

RC-12



---

---

---

## **6.4 Nukleare Endlagerung (Tiefenlagerung)**

# Ziel der Endlagerung

---

---

- **Verhinderung, dass aus dem Abfall stammende Radionuklide in die Biosphäre gelangen, bevor ihre Radioaktivität auf unbedenkliche Konzentrationen abgeklungen ist.**  
*(auch eingebrachte „konventionelle Stoffe mitbetrachten!)*

**Endlager = Geologisches Tiefenlager**

# Rahmenbedingungen auf dem Weg zum Nuklearen Endlager

---

---

## - Ergebnisoffene Standortsuche

*2013 „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Endlagersuchgesetz)“*

## - Evaluierung des Gesetzes durch 33 Mitglieder der Endlagerkommission bis 2016

## - Anfang 2017 Bundestag/Bundesrat „Grünes Licht“ für tatsächliche Standortsuche

## - Organisation der Standortsuche durch das dem BMU unterstellte „Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)“

## - „Bundesamt für kerntechnische Entsorgung (BfE)“ ist die Regulierungsbehörde für das Standortauswahlverfahren und auch später für die Planfeststellung und Genehmigung von Endlagern

## - Bildung einer „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ nach Standortauswahlgesetz (in 2014)

**Betriebsbereites Endlager ca. 2050 ?**

# Relevante Forschungsaktivitäten

---

---

- Schaffung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen für ein Endlager  
Entwicklung erforderlicher Methoden und Techniken,
- Endlagerbezogene Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft  
und Technik auf diesem Gebiet
- derzeit verstärkte wirtsgesteinsübergreifende Forschungstätigkeit,  
standortunabhängig, technische, chemische, physikalische, biologische  
Daten
- Betrachtung längerer Zwischenlagerzeiten des Nuklearmaterials  
(Brennelemente bzw. verglaste Spaltprodukte in Castoren)



***Prozessverständnis***

# „Atommüll“

---

---

## ***Radioaktiver Abfall:***

**jegliche radioaktiv kontaminierte, bei Betrieb und Abbau von Kernanlagen und den Umgang mit radioaktiven Stoffen anfallenden Reststoffe, die nicht dekontaminierbar und damit nicht wiederverwendbar sind.**

- aktivierte, bzw. kontaminierte Bauteile von Reaktoren, Kernanlagen und Produktionsanlagen für radioaktive Isotope**
- anfallende radioaktive Abfälle aus nuklearmedizinischer, industrieller und forschungsseitiger Anwendung**
- konzentrierte Prozessabfälle bei der Urangewinnung und Aufarbeitung**

## ***Nuklearer Abfall:***

- abgebrannte Brennelemente der Reaktoren**
- radioaktive Prozessabfälle (Glaskokillen), die bei der Wiederaufbereitung von Brennelementen entstehen**

# Herausforderung Zwischenlagerung

---

---

- derzeit keine zentrale Zwischenlagerung von radioaktiven und nuklearen Abfällen
- Zeitliche Ausdehnung der Zwischenlagerung Nuklearer Abfälle
- gesetzliche Neuordnung der Dauer einer „Zwischenlagerung“  
juristisch und fachlich erforderlich
- Untersuchungsmöglichkeiten (technologische Anlagen und Analytik)  
für in Containern gelagerte Brennelemente und Kokillen bereithalten
- Bund muss erforderliche Mittel für die Lösung des Endlagerproblems zeitlich  
gestraft zur Verfügung stellen
- Fokussierung der Mittel auf Lösung der Direkten Endlagerung
- derzeit werden radioaktive Abfälle an ca. 50 Standorten in D. aufbewahrt
- Entleerung des „Endlagers Asse“, Umlagerung nach Schacht Konrad geplant

# Zwischenlagerung von radioaktiven und Nuklearabfällen in D

## Radioaktive:

- \* in den entsprechenden Landessammelstellen
- \* in Großforschungszentren
- \* in Tiefenlagern (Asse 47.000 m<sup>3</sup>, Morsleben 37.000 m<sup>3</sup> )
- \* zukünftig Schacht Konrad 303.000 m<sup>3</sup>

## Nukleare:

- \* bei Kernkraftwerken an 18 Standorten
- \* in drei externe Zwischenlagern (Ahaus, Gorleben, ZL Nord-Lubmin )



Schacht Konrad Salzgitter

Gns.de



**Ahaus:**  
ca. 370 Stellplätze,  
weiterhin Plätze für BE aus Forschungsreaktoren



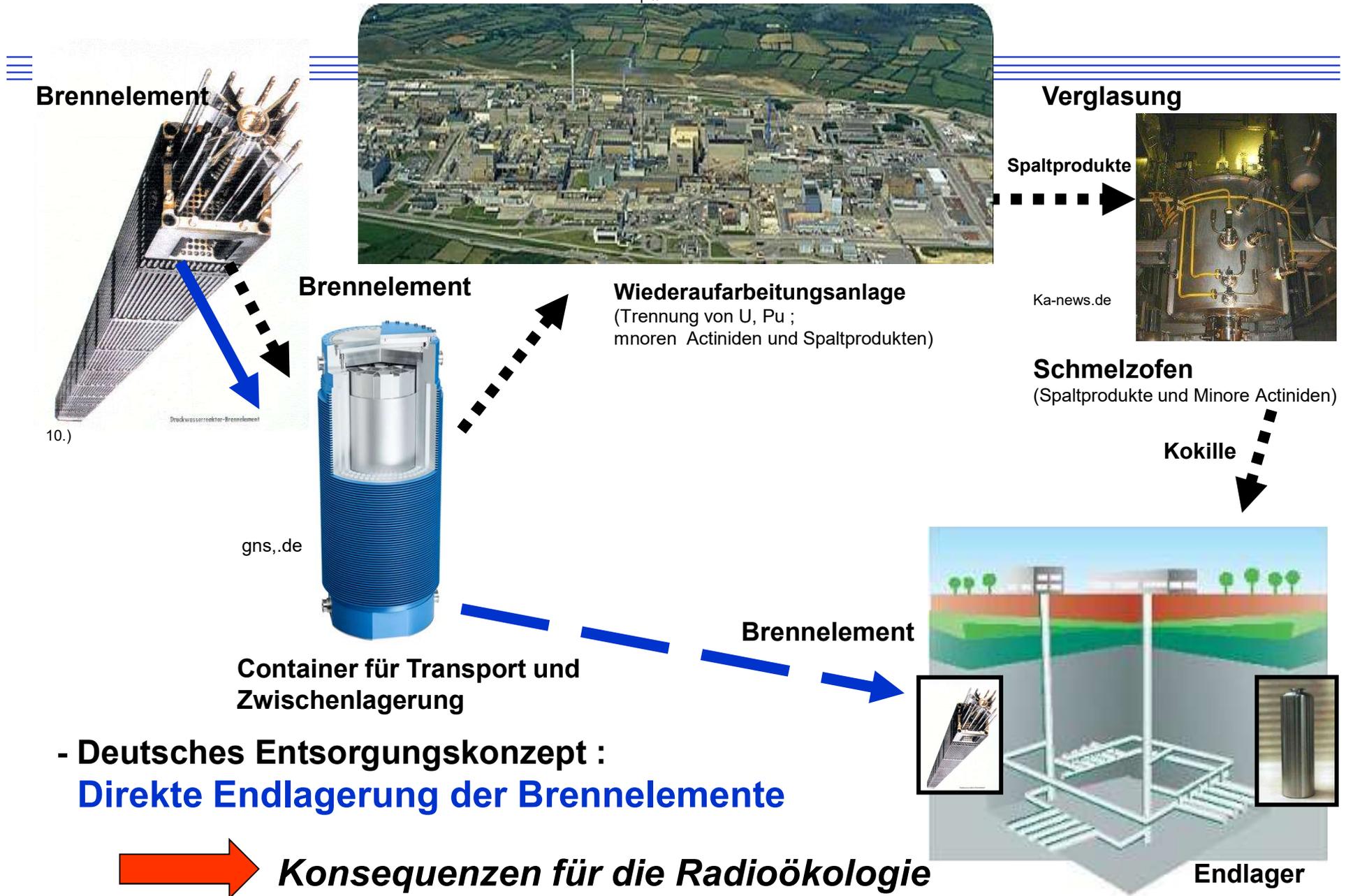
**Gorleben**  
ca. 420 Stellplätze



**ZL Nord Lubmin**  
ca. 80 Stellplätze

# Weg der Brennelemente (Wdh., Überblick)

<http://www.aveva.com>



# Entsorgung im Tiefenlager

---

---

- Wo, wie kann man „Tiefenlagern“?

Welche Gesteins- (Wirts-) Formationen kommen in Frage?

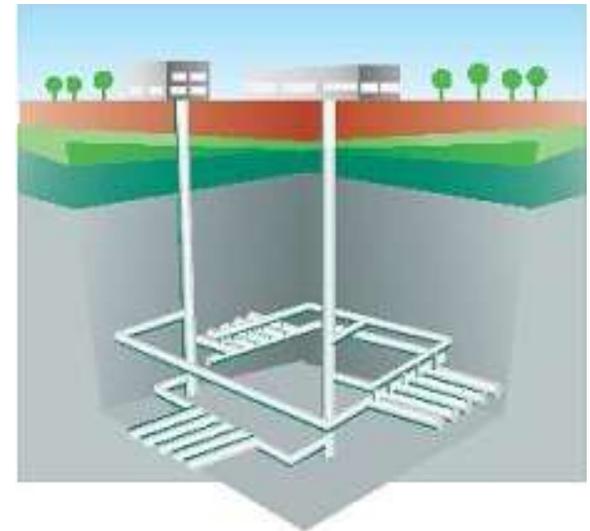
Welche Technik muss vorhanden sein?

Was muss erforscht werden?

Welche Anforderungen an den Standort?

- **Beispielskriterien für die Standortauswahl:**

- \* **Geographie**
- \* **Regionalgeologische Verhältnisse**
- \* **Tektonik**
- \* **Hydrogeologie**
- \* **Wirtsgesteinseigenschaften**
- \* **Seismizität**
- \* **Rohstoffvorkommen, Bergbau, Infrastruktur...**



# Potenzielle Wirtsgesteine

---

---

## Mögliche Wirtsgesteine:

- Salz
- Ton/Tonstein
- Kristallines Gestein

Generell ist in jeder dieser Formationen eine sichere Tiefenlagerung möglich.

*Da keine globale/europäische Lösung der Endlagerung möglich, bleibt die Endlagerung von Nuklearen Abfällen in Landeshoheit.*

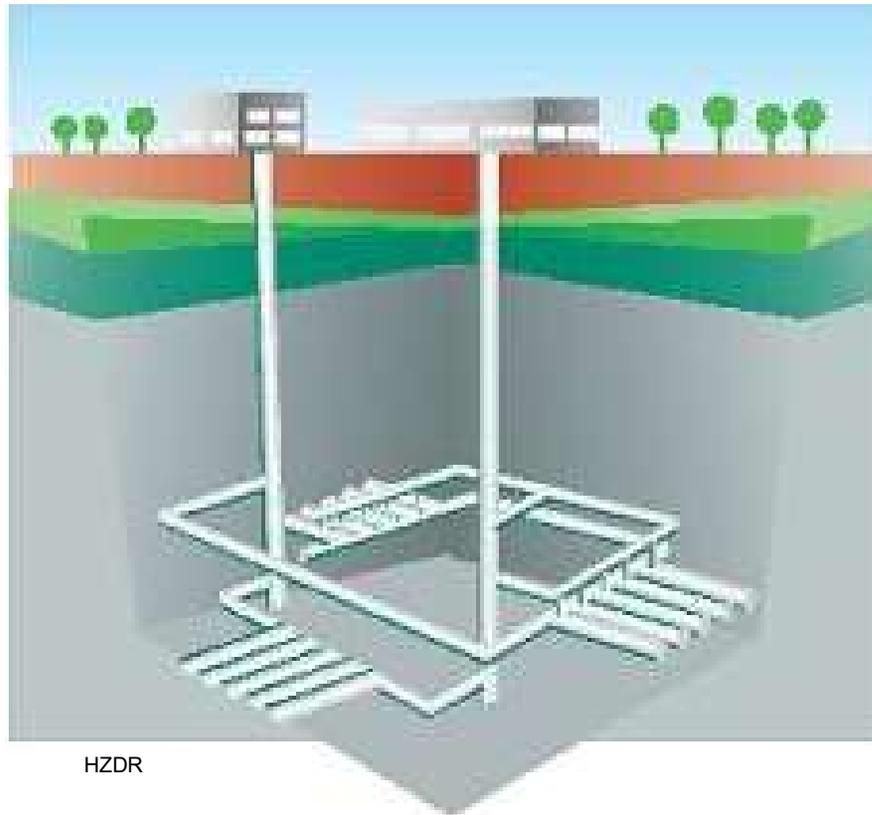
- In D. ist der Bund verantwortlich!
- Deutschland hat den Vorteil, dass die drei Wirtsgesteine auf dem Territorium vorhanden sind.
- Andere Länder (z.B. Finnland, Schweden, Frankreich ...) haben nicht diese 3 allgemeinen Optionen

# Vergleich potenzieller Wirtsgesteine

Eigenschaften	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein
Temperatur - leitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering - gering	sehr gering - durchlässig
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch – spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch - gering
In-situ Spannungen	isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel – hoch
Temperatur-belastbarkeit	hoch	gering	hoch

# Endlager- Mindestanforderungen

- **Teufe mind. 300 m**
- **Endlager darf nicht tiefer als 1500 m liegen**



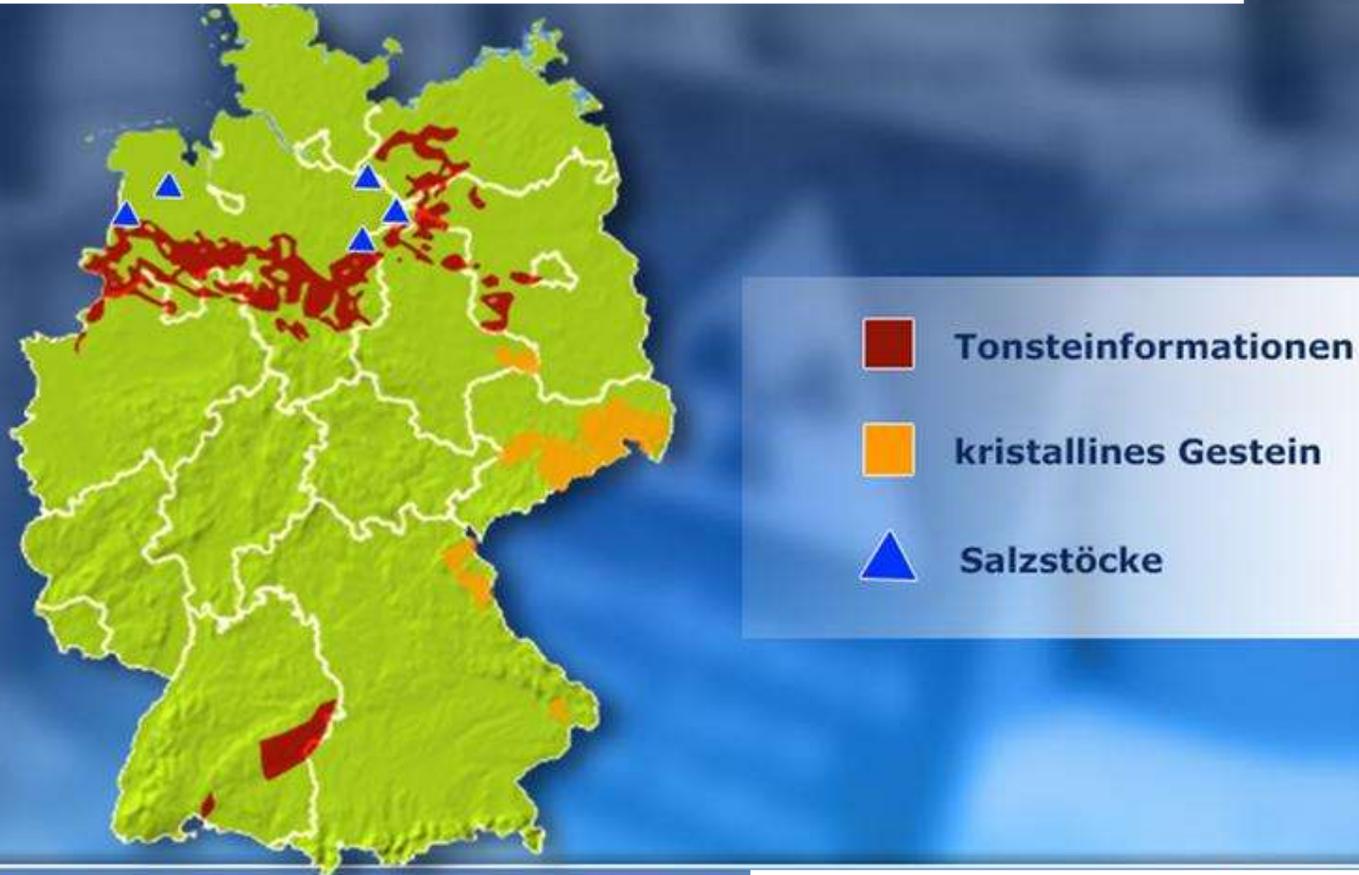
HZDR

**Einschlusswirksamer Bereich muss mind. 100 m mächtig sein**

**Durchlässigkeit im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kleiner als 3 mm/a**

Quelle: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte

## Untersuchungswürdige Gesteinsformationen, D.



Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

### - Bisher D:

#### Erkundung Standort Gorleben, Salz

Technische und wissenschaftliche Mitarbeit in Untertagelaboren:

Schweden: UTL Äspö, Granit

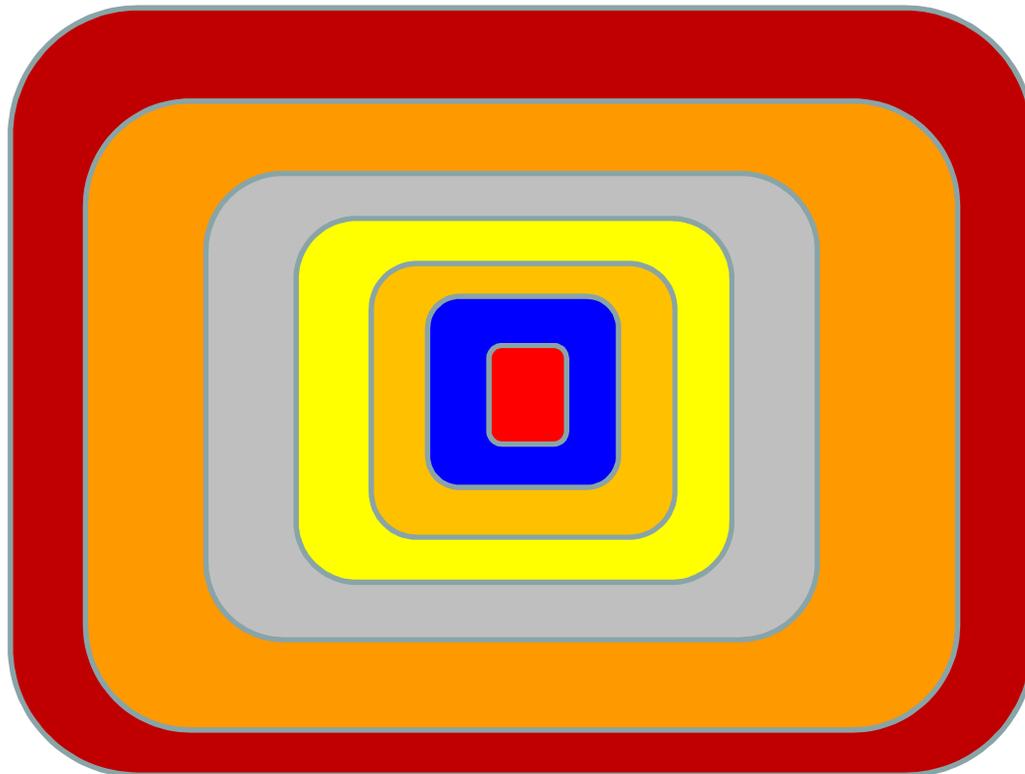
Schweiz: UTL Mont Terri, Tonstein; UTL Grimsel, Granit

# Multibarrierenkonzept bei der Endlagerung nuklearer Abfälle



## Prinzip:

- Rückhaltung der Radioaktivität durch die unterschiedlichen Barrieren
- Szenario ... Wassereintritt
- Barrieren haben unterschiedliche, abgestufte Wirksamkeit



**Abfallzusammensetzung**

**Abfallform**

**Verpackung**

**Versatzmaterial**

**Abschlussbauwerke**

**Wirtsgestein**

**Deckgebirge**

# Multibarrierenkonzept bei der Endlagerung nuklearer Abfälle

## II

### Technische Barriere

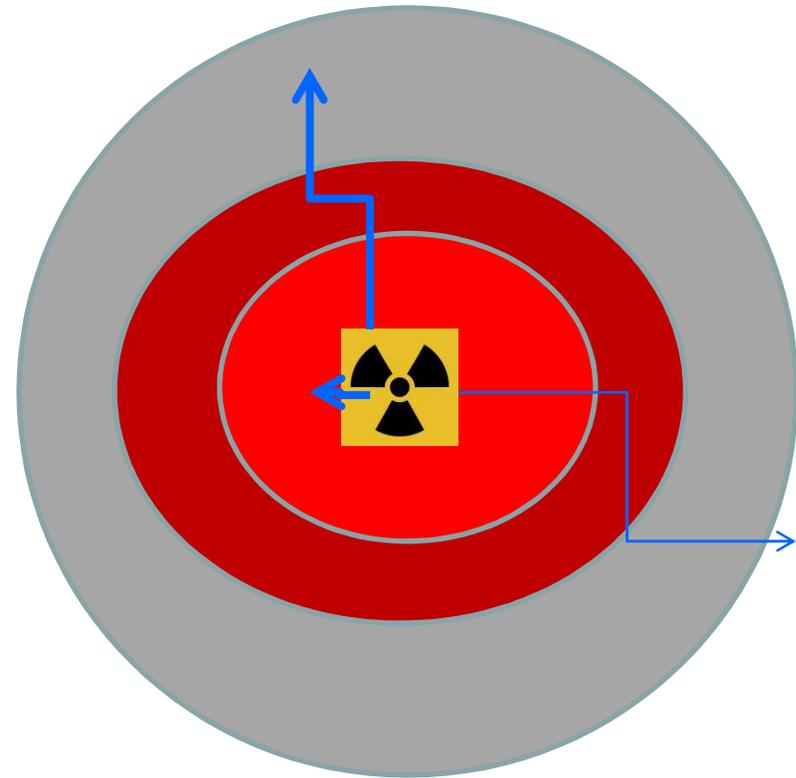
Brennstoffmatrix  
Container

### Geotechnische Barriere

Verfüllung der Bohrlöcher  
Dammsystem  
Verfüllung des Schachtsystems

### Geologische Barriere

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich  
Wirtsformation  
Deckgebirge mit Aquifersystem



# **Langzeitsicherheitsanalyse: Szenario Zutritt von wässriger Lösung**

---

---

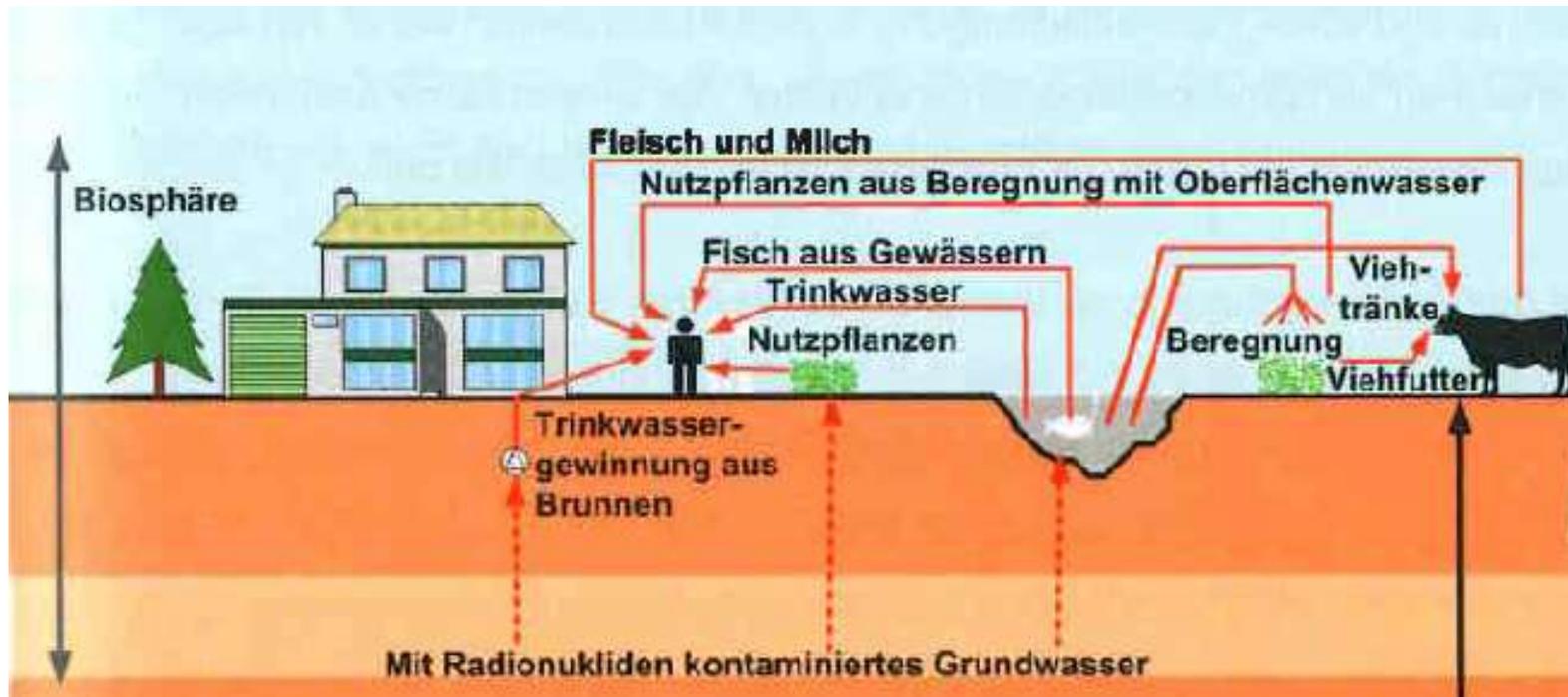
- **Radioaktive Stoffe können nach Wasserzutritt zum Endlager über das Grundwasser in die Biosphäre gelangen**
- **Schadstoffe können über Klüfte, aber auch diffusiv in das Wirtsgestein eindringen.**

**Interdisziplinärer Ansatz bei der Erarbeitung der Sicherheitsanalyse:**  
Zusammenarbeit und Abstimmung verschiedener Wissensgebiete und Techniken

Geo- Biochemie  
Radiochemie  
Hydrologie  
Geologie  
Geophysik  
Geotechnik  
Mathematik u.a.

# Radioökologie als Wissensgebiet

- Wissenschaft von der Ausbreitung und dem Verhalten von Radionukliden in der Umwelt; beschreibt die Freisetzung von Radionukliden (Quellterm), die Verteilung und die Ausbreitung.
- Beitrag zum Strahlenschutz, ermittelt Eingabeparameter für die Berechnung der Strahlendosis bei Menschen und anderen Lebewesen durch Aufnahme der Radionuklide in den Körper und auch bei äußerer Bestrahlung.



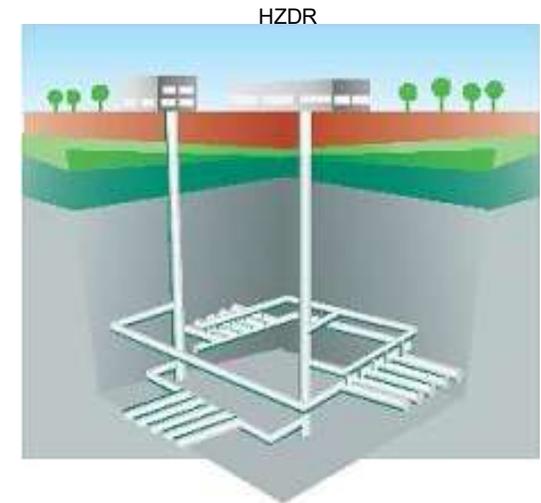
# Relevante geo- und biochemische (radioökologische) Prozesse zur Langzeitsicherheitsanalyse

## Standortunabhängige Daten

- *Thermodynamik*
- *Sorption*
- *Nuklidspezies*

## Standortspezifische Daten

- *Geomechanik*
- *Gesteinsphysik*
- *Geohydraulik*
- *Geochemie*



## Prozesse

- *Auflösung/Ausfällung*
- *Grenzflächenreaktionen*
- *Redoxreaktionen*
- *Komplexbildung*
- *Radiolyse*
- *Gasbildung*
- *Kolloidbildung*
- *Mikrobiologische Prozesse*
- *Wärmetransport*

*Daten und Prozesse betrachten  
in Abhängigkeit des*

- *Wirtsgestein*
- *Barrieren Nahfeld/Fernfeld*

Prozessmodellierung/Stofftransport

Langzeitsicherheitsanalyse

# FEP- Katalog für ein Endlager

---

---

- Voraussetzungen für einen Langzeitsicherheitsnachweis sind die Kenntnis des Anfangszustandes sowie Vorstellungen zur zukünftigen geologischen und klimatischen Entwicklung

**FEP: Features, Events, Processes** (Merkmale, Ereignisse, Prozesse)

- wesentlicher Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager ist die Identifizierung und die quantitative Analyse und Bewertung von Szenarien, die jeweils eine der möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems darstellen können.
- Die einzelnen Szenarien werden durch Merkmale, Ereignisse und Prozesse charakterisiert, die die betrachtete zukünftige Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen können.

# Parameter, die den Transport der Radionuklide mitbestimmen

---

---

- Eigenschaften des Grundwassers, bzw. des eindringenden Wassers
- Hydrogeologie (Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit)
- Eigenschaften des umliegenden Gesteins (Salzes)
- Einstellende chemische Gleichgewichte

## Chemie der Actinide:

### Thorium, Uran, Neptunium, Plutonium, Curium, Americium

- \* Löslichkeiten (Abhängigkeit von Ionenstärke, pH-Wert, Temperatur, Druck, Redoxpotential)
- \* Kenntnis der Speziation (chemischer Zustand des Actinids / Radionuklids)
- \* Sorptionsgleichgewichte, Reaktionskinetik

# Radionuklide im Endlager (Direkte Endlagerung)

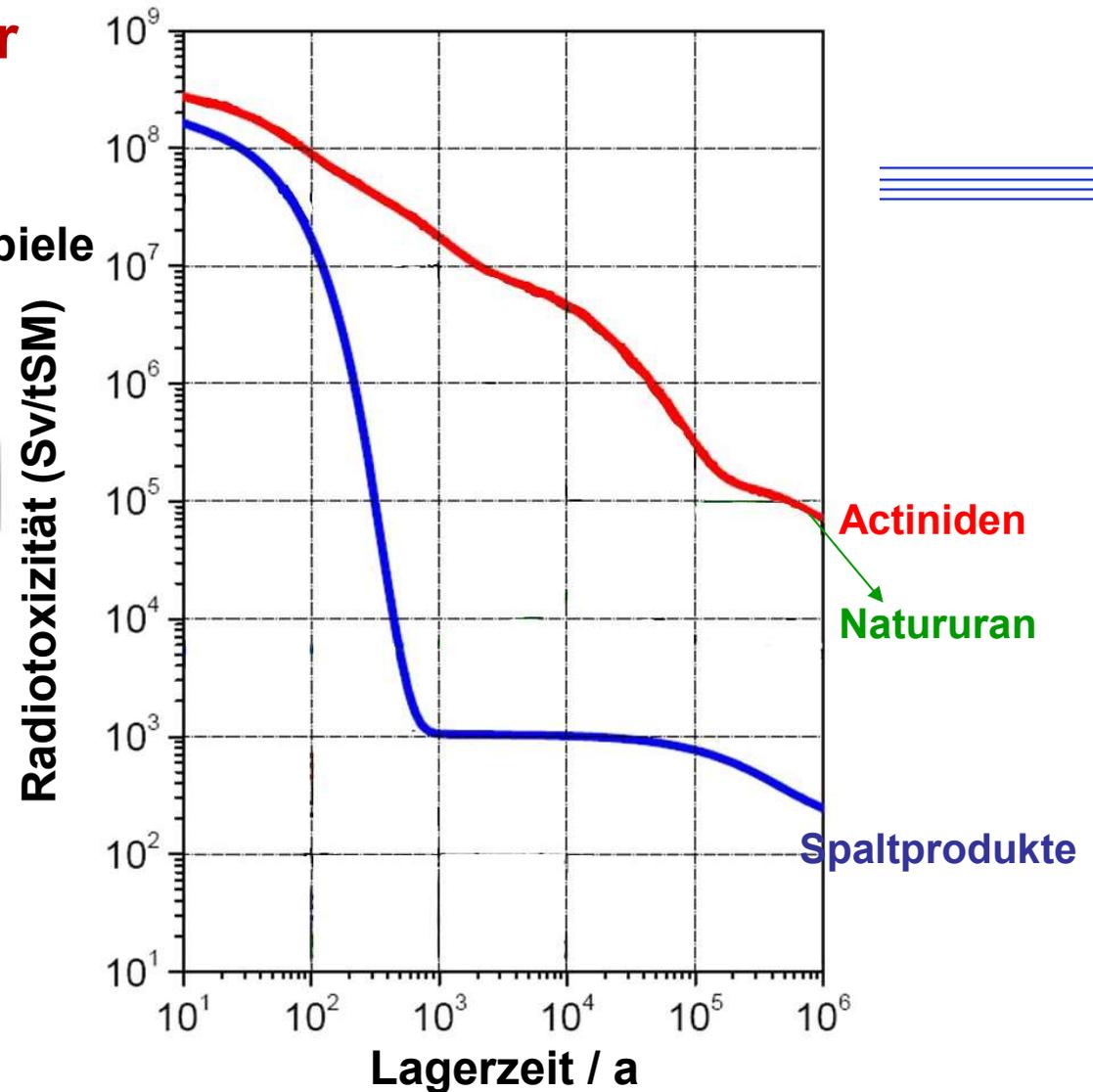
## Relevante Elemente (RN), Beispiele

### Kurzlebig:

Cäsium (Cs-137)  
Strontium (Sr-90)

### Langlebig:

Thorium (Th-232)  
Uran (U-235, U-238)  
Plutonium (Pu-238, Pu-239, Pu-240)  
Americium (Am-241, Am-243)  
Neptunium (Np-237)  
Selen (Se-79)  
Technetium (Tc-99)  
Iod (I-129)  
Cäsium (Cs-135)



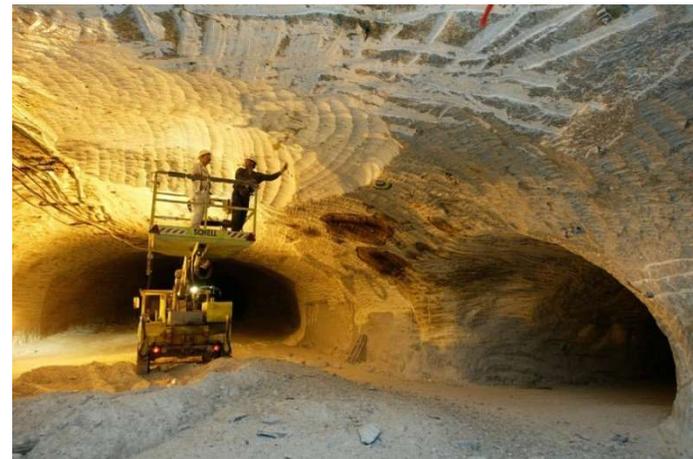
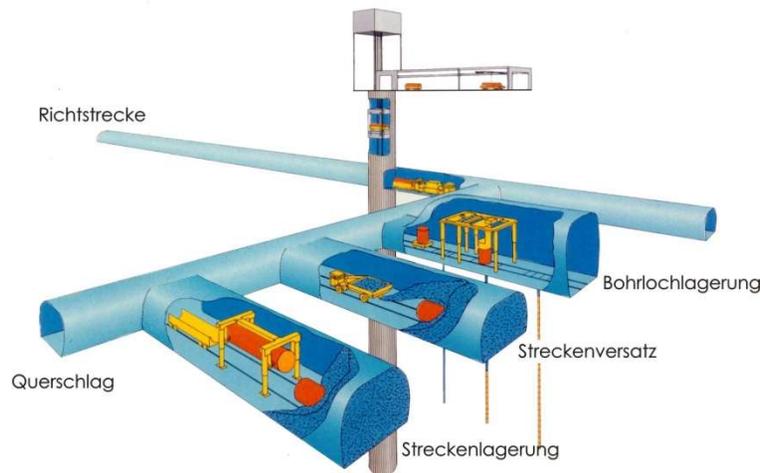
- nach ca. 10.000 Jahren bestimmen die Actiniden die Radiotoxizität



- Langlebige Radionuklide sind der Quellterm für die Langzeitsicherheitsanalyse

# Endlager – Technologie

- Erkunden
- Auffahren (Schacht/Stollen)
- Einlagerung der Abfallgebinde (Behälter mit Brennelementen/Behälter mit Glaskokillen)
- Einlagerung im Stollen oder in Bohrlöchern von der Stollensohle aus
- Verschließen der Bohrlöcher, Stollen, Schächte



sueddeutsche.de

# Fazit

---

---

**Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist die sicherste Methode der Entsorgung hochradioaktiver /nuklearer Abfälle**

**Für die Tiefenlagerung müssen die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen geschaffen werden.**

**Ein Multibarrieren - System aus technischer, geo-technischer und geologischer Barriere erhöht die Sicherheit**

**Radioökologische Untersuchungen sind zwingend erforderlich, um zur Langzeitsicherheit des Endlagers und somit zum Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren zusätzlicher Radioaktivität beizutragen**

**Neben den standortunabhängigen Daten sind je nach Wirtsgestein standortspezifisch unterschiedliche Untersuchungen und Daten nötig,**

**Sowohl die Brennelemente (direkte Endlagerung) als auch die Glaskokillen (nach Wiederaufarbeitung) werden in Castoren transportiert und sollen letztlich in ein Endlager verbracht werden.**

**Deutschland besitzt noch kein Endlager für Nukleare Abfälle, deshalb werden bisher alle beladenen Castoren in Zwischenlagern (zentral) oder an den Kernkraftwerksstandorten selbst zwischengelagert.**