

# **Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen - internationaler Stand und Perspektiven**

H. Geckeis, K. Gompper, B. Kienzler, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Nukleare Entsorgung

## **Einleitung**

Seit vielen Jahren wird in Deutschland sehr kontrovers über die Nutzung der Kernenergie sowie die Endlagerung radioaktiver Abfälle diskutiert. In allen Ländern, die Kernenergie nutzen, stellt der Nachweis der Langzeitsicherheit für die Endlagerung hochradioaktiver, wärmeproduzierender Abfälle gewaltige Herausforderungen dar an Wissenschaft und Technik, aber auch an die Gesellschaft, die beteiligten Genehmigungsbehörden und die Politik. Die hohe Radiotoxizität der hochradioaktiven Abfälle und die langen Halbwertszeiten darin enthaltener Radionuklide führen vielfach zum Eindruck, dass eine sichere Entsorgung nicht möglich ist. Derzeit erfährt dieses Thema erneute Aktualität. Im Frühjahr 2011 wurde von der Bundesregierung der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie in Deutschland bis zum Jahr 2022 als Reaktion auf die Reaktorhavarie im japanischen Fukushima beschlossen. Damit scheint die Frage einer weiteren Kernenergienutzung in Deutschland entschieden. Offen bleibt dagegen die Suche nach einer Entsorgungsoption für die vorhandenen hochradioaktiven Abfälle bzw. nach einem geeigneten Endlagerstandort. Vermehrt werden Rufe nach bewachter Langzeitzwischenlagerung an der Erdoberfläche bzw. oberflächennah oder nach einer Endlagerung mit der Möglichkeit, die Abfälle gegebenenfalls wieder rückholen zu können, laut. Alternativen Entsorgungskonzepten wird oftmals eine größere gesellschaftliche Akzeptanz zugesprochen und sie werden als technisch einfacher machbar und sicherer eingeschätzt als dies bei den derzeit diskutierten geologischen Endlagerprojekten der Fall ist. Im folgenden Text werden Entsorgungskonzepte im Licht der derzeitigen Abfallsituation und der Entsorgungsprojekte in Deutschland und weltweit diskutiert. Dabei liegt der Fokus auf den hochradioaktiven Abfällen, die wegen ihres hohen Radiotoxizitätsinventars besondere Aufmerksamkeit erfordern.

## **Abfälle und Abfallmengen**

Bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe werden nicht verbrauchtes Uran und Plutonium abgetrennt, um sie wieder in sogenannten Mischoxid-Brennelementen zur Stromerzeugung einzusetzen. Dabei fallen unter anderem flüssige hochradioaktive Abfälle an, die neben den Spaltprodukten noch geringe Anteile an Plutonium und Uran sowie die minoren Actiniden Neptunium, Americium und Curium enthalten. Diese Abfälle werden in Tanks gelagert und müssen wegen der beim Zerfall der Radionuklide frei werdenden Wärme und unlöslicher Bestandteile ständig gekühlt und durchmischt werden. Für die sichere Zwischen- und Endlagerung werden diese Abfälle in einem speziellen Hochtemperaturprozess in ein stabiles Glasprodukt (HAW-Glas) überführt und in sogenannte Kokillen gefüllt.

## Deutschland

Nachdem 1989 entschieden wurde, in Deutschland keine eigene industrielle Wiederaufarbeitungsanlage zu errichten, schlossen die Kernkraftwerksbetreiber mit den Wiederaufarbeitungsanlagen La Hague in Frankreich und Sellafield in Großbritannien Verträge über die Wiederaufarbeitung von rund 6670 Tonnen Schwermetall (tSM) in Form von abgebrannten Kernbrennstoffen [1]. Bestandteil der Verträge war die Rückführung der verglasten hochradioaktiven Abfälle nach Deutschland.

Im Jahr 2005 wurde die Wiederaufarbeitung in Deutschland gesetzlich verboten. Dies führte dazu, dass abgebrannte Kernbrennstoffe, die wegen ihres Gehaltes an wiederverwendbarem Uran und Plutonium bislang nicht als Abfälle betrachtet wurden, nun in Deutschland als hochradioaktive Abfälle endgelagert werden müssen. Bis Ende 2010 waren in Deutschland aus dem Betrieb der Leistungsreaktoren rund 13.470 tSM als abgebrannter Kernbrennstoff angefallen von denen sich unter Berücksichtigung des zur Wiederaufarbeitung ins Ausland transportierten Anteils (s.o.) rund 6800 tSM in den Zwischenlagern befanden. Mit der Novellierung des Atomgesetzes im August 2011 als Reaktion auf die Ereignisse in Fukushima blieben die sieben ältesten Reaktoren einschließlich des Kernkraftwerks Krümmel endgültig vom Netz. Aus dem Restbetrieb der verbleibenden neun Kernkraftwerke bzw. deren Stilllegung werden noch etwa weitere 4300 Tonnen abgebrannter Kernbrennstoff erwartet, so dass rund 11.100 tSM endgelagert werden müssen [1].

*Tabelle. I: Prognose des Gesamtanfalls endzulagernder wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland [1].*

Wärmeentwickelnde Abfälle	Menge/Gebinde	Volumen Abfallgebände (m³)
<b>aus der Wiederaufarbeitung</b>		
HAW-Glas	3.719 Kokillen	ca. 670
MAW-Glas	600 Kokillen	ca. 110
Kompaktierte Abfälle	4.104 Kokillen	ca. 740
<b>Brennelemente (direkte Endlagerung)</b>		
aus Leistungsreaktoren	11.133 tSM (in Pollux-Behälter)	21.800
aus PKA/IKA*	2.600 Mosaik II Behälter	3.400
aus THTR/AVR**	457 CASTOR- THTR-AVR-Behälter	1.970
aus Forschungsreaktoren	65 CASTOR MTR 2- Behälter	160
<b>Sonstige</b>		
WAK Karlsruhe u.a.	ca. 900 200-Liter- Fässer	1.800
<b>Gesamtsumme</b>		<b>29.030</b>

\* Pilot-Konditionierungsanlage/Industrie-Konditionierungsanlage

\*\* Thorium-Hochtemperaturreaktor Hamm/Uentrop / Atomversuchsreaktor Jülich

Sowohl HAW-Glas als auch abgebrannter Kernbrennstoff werden im Hinblick auf die Endlagerung wegen ihres hohen Aktivitätsinventars und der damit verbundenen Zerfallswärme als wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle eingestuft. Zu dieser Gruppe werden weitere Abfallarten gezählt, darunter Kokillen mit kompaktierten Abfällen und mittelaktivem Glasprodukt aus der Wiederaufarbeitung (MAW-Glas), sowie Brennelemente aus dem Betrieb der Hochtemperaturreaktoren. Die bis zum Ende der Kernenergienutzung prognostizierten Mengen wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland sind in Tabelle I aufgeführt. Bis zum Jahr 2040 werden insgesamt ca. 280.000 m<sup>3</sup> schwach- und mittelaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung erwartet. Sie werden in dem genehmigten Endlager Konrad endgelagert [1].

### *Weltweit*

Aus dem Betrieb von Kernkraftwerken im Rahmen der friedlichen Nutzung der Kernenergie fielen bis zum Jahr 2010 weltweit rund 340.000 tSM in Form von abgebranntem Kernbrennstoff an. Bezogen auf die Zahl der betriebenen Kernkraftwerke, 2010 waren es weltweit 443 mit einer Gesamtleistung von rund 376 GWe [2], kommen jährlich rund 11.500 tSM dazu. Die Kapazität der weltweit kommerziell betriebenen Wiederaufarbeitungsanlagen liegt bei insgesamt etwa 5.550 tSM pro Jahr. Gegen Ende der 80er Jahre wurde in Deutschland und einigen anderen Ländern unter dem Eindruck der Reaktorunfälle in Harrisburg und Chernobyl sowie wachsender öffentlicher Proteste gegen die Nutzung der Kernenergie von der Wiederaufbereitungstechnologie Abstand genommen und auch der abgebrannte Kernbrennstoff als Abfall betrachtet. Ausnahmen sind derzeit Frankreich, Japan, Großbritannien und Russland, wo weiterhin Plutonium und Uran rezykliert und daraus neuer Mischoxidbrennstoff hergestellt wird. Nur etwa ein Drittel der weltweit anfallenden Mengen an abgebranntem Kernbrennstoff wurden daher bislang wiederaufgearbeitet. Eine Abschätzung für 2020 geht von insgesamt rund 445.000 tSM abgebrannten Kernbrennstoffen aus, wovon etwa 115.000 tSM wiederaufgearbeitet wurden<sup>1</sup> und rund 330.000 tSM sich in Zwischenlagern befinden [3].

## **Das Prinzip der tiefeologischen Endlagerung**

Seit Beginn der Nutzung der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung wurde über Entsorgungsmöglichkeiten der dabei entstehenden Abfälle nachgedacht. Von vielen Konzepten wie der Entsorgung im Weltall, im Meer, im polaren Eis etc. wurde mittlerweile im Wesentlichen aus Sicherheitsüberlegungen heraus Abstand genommen (siehe auch [4]). Hochradioaktive Abfallarten werden entsprechend den Vorgaben des Deutschen Atomgesetzes in Castorbehältern in zentralen (Gorleben, Ahaus, Lubmin) und dezentralen Zwischenlagern an Kernkraftwerksstandorten aufbewahrt. Zwischenlager sind nicht als endgültiger Entsorgungsweg vorgesehen, sondern wurden für einen befristeten Zeitraum von zunächst 40 Jahren genehmigt. In anderen Ländern wird ähnlich verfahren. Zur endgültigen Entsorgung radioaktiver Abfälle wird von vielen internationalen Organisationen, u.a. der IAEA [5], der OECD/NEA [6], der ICRP [9] und kürzlich auch in einer Richtlinie der Europäischen Kommission [7], die Einrichtung speziell konzipierter

---

<sup>1</sup> (Die Wiederaufarbeitung von ca. 8 t Magnox- oder 2 t LWR-Brennstoff führt zu etwa 1 Kokille mit HAW-Glas (400 kg) 1)

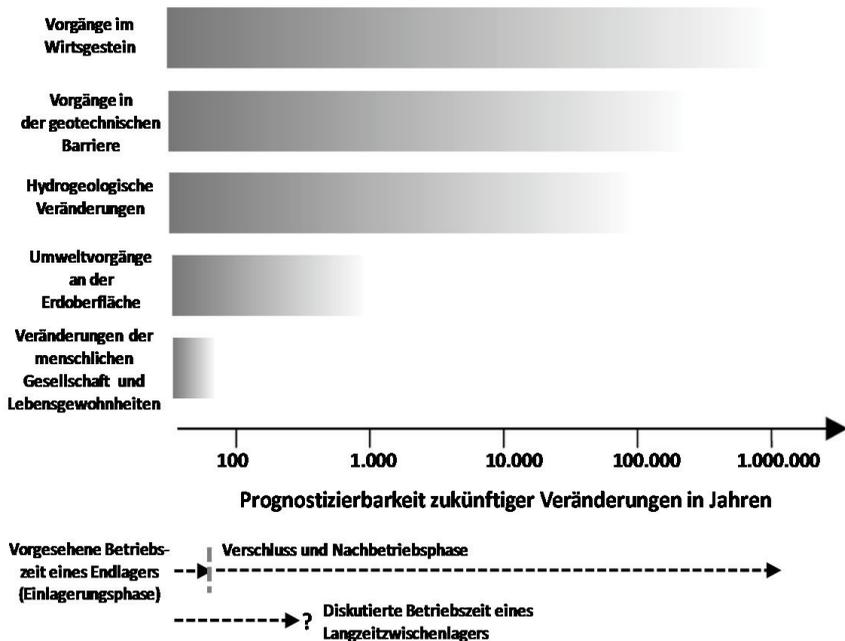
Endlager empfohlen. Dies können für schwach- und mittelaktive Abfälle oberflächennahe Einrichtungen sein. Für hoch radioaktive Abfälle (*High Level Waste - HLW*) besteht weltweit in Wissenschaft und Technik Einigkeit darüber, dass die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen die sicherste und ökologisch tragfähigste Option darstellt (Zitat aus [7]). Dadurch soll bestmöglicher Schutz von Mensch und Umwelt vor den radiotoxischen Bestandteilen dieser Abfälle durch die Minimierung einer Exposition erreicht werden. Als radiologisches Schutzziel schlägt die ICRP eine Beschränkung der durch ein Endlager verursachten Dosis für die Bevölkerung über alle Expositionspfade von 0,3 mSv/a vor, der BMU legt für ein Endlager in Deutschland in seinen Sicherheitsanforderungen [8] eine Beschränkung auf 10  $\mu$ Sv/a fest. Dies soll durch das Prinzip des „Konzentrierens und Einschließens (isolation and containment) [9]“ des Abfalls in einem Endlagersystem mit gestaffelten Barrieren erreicht werden. Als ein herausragender Vorteil der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen wird der Aspekt der „passiven Sicherheit“ nach Verschluss des Endlagers gesehen. Dieses Konzept ermöglicht den Nachweis eines Höchstmaßes an Sicherheit für Mensch und Umwelt, ohne dass aktive Maßnahmen wie Überwachung und Sicherung des Lagers erforderlich werden.

Ähnliche Prinzipien gelten übrigens auch für die Entsorgung chemotoxischer Abfälle. Gefährliche Abfälle im Sinne der Deponieverordnung [10] und der TA Abfall [11] sind z.B. schwermetall- (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, As, Hg etc.), cyanid- und dioxinhaltige Stoffe. Die chemische Toxizität solcher Abfälle ist beträchtlich und nimmt im Gegensatz zu radioaktiven Stoffen mit der Zeit nur unwesentlich ab. Sie müssen in Deutschland in Untertagedeponien (Deponiekategorie IV) *vollständig im Gestein eingeschlossen abgelagert werden* (Zitat aus [10]), so dass keine Nachsorge erforderlich ist. Die Tatsache, dass Untertagedeponien (500-800 m Tiefe) in Deutschland mit einem Inventar von mittlerweile ca. 3 Mio. Tonnen [12] chemotoxischer Abfälle betrieben werden (allein im Jahr 2009 wurden ca. 100.000 t derartiger Reststoffe in Deutschland deponiert [13]) belegt die technische Machbarkeit einer tiefengeologischen Endlagerung. Anders als für die Ablagerung chemotoxischer Abfälle in Untertagedeponien ist die Akzeptanz für die Endlagerung radiotoxischer Abfälle jedoch in der Öffentlichkeit keineswegs vorhanden. Diese Tatsache weist deutlich darauf hin, dass die Endlagerproblematik zu einem ganz wesentlichen Teil nicht in naturwissenschaftlich-technischen Problemen gründet.

Die Sicherheit eines nuklearen Endlagers ist in einem umfassenden Nachweiswerk zu belegen. Ein kritischer Aspekt besteht darin, dass dies für einen Zeitraum von 1 Million Jahre erfolgen soll. Die Radiotoxizität von abgebranntem Kernbrennstoff ist dann auf ein Niveau unterhalb desjenigen von Natururan abgeklungen. Weiterhin wird eine Prognose für die Entwicklung einer stabilen geologischen Formation über diesen Zeitraum hinweg noch für machbar erachtet. Ein wesentlicher Grund für die Favorisierung der tiefengeologischen Endlagerung gegenüber anderen Entsorgungsoptionen liegt in dieser relativ guten Langzeitprognostizierbarkeit (Abbildung 1). Voraussetzung dafür ist die Auswahl einer Formation in einer seismisch ruhigen Region und die ausreichende Mächtigkeit einer solchen Anordnung. Das Auffahren von Hohlräumen für die Endlagerung muss so gering als möglich erfolgen, um die Schutzfunktion der geologischen Barriere nicht zu beeinträchtigen. Alle in Europa diskutierten Wirtsgesteinsformationen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle besitzen nachweisbare Alter von vielen Millionen Jahren (s.u.). Sie liegen mehrere hundert Meter unter der Erdoberfläche, um nach Verschluss einen möglichst großen Schutz vor einem unautorisierten menschlichen Zugriff zu bieten. Massive

Veränderungen, wie sie z.B. durch einen Klimawandel an der Erdoberfläche auftreten, sind in diesen Tiefen nicht zu erwarten. Von allen Teilbereichen eines Endlagersystems, können zum Wirtsgestein die sichersten Aussagen über lange Zeiträume gemacht werden. Zukünftige Veränderungen der oberflächennahen Biosphäre und insbesondere menschlicher Gesellschaftsformen und Lebensgewohnheiten lassen sich dagegen nur mit größten Unsicherheiten bzw. gar nicht vorhersagen.

Der wichtigste Anteil an einem Sicherheitsnachweis für ein Endlager kommt daher der Stabilität der Wirtsgesteinsformation und dem Einschluss des Abfalls zu. Die Isolation der Abfallformen von der Biosphäre muss durch das Wirtsgestein im Zusammenwirken mit geeigneten technischen Barrieren gewährleistet werden. Alle Endlagerkomponenten werden daher so konzipiert, dass ein Wasserzutritt zum Abfall minimiert wird, und vorhandenes Gesteinsporenwasser keinen oder einen nur geringfügigen Austausch mit Grundwasserleitern besitzt. Dadurch wird ein grundwassergetragener Schadstofftransport verhindert bzw. minimiert.

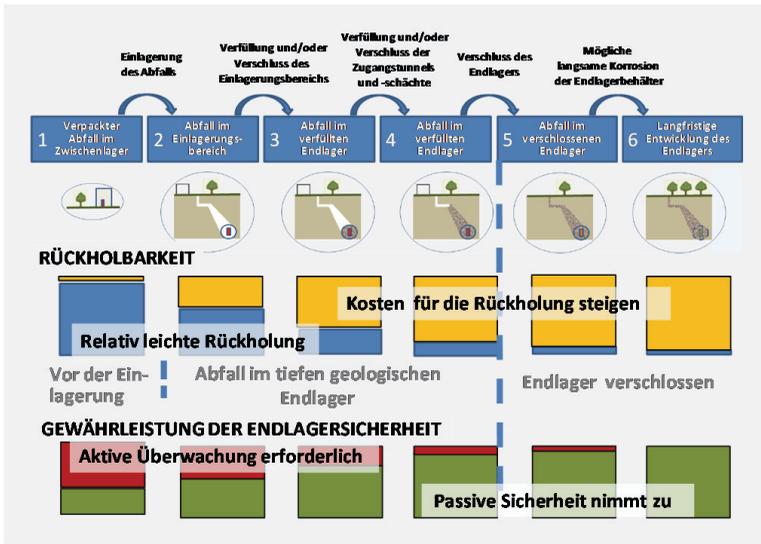


*Abbildung 1: Komponenten eines Endlagersystems, über die im Rahmen eines Sicherheitsnachweises Aussagen zu machen sind, und die Vorhersagbarkeit zu diesen Komponenten in Abhängigkeit von der Zeit; Vergleich mit end- bzw. zwischenlagerrelevanten Zeitskalen (modifiziert nach [14]).*

Neben den geologisch-physikalischen Barrierefunktionen der Endlagersysteme, die den weitgehenden Einschluss des Abfalls sowie möglichst geringe Fließgeschwindigkeiten des Grund- und Porenwassers garantieren, üben auch physikalisch-chemische Prozesse eine Barrierewirkung aus. Sie werden dann relevant, wenn Wasser zur Abfallform vordringt. Auch wenn dies in einigen Endlagersystemen als ein weniger wahrscheinliches Ereignis erachtet wird, werden die dabei möglicherweise ablaufenden geochemischen Prozesse untersucht. Um Aussagen zur Rückhaltung oder Freisetzung von Radionukliden in einem Endlagersystem zu erlauben, werden Daten zur Radionuklidlöslichkeit, Komplexbildungs- und Redoxreaktionen mit Grundwasserinhaltsstoffen und zur Sorption an Mineraloberflächen benötigt. Sie dienen als Eingangsparameter für geochemische Modelle, die das Radionuklidverhalten im Endlager beschreiben können. Interessant ist, dass Forschungsarbeiten der letzten Jahre gezeigt haben, dass technische Barrieren auch im Falle ihres physikalischen Versagens wichtige chemische Barrierefunktionen besitzen. Ein Beispiel soll das verdeutlichen: Wasserzutritt zu hochradioaktiven Abfällen führt mittel- und langfristig zur Korrosion der Abfallprodukte. Die dabei entstehenden Korrosionsprodukte können Radionuklide binden und damit ihre Mobilisierung wirksam verhindern. Laborexperimenten werden komplementiert mit Studien zum geochemischen Verhalten natürlich vorkommender Radionuklide - etwa in der Umgebung von Uranlagerstätten. Solche Naturbeobachtungen erlauben weitere Rückschlüsse zum Langzeitverhalten einiger Abfallbestandteile. Die so zugänglichen Informationen sind nicht nur für einen bestimmten Endlagerstandort gültig, sondern können auf alle Wirtsgesteinsformationen (Salz, Ton, Kristallingestein) übertragen werden. Dadurch ist auch aus geochemischer Sicht eine wissenschaftlich fundierte Sicherheitsanalyse über die betrachteten sehr langen Zeiträume möglich. Letztendlich werden in einem Langzeitsicherheitsnachweis für ein gegebenes Endlagerprojekt alle Erkenntnisse und Daten gesammelt, und es muss gezeigt werden, dass für alle relevanten Szenarien die Sicherheitsziele erreicht werden.

Ethische Prinzipien legen die Forderung nahe, die Verantwortung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle nicht auf zukünftige Generationen zu verschieben und ein möglichst hohes Maß an passiver Sicherheit zu garantieren. Ebenfalls ethisch begründet werden jedoch auch Forderungen nach der „Rückholbarkeit“ des Abfalls aus einem Endlager [15]. Zur Thematik „Rückholbarkeit“ befasste sich der Endlagerrauschuss der Entsorgungskommission in einem Diskussionspapier sehr ausführlich [16]. Andere alternative Entsorgungsvorschläge sehen die Einrichtung von Langzeitzwischenlagern vor. Alle Konzepte beinhalten technische Einrichtungen, die für unterschiedliche Zeiträume einen erleichterten Zugang zum Abfall ermöglichen. Sie bestehen darin, Zugangstunnel und Schächte in einem Endlagerbergwerk nach Einlagerung der Abfälle für variable Zeiträume offen zu halten, oder an der Oberfläche bzw. oberflächennah gesicherte Lager zu errichten, die für den Bestimmungszeitraum über einige hundert Jahre gesichert und überwacht werden sollen. Als Gründe werden Sicherheitsbetrachtungen angeführt, die eine Korrektur eines Endlagerprojekts ermöglichen sollen, falls unerwartete Erkenntnisse oder Ereignisse einen gewählten Standort zukünftig als unsicher erscheinen lassen. Andere Argumente zielen dahin, einen zukünftigen leichten Zugriff auf den abgebrannten Kernbrennstoff zu ermöglichen, um ihn mittels dann möglicherweise verfügbaren neuen Technologien wie z.B. Partitioning und Transmutation (P&T) (s. unten) zu behandeln oder als Energiequelle nutzen zu können. Die Zeiträume, für die eine Rückholung vorzusehen ist, variieren von

Jahrzehnten bis zu einigen Jahrhunderten. Alle genannten technischen Konzepte weichen allerdings mehr oder weniger von der Idee einer möglichst baldigen Überführung der hochradioaktiven Abfälle in einen passiv sicheren Zustand ab. Sie bedürfen daher einer aktiver Sicherungs- und Überwachungsmaßnahmen, die für den beabsichtigten Betrieb sichergestellt werden müssen. Abbildung 2 veranschaulicht Konsequenzen für ein Endlagerprojekt in Abhängigkeit vom Baufortschritt. Die Einrichtung eines Langzeitzwischenlagers würde in diesem Diagramm die Verlängerung der ersten Phase bedeuten. Gegenüber herkömmlichen Zwischenlagern zeichnen sich solche Einrichtungen durch massivere Bauweise aus, wie z.B. dicke Betonwände, die gegen terroristische Angriffe und Flugzeugabstürze sichern sollen. Dennoch muss auch hier eine aktive Über- und Bewachung über gegebenenfalls lange Zeiträume gewährleistet sein. Ein Endlager mit Rückholbarkeitsoption und die Langzeitzwischenlagerung erfordern darüber hinaus die Vorsorge, dass die Überführung der Abfälle in ein endgültig verschlossenes passiv sicheres Endlager schließlich erfolgt. Wie bereits oben diskutiert, sind all diese Maßnahmen immer schwerer zu garantieren, je weiter dieser Zeitpunkt in der Zukunft liegt.



**Abbildung 2:** Entwicklung des Aufwands für eine Rückholung radioaktiven Abfalls sowie des Grades an passiver Sicherheit des Endlagers in Abhängigkeit vom Fortschritt der Endlagerung (nach [18]).

Gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU ist in Deutschland vorgesehen, dass hochradioaktiver Abfall während der rund 50 Jahre dauernden Einlagerungsphase rückholbar gelagert werden muss. Während dieser Zeit können gegebenenfalls auftretende Probleme erkannt und gelöst bzw. im ungünstigen Falle die Entscheidung gefällt werden, dass ein Endlagerstandort aufgegeben werden muss. Aus heutiger Sicht könnten P&T Verfahren während dieses Zeitraums technisch verfügbar werden. Im Gegensatz zur häufig

in den Medien geäußerten Meinung sind Bau eines Endlagers und Entwicklungen zu P&T keinesfalls als konkurrierende, sich ausschließende Projekte zu sehen. Auch im Fall funktionierender P&T Anlagen wird für die verbleibenden Abfälle ein Endlager benötigt werden [17].

### **Einfluss von Partitioning und Transmutation auf die Endlagerung**

Bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle werden immer wieder der hohe Anteil an langlebigen radiotoxischen Radionukliden, insbesondere Plutonium und die anderen Actiniden, und das damit verbundene Langzeitrisko thematisiert. International wird deshalb seit einigen Jahren die sogenannte Partitioning und Transmutations-Technologie untersucht. Sie hat das Ziel, langlebige Radionuklide wie die Actiniden Neptunium, Plutonium, Americium und Curium aus abgebrannten Kernbrennstoffen abzutrennen (Partitioning, P) und sie dann gezielt in speziellen Reaktoranlagen durch Reaktionen mit schnellen Neutronen in kurzlebige oder - im Idealfall - stabile Isotope umzuwandeln (Transmutation, T). Der Transmutationsprozess kann in einer unterkritischen Beschleunigeranlage (ADS) oder einem schnellen Reaktor durchgeführt werden. Da die Transmutation nicht vollständig erfolgt, müssen mehrere Zyklen (ca. 5) gefahren werden. Dies bedeutet auch mehrfaches Partitioning und verlangt eine Kernbrennstoffkreislauf-Technologie. Die schließlich verbleibenden und endzulagernden Abfälle hätten, auch unter Berücksichtigung von unvermeidlichen Prozessverlusten, einen deutlich geringeren Anteil an langlebigen Actiniden. Die technische Machbarkeit erscheint nach heutigem Kenntnisstand sowohl für Partitioning als auch Transmutation gegeben. Die industrielle Anwendung der P&T Technologie erscheint aus heutiger Sicht frühestens in 30 Jahren möglich.

Die Anwendung der P&T-Technologie ist nur sinnvoll für abgebrannte Kernbrennstoffe, hochradioaktive Abfälle, wie z.B. HAW-Glas, kämen dafür nicht infrage, da sie nur noch geringe Mengen an Plutonium enthalten ( $\leq 1\%$ ) und die Auflösung der stabilen Glasmatrix technologisch sehr anspruchsvoll wäre [19].

Partitioning und Transmutation der Actiniden hätte unterschiedliche Auswirkungen auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Einige Stichpunkte werden im Folgenden aufgeführt[19-22 ]:

- (i) Aufgrund des niedrigeren Anteils an Actiniden verringert sich die Radiotoxizität des Abfalls nach Zerfall der kurzlebigen Spaltprodukte um bis zu zwei Größenordnungen. So könnte das Radiotoxizitätslevel einer Menge an Natururan, die für die Herstellung frischen Kernbrennstoffs benötigt würde, je nach Effizienz des P&T Prozesses innerhalb von einigen hundert bis wenigen tausend Jahren erreicht werden. Ohne P&T wäre das erst nach deutlich über 100.000 Jahren der Fall.
- (ii) Je nach P&T Konzept kann der endzulagernde Abfall nach einer Abklingzeit von ca. 50 Jahren bis zu einem Faktor vier weniger Wärme entwickeln als ohne P&T [22]. Der Wärmeeintrag in das Endlager wäre so niedriger und würde zu einer besseren Ausnutzung des Endlagers bzw. zu einem kleineren Endlager führen.
- (iii) Die Inventarverringerung an langlebigen radiotoxischen Actiniden hätte positive Auswirkungen auf einen Langzeitsicherheitsnachweis. Dies gilt insbesondere bei

- Berücksichtigung bestimmter Szenarien für die Entwicklung eines Endlagers, wie zum Beispiel die Veränderung der geochemischen Bedingungen, was zu einer höheren Mobilität der Actiniden führen könnte.
- (iv) Das geringere Radiotoxizitätsinventar der endgelagerten Abfälle würde im Falle eines zukünftigen ungewollten menschlichen Eindringens in das Endlager (human intrusion), z. B. durch bergbautechnische Maßnahmen, zu einem verringerten Gefährdungspotential führen
  - (v) Durch P&T der Actiniden würde der Anteil an spaltbarem bzw. waffenfähigem Material in einem Endlager gegenüber der direkten Endlagerung abgebrannter Kernbrennstoffe signifikant verringert. Dadurch wird eine spätere unautorisierte Bergung und Nutzung der Abfälle für militärische oder terroristische Zwecke unwahrscheinlich.
  - (vi) Durch Prozessverluste während der P&T-Zyklen würde der Anteil langlebiger schwach- und mittelaktiver Abfälle zunehmen. Diese Abfälle müssten auch endgelagert werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass, verglichen mit der direkten Endlagerung von abgebranntem Kernbrennstoff, die industrielle Anwendung von Partitioning und Transmutation der Actiniden eine Reihe von Vorteilen durch die signifikante Reduzierung langlebiger radiotoxischer und teilweise spaltbarer Stoffe bietet. Möglicherweise erhöht dies die öffentliche Akzeptanz für ein Endlager. P&T wird aber die geologische Endlagerung nicht ersetzen können. Sie ist weiterhin für die verbleibenden hochradioaktiven Abfälle und die vorhandenen hochradioaktiven Glasprodukte aus der Wiederaufarbeitung unerlässlich.

## **Wirtsgesteine und Stand internationaler Endlagerprojekte**

### *Wirtsgesteine*

In Europa werden als mögliche Wirtsgesteine, die die in der Lage sind, einen langfristigen Einschluss der Abfälle und ihr Fernhalten von der Biosphäre zu gewährleisten, Tongestein, Steinsalz und kristalline Gesteine (z.B. Granit) untersucht. Prinzipiell kann ein sicheres Endlager in allen diesen Wirtsgesteinen errichtet und betrieben werden. Die angewandten Konzepte unterscheiden sich und müssen den spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins Rechnung tragen, wie z.B. der Wärmeleitfähigkeit oder seiner Durchlässigkeit für Gase und Lösungen, etc. Einige positive und negative Eigenschaften der genannten Wirtsgesteine sind in Tabelle II aufgeführt. Für alle Wirtsgesteine basiert der Sicherheitsnachweis auf dem Multibarrieren Prinzip, dessen wichtigsten Komponenten das Abfallprodukt, die Behälter und das Wirtsgestein selbst darstellen.

Während wegen seiner thermomechanischen Eigenschaften ein vollständiger Einschluss der hochradioaktiven Abfällen in einer Steinsalzformation möglich ist, finden in Tongesteinen fortlaufend Diffusionsprozesse statt, über die ggf. Radionuklide aus dem Endlagerbereich in entferntere Schichten transportiert werden können. In kristallinen Gesteinen finden darüber hinaus druckgetriebene Strömungsvorgänge in Klüften statt. Aus diesen Voraussetzungen ergibt sich, dass die Wahl des Wirtsgesteins wesentlich von seiner Verfügbarkeit bzw. seiner Zugänglichkeit im jeweiligen Land abhängt. So verfügt Deutschland über zahlreiche Steinsalzvorkommen, welche seit den 1960er Jahren als das

bevorzugte Wirtsgestein angesehen wurde [23]. Zurzeit wird außer in Deutschland auch in den Niederlanden, Polen und USA die Option der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Wirtsgestein Steinsalz erwogen (Gründung des „Salt Club“ im Rahmen eines „Co-operative Projects“ der „NEA Integration Group for the Safety Case (IGSC“ am 18-20 Oktober 2011).

**Tabelle II:** Vergleich der Eigenschaften betrachteter Wirtsgesteine

	<b>Steinsalz</b>	<b>Tongestein</b>	<b>Kristalline Gesteine (Granit)</b>
positive Eigenschaften	Dichtigkeit Plastisches Verhalten (Konvergenz) Wärmeleitfähigkeit Temperaturbelastbarkeit Alter der Salzstöcke Erfahrung	Dichtigkeit Plastisches Verhalten (Quellfähigkeit) Nicht wasserlöslich Hohe Rückhaltung	Stabile Mechanik Hohe mechanische Belastbarkeit Mäßige Wärmeleitfähigkeit Erfahrung
negative Eigenschaften	Wasserlöslichkeit Geringe Rückhaltung Ablösungsvorgänge Aufstieg (ca. 0,02 mm/a)	Geringe Wärmeleitfähigkeit Geringe Temperaturbelastbarkeit Aufwändiger Bergbau	Wasserführende Klüfte Geringe Rückhaltung Technische Barrieren erforderlich (Bentonit)
Einschluss-Charakteristik	Vollständiger Einschluss (Isolation) möglich	Diffusionskontrollierte Austauschprozesse	Kluftwasserleiter, Matrixdiffusion, Tonbarrieren

Es finden sich in Deutschland neben Steinsalz (Alter ca. 250 Ma) auch hinreichend mächtige Tongesteine (Alter ca. 70 Ma) [24], während Granit in Deutschland häufig tektonisch beansprucht und klüftig ist, wie z.B. im Schwarzwald [25]. Granite in der Lausitz liegen z.T. sehr tief und die vorliegenden Informationen sind eher spärlich. In Schweden und Finnland finden sich nahezu ausschließlich die kristallinen Gesteine des skandinavischen Schildes (Alter ca. 1000 Ma). Seit 1990 wird in China eine Granitformation in der Wüste Gobi auf ihre Eignung untersucht (Beishan area in der Gansu Province [26]).

Im Rahmen eines Untersuchungsprogramms alternativer Wirtsgesteine fanden in Frankreich im Zeitraum von 1991 bis 2006 Arbeiten zu Tongesteinen und granitischen Wirtsgesteinen statt [27]. Letztlich zeigten sich die Tongesteine des Callovo-Oxfordian im

französischen Becken besser geeignet für die Endlagerung. Auch in der Schweiz waren zunächst kristalline Gesteine präferiert [28], später wurden Tongesteine (Opalinuston) in das Auswahlverfahren einbezogen. Belgien verfolgt die Planung der Endlagerung in der „Boom Clay“ Formation. Dieser Ton unterscheidet sich von den in Frankreich und der Schweiz ausgewählten Gesteinen durch seinen hohen Wassergehalt, Gehalt an organischem Material und seiner geringeren Tiefe [29].

In den USA wurde im Jahr 1982 das Gesetz „Nuclear Waste Policy Act“ verabschiedet, welches die Zuständigkeit der Bundesregierung für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle festlegte. Auf Grund dieses Gesetzes wurde 1987 der Standort „Yucca Mountain“ im Wirtsgestein „Tuff“ als alleiniger Standort eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle vom Kongress beschlossen. Seit 2009 wurden von der amerikanischen Regierung die Mittel für dieses Projekt so stark gekürzt, dass es praktisch zum Erliegen kam. Im Gegensatz zu den europäischen Endlagerprojekten war geplant die Endlagerung oberhalb des Grundwasserspiegels in der aeroben Zone durchzuführen. Allerdings wäre dieser Standort nach den Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEnd) als nicht geeignet qualifiziert ungeeignet worden, da er sich in der Nähe eines Vulkans befindet [30].

#### *Endlagerstandortauswahlverfahren*

Die Ausführungen zeigen, dass durchaus unterschiedliche Wirtsgesteine für die Endlagerung in Frage kommen. Nach der Entscheidung über das Wirtsgestein ist es erforderlich, einen Standort für das Endlager festzulegen. In Deutschland wurde in den 1970er Jahren der Standort „Gorleben“ über einem Salzstock ausgewählt, wobei die Auswahlkriterien ursprünglich die Errichtung eines Entsorgungszentrums mit der Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe und die Brennelementfabrikation im Blickfeld hatten. Dieses Konzept wurde aber aus politischen Gründen als nicht durchsetzbar erachtet und bald wieder aufgegeben. Ein Vorschlag zu einem neuen Auswahlverfahren wurde 2002 von einem interdisziplinär zusammengesetzten Arbeitskreis (AKEnd) dem BMU übergeben, allerdings bislang nicht weiter verfolgt [30]. Eine endgültige Entscheidung über den Standort steht aus und im November 2011 haben sich der BMU und die zuständigen Landesminister auf die Verabschiedung eines Standortauswahlverfahrens innerhalb von 2 Jahren verständigt.

In der Schweiz wurde 2008 ein Verfahren zur Standortwahl „Sachplan geologische Tiefenlager“ verabschiedet. Dieses ist ein Instrument der Bundesregierung zur Regelung und Durchführung der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz. Der Sachplan legt die Verfahrensschritte und Kriterien für das Auswahlverfahren fest und regelt die regionale Mitwirkung der Bevölkerung. Für die Auswahl hat die Sicherheit erste Priorität, daneben spielen aber auch sozioökonomische und raumplanerische Aspekte eine wichtige Rolle.

In Schweden ist das Auswahlverfahren in den schwedischen Umweltgesetzen verankert. Dort wurde auch der Begriff "bestmöglicher Standort" eingeführt, obwohl die Standortentscheidung letztlich aufgrund einer Reihe von Auswahlkriterien getroffen wurde [31]. Seit 1995 wird eine Strategie verfolgt, die auf einer Kombination von geologischen Kriterien und der freiwilligen Teilnahme von Gemeinden mit geeigneten Bedingungen basiert. Im Juni 2009 wählte die schwedische Waste Management Organisation SKB die

Gemeinde Forsmark als Standort für ein Endlager für abgebrannte Kernbrennstoffe aus. Aufgrund des Kernenergiegesetzes wurde in Finnland 1994 Posiva Oy mit dem Ziel gegründet, die Endlagerung durchzuführen und die entsprechende Forschung gewährleisten. Von 1983 bis 1985 fand eine Bewertung von ganz Finnland und bis 1992 eine vorläufige Standorterkundung statt. Als Ergebnis wurden 4 mögliche Standorte vorgeschlagen, von denen Olkiluoto in Eurajoki ausgewählt wurde. Zurzeit ist dort der Bau der untertägigen Anlagen im Gange ([www.posiva.fi](http://www.posiva.fi)).

In Kanada wurden bis 2006 eine tiefe Granitformation bezüglich der HAW Endlagerung untersucht und darin auch ein Untertagelabor errichtet. Dies wurde mittlerweile aufgegeben. Im Jahr 2007 wurde das sogenannte "Adaptive Phased Management" für abgebrannte Kernbrennstoff beschlossen, welches neben der Auswahl eines Standortes im Kanadischen Schild die Entwicklung von großen Infrastrukturprojekten in den betroffenen Gemeinden beinhaltet. Zurzeit liegen von mehreren (8) Gemeinden Anträge auf weitere Erkundung vor ([www.nwmo.ca](http://www.nwmo.ca)). Die endgültige Festlegung eines Standortes wird etwa 10 Jahre Forschungs- und regulative Arbeiten beanspruchen.

In Japan kommen sowohl kristalline als auch Tongesteine für die Aufnahme von wärmeproduzierenden Abfällen in Frage. Ähnlich wie in Kanada wurde in Japan auch die Freiwilligkeit einer Gemeinde zur Aufnahme des Endlagers in den Vordergrund gestellt. Im Jahr 2002 verschickte die zuständige japanische Organisation NUMO entsprechende Anfragen an alle 3239 Gemeinden in Japan. Bisher gab es nur eine Anmeldung, die aber wieder zurückgenommen wurde ([www.numo.or.jp/en/](http://www.numo.or.jp/en/)).

Im Juli 2011 unterzeichnete der russische Präsident Medvedev das Gesetz der Russischen Föderation "On Management of Radioactive Waste", welches in der Duma über einen langen Zeitraum beraten worden war. Dieses Gesetz führt eine Klassifizierung der Abfälle ein und definiert Normen und Regeln. Es beinhaltet weiterhin Vorschriften zum Umweltschutz und zur Rolle von *Rosatom Nuclear Energy State Corporation* ([eng.kremlin.ru/acts/2567](http://eng.kremlin.ru/acts/2567)). Planungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle laufen für die Standorte Tomsk und Krasnoyarsk (kristalline Gesteine [32]) und für Mayak, wo bis zum Jahr 2030 ein Endlager errichtet werden soll. Die regionale geologische Situation in der Umgebung von Mayak ist nicht optimal, aber es finden sich hinreichend große Areale, die nur wenig durch tektonische Vorgänge und Heterogenitäten gekennzeichnet sind, eine geringe Porosität aufweisen und durch geringpermeable Schichten voneinander getrennt sind [33].

### *Einlagerungskonzepte*

In Deutschland wurden für hochradioaktive Abfälle zwei unterschiedliche Einlagerungskonzepte in einem Endlagerbergwerk entwickelt. Dieses sind die Lagerung in vertikalen Bohrlöchern bzw. die Lagerung in horizontalen Strecken. Bei der Bohrlochlagerung wurde dem Abfallbehälter keine Bedeutung zuerkannt, man ging davon aus, dass durch die Konvergenz des Steinsalzes der Ringspalt im Bohrloch innerhalb weniger Jahre verschlossen sei und somit die vollständige Isolation der Abfälle stattfindet. Durch die große vertikale Dimension der Salzstöcke waren Bohrlochtiefen bis 300 m in der Diskussion. Für die Streckenlagerung sind dickwandige Behälterkonzepte (POLLUX) vorgesehen. Es ist offensichtlich, dass durch die Bohrlochlagerung der Wirtsgesteinskörper

auch in der dritten Dimension ausgenutzt werden kann und die Fläche des Endlagers (foot print) deutlich geringer ist.

Die vertikale Bohrlochlagerung schließt sich im Falle von Tongesteinen i.A. aus, da die Mächtigkeiten dieser Gesteinsschichten nur ca. 100 m betragen. Daher werden für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tongesteinen nur die Streckenlagerung (Schweiz und Belgien) oder die Lagerung in horizontalen Bohrlöchern (Frankreich) verfolgt. In den Tonkonzepten sollen dickwandige Behälter verwendet werden bis hin zum Supercontainer Konzept in Belgien, das neben einer Verpackung der Abfälle in Stahlbehältern eine zusätzliche Ummantelung mit Beton vorsieht [34]. In Schweden und Finnland wird das KBS-3 Konzept verfolgt, welches Folgendes beinhaltet: 12 SWR Brennelemente werden durch Stege voneinander getrennt in einen Stahlbehälter eingesetzt und der Stahlbehälter in einen Overpack aus Kupfer mit 50 mm Wandstärke verpackt. Kupfer ist unter den anaeroben Bedingungen granitischer Grundwässer thermodynamisch stabil und korrodiert praktisch nicht. Im Endlager sollen diese Behälter in vertikale Bohrlöcher (8 m tief, 2 m Durchmesser), die mit kompaktiertem Bentonit ausgekleidet sind, gelagert werden. Der Bentonit soll den Zutritt von Grundwasser aus dem (klüftigen) Granit zum Behälter verhindern.

### *Wärmeproduktion*

Hochoxidative Abfälle und abgebrannte Brennelemente entwickeln Wärme, die im Endlager durch Wärmeleitung durch das Versatzmaterial um die Abfallbehälter und das Wirtsgestein abgeführt werden muss. Die verschiedenen Wirtsgesteine weisen unterschiedliche thermische Eigenschaften auf, denen die Endlagerkonzepte Rechnung tragen müssen. Während Steinsalz thermisch hoch belastbar ist und eine der höchsten Wärmeleitfähigkeiten natürlicher Gesteine aufweist, sind Tongesteine weniger belastbar. Hierbei spielt die Tatsache eine wesentliche Rolle, dass Wasser ein inhärenter Bestandteil dieser Mineralphasen ist. Aus diesem Grund wurden vorgeschlagen, die maximalen Temperaturen, die aus der Wärmefreisetzung resultieren, auf 200°C im Steinsalz und etwa 100°C in Ton- bzw. granitischen Gesteinen zu begrenzen. Diese Begrenzung kann durch entsprechend lange Zwischenlagerzeiten oder durch geringeren Wärmeeintrag pro Volumeneinheit im Endlager eingehalten werden. Rechnungen zeigten, dass der foot print eines Endlagers in einem Tongestein nahezu 10 mal größer ist als im Salzgestein (bei gleicher Zwischenlagerzeit und gleichem Lagerkonzept).

### *Rückholbarkeit*

Bis 2010 war die Rückholbarkeit der Abfälle aus einem Endlager in Deutschland nicht vorgesehen. Seit der Publikation der Sicherheitsanforderungen [8] ist vorgesehen, dass die Endlagerung so durchgeführt wird, dass alle Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers jederzeit zurückgeholt werden können. Zusätzlich wird ein Nachweis gefordert, dass der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren handhabbar ist, um prinzipiell auch nach Verschluss des Endlagerbauwerks die Abfälle bergen zu können. Diese Vorgaben stellen besondere Anforderungen an die Endlagertechnik, die Behälter und die Bereitstellung von entsprechenden Ressourcen. Die Rückholbarkeit der Abfälle wird in Frankreich über einen Zeitraum von 200 Jahren ebenfalls gefordert. Auch im amerikanischen Yucca Mountain Project wurde eine Rückholbarkeit betrachtet, wobei sich die Vorkehrungen nur auf den Verzicht auf die Verfüllung der Lager- und Zugangsstrecken

erstrecken. In der Schweiz soll die Rückholbarkeit der hochaktiven Abfälle bei der Auslegung eines Tiefenlagers eingeplant werden. Die technische Machbarkeit muss vor der Inbetriebnahme des Lagers nachgewiesen und in Versuchen im Maßstab 1:1 demonstriert werden. Wird während des Einlagerungsbetriebs oder der anschließenden Beobachtungsphase vor dem Verschluss des Lagers beschlossen, die Abfälle zurückzuholen, wird davon ausgegangen, dass dies mit geringem Aufwand möglich ist. Zu einem späteren Zeitpunkt wird der Aufwand grösser, weil die Zugangstunnels zu den Lagerstollen wieder geöffnet werden müssen. Als ein Grund für die Rückholung ist die mögliche zukünftige Nutzung von Uran und Plutonium als Energiequelle ([www.nagra.ch](http://www.nagra.ch)). Auch im schwedischen Konzept besteht eine Rückholbarkeitsoption. SKB demonstrierte in einem Test, dass die Rückholung eines Abfallbehälters, der allerdings keinen wärme-producingen Abfall enthielt, prinzipiell durch eine in-situ Aufschlammung der Bentonitbarriere technisch möglich ist.

Bislang hat sich nur ein einziges Land für die Langzeitzwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle entschieden. Die Niederlande betreibt seit 2003 in Borssele, Zeeland eine solche Anlage (<http://www.covra.nl>). Hier werden verglaste Abfälle aus wiederaufgearbeitetem Brennstoff, die in zwei mittlerweile stillgelegten Kernkraftwerken und einem im Betrieb befindlichen Reaktor für 100 – 300 Jahre zwischengelagert. Kürzlich hat eine von der US Regierung eingesetzte Kommission („blue ribbon commission“ – [www.brc.gov](http://www.brc.gov)), die sich mit zukünftigen Entwicklung der Kernenergie in den USA befassen soll, ebenfalls ein solches Konzept vorgeschlagen.

Auf die Problematik von Rückholbarkeitskonzepten und Langzeitzwischenlagerung wurde bereits oben eingegangen.

### *Sicherheitsanalysen*

In allen Endlagerkonzepten steht die Langzeitsicherheit an erster Stelle. Gemeinsam an der Nachweisführung ist allerdings, dass eine Endlagersicherheitsanalyse keine Vorhersage der Endlagerentwicklung beinhaltet, sondern auf Basis von Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen (FEP) bestimmte Entwicklungsszenarien analysiert werden. Die weitere Nachweisführung ist allerdings in den verschiedenen Ländern unterschiedlich. In Deutschland ist im Atomgesetz das Planfeststellungsverfahren als Basis einer Genehmigung definiert, wobei die Strahlenschutzverordnung und das Bundesberggesetz zu berücksichtigen sind. Die standortspezifische Sicherheitsanalyse beinhaltet die Analyse definierter Auslegungstörfälle und die Analyse der Robustheit des Endlagersystems. Diese erstreckt sich auf die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahre, die Bildung bzw. Existenz von sekundären Wasserwegsamkeiten oder das Vorhandensein von Porenwasser und dessen (Nicht-) Teilnahme am hydrogeologischen Kreislauf, sowie auf Dilatanzfestigkeiten, Fluiddrücke und die Temperaturentwicklung. Wie bereits oben erwähnt darf die radiologische Langzeitaussage eine zusätzliche effektive Strahlenbelastung von 0.01 mSv/a für die wahrscheinlichen bzw. 0.10 mSv/a für weniger wahrscheinlichen Entwicklungen nicht überschreiten [8]. In den Sicherheitsanforderungen wird auch vorgegeben, dass die Analysen auf deterministischen Rechnungen auf der Basis realitätsnaher Modellierung erfolgen sollen.

Ein völlig anderes Nachweiskonzept wurde in den USA für Yucca Mountain angewandt. Hier wurde die „Total System Performance Analysis“ (TSPA) benutzt. Diese Analyse basiert auf dem Design des Endlagers und den erforderlichen wissenschaftlichen Daten und Analyse. TSPA beschreibt das Verhalten des Endlagers mittels wahrscheinlichkeitsbasierten Methoden. Die Bewertung der Langzeitsicherheit erfolgt auf der Basis von Risiken. Zunächst erstreckte sich die Analyse nur über einen Zeitraum von 10000 Jahren [35]. Als Ergebnis von Gerichtsurteilen wurde dieser Zeitraum bis zum Auftreten der maximalen Dosis verlängert.

In den meisten Ländern werden Kombinationen von deterministischen und probabilistischen Verfahren angewandt. Die Bewertung der berechneten Dosisbelastung erfolgt in den meisten Ländern auf der Basis des Risikos. Unter Annahme einer definierten Dosis-Wirkungsbeziehung kann eine Individualdosis in ein Risikoäquivalent umgerechnet werden. International werden Umrechnungsfaktor zwischen 0,05 pro Sv und 0,073 pro Sv verwendet. Die Umrechnungsfaktoren unterscheiden sich vor allem darin, welche schwerwiegenden Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit sie als Wirkung betrachten und wie sie die verschiedenen Wirkungen wichten [36].

## **Schlußfolgerungen**

Die verantwortungsvolle Entsorgung insbesondere hochradioaktiver Abfälle in einer Art und Weise, die ein Höchstmaß an Sicherheit für Mensch und Umwelt bietet, ist eine Notwendigkeit für alle Länder, die Kernenergie nutzen oder in der Vergangenheit genutzt haben. Sie ist auch in Deutschland eine nationale Aufgabe, die unabhängig von der Bewertung der Kernenergie als Energiequelle bewältigt werden muss. Die übereinstimmende Einschätzung vieler nationaler und internationaler Gremien und Fachorganisation weist der tiefengeologischen Endlagerung das höchste Sicherheitspotential zu. Alternative Entsorgungsvorschläge wie Langzeitzwischenlagerung oder technische Konzepte, die die langfristige Rückholbarkeit von Abfällen aus einem Endlager ermöglichen, müssen vor diesem Hintergrund sorgfältig diskutiert werden. Insbesondere der Aspekt der passiven Sicherheit eines gut konzipierten und ordnungsgemäß verschlossenen geologischen Endlagers wiegt schwer und ist von Alternativkonzepten in diesem Maße schwerlich zu erbringen. P&T kann einen wichtigen Beitrag zur deutlichen Reduzierung des hohen Radiotoxizitätsinventars verursacht durch Transuranelemente im Abfall nach einigen hundert Jahren leisten. Die möglichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt bei bestimmten Freisetzungsszenarien, z.B. im Falle unbeabsichtigten menschlichen Eindringens, werden geringer und das Endlager daher sicherer. Dafür wird allerdings der Betrieb entsprechender kerntechnischer Anlagen erforderlich und die Endlagerung verbleibender Abfälle bleibt dennoch notwendig, möglicherweise jedoch von der Bevölkerung eher akzeptiert. Die Einschätzung, dass die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle nicht sicher zu bewerkstelligen ist, kann nicht geteilt werden. Der sichere Betrieb von Untertagedeponien für chemotoxische Abfälle beweist das Gegenteil. Ein Blick ins benachbarte Ausland zeigt darüber hinaus, dass auch ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Abstimmung mit der Bevölkerung realisiert werden kann. Sicherheitsanalysen für solche Endlagerkonzepte zeigen, dass selbst unter der Annahme ungünstiger Entwicklungen eine mögliche Strahlenexposition der Bevölkerung durch ein optimiertes Endlager deutlich unter den jeweils geltenden Schutzziele liegen wird.

## Literatur

- [1] Bundesamt für Strahlenschutz (201); <http://www.bfs.de/de/endlager/abfaelle/prognose.html>
- [2] atw International Journal for Nuclear Power, Vol. 55, 36 (2011)
- [3] IAEA-TECDOC-1587 (2008)
- [4] Brasser, T., Droste, J., Müller-Lyda, I., Neles, J., Sailer, M., Schmidt, G., Steinhoff, M., Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Öko-Institut e.V., GRS, GRS-247, 2008
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA), OECD-Nuclear Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. - Safety Requirements WS-R-4, Vienna, 2006.
- [6] OECD-NEA Radioactive Waste Management Committee: „Collective Statement on Moving Forward to Geological Disposal of Radioactive Waste“, ISBN 978-92-64-99057-9.
- [7] RICHTLINIE DES RATES über die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle SEK(2010) 1290 / SEK(2010) 1289 2010/0306 (NLE)
- [8] Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle; Endfassung des Bundesumweltministeriums, 30.09.2010 (<http://www.bmu.de>)
- [9] ICRP PUBLICATION, Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, Draft July 21, 2011
- [10] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), DepV, Ausfertigungsdatum: 24.07.2002
- [11] Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), AbfR 4.1.2, 12. März 1991 (GMBL S. 139)
- [12] <http://www.ks-entsorgung.com>
- [13] Statistisches Bundesamt, Fachserie 19 Reihe 1, Umwelt, Abfallentsorgung 2009
- [14] OECD/NEA, The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety - Lessons Learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France, OECD 2004, NEA No. 4435
- [15] Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft; vorgelegt von der Ethik-Kommission: Sichere Energieversorgung, Berlin, den 30. Mai 2011 ([www.bundesregierung.de](http://www.bundesregierung.de))
- [16] <http://www.entsorgungskommission.de/>
- [17] Potential Benefits and Impacts of Advanced Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation (WPF/TFPT), OECD 2011, NEA No. 6894
- [18] <http://www.nea.fr/rwm/rr>
- [19] French R&D on the Partitioning and Transmutation of Long-Lived Radionuclides - An International Peer Review of the 2005 CEA Report, OECD-NEA No. 6210 (2006)
- [20] Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management, Technical reports series no. 435, IAEA (2004)
- [21] M. Salvatores, H. Geckeis, K. Gompfer, J. Marivoet, J.F. Milot, H. Oigawa, A. Saturnin, T. Taiwo, R. Wigeland, A. Zaetta. NSC-WPFC Task Force on Potential Benefits and Impacts of Advanced fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation (WPF/TFPT). Proceedings of GLOBAL 2011, Makuhari, Japan, Dec. 11-16, 2011
- [22] Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, OECD 2006, NEA, No. 5990

- [23] Kockel, F. and P. Krull (1995). Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- [24] Hoth, P., H. Wirth, et al. (2007). Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- [25] Bräuer, V. (1994). Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- [26] Wang, J. (2010). "High-level radioactive waste disposal in China: update 2010." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2(1): 1-11.
- [27] ANDRA (2005). Dossier 2005 Argile, Tome: Évolution phénoménologique du stockage géologique.
- [28] NAGRA (1985). Project Gewähr 1985. Nuclear waste management in Switzerland: Feasibility studies and analysis, NAGRA Project Report.
- [29] Bernier, F., G. Volckaert, et al. (1997). "Suction-controlled experiments on Boom clay." *Engineering Geology* 47: 325-338.
- [30] AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- [31] Bräkenhielm, C. R. (2010). The Swedish Process for Selection of a Site for Localization of a Depository for High Level Nuclear Waste. WM2010 Conference, March 7-11, 2010, Phoenix, AZ.
- [32] Kudryavtsev, E. G., I. V. Gusakov-Stanyukovich, et al. (2009). Construction of a Deep Geological Disposal Facility for Final Isolation of High-Level Waste in the Nizhnekansky Rock Massif (Krasnoyarsk region), IAEA.
- [33] Smith-Briggs, J. L. and et al. (2000). Assessment of situation and disposal concepts for radioactive waste arisings from reprocessing operations in Chelyabinsk-65 (Mayak).
- [34] Bel, J., A. V. Cotthem, et al. (2005). Construction, operation and closure of the Belgian repository for long-lived radioactive waste. 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICRP 2005, Glasgow, UK.
- [35] EPA (2001). 40 CFR Part 197: Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, NV; Final Rule. USA, Environmental Protection Agency.
- [36] International Commission on Radiological Protection (ICRP): Biological and Epidemiological Information on Health Risks Attributable to Ionising Radiation: A Summary of Judgements for the Purposes of Radiological Protection of Humans, Committee 1 Task Group Report: C1 Foundation Document (Annex A of Main Recommendations), 12/180/06, 16.02.2006

Prof. Dr. Horst Geckeis,  
 Karlsruher Institut für Technologie  
 Institut für Nukleare Entsorgung  
 Postfach 3640  
 D-76021 Karlsruhe

Deutsche Physikalische Gesellschaft  $\Phi$  DPG

Arbeitskreis Energie



# Energie

## Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Herausgegeben von Hardo Bruhns

# Energie

## Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2012

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie  
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
Dresden, 13. bis 16. März 2011

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	7
Übersicht über die Fachsitzungen.....	8
Abstracts aller Vorträge.....	9
Electrolytes in lithium-ion batteries: state of the art and future trend (presented by A. Balducci).....	27
Das Energiekonzept der Bundesregierung und andere Optionen für die Energiezukunft Deutschlands (vorgetragen von M. Popp).....	37
Vergleichende Bewertung von Stromerzeugungssystemen (vorgetragen von R. Friedrich).....	47
Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen - internationaler Stand und Perspektiven (vorgetragen von H. Geckeis).....	64
Nuclear Waste Transmutation: Status and Perspectives for Accelerator Driven Systems (ADS) in Europe (presented by A. C. Mueller).....	81
Der Stellarator - Ein alternatives Einschlusskonzept für ein Fusionskraftwerk (vorgetragen von R. Wolf).....	97
Production and conversion of liquid fuels and hydrogen from biomass and natural gas using microreactor technology (presented by P. Pfeifer).....	105
Physik der Windparkoptimierung (vorgetragen von S. Emeis).....	120

Geothermie für Grundlaststrom und Wärmeversorgung - internationale Nutzung, Potenzial, technologische Entwicklungen (vorgetragen von D. Bruhn).....	130
Einsatz großer Wärmepumpen im Industrie- und Gewerbebau (vorgetragen von R. Grimm) .....	140
Anforderungen an einen Wärmepumpentarif zur Überwindung diskriminierender Steuern und Abgaben beim thermodynamisch optimierten Heizen (vorgetragen von G. Luther).....	151
Clean Power from Deserts (presented by M. Düren).....	164
Hochkonzentrierende Photovoltaik: Stand der Entwicklungen und Perspektiven (vorgetragen von A. Bett) .....	182
Das Aufwindkraftwerk – Funktionsweise und aktueller Stand (vorgetragen von G. Weinrebe) .....	200

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2011 -Dresden:

[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2011-AKE\\_Dresden/Links\\_DPG2011.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2011-AKE_Dresden/Links_DPG2011.htm)

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2011 in Dresden zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien der Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.