

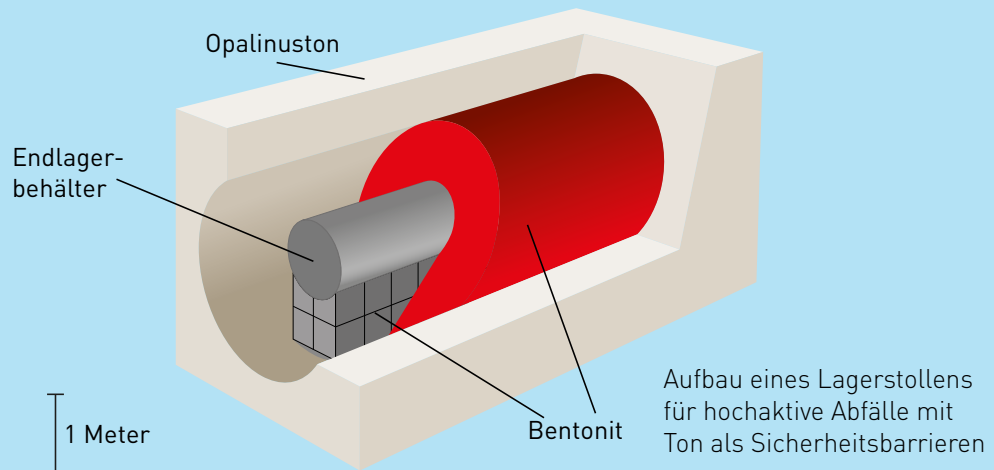
ton- gesteine

und ihr beitrage
zur lagerung der
radioaktiven abfalle



nagra ● aus verantwortung

Zu diesem Heft



Tone spielen im Schweizer Konzept für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle eine wichtige Rolle. Das geologische Tiefenlager (vgl. Glossar) soll dereinst im Opalinuston gebaut werden. Der Opalinuston wird deshalb als Wirtgestein bezeichnet. Das Gestein besteht hauptsächlich aus Ton. Auch das Verfüllmaterial Bentonit in einem Lager für hochaktive Abfälle hat einen hohen Tonanteil.

Warum Ton? Er hat viele Vorteile, die wesentlich zur Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers beitragen. Zu seinen Eigenschaften zählen seine Quellfähigkeit und dass er radioaktive Stoffe (Radionuklide, vgl. Glossar) zurückhalten kann, bis diese durch radioaktiven Zerfall unschädlich geworden sind.

In diesem Heft wird beispielhaft ein geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle (vgl. Glossar) und abgebrannte Brennelemente betrachtet.

Tongesteine – und ihr Beitrag zur Lagerung der radioaktiven Abfälle

Die Nagra veröffentlicht in loser Folge Themenhefte zur nuklearen Entsorgung
Dezember 2019

Titelbild: Julia Buschbeck – wissenschaftliche Illustration

| | |
|--|----------------|
| Was sind Tongesteine? | 4 - 9 |
| Das Wirtgestein Opalinuston | 10 - 15 |
| Die Rahmengesteine: eine weitere Barriere | 16 - 17 |
| Der Bentonit: Verschluss für die Lagerstollen | 18 - 19 |
| Analoga in Ton: Die Natur macht es vor | 20 - 21 |
| Glossar – zum Weiterlesen | 22 - 23 |

Was sind Tongesteine?

Die Schweiz will die radioaktiven Abfälle im Opalinuston lagern. Wie der Name schon vermuten lässt, ist der Opalinuston ein Tongestein. Tongesteine sind weitverbreitet und entstehen sowohl an Land als auch im Meer. Sie haben chemische und physikalische Eigenschaften, die für ein geologisches Tiefenlager eine wichtige Rolle spielen.

Wie entstehen Tongesteine?

Tongesteine sind meistens ein Gemisch aus verschiedenen Mineralen. Diese Gesteine bestehen jedoch nicht nur aus Tonmineralen, sondern haben auch Anteile von Quarz, Feldspat und Kalzit (Kalk). Nur Gesteine, die überwiegend aus Tonmineralen bestehen, werden als Tongesteine bezeichnet. Tonminerale können zum Beispiel durch die Verwitterung von Feldspat, wie er im Granit zu finden ist, oder von vulkanischem Glas (Obsidian) entstehen. Mit Wasser wandeln sich die ursprünglichen Minerale mit der Zeit chemisch in Tonminerale um (vgl. Abb. 2). Durch Flüsse werden diese Minerale in Seen oder ins Meer transportiert (vgl. Abb. 3). Dort lagern sich die Minerale auf dem Grund ab. Dabei entsteht ein Tonschlamm, der zu 50 bis 60

Prozent aus Wasser besteht. Wird immer mehr Material auf dieser Schicht abgelagert, wird das Wasser ausgepresst. Zum Schluss bleibt ein Tongestein mit typischerweise 10 bis 15 Prozent Wasseranteil in mikroskopisch kleinen Poren übrig.

Mit Ton werden zudem auch sehr kleine Gesteinspartikel bezeichnet. In der Regel liegt die Korngrösse in Tongesteinen unter 0,002 Millimeter, was etwa einem Zwanzigstel des Durchmessers eines menschlichen Haars entspricht.

Abbildung 1

Im Laufe von Jahrmillionen können durch Ablagerung im Meer mächtige Sedimentgesteine entstehen (Bild rechts: Tongrube bei Frick, Kt. Aargau).
Foto: Nagra

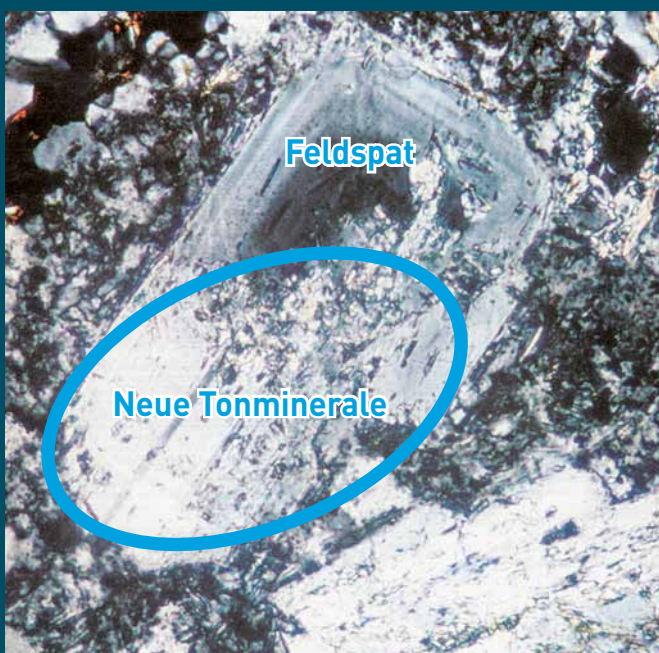
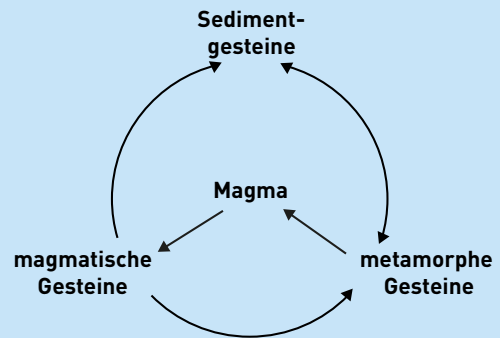


Abbildung 2

In der Bildmitte ist ein Feldspat zu sehen. Durch natürliche Verwitterung sind im unteren Teil des Kristalls neue Tonminerale entstanden (Bildbreite zirka 0,85 mm).
Foto: Decher und Friedrich (1991)



Kreislauf der Gesteine



Gesteine entstehen in einem sehr langsamen Prozess, der in der Regel Hunderte von Millionen Jahren dauert. Durch Veränderung geht in diesem Prozess ein Gestein aus dem anderen hervor. Gebirge bilden sich, werden abgetragen und aus dem abgetragenen Material entstehen Sedimentgesteine (vgl. Abb. 1). Gesteine können in grosse Tiefen versinken und unter hohem Druck und hoher Temperatur umgewandelt oder aufgeschmolzen werden. In diesem Kreislauf ist auch das Tongestein Opalinuston als Sedimentgestein entstanden.



Abbildung 3
Entstehung von Tongesteinen: Verwittertes Gestein wird abtransportiert und wieder an Land oder im Meer abgelagert. Nach: Iwan Stössel

Tonminerale: Aufbau bestimmt

Es gibt nicht ein einziges Tonmineral, sondern viele verschiedene. Sie gehören zu den sogenannten Schichtsilikaten, die nach einem bestimmten Muster aufgebaut sind und einzelne Plättchen ausbilden, die in Schichten übereinander liegen. Sie unterscheiden sich hauptsächlich chemisch und strukturell.

Tonminerale können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die eine Gruppe ist quellfähig, die andere nicht (vgl. Abb. 4). Diese Eigenschaft lässt sich auf die elektrisch negativ geladene Oberfläche der Tonplättchen zurückführen.

Nicht nur die elektrische Ladung der Plättchen beeinflusst die Eigenschaften, auch die Grösse der Oberfläche der Minerale ist massgebend.

Grosse Oberfläche

Die kleinen Korngrössen führen zu einer inneren (spezifischen) Oberfläche der Tonminerale von bis zu achthundert Quadratmeter pro Gramm. Eine wichtige Auswirkung davon ist das grosse Potenzial, positiv geladene Teilchen (Kationen) einzufangen und zu binden (vgl. Abb. 4). Diese Fähigkeit wird Sorption genannt und ist wiederum eine Folge der negativ geladenen Minerale.

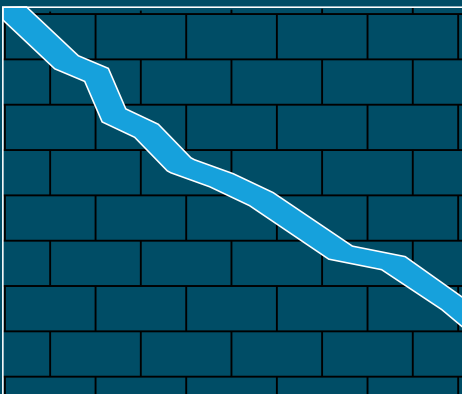
Abbildung 4

In Tonmineralen bestimmt der atomare Aufbau, ob das Mineral quellfähig ist oder nicht. Tonminerale mit einer geraden Anzahl von Schichten haben eine geringere negative Ladung als Tonminerale mit einer ungeraden Schichtanzahl. Bei einer hohen negativen Ladung können sich positiv geladene Teilchen und Wasser zwischen den Schichten einlagern.
Nach: Jasmund und Lagaly (1992)

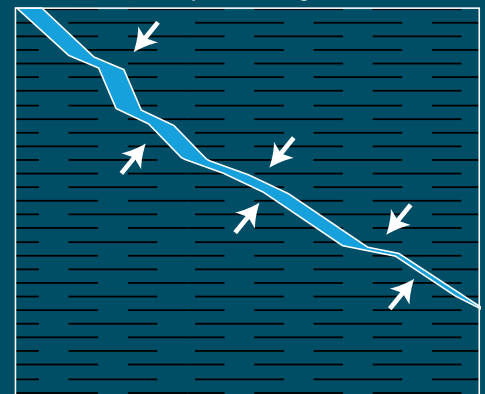
Tongesteine sind quellfähig

Bei den quellfähigen Tonmineralen kann Wasser zwischen den Schichten eingelagert werden. Dies führt zu einer Volumenzunahme des Tons. Im Gegensatz zu anderen Gesteinen (z. B. Kalkstein) können Risse durch Aufquellen schnell verschlossen werden.

Kalkstein
nicht quellfähig



Tongestein
quellfähig



Eigenschaften

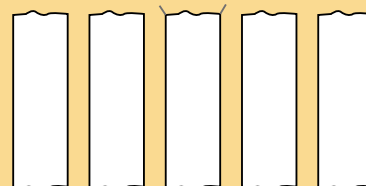
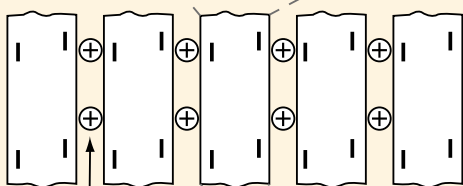
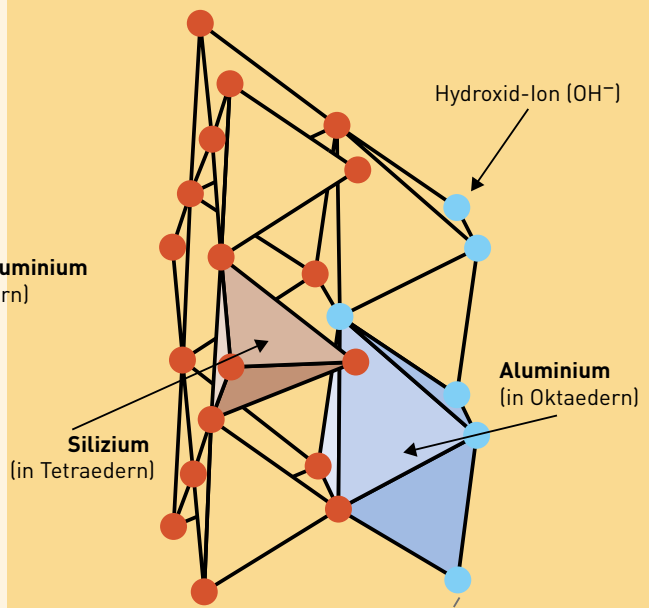
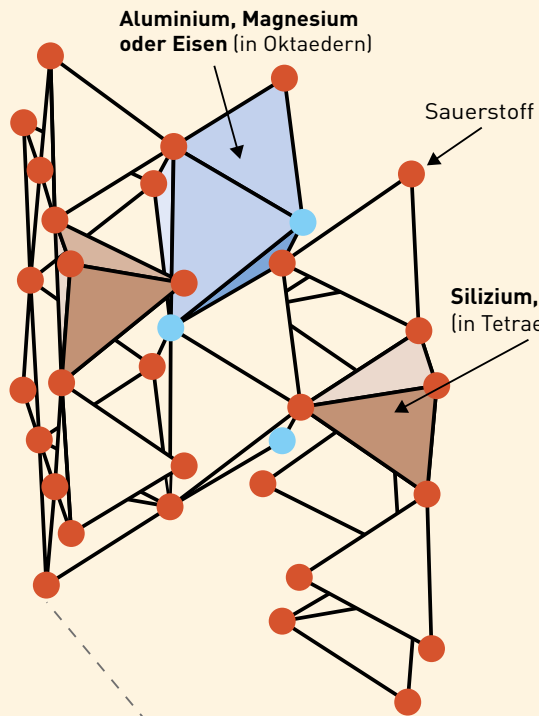
quellfähig

nicht quellfähig

T - O - T

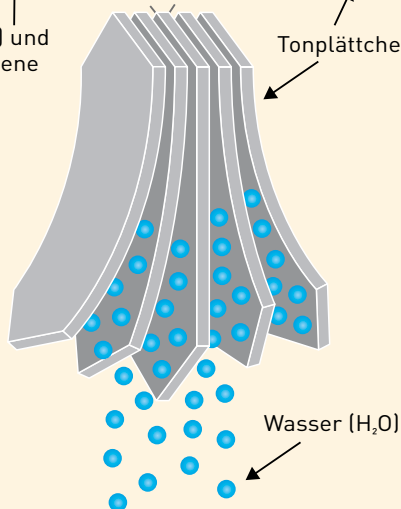
T = Tetraederschicht
O = Oktaederschicht

T - O



Wasser (H₂O) und positiv geladene Teilchen

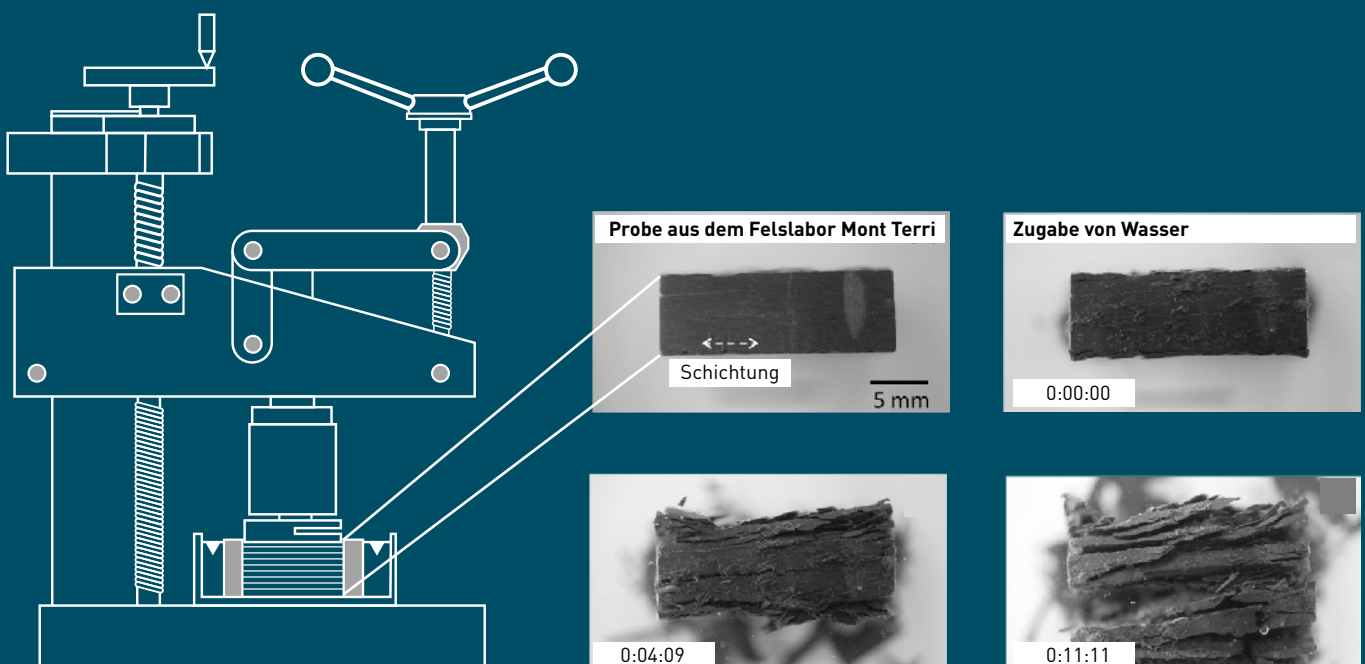
Tonplättchen



Druckaufbau durch Quellen

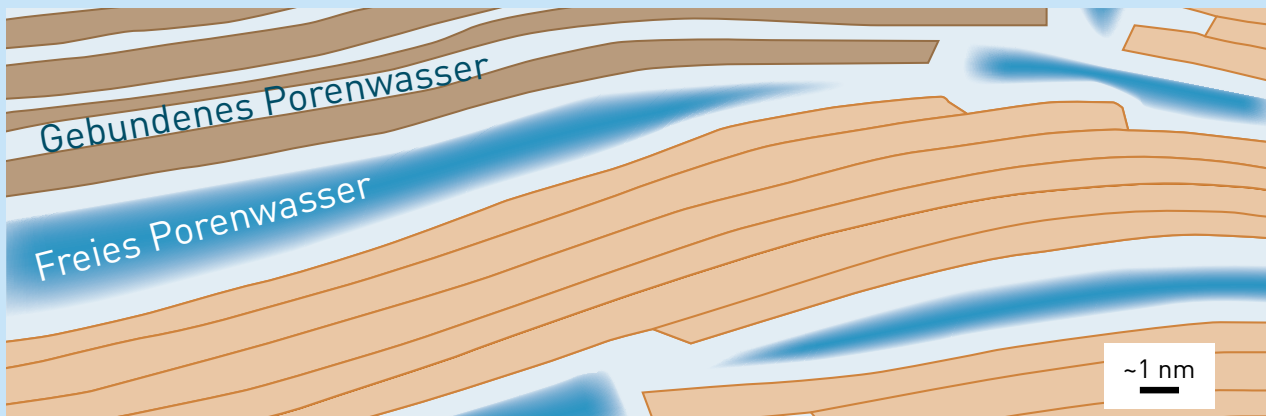
Grosse Wassermengen können auch in die Porenräume zwischen den Tonmineralen aufgenommen werden (vgl. Kasten rechts). Das Wasser in den Porenräumen und jenes in den Zwischenschichten der Minerale unterscheidet sich chemisch. Das Gestein versucht, diesen Unterschied auszugleichen. Dadurch wird mehr Wasser in die Porenräume gezogen. Dieser Vorgang wird als osmotische Quellung bezeichnet. Dies kann nur geschehen, wenn der Ton mit zusätzlichem Wasser in Kontakt kommt.

Dieses osmotische Aufquellen kann in Sedimentgesteinen mit hohen Anteilen quellfähiger Tonminerale einen Druck von mehreren Hundert Tonnen pro Quadratmeter erzeugen (Opalinuston ca. 150 t/m²; vgl. Abb. 5). Dies macht Tone zu bautechnisch anspruchsvollen Gesteinen, was im Berg- und Tunnelbau beachtet werden muss (vgl. Seite 14).



Millionen Jahre altes Wasser: gebunden und schwer herauslösbar

Im heutigen Opalinuston befindet sich noch etwa 12 Prozent Wasser. Ein Grossteil dieses Porenwassers ist an die Tonminerale gebunden. Erst mit grossem technischem Aufwand im Labor lässt sich unter sehr hohem Druck etwas Wasser aus den Poren des Opalinustons herauspressen. Untersuchungen zeigen, dass in jedem Liter Porenwasser bis zu 20 Gramm Salze gelöst sind. Das Wasser in den feinen Poren enthält noch immer Anteile von Meerwasser, das viele Millionen Jahre alt ist. Heutiges Meerwasser enthält zum Vergleich ca. 35 Gramm Salze pro Liter.



Struktur des Opalinustons (schematisch)

- quellfähiges Tonmineral
- nicht quellfähiges Tonmineral

Abbildung 5

Apparatur zur Messung des Drucks, der beim Quellen von Gesteinen entsteht. Dabei wird die Kraft gemessen, die benötigt wird, um zu verhindern, dass die Probe sich vergrössert. Ein freiliegendes Stück Opalinuston, das nicht eingespannt ist, quillt bei Zugabe von Wasser immer weiter auf, bis es vollständig zerfällt. Wird genügend Druck auf den Opalinuston ausgeübt, entweder unterirdisch oder im Labor, behält er seine Form. Fotos: Seiphoori (2019)

Das Wirtgestein Opalinu

Der Opalinuston wurde in einem aufwendigen Verfahren als das beste Wirtgestein zur Lagerung der radioaktiven Abfälle der Schweiz bestimmt. Er weist Eigenschaften auf, die sich auf die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers günstig auswirken.

Woher stammt der Opalinuston?

Vor etwa 173 Millionen Jahren bedeckte ein Ausläufer eines Urmeers (vgl. Abb. 6), der Tethys, weite Teile Europas. Von verschiedenen Inseln wurden Sedimente in dieses Meer geschwemmt. Tonreicher Schlamm wurde im Raum der Nordschweiz und Süddeutschlands abgelagert. Im Laufe der Erdgeschichte verfestigte sich dieser Schlamm zu einem Tongestein, dem Opalinuston.

Wie ist der Opalinuston aufgebaut?

Der Opalinuston besteht aus 40 bis 80 Prozent Tonmineralen (wobei 10 Prozent quellfähig sind), 10 bis 40 Prozent Quarz, 5 bis 40 Prozent Kalzit und kleineren Anteilen anderer Mineralen sowie organischem Kohlenstoff. Er weist über weite Gebiete ähnliche Eigenschaften auf. Der Grund dafür ist, dass der Opalinuston in einem ruhigen Flachmeer abgelagert wurde. Dies ermöglicht Aussagen über grosse Gebiete und macht Forschungsergebnisse übertragbar. Diesen Schluss konnte man aus Bohrungen und dem Kartieren von Aufschlüssen an der Oberfläche ziehen. Aufschlüsse sind Stellen, an denen das normalerweise unter dem Boden liegende Gestein an der Erdoberfläche zu sehen ist, wie zum Beispiel an Felswänden.

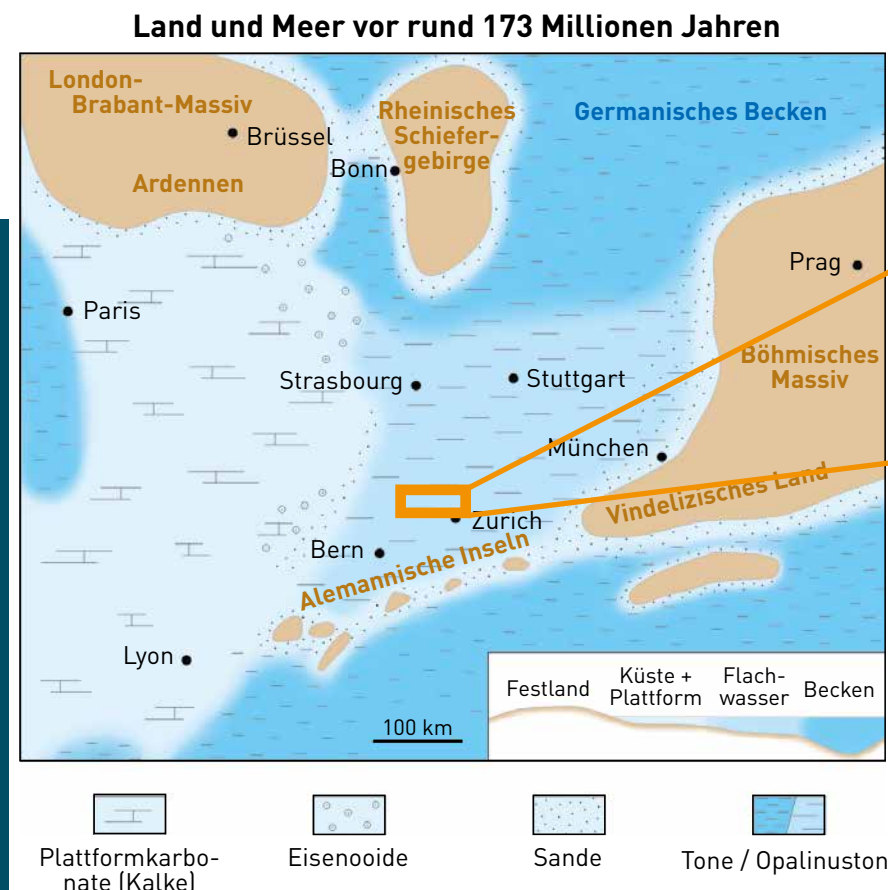


Abbildung 6

Vor 173 Millionen Jahren sah die Landschaft in «Mitteleuropa» völlig anders aus.
 Nach: Nüesch (1991), Riegraf et al. (1984) sowie Wetzel und Allia (1996)

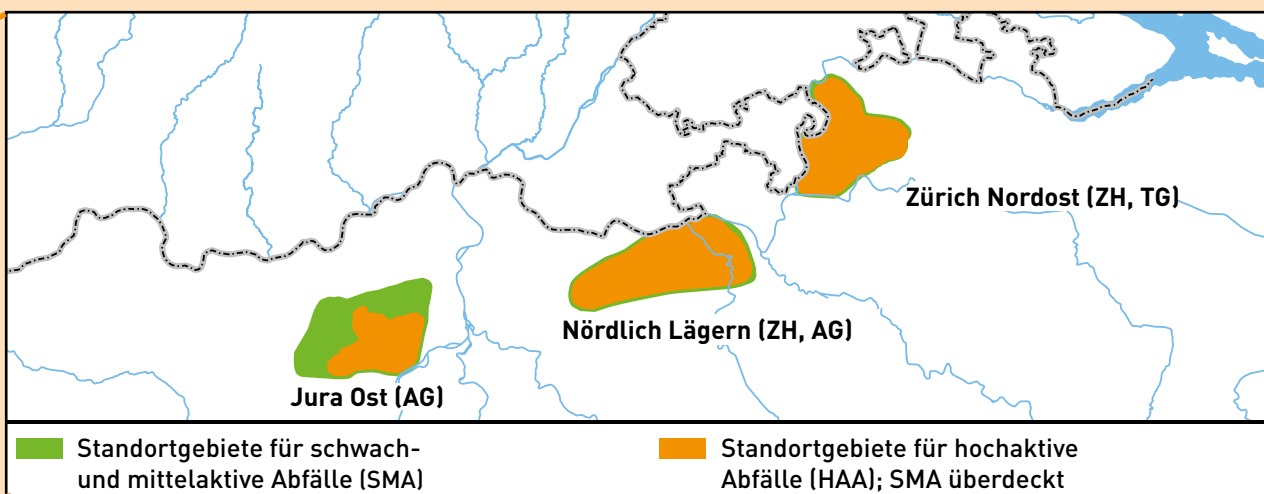
ston

Die Suche nach dem besten Gestein für ein Tiefenlager

Die Nagra hat die Geologie der ganzen Schweiz eingehend geprüft. Aufgrund ihrer geologischen Instabilität kommen zum Beispiel die Alpen und der Jura für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle nicht in Frage. Die Untersuchungen der Nagra konzentrierten sich in einem zweiten Schritt deshalb auf das Schweizer Mittelland und die Nordschweiz.

Dort hat die Nagra nach einer Gesteinsschicht gesucht, die nur gering wasserdurchlässig ist und die radioaktiven Teilchen sicher einschliesst. Die Schicht muss mächtig (dick) genug sein, ausreichend tief liegen und genügend Platz für das Lager bieten. Diese Eigenschaften sollten sich über lange Zeit nicht verändern.

Bei der Suche hat sich der Opalinuston als das beste Gestein herausgestellt. Drei Standortgebiete mit Opalinuston eignen sich am besten für ein Tiefenlager: Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost. Alle drei Gebiete zeichnen sich durch eine stabile geologische Situation aus. Der Opalinuston liegt dort in einer Tiefe von 400 bis 900 Metern.



Die drei Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost liegen in dem Gebiet, in dem der Opalinuston abgelagert wurde.

Opalinuston ist selbstabdichtend

Eine der wichtigsten Eigenschaften des Opalinustons – im Hinblick auf ein Tiefenlager – ist seine Fähigkeit, Risse selbstständig zu verschliessen. Dies obwohl der Anteil quellfähiger Tonminerale nur zehn Prozent des Gesteins ausmacht. Sollten einmal Risse entstehen, quillt das Gestein auf und mögliche Wasserfliesswege werden abgedichtet (sog. Selbstabdichtung). Damit kann über Risse (Störungen) im Gestein kein Wasser in das Tiefenlager eindringen und radioaktive Stoffe wegtransportieren. In mehreren Experimenten wurde die Selbstabdichtung nachgewiesen und ist auch direkt am Gestein zu sehen (vgl. Abb. 7).

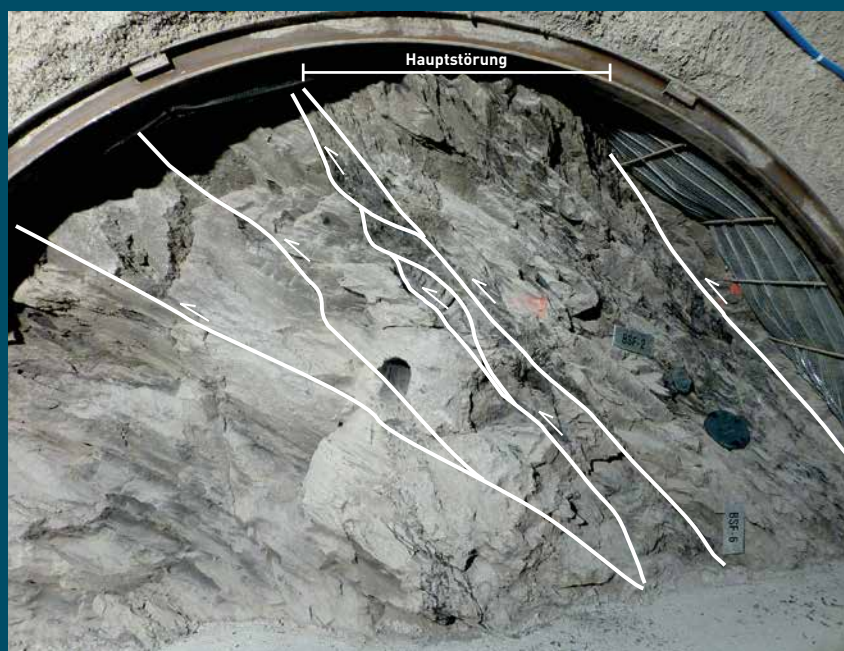
Praktisch undurchlässig

Durch die Tonminerale kann der Opalinuston auch Radionuklide binden. Die meisten radioaktiven Stoffe in den Abfällen sind Metalle und positiv geladen. Diese werden durch die negativ geladenen Tonplättchen eingefangen (Sorption; vgl. Seite 6). Trotz der Eigenschaft des Opalinustons die meisten Radionuklide zu binden, können sich einzelne

Wie lange sind die Abfälle schädlich?

Der grösste Teil der radioaktiven Abfälle zerfällt rasch. Nach rund zweihundert Jahren beträgt die Strahlung der Abfälle im Tiefenlager für hochaktive Abfälle nur noch wenige Prozent im Vergleich zu dem Zeitpunkt, als sie eingelagert wurden. Der Anteil radioaktiver Stoffe mit hohen Halbwertszeiten strahlt schwächer, aber über lange Zeit.

In 200 000 Jahren sind die hochaktiven Abfälle noch etwa so gefährlich wie die entsprechende Menge natürliches Uranerz, die zur Herstellung der Brennelemente abgebaut wurde.



Legende

- Störung / Riss
- ← Bewegungsrichtung

Abbildung 7

Durch den Opalinuston im Bild verlaufen Risse einer Störungszone. Trotz umgrenzender wasserführender Gesteinsschichten ist der Opalinuston trocken und es tritt kein Wasser in den Stollen ein (Felslabor Mont Terri). Foto: Nagra

sehr langsam durch das Gestein ausbreiten. Um die Transportprozesse im Opalinuston zu verstehen, muss man sich dessen Porenräume genauer ansehen (vgl. Abb. 8). In den unzähligen kleinen Poren sind Porenwasser und gelöste Stoffe nahezu unbeweglich «gefangen». Stoffe können sich nur sehr eingeschränkt mittels Diffusion (vgl. Glossar) durch das Gestein bewegen. Dies ist ein sehr langsamer Prozess.

Mit einer NASA-Sonde auf der Spur von Radionukliden

Die Nagra führt seit über 20 Jahren Experimente durch, um das «Wandern» von Radionukliden im Gestein besser zu verstehen. Mit einer für die NASA entwickelten «Röntgenfluoreszenz-Sonde» wird erstmals die Diffusion über einen Zeitraum von mindestens zehn Jahren direkt im Opalinuston untersucht. Mit diesem Experiment überprüft die Nagra ihr Wissen. Die Ergebnisse fließen in Überlegungen zur Langzeitsicherheit ein.



Bild: Maria Schmid

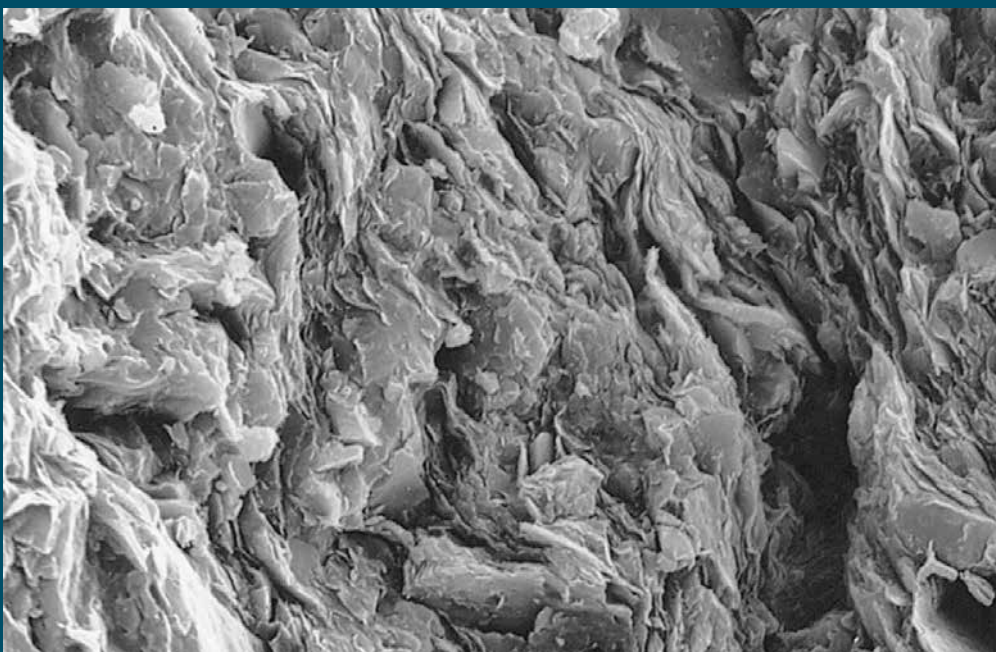


Abbildung 8

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Opalinustons: Ein Gramm Opalinuston hat eine Oberfläche von zirka 100 Quadratmetern. Das entspricht etwa der Fläche eines Badmintonfelds (Bildbreite Aufnahme zirka 0,05 mm).

Opalinuston: sehr gut, hat aber

Der Opalinuston hat eine Reihe guter und sehr guter Eigenschaften. Das perfekte Gestein für alle Anforderungen der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle gibt es aber nicht. Dennoch können sichere Tiefenlager gebaut werden.

Bautechnisch herausfordernd

Der Opalinuston stellt hohe Anforderungen an den Bau eines geologischen Tiefenlagers. Unterirdische Bauten im Opalinuston müssen gesichert werden. Dies geschieht zum Beispiel mit Betonverschalungen, Felsankern oder Stahlringen (vgl. Abb. 9). Grundsätzlich sind die Herausforderungen des Opalinustons im Tunnelbau beherrschbar. Beispiele hierfür sind Autobahntunnel im Bözberg oder im Mont Terri.

Eine weitere Herausforderung ist, dass der Opalinuston nicht immer gleich auf Druck reagiert. Es macht einen Unterschied, ob der Druck zum Beispiel senkrecht auf die Schichtung einwirkt oder parallel dazu. Der Opalinuston ist im ersten

Fall belastbarer. Darauf muss bei der Gestaltung des Tiefenlagers geachtet werden, damit die Stabilität der Stollen gewährleistet bleibt.

Gas im Opalinuston

In einem verschlossenen Tiefenlager für radioaktive Abfälle laufen chemische Prozesse ab. Dabei entsteht vor allem nicht radioaktiver Wasserstoff, der sich bei der Korrosion der Endlagerbehälter (vgl. Glossar) unter Sauerstoffausschluss bildet. Dieser muss das Tiefenlager verlassen können, ohne das Wirtgestein zu sehr zu beanspruchen. Der Gasdruck könnte sonst zu einer Rissbildung im Wirtgestein führen. Das Gas kann entlang der Lagerbauten zwischen Wirtgestein und Bentonit (vgl. Seite 18 und 19) entweichen, ohne dass Wasser ein- oder austreten kann oder unzulässige Risse entstehen.

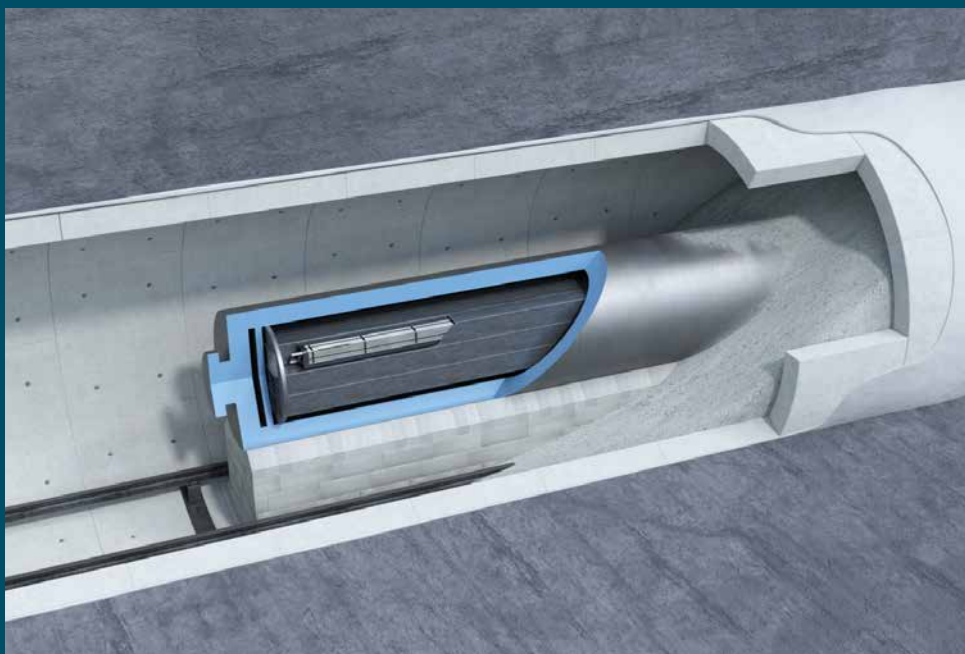


Abbildung 9

Modell eines Lagerstollens für hochaktive Abfälle. Die Stollenwand wurde mit einer Betonverschalung (sog. Tübbing) gesichert. Grafik: Nagra

auch Nachteile

Wie wirkt sich die Zerfallswärme aus?

Hochaktive Abfälle erzeugen durch radioaktiven Zerfall über lange Zeit Wärme. Weil die Tonmineralen im Opalinuston durch eine zu hohe Wärme- einwirkung geschädigt werden könnten (thermisch bedingte Rissbildung, Mineralumwandlungen), wurden diese Effekte genauer untersucht.

Die relativ schlechte Wärmeleitfähigkeit des Opalinustons und des Bentonits hat einen Einfluss drauf, wie die Stollen in einem Tiefenlager angeordnet werden. Damit die radioaktiven Abfälle ihre Umgebung nicht zu stark aufheizen, müssen die einzelnen Lagerstollen einen Mindestabstand zu- einander aufweisen (ca. vierzig Meter). Damit kann verhindert werden, dass die Temperaturen und da- durch der Druck im Opalinuston zu stark steigen.

Die maximale Temperatur in der Umgebung der verfüllten Lagerstollen beträgt zirka 90 Grad Celsius (vgl. Abb. 10). Der Opalinuston war während seiner Geschichte schon ähnlich hohen Tempera- turen (ca. 85 bis 95 Grad Celsius) über sehr lange Zeiträume ausgesetzt.

Einlagerung der Abfälle proben

Mit Demonstrationsexperimenten erprobt die Nagra Verfahren zur Einlagerung von Abfallbehältern. Im Felslabor Mont Terri der swisstopo (das Bundesamt für Landestopo- grafie) wird das Einlagerungskonzept für abgebrannte Brennelemente mit dem «FE-Experiment» überprüft. Dabei wird die durch radioaktiven Zerfall entstehende Abwärme der Abfallbehälter mit Heizele- menten simuliert.



Bild: © Cornet Photoshopping, Dieter Enz

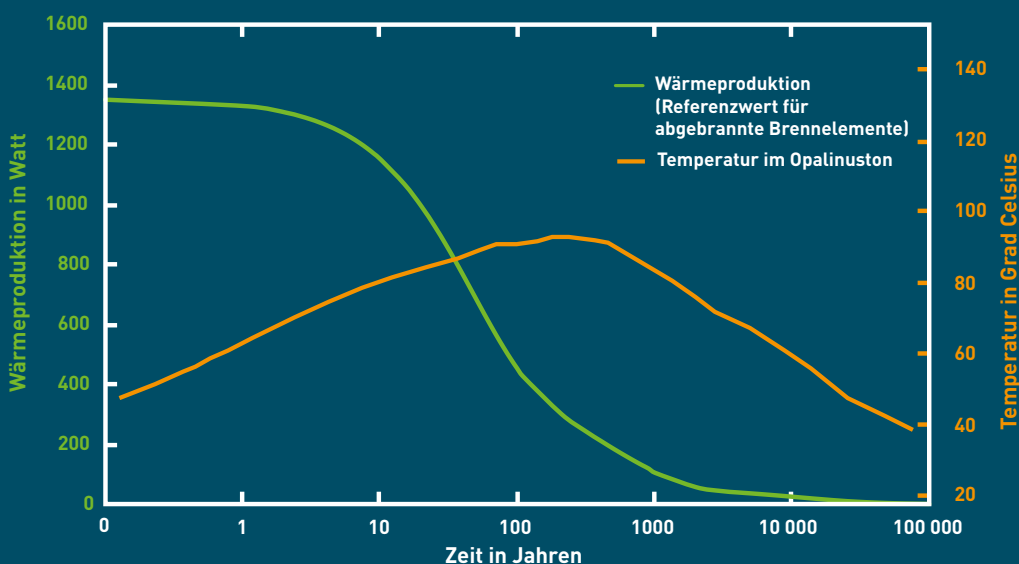


Abbildung 10

Die hochaktiven Abfälle und abgebrannten Brennelemente produzieren durch radioaktiven Zerfall Wärme. Nach etwa 1000 Jahren sind die Radioaktivität und damit die Wärme- produktion stark zurück- gegangen. Die Zerfalls- wärme führt zu einer Erhöhung der Tempera- tur im Opalinuston. Nach: Diomidis N. et al. (2016) und Senger R. et al. (2017)

Die Rahmengesteine: ein

Nicht nur der Opalinuston sorgt für die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers. Sondern auch die darunter- und darüberliegenden tonhaltigen Gesteine, die Rahmengesteine, tragen dazu bei.

Zwischen dem Wirtgestein und den Schichten, die Grundwasser führen, befinden sich weitere gering durchlässige, tonhaltige Gesteine. Diese bilden eine zusätzliche geologische Barriere. Diese Rahmengesteine (vgl. Abb. 11 & 12) bewirken, wie der Opalinuston, dass Radionuklide nur mit einer beträchtlichen Verzögerung in den Lebensraum an der Erdoberfläche gelangen können. Dadurch haben die meisten Radionuklide genügend Zeit, bis zur Unschädlichkeit zu zerfallen.

Ähnliche Eigenschaften wie das Wirtgestein

Beispiele für diese Rahmengesteine sind der 'Brauner Dogger' oder das «Effingen Member». Im Vergleich zum Wirtgestein sind diese Rahmengesteine nicht gleichmässig aufgebaut und enthalten eine grössere Bandbreite an Gesteinen beziehungsweise Mineralen. Beide bestehen hauptsächlich aus Mergel, der eine Mischung aus Ton und Kalk ist. Aber es sind auch Sand- und Kalksteine sowie im Falle des 'Brauner Doggers' Eisenoolithe (Eisenerz) enthalten.

Diese Schichten haben einen geringeren Tongehalt, wodurch sie nicht ganz so undurchlässig wie der Opalinuston sind. Aus Untersuchungen an Bohrkernen und Tests in zahlreichen Tiefbohrungen der Nordschweiz ist die Durchlässigkeit der verschiedenen Gesteine gut bekannt.



Abbildung 11

Die Tongrube Frick mit einem Teil der unteren Rahmengesteine (Staffelegg- und Klettgau-Formation) (vgl. Abb. 12).

Foto: Nagra

e weitere Barriere

Tiefbohrungen

Die Nagra führt eine Reihe von Bohrungen in den drei Standortgebieten durch (vgl. Seite 11). Die Bohrungen sollen das geologische Gesamtbild der potenziellen Standortregionen vervollständigen. Dabei werden unter anderem die Mächtigkeit, die Dichtigkeit und die Zusammensetzung des Wirtgesteins Opalinuston und der Rahmengesteine bestimmt.



Bild: Nagra

Tiefbohrung der Nagra in Trüllikon

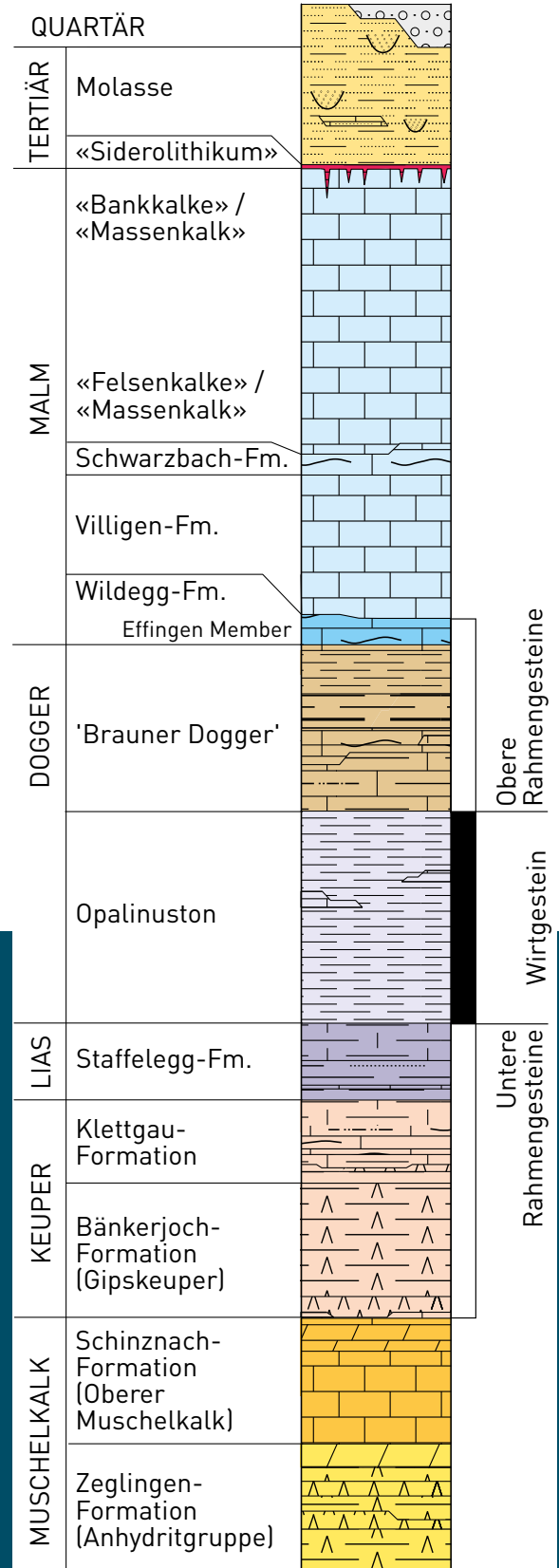


Abbildung 12

Geologisches Profil aus dem Standortgebiet Zürich Nordost. Zu sehen sind die verschiedenen Gesteinsschichten und der sogenannte «einschlusswirksame Gebirgsbereich». Dazu gehören das Wirtgestein Opalinuston und die darunter- und darüberliegenden Rahmengesteine.

Nach: Nagra (2008)

Der Bentonit: Verschluss

Das Verfüllmaterial, mit dem die Lagerstollen verschlossen werden, soll eindringendes Wasser von den Endlagerbehältern fernhalten und allfällig austretende Radionuklide zurückhalten. Bentonit ist ein Tonmaterial, das beide Anforderungen erfüllt.

Der Bentonit ist in der Schweiz als Material für die Verfüllung der Lagerstollen vorgesehen, in welchen die hochaktiven Abfälle eingelagert werden (vgl. Seite 2). Er ist damit eine der Barrieren eines Tiefenlagers.

Was ist Bentonit?

Bentonit ist ein mineralischer Rohstoff, der hauptsächlich aus Tonmineralen aufgebaut ist. Der Name leitet sich von der Ortschaft Fort Benton (Montana, USA) ab. Dort wurde Bentonit das erste Mal wissenschaftlich beschrieben.

Er entsteht durch die chemische Veränderung (Verwitterung) vulkanischer Asche. Dabei haben sich die ursprünglichen Minerale zu Ton umgewandelt (vgl. Abb. 13).

Vielfältiger Einsatz

Zum grössten Teil wird Bentonit in der Giesserei-industrie verwendet (Binden von Formsand im Nassformgussverfahren). In der Bohrtechnik wird er als Zusatz zur Bohrspülung genutzt. In der Lebensmittelindustrie wird Bentonit zum Beispiel als Klärmittel für Weine genutzt. In Katzenstreu dient er zur Feuchtigkeitsaufnahme und zur Geruchskontrolle.

Bentonit in einem Tiefenlager

In einem geologischen Tiefenlager werden die Stollen des Lagers mit Bentonit verfüllt. Nach deren Verschluss sättigt sich der Bentonit langsam mit Porenwasser auf. Dieses stammt aus dem umgebenden Wirtgestein Opalinuston und diffundiert langsam in den Bentonit um die Behälter. Durch die Wasseraufnahme beginnt der Bentonit zu quellen und bildet dadurch eine dichte, feste und praktisch wasserundurchlässige homogene Masse. Durch den entstehenden Quelldruck schliessen sich die während des Stollenbaus entstandenen

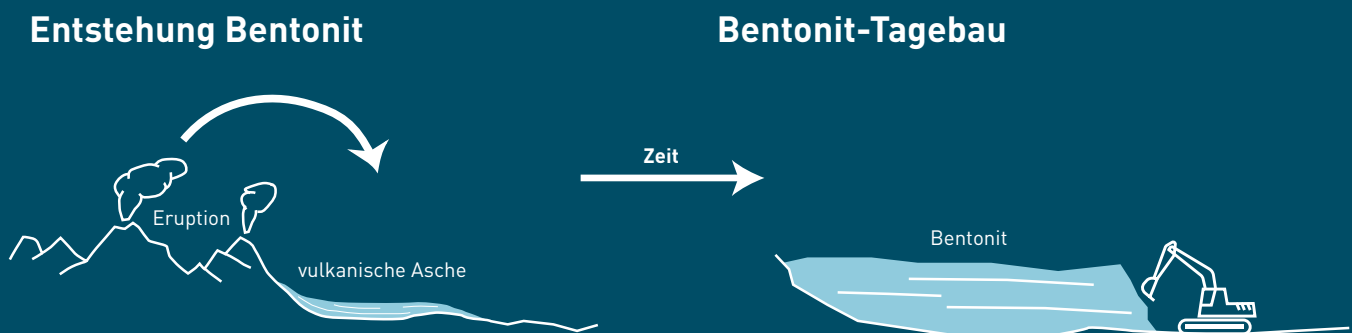


Abbildung 13

Bentonit wurde durch die Umwandlung vulkanischer Asche gebildet.

für die Lagerstollen

Risse im Gestein. So unterstützt der Bentonit das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons.

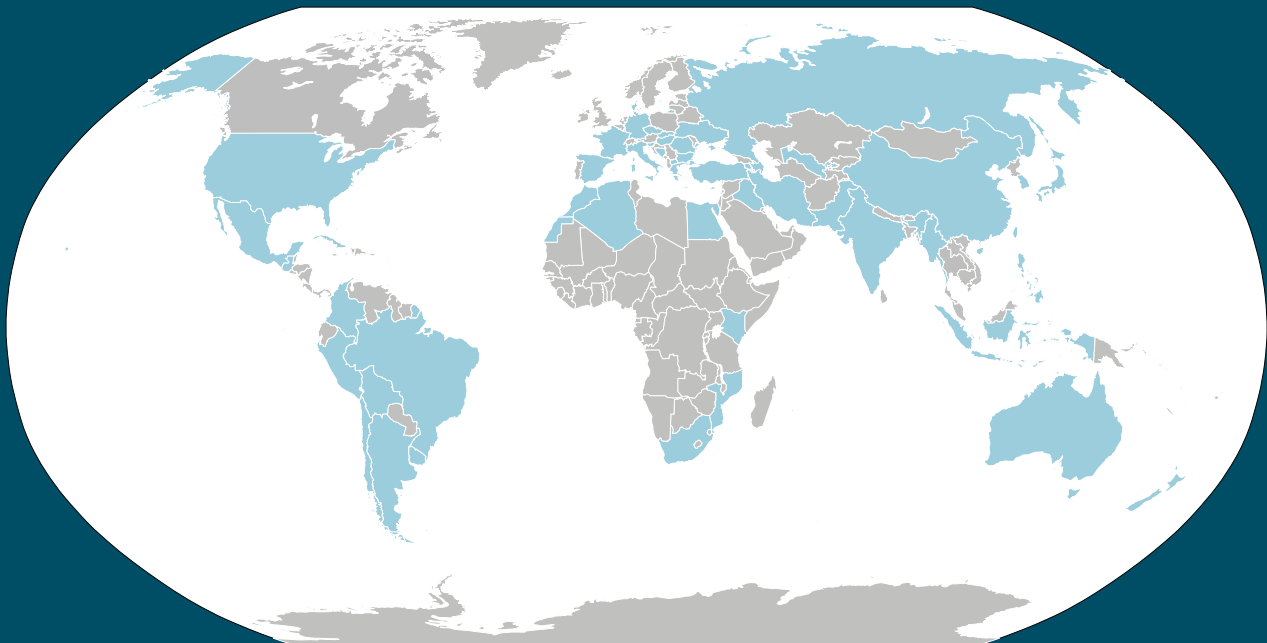
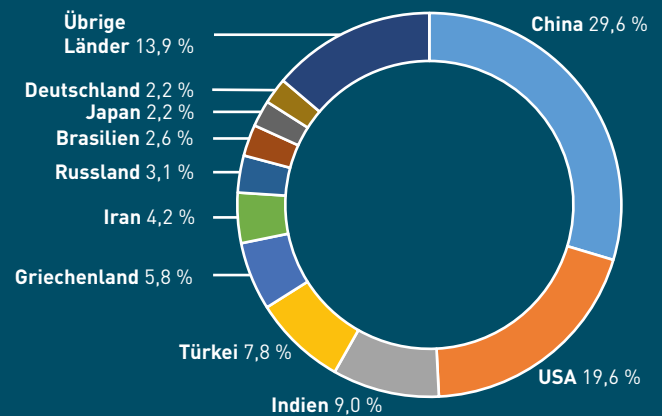
Durch die enthaltenen Tonminerale besitzt der Bentonit ähnliche Eigenschaften wie das ihn umgebende Wirtgestein. Neben seiner Dichtigkeit hat er die Fähigkeit, Radionuklide zu binden.

Für den Verschluss der Lagerstollen werden in einem Tiefenlager für hochaktive Abfälle rund 80 000 Kubikmeter Bentonit benötigt.

Weltweite Bentonitproduktion

Wegen seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten ist Bentonit ein begehrter Rohstoff. Weltweit bauen über 50 Nationen Bentonit ab. Insgesamt werden zirka 18 900 000 Tonnen pro Jahr gefördert. China und die USA sind die grössten Produzenten (Stand 2017).

Nach: Brown et al. (2019)



Analoga in Ton: Die Nat

Experimente, die im Labor oder in Felslaboren durchgeführt werden, können nur über eine verhältnismässig kleine Zeitspanne betrachtet werden. Im Hinblick auf die langfristige Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle können Beobachtungen in der Natur bei der Beurteilung von Laborexperimenten und theoretischen Berechnungen unterstützend wirken.

Die Fähigkeit, Wasser und andere Stoffe einzuschliessen, erklärt, warum im Ton sehr gut erhaltene Fossilien zu finden sind. Eindrucksvolle Beispiele gibt es in Deutschland, Italien und der Schweiz (vgl. Abb. 14).

Zwei Millionen Jahre alte Bäume

In der italienischen Region Umbrien fand man beim Abbau von Ton in einem Tagebau viele sehr gut erhaltene Baumstämme. Diese Baumstämme mit einer Höhe von bis zu acht Metern wurden vor etwa zwei Millionen Jahren mit Tonschlamm bedeckt. Das Besondere an diesem Fund ist, dass das Holz noch erhalten ist. Die Bäume sind noch in ihrer ursprünglichen Position verwurzelt.

Fossilien aus der Tongrube

Im deutschen Messel entstand vor etwa 48 Millionen Jahren durch Vulkanismus ein Krater, der sich mit Wasser füllte. In diesem See lagerte sich Tonschlamm ab. In der späteren Tongrube wurden viele unterschiedliche Fossilien gefunden. Darunter befinden sich die Vorläufer von Murmeltieren, Pferden und Insekten. Im Gestein kann man noch das Fell und den Mageninhalt von Säugetieren oder die Farbe von Käfern erkennen.

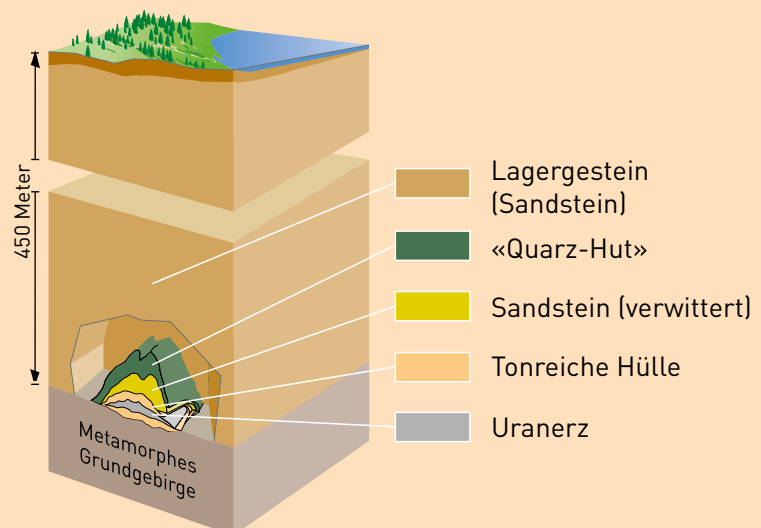
Diese Beispiele zeigen, dass Ton über Jahrmillionen Stoffe einschliessen kann. Diese Eigenschaft macht sich die Nagra für den Bau eines sicheren geologischen Tiefenlagers zunutze.

Abbildung 14

Beispiele von gut erhaltenen Fossilien in Tongesteinen mit Altersangabe und Herkunft.
Fotos in Leserichtung: Cantalamessa (CC BY-SA 3.0), Daderot, Messelforschung, © Comet Photoshopping, Dieter Enz, Nagra, Sauriermuseum Frick

Erzgang Cigar Lake

Das 1,3 Milliarden Jahre alte Uranerzvorkommen von Cigar Lake (Saskatchewan, Kanada) weist weltweit eine der höchsten Urankonzentrationen auf. An der Erdoberfläche lässt sich das Erzvorkommen radiologisch nicht nachweisen. Die vorhandenen Radionuklide werden durch eine 10 bis 50 Meter dicke Tonschicht so wirksam zurückgehalten, dass schon in wenigen Zehnermetern Abstand vom Erzkörper in Bohrungen keine erhöhte Radioaktivität mehr messbar ist. Entdeckt wurde das Vorkommen eher zufällig.



ur macht es vor



Baumstümpfe (ca. 2 Mio. Jahre, I)



Riesenschlange (ca. 48 Mio. Jahre, D)



Hirschkäfer (ca. 48 Mio. Jahre, D)



Ammonit (ca. 173 Mio. Jahre, CH)



Ammonit (ca. 180 Mio. Jahre, D)



Plateosaurus (ca. 200 Mio. Jahre, CH)

Glossar

Diffusion

Diffusion ist ein passiver Konzentrationsausgleich von gelösten Stoffen zwischen Bereichen höherer und niedrigerer Konzentration. Diffusion findet vereinfacht erklärt statt, wenn ein Stück Zucker in eine Tasse Kaffee gegeben wird. Nach einiger Zeit wird der Kaffee süß, auch wenn nicht umgerührt wird. Die Zuckermoleküle diffundieren, bis der Kaffee überall ähnlich süß ist, also bis sich die Konzentration der Zuckermoleküle überall im Kaffee ausgeglichen hat.

Endlagerbehälter

Radioaktive Abfälle werden in Tiefenlagern durch mehrere Barrieren eingeschlossen. Eine der Barrieren ist der Endlagerbehälter – die eigentliche Verpackungshülle für abgebrannte Brennelemente oder verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.

Hochaktive Abfälle

Dies sind Abfälle, die stark strahlen. Es handelt sich um Spalt- und Aktivierungsprodukte aus verbrauchten Brennelementen, die bei deren Wiederaufarbeitung abgetrennt und mit Glas verschmolzen werden. Auch abgebrannte Brennelemente, die nicht wiederaufgearbeitet werden, gelten als hochaktive Abfälle.

Ion

Besitzt ein Atom oder Molekül ein oder mehrere Elektronen weniger oder mehr als in einem neutralen Zustand, hat es eine elektrische Ladung und wird als Ion bezeichnet.

Molekül

Als Molekül wird die chemische Verbindung von mehreren Atomen bezeichnet.

Radionuklid

Dies ist ein instabiler Atomkern, der unter Aussendung von ionisierender Strahlung zerfällt. Es gibt natürlich vorkommende und künstlich erzeugte Radionuklide.

Tiefenlager

Das geologische Tiefenlager ist eine Anlage in stabilen und undurchlässigen Gesteinsschichten, in der die radioaktiven Abfälle sicher entsorgt werden können.

Zum Weiterlesen

Literaturverzeichnis

Brown T. J., Idoine N. E., Raycraft E. R., Hobbs S. F., Shaw R. A., Everett P., Kresse C., Deady E. A. und Bide T. (2019): «World Mineral Production 2013–17»; British Geological Survey.

Decher A. und Friedrich G. (1991): «Bentonite der Cabo de Gata. Produkte der hydrothermalen Alteration vulkanischer Gesteine in Südspanien»; Die Geowissenschaften, 9. Jahrgang, Heft 10, Seiten 305–316.

Diomidis N., Cloet V., Leupin O.X., Marschall P., Poller A., Stein M. (2016): «Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept»; NTB 16-03.

Jasmund K. und Lagaly G. (Hrsg.) (1992): «Tonminerale und Tone. Strukturen, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt»; Steinkopff Verlag, Darmstadt.

Nagra (2008): «Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Geologische Grundlagen»; NTB 08-04.

Nüesch R. (1991): «Das mechanische Verhalten von Opalinuston»; Dissertation ETH Zürich, Nr. 9349.

Seiphoori A. (2019): «Self-sealing of fractures in Opalinus Clay: experiments and a conceptual framework for quantitative assessments»; NAB 19-07.

Senger R., Papafotiou A., Marschall P. (2017): «Thermo-hydraulic simulations of the near-field of a SF/HLW repository during early- and late-time post-closure period»; NAB 14-11.

Riegraf W., Werner G. und Lörcher F. (1984): «Der Posidonienschiefer»; Enke Verlag, Stuttgart.

Wetzel A. und Allia V. (1996): «Der Ablagerungsraum des Opalinustons – eine sedimentologische Analyse»; Informationen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg (Freiburg im Breisgau) Nr. 8, Seiten 20–24.

Broschüren und Themenhefte

«Erosion – Geologische Langzeitentwicklung und Tiefenlager», Dezember 2017

«Radioaktive Abfälle – Woher, wieviel, wohin?», März 2017

«Langzeitsicherheit – Die Hauptaufgabe der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle», Oktober 2015

Sie können diese Dokumente unter www.nagra.ch im Bereich «Publikationen» herunterladen oder bestellen.

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
Postfach 280
5430 Wettingen
Schweiz

Tel. 056 437 11 11
Fax 056 437 12 07

info@nagra.ch
www.nagra.ch
www.nagra-blog.ch

nagra ● **aus verantwortung**