



Weltweit warten hunderttausende Tonnen Atommüll auf ihre Entsorgung abwer wohin damit?

© FooToo/ thinkstock

## Wohin mit dem Atommüll?

### Die schwierige Suche nach einem Endlager

**Das Problem könnte drängender nicht sein: Weltweit warten hunderttausende Tonnen hochradioaktiver Abfälle auf ihre Entsorgung – und jedes Jahr kommen mehr dazu. Doch bisher gibt es weltweit kein einziges Endlager für diesen Atommüll. Nicht einmal über die geeigneten Gesteine, Materialien und Technologien eines solchen Depots herrscht Einigkeit.**

Auch wenn in Deutschland der Atomausstieg beschlossene Sache ist – mit dem Abschalten des letzten Kernkraftwerks im Jahr 2022 ist das Problem noch lange nicht vom Tisch. Es bleibt das strahlende Erbe des Atomzeitalters: verbrauchte Kernbrennstäbe und andere hochradioaktive Überreste. Weil sie noch hunderttausende von Jahren tödliche Strahlung abgeben, müssen sie dauerhaft sicher irgendwo gelagert werden. Denn abbauen, umwandeln oder anderweitig unschädlich machen lassen sie sich nach heutigem Kenntnisstand nicht.

Weltweit ist man sich inzwischen darüber einig, dass unterirdische Endlager zur jetzigen Zeit die machbarste und sicherste Lösung sind. Aber wie muss ein solches Endlager beschaffen sein? Und wie stellt man sicher, dass der Atommüll auch in langen Zeiträumen weder Untergrund noch Grundwasser weiträumig verseucht?

## Das Problem

### Radioaktive Abfälle und ihre Entsorgung

Lange galt die Atomenergie als vielversprechende und sogar umweltfreundliche Alternative zu Kohle, Gas oder Öl. Denn die Kernspaltung setzt keine klimaschädlichen Abgase frei und verbraucht im Vergleich zu fossilen Brennstoffen weniger Ressourcen – so die immer wieder von der Atombranche betonten Vorteile.

### Die Schattenseite der Atomenergie

Doch spätestens seit Tschernobyl und Fukushima ist klar, dass dies nur die halbe Wahrheit ist. Denn Atomkraftwerke sind trotz aller Sicherheitsvorkehrungen nicht unfehlbar. Bedienungsfehler, technische Pannen oder Naturkatastrophen können in schlimmsten Fall zu kaum mehr beherrschbaren Atomkatastrophen führen und ganze Landstriche radioaktiv verseuchen.

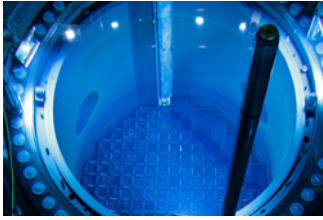
Aber selbst wenn alles glatt läuft, bringt die Atomenergie ein großes Problem mit sich: den Atommüll. Ob abgebrannte



Atomkraftwerke erzeugen hochradioaktive Abfälle, darunter vor allem ausgebrannte Brennstäbe.

© were1962/ thinkstock

Kernbrennstäbe, kontaminierte Kühlflüssigkeit oder verstrahlte Bauteile: Im regulären Betrieb fallen ständig radioaktive Abfälle an. Und das nicht zu knapp: Rund 400 Atomkraftwerke sind weltweit in Betrieb und sie produzieren neben Strom und Wärme jährlich tausende Tonnen radioaktiver Abfälle. Allein beim radioaktivsten Anteil des Atommölls – verbrauchte Brennelemente – kommen jedes Jahr rund 10.000 Tonnen neu hinzu.



Blick in einen Reaktorbehälter des schwedischen Kernkraftwerks Ringhals

© **Vattenfall (CC BY-NC-ND 2.0)**

### 35.000 Kernbrennstäbe – allein in Deutschland

Seit der Inbetriebnahme des ersten Atomkraftwerks haben sich dadurch weltweit rund 370.0000 Tonnen dieser hochradioaktiven Abfälle angesammelt, so die Schätzung der Internationalen Atomenergie Agentur (IAEA). Auch Deutschland produziert – trotz Atomausstieg – weiterhin hochradioaktive Abfälle: Bis zum Abschalten des letzten Kernkraftwerks im Jahr 2022 werden sich rund 35.000 verbrauchter Brennelemente bei uns angesammelt haben.

Dazu kommt noch ein Mehrfaches an mittel- und leichtradioaktivem Atommöll. Dieser entsteht beispielsweise durch den Einsatz von radioaktivem Material in der

Forschung und Medizin, aber auch beim Rückbau von stillgelegten Atomkraftwerken. Nach Angaben des Bundesumweltministeriums fallen davon bei uns insgesamt rund 620.000 Kubikmeter an.

### Bisher nur Zwischenlösungen

Doch wohin damit? Bisher gibt es auf diese Frage keine endgültige Antwort: Weltweit ist bisher kein einziges Endlager für hochradioaktiven Atommöll in Betrieb. Erst im Jahr 2015 erteilte die finnische Regierung als erstes Land zumindest eine Baugenehmigung für ein Endlager. Aber selbst in Staaten wie Frankreich oder den USA, die seit Jahrzehnten einen beträchtlichen Teil ihrer Energieversorgung durch Atomkraft decken, ist man bisher über Planungen und Tests nicht hinausgekommen.

Deshalb werden die Brennstäbe und andere strahlende Relikte zurzeit entweder wiederaufbereitet oder in speziellen Transportbehältern wie den Castoren eingeschlossen und auf dem Gelände der Atomkraftwerke oder in Zwischenlagern aufbewahrt. Doch diese Zwischenlagerung ist bestenfalls eine vorübergehende Lösung, weil die in diesen Abfällen enthaltenen Radionuklide teilweise noch zehntausende von Jahren und länger zerfallen und dabei Strahlung abgeben. So hat Plutonium-239 eine Halbwertszeit von knapp 25.000 Jahren, radioaktives Iod-129 sogar von gut 15 Millionen Jahren.



Ein CASTOR-Behälter mit radioaktivem Abfall aus der Wiederaufbereitungsanlage La Hague auf dem Weg nach Gorleben.

© **KaiMartin/ CC-by-sa 3.0**

Um eine Kontamination der Umwelt zu verhindern, muss dieser Atommöll daher für lange Zeiträume hinweg sicher eingeschlossen werden – und dies möglichst ohne dass ständig Wartungsarbeiten oder andere erhaltende Maßnahmen anfallen. Doch wie und wo eine solche langfristige Aufbewahrung möglich ist, darüber wird bis heute heftig gestritten.

## Unwägbare Risiken

### Was die Endlagersuche so schwierig macht

Fragt man die Atomenergie-Branche, ist die Sache ganz klar: Radioaktiver Müll kommt unter die Erde und damit ist das Problem gelöst. Im Gestein eingeschlossen sollen die Abfälle über Jahrtausende hinweg sicher sein – so heißt es. Tatsächlich gilt die unterirdische Lagerung von hochradioaktiven Abfällen bisher als die einzige machbare und wenigstens halbwegs sichere Lösung. Doch über das Wie und Wo einer solchen Endlagerung im Untergrund gehen die Ansichten teilweise weit auseinander.



### Komplex und jenseits unseres Zeithorizonts

Einer der Gründe dafür: Die Bedingungen in einer unterirdischen Gesteinsformation werden durch ein komplexes Gefüge von Wechselwirkungen bestimmt. Neben der Geologie wirken chemische, physikalische und sogar biologische Einflüsse auf die Materialien ein, die in ein solches Endlager gebracht werden. Was an einem speziellen Standort zum Tragen kommt, kann daher oft erst vor Ort untersucht werden.

Ein Endlager für hochradioaktive Abfälle muss diese hunderttausende von Jahren sicher einschließen

© DOE

Ein weiteres Problem: Ein atomares Endlager muss über hunderttausende oder sogar Millionen von Jahren dicht halten. Welche Prozesse innerhalb dieser enormen Zeitspannen in einem Endlager ablaufen, lässt sich daher im Vorhinein nicht 1:1 erforschen oder simulieren. Bestenfalls können Wissenschaftler über Modelle und Laborexperimente versuchen, mögliche Reaktionen und Wechselwirkungen grob abzuschätzen und hochzurechnen.

Aber auch solche Forschungen bilden nur Teilaspekte der komplexen Wechselwirkung von radioaktivem Zerfall, chemischen Reaktionen und Veränderungen des Untergrunds ab – und dies nur in kurzen Zeitausschnitten. Ob irgendwann in ferner Zukunft nicht doch unerwartete und heute noch unbekannte Reaktionen und Probleme an einem Endlagerstandort auftreten, bleibt unberechenbar.

### "Reichlich Fehler und Versagen"

Hinzu kommt, dass bisherige Versuche und Testanlagen nicht gerade durch eine lückenlose Erfolgsbilanz überzeugen – eher im Gegenteil. "Selbst die begrenzten Erfahrungen mit existierenden Atommülllagern liefern reichlich Beispiele für Fehler und Versagen", sagt der Physiker M.V. Ramana von der Princeton University.

Ein solcher Fall ist die Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in den USA – eines von nur einer Handvoll Endlagern weltweit, in der mittleradioaktive Abfälle, darunter Transurane, eingelagert werden. Im Mai 2014 platzte in einer der Salzkavernen des WIPP ein Behälter mit Transuran-Abfällen auf, radioaktives Plutonium und Americium gelangten bis an die Erdoberfläche und kontaminierten Teile der Anlage und 21 Arbeiter.



Beschädigtes Fass mit radioaktivem Müll in der WIPP: Kontaminiertes Material ist beim Platzen des Behälters ausgetreten.

© DOE

Der Grund für diesen Unfall: menschliches Versagen und schlechte Schlamperei. Oder wie es die Untersuchungskommission formulierte: "Man hat zugelassen, dass die Sicherheitskultur in Teilen dieser Organisation nachließ." Wie sich herausstellte, hatten Arbeiter den Atommüllbehälter mit einem organischen statt einem anorganischen Granulat aufgefüllt – einer Art Katzenstreu, die austretende Flüssigkeit absorbieren soll. Reaktionen in diesem ungeeigneten Material führten zur Gasentwicklung und sprengten schließlich den Behälter.

"Wenn solche Fehler sich schon nach nur 15 Jahren des Betriebs einschleichen, wie soll das dann erst bei Anlagen werden, die über Jahrzehnte hinweg gebaut und befüllt werden", sagt Ramana.



Zufuhrkammer für mittelaktiven Abfall in der Schachtanlage Asse II

© Stefan Brix/ gemeinfrei

### Geologie falsch eingeschätzt: Der Fall Asse

Ebenfalls fatal sind wissenschaftliche Fehler bei der Standortwahl, beispielsweise durch Fehleinschätzungen der geologischen Gegebenheiten. Ein Beispiel dafür ist die Schachtanlage Asse II bei Wolfenbüttel. Zwischen 1967 und 1978 wurden in diesem ehemaligen Salzbergwerk rund 126.000 Fässer mit schwach- und mittleradioaktiven Abfällen eingelagert – darunter auch mehrere Kilogramm Plutonium. Gutachter, Behörden und Betreiber waren sich auf Basis jahrelanger Tests und Untersuchungen sicher, dass dieser Atommüll für Jahrtausende sicher im Salzstock eingeschlossen bleiben würde.

Doch das erwies sich als fataler Irrtum: Der Salzstock ist instabil und undicht: Täglich strömen 12.000 Liter salzhaltiges Grundwasser in die Schachtanlage ein – das entspricht 50 Badewannen voll. Die Salzlauge hat das Material vieler Atommüllbehälter korrodieren lassen und dadurch Lecks verursacht. Aus einigen Lagerkammern tritt bereits radioaktiv kontaminierte Salzlauge aus. Gleichzeitig sind Teile der Anlage einsturzgefährdet.

Um eine Verseuchung des Untergrunds und Grundwassers zu verhindern, bleibt nun nichts anders übrig, als den Atommüll wieder zu bergen und anderweitig zu lagern. Die Kosten für diese Aktion betragen nach Schätzungen der Behörden vier bis sechs Millionen Euro. Bezahlen müssen dies die Steuerzahler, auch wenn gut 80 Prozent der eingelagerten Abfälle aus Kernkraftwerken der großen Stromkonzerne stammen.

Was aber bedeuten diese Erfahrungen für die laufende Suche nach einem Endlager?  
Welche Kriterien und Vorgaben gelten und wo gibt es noch offene Fragen?

## Der Untergrund

### Welches Gestein für das Endlager?

Eine der wichtigsten Entscheidungen bei der Suche nach einem Endlager ist die Beschaffenheit des Untergrunds, der die Kavernen mit dem Atommüll einschließen soll. Dieses Gestein bildet die geologische Barriere gegen die Radioaktivität. Sie muss die Menschheit über Generationen hinweg vor den gesundheits- und umweltschädlichen Folgen einer radioaktiven Kontamination bewahren.

### Welche Gesteine kommen in Frage?

Die Anforderungen sind entsprechend hoch: Das Gestein muss so dicht sein, dass möglichst kein Grundwasser in die Kavernen gelangt und zur Korrosion der Behälter beiträgt. Umgekehrt sollte es den Austritt von radioaktiven Stoffen in umgebende Grundwasserleiter und zur Oberfläche blockieren. Im Idealfall bindet das Gestein zudem Radionuklide und verlangsamt so ihre Verbreitung im Untergrund.

In den meisten Ländern gelten zurzeit drei Gesteinsklassen als geeignet für ein atomares Endlager: Salzstöcke, Ton und kristalline Gesteine wie Granit oder Basalt. Welches davon die größte Sicherheit bietet, darüber gehen die Meinungen jedoch auseinander.



Granit ist ein kristallines Gestein, das als sehr fest und stabil gilt – aber Risse bilden kann.

© **Der Messer/ CC-by-sa 3.0**

### Granit: Stabil, aber rissanfällig

In Schweden wird Granit als Barrieregestein favorisiert. Bereits seit den 1980er Jahren werden in Forsmark an der schwedischen Ostküste schwach- und mittelradioaktive Abfälle in einer Schachtanlage in Granitgestein gelagert. Ab 2025 soll diese Formation auch als Endlager für hochradioaktiven Atommüll genutzt werden. Die Behälter mit dem Atommüll sollen in rund 500 Metern Tiefe eingeschlossen werden.

Der Vorteil von kristallinem Gestein wie Granit liegt in der Stabilität des Materials: Granit ist ein sehr festes Gestein, das hohe Belastungen aushält und Hohlräume umschließen kann, ohne einzustürzen. Das Gestein selbst ist zudem

wasserdicht. Die Kehrseite dieser Festigkeit ist jedoch die Anfälligkeit des Granits für Risse: Weil das Gestein eher spröde ist, bilden sich leicht Spalten und Verwerfungen, durch die dann Wasser einströmen kann.

Ein weiterer Nachteil: Granit bindet austretende Radionuklide kaum. Sind die radioaktiven Materialien einmal aus ihren Behältern ausgetreten, können sie durch Risse relativ schnell und ungehindert verteilt werden. "Eine wesentliche Barrierefunktion im Endlagerkonzept im Wirtsgestein Granit übernimmt deshalb der Abfallbehälter", schreibt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### Ton: Guter Absorber, aber unberechenbar

In Frankreich und der Schweiz setzt man auf Ton als Wirtsgestein für ein Endlager. Eine Tonformation bei Bure in Lothringen ist zurzeit als künftiges Endlager in der Diskussion. Das aus sehr feinen Körnern bestehende Tongestein hat den Vorteil, dass es wasserundurchlässig ist, gleichzeitig aber so weich, dass es mehr oder weniger plastisch auf Druck reagieren kann. Für Ton spricht auch, dass das Material ein guter chemischer Puffer ist und Radionuklide an sich bindet.

Der Nachteil: Ton ist weniger fest als kristalline Gesteine – und jede Tonformation ist anders: "Ton und Tonsteine variieren – abhängig von ihrer Entstehung – vom plastischen Ton mit Übergangsformen bis zum stark verfestigten und geklüfteten Tonstein", so die BGR. "Entsprechend groß sind die Unterschiede im Mineralbestand, Verformungsverhalten, der Temperaturempfindlichkeit und der Gebirgsstabilität."



Der Opalinuston, hier im deutschen Albvorland, ist eine der Tonsteinformationen, die in der Schweiz für ein Endlager untersucht werden.

© **BerndH/ CC-by-sa 3.0**

### Salz: Selbstheilend, aber unzuverlässig

In Deutschland hat man in der Vergangenheit vor allem auf Salzstöcke als Atommüll-



Lager gesetzt. In der Bundesrepublik war dies das ehemalige Salzbergwerk Asse, in der DDR ab 1971 das ehemalige Salzbergwerk Morsleben. Die Gründe dafür: Steinsalz kommt bei uns reichlich vor und wird schon lange abgebaut. Seine geologischen Eigenschaften sind daher relativ gut erforscht.



Salzstöcke, hier in den USA, sind plastisch, aber nicht vollkommen wasserdicht.

© DOE

Lange galten Salzstöcke zudem als ziemlich stabil und wasserundurchlässig – immerhin sind viele Salzformationen Millionen Jahre alt. "Steinsalz verhält sich unter Druckbelastung plastisch, das heißt, das Vorkommen von zusammenhängenden Klüften und Spalten wird weitgehend verhindert", erklärt die BGR. "Falls doch Risse entstehen sollten, heilen diese schnell wieder aus." Außerdem leitet Steinsalz die vom Atommüll erzeugte Wärme deutlich besser ab als Ton oder Granit.

Doch einige Studien und die Erfahrungen bei Asse und Morsleben zeichnen ein weniger positives Bild. Beide

Anlagen haben sich als einsturzgefährdet erwiesen, in Morsleben stürzte bereits 2001 ein 5.000 Tonnen schwerer Salzgesteinsbrocken von der Grubendecke. Ein weiteres Problem: Teile des Salzes sind wasserlöslich. Hat sich das Wasser einmal seinen Weg in die Anlage gebahnt, ist der Einstrom kaum mehr zu stoppen – wie der Fall Asse II eindringlich demonstriert.

### Kein optimaler Kandidat

Damit scheint klar, dass es wohl keinen optimalen Kandidaten für ein Wirtsgestein gibt. Bei allen drei Gesteinstypen müssen bestimmte Nachteile und Risiken in Kauf genommen werden. Unter anderem deshalb herrscht weltweit keine Einigkeit darüber, welcher Untergrund am besten für ein Endlager geeignet ist. Während Frankreich und die Schweiz auf Ton setzen, haben sich Finnland und Schweden für Granit entschieden. In Deutschland werden zurzeit noch mögliche Standorte in allen drei Gesteinstypen berücksichtigt.

Erschwerend kommt hinzu, dass alle Untergründe durch den Bau der Kavernen und Schächte für das Endlager zusätzlichen Belastungen ausgesetzt werden. Bohrungen und Grabungsarbeiten erzeugen Vibrationen und Druckveränderungen im Gestein, die beispielsweise zur Bildung von Rissen führen können. Der hochradioaktive Atommüll gibt zudem Hitze ab, die die Eigenschaften des jeweiligen Gesteins ebenfalls verändern kann.

## Die Behälter

### Auf das Material kommt es an

Um radioaktive Abfälle halbwegs sicher einzuschließen, reicht die geologische Barriere allein nicht aus. Zudem wird sie für den Bau und die Befüllung des Endlagers durchbrochen. Daher wird der Atommüll mit zusätzlichen geotechnischen und technischen Barrieren umgeben, die ein Austreten des Materials verhindern sollen.

### Dicht auch bei Hitze, Strahlung und Korrosion

Die erste Barriere ist der Behälter. Er sollte so konstruiert sein, dass er die radioaktiven Abfälle während des Transports und der Einlagerung von der Umwelt isoliert. Er muss der vom Atommüll abgestrahlten Hitze, der Strahlung und möglichen zersetzenden chemischen Reaktionen widerstehen können. Weil meist mehrere verbrauchte Kernbrennstäbe in einem Behälter gelagert werden, muss das Material zudem sicherstellen, dass der radioaktive Zerfall keine atomare Kettenreaktion auslösen kann.



Transportbehälter für transuranhaltigen Atommüll in den USA.

© DOE/ National Nuclear Security Administration

Im deutschen Standortauswahlgesetz ist außerdem festgelegt, dass die Behälter auch nach Verschließen des Endlagers einige hundert Jahre lang stabil und dicht bleiben müssen – damit eine Rückholung und Umlagerung zur Not möglich ist. Wichtig ist dabei vor allem, dass entstehende radioaktiv kontaminierte Gase nicht austreten können. Um alle diese Anforderungen zu erfüllen, werden bisher verschiedene Ansätze getestet.

### Kupfer: Haltbar bis zu 100.000 Jahre?

Finnland und Schweden setzen für ihre geplanten Endlager auf eine Kombination aus Kupfer und Stahl. Dabei liegen die Brennstäbe einzeln in Fächern aus mit Graphit versetztem Stahl – dieser soll die Neutronen absorbieren und damit eine Kettenreaktion verhindern. Umhüllt ist dieser Innenbehälter von einer fünf Zentimeter dicken

Kupferschicht. Das Metall ist ein guter Wärmeleiter und korrodiert in sauerstofffreier Umgebung nur extrem langsam. Die Behälterhersteller gehen daher von einer Haltbarkeit der Kupferbarriere von rund 100.000 Jahren aus.



Finnischer Endlagerbehälter mit einem Innenteil aus Stahl und einer Außenhülle aus Kupfer.

© Posiva Oy

Dabei gibt es jedoch zwei Haken: Zum einen ist während der Befüllung des Endlagers und in den rund 100 Jahren danach noch genügend Sauerstoff vorhanden, um eine Oxidierung des Kupfers zu ermöglichen. Zum anderen haben Studien gezeigt, dass Kupfer unter bestimmten Voraussetzungen auch in sauerstofffreiem Wasser korrodieren kann. Vor allem Schwefelverbindungen könnten dem Metall im Laufe der Zeit genügend zusetzen, um die Barriere löchrig werden zu lassen.

### Stahl: Korrosion und Gasbildung

Eine andere Behältervariante planen Frankreich und die Schweiz. Sie wollen ihren Atommüll in eine Außenhülle aus dickem Kohlenstoffstahl einschließen. Die größtenteils aus der Wiederaufbereitung stammenden Abfälle werden zuvor in Borosilikatglas eingegossen, dann mit dem von Graphit durchsetzten Metall ummantelt. Auch die zurzeit für den Transport und die Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle eingesetzten Castor-Behälter sind nach diesem Prinzip konstruiert.

Das Problem hierbei: Stahl korrodiert sehr viel schneller als Kupfer. Forscher gehen davon aus, dass die Behälterhüllen schon nach 1.000 bis maximal 10.000 Jahren undicht werden. Die zersetzende Wirkung der Gammastrahlung könnte dies sogar noch beschleunigen. Hinzu kommt, dass bei der anaeroben Korrosion von Stahl Wasserstoffgas entsteht. Sammelt sich zu viel Gas an, könnte der Gasdruck Risse in das umgebende Gestein sprengen.

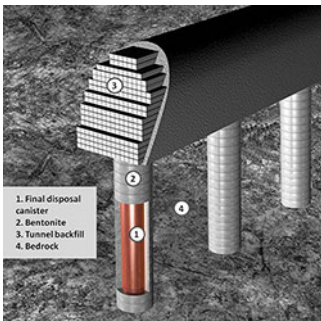
### Eignung abhängig vom Standort

Daraus folgt: Das Design und die Eignung der Endlagerbehälter hängt stark davon ab, in welchem Gesteinsuntergrund das Endlager liegt. Weil Stahl schneller korrodiert, sollten solche Behälter eher in den dichteren Ton- und Salzformationen eingesetzt werden, nicht im potenziell rissigen Granit. Denn die Behälter selbst könnten schon nach relativ kurzer Zeit undicht werden und radioaktive Flüssigkeiten und Gase austreten lassen.

In Deutschland kann deshalb erst dann über ein geeignetes Behälterkonzept entschieden werden, wenn klar ist, an welchem Standort und in welchem Gestein das geplante Endlager liegen wird. In einem Bericht der zuständigen Kommission an den Bundestag heißt es dazu: "Deshalb bietet sich ein iterativer Prozess an, in dem zunächst wirtsgesteinsspezifische Anforderungen an Behälter für alle drei Gesteinsarten ggf. in drei Konzepten mitgeführt werden."

## Das Füllmaterial

### Bentonit als geotechnische Barriere



Geotechnische Barriere dienen dazu, die Behälter einzuschließen und die Zugangsschächte abzudichten.

© Posiva Oy

Um ein Atommüll-Endlager längerfristig dicht zu machen, wird neben dem Untergrundgestein und den Behältern eine weitere Komponente benötigt: eine geotechnische Barriere. Sie dient dazu, die Zugangsschächte und Kavernen aufzufüllen und so die Schachthanlage sicher nach oben hin abzudichten. Gleichzeitig soll diese Barriere die Atommüllbehälter vor Wasser und chemischen Einflüssen schützen, die eine Korrosion beschleunigen würden.

Beton kommt für diese Aufgabe nicht in Frage. Denn die Mischung aus Zement, Kies und Sand hält unter Belastung meist nur wenige Jahrzehnte, bevor sich Risse und Brüche bilden. Hinzu kommt, dass in sich verformenden Wirtsgesteinen wie Ton oder Salz der sprödere Beton nicht flexibel genug ist, um eine anhaltende Abdichtung zu gewährleisten.

### "Wundermaterial" Bentonit

Als geotechnische Barriere der Wahl wird daher in fast allen Endlagerkonzepten ein natürlicher Füllstoff favorisiert: das Bentonit. Dieses Gestein besteht zu 60 bis 80 Prozent aus dem Mineral Montmorillonit, gemischt mit weiteren Tonmineralen. Der Clou dabei: Die besondere Kristallstruktur des Montmorillonits macht das Bentonit extrem

quellfähig.

Das Mineral kann große Mengen Wasser aufnehmen und dabei sein Volumen um ein Mehrfaches ausdehnen. Gleichzeitig lässt sich das Bentonit ähnlich wie Beton in flüssiger Lösung einfüllen und wird dann in Ruhe von selbst fest. Dieses mineralische Dichtungsmaterial ist daher besonders gut dafür geeignet, Hohlräume dicht auszufüllen und eindringendes Wasser aufzusaugen und einzuschließen.

Im Endlager soll das Bentonit die Atommüllbehälter umschließen und dadurch zusätzlich stabilisieren. Gleichzeitig dient es als Puffer, der eindringendes Grundwasser von den Behältern fernhält. Umgekehrt kann das Bentonit die nach Korrosion der Behälter möglicherweise austretenden radioaktiven Flüssigkeiten zumindest zum Teil absorbieren und so deren Verteilung im Untergrund eindämmen – so die Theorie.



Die feinen Kristallstäbchen des Montmorillonits verleihen dem Bentonit seine Absorptions- und Quellfähigkeit.

© **Rob Lavinsky,**  
**[iRocks.com/](http://iRocks.com/) CC-by-sa 3.0**

### Das FEBEX-Projekt

Ob das Bentonit diese Aufgaben auch unter den harten Bedingungen eines Endlagers dauerhaft erfüllen kann, erforschen Wissenschaftler unter anderem im Rahmen des FEBEX-Projekts im schweizerischen Grimsel. Leere Atommüllbehälter wurden dafür mit Ballast und Heizelementen gefüllt und 1997 in den Schächten eines Untergrundlabors in Bentonit eingeschlossen. Mehr als 100 Sensoren messen seitdem die physikalischen und chemischen Veränderungen, die im Bentonit und den Behältern auftreten.

Dabei zeigte sich: Das Bentonit schafft es offenbar auch bei Temperaturen bis 100 Grad, seine Pufferfunktion gegen einen Wassereinstrom zu behalten. Während die Außenbereiche der Bentonitbarriere nach einigen Jahren deutlich aufgequollen und wassergesättigt waren, blieb der Bereich um die Behälter trocken. Studien in Südkorea deuten allerdings darauf hin, dass sich die Bentonitminerale innerhalb längerer Zeiträume in Illite umwandeln können – Tonminerale, die nicht quellen.

Im FEBEX-Versuch stellten die Forscher auch fest, dass sich im Bentonit durch chemische und mikrobielle Reaktionen Gase gebildet hatten – immerhin 350 Liter CO<sub>2</sub> pro 100 Kilogramm Bentonit. Auf Dauer könnte eine solche Gasproduktion Hohlräume in die Mineralbarriere sprengen und so deren Dichtigkeit gefährden. Hier besteht daher noch Forschungsbedarf. Ungeklärt ist auch, inwieweit chemische Wechselwirkungen – beispielsweise mit Korrosionsprodukten der Behälter oder ebenfalls zum Verfüllen genutzte Zement – die Eigenschaften des Bentonits verändern.

## Großexperiment mit ungewissem Ausgang

### Wie geht es nun weiter?

Allen bisherigen Erfahrungen und ungeklärten Fragen zum Trotz verkündet die World Nuclear Association (WNA) auf ihrer Website: "Sichere Methoden für die endgültige Lagerung von hochradioaktiven Abfällen sind technisch belegt." Damit allerdings drückt die Atomenergie-Lobbyorganisation wohl eher Wunschdenken als den bisherigen Kenntnisstand aus.



Ob ein Endlager auch kommende Generationen vor dem Atommüll schützen kann, weiß niemand.

© **Thomas Bethge/**  
**thinkstock**

### Unsicherheiten bleiben

Denn auch nach Jahrzehnten der Forschung sind viele Aspekte der Endlagerung von hochradioaktivem Atommüll alles andere als endgültig geklärt. "Der Weg hin zu einem geologischen Endlager ist geprägt von Überraschungen, neuen Einsichten und der Erkenntnis, dass selbst für die bestuntersuchten Orte Unsicherheiten darüber bleiben, wie sicher diese Anlagen langfristig sind", konstatierte das zuständige Komitee der US National Academy of Sciences vor Kurzem.

Keiner kann sich sicher sein, ob die Lagerung unserer Atomabfälle im Untergrund nicht doch zu einer tödlichen Gefahr für künftige Generationen wird. "Kein Endlager kann Atommüll unendlich lange einschließen", räumt auch Alison Macfarlane, früherer Vorsitzender der US-Atomkommission, ein. "Das Ziel ist es, einen Ort und technische Maßnahmen

zu finden, die die Einschlusszeit maximieren."

Auch wenn einige Länder inzwischen bereits ihre Standortwahl getroffen haben und die ersten Endlager im Bau sind – letztlich ist die atomare Endlagerung ein Großexperiment mit ungewissem Ausgang.

### Keine Alternative

Klar ist aber auch, dass die tausenden Tonnen hochradioaktiver Abfälle nicht ewig in den Lagerhallen der Kernkraftwerke und den zentralen Zwischenlagern stehen bleiben können. Denn weder die Castorbehälter noch die oberirdischen Lagerhallen bieten auf Dauer eine ausreichende Sicherheit. Naturkatastrophen, Angriffe oder auch gesellschaftliche Umstürze können schnell dazu führen, dass diese Depots beschädigt, zerstört oder anderweitig kompromittiert werden.

Im Vergleich dazu erscheinen unterirdische Endlager zumindest als das kleinere Übel – selbst wenn auch sie vermutlich keine optimale und ewige Sicherheit bieten. Auch das Ökoinstitut Freiburg kommt zu diesem Schluss: "Zu einer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen gibt es aus unserer Sicht keine langfristig wirksame Alternative.



Vorkommen der Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Kristallin in Deutschland

© **Oeko-Institut e.V. / CC-by-sa 2.0**

### Deutschland: Auswahlverfahren hat begonnen

Immerhin scheint man in Deutschland zumindest etwas aus vergangenen Erfahrungen gelernt zu haben: Das seit März 2017 geltende Standortauswahlgesetz sieht ein mehrschrittiges Verfahren bei der Suche nach einem deutschen Endlagerstandort vor.

Ausgehend von einer "weißen" Deutschlandkarte sollen geeignete Gesteinsformationen identifiziert und dann nach und nach durch weitere Untersuchungen auf die besten Kandidaten eingengt werden. Jeder Schritt in diesem Ablauf muss im Bundestag und Bundesrat vorgestellt und beschlossen werden. Und: Die Öffentlichkeit soll diesmal ausdrücklich beteiligt werden.

Als Mindestanforderungen gelten: Das Endlager muss durch mindestens 300 Meter Gestein von der Erdoberfläche getrennt sein. Um die Schachtanlagen muss eine mindestens 100 Meter dicke Schicht aus intaktem Granit, Salz oder Ton liegen. Ziel des Auswahlverfahrens ist es, bis zum Jahr 2031 einen Endlagerstandort festzulegen. Im Jahr 2050 könnte dann die Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle beginnen – falls ein geeignetes Endlager gefunden wird.

(Nadja Podbregar, 01.12.2017)

