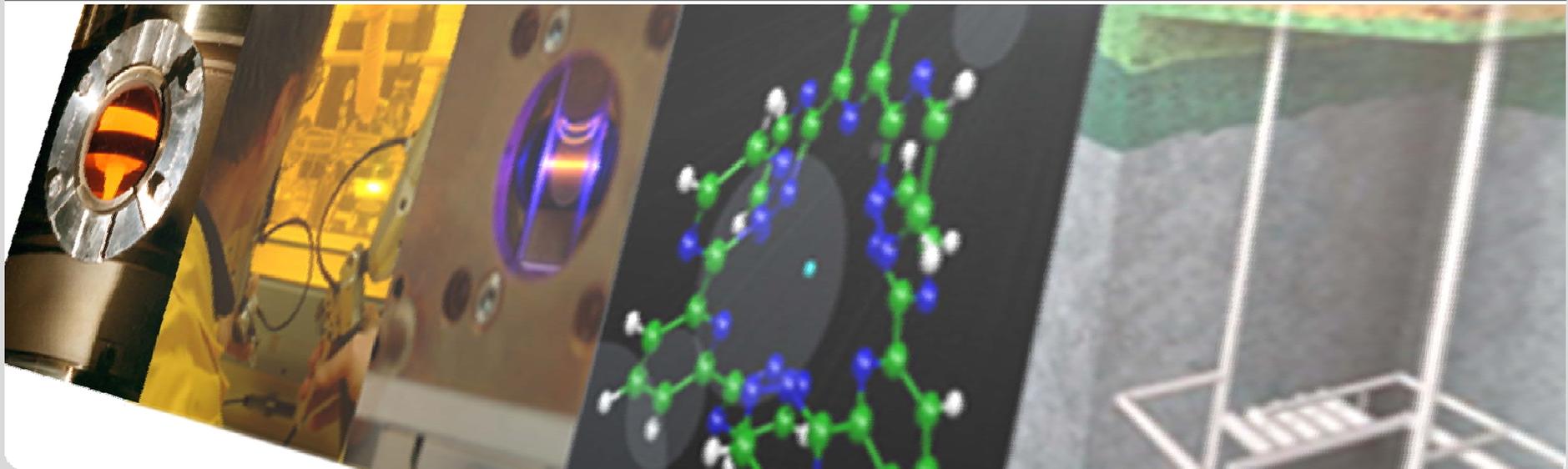


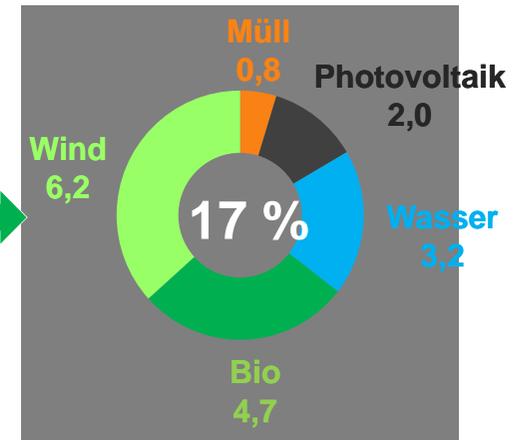
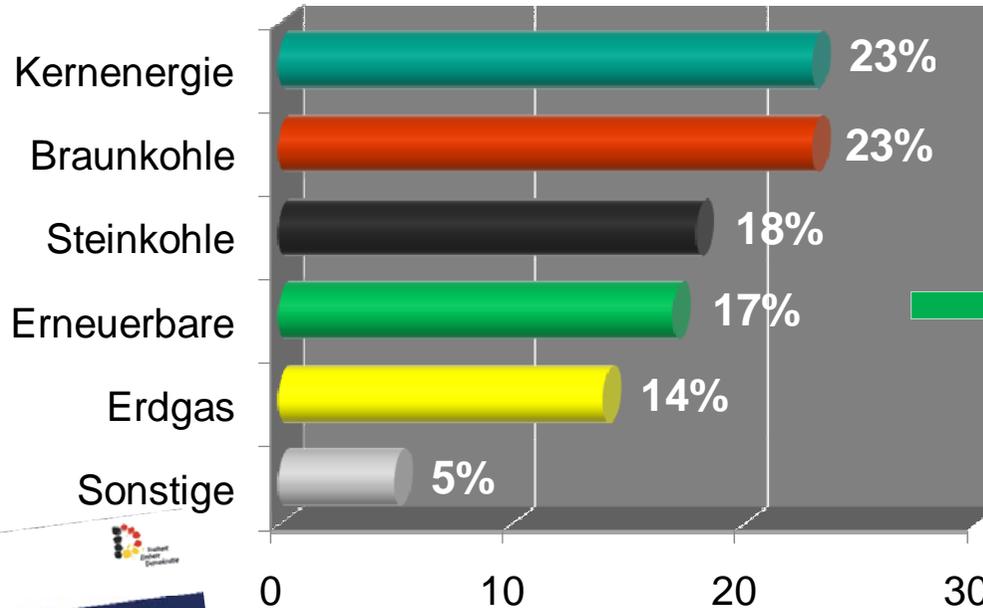
# Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen - internationaler Forschungsstand und Perspektiven

Horst Geckeis, Bernhard Kienzler, Klaus Gompper

INSTITUT FÜR NUKLEARE ENTSORGUNG (INE)

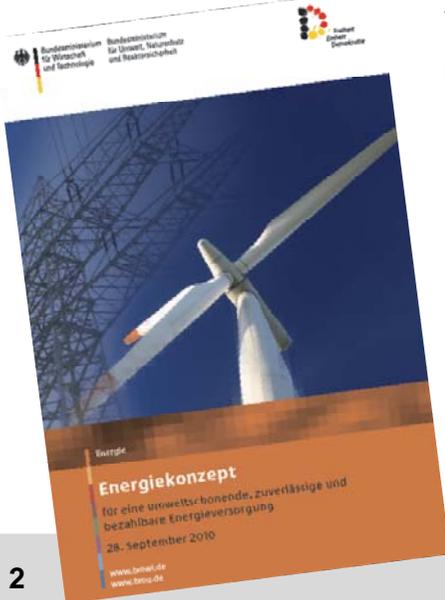


# Beiträge zur Stromerzeugung 2010 in Deutschland



Quelle: **bdew**  
Energie. Wasser. Leben.

... brauchen wir noch zeitlich befristet die Kernenergie und werden deshalb die Laufzeiten um durchschnittlich 12 Jahre verlängern.



## Radioaktive Abfälle

Was tun damit?

Zwischenlagerung/Langzeitzwischenlagerung

Nukleares Recycling  
(Wiederaufarbeitung/Partitioning/Transmutation)

Endlagerung in tiefen geologischen Formationen  
- Internationaler Stand -

# Radioaktiver Abfall

Bis ca. 2020 (Ausstiegsbeschluss) + ca. 12 Jahre Laufzeitverlängerung:

Abfälle mit vernachlässigbarer  
Wärmeentwicklung:  
(Schwach-, mittelradioaktiv)



277.000 m<sup>3</sup>  
+ 9.180 m<sup>3</sup>

Wärmeentwickelnde Abfälle:  
(Hochradioaktiv)

29.000 m<sup>3</sup>

abgebrannter Kernbrennstoff  
wiederaufgearbeitet →  
HAW-Glas



17.400 t + 4.440 t  
6.900 t  
ca. 2.750 t

(BfS, 2010)

## Radioaktive Abfälle

Was tun damit?

Zwischenlagerung/Langzeitzwischenlagerung

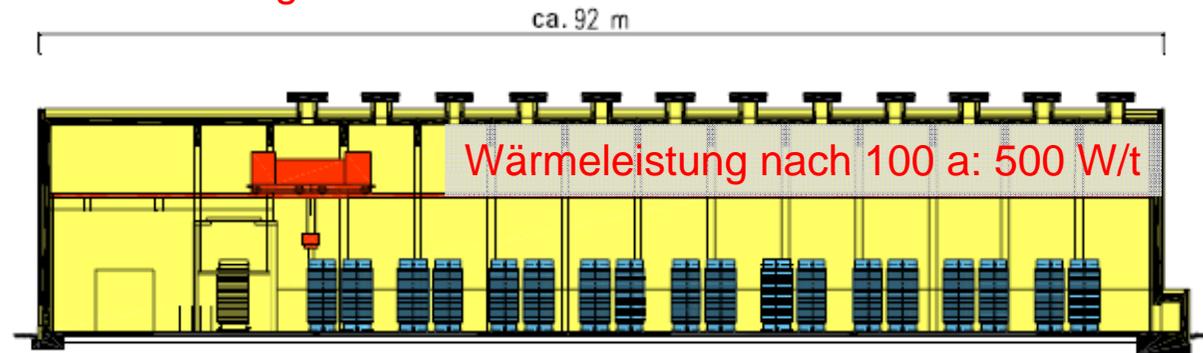
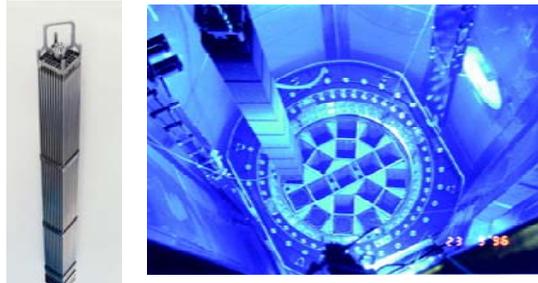
Nukleares Recycling  
(Wiederaufarbeitung/Partitioning/Transmutation)

Endlagerung in tiefen geologischen Formationen  
- Internationaler Stand -

# Zwischenlagerung von abgebrannten BE

Reaktorentnahme: 200 kW/t

Wärmeleistung nach 1 a: 13 kW/t    10 a: 2 kW/t



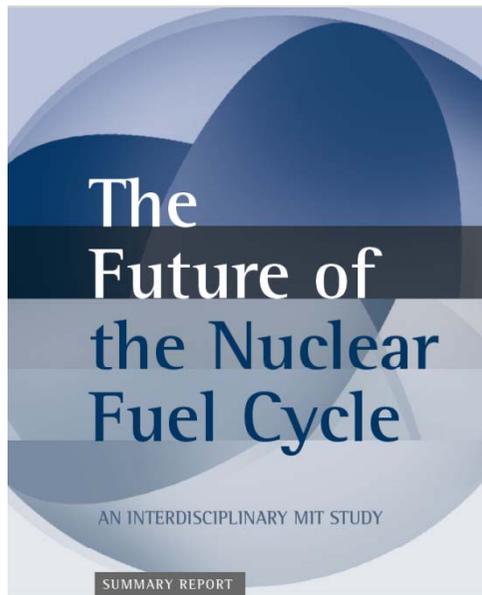
Standortzwischenlager	Stellplätze (belegt, 2010)	Voraussichtl. Behälteranz. bei Laufzeitende	Kapazitäts- grenze erreicht
Biblis	135 (46)	147	2018
Brokdorf	100 (13)	106	2030
Brunsbüttel	80 (6)	32	-
Grafenrheinfeld	88 (13)	89	-
Grohnde	100 (13)	102	-
Gundremmingen	192 (31)	244	2020
Isar	152 (22)	165	2030
Krümmel	80 (19)	94	2027
Lingen	125 (32)	119	-
Neckarwestheim	151 (36)	161	2030
Philippsburg	152 (36)	148	-
Unterweser	80 (7)	59	-

## Zwischenlagerung von abgebrannten BE



*MIT 2011: Recommendations*

Planning for long term managed storage of spent nuclear fuel—for about a century—should be an integral part of nuclear fuel cycle design. ... managed storage is believed to be safe for these periods ...



**Langfristige (Zwischen-)Lagerung hochaktiven Abfalls**

HABOG (bei Borssele, Zeeland, Niederlande)

## Radioaktive Abfälle

Was tun damit?

Zwischenlagerung/Langzeitzwischenlagerung

**Nukleares Recycling**  
(Wiederaufarbeitung/Partitioning/Transmutation)

Endlagerung in tiefen geologischen Formationen  
- Internationaler Stand -

# Einfluss von P&T auf die Langzeitradiotoxizität des Abfalls

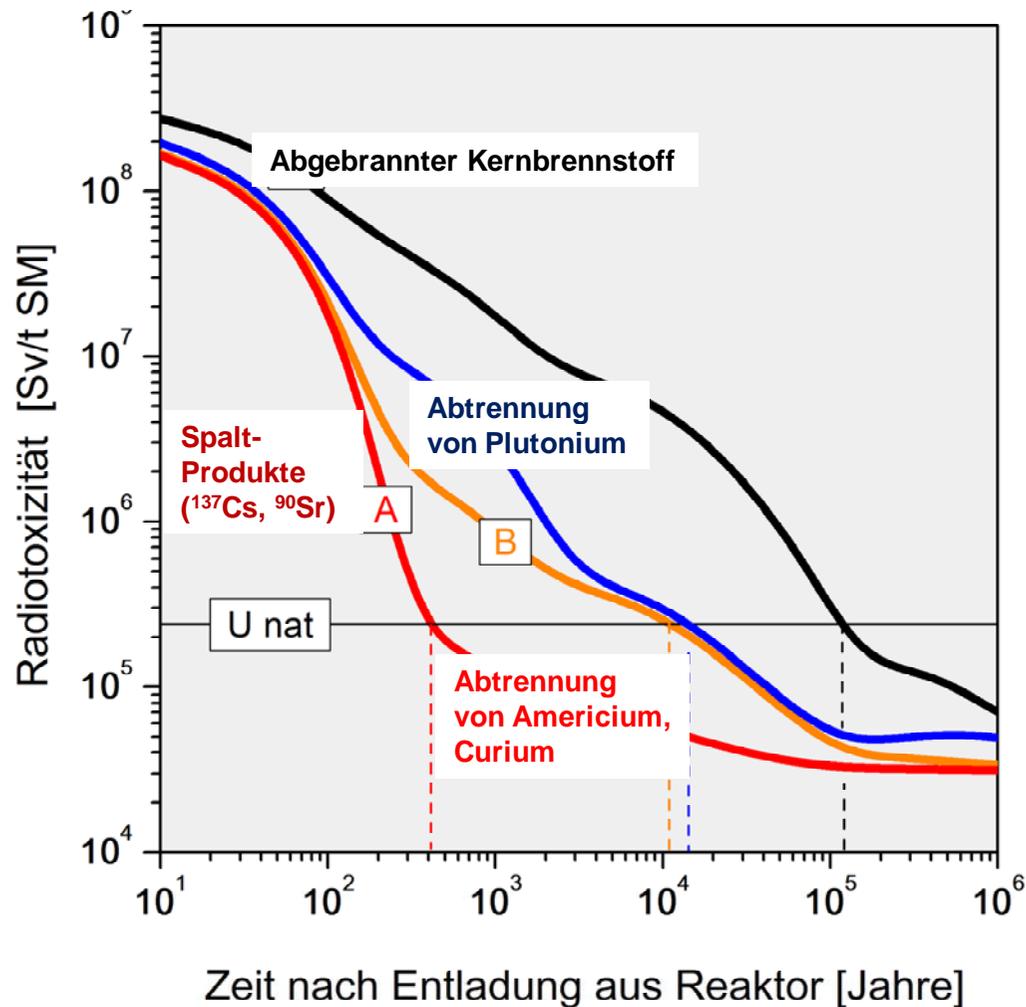
WELT ONLINE

TRANSMUTATION

14.09.2010



## Atommüll wird in 20 Jahren nicht mehr strahlen



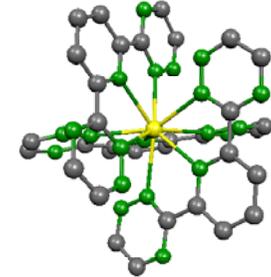
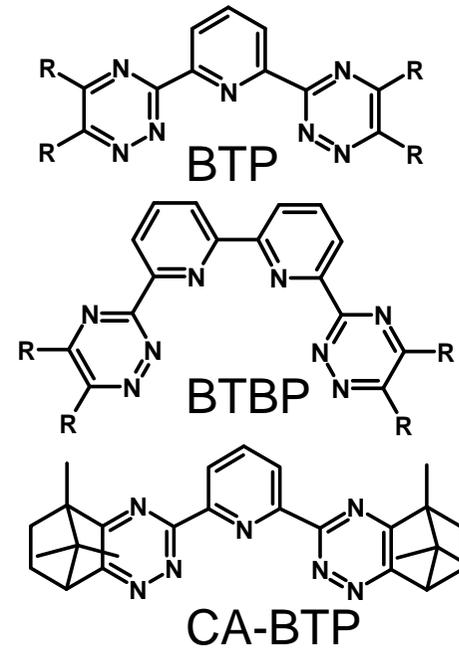
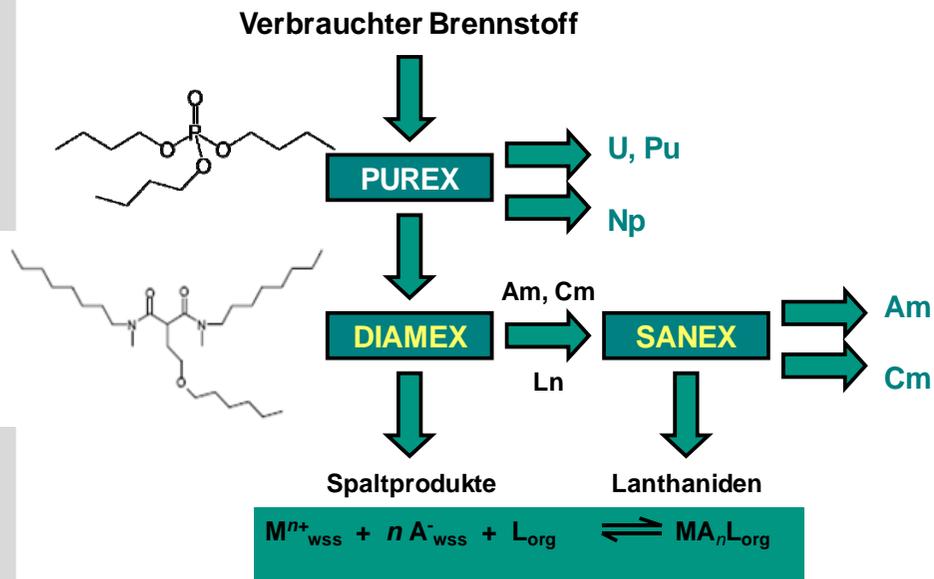
Intensive P&T Entwicklungen finden statt in:

Frankreich  
Japan  
Südkorea  
Indien  
Russland  
China  
(USA)

A = 99,5 % P&T Effizienz

B = 95 % P&T Effizienz

## Das Europäische SANEX Konzept (Selective ActiNide EXtraction)



D. Magnusson, Thesis, 2008

Z. Kolarik et al., Solvent Extr. Ion Exch. 1999, 17, 23  
M.R.S. Foreman et al., Solvent Extr. Ion Exch. 2005, 23, 645  
S. Trumm et al., EP 10157567.8 (24.3.2010)

## Radioaktive Abfälle

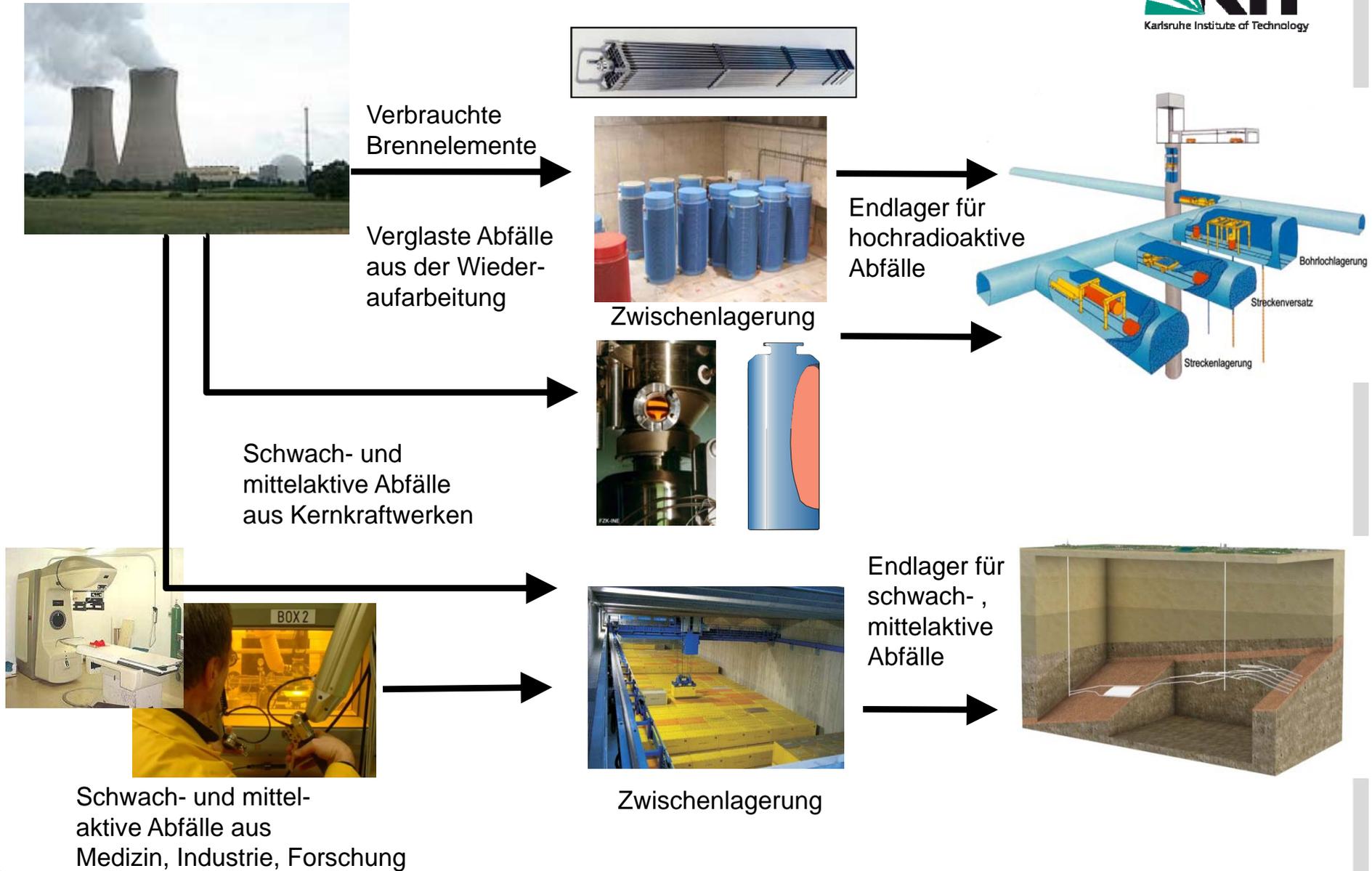
Was tun damit?

Zwischenlagerung/Langzeitzwischenlagerung

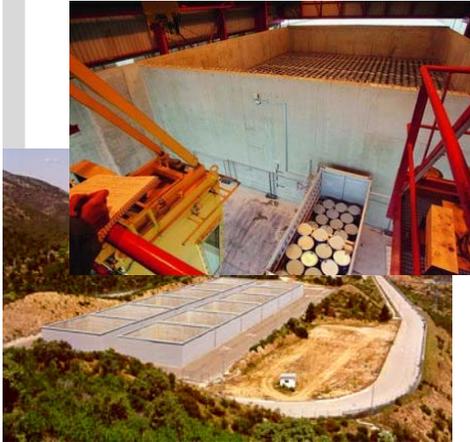
Nukleares Recycling  
(Wiederaufarbeitung/Partitioning/Transmutation)

**Endlagerung in tiefen geologischen Formationen  
- Internationaler Stand -**

# Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland

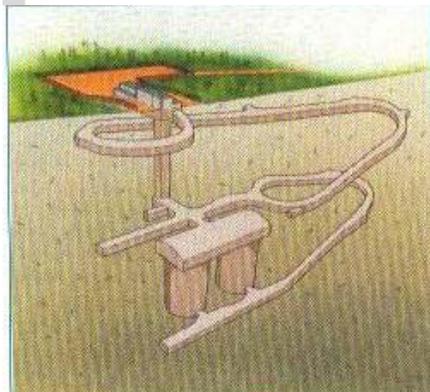


# Endlager für schwach + mittelaktive Abfälle



## Oberfläche

Centre de l'Aube,  
Centre de la Manche (F)  
El Cabril (Spanien), Drigg (UK),  
Dukovany (CZ)



## Oberflächennahe Endlagerung (60-120 m Tiefe)

Forsmark (S) Loviisa, Olkiluoto (FIN)



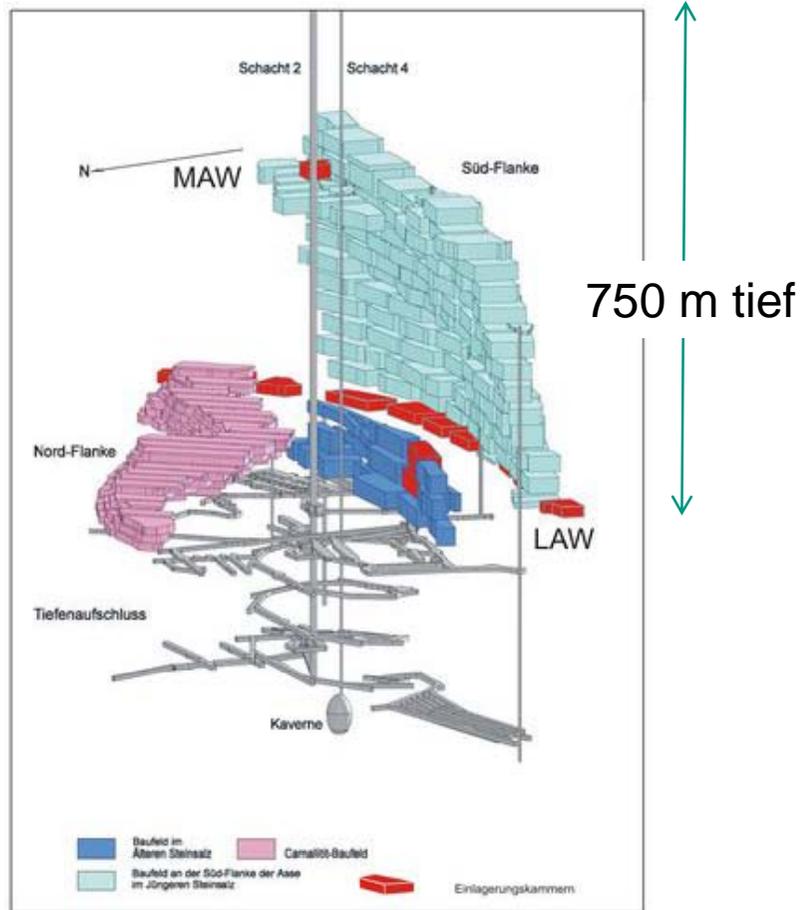
## Tiefe geologische Endlagerung (> 500 m Tiefe)

WIPP (NM, USA),  
Asse, Morsleben, (Konrad) (D)

# Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle

## Schachtanlage Asse

$\beta/\gamma$ : 2700 TBq,  $\alpha$ : 180 TBq  
 28 kg Plutonium, 100 t Uran,  
 80 t Thorium in 750 m Tiefe



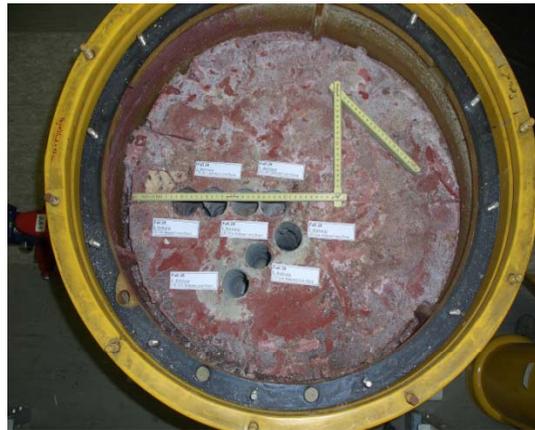
## Centre de l'Aube



bis Ende 2007: 208 053 m<sup>3</sup> Abfälle  
**genehmigt für 1 Mio. m<sup>3</sup> mit  $\alpha$ : 750 TBq**  
 Andra, National Inventory of Radioactive Materials and Waste 2009



# Problem: Asse



Relativ schnelle Korrosion von Abfallgebinden in Salzlauge ( $MgCl_2$ ) ~ 10 Jahre

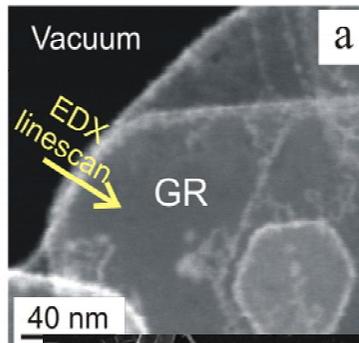
**Aber:** Fixierung insbes. der Actiniden (Th/Pu/U) an Behälter- und Zementkorrosionsprodukten.



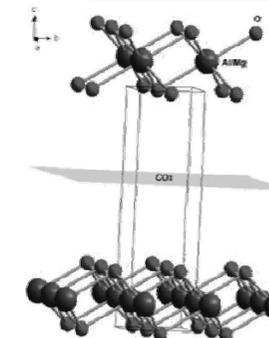
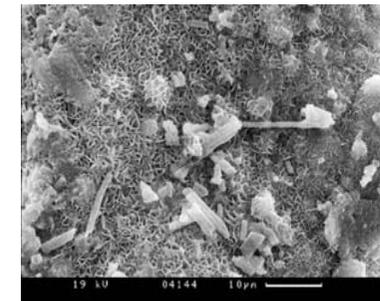
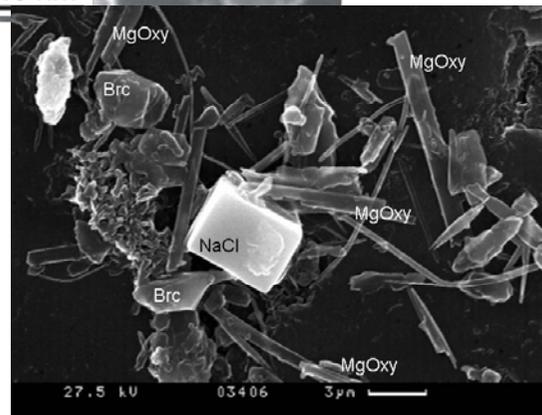
Am- Einbau in **Calcit**



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



U, Np Rückhaltung an **Eisenkorrosionsphasen**



Einbau in Zementkorrosionsprodukte (z.B. **Hydrotalcit, Brucit, Magnesit, Chlorartinit etc.**)

# Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (und weltweit)



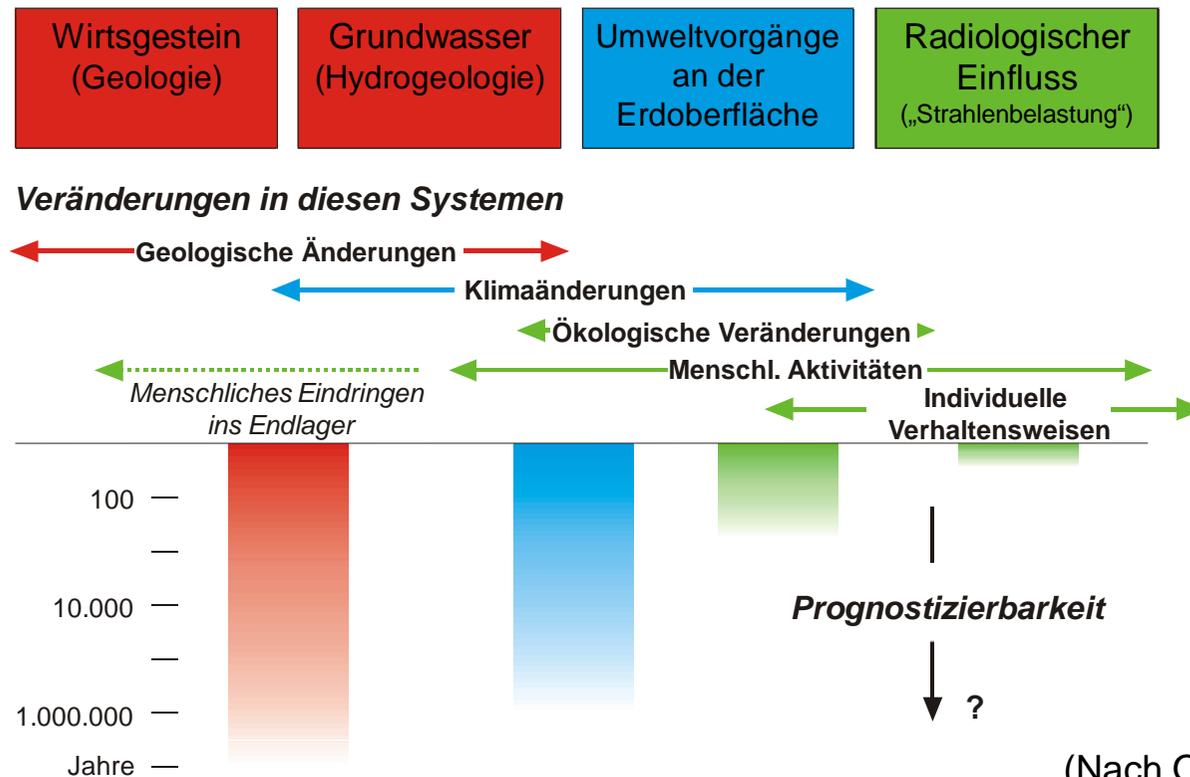
## Konsens:

Endlagerung radioaktiver Abfälle  
Im Weltraum, Polareis oder im  
offenen Meer ist keine  
akzeptable Alternative zur  
Endlagerung in tiefen geologischen  
Schichten.

... **ausschließlich** die Isolation  
dieser Abfälle durch den sicheren  
**Einschluss in einer tiefen  
geologischen Formation** eine  
sichere Lösung darstellt und als  
**einzigster realisierbarer Entsorgungsweg** in Frage kommt.

# Sicherheitsprinzipien (BMU, Sept. 2010)

- Einschluss der Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich; Fernhalten von der Biosphäre.  
→ Schutz von Mensch und Ökosphäre
- Aufrechterhalten des ‚passiven‘ Sicherheitsprinzips



(Nach OECD/NEA, 1999)

## ■ **Zugelassene Dosisbelastung:**

Für wahrscheinliche Endlagerentwicklungen:

→ zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr (Einzelperson)

Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen:

→ 0.1 Millisievert pro Jahr

## ■ **Endlagerauslegung**

- Minimierung der Durchörterung
- Handhabbarkeit der Abfallbehälter aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren
- bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein

(BMU, Sept. 2010)

# Endlagerprojekte

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

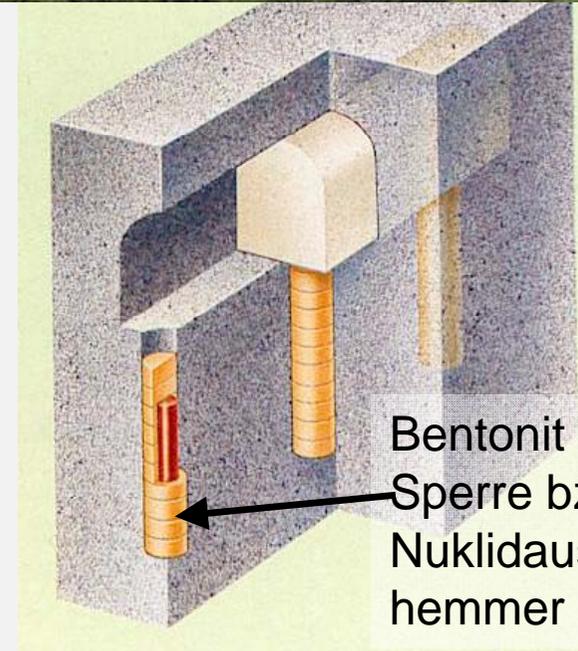


50 mm copper	
<b>Estimated weight (kg):</b>	
Copper canister	7,400
Insert	13,600
Fuel assemblies (BWR)	3,600
<b>Total</b>	<b>24,600</b>

*Copper canister for spent nuclear fuel*

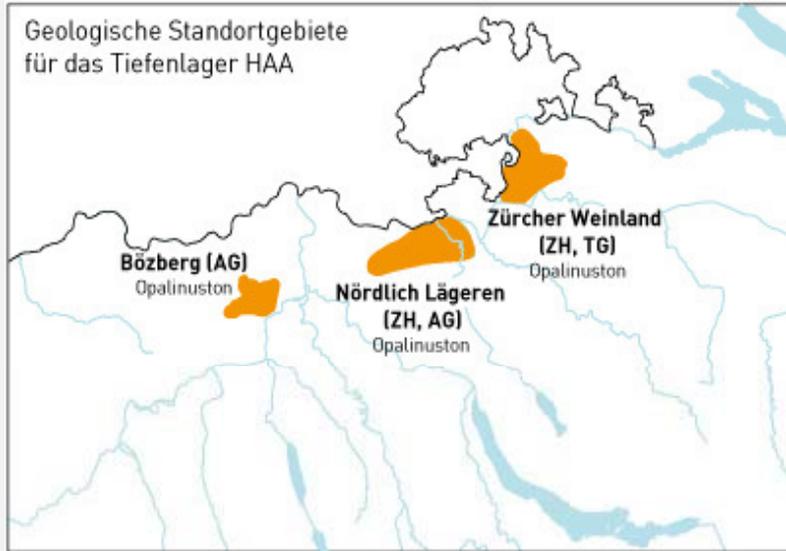
Stahlbehälter mit 5 cm Kupferwand

Skandinavisches Konzept: Schwerpunkt auf technischen Barrieren

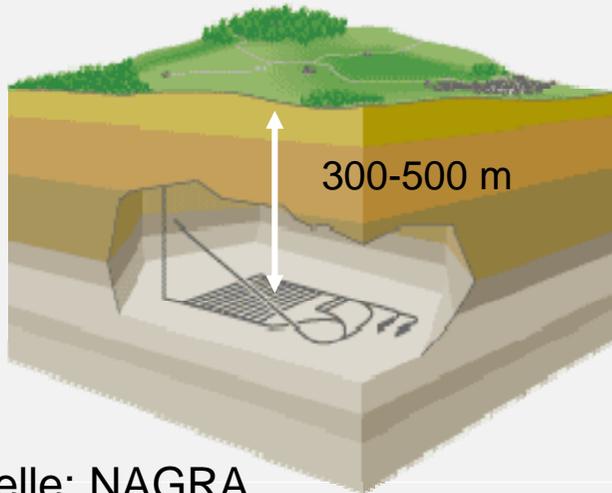


Bentonit als Wassersperre bzw. Radio-Nuklidausbreitungshemmer

Geologische Standortgebiete für das Tiefenlager HAA



**Geologisches Tiefenlager HAA**



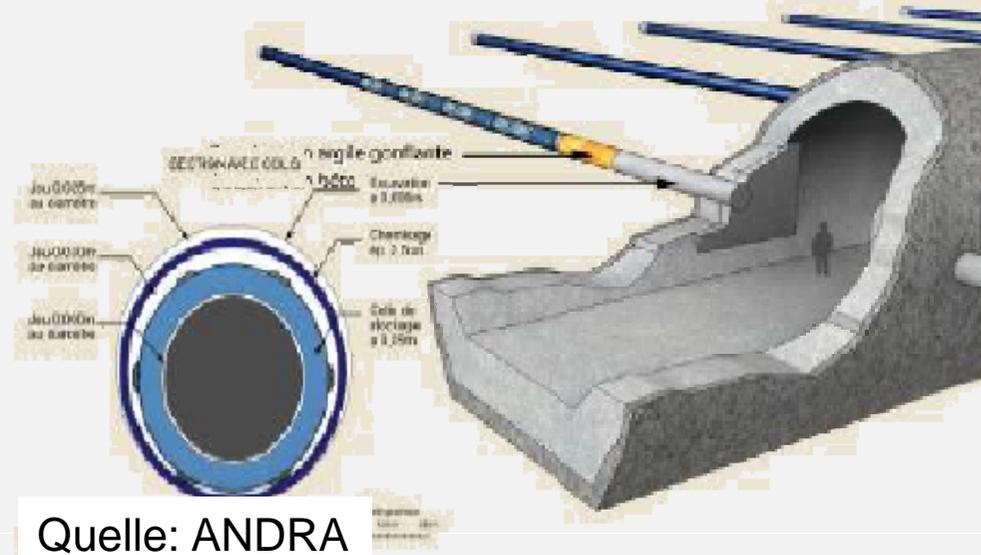
Quelle: NAGRA

## Tongestein:

Opalinus Ton in der Schweiz

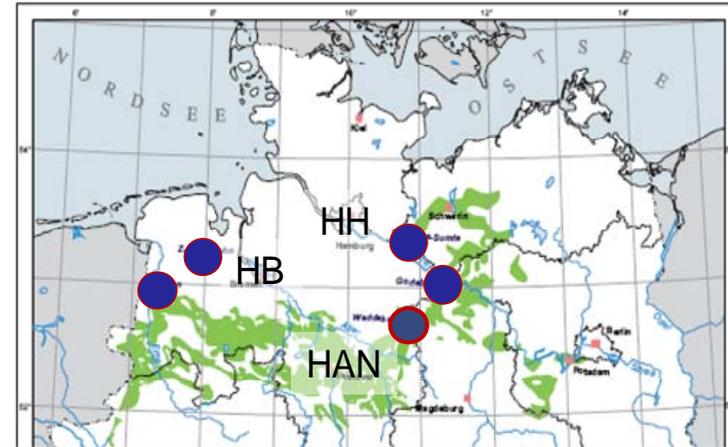
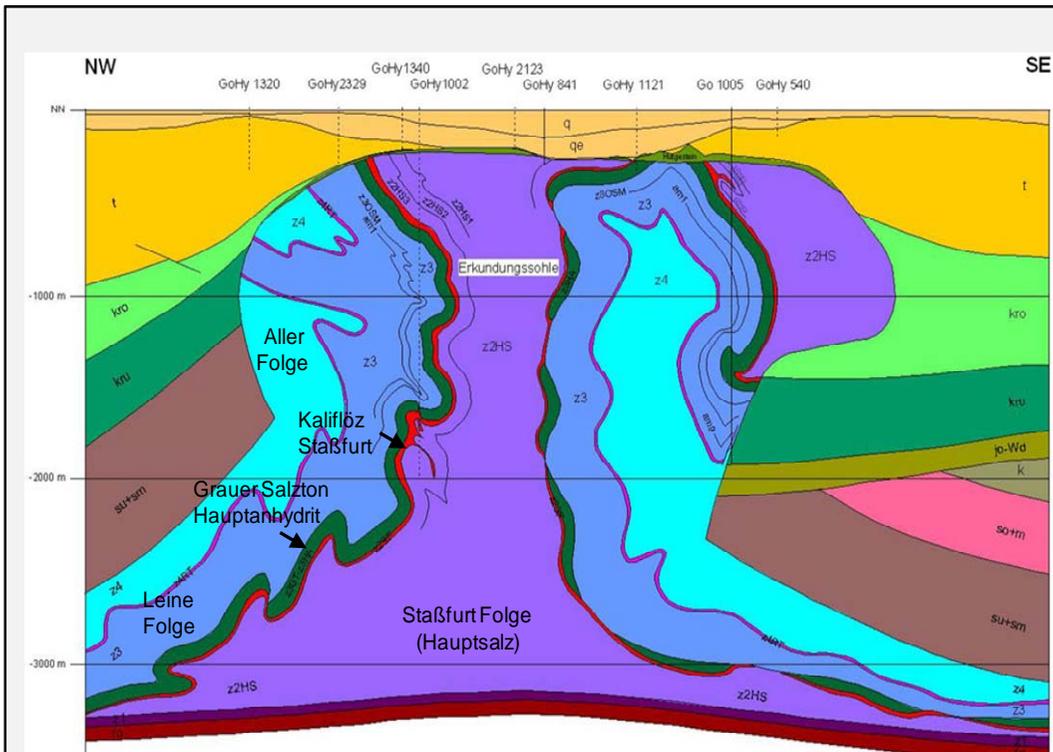
Callovo-Oxford-Ton in Frankreich

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



Quelle: ANDRA

# Endlagerprojekte



## Steinsalz:

Salzstöcke mit großer Mächtigkeit in Norddeutschland

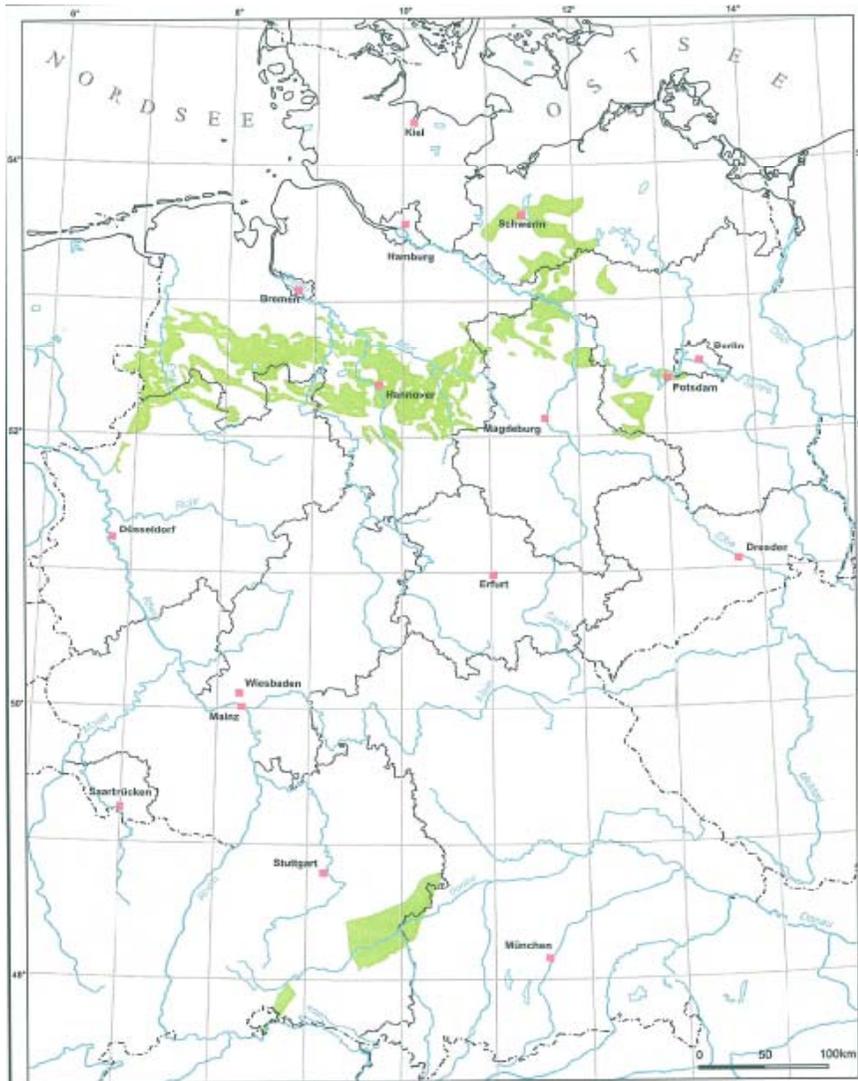
## Gorleben:

- 260 Millionen Jahre alt
- geringer Salzaufstieg (0,02 mm/Jahr)
- Subrosionsraten: ~ 10 µm/Jahr
- Hohe Plastizität
- „Vollständiger Einschluss“

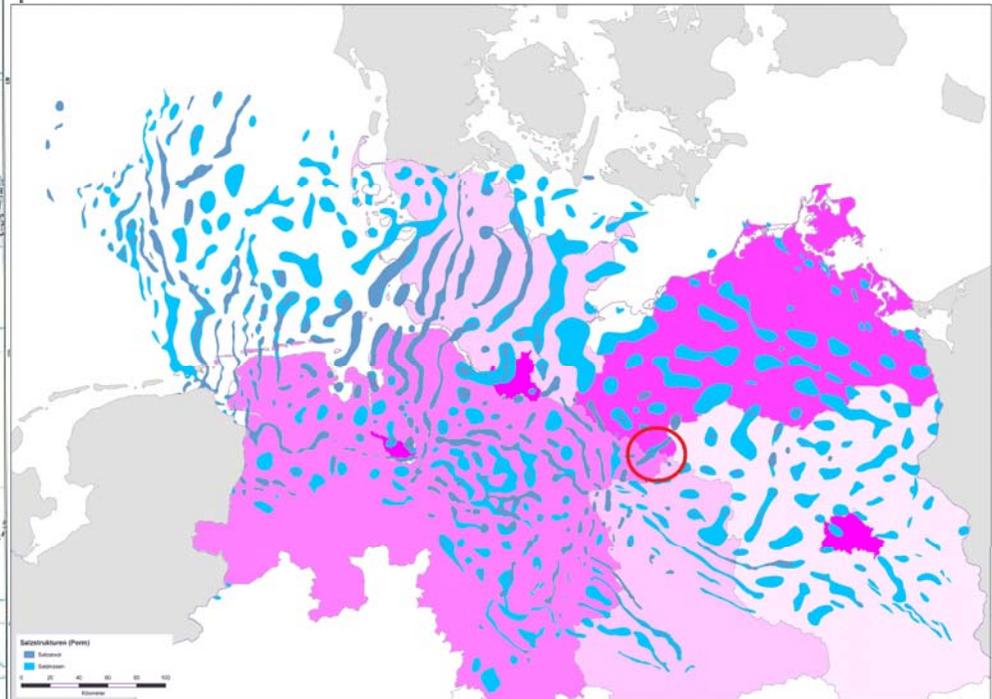
Quelle: BGR

# Potentielle Standorte in Deutschland

## Tonstein



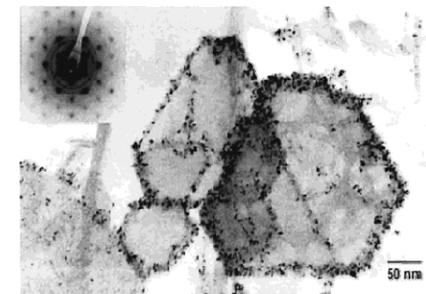
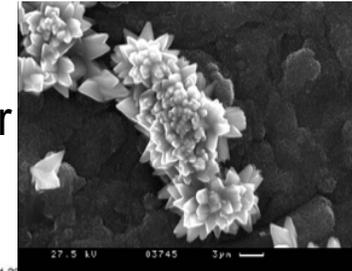
## Steinsalz



Quelle: BGR

# 40 Jahre chemische/geochemische Endlagerforschung

- Deutlich verbessertes Verständnis des Verhaltens hochradioaktiver Abfälle beim Kontakt mit Wasser (Löslichkeitslimitierung, Radionuklidrückhaltung in 'Sekundärphasen')
- Konsistente Sammlungen abgesicherter Daten zur Geochemie von Radionukliden insbesondere der Actiniden (Uran, Neptunium, Plutonium, Americium) - NEA-TDB, THEREDA
- Aufklärung einer Vielzahl von Radionuklidrückhalterreaktionen, die bislang nicht in konservativen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden
  - Reduktion und signifikante Verringerung der Löslichkeit
  - Mineralisierungsreaktionen (Radionuklideinbau in Mineralphasen)



## „Chemische/geochemische“ Barrieren:

Löslichkeitsbegrenzungen (insbesondere: U, Pu, Np, Am)

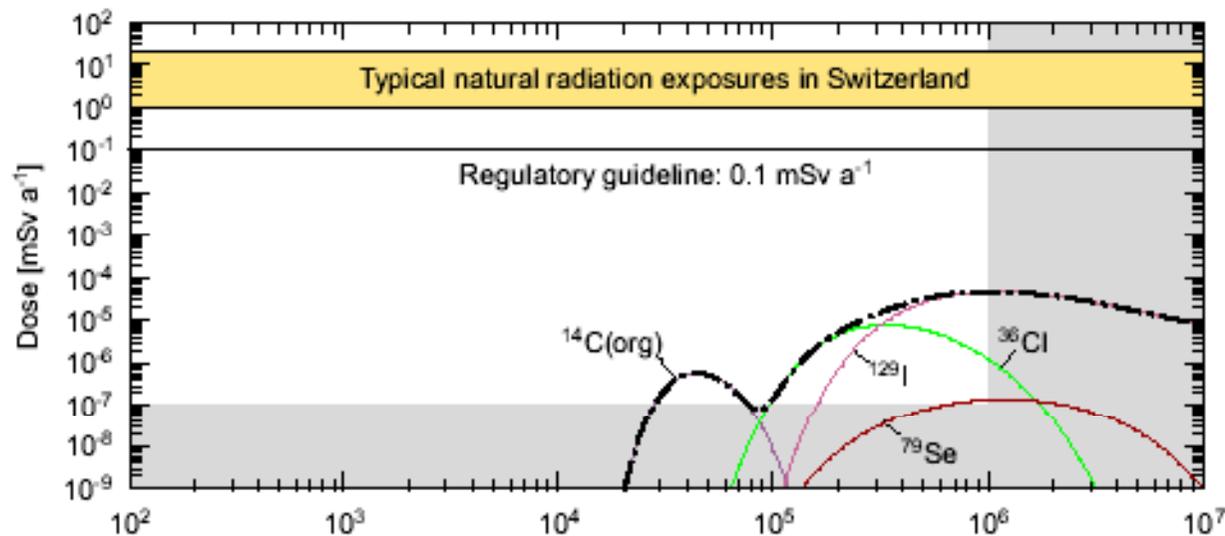
Redoxbarrieren (insbesondere: U, Pu, Np, Tc, Se)

Sorptionsbarrieren (alle Radionuklide)

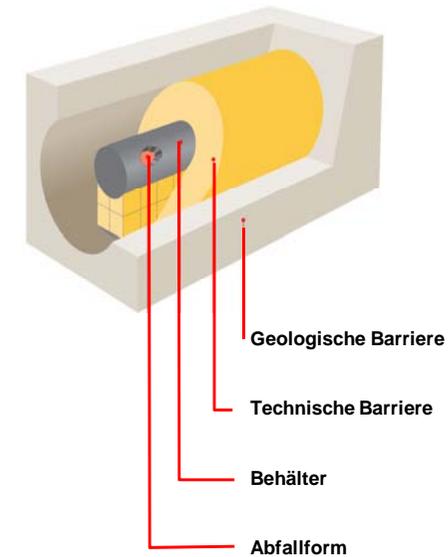
Nahfeld

Nah-/Fernfeld

Nahfeld + Fernfeld



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



# Die Hintertür: Rückholbarkeit - vereinbar mit dem Prinzip der passiven Sicherheit?

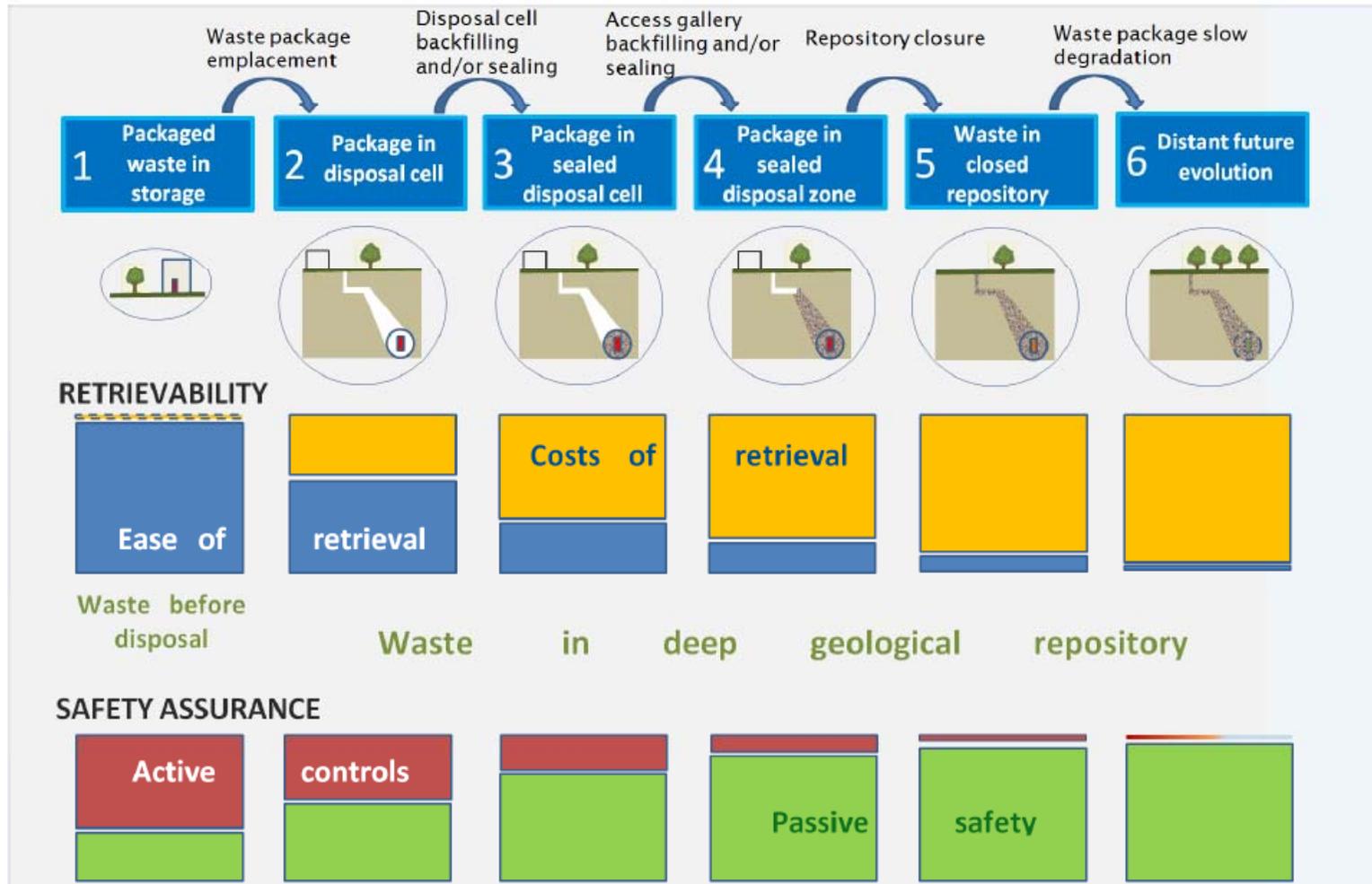


Fig.4: Lifecycle stages of the waste, illustrating changing degree of retrievability, passive safety and active controls in a deep geological repository (http://www.nea.fr/rwm/rr) (actual size of boxes may vary depending on the repository design)

## Schlußfolgerung:

- Unabhängig davon, ob wir Kernenergie weiter nutzen wollen oder nicht:  
Die sichere Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist eine (inter-) **nationale Aufgabe**.
- Die Endlagerung von nicht-wärmeproduzierendem Abfall (schwach- und mittelaktiven Abfällen) wird praktiziert.
- Entsorgung von wärmeproduzierenden Abfällen durch:
  - Partitioning & Transmutation kann die Langzeitradiotoxizität des hochradioaktiven Abfalls um 1-2 Größenordnungen vermindern.
    - erfordert den Aufbau kernchemischer und kerntechnischer Anlagen
    - ein Endlager wird damit nicht überflüssig
      - Spaltprodukte (Zerfall über einige hundert Jahre)
      - Verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bereits vorhanden
      - Verluste bei P&T Zyklen gelangen in den Abfall
  - Direkte Endlagerung in stabilen tiefen geologischen Formationen ist in Deutschland (wie in anderen Ländern technisch machbar).
- Die Lösung des Entsorgungsproblems erfordert allerdings eine klare Linie (politisch-gesellschaftlicher Konsens) .
- Ein gemeinsamer (Politik/Behörde/Industrie/Forschung/Öffentlichkeit) Prozess zur Lösung der Entsorgungsfrage muss durchlaufen werden.