

---

***“Was ist Atommüll?”***

**Deutschlands Atommüll - ein Überblick**

**Wolfgang Neumann**

***Atomares Erbe***

*Herausforderung für die nächste Generation*

Sommerakademie

Wolfenbüttel, 6. – 10. August 2019

## **Inhalt**

- 1. Anfall und Klassifizierung radioaktiver Abfälle**
2. Abfallarten
3. Atommüllmengen und Lagerorte
  - Bestand
  - Prognose
4. Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle
5. Endlagerrelevante Eigenschaften
6. Abtrennung und Umwandlung (P&T)
7. Zusammenfassung

## **Anfall bzw. Herkunft radioaktiver Abfälle**

### **Definition:**

**Wissenschaft:** radioaktiv ist die Eigenschaft bestimmter Atome, sich ohne äußere Einwirkung in andere Atome umzuwandeln und dabei ionisierende Strahlung auszusenden. Die Atome heißen Radionuklide.

**Atomgesetz:** Stoff ist radioaktiv, wenn er ein bestimmtes Radioaktivitätsinventar enthält (Menge an Radionukliden).  
Stoff ist im Sinne des Gesetzes nicht radioaktiv, wenn nicht zu beachten < Freigrenzen  
< Freigabewerte

## **Anfall bzw. Herkunft radioaktiver Abfälle**

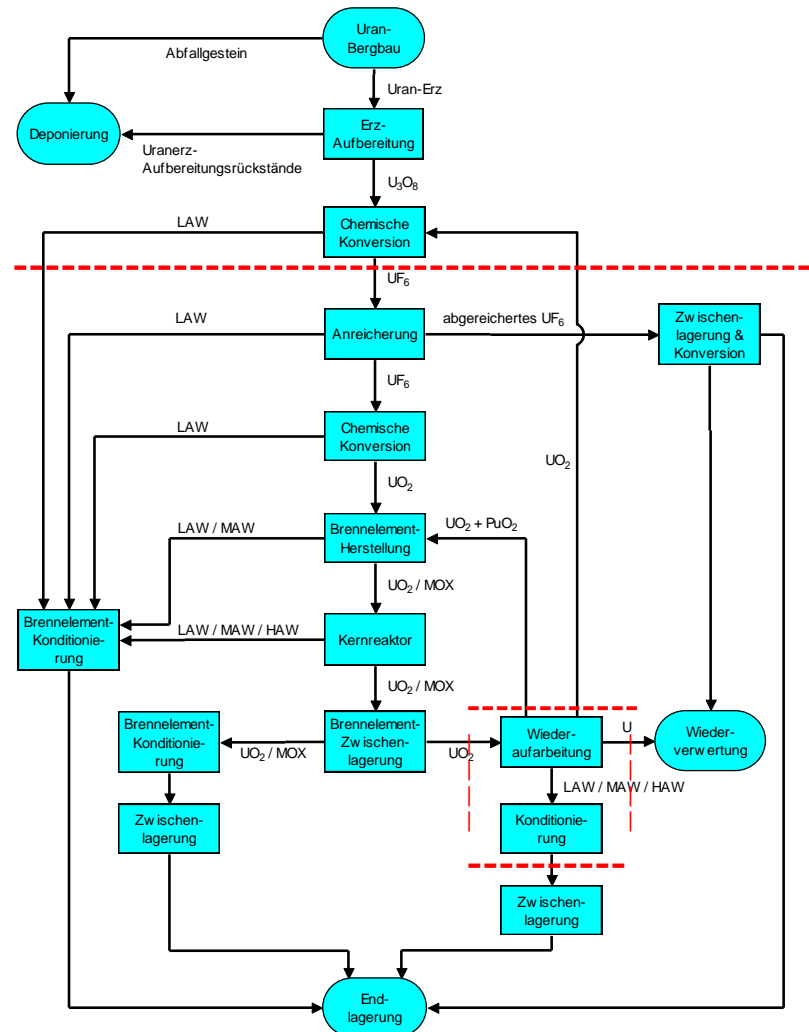
**Abfälle sind radioaktiv durch:**

- **Natürliche Radionuklide**
- **Umwandlung von Atomkernen (Reaktor)**
- **Kontamination**
- **Aktivierung**

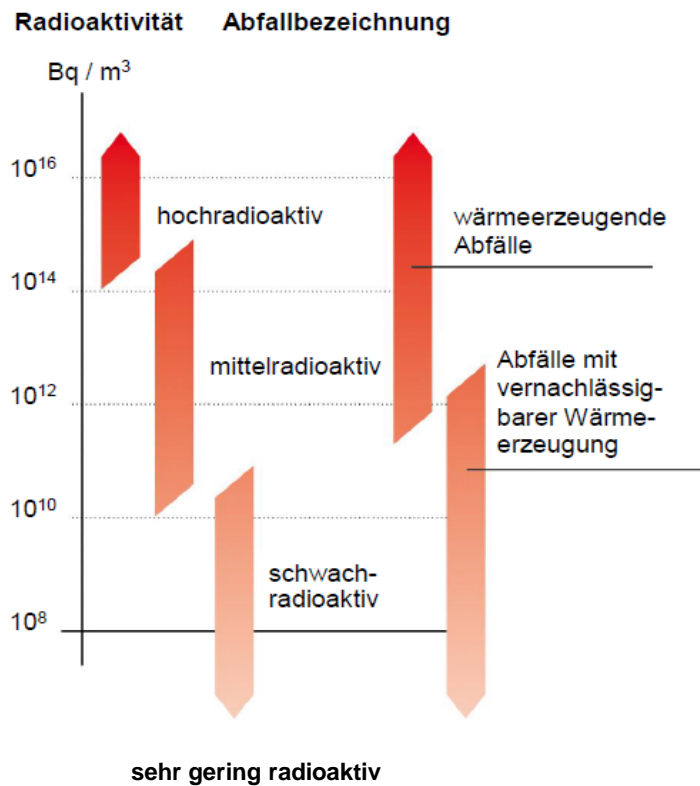
## **Anfall bzw. Herkunft radioaktiver Abfälle**

- Nutzung der Atomenergie zur Strom- und Wärmeproduktion
- Forschung/Untersuchung (Atomenergienutzung, Materialstrukturen)
- Medizin (Diagnose und Therapie)
- Industrie (u.a. Prüfstrahler, Marker)
- Abbau und Verarbeitung von Erzen, die natürliche Radionuklide enthalten
- Erdöl-/Erdgasgewinnung

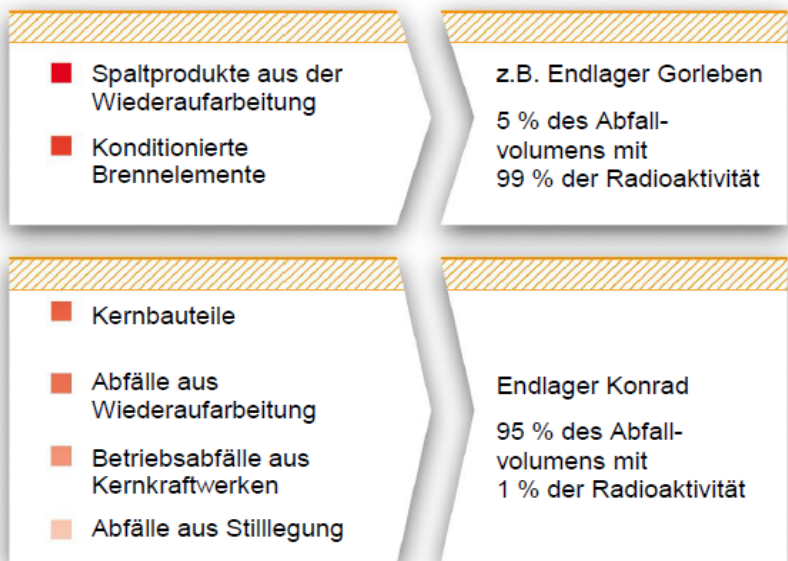
# Anfall bzw. Herkunft radioaktiver Abfälle bei der Atomenergienutzung



# Klassifizierung radioaktiver Abfälle



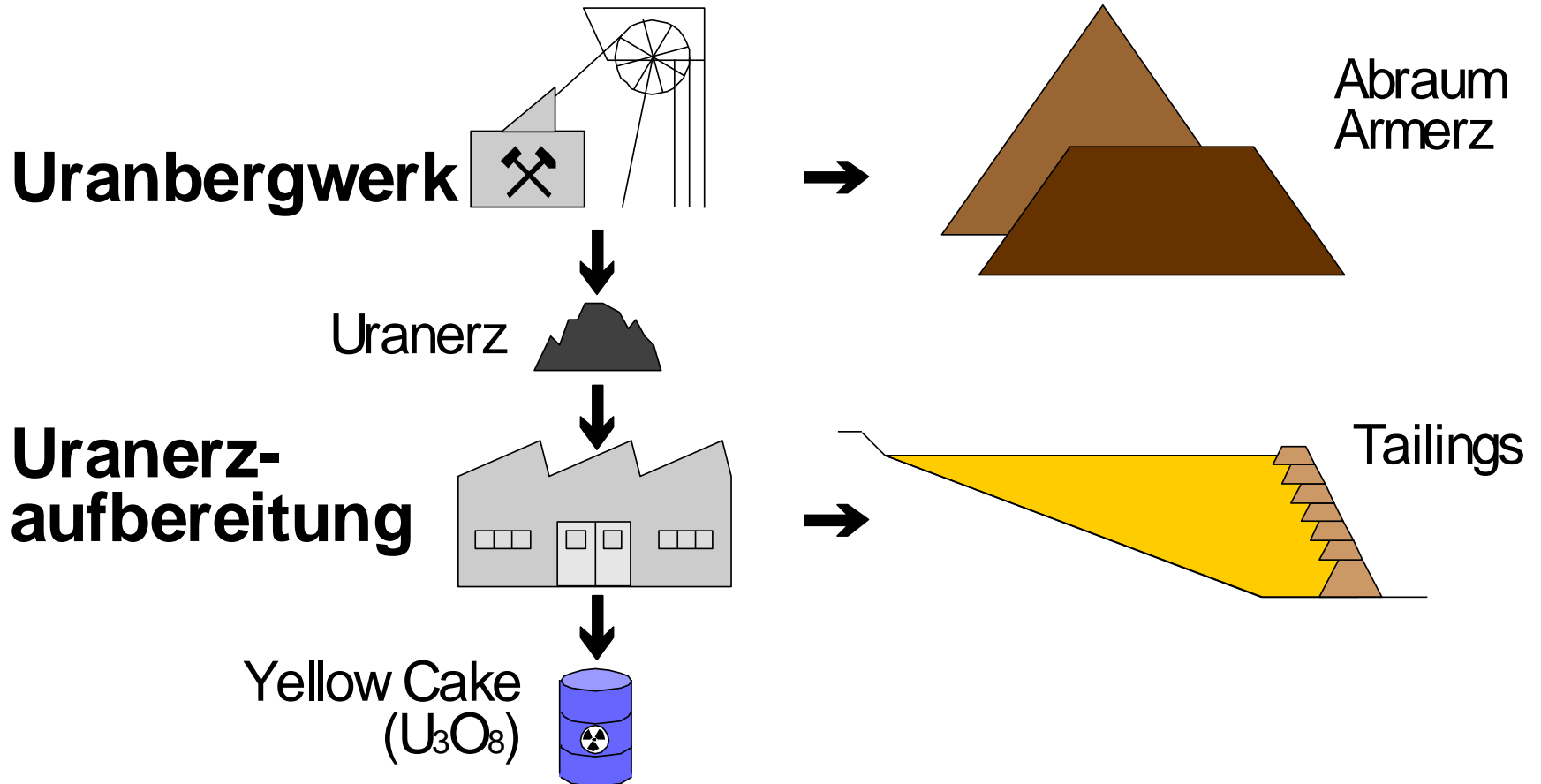
## Beispiele für Abfälle



## **Inhalt**

1. Anfall und Klassifizierung radioaktiver Abfälle
- 2. Abfallarten**
3. Atommüllmengen und Lagerorte
  - Bestand
  - Prognose
4. Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle
5. Endlagerrelevante Eigenschaften
6. Abtrennung und Umwandlung (P&T)
7. Zusammenfassung

# Die nukleare Brennstoffproduktion





Ronneburg  
Thüringen  
1990

*Atomares Erbe*  
*Herausforderung für die nächste Generation*  
Sommerakademie Wolfenbüttel, 6. – 10. August 2019



Culmitzsch, Thüringen, 1990 (M. Beleites)

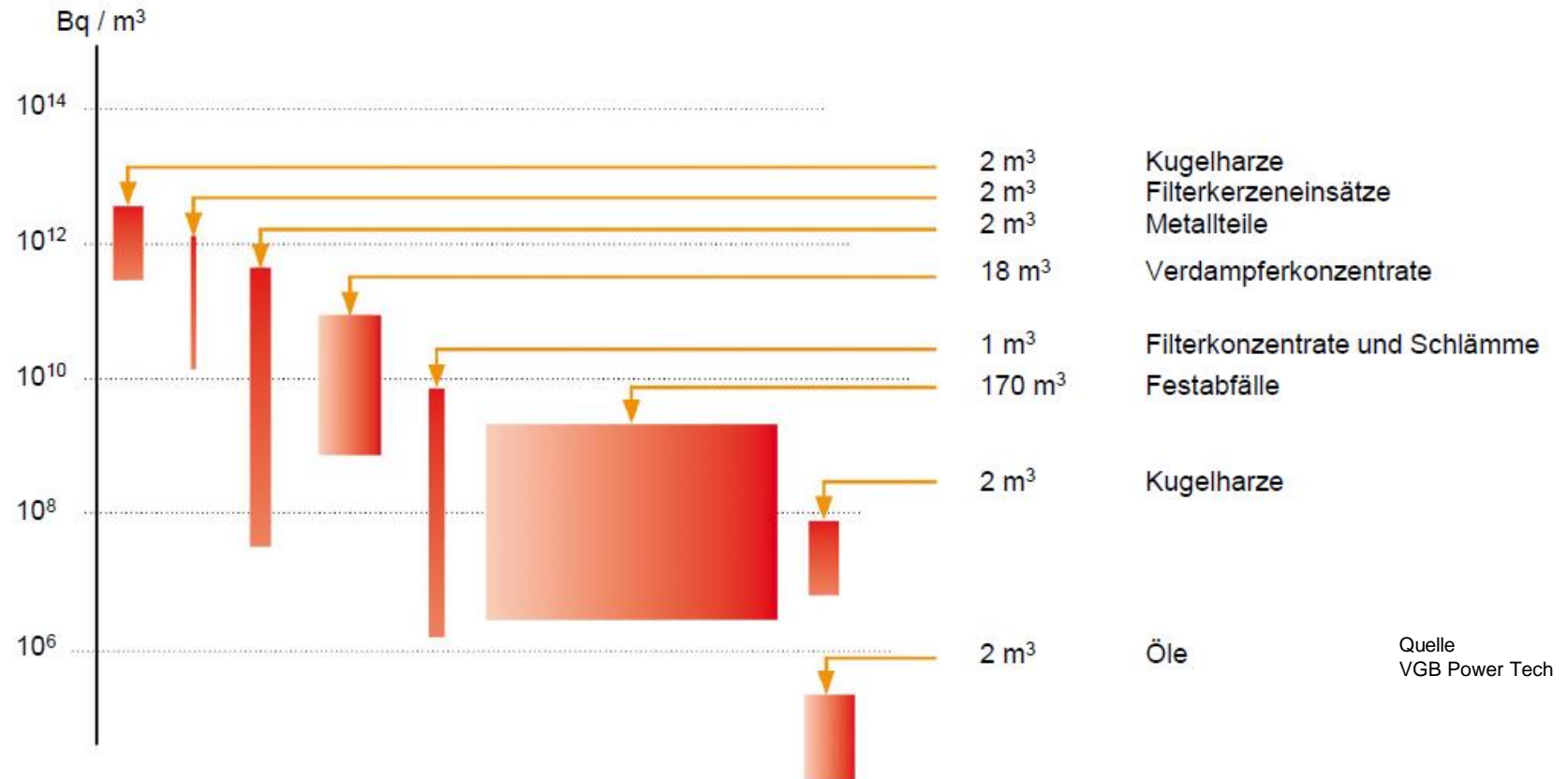
## Grobe Orientierung Jahresbedarf eines 1.300 MW<sub>e</sub>-Reaktors

Uranerzförderung	440.000 Mg		
	<u>400.000 Mg</u>	→	Halde
Erzaufbereitung	40.000 Mg		
	<u>39.600 Mg</u>	→	Schlammbecken
Yellow Cake (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	400 Mg		
	<u>180 Mg</u>	→	Abfall
Anreicherung (UF <sub>6</sub> 0,7%)	220 Mg		
	<u>187 Mg</u>	→	Lager (UF <sub>6</sub> 0,4%)
Brennelemente (UO <sub>2</sub> 3%)	33 Mg		

# Atomares Erbe

Herausforderung für die nächste Generation  
Sommerakademie Wolfenbüttel, 6. – 10. August 2019

## Radioaktivität



Quelle  
VGB Power Tech

Jährliche Betriebsabfälle (AKW mit DWR)

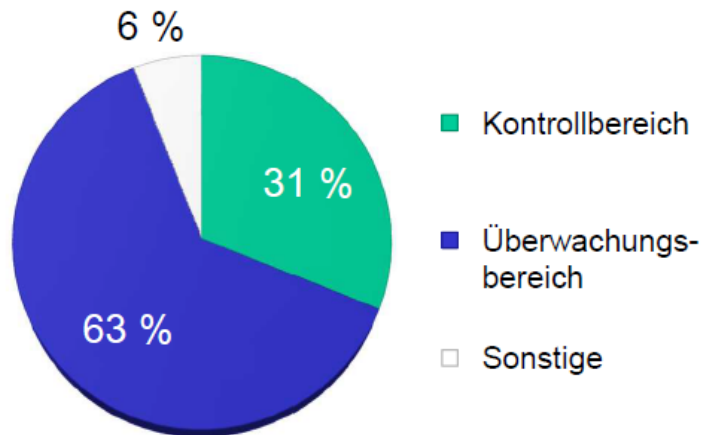


## Gesamtmasse beim Abbau eines KKW

≈ 94 % Betonstrukturen

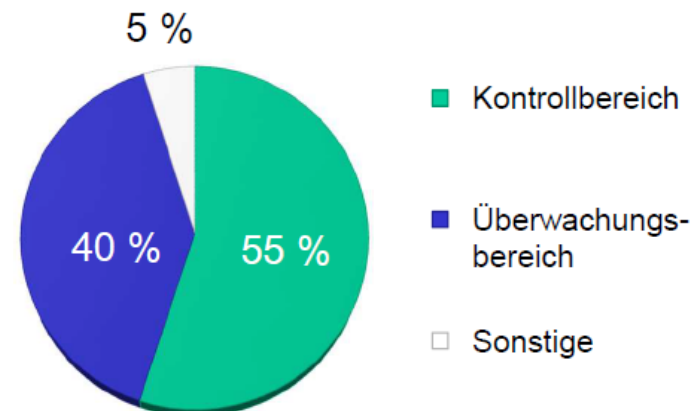
### Druckwasser-Reaktor

≈ 600.000 Mg



### Siedewasser-Reaktor

≈ 400.000 Mg

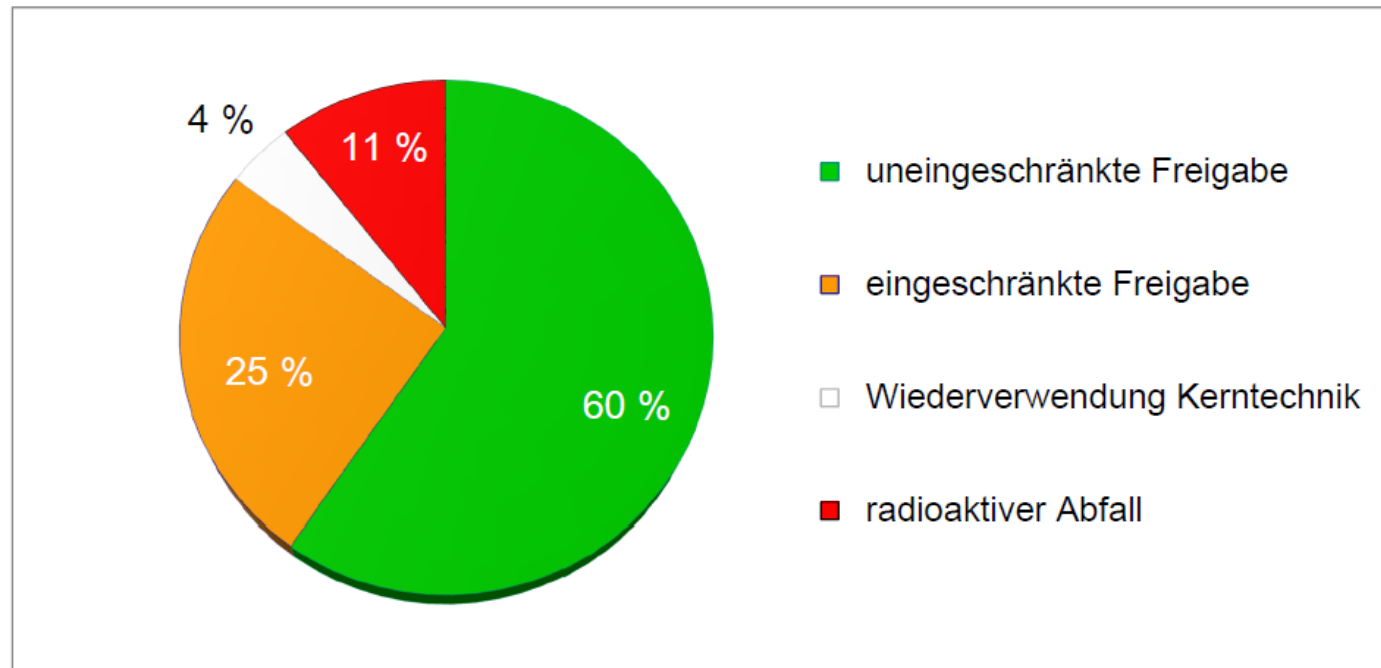




## Kontaminiertes Material

---

ca. 50.000 Mg pro KKW



# **Notwendiger Umgang mit radioaktiven Abfällen**

**Sortieren**

**Puffer- bzw. Bereitstellungslagerung**

**Konditionierung**

**Zwischenlagerung**

**Endlagerung**

**Transportieren**

**(bei diesen Schritten fallen ebenfalls radioaktive Abfälle an)**

## **Inhalt**

1. Anfall und Klassifizierung radioaktiver Abfälle
2. Abfallarten
- 3. Atommüllmengen und Lagerorte**
  - Bestand**
  - Prognose**
4. Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle
5. Endlagerrelevante Eigenschaften
6. Abtrennung und Umwandlung (P&T)
7. Zusammenfassung

## Abfallbestand in der Bundesrepublik Deutschland

Stand 31.12.2017

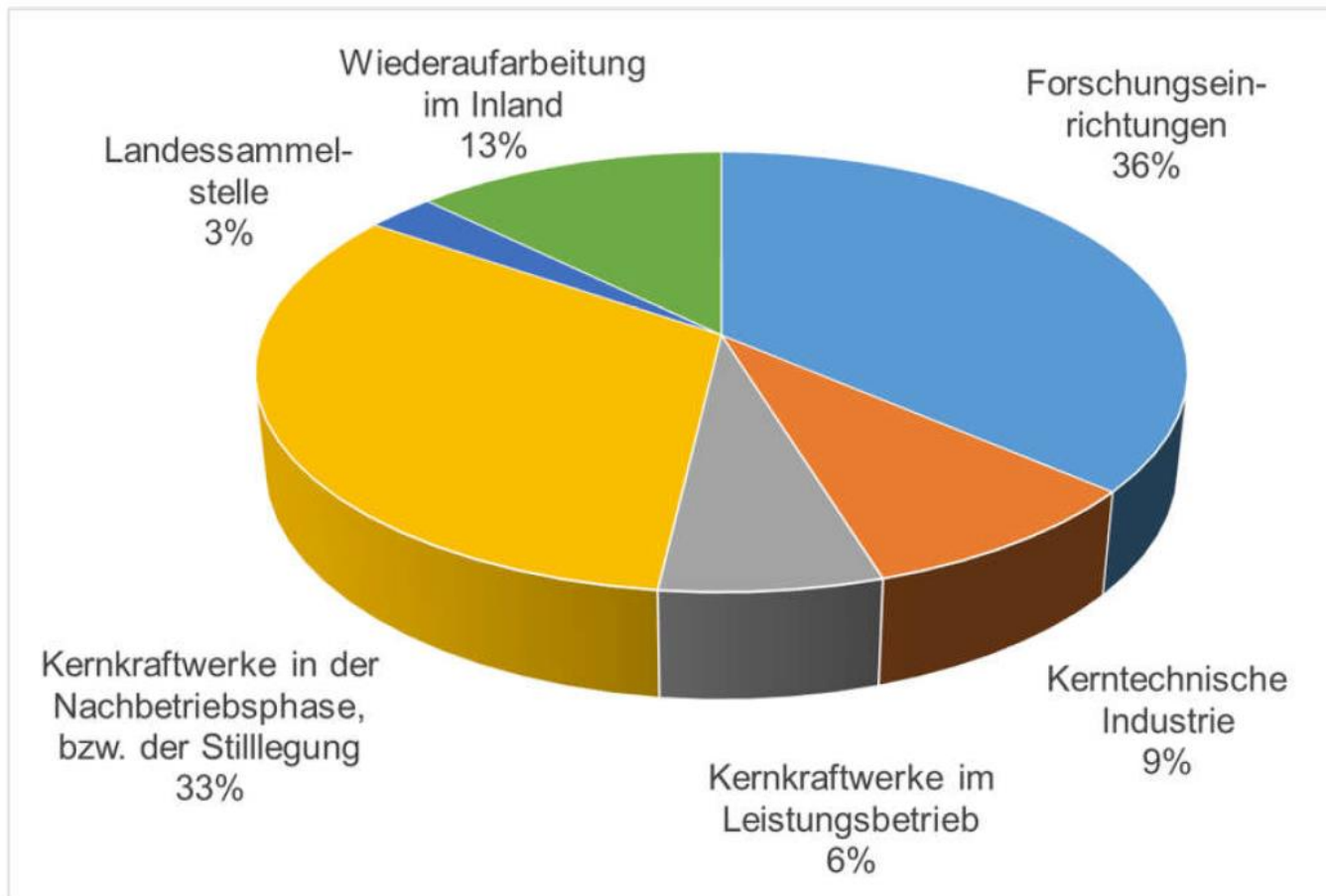
	gering Wärme entwickelnd		Wärme entwickelnd	
	konditioniert	roh oder vorkonditioniert	konditioniert	roh oder vorkonditioniert
Zwischenlager	121.980 m <sup>3</sup>	ca. 19.500 Mg	727 m <sup>3</sup>	1.254 m <sup>3</sup> 8.839 MgSM (31.228 BE)
ERAM	29.000 m <sup>3</sup>	8.260 m <sup>3</sup>	-	-
Asse	52.500 m <sup>3</sup>	-	-	-

# **Gering Wärme entwickelnde Abfälle**

**schwach und mittel radioaktiv**

## Gering Wärme entwickelnde Abfälle

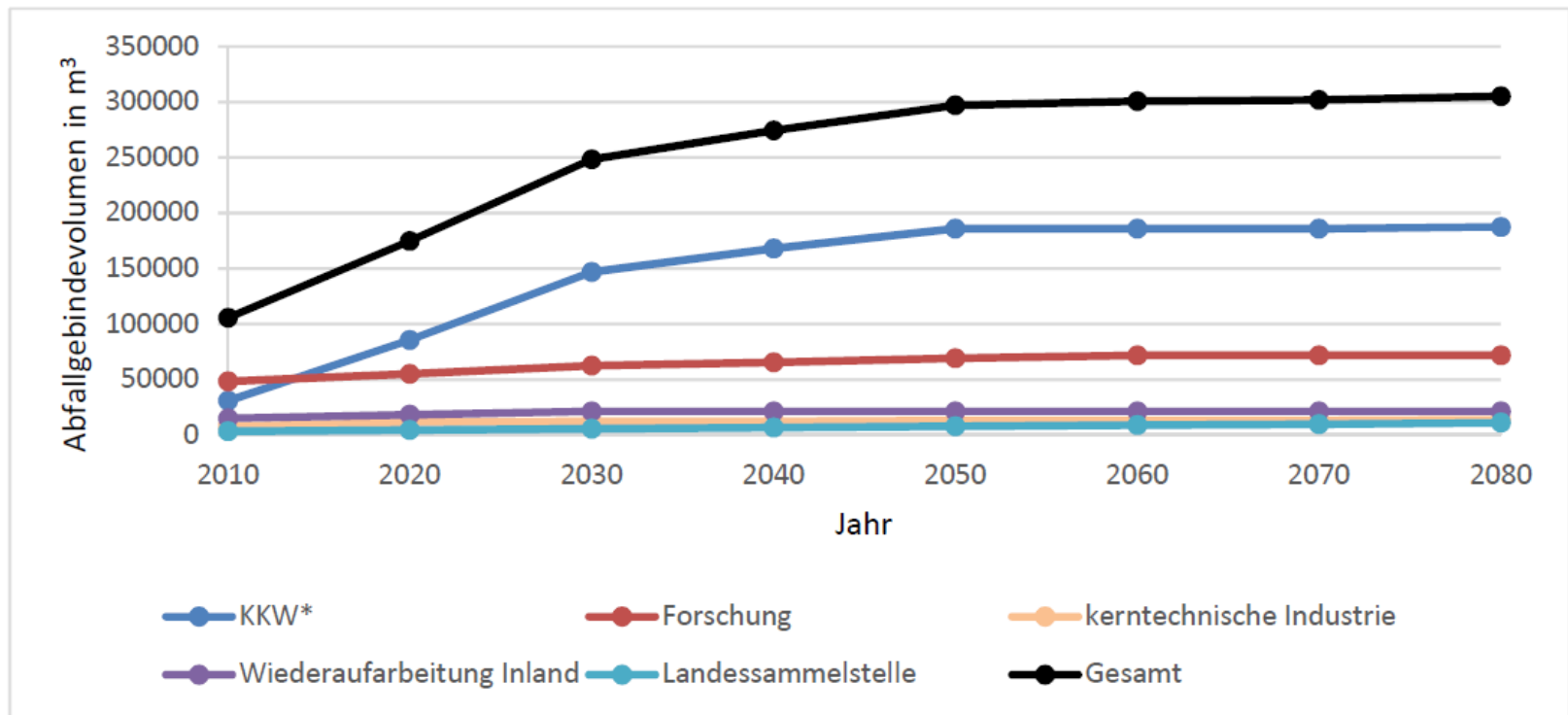
Bestand nach Abfallverursachergruppen am 31.12.2017



Quelle:  
BMUB 2018

# Abfallprognose für die Bundesrepublik Deutschland

noch endzulagernde gering Wärme entwickelnde Abfälle  
(Konrad)



## **Abfallprognose für die Bundesrepublik Deutschland** gering Wärme entwickelnde Abfälle (nicht festgelegter Verbleib)

nach BMUB 2018:

Asse	175.000 – 220.000 m <sup>3</sup>
Urananreicherung	ca. 100.000 m <sup>3</sup>
nicht Konrad-gängig (z.B. größeres Inventar C-14, Th)	keine Aussage

# Zwischenlagerung gering Wärme entwickelnder Abfälle

- Abfalllager Gorleben (ALG)
- Brennelementzwischenlager Ahaus (BZA)
- Zwischenlager Nord (ZLN)
- NCS Hanau
- GNS Duisburg
- Abfalllager Mitterteich (Bayerische AKW)
- Standortlager (AKW , Industrie + Forschungseinrichtungen)
- Landessammelstellen
- Anreicherungsanlage Gronau / Brennelementfabrik Lingen

## **Endlagerung gering Wärme entwickelnder Abfälle** (gegenwärtiger Stand)

**Endlager Konrad**                      **303.000 m<sup>3</sup>**

planfestgestellt, in Ausbau, Inbetriebnahme 2027?

**Endlager Morsleben**                **37.260 m<sup>3</sup>**

Stilllegungsverfahren, zwischengelagerte Abfälle?

~~**Schachtanlage Asse** — **52.500 m<sup>3</sup> ???**~~

Rückholungsplanung, 150.000 -220.000 m<sup>3</sup>

**Endlager ???**

Asse-Abfälle, Graphitabfälle, Thoriumabfälle, Uran<sub>abger.</sub>

**Freigabe sehr gering radioaktiver Abfälle >>1.000.000 m<sup>3</sup>**

## **“Schicksal” gering Wärme entwickelnder Abfälle**

Konrad sollte ursprünglich 1988 in Betrieb gehen.

Ein Teil der dafür vorgesehenen Abfälle wurde nach dem Anschluss der DDR in Morsleben eingelagert.

Der Rest der Abfälle muss länger als vorgesehen zwischengelagert werden.

Die Zwischenlagergenehmigungen sind meistens unbefristet

# **Wärme entwickelnde Abfälle**

hoch und mittel radioaktiv

## **Wärme entwickelnde Abfälle**

### **Bestrahlte Brennelemente (bBE)**

- Aus:
- Leistungsreaktoren
  - Prototypreaktoren
  - Forschungsreaktoren

### **Hoch/mittel radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung**

- verglaste Spaltproduktlösung (HAW-Kokillen)
- verglaste Schlämme (MAW-Kokillen)
- verpresste Strukturteile und Hüllen (MAW-Kokillen)
- Komponenten/Bauteile aus der WAK

### **Hoch/mittel radioaktive Abfälle**

- verpresste Strukturteile aus Konditionierung von bBE
- Bauteile aus Reaktorkern und Konditionierungsanlage

## **Bestrahlte Brennelemente in der Bundesrepublik Deutschland**

bis 31.12.2017 in LWR angefallen:	ca.15.500 MgSM
Verbleib im Ausland (S, H):	- 320 MgSM
<u>wiederaufgearbeitet:</u>	<u>- 6.340 MgSM</u>
bisher endzulagern:	8.840 MgSM
es fallen in LWR noch an:	ca. 1.370 MgSM
<u>sonstige Reaktoren</u>	<u>ca. 20 MgSM</u>
<b>insgesamt endzulagern:</b>	<b>ca.10.230 MgSM</b>

1 MgSM = 1 tSM = 1.000 kgSM

# Abfallprognose für die Bundesrepublik Deutschland

## Wärme entwickelnde Abfälle

Abfallherkunft	Wärme einwickelnd
Atomkraftwerke	ca. 22.900 m <sup>3</sup>
Wiederaufarbeitungsanlagen	ca. 1.615 m <sup>3</sup>
Konditionierungsanlage	ca. 3.400 m <sup>3</sup>
Forschungsreaktoren	ca. 160 m <sup>3</sup>
<b>gesamt</b>	<b>ca. 28.075 m<sup>3</sup></b>

## **Inhalt**

1. Anfall und Klassifizierung radioaktiver Abfälle
2. Abfallarten
3. Atommüllmengen und Lagerorte
  - Bestand
  - Prognose
4. **Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle**
5. Endlagerrelevante Eigenschaften
6. Abtrennung und Umwandlung (P&T)
7. Zusammenfassung

# Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und we Abfälle

<b>Transportbehälterlager Gorleben:</b>	- bBE - HAW-Kokillen
<b>Brennelementzwischenlager Ahaus:</b>	- bBE - MAW-Kokillen
<b>Zwischenlager Nord:</b>	- bBE - HAW-Kokillen
<b>Standort-Zwischenlager:</b> zusätzl. in Biblis, Brokdorf, Ohu zusätzl. in Philippsburg	- bBE - HAW-Kokillen - MAW-Kokillen

## Situation Bundesrepublik Deutschland

Alle Genehmigungen zur Zwischenlagerung sind auf 40 Jahre begrenzt.

=> z.B. TBL Gorleben 2034  
SZL Gundremmingen 2046

Endlagerstandortauswahlgesetz:

Standortfestlegung 2031, Inbetriebnahme Endlager 2050

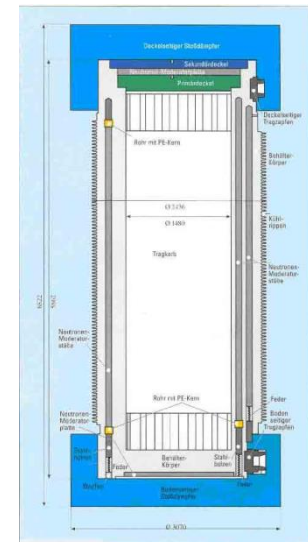
NaPro 2015: ca. 2050 Eingangslager am EL-Standort

Andere: EL-Genehmigung eher 2080

=> so oder so große Lücke

## Zwischenlagerzeitverlängerung / Normalbetrieb

- Versagen / Alterung der Behälterdeckeldichtungen
- Versagen / Alterung anderer Behälterkomponenten
- Abluftüberwachung (Beweissicherung)
- Versagen / Alterung Brennstabhüllrohre
- Alterung Brennelementstrukturteile/Kokillen
- Alterung Gebäudestrukturen
- Inventar muss bis Ablauf der Zwischenlagerung handhabbar, konditionierbar und transportierbar bleiben
- Heiße Zelle: - Reparatur Primärdeckeldichtung  
- Validierung der Nachweise  
- Periodische Sicherheitsüberprüfung alle 10 a



## **Zwischenlagerzeitverlängerung / Störfälle**

- **Sicherheitsnachweise müssen für weitere 40 Jahre erbracht werden (Berücksichtigung der Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik).**
- **Lagergebäude in Hessen, Ba-Wü und Bayern sind nicht gegen Einwirkungen von außen ausgelegt.**
- **Zukunftsorientierter Terrorschutz**
  - **Sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD)**
  - **gezielter Flugzeugabsturz (FLAB)**

## **Nachrüsten oder Neubau?**

Bei Standort-Zwischenlagern Brokdorf, Brunsbüttel, Emsland, Grohnde, Krümmel evtl. Nachrüstung möglich. Bisher wurde keine Prüfung bzgl. FLAB veranlasst.

Bei allen anderen Standort- und zentralen Zwischenlagern Nachrüstung bzgl. FLAB nicht möglich. Bisherige Konsequenz:

- Neubau Lubmin/Greifswald.
- Trotz einiger Klagen keine Aktivitäten der Behörden.

## **Motivation zur Zwischenlagerung**

- Bisher: Zwischenlagerung bis ein Endlager zur Verfügung steht.  
“längerfristige Zwischenlagerung”
- Anderer Ansatz: Zwischenlagerung als vorläufige Entsorgungsoption.  
“Langzeitzwischenlagerung”

## **Langzeit-Zwischenlagerung in Bauwerken**

### Wesentliche Aspekte:

- Gewährleistung der Einhaltung der Schutzziele durch
  - kontinuierliche Überwachung
  - Instandhaltung und ggf. Reparatur
- mehrere Sicherheitsbarrieren
- Notwendigkeit stabiler gesellschaftlicher Verhältnisse
- jederzeitige Rückholbarkeit
- vorläufige Entsorgungslösung
- Fortschritte beim Stand von Wissenschaft und Technik zum Langzeitsicherheitsnachweis und weiteren Endlageraspekten

## Langzeit-Zwischenlagerung in Bauwerken

Die sicherheitstechnischen Anforderungen sind im Prinzip die gleichen, wie bei der längerfristigen Zwischenlagerung. Allerdings sind die Zeiträume noch länger =>

- Disk. über Lagerkonzept (sicherheitstechnisch):
  - Behälterlagerung (wie bisher in D)
  - Betonblocklagerung (wie NL)
- Disk. über Lagerkonzept (örtlich):
  - zentral
  - dezentral
- Auf jeden Fall Neubau
  - mind. 2-fache Redundanz der Sicherheitsbarriere
  - Heiße Zelle
    - Instandhaltung
    - Periodische Sicherheitsüberprüfung
    - ggf. Reparatur (u.a. Behälterdichtungen)

## **Inhalt**

1. Anfall und Klassifizierung radioaktiver Abfälle
2. Abfallarten
3. Atommüllmengen und Lagerorte
  - Bestand
  - Prognose
4. Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle
5. **Endlagerrelevante Eigenschaften**
6. Abtrennung und Umwandlung (P&T)
7. Zusammenfassung

**Bisheriges Verbleibkonzept in der Bundesrepublik Deutschland ist die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen.**

**Nationales Entsorgungsprogramm der Bundesregierung:**

- **Endlager nach Standortsuchgesetz für hoch radioaktive Abfälle (bBE, HAW aus WA, sonst. HAW).**
- **Endlager Konrad (geplant) für schwach und mittelradioaktive Abfälle.**
- **Endlager Morsleben soll stillgelegt werden.**
- **Endlager ??? für Abfälle aus der Asse und der Urananreicherung sowie nicht „Konrad-gängig“.**

## **Endlagerrelevante Eigenschaften radioaktiver Abfälle**

- Radioaktivität**
- Inventar
  - Halbwertszeit
- Wärme**
- wärmeentwickelnd
  - gering wärmeentwickelnd
- Kritikalität**
- Inventar Kernbrennstoffe (z.B. U-235, Pu-239)**
- Art der ionisierenden Strahlung**
- $\alpha$
  - $\beta$
  - $\gamma$
  - n

## **Endlagerrelevante Eigenschaften radioaktiver Abfälle**

**Radiotoxizität (gesundheitsschädliche Wirkung der Strahlung)**

**Chemische Toxizität (gesundheitsschädliche Wirkung z.B. von Schwermetallen, Kohlenwasserstoffen)**

**Wasserlöslichkeit**

**Sorptionsfähigkeit**

**Gasbildung**

## **Inhalt**

1. Anfall und Klassifizierung radioaktiver Abfälle
2. Abfallarten
3. Atommüllmengen und Lagerorte
  - Bestand
  - Prognose
4. Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle
5. Endlagerrelevante Eigenschaften
- 6. Abtrennung und Umwandlung (P&T)**
7. Zusammenfassung

## **Abtrennung und Umwandlung**

**Transmutation ist in der Atomenergietechnik die Umwandlung von Atomkernen durch Neutronenbeschuss.**

**Voraussetzung für Transmutation ist Partitioning, d.h. Abtrennung verschiedener Stoffströme bzw. Radionuklidsorten.**

**Abtrennung und Umwandlung sind zwei notwendige Teile einer Technologie**

## **Abtrennung und Umwandlung - Vorteile**

Verringerung des Inventars langlebiger Radionuklidarten im radioaktiven Abfall.

⇒ Möglicherweise Reduzierung der für die Langzeitsicherheit eines Endlagers zu betrachtenden Radionuklidarten.

Verringerung des Wärmeeintrags in das Wirtsgestein.

⇒ Entlastung der umgebenden technischen und geologischen Barrieren.

Verringerung von Neutronenemittenten des Inventars.

⇒ Möglicherweise Reduzierung der Menge des hochradioaktiven Abfalls.

Weitgehende Umwandlung von Atombomben tauglichen Stoffen (Pu-239, Pu-241, Np-237, Am-241).

⇒ Proliferationsgefahr in Bezug auf das Endlager stark verringert.

## **Abtrennung und Umwandlung - benötigte Anlagen**

**Abtrennungsanlage.** Komplexe chemische Prozesse zur Trennung in Stoffströme (U, Pu, Np, Cm, weitere Aktinidenfraktionen, langlebige Spaltprodukte, weitere Spalt- und Aktivierungsprodukte).

**Target-/Brennelementfabrik.** Anlage zur Herstellung der Zielelemente mittels komplexer chemischer und physikalischer Verfahren bei hohem Strahlungsniveau.

**Kernreaktoren.** Anlagen zur Umwandlung von Atomkernen mit Neutronen unterschiedlicher Energie (Beschleuniger getriebene Reaktoren, Schnelle Brüter, Salzschnmelzen-Reaktoren, Leichtwasserreaktoren).

**Targetverarbeitungsanlage.** Trennung der umgewandelten Atome von dem übrigen Material (kommt wieder in die Abtrennungsanlage) durch komplexe chemische Prozesse.

## **Abtrennung und Umwandlung – Probleme (1)**

- Selbst bei gut funktionierender Technik ist keine vollständige Beseitigung aller langlebigen Radionuklide aus dem hochradioaktiven Abfall (Brennelemente) möglich. Chemie und Physik funktionieren nicht zu 100%.
- Neben einem gewissen Anteil der behandelbaren langlebigen Radionukliden bleiben die nicht behandelbaren langlebigen und auch alle anderen Radionuklide im Abfall.
- Die Abtrennung und Umwandlung langlebiger Radionuklide aus schwach- und mittelradioaktiven Abfällen ist ineffizient und deshalb kaum umsetzungsfähig.
- Für die existierenden hochradioaktiven, verglasten Abfälle ist keine Transmutation möglich.

## **Abtrennung und Umwandlung – Probleme (2)**

- Selbst bei gut funktionierender Technik ist keine vollständige Beseitigung aller langlebigen Radionuklide aus dem hochradioaktiven Abfall (Brennelemente) möglich. Chemie und Physik funktionieren nicht zu 100%.
- Neben einem gewissen Anteil der behandelbaren langlebigen Radionukliden bleiben die nicht behandelbaren langlebigen und auch alle anderen Radionuklide im Abfall.
- Die Abtrennung und Umwandlung langlebiger Radionuklide aus schwach- und mittelradioaktiven Abfällen ist ineffizient und deshalb kaum umsetzungsfähig.
- Für die existierenden hochradioaktiven, verglasten Abfälle ist keine Transmutation vorgesehen.

## **Abtrennung und Umwandlung – Probleme (3)**

- Die Prozesse der Abtrennung und vor allem der Umwandlung müssen vielfach durchlaufen werden. Ein einzelner Zyklus benötigt bereits mehrere Jahre.
- Der Betrieb der verschiedenen Anlagen ist mit großen Stör-/Unfallrisiken mit erheblichen Freisetzungen radioaktiver Stoffe verbunden. Im Normalbetrieb treten Strahlenbelastungen von Personal und Bevölkerung auf.
- Die Aufteilung der Stoffströme ist mit erheblichen Proliferationsrisiken verbunden.
- Die Technologie wird in den nächsten 50 Jahren nicht großtechnisch einsetzbar sein.
- Bindung von Finanzmittel im mehrstelligen Milliardenbereich.



**Atomstandort Sellafield**

## **Abtrennung und Umwandlung**

Keine Lösungsmöglichkeit für dieses Jahrhundert.

Wiedereinstieg in Atomenergienutzung.

Große Stör-/Unfallrisiken in Anlagen und bei Transporten.

Im Normalbetrieb hohe Strahlenbelastungen für Personal und Bevölkerung.

Endlager mit Langzeitsicherheit sind trotzdem erforderlich.

Langzeitsicherheitsnachweis wird kaum entlastet.

Proliferationsrisiko wird für lange Zeiträume stark erhöht.

**⇒ Für die Bundesrepublik keine sinnvolle Option**

## **Inhalt**

1. Anfall und Klassifizierung radioaktiver Abfälle
2. Abfallarten
3. Atommüllmengen und Lagerorte
  - Bestand
  - Prognose
4. Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle
5. Endlagerrelevante Eigenschaften
6. Abtrennung und Umwandlung (P&T)
7. **Zusammenfassung**

## **Zusammenfassung**

**Die Zwischenlagerung we Abfälle muss, wie bereits die von gering we Abfälle, um Jahrzehnte verlängert werden.**

**Die Sicherheitsanforderungen für die längere Lagerzeit müssen erhöht werden.**

**Es sind endzulagern:    ca. 30.000 m<sup>3</sup> we Abfälle  
                                 > 600.000 m<sup>3</sup> gering we Abfälle**

**Verbleib relevanter Mengen gering we Abfälle unklar.**

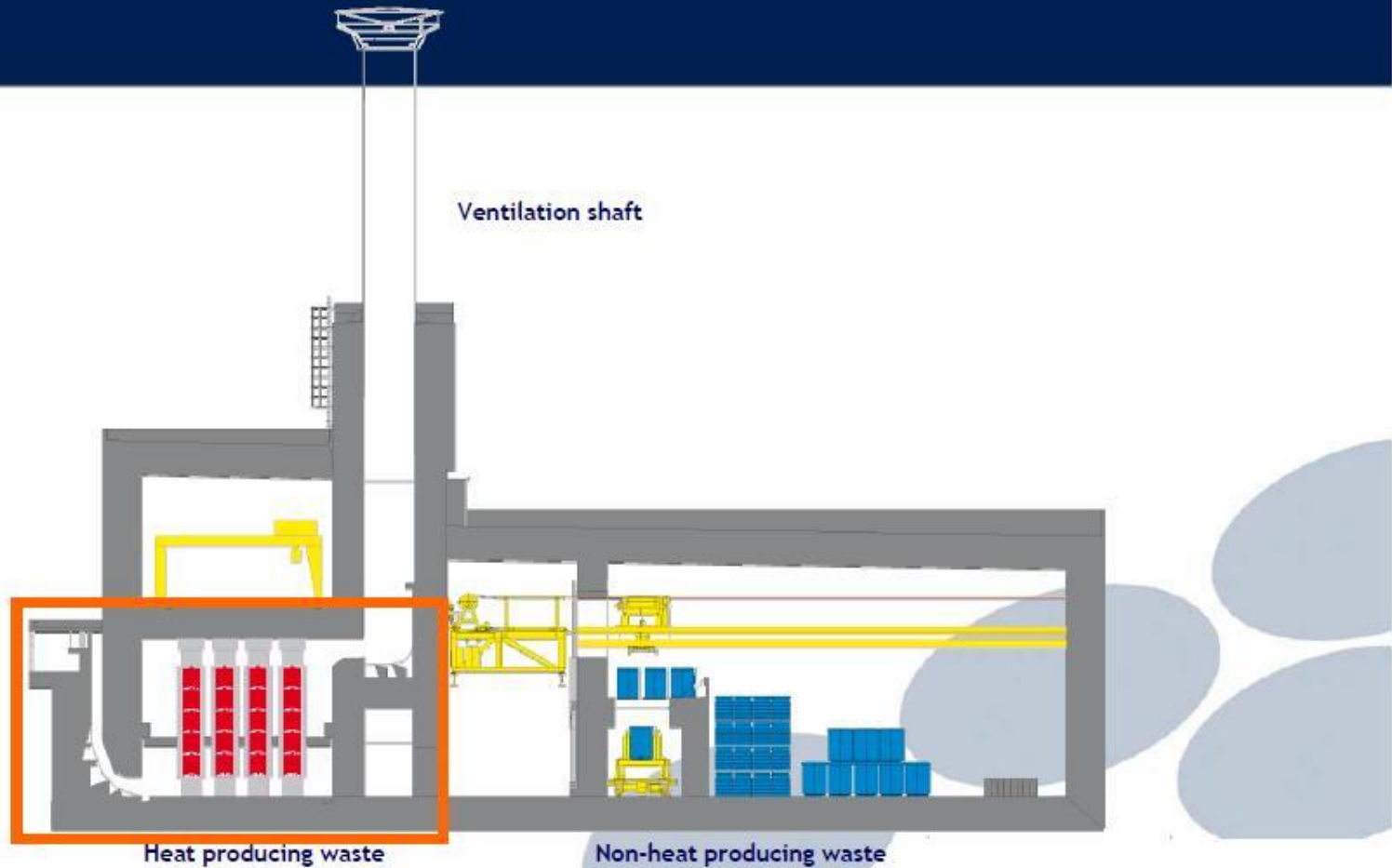
**Transmutation ist keine Lösung für das Atommüllproblem**

*Atomares Erbe*

*Herausforderung für die nächste Generation*  
Sommerakademie Wolfenbüttel, 6. – 10. August 2019

---

# HABOG cross-section



# Atomares Erbe

Herausforderung für die nächste Generation  
Sommerakademie Wolfenbüttel, 6. – 10. August 2019

