

Geologie

Geologinnen und Geologen
tauchen ab und untersuchen den Untergrund

Eine Geschichte um den Endlagerbergbau...

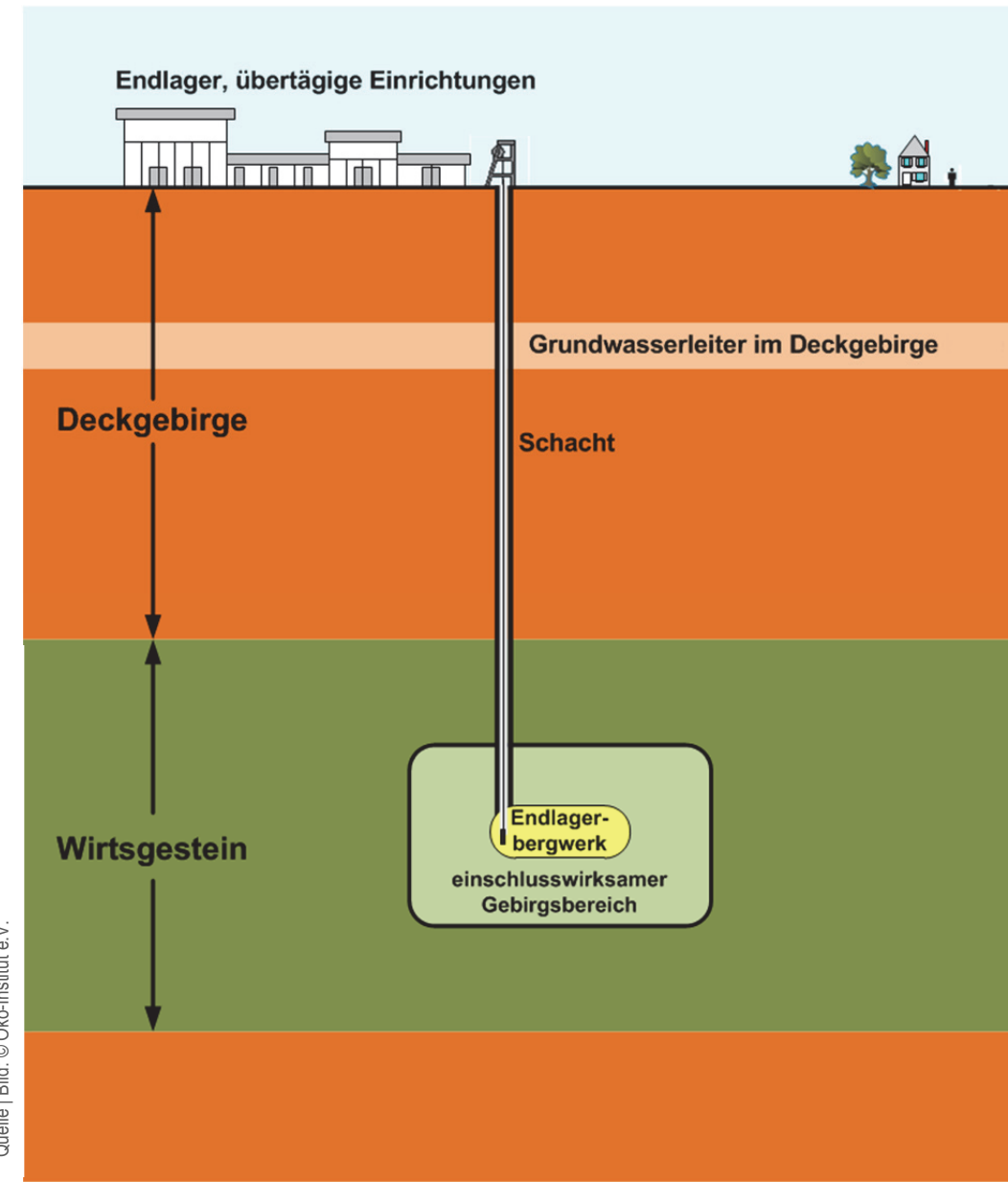
Mehrere hundert Meter unter der Erdoberfläche entsteht ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Mit bewährter Technik wird ein Bergwerk erstellt. Die Teilschnittmaschine bahnt die Wege. Und einige Jahrzehnte später sind die radioaktiven Abfälle in Behältern verpackt und in vorher erstellte Strecken oder Bohrlöcher eingelagert. Die Resthohlräume werden mit Gesteinsmaterial aufgefüllt, in Steinsalz mit Salzgrus, in Ton mit Bentonit, einer Mischung aus verschiedenen Tonmineralien. Sie hat die Eigenschaft, dass sie Wasser aufnimmt, dabei quillt und schließlich gegen zutretende Wässer weitestgehend abdichtet. Im Granit können wasserführende Klüfte nicht ausgeschlossen werden, daher müssen Endlagerkonzepte mit besonders stabilen Behältern entwickelt werden. Hohlräume werden ebenfalls mit Bentonit verschlossen.



Quelle | Bilder: Die Bilder zeigen Geräte, die beim Bergbau eingesetzt werden. © Bundesamt für Strahlenschutz

Das Endlagersystem

Das Endlagersystem schließt alle Bereiche ein, die dem Schutz vor Radionukliden aus dem Abfall dienen. Es besteht aus den geotechnischen Barrieren des Endlagerbergwerks, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich innerhalb des Wirtsgesteins und aus den diesen Gebirgsbereich umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche und Biosphäre, soweit sie sicherheitstechnisch bedeutsam sind. Das Endlagerbergwerk besteht aus all dem, was die Menschen dort gebaut haben: Schächte, Strecken, Kammern mit den darin eingelagerten Abfallgebinden, Verfüllmaterial und Dichtelelementen. Einschlusswirksamer Gebirgsbereich ist der Teil des Wirtsgesteins, der zusammen mit den technischen Verschlüssen des Endlagers den Einschluss des radioaktiven Abfalls sicherstellt.



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

Ein Hindernis, welches Räume trennt oder abgrenzt ist eine Barriere

Für ein Endlager brauchen wir viele und gute Barrieren. Es wird unterschieden zwischen:

Geologischer Barriere: die natürliche geologische Schicht, die aufgrund ihrer Eigenschaften und Abmessungen die Schadstoffausbreitung maßgeblich behindert. Hier sind es der einschlusswirksame Gebirgsbereich, das Wirtsgestein und ggf. das Deckgebirge

und

(Geo-)technischer Barriere: die Verschlüsse der Schächte, Strecken und Bohrlöcher, die Behälter und Abdichtungen nach dem Abschluss der Einlagerung von Abfällen in ein Endlager. Sie dienen einer mittelfristig sicheren Abdichtung, ihre Funktion wird aber langfristig (nach 500-1.000 Jahren) von der geologischen Barriere übernommen.

Zusammenfassung:

Die Idee eines Endlagers ist, dass die Abfälle durch das Wirtsgestein (natürliche oder geologische Gesteinsbarriere) und zu Beginn der Nachbetriebsphase durch technische (an den Behältern) und geotechnische Barrieren (Verfüllmaterial und Verschlüsse) komplett isoliert sind. Nach einigen tausend Jahren soll alleine das Wirtsgestein die Funktion übernehmen.

Bis dahin sind die Behälter mit den Abfällen nämlich undicht geworden.

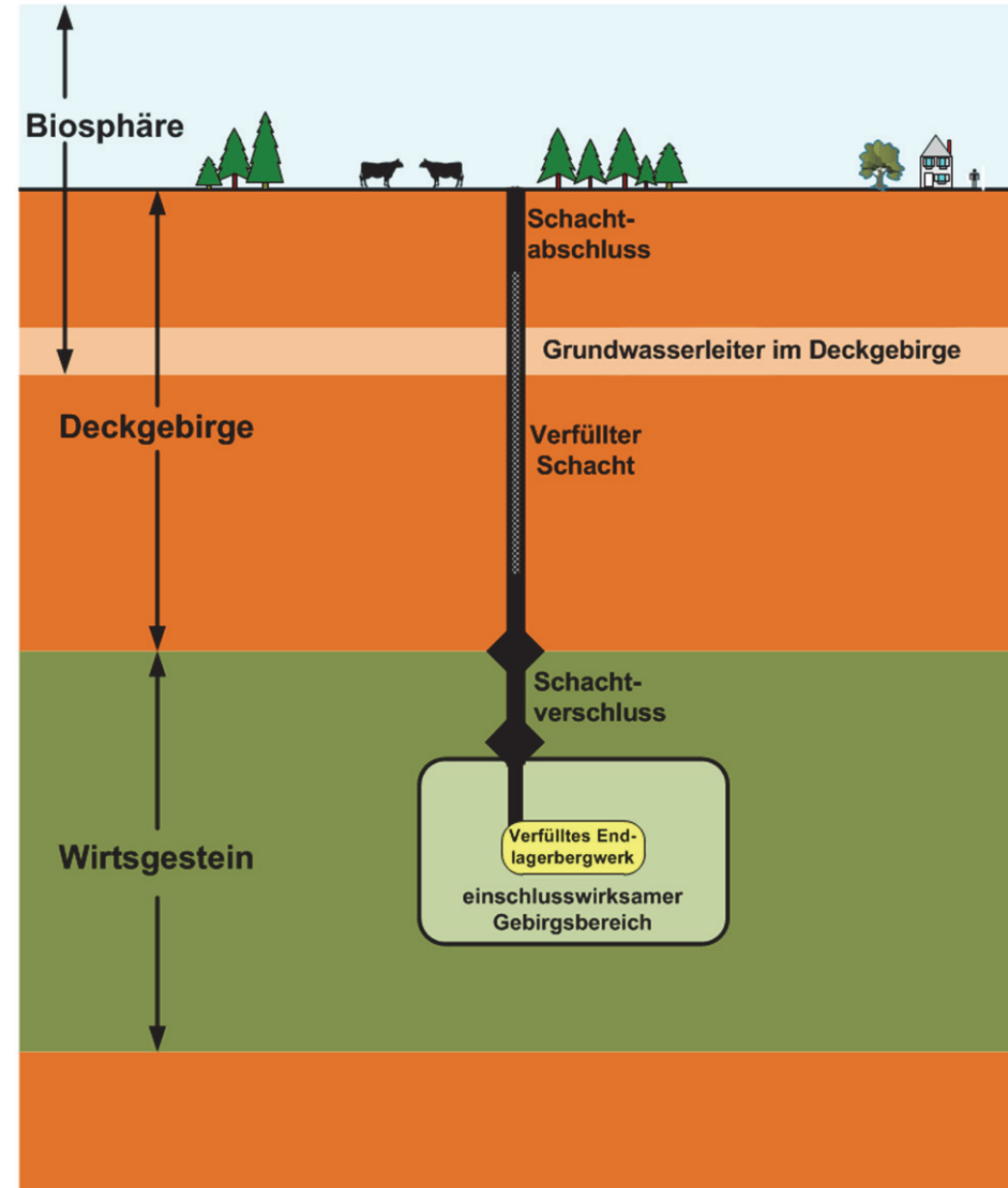
Schritt für Schritt – Phasen der Lagerung

Betriebsphase: In der Betriebsphase wird Atommüll eingelagert. Parallel werden bereits verfüllte Strecken verschlossen und neue Strecken aufgefahren, so dass sich alle drei Phasen überlappen. Dadurch wird verhindert, dass der zuerst eingelagerte Abfall lange frei zugänglich ist. Die Rückholung erfordert daher immer die Freilegung von Abfallgebinden aus einer verschlossenen Strecke oder Kammer.

Stilllegung: Alle Strecken und Schächte werden verfüllt, oberirdische Anlagen werden rückgebaut. Die Dichtfunktion der Verschlüsse muss genauso gut sein wie die der geologischen Barriere.

Nachbetriebsphase: Sie beginnt mit Abschluss der Stilllegung. Die Isolierung des Abfalls soll, nachsorgefrei funktionieren, das bedeutet, dass niemand etwas aktiv dafür tun muss. Die Gebinde sollen in Notfällen weitere 500 Jahre geborgen werden können. Dazu müsste allerdings ein neuer Schacht gebaut werden. Ein Nachweis über die Sicherheit für eine Million Jahre muss geführt werden. Alle Einflüsse wie Kalt- und Warmzeiten, Hebung des Erdreichs oder Erosion (Abtragung) sollen in diesem Zeitraum ohne Einfluss sein.

Quelle | Bild: Endlager in der Nachbetriebsphase © Öko-Institut e.V., 2014



Eine unendliche Endlagergeschichte

Was könnte mit einem Endlager in Steinsalz, Ton oder Granit in den nächsten Millionen Jahren geschehen? (Geschichte nach Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, geändert)

Die Jahre vergehen. Die oberirdischen Anlagen werden abgebaut. Den Rest erledigt die Natur. Das Wissen um das Endlager bleibt mehrere hundert Jahre in Behördenakten. Unter der Erde sollen die Behälter der Abfälle in Steinsalz und Ton 500 Jahre halten. Im Granit dürfen die Kupferbehälter erst nach 200.000 Jahren kleine Lecks aufweisen. Was kann alles in einer Million Jahre geschehen?

Die **Erdbebenzonen** in Deutschland wurden bei der Endlagerplanung gemieden. Erdbeben könnten zur Rissbildung im Wirtsgestein führen. Diese Gefahr besteht auch in **Vulkangebieten** wie der Eifel und dem Vogtland. Magma könnte die Abfälle nach oben transportieren. Das Risiko eines großen **Meteoriteneinschlags** ist überall gleich groß und sehr gering. Zu erwarten sind Veränderungen des Klimas.

Die nächste **Vereisung** auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland kann in einigen 10.000 Jahren erfolgen. Wenn das Eis mit einer Höhe bis über 1.000 m kommt, transportiert es große Gesteinsbrocken mit. Die oberen Erdschichten werden abgetragen. Noch kräftiger ist die Wirkung bei seinem Rückgang. Vor allem durch Schmelzwasserflüsse unter dem Eis können Täler und Rinnen entstehen, die bis zu 500 Meter tief sein könnten. Diese werden beim Rückzug des Gletschers jedoch wieder mit Gesteinsmaterial aufgefüllt. Auch nach einer Million Jahren soll der Abfall noch gut isoliert im Boden sein.

Welche Eigenschaften muss ein Endlagerstandort haben?

Mindestanforderungen

Das Wirtsgestein muss die nötige Dichtheit aufweisen

- Die Dichtheit wird über die Gebirgsdurchlässigkeit bestimmt. Physikalisch heißt das K_f kleiner als 10^{-10} m/s

Das Wirtsgestein muss Platz bieten für den gesamten deutschen wärmeentwickelnden Abfall

- Die Fläche des Endlagers muss auch Platz bieten für die Infrastruktur, die untertage erforderlich ist.

Das Endlager soll zum Schutz vor ungünstigen Standortentwicklungen, in einer ausreichenden Tiefe liegen. Eine Mindestdtiefe muss über 1 Million Jahre gewährleistet sein!

- Mindestens 300 m tief! Dabei sind Besonderheiten der einzelnen Wirtsgesteine und die Lage der Standorte zu berücksichtigen.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss ausreichend dick sein

- In den Wirtsgesteinen Salz und Ton mindestens 100 m

An der Barrierewirkung des Wirtsgesteins über 1 Million Jahre dürfen keine begründeten Zweifel auftreten.

- D.h. Dichtheit, Dicke und Tiefe müssen dauerhaft den Mindestanforderungen genügen.

Wie kommt man von mindestens geeignet zu bestmöglich?

Die Mindestanforderungen werden sicherlich von einer Reihe von Standorten erfüllt werden. Das Endlager soll aber in dem Standort, der die bestmögliche Sicherheit bietet, untergebracht werden. Im Standortauswahlgesetz wurden deshalb zusätzlich **geowissenschaftliche Abwägungskriterien** entwickelt. Das sind Kriterien, die z.B. eine noch bessere Dichtigkeit oder besonders günstige Gesteinseigenschaften festlegen.

Mit den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wird jeweils die **geologische Gesamtsituation** eines Standortes bewertet. Verschiedene Standorte werden dann miteinander verglichen. Der Standort, der im Vergleich am besten abschneidet, soll der Endlagerstandort werden.

Was kommt raus bei einem Standort, wenn seine guten und nicht ganz so guten Eigenschaften zusammengezählt werden?

Und wie ist das im Vergleich zu einem anderen Standort zu sehen?

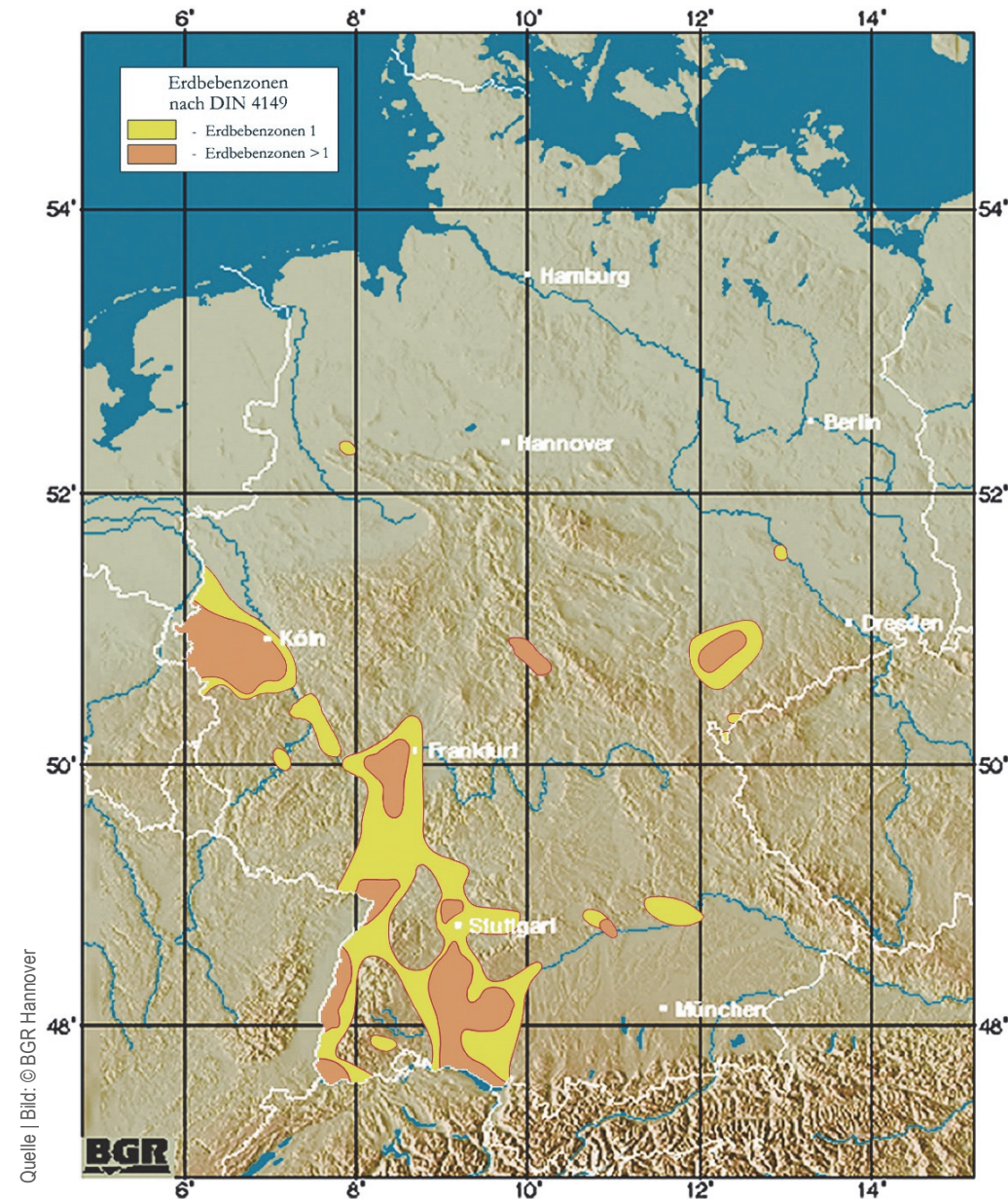
Was macht dann den insgesamt besten Standort aus?

Elementare Spielregeln – Ausschlusskriterien

Geologische No-Gos für Endlagerstandorte

- KEINE Gebirgshebungen – mehr als 1 mm Hebung pro Jahr ist zu viel,
- KEINE aktiven Störungszonen, d.h. in den letzten ca. 34 Millionen Jahren dürfen in den Gesteinsschichten kein Gesteinsversatz, Zerrüttungszonen oder Brüche entstanden sein,
- KEINE Gebiete, die durch Bergbau vorgeschädigt sind
- KEINE Erdbebengebiete (seismische Aktivität),
- KEIN Vulkanismus,
- KEIN junges Grundwasser, das wäre ein Hinweis auf eine Verbindung zum genutzten Grundwasser oder dem Eintrag von Niederschlagswasser

Erdbebenzone > 1 bedeutet auf jeden Fall Ausschluss für einen Endlagerstandort.



Der Wirt im Gasthof der Endlagerung ist das Wirtsgestein

Das Gestein, in dem das Endlager errichtet wird, wird Wirtsgestein genannt. International werden unterschiedliche Gesteinsarten untersucht:

- Steinsalz
- Tongestein
- Kristallingestein (z.B. Granit)



Quelle: Bilder: © Öko-Institut e.V.

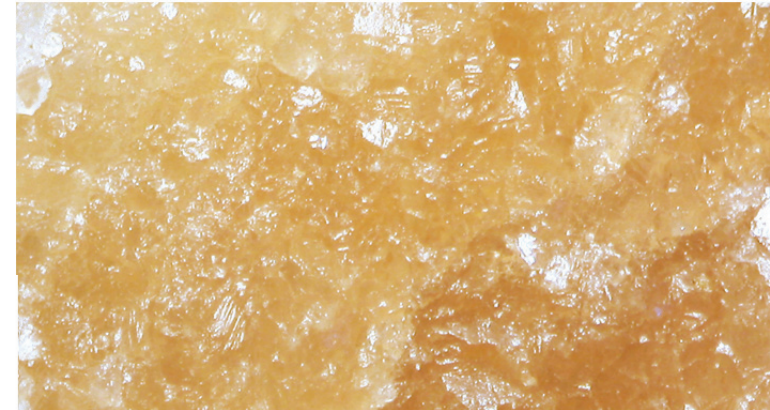
In Deutschland gibt es alle drei Wirtsgesteinsarten. Bisher wurde hauptsächlich Steinsalz untersucht, da die Eigenschaften wie Dichtheit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen sowie die Selbstheilungseigenschaften für Steinsalz sprachen. In den anderen europäischen Ländern, die nach Endlagern suchen, gibt es nicht immer alle Gesteinsarten. Daher müssen jeweils die Gesteinsschichten auf ihre Eignung untersucht werden, die vorhanden sind.

Die Gastwirte präsentieren sich

Ich bin Granit! Ich bin unglaublich stabil! Die Untertagebauten unserer Gastwirtschaft stehen sicher auch ohne bauliche Maßnahmen. Allerdings gibt's mich fast nur geklüftet (mit Trennflächen und somit beweglichen Spalten) und ich bin deshalb nicht immer ganz dicht. Deswegen braucht der Abfall in mir zusätzlich zeitlich zuverlässige technische Barrieren (hochwertige Behälter), mein Sorptionsverhalten ist leider nicht so toll...



Ich bin ein Steinsalz! Durch Verformung kann ich den Abfall rasch und vollständig einhüllen (je wärmer umso schneller). Ich habe eine sehr geringe Durchlässigkeit, weshalb ich Schadstoffe vollständig und trocken einschließe. Meine Schwäche ist, dass mir Wasser gar nicht bekommt, da löse ich mich auf! Ich habe nur ein geringes Sorptionsvermögen. Dafür bin ich aber tolerant gegenüber Wärme. Es gibt mich in wirklich sehr dicken Schichten! Bin ich gefüllt und unbeschädigt ist die vollständige Isolation der Radionuklide gewährleistet.



Ich bin ein Tonstein! Ich bin quasi unauflöslich! Man kann mich fast nicht abtragen, bei Eindringen von Wasser habe ich Selbstheilungskräfte! Außerdem bin ich sehr wasserundurchlässig und kann gut absorbieren. Wärme kann ich leider nicht sehr gut ertragen. Daher sollten wärmeentwickelnde Abfälle in größerem Abstand eingelagert werden – die Gastwirtschaft muss bei



Quelle | Bilder: © Öko-Institut e.V.

Eigenschaften der betrachteten Wirtsgesteine

In der nebenstehenden Tabelle finden sich die Gesteinseigenschaften, die generell für bestimmte Wirtsgesteine gelten. Im Einzelnen müssen die Standorte dennoch genau untersucht werden.

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein (z. B. Granit)
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	durchlässig bis gering durchlässig (Abhängig von Klüftung)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr schlecht	sehr gut	bestenfalls mittel bis schlecht
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch
Hohlraumstabilität	hoch (Eigenstabilität)	gering (Ausbau notwendig)	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)

 günstig
  mittel
  ungünstig

Quelle | Bild: Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine / nach © BGR Hannover

Endlagerkonzepte nach Wirtsgestein

Je nachdem, welches Gestein vorliegt, in dem ein Endlager errichtet werden soll, muss ein entsprechend anderes Konzept verwendet werden.

Komponenten	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein (z. B. Granit)
Einlagerungssohle	ca. 900 m	ca. 500 m	500 - 1200 m
Lagerungstechnik*	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher oder Strecken
Auslegungstemperatur	max. 200° C	max. 100° C	max. 100° C (Bentonitversatz)
Versatzmaterial*	Salzgrus	Bentonit	Bentonit
Zwischenlagerzeit (BE u. HAW-Kokillen)	min. 15 Jahre	min. 30 - 40 Jahre	min. 30 - 40 Jahre
Streckenausbau	nicht erforderlich	erforderlich, ggf. sehr aufwändig	in stark geklüfteten Bereichen erforderlich
Behälterkonzept	vorhanden	für Deutschland neu zu entwickeln	für Deutschland neu zu entwickeln
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	groß (Erzbergbau)

* wird an das jeweilige Wirtsgestein angepasst

 günstig

 mittel

 ungünstig

Quelle | Bild: Eckpunkte der Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen / nach © BGR Hannover

Internationale Endlagersuche

Neben Steinsalz werden international Tonstein oder Granit/Kristallin als mögliche Endlagerformationen diskutiert. Ihre nationale Bedeutung hängt von der Verfügbarkeit innerhalb der Landesgrenzen ab.

In der Schweiz, in Frankreich und in Belgien werden Standorte mit Tonsteinvorkommen erkundet.

In Schweden und Finnland werden Standorte in Granitgestein untersucht.

Der Versuch, in den USA ein HAW-Endlager in einem vulkanischen Tuff einzurichten (Yucca Mountain), ist letztlich gescheitert.

„Sonderfall“ Schacht Konrad bei Salzgitter: Ehemaliges Eisenerzbergwerk innerhalb einer Tonsteinformation.

Deutschland verfügt neben Steinsalz auch über Vorkommen von Tonstein und Granit. Ob letzterer in genügender Qualität vorhanden ist, ist umstritten. Der Granit hierzulande ist häufig stark geklüftet (also löchrig).

„Das Positive [am Standort Yucca Mountain] ist, dass es (...) weit weg von allen Siedlungen ist und dass dort seit 12.000 Jahren Wüste ist. (...) Dort gibt es [allerdings] Erdbeben, es ist ein vulkanisch aktives Gebiet, man weiß, dass dort im Untergrund vulkanische Quellen sprudeln, das Grundwasser zirkuliert viel schneller als man gedacht hat. Das heißt, all diese geologischen Hindernisse sprachen eigentlich dagegen, überhaupt dort ein Endlager zu errichten, so dass die Experten da gar nicht glücklich mit gewesen sind...“

Dagmar Röhrlich 2010 im Deutschlandfunk

Was wissen wir über Wirtsgesteine hierzulande?

„**Tonstudie**“ (**BGR 2007**) kommt zu dem Schluss, dass es in Deutschland Verbreitungsgebiete mit vielleicht ausreichend dicken und homogenen Tonformationen gibt, die als „Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinsinformationen“ bezeichnet werden, dass konkrete Standorte aufgrund der dünnen Datenlage nicht benannt werden können und dass für die Bewertung von Tonsteinen ein aufwendiges Untersuchungsprogramm erforderlich wäre.

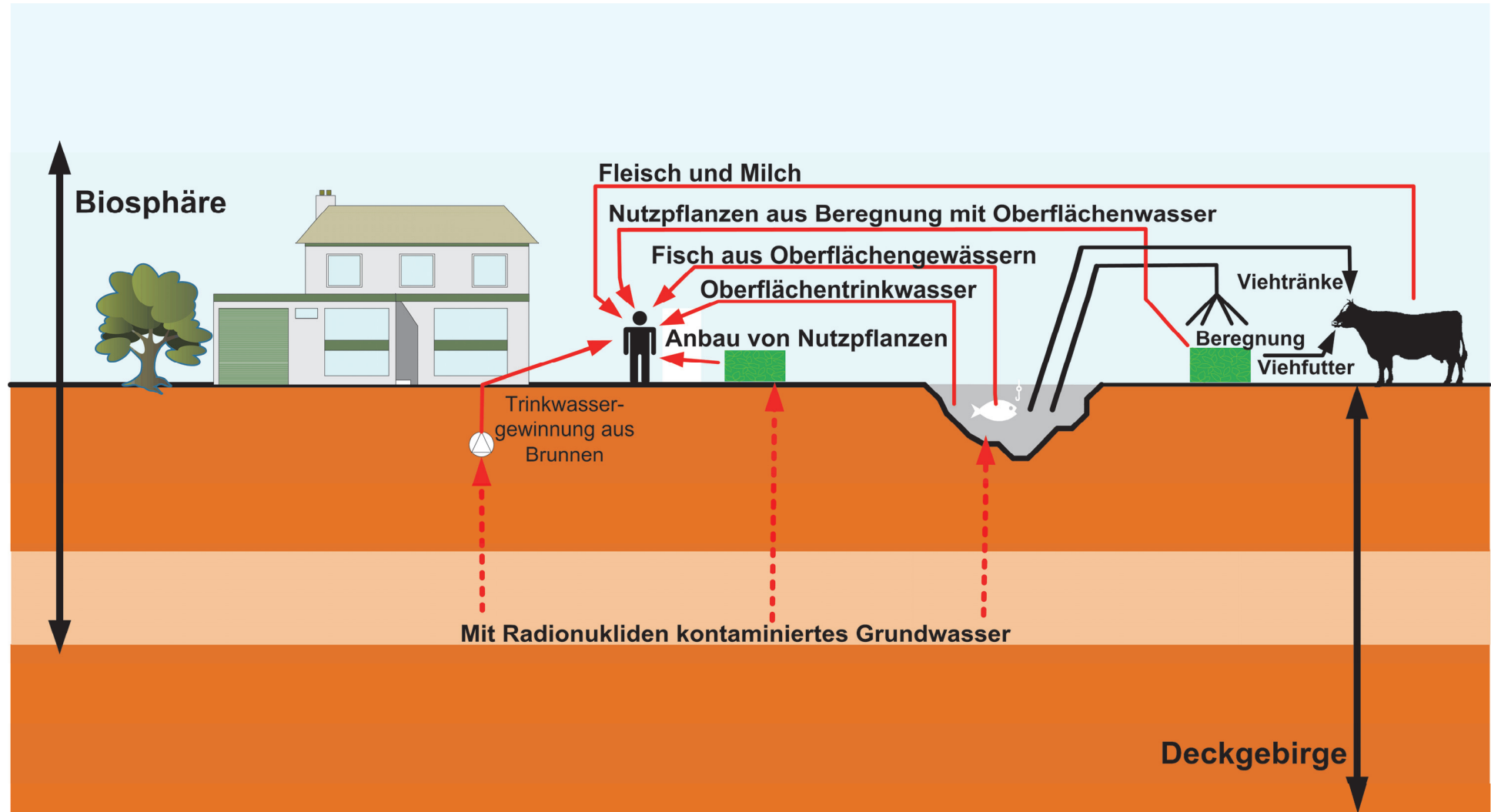
Die „**Kristallinstudie**“ (**BGR 1994**) kommt zu dem Schluss, dass die ggf. geeigneten Vorkommen in Deutschland aufgrund konkurrierender Nutzung in der verfügbaren Fläche stark eingeschränkt sind. Für weiterführende Diskussionen werden Vorkommen in den Regionen Bayrischer Wald/Fichtelgebirge, Erzgebirge/Vogtland, Lausitz und Halle/Wittenberg benannt.

„**Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland**“ (**BGR 2007**) „Aus den bisherigen Bergbauerfahrungen und geologischen Befunden geht hervor, dass in Deutschland homogene und ungeklüftete Bereiche im Kristallin in einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes notwendigen räumlichen Ausdehnung nicht zu erwarten sind.“

Die „**Salzstudie**“ (**BGR 1995**) kommt zu dem Schluss, dass es außer Gorleben bei 43 untersuchten noch mindestens vier weitere Steinsalzstöcke gibt, die im Hinblick auf Tiefenlage und Geometrie, Dicke des Deckgebirges, Querschnittsfläche, Alter und konkurrierende Nutzung untersuchungswürdig sind. Der Salzstock Gorleben wurde in der Studie nicht bewertet. Er wurde zu dieser Zeit schon erkundet.

„**GENESIS**“ (**DBE tec 2007**) benennt vier „Modellstandorte“ im Tonstein. Als mögliche Standortregionen werden Minden/Hameln, Großburgwedel, Ulm und Jestetten benannt.

Risiken und Langzeitsicherheit (I)



Risiken und Langzeitsicherheit (II)

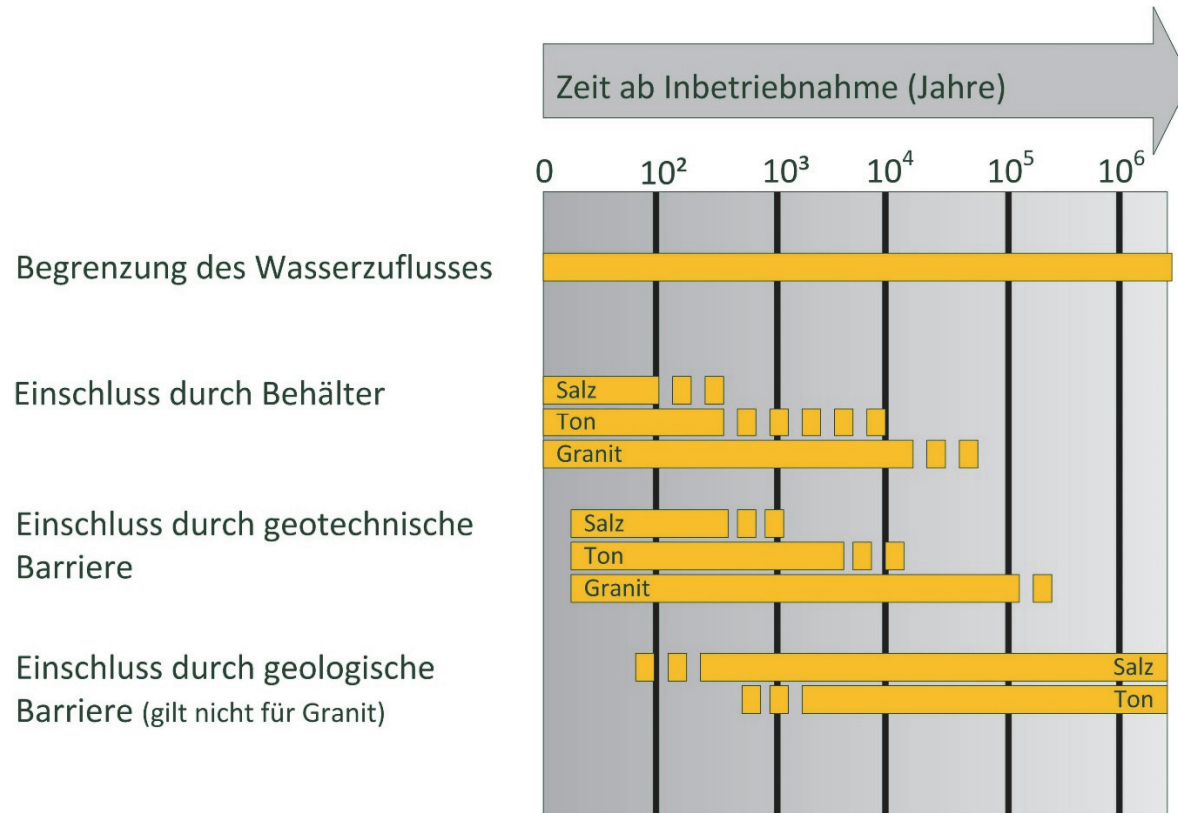
Für die Einhaltung der Schutzanforderungen in einem Endlager kann keine zeitliche Grenze hergeleitet werden. Der Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre wird hilfsweise verwendet. Darin schwingt die Erwartung mit, dass das geologische System auch darüber hinaus stabil ist. Über den Nachweiszeitraum wird die „Langzeitsicherheitsanalyse“ durchgeführt.

Hauptschritte der Langzeitsicherheitsanalyse:

- Erstellung eines Katalogs von Szenarien.
- Modellentwicklung der Prozesse.
- Beschreibung der Prozesse und Szenarienabläufe mit numerischen Modellen.
- Berechnung der Konsequenzen und Analyse dieser im Hinblick auf die Schutzziele.
- Durchführung weiterer Analysen zur Bewertung und Ermittlung von Unsicherheiten.

Das dargestellte Biosphärenmodell zeigt die Wege, die Radionuklide nehmen könnten, wenn sie austreten würden: Ein Teil gelangt ins Grundwasser, Kühe trinken kontaminiertes Wasser, Menschen trinken Milch usw. Im Ergebnis dürfen auch im Störfall heutige Strahlenschutzwerte nicht überschritten werden.

Sicherheitsfunktionen über die Zeit



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V., 2017

Die Bedeutung der verschiedenen Sicherheitsfunktionen und Barrieren verändert sich mit der Zeit. Während den Behältern beispielsweise zu Beginn der Endlagerung eine große Bedeutung zukommt, übernimmt die geologische Barriere die Aufgabe des Einschlusses nach einigen hundert bis tausend Jahren.

Im Granitgestein übernimmt das Konzept aus Behälter und geotechnischer Barriere den Einschluss der Radionuklide.

Warum bleibt die Bedeutung der Begrenzung des Wasserzuflusses gleichbleibend hoch?

Wasser und Endlagerung – Wo ist das Problem?

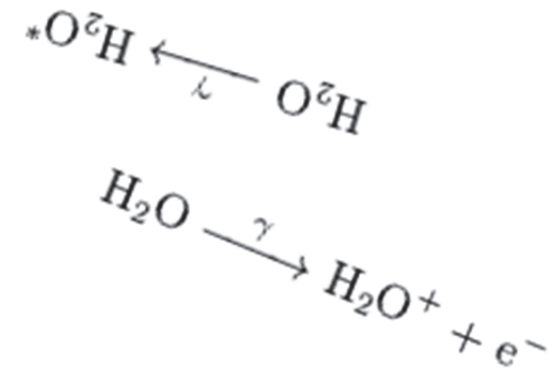
Wie kann überhaupt Wasser ins Endlager kommen?

- In Wirtsgesteinen mit hydraulischem Durchfluss (Granit) durchströmt Grundwasser den Einlagerungsbereich.
- In Wirtsgesteinen ohne hydraulischen Durchfluss (Tonstein, Salz) diffundiert Poren- oder Formationswasser in den Einlagerungsbereich.

Wasser löst und transportiert Radionuklide.

Nach Durchdringen des Versatzmaterials korrodieren die Behälter (Metall-Wasser-Reaktion). Dringt Feuchtigkeit in den Bereich des Brennstoffes, können dessen lösliche Bestandteile aufgelöst werden. In Wirtsgesteinen mit hydraulischem Durchfluss wird die kontaminierte Lösung mit dem Durchfluss transportiert. Dabei können sie im Gestein sorbiert werden. In Wirtsgesteinen ohne hydraulischen Durchfluss diffundieren die gelösten Schadstoffe entsprechend ihrer Diffusionsgeschwindigkeit durch die Matrix. Dabei können sie ebenfalls im Gestein sorbiert werden.

So wenig Wasser wie möglich sollte so langsam wie möglich den radioaktiven Abfall erreichen.



Quelle | Bild: Wirtsgesteine in Deutschland (grün: Ton, blau: Salz, pink: Kristallin) © Öko-Institut e.V.

Vieles unklar



Obwohl bereits vieles erforscht wurde, sind immer noch reichlich Fragen offen. So müssen alle Eigenschaften für jeden Standort und jedes Wirtsgestein getrennt in untertägigen Erkundungen untersucht werden.

Es ist sehr teuer und langwierig, einen Standort zu erkunden. Erkunden wir aber nur einen Standort oder eine „Sorte“ von Standort, ist die Gefahr gegeben, dass dieser zu guter Letzt nicht infrage kommt.

Dann stehen wir wieder ohne Endlager da!