

# Strahlende Abfälle

Entsorgungsexpertinnen und Entsorgungsexperten  
wählen in hochradioaktivem Müll

INFOKARTEN



## Müll ist nicht gleich Müll

### Radioaktive Abfälle erfordern eine differenzierte Handhabung

Je größer die Radioaktivität von Abfällen und je größer die Konzentration, desto mehr Wärme entwickeln sie. Wichtig für die Lagerung ist außerdem ihre Langlebigkeit. Aus stofflicher Zusammensetzung, Strahlungsart, Halbwertszeit und Aktivität des radioaktiven Abfalls lassen sich Schlüsse über Umgang wie Verpackung, Abschirmungsnotwendigkeit usw. ziehen.

Im genehmigten Endlager Konrad ist eine Bedingung, dass im Bergwerk keine wesentlichen Temperaturerhöhungen auftreten dürfen. Die Temperatur im umgebenden Wirtsgestein darf sich nur um 3° C erhöhen. Aus dieser Vorgabe ergibt sich die zulässige Wärmeleistung des atomaren Abfalls, der eingelagert werden darf.

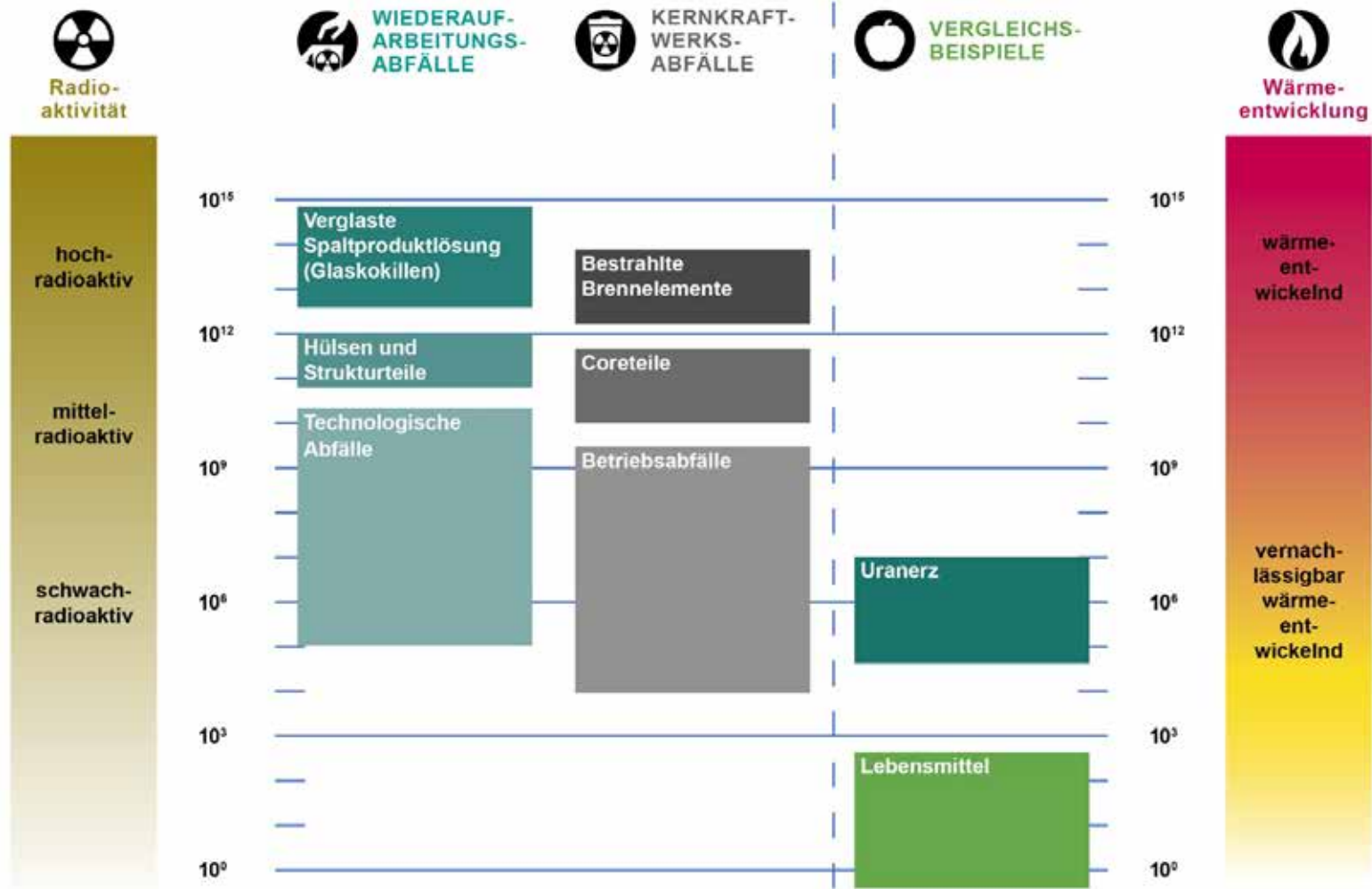


Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

# Arten radioaktiver Abfälle nach ihrer Aktivität im Vergleich:

## Klassen und Eigenschaften radioaktiver Abfälle

Aktivität und Wärmeentwicklung im Überblick



Radioaktivität in Becquerel pro Kilogramm oder Becquerel pro Liter (Bq/kg oder Bq/L)

# Umgang mit atomaren Abfällen



Quelle | Bild: Entsorgungsanlagen in Deutschland © Öko-Institut e.V.

## Wärmeentwickelnde Abfälle

werden in Castor- oder vergleichbare Behälter verpackt und in Zwischenlagern am Kraftwerksstandort oder zentralen Zwischenlagern (Gorleben, Ahaus, Jülich, Greifswald) gelagert.

## Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

werden meistens konditioniert, d. h. verpresst, getrocknet, verbrannt, zementiert ... mit dem Ziel, ein chemisch stabiles Abfallprodukt und ein geringeres Volumen zu erreichen. Sie werden anschließend ebenfalls verpackt und zwischenlagert.

Derzeit werden alle in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle früher oder später in Zwischenlagern gelagert.

## Was gibt's und wohin soll's?

Deutschland klassifiziert Abfälle in solche, die Wärme entwickeln und solche, die dies nicht tun. Für letztere soll Schacht Konrad als Endlager ausgebaut werden, für die ersten gibt es das Standortauswahlgesetz – also alle Fragen geklärt?

Nicht nur bei den Wärme entwickelnden Abfällen gibt es noch viele ungeklärte Fragen. Ein Experte beschreibt folgende Probleme: „Es gibt mehr schwach- und mittelradioaktive Abfälle, als in Konrad gelagert werden dürfen. Sie haben zwar nicht das Problem der Wärmeentwicklung, aber andere. Außerdem gibt es Stoffe, die als Wertstoffe deklariert sind, faktisch aber endgelagert werden müssen“

**Viele Fragen sind noch offen. Unbestritten ist:  
Wir brauchen ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland!**

Die Europäische Union hatte alle Mitglieds-länder aufgefordert, bis Mitte 2015 zu erklären, welche radioaktiven Abfälle sie haben und wie sie mit ihnen verfahren werden. Deutschland hat sein „Nationales Entsorgungsprogramm“ im August 2015 veröffentlicht.



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.



# Spielregeln für Endlager

Die Abfälle müssen bestimmten Anforderungen, so genannten Endlagerbedingungen, genügen.

Diese Anforderungen dienen dazu

- die Schutzprinzipien für heutige und zukünftige Generationen einzuhalten,
- nur Abfälle zu erhalten, die zu transportieren, zu stapeln und zu heben u.s.w. sind,
- den Arbeitsschutz des Personals zu gewährleisten,
- im Störfall (Bsp. Brand oder Behälterabsturz) die radioaktive Belastung zu begrenzen.



Quelle | Bild: Morsleben © Öko-Institut e.V.

## Beispiel Konrad

Grundlage waren Sicherheits- und Störfalluntersuchungen, der Langzeitsicherheitsnachweis und technische Randbedingungen. Herausgekommen sind neben der Begrenzung der Wärmeentwicklung, die Begrenzung bestimmter Radionuklide, Anforderungen an die Festigkeit und die chemische Stabilität des Abfalls, Anforderungen an Abfallverpackungen und einiges mehr.

Für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle werden dann eigene Anforderungen gelten. Aber auch da ergeben sich die Randbedingungen aus Sicherheitsnachweisen, Strahlenschutz und Arbeitsschutz, Handhabbarkeit, Störfällen und Dokumentationsfragen.

# Entstehung von Abfällen in Kernkraftwerken

## Abfälle aus Kernkraftwerken:

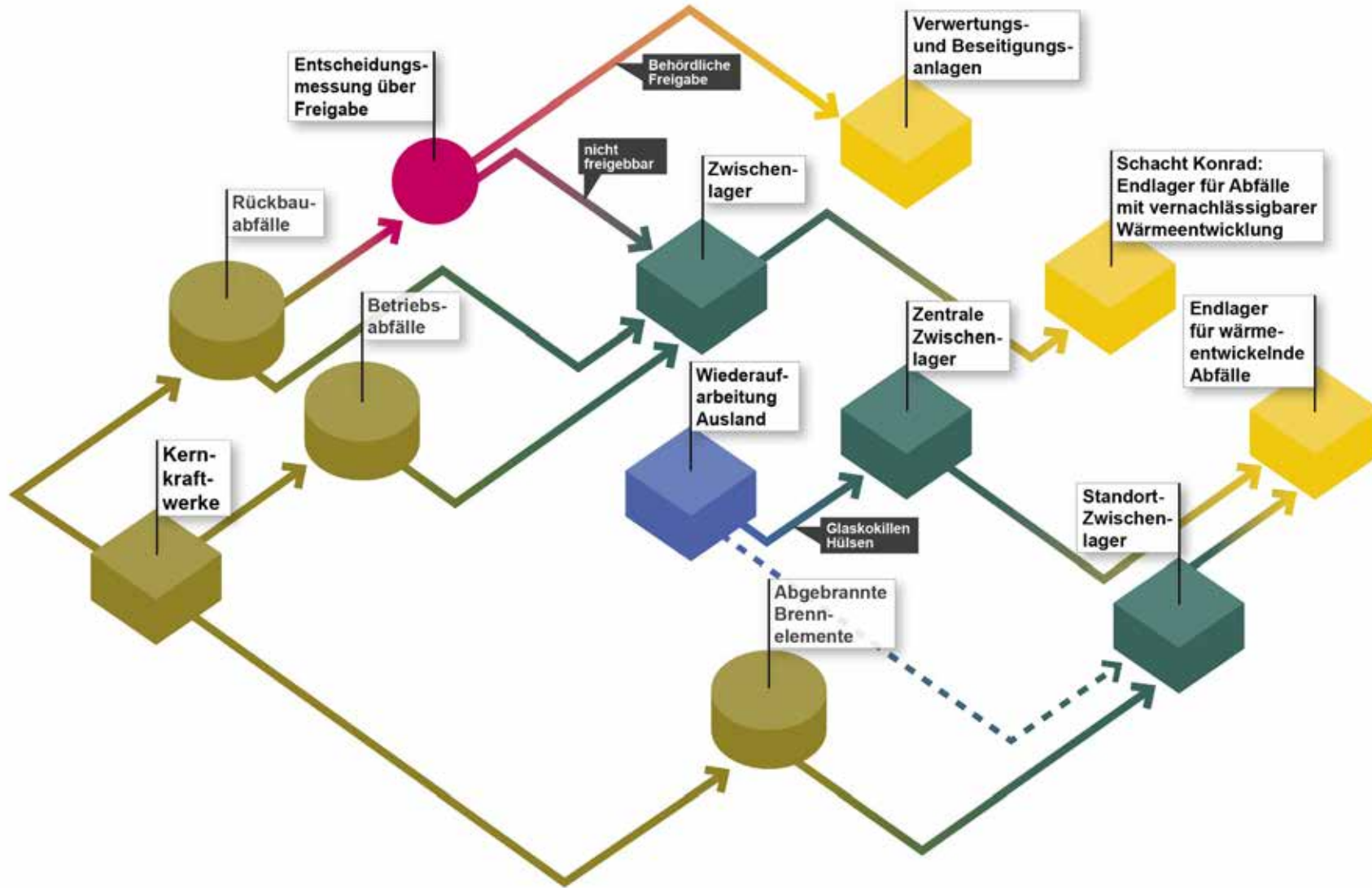
- Bei der Kernspaltung entstehen Spaltprodukte und Aktiniden. Diese verbleiben überwiegend im Brennelement.
- Neutronen aus der Kernspaltung aktivieren die Umgebungsmaterialien. Atome des umgebenden Wassers, Betons, Stahls, usw. lagern Neutronen an und werden zu radioaktiven Isotopen. Stahleinbauten, Reaktordruckbehälter, usw. werden zu Abfall.
- Beim Umgang mit diesen Materialien entstehen außerdem Abfälle: bei der Reinigung des Kühlwassers, beim Austausch von Bauteilen, bei Reparatur und Wartung (Werkzeug, Wischlappen).
- Beim Rückbau entstehen Rückbauabfälle, die das ganze radioaktive Spektrum umfassen.

Radioaktive Abfälle entstehen überwiegend in Kernkraftwerken, aber auch in der Forschung, der Medizin und der Industrie.



Quelle | Bild: Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich © Öko-Institut e.V.

# Vom Kernkraftwerk ins Endlager: die Wege des radioaktiven Abfalls heute





## Entstehung hochradioaktiver Abfälle in der Wiederaufarbeitung

Die Wiederaufarbeitung trennt das im Brennelement entstandene Plutonium und das noch vorhandene Uran für eine weitere Nutzung ab. Dabei entstehen folgende radioaktive Abfälle:

- Der aufgelöste Rest des Brennstoffs als hochradioaktive Spaltproduktlösung, die verglast und in Kokillen verpackt wird.
- Die Brennstabhülsen, Tragteile des Brennelements etc. werden als Hülsen- und Strukturteile verpresst und verpackt.
- Bei Betrieb und später dem Rückbau der Wiederaufarbeitungsanlage entstehen Betriebs- und Rückbauabfälle (z.B. verglaste Konzentrate aus der Wasseraufbereitung).

*„Der Einsatz des aus der Wiederaufarbeitung zurückgewonnenen Plutoniums und Urans ist technisch schwierig und wirtschaftlich unattraktiv.“*

(Neles/Pistner 2012, S. 169)

Die Betreiber mehrerer deutscher Kernkraftwerke lieferten ihre abgebrannten Brennelemente nach Frankreich (La Hague) oder England (Sellafield). Seit 2005 ist der Transport von abgebrannten Brennelementen ins Ausland gesetzlich verboten (Atomgesetz von 2002). Deutschland ist vertraglich verpflichtet, seine eigenen Abfälle zurückzunehmen. Die Rückführung erfolgt über die so genannten „Castor-Transporte“.

## Wie viele abgebrannte Brennelemente sind zu entsorgen?

Bis Ende 2014 sind in Deutschland etwa 54.000 abgebrannte Brennelemente angefallen. Darin enthalten sind rund 15.050 Mg Uran (U) und Plutonium (Pu). Bis zur endgültigen Stilllegung aller Atomkraftwerke im Jahr 2022 werden weitere noch 2.150 Mg in abgebrannten Brennelementen dazukommen. Insgesamt werden also ca. 17.200 Mg abgebrannte Brennelemente entstehen, von denen 10.500 Mg direkt als Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle zu entsorgen sind. Rd. 6.700 Mg sind in die Wiederaufarbeitung gegangen.

(Nationales Entsorgungsprogramm 2015)

**Mit der Maßeinheit Tonne oder Mg Schwermetall (= U und Pu) wird die Menge abgebrannter Brennelemente gemessen. Mg ist die offizielle ISO Bezeichnung.**



Quelle | Bild: Modell eines Druckwasserreaktor Brennelementes © Öko-Institut e.V.

### Beispiel Kernkraftwerk Biblis B:

von 1976 bis 2011 sind 1.824 abgebrannte Brennelemente mit 976 Mg Uran und Plutonium angefallen.

## Wie viele wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle gibt es hierzulande insgesamt? Nun mal konkret ...

Neben den abgebrannten Brennelementen sind die Wärme entwickelnden Abfälle aus den Wiederaufarbeitungsanlagen zu entsorgen.

### **Aus der Wiederaufarbeitung fallen insgesamt folgende wärmeentwickelnde Abfälle an:**

- 670 m<sup>3</sup> verglaste Spaltproduktlösung,
- 25 m<sup>3</sup> Verglasungsprodukte mittlerer Radioaktivität,
- 740 m<sup>3</sup> verpresste Hülsen- und Strukturteile.

### **Wie groß ist die gesamte Menge strahlender und wärmeentwickelnder Abfälle aus der Stromerzeugung, die wir in einem Endlager entsorgen müssen?**

Aktuelle Schätzung (Stand 2014) bis zum Ende der Stromerzeugung aus Kernkraft: ca. 27.000 m<sup>3</sup>.

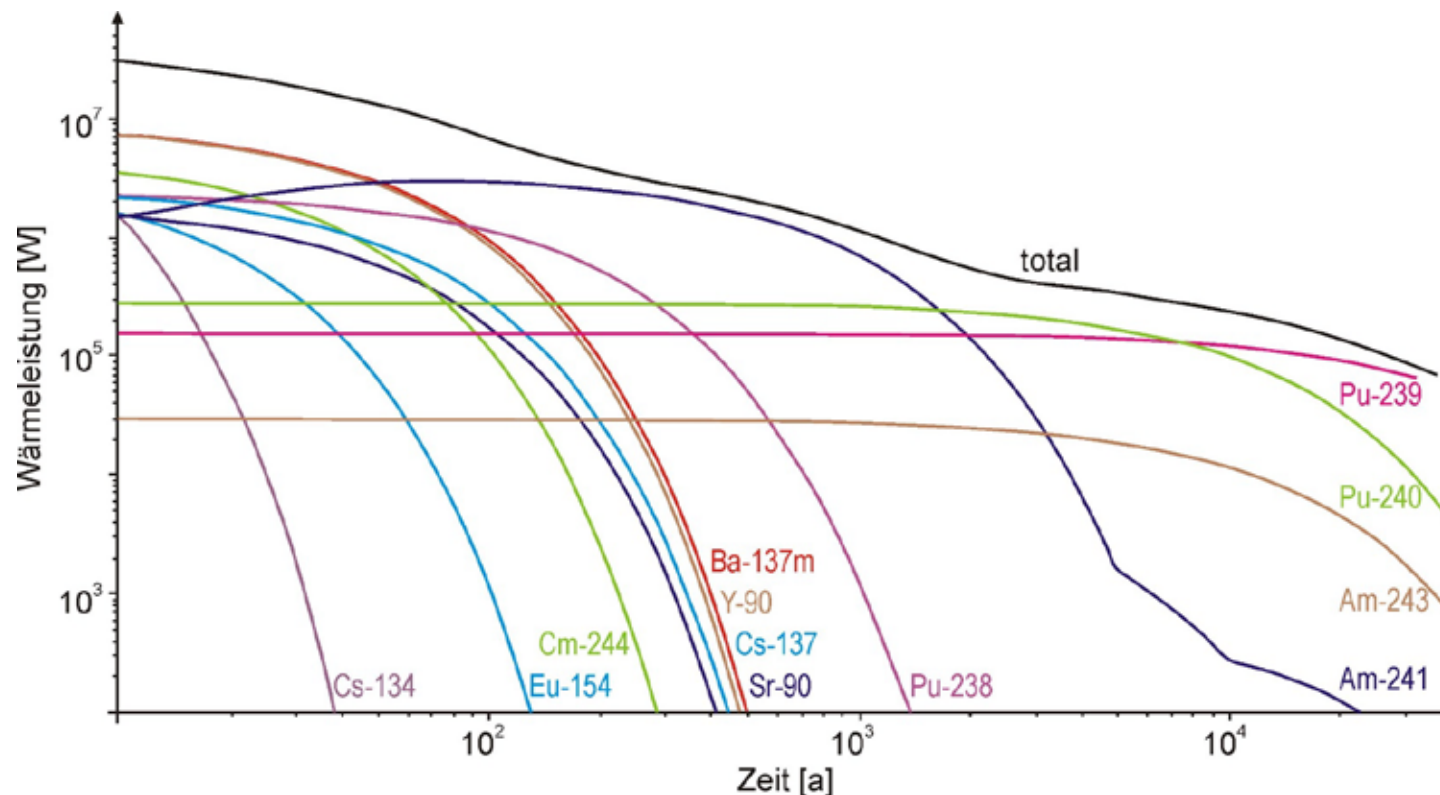


Quelle | Bild: Verglaste Abfälle in Glaskokille © GNS



## Was bedeutet eigentlich wärmeentwickelnd?

Die Kerne radioaktiver Substanzen wandeln sich unter Abgabe von Strahlung und Wärme um. Dies geschieht in einer für jeden Stoff festgelegten Zeit. In der Abbildung seht ihr die Wärmeleistung über die Zeit für die wichtigsten Radionuklide des Abfalls, einer Mischung aus direkt endgelagerten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen.



Zum Verständnis dieser Grafik ist ein Periodensystem von Vorteil! Die einzelnen Verläufe zeigen Elemente, bzw. die Isotope bestimmter Elemente, deren durch radioaktiven Zerfall erzeugte Wärme sich mit der Zeit ändert. Die Skalierung ist logarithmisch!

Seht Euch die Grafik genau an: Welche Wärmeleistung hat das Abfallgemisch nach 100, welche nach 1000 Jahren? Vergleicht mit der Wärmeleistung eines Wasserkochers (der hat ca. 2000 W)! Wir lagern die ersten 100 Jahre ca. 5000 angeschaltete Wasserkocher, nach 1000 Jahren immer noch 500 Wasserkocher ein.

## Ist Zwischenlagerung sinnvoll?

Die Zwischenlagerung ist in Deutschland als befristete Lösung angelegt. Auch hier gilt: sicherer Einschluss der Abfälle, Schutz der Menschen und der Umwelt vor Radioaktivität. Diese Aufgabe übernimmt im Wesentlichen der Behälter, der ständig überwacht wird. Alle Zwischenlager wurden für einen befristeten Zeitraum von max. 40 Jahren genehmigt, damit sie nicht schleichend zu Endlagerstandorten werden können – das ist eine große Sorge der Standortgemeinden!

### Wie lange kann zwischengelagert werden?

Über 20 – 30 Jahre ist die oberirdische Zwischenlagerung sinnvoll, da in dieser Zeit die Wärmeleistung der Abfälle nachlässt und so der Wärmeeintrag in das Endlager reduziert wird. Das Mindesthaltbarkeitsdatum für einen Behälter beträgt 40 Jahre. Halten wird er sicherlich einige Jahrzehnte länger. Doch irgendwann werden Schäden auftreten. Keiner weiß, wie es dann im Inneren des Behälters aussehen wird. Der Behälter muss immer noch transportiert werden können. Das Know How darf nicht vergessen werden, z.B. wenn etwas repariert werden soll. Und wenn der Zeitraum immer länger wird: wer bezahlt das?

Was passiert, wenn es Krieg gibt? Naturkatastrophen? Klimawandel?  
Die Zwischenlagerung ist keine Langzeitoption.



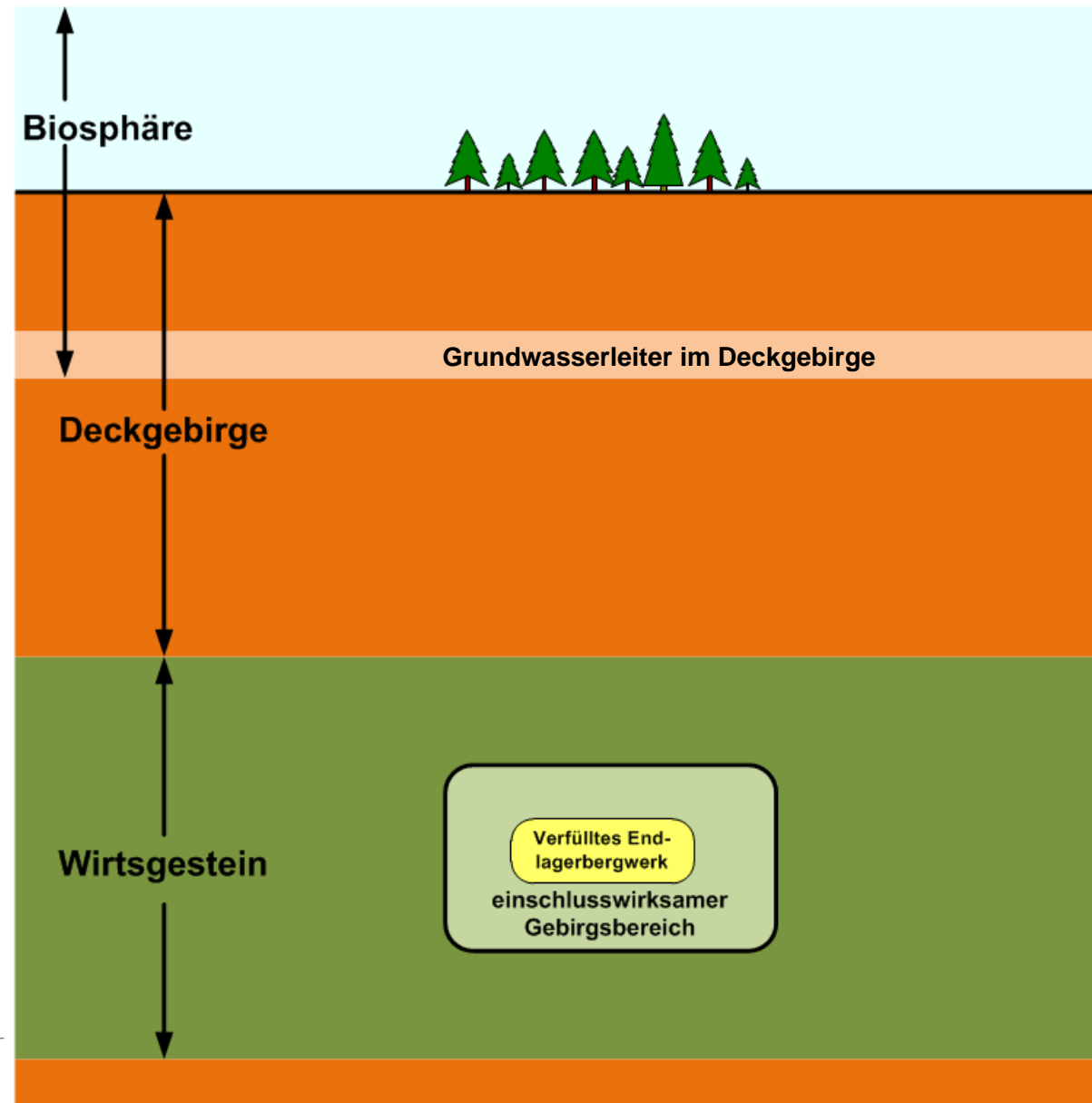
Quelle | Bild: Zwischenlager Gorleben © GNS

## Gründe für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Schichten

Alle und insbesondere die hochradioaktiven Abfälle müssen über einen sehr langen Zeitraum von der belebten Umwelt ferngehalten werden. Lediglich ein Endlager in tiefen geologischen Schichten

- ermöglicht langfristig die Isolierung der radioaktiven Abfälle,
- ist mit vertretbarem Aufwand zeitnah realisierbar,
- ist ethisch vertretbar (Risikominimierung, Verursacherprinzip, Generationengerechtigkeit).

Andere Entsorgungsalternativen wurden in der Vergangenheit geprüft, ihre Realisierung ist nicht absehbar.



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.



# Ein Hindernis, welches Räume trennt oder abgrenzt, ist eine Barriere

## Schutz vor Strahlung bieten Barrieren

Die Radionuklide, die im Brennelement entstanden sind, werden durch mehrere Barrieren eingeschlossen. Das sind die Brennstoffmatrix, das Hüllrohr und nach Verpackung der Behälter. Die Brennstoffmatrix bindet feste Stoffe ein, das Hüllrohr ist gasdicht und der Behälter bietet als wichtigste Barriere Schutz vor Strahlung und Zerstörung des Brennelements.

Bei der Wiederaufarbeitung werden allerdings die Barrieren Matrix und Hüllrohr entfernt. Entsprechend sind neue Barrieren erforderlich. Die Spaltproduktlösung wird verglast und in die Kokille verfüllt. Die Kokillen werden in Behälter eingestellt (z.B. Castor). Der Behälter bietet wiederum den Schutz vor Strahlung und Zerstörung.

Von diesen Barrieren profitiert auch die Zwischenlagerung. Das Zwischenlagergebäude selbst bietet auch noch einen gewissen Schutz, z.B. Abschirmung oder Witterungsschutz. Für die Endlagerung wird gegebenenfalls umgepackt. Je nach Behälterkonzept müssen Brennelemente zerlegt oder auch zerschnitten werden (Brennelemente können 5 m lang sein).

Das Konzept ist aber noch offen. Sicher ist, dass auch dann Barrieren benötigt werden, um Mensch und Umwelt zu schützen. In der Einlagerungsphase wird das ein Behälter sein. Auf lange Sicht stellt das Gestein des Endlagers die Barriere dar.

# Ich bin eine Glaskokille

## Was bin ich?

Verglaste Spaltprodukte und Aktiniden. Genauer: hochradioaktiver Flüssigabfall, vermischt mit Borosilikatglas, gefüllt in Behälter aus Edelstahl, nach dem Abkühlen mit einem Edelstahldeckel verschweißt.

## Was ist in mir?

Nicht verwertbarer Abfall aus der Kernspaltung aus ca. 1,3 t abgebranntem Kernbrennstoff.

## Wo komme ich her?

Verglasungsanlagen bei den Wiederaufarbeitungsanlagen.

## Meine Maße?

Ich bin schlank und zylinderförmig! Ich habe einen Durchmesser von 43 Zentimetern und eine Höhe von 1,34 Metern und kann ca. 400 Kilogramm (150 Liter) Glasprodukt aufnehmen. Das entspricht der Menge an Spaltprodukten aus drei bis vier wiederaufgearbeiteten Druckwasserreaktor-Brennelementen.

## Was macht mich so wichtig?

Sowohl das Glas als auch die Stahlmantelung haben eine Barrierewirkung.

## Fass mich nicht an!

Ich strahle und bin heiß! Ich bin wegen meiner radioaktiven Strahlung nur abgeschirmt oder ferngesteuert handhabbar.



Quelle | Bild: Verglaste Abfälle in Glaskokille © GNS

# Ich bin ein Castorbehälter

## Was bin ich?

Ich bin ein Transport- und Lagerbehälter für hochradioaktive Abfälle.

## Meine Kleidung ist das Beste an mir!

Ein ca. 40 Zentimeter dicker Mantel aus Gusseisen umgibt das hochradioaktive Material. So genannte „Moderatorstäbe“ schirmen gegen Neutronen ab. So wird der gesetzliche Grenzwert für die Strahlenbelastung an der Behälteroberfläche unterschritten.

## Was ist in mir?

Glaskokillen (auf dem Bild sind vier zu sehen) oder abgebrannte Brennelemente

## Wo komme ich her?

Ich komme aus den Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich und England sowie direkt aus den Kernkraftwerken in Deutschland.

## Fass mich nicht an! Ich strahle!

Im Inneren des Castorbehälters herrschen Temperaturen von mehreren Hundert Grad Celsius, an der Oberfläche bis zu 80 Grad. Würde jemand auf die Idee kommen, den Castorbehälter zu öffnen, wäre er durch die Brennelemente einer so hohen direkten Strahlung ausgesetzt, dass durch verbrennungsähnliche Schäden schließlich der Tod eintreten würde.

## Wie alt kann ich werden?

Eine Mindesthaltbarkeit von 40 Jahren ist für die Castorbehälter garantiert. Danach ist eine erneute Prüfung und Genehmigung erforderlich.



Quelle | Bild: Castorbehälter im Schnitt © GNS



## Endlagerbehälter – nochmal ein neues Kleid?

In den 1980er Jahren wurden verschiedene Behälterkonzepte für die Endlagerung entwickelt. Ein Beispiel ist das Umpacken in den kleineren Polluxbehälter. Die Castorbehälter waren damals für die Bergbautechnik zu schwer. Heute müssen die alten Konzepte weiterentwickelt oder ganz neue Konzepte erarbeitet werden.

Mit dem Standortauswahlgesetz ergeben sich wichtige Anforderungen an den Abfallbehälter. So soll der Abfall während der Betriebszeit des Endlagers, also etwa 100 Jahre, rückholbar und weitere 500 Jahre bergbar gelagert werden. Der Behälter muss über diesen Zeitraum stabil und dicht bleiben, damit er gegebenenfalls das Herausholen und Transportieren übersteht. Bei der Behälterentwicklung müssen also hunderte Jahre radioaktive Strahlung, Wärmeentwicklung, Druck der darüber liegenden Gesteinsschichten sowie chemische und physikalische Wechselwirkungen mit der Umgebung des Behälters berücksichtigt werden.



Quelle | Bild: PKA Gorleben © GNS

## Transporte von hochradioaktiven Abfällen

Die Akzeptanz solcher Transporte ist gering und die Sorge vor Strahlenbelastung hoch. Es könnten beim Auf- und Umladen oder bei der Fahrt Unfälle passieren. Um die Behälter gab es einige Skandale, bei denen heraus kam, dass sie aufgrund von Verschmutzungen mehr strahlten, als sie dürfen. Je mehr Transporte durchgeführt werden, desto höher ist das Risiko von Unfällen.

Transporte von abgebrannten Brennelementen aus kommerziellen Kernkraftwerken finden nicht mehr statt. Transporte zur Wiederaufarbeitung wurden 2005 verboten. Stattdessen wurden die Zwischenlager an den Kraftwerkstandorten errichtet. Was wir noch transportieren sind Abfälle aus abgebrannten Brennelementen deutscher Kernkraftwerke, die bereits in die Wiederaufarbeitung nach Frankreich und Großbritannien geliefert wurden. Diese müssen wir zurück nehmen.

Wenn ein Endlager in Betrieb geht, werden Transporte nochmal erforderlich. Und zwar so lange bis der ganze Abfall im Endlager verschwunden ist.

Wie groß die Panik vor Transporten ist, könnt ihr häufig in der Presse finden. „Angst vor den Castor-Transporten“ und „Große Gefahr für Anwohner“ titelte die WAZ anlässlich der Durchfahrt eines Castortransports zum Zwischenlager Ahaus 2012.

## Kann man das nicht doch noch gebrauchen?

Viele hoffen, dass uns irgendetwas einfällt, wozu wir diese Abfälle gebrauchen können. Leider ist uns in den letzten 60 Jahren nichts Umsetzbares eingefallen. Und 60 Jahre sind für technische Entwicklungen eine lange Zeit, denkt an die Entwicklung des Autos oder der Computer!

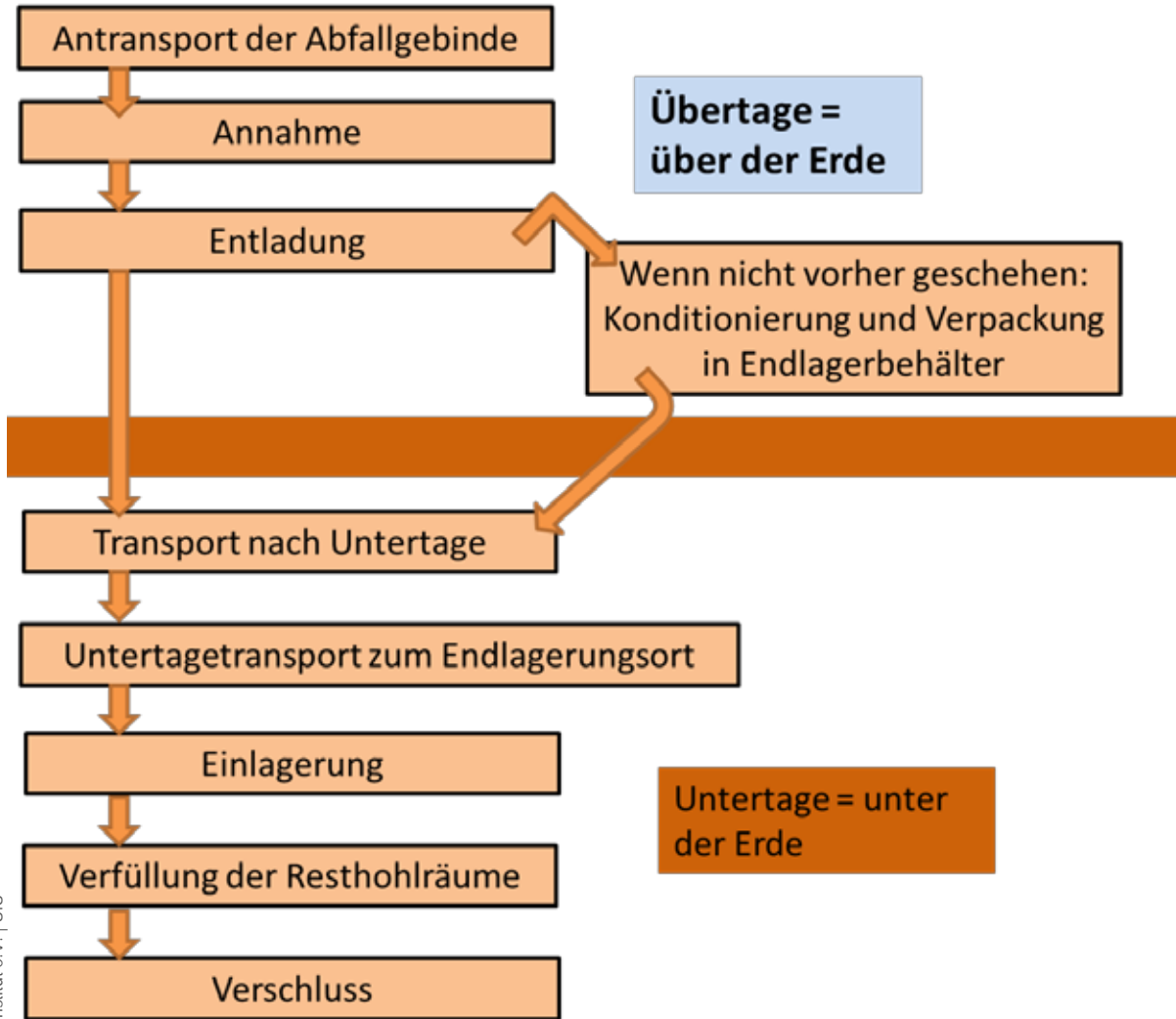
Noch brauchen wir ca. 100 Jahre, bis wir das Endlager gefunden, ausreichend untersucht, ausgebaut und befüllt haben. In dieser Zeit wird auch weiter geforscht und die Forschung anderer Länder beobachtet.

Wenn uns bis dahin immer noch nichts eingefallen ist, wird's wahrscheinlich auch nichts mehr.



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

## Und was passiert alles, bis der strahlende Abfall sicher unten gelagert wird?



Quelle | Bild: Zwischenlager Gorleben © GNS