



Die Endlagerung radioaktiver Abfälle

Die Nutzung von Kernenergie wird in Zeiten des Klimawandels verstärkt als saubere Alternative zur Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen diskutiert, da Kernenergie die Atmosphäre nur vergleichsweise gering mit dem Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) belastet. Doch bei der Erzeugung von Energie in Kernkraftwerken fallen radioaktive Abfälle an, die in einer anderen Weise die Umwelt belasten. Wie diese Abfälle entstehen, welche Eigenschaften sie haben und wie Endlagerkonzepte aussehen, soll im Rahmen dieses Textes erläutert werden.

Die gleiche Energie, welche Atomkerne zusammenhält, wird in einem Kernkraftwerk zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet. Man spaltet dazu in Brennelementen befindliche Urankerne unter Wasser in leichtere Elemente. Ermöglicht wird diese Kernspaltung durch Beschuss des Urans mit im Reaktor vorhandenen Teilchen, den Neutronen. Bei dem Vorgang wird dann die Energie frei, die den Kern bisher zusammengehalten hat. Sie erhitzt das umgebende Wasser zu Wasserdampf, welcher zum Antrieb einer Turbine und so zur Produktion von elektrischem Strom genutzt wird.

Bei der Verwendung von Uran muss man allerdings beachten, dass das natürlich vorkommende Uran nicht unmittelbar zur Stromproduktion eingesetzt werden kann, da sich nicht alle Urankerne ohne weiteres spalten lassen. Natururan besteht größtenteils aus zwei Sorten, genauer gesagt zwei Isotopen, welche sich durch eine unterschiedliche Neutronenanzahl im Atomkern auszeichnen. Es handelt sich um die Isotope Uran-238 und Uran-235, wobei Ersteres mehr Neutronen im Kern besitzt, also ein wenig schwerer ist als Letzteres. In Druck- und Siedewasserreaktoren leicht spaltbar ist jedoch nur Uran-235, welches aber in der Natur nur in geringem Maße vorkommt (Natururan besteht zu 0,7% aus spaltbarem Uran-235 und zu 99,3% aus Uran-238).^[1] Daher ist in der Regel eine Anreicherung vor der Verwendung nötig, wobei der Anteil an Uran-235 erhöht wird. Geht nun bei der Stromerzeugung der in den Brennelementen enthaltene Anteil an Uran-235 zur Neige, so sagt man das Element sei abgebrannt; es muss dann im Reaktor ersetzt werden.

Neben einem Rest nicht abgebrannten Urans befinden sich u. A. bei der Reaktion entstandenes Plutonium und die radioaktiven Spaltprodukte in dem abgebrannten Brennelement. Unter Radioaktivität versteht man, dass die Kerne instabil sind und unter Aussendung von Strahlung oder Teilchen, welche für den menschlichen Organismus sehr gefährlich sind, in andere Atomkerne zerfallen.

Radioaktive Elemente besitzen verschiedene Halbwertszeiten, was bedeutet, dass sie unterschiedlich schnell zerfallen und somit unterschiedlich lange strahlen. Die Halbwertszeit ist eine intrinsische Eigenschaft eines Isotops und beschreibt, binnen welchen Zeitraums aufgrund des radioaktiven Zerfalls nur noch die Hälfte der ursprünglichen Menge des Isotops vorhanden ist. Atome mit einer kurzen Halbwertszeit senden also häufiger radioaktive Strahlung aus als eine vergleichbare Menge von Atomen mit einer langen Halbwertszeit; dafür sind sie aber auch nach einer kürzeren Zeit zerfallen. Jedoch sind die Zerfallsprodukte häufig ebenfalls radioaktiv, wodurch eine erneute potentielle Strahlenbelastung entsteht.

International wird der strahlende Abfall in drei Kategorien eingeteilt: Hoch- (HAW = high active waste), mittel- (MAW), und schwachradioaktiver Abfall (LAW).^[2] In Deutschland unterscheidet man lediglich zwischen wärmeproduzierendem Abfall und Abfall mit vernachlässigbarer Wärmeproduktion. Um ein Gefühl für diese Klassifikation zu bekommen sei angemerkt, dass 90% des radioaktiven Abfalls in

Deutschland zur Kategorie der vernachlässigbaren Wärmeproduktion gehören, aber diese Abfallmenge nur 0,1% der Strahlenbelastung des gesamten deutschen Atommülls ausmacht.^[3]

Bis die Radioaktivität eines Brennelementes wieder auf den Wert abgeklungen ist, den sie beim Abbau in der Uranmine hatte, vergehen mehrere tausend Jahre (ca. 10.000 – 100.000 Jahre).^[4] Mit dieser Abschätzung kann eine Mindestzeit festgelegt werden, für die ein Endlager die Radioaktivität von der Biosphäre fernhalten muss, um diese nicht zusätzlich zur natürlichen Radioaktivität zu belasten. Allerdings sind auch andere Referenzwerte denkbar wie der im deutschen Endlagerprogramm geforderte sichere Einschluss über eine Million Jahre. Aufgrund dieser langen Zeitspanne müssen auch ethische Aspekte berücksichtigt werden, wie z. B. die Belastung zukünftiger Generationen, die keinen Nutzen durch die Kernenergie der gelagerten Brennelemente hatten, sich aber u. U. um eine sichere Verwahrung bemühen müssen.^[5] Daher sind wartungsfreie Endlager das Ziel heutiger Konzepte. Ferner sollte der Standort so gewählt werden, dass ein versehentliches Eindringen sehr unwahrscheinlich ist, da eine Dokumentation des Lagerstandortes über die oben genannten Zeitspannen möglicherweise nicht gewährleistet werden kann.^[6]

Beim Wechsel der Brennelemente im Reaktor wird das abgebrannte, radioaktiv strahlende und noch heiße Brennelement unter Wasser in das so genannte Abklingbecken transferiert, wo es für einige Jahre gelagert wird, bevor es entweder zur Wiederaufbereitung oder zur Lagerung präpariert wird. Nach etwa einem Jahr besitzt das Brennelement noch eine Temperatur von ca. 390 °C.^[7]

In Deutschland entstandener Atommüll wurde früher nach England oder Frankreich zur Wiederaufbereitung transportiert, doch seit dem Jahre 2005^[8] wird dieser nach dem Abklingen direkt und ohne Wiederaufbereitung am Reaktorstandort in Castor-Behältern in Hallen zwischengelagert und nicht, wie häufig vermutet, in einen Salzstock transportiert.^[9] Der nächste Schritt nach der Zwischenlagerung ist die Endlagerung an einem sicheren Ort, der für den Zeitraum in dem der Atommüll radioaktiv strahlt eine Abschirmung zur Biosphäre gewährleisten soll. Ein solches Endlager für zivilen hochradioaktiven Abfall existiert bisher weltweit nicht.

Anstatt der Lagerung in tiefegeologischen Formationen wie Salzstöcken sind auch andere Endlagermethoden denkbar.^[10] Zum Beispiel wurden bis zu dem im Jahre 1993 beschlossenen internationalen Verbot^[11] Atommüllfässer im Meer versenkt („*sea dumping*“). Auch die Bundesrepublik Deutschland versenkte im Jahre 1967 insgesamt 480 Behälter mit einem Gewicht von 185 Tonnen vor der Westküste Portugals.^[12]

Eine weitere Möglichkeit ist, den Atommüll unter dem Meeresboden zu platzieren („*sub-seabed disposal*“). Spezielle Vorrichtungen unter den Fässern versetzen diese beim Absinken in Rotation und graben sich samt Fass in den Meeresboden. Ein Problem ist allerdings, dass die Aufprallstelle nicht bekannt ist und dass die Fässer mit heute bekannten Methoden nicht mehr zurückgeholt werden können, sollte dies eines Tages notwendig werden. Ein genereller Kritikpunkt bei der Deposition im Ozean ist, dass die Folgen auf das Ökosystem und auf die Nahrungskette durch den radioaktiven Müll derzeit völlig unklar sind. Ähnliches gilt für eine mögliche Lagerung in Eisschichten beispielsweise an den Polkappen.^[7] Denkbar wäre auch eine Entsorgung im *Weltraum*. Doch die Risiken bei einem Raketenstart werden als zu hoch und das Schadensausmaß bei einem Unfall als unverantwortlich eingeschätzt. Zudem wäre dies eine sehr teure Alternative, da die Raketen eine geringe Nutzlast haben und man sehr viele Starts benötigen würde.^{[2], [7]}

Eine Alternative wäre eine Umwandlung (*Transmutation*) der Atomkerne durch Kernreaktionen in Elemente mit kürzeren Halbwertszeiten, z. B. mittels Neutronenbeschuss. So würden Elemente, die über einen langen Zeitraum radioaktiv strahlen in andere Elemente umgewandelt, welche Ihre Strahlung über einen kürzeren Zeitraum abgeben. Dies hätte eine Verkürzung der Lagerzeit zur Folge. Das Verfahren ist aber technisch sehr komplex, aufwändig und bisher noch nicht realisiert. Deshalb kann es derzeit nicht als Alternative gelten.^{[2], [7]}

Bei jedem Konzept ist abzuwägen, ob eine vollständige Abschottung des Mülls wünschenswert ist oder ob der radioaktive Müll rückholbar gelagert werden soll, für den Fall dass zukünftige Generationen eine

sicherere Lagerstätte oder ein Verfahren finden, um den Atommüll besser zu lagern bzw. unschädlich zu machen.^[13]

Trotz dieser vielen prinzipiellen Möglichkeiten wird derzeit eine *Endlagerung in tiefegeologischen Formationen* wie Salz, Granit oder Ton als realistischste und effizienteste Methode bewertet. In Deutschland wird dabei meist die Lagerung in ca. 1 km tiefen Salzstöcken bevorzugt in Betracht gezogen. Vorteile bei der Salzlagerung sind die gute Wärmeleitfähigkeit, die die starke Wärmeproduktion der Atommüllbehälter ausgleichen kann und die hohe Verformbarkeit, durch die während der Endlagerung entstandene Höhlen automatisch mit der Zeit verschlossen werden. Außerdem ist meist eine Tonschicht über den Salzstöcken vorhanden, die wasserundurchlässig ist und somit einen Eintritt kontaminierten Wassers in die Umwelt verhindert.

Nachteilige Eigenschaften sind die hohe Korrosivität des Salzes, welche die Behälter bei Wassereintritt schnell rosten lässt. Außerdem wurden in vielen bisher untersuchten Salzstöcken Wasserlecks beobachtet, die einen Kontakt der eventuell ausgespülten Radioaktivität mit der Biosphäre ermöglichen können. Ferner besitzt Salz eine schlechte Gasdurchlässigkeit, was einerseits vorteilhaft ist, da gasförmige radioaktive Elemente nicht entweichen können, andererseits ermöglicht diese Eigenschaft auch einen Druckaufbau innerhalb des Salzstockes durch Gaseinschlüsse.

Lager	Lagerungsstätte	Art des Atommülls	Einlagerung seit / ab	Kapazität	Status
Ahaus ^[14]	Lagerhalle aus Stahlbeton	HAW	1992	3.960 t	Lager aktiv
Asse II ^[15]	Salzstock	LAW, MAW	1967	> 46.930 m ³	Schließung geplant in 2017
Gorleben ^[14]	Lagerhalle (Zwischenlager)	LAW, MAW	1983	3.800 t	Zwischenlager aktiv
	Salzstock (Endlager)			unbekannt	Moratorium seit 2000
Morsleben ^[16]	Salzbergwerk	LAW, MAW	1971	> 37.000 m ³	Stabilisierung bis 2010
Schacht Konrad ^[17]	Eisenerz-Bergwerk	LAW, MAW	2013	303.000 m ³	Fertigstellung geplant 2013

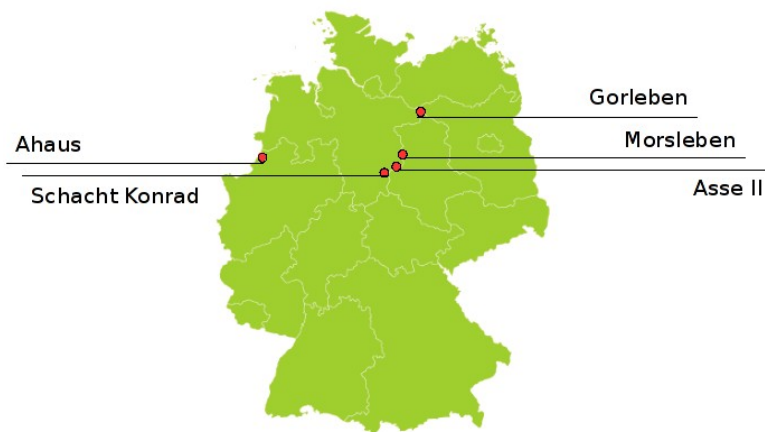


Abbildung 1: Atommülllager in Deutschland

In Deutschland existieren mehrere tiefegeologische Formationen, in die radioaktive Abfälle eingelagert werden können. Beispielsweise gibt es das Forschungslager *Asse (Schacht Asse II)*, an dem die Lagerung in Salzbergwerken erprobt werden sollte, welches aber aktuell durch einen erheblichen Wassereinfluss (ca. 12 m³ pro Tag)^[18] und einer einsturzgefährdeten Kammer^[15] die sichere Lagerung fraglich erscheinen lässt. Es wird sogar aktuell eine Rückholung des Mülls diskutiert. Der Salzstock wird gegenwärtig stabilisiert und

soll nach momentaner Planung bis 2017 geschlossen sein.^[19]

Als Endlagerkandidat wurde lange Zeit der Salzstock *Gorleben* gehandelt. Jedoch wurden während der Erkundung des bis dato ungenutzten Salzstockes viele Probleme bekannt, wie z. B. ein defektes Deckgebirge, mögliche Gaseinschlüsse und kurze Wasserlaufzeiten durch welche kein langfristiger Einschluss durch frühe Grundwasserausflüsse gewährleistet werden kann. Auf Grund dieser Unsicherheiten wurde im Jahre 2000 ein Moratorium beschlossen, welches aber möglicherweise bald wieder aufgelöst wird.^[20]

Das Atommülllager der ehemaligen DDR befindet sich in *Morsleben* und wird zur Zeit aufgrund bestehender partieller Standsicherheitsprobleme bis 2010 stabilisiert.^[21] Auch hier gibt es einen Zufluss von Tropfwasser von ca. 14 m³ pro Tag.^[2]

Deutschlands zukünftiges Endlager für schwach- und mittelradioaktiven Müll (mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) wird die Eisenerzgrube *Schacht Konrad* bei Salzgitter, welche ab 2013 für die Endlagerung vorgesehen ist.^[22] Entscheidend ist hier, dass bei der Lagerung in Sedimenten aufgrund von Grundwasserflüssen kein kompletter Einschluss garantiert werden kann und so nur eine Einhaltung der Grenzwerte angestrebt wird.^[2]

Abschließend sei nochmals angemerkt, dass derzeit weltweit kein Endlager für zivile hochradioaktive Abfälle existiert und dass sich die Experten über die Realisierbarkeit eines solchen Lagers streiten. Kernenergiebefürworter behaupten, dass lediglich politische und keine technische Ursachen für die Verzögerungen bei den Planungs- und Genehmigungsverfahren verantwortlich sind. Kritiker hingegen halten die Prognoseunsicherheit für die genannten Zeiträume für zu groß, um verantwortungsvoll ein Endlager zu errichten. Unstrittig ist jedoch, dass für ca. 120.000 m³ bereits existierenden radioaktiven Abfalls^[23] eine Lösung gefunden werden muss. Ein Kernenergieausbau hätte unmittelbar auch mehr Atommüll zur Folge, der die Problematik weiter verschärft. Somit stellt dies ein Argument für das Beibehalten des derzeit in Deutschland beschlossenen Atomausstiegs dar.

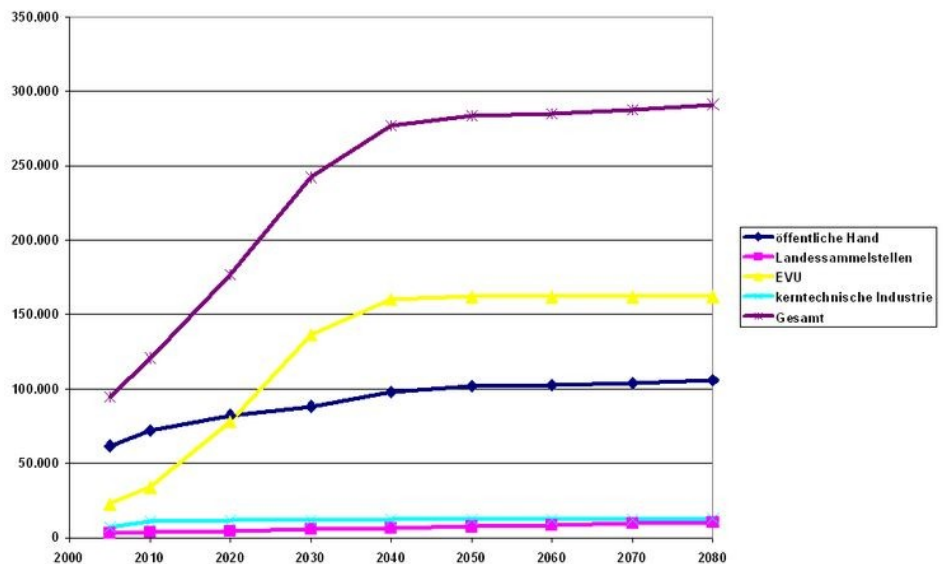


Abbildung 2: Prognose des Gesamtvolumens radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung des „Bundesamtes für Strahlenschutz“ in m³ [23]

Unstrittig ist jedoch, dass für ca. 120.000 m³ bereits existierenden radioaktiven Abfalls^[23] eine Lösung gefunden werden muss. Ein Kernenergieausbau hätte unmittelbar auch mehr Atommüll zur Folge, der die Problematik weiter verschärft. Somit stellt dies ein Argument für das Beibehalten des derzeit in Deutschland beschlossenen Atomausstiegs dar.

Literaturverzeichnis

- [1] Informationskreis KernEnergie: kernenergie.de Lexikon; Februar 2009, http://www.kernenergie.de/r2/de/Gut_zu_wissen/Lexikon/n/natururan.php?navanchor=1210056
- [2] IPPNW - International Physicians for the Prevention of Nuclear War (Herausgeber): Die Endlagerung radioaktiver Abfälle - Risiken und Probleme; S. Hirzel Verlag Stuttgart / Leipzig, 1995
- [3] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Warum wir in Deutschland Endlager für radioaktive Abfälle brauchen; 2008, http://www.endlager-konrad.de/cln_108/nn_1072978/DE/Themen/Entstehung/_node.html?__nnn=true
- [4] Bernard L. Cohen: Risk analysis of buried wastes from electricity generation; American Journal of Physics, Band 54, Ausgabe 1, Seite 38-45, Januar 1986
- [5] BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (W. Boetsch, Arbeitsgruppe RS I 1): Ethische Aspekte bei der Endlagerung radioaktiver Stoffe - Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz; 2003, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs619.pdf
- [6] Roland Posner (Herausgeber): Warnungen an die ferne Zukunft - Atommüll als Kommunikationsproblem; Raben-Verlag (Raben-Streifzüge) München, 1998
- [7] Albert Günter Herrmann: Radioaktive Abfälle - Probleme und Verantwortung; Springer Verlag Berlin / Heidelberg / New York, 1983
- [8] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Rückführung von radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus Frankreich und Großbritannien; September 2008, <http://www.bfs.de/de/endlager/rueckfuehrung.html>
- [9] NDR Online: Das Atommüll-Zwischenlager in Gorleben; November 2008, <http://www1.ndr.de/nachrichten/dossiers/atomkraft/hintergrund/castor6.html>
- [10] Öko-Institut e.V. & Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland; September 2008, <http://endlagerung.oeko.info/>
- [11] IMO - International Maritime Organization: Resolutions LC.51(16) - Amendments to the annexes to the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 1972, concerning disposal at sea of radioactive wastes and other radioactive matter; 1993, [http://www.imo.org/includes/blastData.asp?doc_id=7217/LC%2051\(16\).pdf](http://www.imo.org/includes/blastData.asp?doc_id=7217/LC%2051(16).pdf)
- [12] IAEA - International Atomic Energy Agency: Inventory of radioactive material entering the marine environment: Sea disposal of radioactive waste; Februar 1991, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_588_web.pdf
- [13] Gruppe Ökologie e. V. (Dr. Detlef Appel, Jürgen Kreuzsch, Wolfgang Neumann): Vergleichende Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle - Abschlussbericht; Hannover, 2001
- [14] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Zentrale Zwischenlager; März 2008, http://www.bfs.de/de/transport/zwischenlager/zentrale_zl.html
- [15] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Asse; 2009, <http://www.bfs.de/de/endlager/asse>
- [16] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: ERAM - Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben; November 2008, http://www.bfs.de/de/endlager/morsleben.html/morsleben_artikel.html
- [17] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Homepage Endlager Konrad; 2008, <http://www.endlager-konrad.de/>
- [18] GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (Manfred W. Schmidt, Rainer Gömmel, Heinz-J. Haury): Asse - Ein Bergwerk wird geschlossen; Science&Media München,
- [19] NDR Online: Schachtanlage Asse: Erstes Atommüll-Lager unter der Erde; Januar 2009, <http://www1.ndr.de/nachrichten/dossiers/atomkraft/hintergrund/assezwo102.html>
- [20] BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Gorleben-Moratorium gilt; September 2003, http://www.bmu.de/pressearchiv/15_legislaturperiode/pm/4527.php
- [21] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Verfüllung ausgewählter Grubenbaue im Zentralteil des ERAM; November 2008, http://www.bfs.de/de/endlager/morsleben.html/verfuellung_02.html
- [22] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Verantwortlichkeiten beim Endlagerbetrieb; 2008, http://www.endlager-konrad.de/cln_115/nn_1073268/DE/Themen/Verantwortlichkeiten/_node.html?__nnn=true
- [23] BfS - Bundesamt für Strahlenschutz: Abfallmengen / Prognosen; Dezember 2008, http://www.bfs.de/de/endlager/abfall_prognosen.html