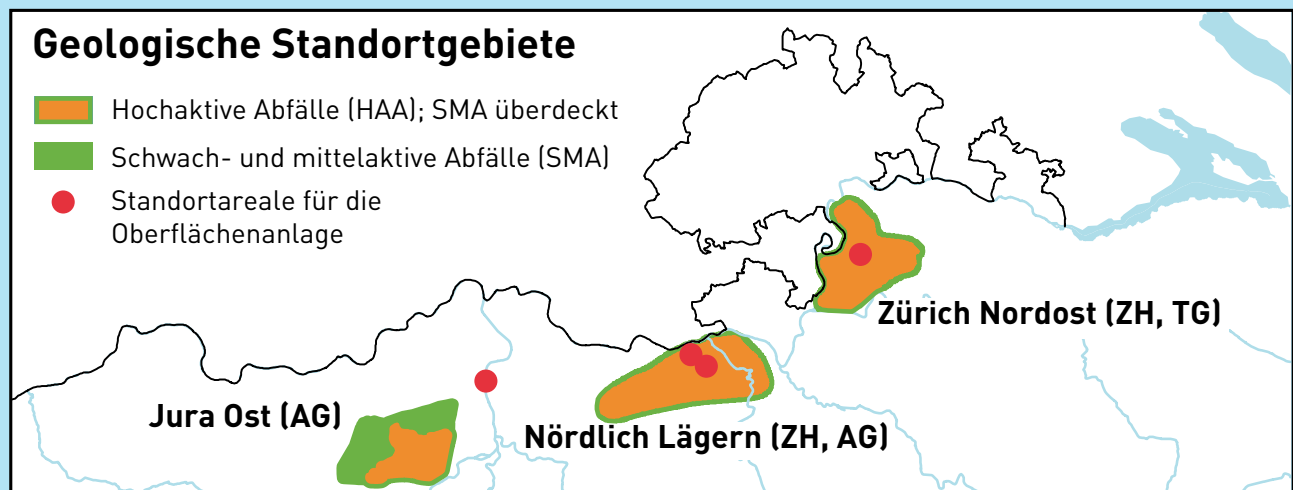


erosion

geologische
langzeitentwicklung
und tiefenlager

Zu diesem Heft



Der «Sachplan geologische Tiefenlager» legt fest, wie in der Schweiz in drei Etappen Standortgebiete für geologische Tiefenlager gesucht werden. Für die Identifikation und den sicherheitstechnischen Vergleich möglicher Standortgebiete wurden im Sachplan dreizehn Kriterien festgelegt. Eines dieser Kriterien betrifft die zukünftige Erosion und deren Bedeutung für die Langzeitsicherheit und die Langzeitstabilität eines Tiefenlagers. Dazu werden mehrere Faktoren betrachtet, die in den Standortgebieten unterschiedlich ausgeprägt sind. Es sind dies unter anderem die Tiefenlage des Wirtgesteins Opalinuston (vgl. Glossar), die Erosionsresistenz des darüberliegenden Gesteins und die Topografie. Zudem wird die Lage der möglichen Standortgebiete bezüglich vergangener und zukünftiger Vergletscherungen betrachtet. Die Nagra hat anhand von Szenarien für alle Standortgebiete abgeschätzt, wie tief der Opalinuston liegen muss, damit er vor künftigen Auswirkungen der Erosion geschützt ist. Als Basis für diese Szenarien wurde die vergangene Entwicklung der Topografie analysiert, insbesondere die Einschneideraten der grossen Flüsse und der Effekt von glazialer Tiefenerosion.

In den nächsten Jahren wird die Geologie der drei möglichen Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost vertieft untersucht, auch um die Erosionsszenarien zu überprüfen und zu verfeinern. Die Resultate werden in den Vergleich der Standorte in Etappe 3 des Sachplans einfließen.

Erosion – geologische Langzeitentwicklung und Tiefenlager

Die Nagra veröffentlicht in loser Abfolge
Themenhefte zur nuklearen Entsorgung
Dezember 2017

Einführung ins Thema

4 – 5

Die Erosion – das Abtragen von Gestein – und die daraus folgende Veränderung der Topografie spielen eine wichtige Rolle bei der Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers für radioaktive Abfälle.

Erosion

6 – 9

Erosion ist ein Prozess, der die Erdoberfläche über grosse Zeitspannen verändert und der für die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers betrachtet werden muss.

Flüsse

10 – 13

Flüsse sind wichtige Landschaftsgestalter. Ob grosse Flüsse wie der Rhein oder kleine Bäche, alle verändern die Topografie.

Gletscher

14 – 17

Gletscher sind durch Schnee gebildete Eismassen. Weite Teile der Schweiz wurden früher von Gletschern bedeckt. Die Spuren dieser Vereisungen sind noch heute in der Landschaft zu finden.

Erosion und Tiefenlager

18 – 19

Um Standortgebiete abzugrenzen, in denen das Wirtgestein in optimaler Tiefenlage liegt, müssen Annahmen über die zukünftige Erosion getroffen werden.

Erdwissenschaftliche Untersuchungen

20 – 21

Um die Szenarien der zukünftigen Erosion zu überprüfen und weiter zu entwickeln, führt die Nagra in den verbleibenden Standortgebieten erdwissenschaftliche Untersuchungen durch.

Fazit

22 – 23

Die zukünftige Topografie in den geologischen Standortgebieten wird vor allem durch Flüsse und Gletscher gesteuert.

Glossar

24 – 25

Literaturverzeichnis & Zum Weiterlesen

26 – 27

Einführung ins Thema

Erosion bezeichnet das Abtragen von Gestein. Sie spielt eine wichtige Rolle für die Langzeitentwicklung der geologischen Barrieren eines Tiefenlagers für radioaktive Abfälle. Es muss sichergestellt werden, dass die Lagerkammern auch in Zukunft genügend lange vor einer Freilegung geschützt bleiben, bis die Radioaktivität auf einen unbedenklichen Wert abgeklungen ist. Um den künftigen Einfluss der Erosion in verschiedenen Szenarien beurteilen zu können, muss man die Vergangenheit verstehen.

Man schliesst aus der Vergangenheit ...

Zur Ableitung verschiedener zukünftiger Entwicklungen der Erosion zieht man die Veränderung der Topografie der letzten zirka zwei Millionen Jahre zu Rate. Diese stand unter dem Einfluss wechselnder Kalt- und Warmzeiten. Jeder dieser Zyklen hatte eine Dauer von 41 000 bis 100 000 Jahren. Während der Kaltzeiten schufen Gletscher in der Schweiz Täler und Übertiefungen (vgl. Seiten 15 ff.), welche die heutige Landschaft prägen. Das Gebiet von Zürich war in den letzten zwei Millionen Jahren min-

destens fünfzehnmal von einem Gletscher bedeckt. In den drei möglichen Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost wurde die Entwicklung der lokalen Erosionsbasis über die letzten zwei Millionen Jahre anhand von Schotterablagerungen rekonstruiert (vgl. Seiten 10 ff.). Die lokale Erosionsbasis wird durch die Höhenlage der grossen Flüsse wie Rhein, Aare oder Donau bestimmt. An diesen Hauptflüssen orientieren sich wiederum die lokalen Flüsse und Hangprozesse wie Bergstürze. Als Ursachen für die vergangene Eintiefung der Flüsse kommen zum Beispiel eine Hebung des Untergrunds oder ein erhöhter Wasserfluss aufgrund von Änderungen des Klimas in Betracht. Die schnellsten und stärksten Absenkungen der lokalen Erosionsbasis in den letzten fünf bis zehn Millionen Jahren fanden in der Nordschweiz durch eine Änderung von regionalen Flusssystemen statt. Die Nordschweiz entwässerte ursprünglich Richtung Donau und wurde später vom Rhein angezapft. Da der Rhein auf einem deutlich tieferen Niveau floss als die Donau, führte dies zu einer deutlichen und raschen Absenkung der Erosionsbasis.



Abbildung 1

Der Rheinfall bei Schaffhausen stürzt über eine Klippe aus vergleichsweise erosionsresistenten, harten und massigen Kalksteinen. Foto: Beat Müller

... auf die Zukunft

Wie stark sich die grossen Flüsse zukünftig in den Untergrund einschneiden, ist nicht exakt prognostizierbar. Deshalb werden verschiedene Szenarien diskutiert. Sie beinhalten unterschiedliche Annahmen zu den Hebungsraten des Untergrunds, den klimatischen Entwicklungen und den Erosionsraten (vgl. Seite 8).

Gletscher, die Erosionskraft der grossen Flüsse, aber auch lokale Erosionsprozesse (kleine Flüsse, Hangrutschungen) werden wesentlich von der Klimaentwicklung beeinflusst. Für die zukünftige Klimaentwicklung werden viele Möglichkeiten betrachtet. Dabei wird ein Fortbestehen des Wechsels zwischen Kalt- und Warmzeiten als am wahrscheinlichsten angesehen. Modellrechnungen für das Klima der nächsten 130 000 Jahre deuten darauf hin, dass eine grössere Eiszeit mit Gletschervorstössen bis in das Alpenvorland – das heisst bis zu den Standortgebieten – frühestens in 50 000 bis 60 000 Jahren zu erwarten ist. Wegen der Erhöhung der globalen Temperatur durch den CO₂-Ausstoss des Menschen kann dies auch erst

deutlich später geschehen (vgl. Seiten 6 ff.). Die Gletschervorstösse würden in jedem Fall zu einem Zeitpunkt erfolgen, an dem bereits ein Grossteil der radioaktiven Stoffe in einem Tiefenlager zerfallen ist (vgl. Seiten 18 f.).

Gletscher folgen vor allem dem Verlauf der alten Täler. Dadurch werden diese Täler verbreitert und vertieft. Es wird aber auch die Bildung von komplett neuen Tälern in Betracht gezogen, die tiefer als die lokale Erosionsbasis sind (vgl. Seiten 10 f.).

Genügende Tiefe für ein Tiefenlager

Durch die Betrachtung verschiedener Erosions- und Klimaszenarien kann eine minimale Tiefenlage des Wirtgesteins Opalinuston, in dem die radioaktiven Abfälle der Schweiz gelagert werden sollen, bestimmt werden. Damit wird ein genügender Schutz des Wirtgesteins vor Erosion gewährleistet. In Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager wurden dafür verschiedene Szenarien für die Entwicklung der grossen Flüsse und der glazialen Tiefenerosion betrachtet.



Abbildung 2

Der Aletschgletscher befindet sich aufgrund des Klimawandels auf dem Rückzug.

Foto: Danieloizo | Dreamstime.com

Erosion

Erosion ist ein Prozess, der die Erdoberfläche über grosse Zeitspannen verändert und der für die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers betrachtet werden muss.

Erosion ist ein grundlegender Teil des Gesteinskreislaufs (vgl. Kasten Seite 9). Unter Erosion versteht man das Herauslösen und Abtragen von zerkleinerten und chemisch veränderten Gesteinen, Lockergesteinen oder Böden. Gesteine können durch verschiedene Mechanismen erodiert werden. Wichtigste Triebfedern sind Wasser, Eis, Wind und Schwerkraft.

Erosion kann die Erdoberfläche flächenhaft abtragen oder es kann durch Flüsse und Gletscher zu Einschneidung und Talbildung kommen. Flüsse oder Gletscher verändern die Erdoberfläche über Tausende von Jahren. Es gibt aber auch schnelle Ereignisse wie einen Felssturz, der grosse Mengen an Gestein innerhalb von Sekunden verlagern kann.

Die Geschwindigkeit der Erosion hängt von verschiedenen Faktoren wie dem Klima, den Gesteinseigenschaften oder der Hebung des Untergrunds ab.

Klima und Erosion

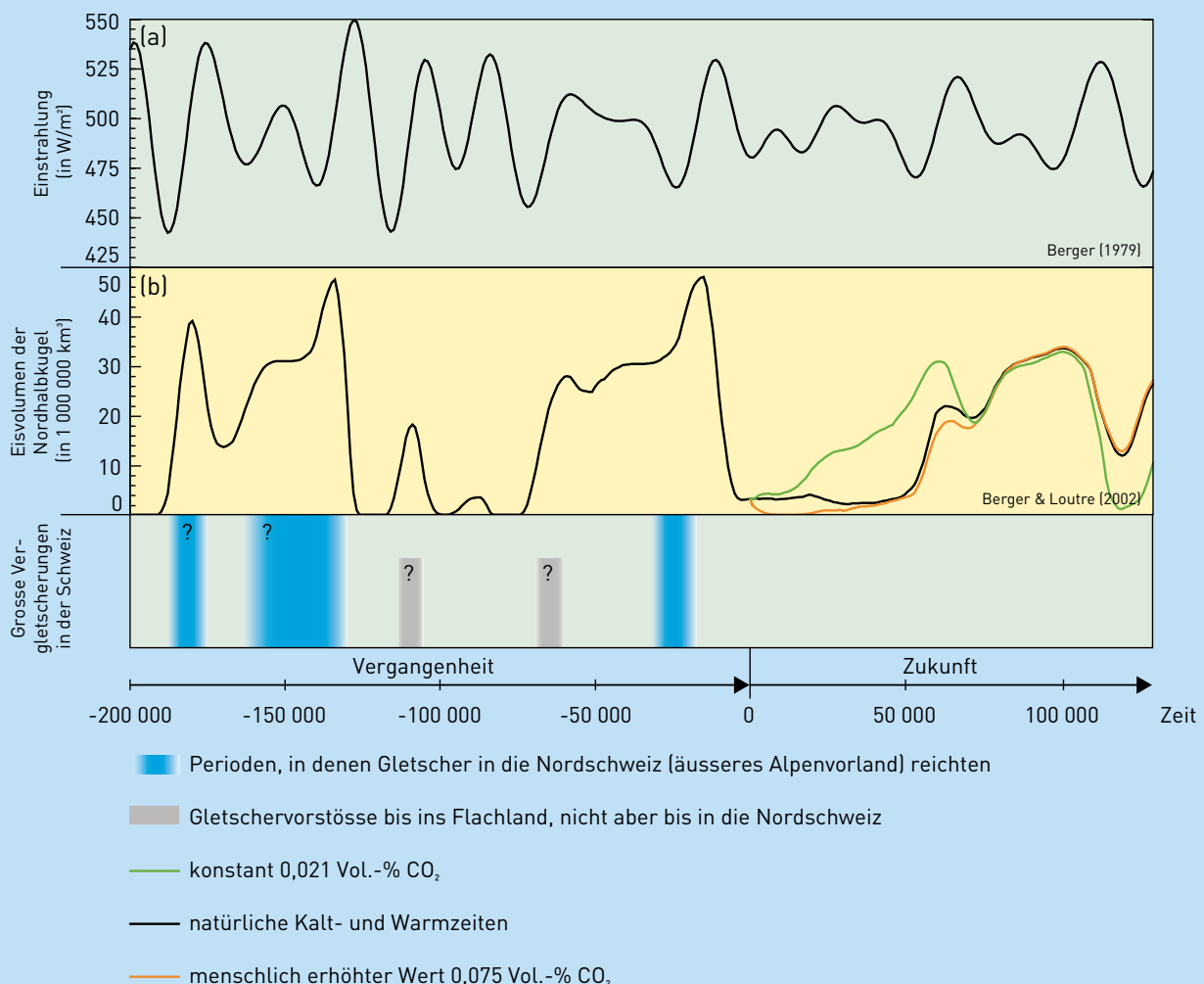
Das Klima ist ein wichtiger Steuerungsmechanismus der Erosion. Ob die Bedingungen in einem Gebiet zum Beispiel feucht-warm oder trocken-kalt sind, hat einen grossen Einfluss auf die Erosionsraten. Die unterschiedliche Sonneneinstrahlung, verursacht durch Schwankungen der Erdumlaufbahn und der Erdachse, bestimmt die Klimaentwicklung massgebend. Diese Schwankungen sind ein Grund für den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Weiter wird das Klima unter anderem durch das komplexe Zusammenspiel zwischen Atmosphäre, Ozeanen und verschiedenen Organismen wie Korallen oder Bäumen gesteuert.

Dabei spielt die CO_2 -Konzentration eine zentrale Rolle. Während die Sonneneinstrahlung auch für die Zukunft relativ exakt berechnet werden kann, ist die zukünftige Entwicklung des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre sehr ungewiss. Auch die anderen Faktoren, die das Klima beeinflussen, sind nicht klar prognostizierbar (vgl. Kasten Seite 7).

Klimamodelle

Während der kommenden Million Jahre wird das Klima wahrscheinlich durch einen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten geprägt sein. Die Sonneneinstrahlung kann für einen Ort auf der Erde über weite Zeiträume berechnet werden (a). Aufgrund von Modellrechnungen wird frühestens in zirka 50 000 bis 60 000 Jahren mit einer grösseren Vereisung gerechnet (b). Eine offene Frage ist dabei die Höhe des CO_2 -Ausstosses durch den Menschen. Hohe Konzentrationen des Treibhausgases könnten zu einer Verschiebung der nächsten Eiszeit in die Zukunft führen. Es wurde mit numerischen Modellen untersucht, wie sich unterschiedliche CO_2 -Konzentrationen auf das Eisvolumen der Nordhalbkugel auswirken können (b). Um den Ungewissheiten in der Klimaentwicklung gerecht zu werden, werden auch die Effekte von anderen Klimaentwicklungen (z.B. permanent feucht-warm) auf die zukünftige Erosion in der Nordschweiz untersucht.

Sonneneinstrahlung und Computersimulationen des Eisvolumens der Nordhalbkugel in den vergangenen 200 000 Jahren bis 130 000 Jahre in die Zukunft



Gesteinseigenschaften und Erosion

Die Gesteinsart bestimmt die Resistenz gegenüber verschiedenen Erosionsarten. Kristalline oder kalkige Gesteine sind im Allgemeinen schwerer abtragbar als tonige oder sandige. Zum Beispiel kann ein Gletscher leichter die Molassegesteine (vgl. Glossar) abtragen als die darunterliegenden härteren Malmkalke.

Ein weiterer Faktor für die Resistenz ist die Löslichkeit der verschiedenen Mineralien in einem Gestein. Die Löslichkeit bestimmt, wie schnell ein Mineral von Wasser aufgelöst werden kann. Zum Beispiel sind Kalke leichter löslich als Quarze.

Hebung und Erosion

Der Alpenraum wird zurzeit jährlich um etwa einen Millimeter gegenüber der Nordschweiz gehoben. Die Hebungsraten nehmen von den Alpen in Richtung Mittelland ab. Der Oberrheingraben nördlich von Basel sinkt dagegen leicht ab (vgl. Abb. 3). Allgemein beeinflusst die Hebung des Untergrunds die Geschwindigkeit, mit der die Erosion «arbeitet». In der Regel ist die Einschneidung von Flüssen in Gebieten mit erhöhter Hebung schneller.

Eine Hebung des Geländes kann verschiedene Ursachen haben. Einerseits kann die Hebung der Alpen eine direkte Folge des Zusammenschiebens der eurasischen und der afrikanischen Platte sein. Eine andere Möglichkeit ist, dass durch das Gewicht eines Gletschers die Erdkruste nach unten gedrückt wird. Nach Rückzug des Gletschers hebt sich die Erdkruste wieder. Ein Beispiel für eine solche Hebung findet sich in Skandinavien. Als Folge des Abschmelzens des Inlandeises hebt sich dort der Untergrund zurzeit immer noch mit bis zu einem Zentimeter pro Jahr.

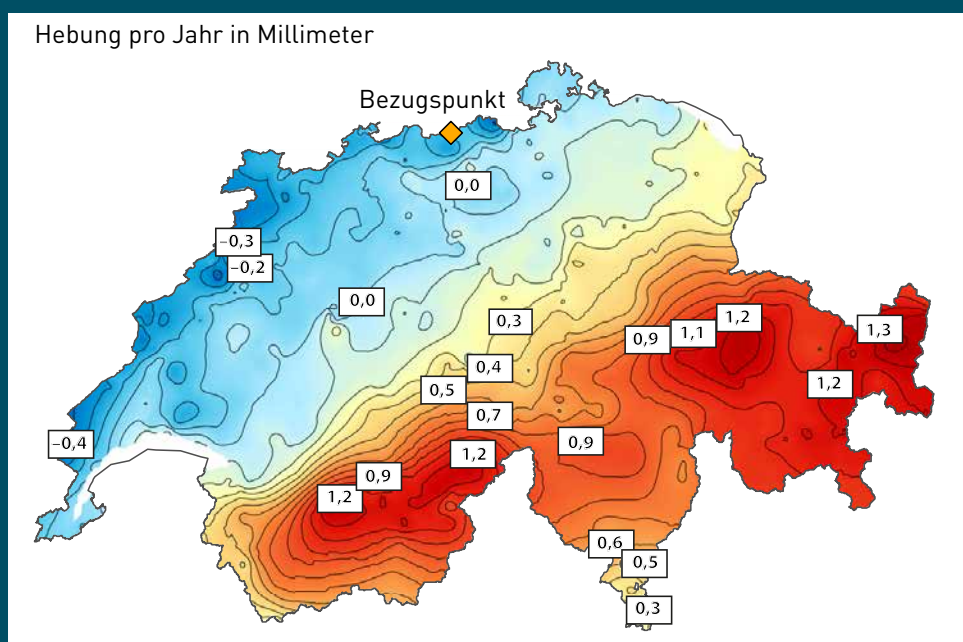


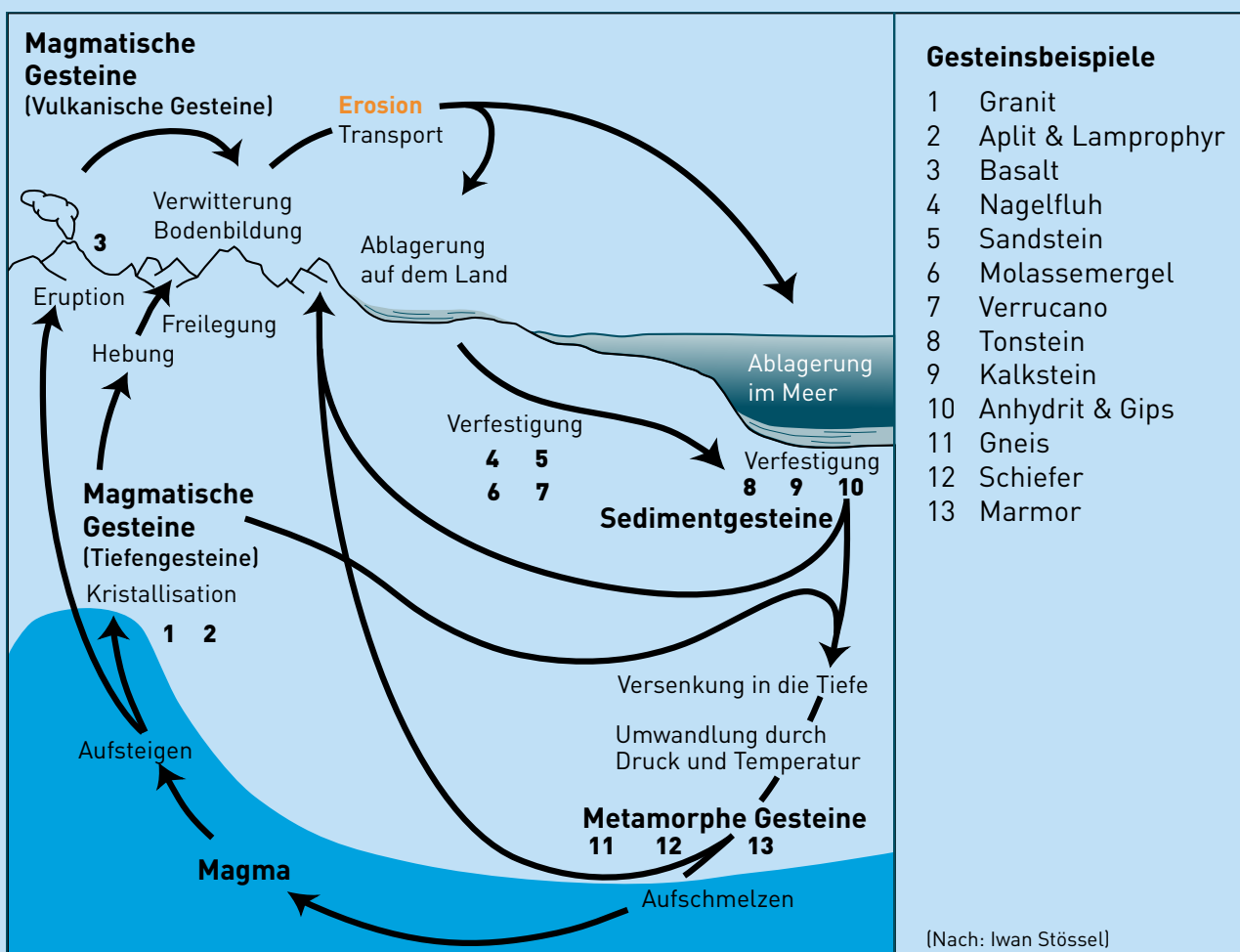
Abbildung 3

Daten der Schweizer Landesvermessung der letzten 100 Jahre lassen eine Hebung der Alpen gegenüber dem Mittelland von zirka einem Millimeter pro Jahr erkennen. Grafik: swisstopo

Kreislauf der Gesteine

Die Gesteine innerhalb der obersten 30 bis 60 Kilometer der Erde, der Erdkruste, befinden sich in einem fortwährenden Kreislauf. Durch ständige Veränderung geht ein Gestein aus dem anderen hervor. Die Erosion ist ein Bestandteil davon.

Es bilden sich Gebirge. Diese werden erodiert und abgetragen, aus dem abgelagerten Schutt entstehen Sedimentgesteine. Alle Gesteine können in grosse Tiefen versenkt und dort unter erhöhten Drücken und Temperaturen zu metamorphen Gesteinen umgewandelt oder aufgeschmolzen werden. Die Gesteinsschmelze (Magma) erstarrt in der Tiefe oder an der Erdoberfläche zu magmatischen Gesteinen. Der Kreislauf beginnt von Neuem.



Flüsse

Flüsse sind wichtige Landschaftsgestalter. Ob grosse Flüsse wie der Rhein oder kleine Bäche, alle verändern die Topografie.

Vor dem Eingriff des Menschen veränderte sich der Verlauf der grossen Flüsse in der Schweiz ständig. Gewässer traten über die Ufer und überschwemmten weite Teile der Landschaft. Das Flussbett verlagerte sich zum Teil rasch – zum Beispiel als Folge dieser Hochwasserereignisse – oder langsam über die Jahre. Flüsse können den Untergrund durch physikalische und chemische Vorgänge abtragen. Dazu gehören das Herauslösen, Transportieren und chemische Auflösen von Gestein. Flusssedimente können an ihrer charakteristischen Form erkannt werden. Durch das Aneinanderschlagen der Steine im Wasser und im Flussbett sind diese meistens gerundet. So lassen sich im Gelände alte Flussläufe an den abgelagerten Gesteinen erkennen.

Erosion durch Flüsse

Die Erosionsbasis ist der tiefste Punkt, unter den sich ein Fluss nicht einschneiden kann. Dieser Punkt ist grossräumig seine Mündung ins Meer, kann aber auch diejenige in einen See sein. Von der Quelle bis zur Erosionsbasis möchte der Fluss eine ideale Gefällskurve realisieren. Er versucht Unregelmässigkeiten in dieser Gefällskurve durch Erosion oder durch Ablagern von Sediment auszugleichen. Gebiete, die über der idealisierten Gefällskurve liegen, haben ein erhöhtes Potenzial für Erosion. Flüsse, die darunter liegen, lagern Sediment ab.

Kleine Flüsse und Prozesse wie Erdrutsche oder Murgänge, die sich an einem Hang ereignen, orientieren sich am nächstgelegenen Hauptfluss und erodieren nicht unter dessen Niveau. Die Höhenlage der Hauptflüsse bestimmt damit die lokale Erosionsbasis, an der sich die Entwicklung des Geländes orientiert (vgl. Abb. 4).



Abbildung 4
Ideale Gefällskurve
eines Flusses
(Nach: Press &
Siever 2003)

Wodurch wird die Erosionsbasis beeinflusst?

Die lokale Erosionsbasis wird durch verschiedene Faktoren gesteuert:

Eine tektonische **Hebung oder Senkung** des Geländes führt dazu, dass der Fluss sich in das Gelände einschneidet oder Sediment ablagert. Überwiegt die Hebung die Erosion, resultiert dies in einer steileren Gefällskurve. Im Gegensatz dazu wird die Gefällskurve flacher, wenn die Erosion stärker ist als die Hebung.

Die Art, Grösse und Menge der von einem Fluss mitgeführten **Sedimente** beeinflusst die Erosionskraft eines Flusses. Steigen Menge und Korngrösse an, kann der Fluss den Untergrund stärker abschleifen. Ab einer bestimmten Menge und Grösse findet vermehrt Sedimenttransport statt. Eine zu grosse Sedimentmenge oder zu hohe Grösse des transportierten Materials führt dagegen zu einer Ablagerung der mitgeführten Sedimente im Flussbett.

Auch das **Klima** beeinflusst das Gefälle eines Flusses. Hohe Niederschlagsmengen fördern die Erosion und den Sedimenttransport in einem Fluss. Ein feuchtes Klima mit vielen Niederschlägen führt zu einer stärkeren Erosion und damit zu einer tieferen lokalen Erosionsbasis.

Bedeutung von Flussläufen

Das Verschieben von Wasserscheiden kann auch zu einem Einschneiden der Flüsse führen (vgl. Abb. 5). Beispiel hierfür ist das Umlenken mehrerer Flüsse in den Rhein und damit in die Nordsee. Viele Flüsse der Nordschweiz flossen zunächst in die Donau und damit in das Schwarze Meer. Das heute noch wachsende Einzugsgebiet des Rheins gegenüber der Donau ist darin begründet, dass der Rhein (Höhenlage ca. 390 m ü. M. bei Schaffhausen) auf einem deutlich tieferen Niveau fließt als die Donau, zirka 650 m ü. M. nördlich von Schaffhausen.

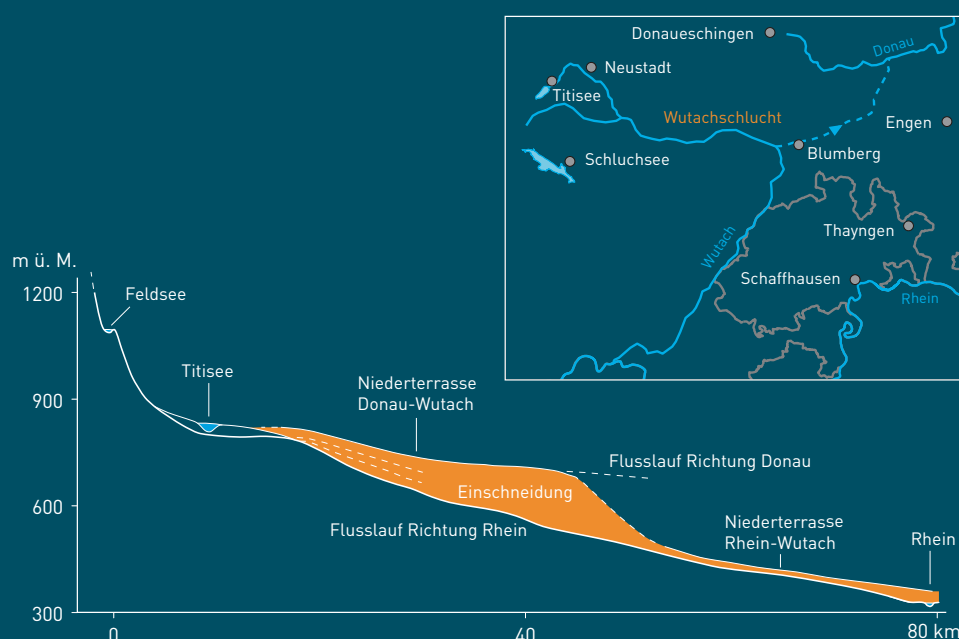


Abbildung 5

Die jüngste Umlenkung eines Flusses geschah vor etwa 18 000 Jahren: Die Wutach wurde bei Blumberg in den Rhein gelenkt. Durch die darauf folgende Einschneidung entstand die Wutachschlucht.

(Nach: Einsele & Ricken 1993)

Flussterrassen liefern Hinweise

Im Gelände sind die vergangenen Einschneidungen von Flüssen durch Terrassenlandschaften sichtbar. Flussterrassen sind treppenförmige Geländestufen, die meistens auf beiden Seiten eines Flusses zu finden sind. Diese Stufen werden gebildet, wenn der Fluss sich einschneidet, zum Beispiel als Reaktion auf eine Hebung der Erdoberfläche oder eine Erhöhung der Erosionskraft des Flusses. Führt der Fluss mehr Sediment, als er aufgrund seiner Fließgeschwindigkeit transportieren kann, wird das Flussbett wieder mit Lockergesteinen aufgefüllt. In der Nordschweiz ist die schrittweise Einschneidung der Flüsse durch Schotterablagerungen dokumentiert (vgl. Abb. 6). Alte Schotter finden sich zum Beispiel auf dem Irchel bei der Tösssegg oder auf dem Cholfirst südlich von Schaffhausen. Diese Ablagerungen erlauben es, die vergangenen Flusseinschneidungen zu rekonstruieren.

Die geologische Uhr tickt anders

Die existierenden Schotterablagerungen zeigen, dass sich die Flüsse in der Nordschweiz in den

letzten zirka zwei Millionen Jahren zwischen 150 und 300 Metern in den Fels eingeschritten haben. Die Erkenntnisse zu vergangenen Einschneidungen der grossen Flüsse wurden für die Ableitung von Erosionsszenarien berücksichtigt. Die Überlegungen sind damit in die Abgrenzung und Bewertung von Lagerperimetern in Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager eingeflossen.

Durchbruchsrinnen entstehen

Im Zusammenhang mit Vergletscherungen kann es zu starken und raschen Veränderungen der lokalen Flussläufe kommen. Durch Moränen, Eis oder Aufschotterung kann ein existierendes Tal verschlossen oder aufgefüllt werden und das Wasser gezwungen sein, sich einen neuen Weg zu suchen. In der Vergangenheit wurden so vermutlich in kurzer Zeit neue Täler geschaffen. Ein Beispiel dafür ist der Durchbruch des Rheins zwischen Rüdlingen und der Tössmündung. Dieses Tal entstand bei der letzten Vergletscherung durch die Bildung einer Moräne zwischen Rüdlingen und dem Rafzerfeld. Vorher erfolgte die Entwässerung von Rüdlingen nach Westen direkt ins Rafzerfeld (vgl. Abb. 7).

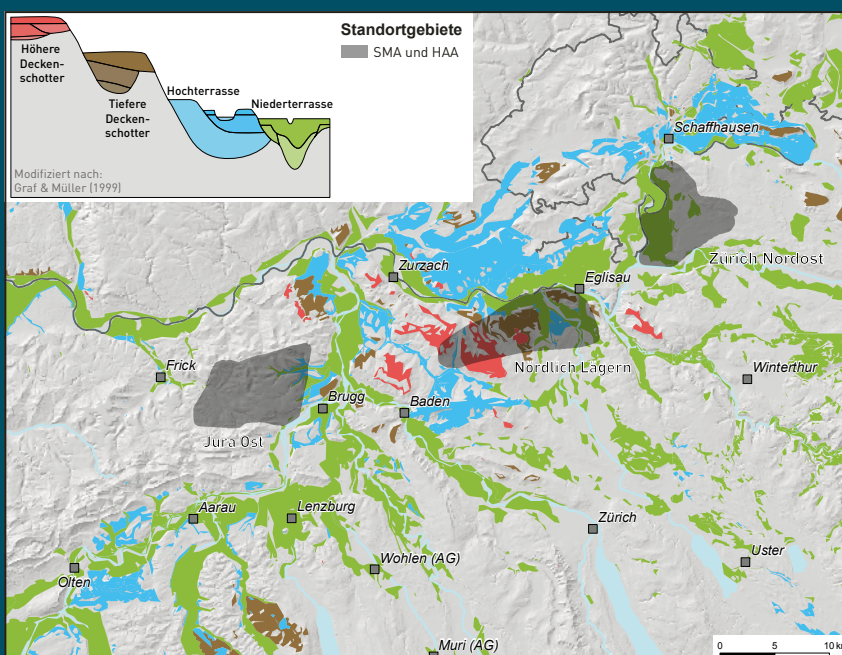


Abbildung 6

In der Schweiz existieren, aufgrund der schrittweisen Einschneidung der Flüsse, Schotterterrassen auf verschiedenen Höhenlagen. Im Allgemeinen sind dabei die höchsten Terrassen (Deckenschotter) älter als die niedrigeren Hoch- und Niederterrassen. Sie geben Hinweise auf die vergangenen Einschneidungsprozesse. Zu sehen ist die weite Verbreitung der Niederterrassenschotter (grün). Von den höheren Deckenschottern (rot) ist nicht viel erhalten geblieben. (Nach: Nagra 2014)

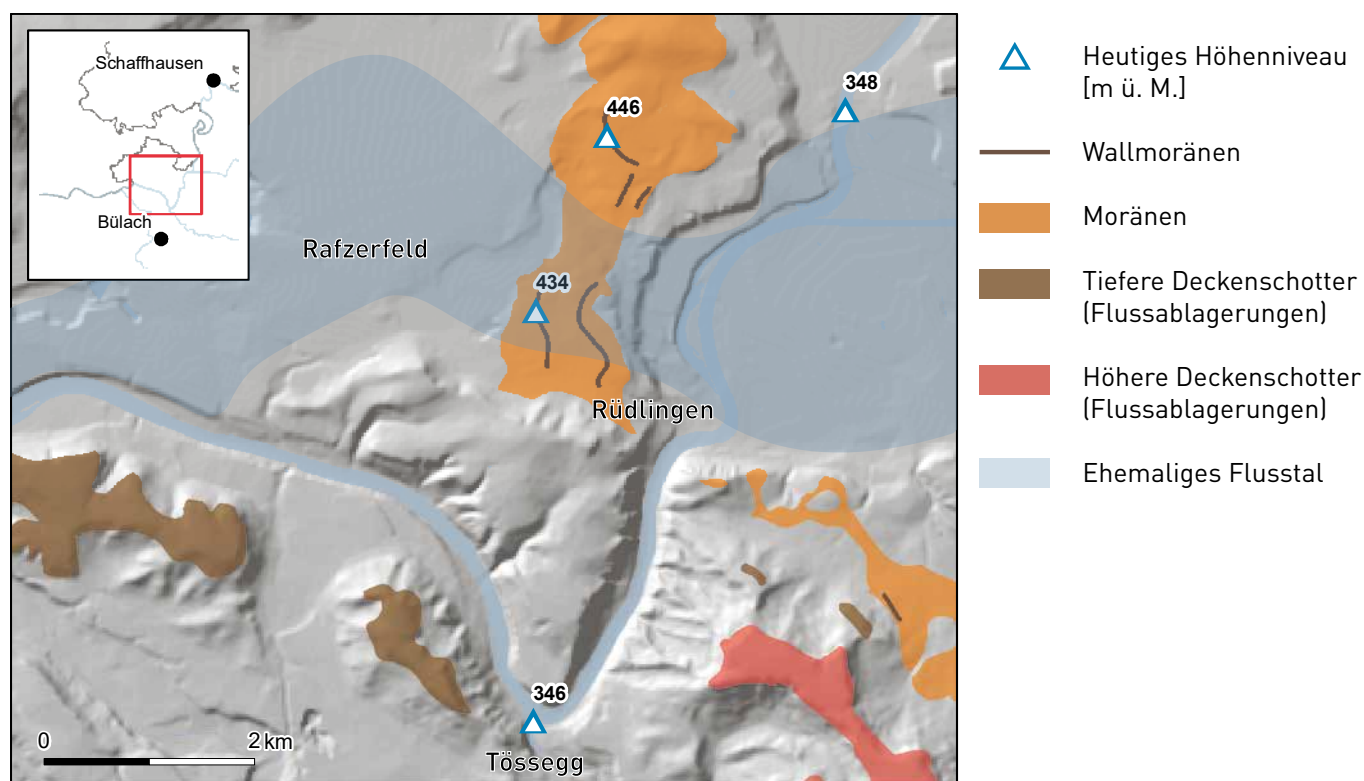


Abbildung 7

Durchbruch des Rheins zwischen Rüdlingen und der Tössmündung: Nach der Ablagerung der Moräne wurde der Fluss aufgestaut und bei der tiefsten Stelle in Rüdlingen Richtung Tössegg abgelenkt. In der Folge tiefte er sich dort rasch ein. (Nach: Nagra 2014a)

Die gleichen Gesteine wie früher bilden sich auch heute

Flusssedimente mit typischem abgerundetem Kies und sandigen Abschnitten können sowohl in heutigen Flussbetten als auch in alten Sedimenten gefunden werden.

Ablagerung der höheren Deckenschotter



Heutige Flussablagerungen des Rheins



Gletscher

Gletscher sind durch Schnee gebildete Eismassen. Weite Teile der Schweiz wurden früher von Gletschern bedeckt. Die Spuren dieser Vereisungen sind noch heute in der Landschaft zu finden.

Wie entstehen Gletscher?

Gletscher entstehen dann, wenn mehr Schnee fällt als abtaut. Dadurch erhöht sich der Druck auf die älteren Schneeschichten. Der Schnee wandelt sich zu Firn und schliesslich zu Gletschereis um. Dieser Vorgang kann mehrere Jahre dauern. Ist die Masse des Eises hoch genug, beginnt sie hangabwärts zu fließen. Ein Gletscher ist entstanden.

Wie sind Gletscher aufgebaut?

Im Nährgebiet gewinnt der Gletscher an Masse (vgl. Abb. 8). Der Zugewinn an neuem Gletschereis im Nährgebiet überwiegt den Anteil, der vor allem durch Schmelzen des Eises verloren geht. Im Zehrgebiet verliert der Gletscher durch Abschmelzen an Masse.

Wie erodiert ein Gletscher?

Unter einem Gletscher kann es zu verschiedenen Arten der Erosion kommen. Beispielsweise kann ein Gletscher festgefrorenes Gestein aus dem Untergrund lösen oder durch mitgeführtes Gestein den Untergrund abschleifen. Die Erosion kann den Untergrund tiefer als die lokale Erosionsbasis abtragen.

Spuren des Eises

Wenn ein Gletscher sich zurückzieht und das unter ihm liegende Gestein freigibt, hinterlässt er charakteristische Landschaftsformen, zum Beispiel Moränen oder Seen (vgl. Glossar).

Die Eismassen eines Gletschers schaffen auch neue Täler oder vertiefen beziehungsweise verändern bestehende. Diese Täler werden wegen ihrer Form Trog- oder U-Tal genannt. Ihre Wände sind typischerweise steil und der Talboden eben. Ausgeprägte Trogtäler wie das Lauterbrunnental sind in den Alpen anzutreffen (vgl. Abb. 9).

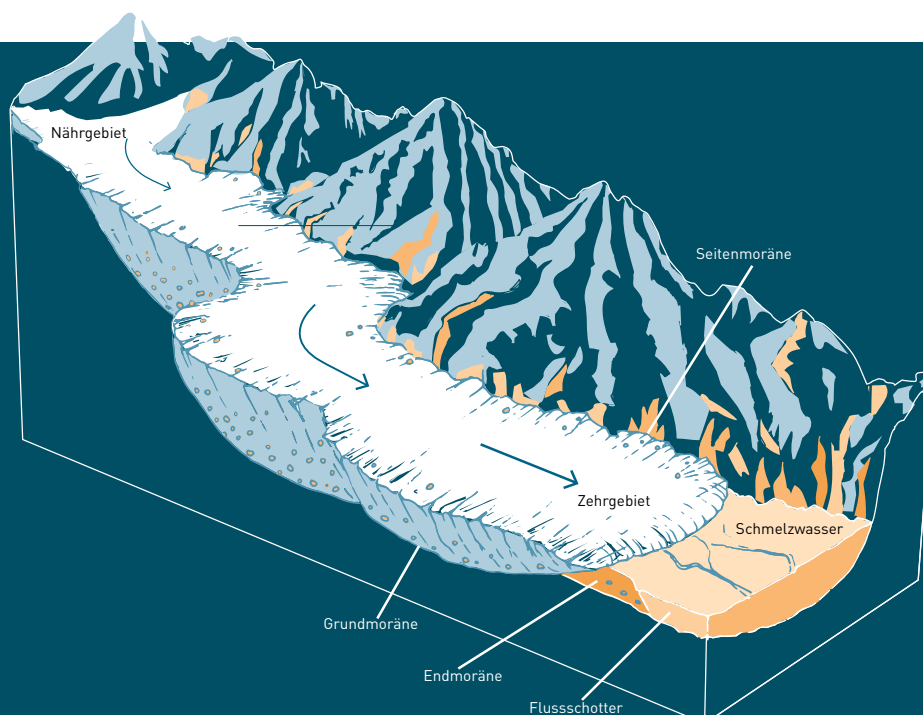


Abbildung 8

Schematischer Aufbau eines Gletschers
(Nach: Press & Siever 2003 | Julia Buschbeck – wissenschaftliche Illustration)

Eiszeitliche Übertiefungen

Unter dem Gletscher können grosse Mengen an Schmelzwasser fliessen, wodurch eine starke Erosion einsetzen kann. Da Wasser und Sedimente unter dem Gletschereis Anstiege überwinden können, führt eine kontinuierliche Erosion zu so genannten «übertieften Felsrinnen» im Gletscherbett (vgl. Seiten 16 f.). Diese können eine Tiefe bis zu mehreren hundert Metern haben. Die Tiefe hängt von verschiedenen Faktoren wie Gesteinsart, Wasserfluss, Fliessgeschwindigkeit und Dicke des Gletschers ab. Welchen Einfluss diese Faktoren genau auf die Bildung von «Übertiefungen» haben, wird heute erforscht.

Hat der Gletscher eine Übertiefung geschaffen, füllt sich diese nach dessen Rückzug mit Wasser. Beispiele hierfür sind der Vierwaldstättersee oder der Zürichsee. Die entstandenen Übertiefungen werden über lange Zeiträume (Tausende bis Zehntausende von Jahren) wieder mit Sedimenten aufgefüllt, die vor allem durch die Alpenflüsse in die Seen transportiert werden.

Durch Bohrungen weiss man, dass grosse eiszeitliche Übertiefungen in der Nordschweiz typischerweise eine Tiefe von 100 bis 300 Metern haben. Übertiefungen im Bereich der Standortgebiete für hochaktive Abfälle (HAA) werden weiter untersucht. Dabei kamen seismische Untersuchungen zum Einsatz. Ab 2019 sind Sondierbohrungen geplant (vgl. Seiten 20 f.).

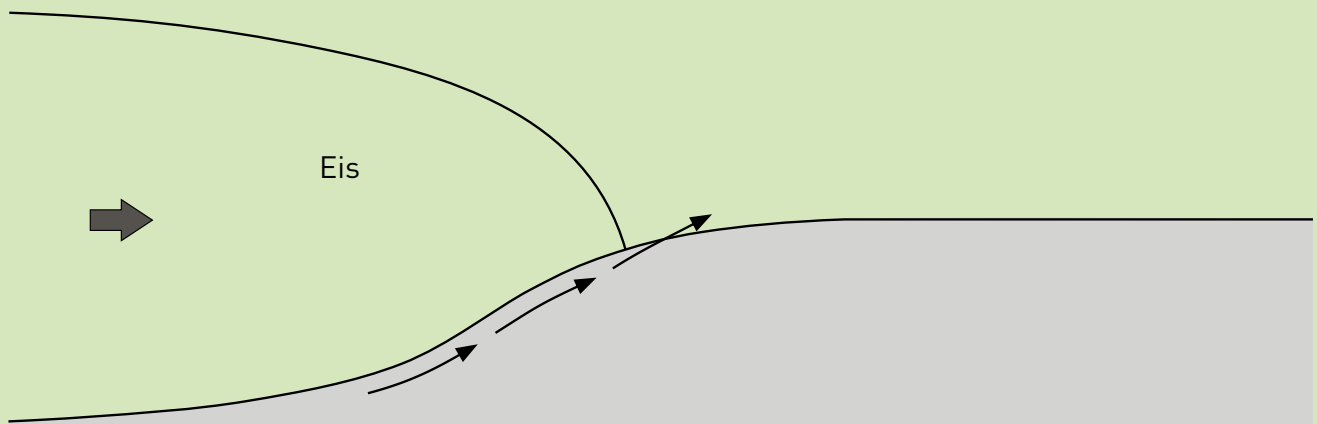


Abbildung 9

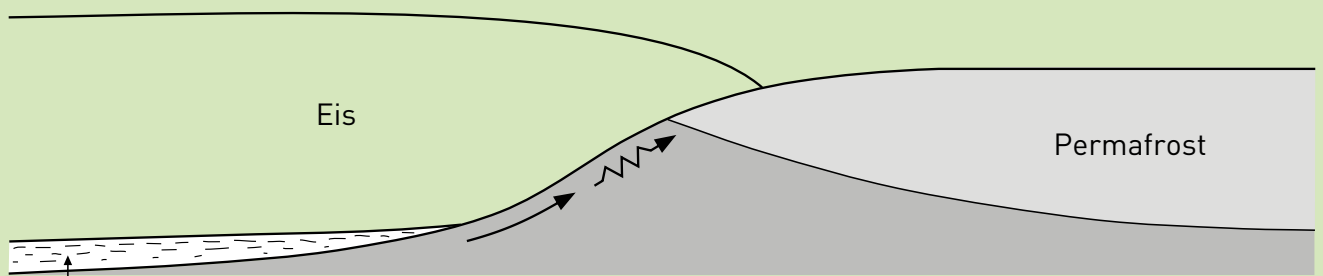
Das Lauterbrunnental ist ein klassisches U-Tal mit steilen Wänden.

Foto: Jakub Jirsák | Dreamstime.com

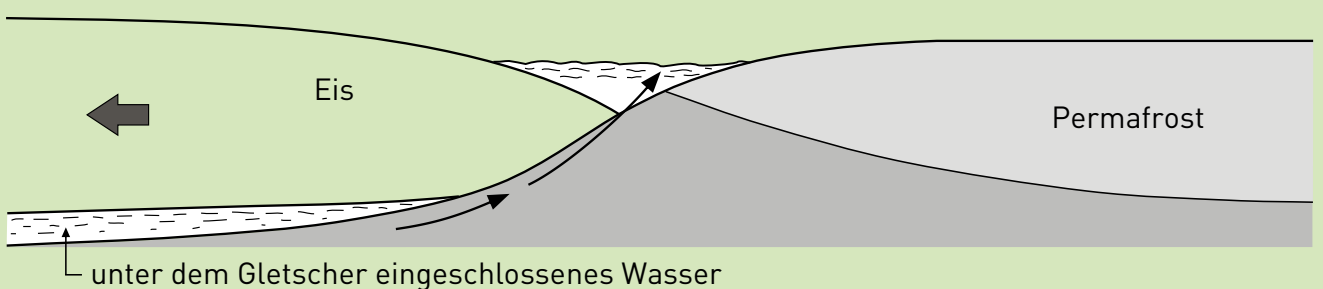
Wie eiszeitliche Übertiefungen entstehen



Stösst ein Gletscher in einer Eiszeit vor, kommt es aufgrund des grossen Druckgefälles unter dem Eis zu hohen Wasserabflussgeschwindigkeiten und Erosionsraten. Dabei können eiszeitliche Übertiefungen entstehen.



Unter trocken-kalten Klimabedingungen bildet sich um den Gletscher Permafrost. Dabei können der Permafrostboden und der Gletscher zusammenfrieren. Es kommt zu einem Aufstauen des Schmelzwassers unter dem Gletscher.



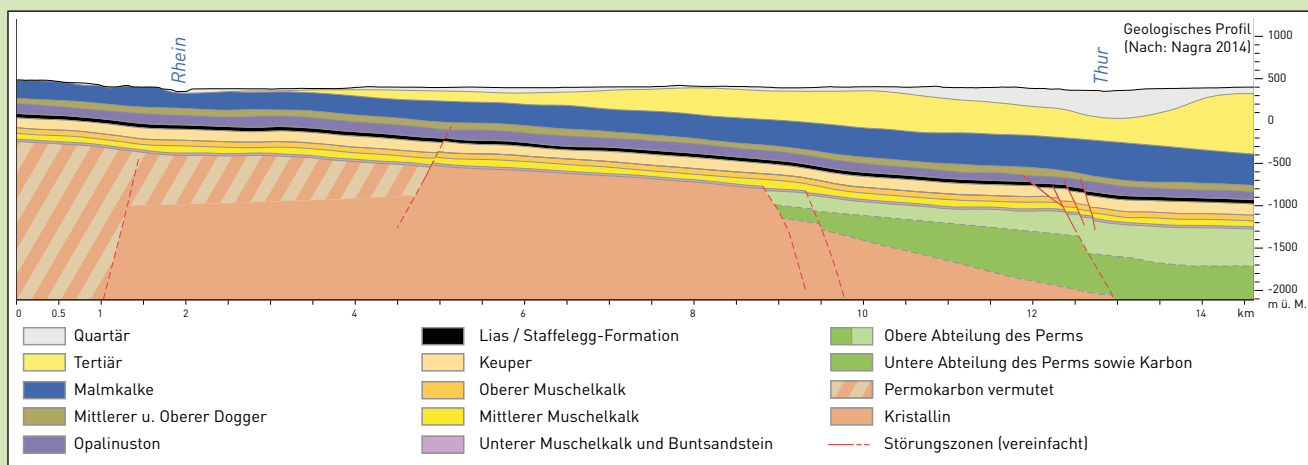
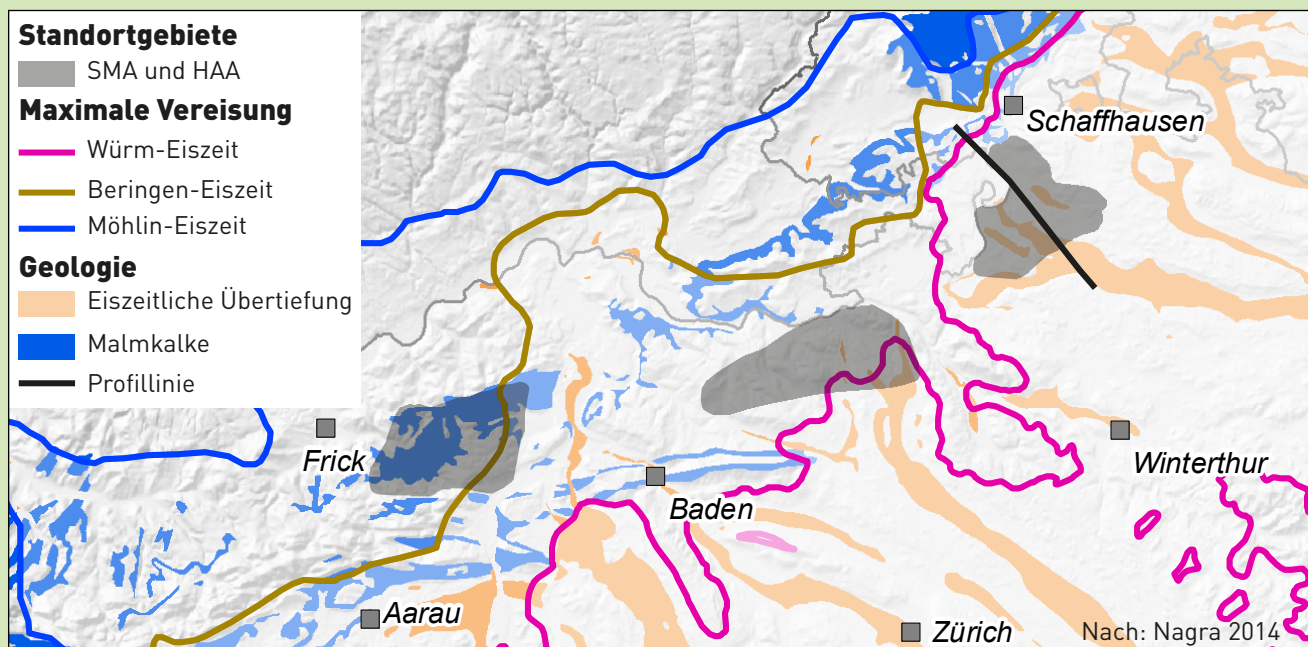
Wird das Klima wärmer, zieht sich der Gletscher zurück und der Permafrost beginnt zu tauen. Als Folge davon kann das unter dem Gletscher gestaute Wasser ausbrechen. Diese Ausbrüche bewirken eine intensive Erosion und können zur Entstehung von eiszeitlichen Übertiefungen führen.

(Nach: Piotrowski 1994 und Hooke & Jennings 2006)

Ein Faktor bei der Standortwahl

Die eiszeitlichen Gletscher schnitten sich im Mittelland in die Molasse (vgl. Glossar) ein und bildeten eiszeitliche Übertiefungen. Diese Übertiefungen wurden später wieder mit Lockergesteinen gefüllt. Zukünftige Gletscher folgen bevorzugt den existierenden Tälern. Insbesondere dort, wo keine ausgeprägten Täler existieren, ist aber auch die Bildung von neuen Übertiefungen möglich.

Bei der Abgrenzung von Lagerperimetern für geologische Tiefenlager wurden diese eiszeitlichen Übertiefungen berücksichtigt. Bei der Abgrenzung der Lagerperimeter für hochaktive Abfälle wurde ein Mindestabstand von 500 Metern zwischen dem Grund von grösseren eiszeitlichen Übertiefungen und dem Opalinuston eingehalten. Diese Felsüberdeckung besteht unter anderem aus dicken Kalksteinschichten (Malmkalke; vgl. Abb. unten), die gegenüber der glazialen Tiefenerosion (vgl. Glossar) eine höhere Erosionsresistenz haben als die darüber liegenden Molassegesteine.



Erosion und Tiefenlager

Um Standortgebiete abzugrenzen, in denen das Wirtgestein in optimaler Tiefenlage liegt, müssen Annahmen über die zukünftige Erosion getroffen werden.

Für die zukünftigen Erosionsprozesse werden verschiedene Szenarien untersucht, die keine exakten Voraussagen sind, aber eine breit abgestützte wissenschaftliche Diskussion erlauben. Dabei werden unterschiedliche Annahmen zur Klimaentwicklung und zu den Erosionsraten getroffen. Die Szenarien dienen zur Bestimmung, wie tief das Wirtgestein Opalinuston liegen muss, damit das Tiefenlager genügend gut und lange vor Erosion geschützt ist.

In Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager wurden im Hinblick auf die Abgrenzung der Lagerperimeter für ein geologisches Tiefenlager folgende Aspekte betrachtet:

- Gleichmässige Abtragung des Geländes durch Flüsse und Hangprozesse
- Ausräumung und Vertiefung von existierenden eiszeitlichen Übertiefungen durch zukünftige Vergletscherungen

- Entstehung von neuen Tälern (Durchbruchsrinnen) und neuen glazialen Übertiefungen im Zusammenhang mit zukünftigen Vergletscherungen

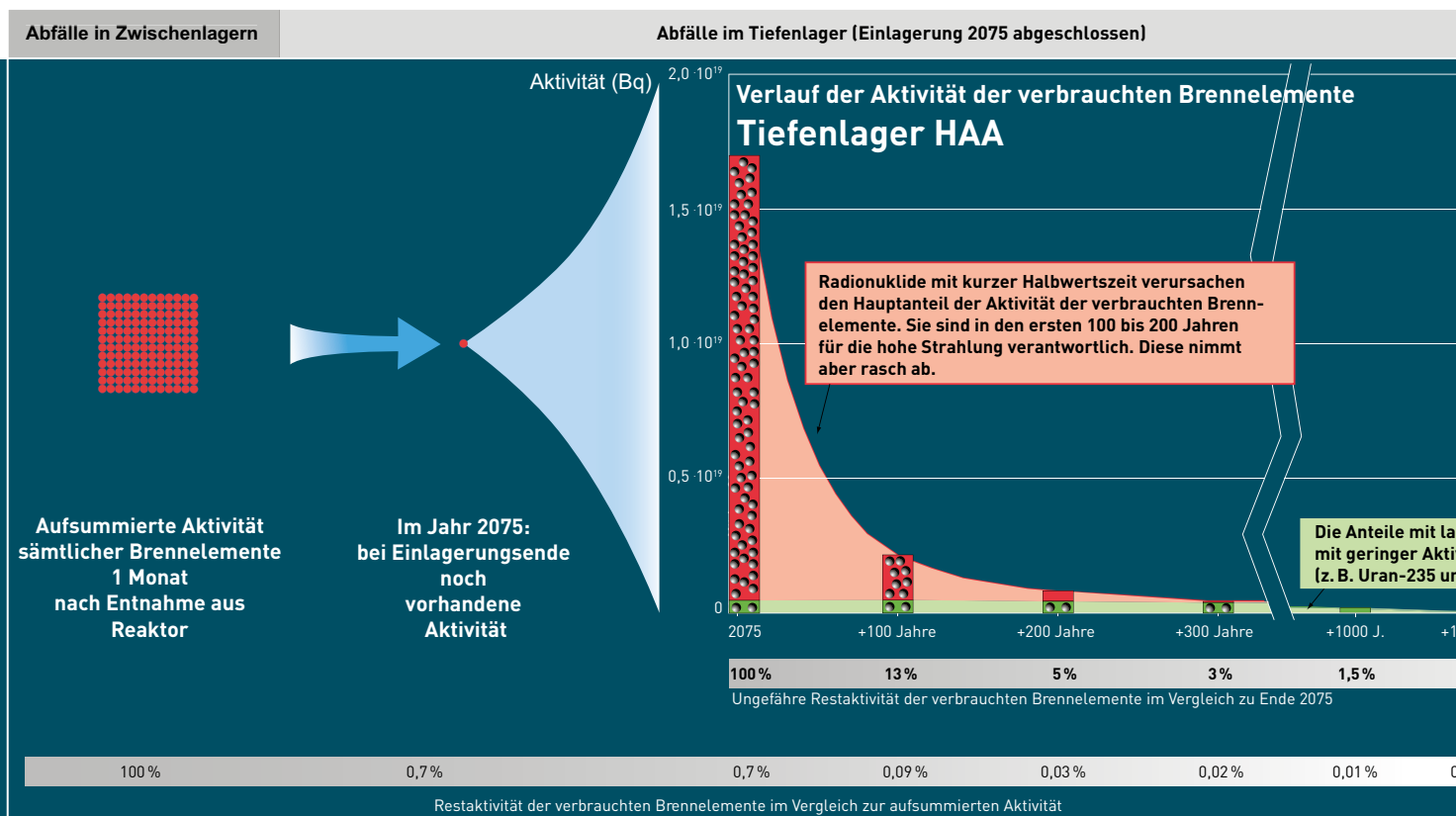
Einschneidung der Hauptflüsse

Bei den Szenarien wird davon ausgegangen, dass sich das Gelände weiter hebt und die Hauptflüsse weiter in den Untergrund einschneiden. Die Hauptflüsse bilden eine lokale Erosionsbasis, unter der keine Erosion durch kleine Fließgewässer und Hangprozesse möglich ist.

Wichtigste Grundlage für die Abschätzung der zukünftigen Einschneidung der Hauptflüsse sind die Erkenntnisse aus der vergangenen Entwicklung.

Eiszeitliche Übertiefungen

In den Alpen und in Alpennähe sind eiszeitliche Übertiefungen und Täler meist ausgeprägt und geben deshalb klare Fließwege für einen Gletscher vor. In flachem Gelände ist die Bildung neuer Sei-



tenäste oder ganzer Übertiefungen einfacher. Im nördlichen Molassebecken der Schweiz (vgl. Abb. 12, Seite 24) finden sich neben mehrfach ausgeräumten und wieder verfüllten Übertiefungen auch verschiedene neu angelegte Übertiefungen beziehungsweise neue Seitenäste von eiszeitlichen Übertiefungen. Die Vergangenheit zeigt, dass dies in den Standortgebieten auch in Zukunft möglich ist.

Aus diesem Grund wurde bei der Abgrenzung von Lagerperimetern in Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager die glaziale Tiefenerosion in zweifacher Hinsicht berücksichtigt – für Zürich Nordost und Nordlich Lägern:

- Im Hinblick auf die Vertiefung von existierenden Übertiefungen wird ein Mindestabstand von 500 Metern vom Grund der grösseren Felsrinnen zum Opalinuston eingehalten.
- Im Hinblick auf die Bildung von neuen Übertiefungen wird im Bereich der Referenz-Lagerperimeter (vgl. Glossar) für hochaktive Abfälle ein Mindestabstand von 450 Metern zur aktuellen lokalen Erosionsbasis eingehalten.

Das Gebiet Jura Ost war in der Vergangenheit deutlich seltener vergletschert als die anderen beiden Gebiete. Auch in Zukunft wird eine Eisbedeckung hier deutlich seltener und weniger dick sein. Für einen Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren wird trotzdem die Möglichkeit einer Durchbruchrinne und einer glazialen Übertiefung mitten durch das Gebiet betrachtet. Ein Mindestabstand von 200 Metern zur lokalen Erosionsbasis wird eingehalten.

Entstehung neuer Durchbruchrinnen

Für die Erosion des Geländes ist die Bildung von Durchbruchrinnen im Zusammenhang mit Vergletscherungen wichtig. Entsteht solch eine Rinne, läuft die Einschneidung vergleichsweise rasch ab. Die Lage neuer Durchbruchrinnen kann nur bedingt vorhergesagt werden. Durchbruchrinnen schneiden sich aber nicht tiefer als die lokale Erosionsbasis in das Gelände ein.

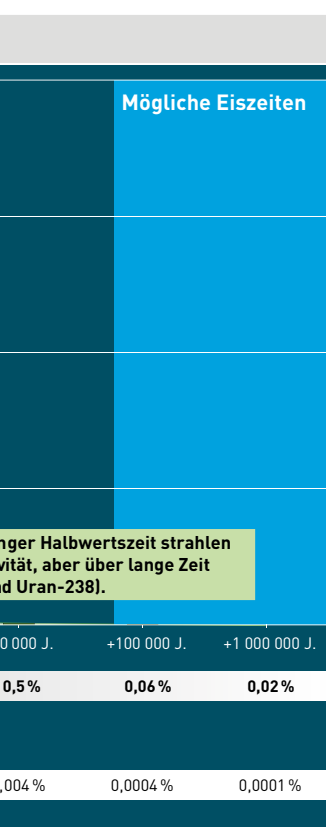


Abbildung 10

Verlauf der Aktivität in einem Tiefenlager für hochaktive Abfälle: Es wird in frühestens 50 000 bis 60 000 Jahren mit grösseren Gletschervorstössen in das Alpenvorland gerechnet. Zu diesem Zeitpunkt ist bereits ein beträchtlicher Teil der radioaktiven Stoffe in einem Tiefenlager zerfallen.

Wie lange sind die Abfälle einzuschliessen?

Der grösste Teil der radioaktiven Abfälle zerfällt rasch. Nach rund dreihundert Jahren beträgt die Strahlung der Abfälle im Tiefenlager nur noch wenige Prozent im Vergleich zum Einlagerungsende. Der Anteil radioaktiver Stoffe mit langen Halbwertszeiten strahlt schwächer, aber über lange Zeit.

In 200 000 Jahren sind die hochaktiven Abfälle (HAA) noch etwa so radiotoxisch wie die entsprechende Menge natürlichen Uranerzes, die zur Herstellung der Brennelemente abgebaut wurde. Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) erreichen nach 30 000 Jahren die Radiotoxizität von Granit.

Erdwissenschaftliche Un

Um die Szenarien der zukünftigen Erosion zu überprüfen und weiter zu entwickeln, führt die Nagra in den verbleibenden Standortgebieten erdwissenschaftliche Untersuchungen durch.

Die Nagra untersucht den Untergrund in den verbleibenden Standortgebieten mit Methoden wie 3D-Seismik und Sondierbohrungen. Letztere sind ab 2019 geplant.

In den Jahren 2015 bis 2017 wurden die Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost bereits 3D-seismisch untersucht (vgl. Glossar). Die 3D-Seismik liefert ein räumliches Abbild der Gesteinsschichten im Untergrund. Die Daten werden ausgewertet und fliessen in das weitere Verfahren ein.

Sondierbohrungen liefern umfassende Informationen zu den Eigenschaften des Wirtgesteins und zu den wasserführenden Schichten. Sie dienen auch zur Eichung der vorangegangenen seismischen Messungen.

Auch ein Fokus auf die Erosion

Die Tiefbohrungen werden eine genauere Angabe zur Tiefenlage des Opalinustons erlauben, was für die Beurteilung des Schutzes vor zukünftiger Erosion relevant ist. Im Bezug auf die Entwicklung der Erosion in der Nordschweiz führt die Nagra 2018 unter anderem auch Quartärbohrungen in der Nordschweiz durch. Mit den Daten aus diesen Bohrungen – in den Lockergesteinen von Über-tiefungen – werden Erkenntnisse aus vergangenen Erosionsprozessen gewonnen und Aussagen für die Zukunft gemacht. Basierend darauf werden in Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager die vorhandenen Erosionsszenarien überprüft und verfeinert.

Weitere Methoden sind die geologische Kartierung und die Untersuchung von Aufschlüssen. Aufschlüsse sind Orte, zum Beispiel Steinbrüche, an denen man Gesteine an der Erdoberfläche sieht. Auch die Untersuchung von Aufschlüssen hilft dabei, die zukünftige Landschaftsentwicklung zu rekonstruieren, insbesondere den Einfluss von Erosion.



3D-Seismik: Überwachung im Messwagen; Foto: Beat Müller

Schusseismik: Bohrung eines Sprenglochs; Foto: Beat Müller

tersuchungen

Die Resultate werden beim sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete in Etappe 3 des Sachplans berücksichtigt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, eine verlässliche Datenbasis für die Rahmenbewilligungsgesuche (siehe unten) zu bilden.

Wie geht es weiter?

Die Nagra gibt, gestützt auf die erdwissenschaftlichen Untersuchungen, etwa 2022 bekannt, für welche Standortgebiete sie Rahmenbewilligungsgesuche für je ein HAA- und SMA-Lager oder aber ein Kombilager ausarbeiten wird.

Voraussichtlich 2024 reicht die Nagra die Rahmenbewilligungsgesuche ein. Für die weitere Konkretisierung der für die Tiefenlager nötigen Oberflächeninfrastruktur ist davor wiederum die Zusammenarbeit mit den Standortkantonen, Regionen und Gemeinden vorgesehen. Der Einreichung der Rahmenbewilligungsgesuche folgen eine behördliche Prüfung und eine breite öffentliche Anhörung. Der Bundesratsentscheid wird zirka 2029 erwartet.

Das Parlament muss diesen Entscheid genehmigen. Der Parlamentsentscheid wiederum untersteht dem fakultativen Referendum. Sofern dieses ergriffen wird, entscheidet das Schweizer Stimmvolk etwa 2031 über die Standorte für geologische Tiefenlager.



Bohrung; Foto: © Comet Photoshopping, Dieter Enz

Gesteinsbeschreibung; Foto: Nagra

Fazit

Die zukünftige Topografie in den geologischen Standortgebieten wird vor allem durch Flüsse und Gletscher gesteuert. Der Opalinuston wird vor Erosion geschützt durch die darüberliegenden Gesteinsschichten und eine genügende Tiefenlage.

Flüsse

Basierend auf den Überlegungen zum vergangenen und heutigen Flussnetz werden verschiedene Szenarien für die zukünftige Entwicklung der lokalen Erosionsbasis abgeleitet. Diese Szenarien unterscheiden zwischen einem Lager für SMA-Abfälle und einem für HAA-Abfälle (unterschiedliche Betrachtungszeiträume) sowie zwischen den Standortgebieten.

Gletscher

Im Bereich der Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern finden sich eiszeitliche Übertiefungen, die 200 bis 300 Meter in die Molasse eingeschnitten sind. Übertiefungen in härteren

Kalkgesteinen, wie sie zwischen der Molasse und dem Opalinuston vorkommen, sind selten und weniger tief.

Die vergangene Entwicklung zeigt, dass Erosion bevorzugt im Bereich von bestehenden Tälern und Übertiefungen stattfindet und diese vertiefen oder verbreitern kann. Insbesondere in Gebieten mit flacherem Gelände können aber auch neue Übertiefungen gebildet werden. Deshalb berücksichtigen die Erosionsszenarien sowohl die Vertiefung oder Verbreiterung als auch die Bildung von neuen Durchbruchsrinnen und eiszeitlichen Übertiefungen.

Situation in den Standortgebieten

Die Standortgebiete, die für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager weiter untersucht werden (Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost) präsentieren sich im Hinblick auf zukünftige Erosion wie folgt:

Die Gebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern waren in der Vergangenheit deutlich häufiger ver-

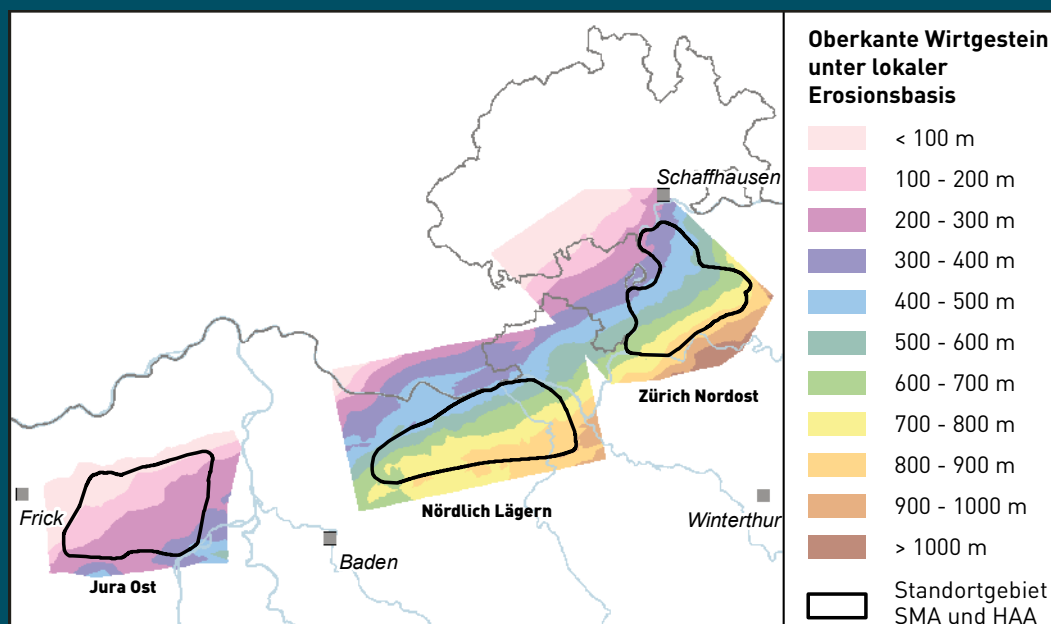


Abbildung 11

Lage der Oberkante des Wirtgesteins Opalinuston unter der lokalen Erosionsbasis (Nach: Pietsch & Jordan 2014)

gletschert als das Gebiet Jura Ost, und es liegen eiszeitliche Übertiefungen innerhalb der ersten beiden Standortgebiete. Aufgrund der relativ flachen Erdoberfläche ist auch das Entstehen von neuen Übertiefungen vergleichsweise einfach. Die in Etappe 2 vorgeschlagenen Referenz-Lagerperimeter liegen mindestens 450 Meter (Zürich Nordost) und 550 Meter (Nördlich Lägern) unter der lokalen Erosionsbasis. In beiden Gebieten sind auch tiefer gelegene Lagerperimeter möglich (vgl. Abb. 11). Zudem kommen über dem Opalinuston mächtige Kalksteine vor, die im Vergleich zu den Mergeln und Sandsteinen der Molasse eine hohe Erosionsresistenz haben.

Das Standortgebiet Jura Ost bringt im Hinblick auf zukünftige Erosion andere Voraussetzungen mit. Die Tiefenlage des Opalinustons ist im Gebiet Jura Ost geringer als in den anderen Standortgebieten. Im vorgeschlagenen Lagerperimeter liegt der Opalinuston mindestens 200 Meter unter der lokalen Erosionsbasis. Das Bözbergplateau wurde allerdings in der Vergangenheit nur wenige Male vergletschert und die Eismächtigkeit war deutlich

geringer. Das Potenzial für die Entstehung von eiszeitlichen Übertiefungen wird deshalb auch für den zukünftigen Betrachtungszeitraum als gering eingeschätzt. Als Erosionsszenario wurde aber die Entstehung eines neuen Tals betrachtet. Es wurde angenommen, dass das untere Aaretal in Folge einer Vergletscherung verschlossen wird und die Aare im neuen Tal mitten durch das Standortgebiet fließt. Auch in diesem pessimistischen Szenario wird das Lager in der nächsten Million Jahre nicht freigelegt.

Alle drei Standortgebiete sind somit genügend lange vor Erosion geschützt.

Wo kann das Tiefenlager gebaut werden?

Grundsätzlich erfüllen alle Standortgebiete die hohen Sicherheitsanforderungen des Bundes und sind für den Bau von Tiefenlagern geeignet. Dies hat das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) im April 2017 in seinem Gutachten bestätigt.

Im weiteren Verfahren werden die einzelnen Standortgebiete vertieft untersucht und miteinander verglichen. Die Nagra schlägt dann die am besten geeigneten Tiefenlagerstandorte bezüglich Sicherheit vor, um dort das Tiefenlager zu realisieren.

Glossar

Aktivität

Aktivität ist die Zahl der je Sekunde in einer radioaktiven Substanz zerfallenden Atomkerne.

Betrachtungszeitraum

Mit dem Betrachtungszeitraum wird die Zeitspanne bezeichnet, die für Sicherheitsanalysen für ein geologisches Tiefenlager herangezogen wird. Der Betrachtungszeitraum beträgt eine Million Jahre für das HAA-Lager und 100 000 Jahre für das SMA-Lager.

Durchbruchsrinne

Wird ein Fluss aufgestaut oder ein Tal mit Schotter aufgefüllt, kann es zur Bildung einer Durchbruchsrinne kommen. Dabei sucht sich das Wasser einen neuen Weg durch ein bestehendes Hindernis.

Eiszeitliche Übertiefung

In den Tälern im Mittelland der Schweiz liegen zum Teil tiefe, mit Lockergesteinen (Sand und Kies) gefüllte Übertiefungen, die von Gletschern bis unter die Basis der heutigen Flüsse erodiert wurden. Der Einfluss solch tiefer Rinnen wird bei der Standortwahl berücksichtigt.

Erosion

Die Abtragung von Gestein und Boden durch Wasser, Eis, Wind und Schwerkraft.

Glaziale Tiefenerosion

Bildung tiefer Felsrinnen und übertiefer Täler unter dem Eis von Vorlandgletschern.

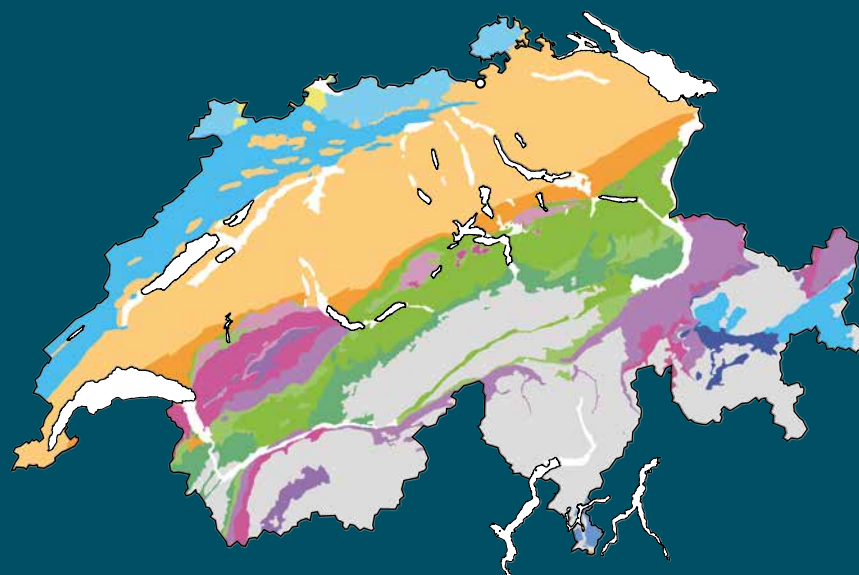
Halbwertszeit

Die Halbwertszeit ist eine Zeitspanne, in der die Menge und damit die Radioaktivität eines bestimmten Radionuklids auf die Hälfte des ursprünglichen Werts gesunken ist.

Lagerperimeter

Der Lagerperimeter umfasst denjenigen Wirtgesteinsbereich im Untergrund eines geologischen Standortgebiets, der unter Sicherheitsaspekten am besten für die Aufnahme des geologischen Tiefenlagers geeignet ist. Referenz-Lagerperimeter wurden im sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager verwendet.

- Rezente Lockergesteine
- Tertiär des Oberrheingrabens
- Tafeljura
- Faltenjura
- Mittelländische Molasse
- Subalpine Molasse
- Nordhelvetikum
- Helvetikum im engeren Sinn
- Ultrahelvetikum
- Unterpenninikum
- Mittelpenninikum
- Oberpenninikum
- Oberpenninische Flyschdecken
- Unterostalpin
- Oberostalpin
- Südalpin
- Südalpine «Molasse»
- Kristalline Decken und Massive



Basierend auf Geokarte der Schweiz, 1:500 000 © swisstopo

Abbildung 12
Geologie der Schweiz

Molasse

Abtragungsschutt der Alpen (vgl. Abb. 12)

Moräne

Von Gletschern abgelagerte Sedimente, die unterschiedliche Gesteine und Korngrössen enthalten, von Ton bis hin zu grossen Felsblöcken.

Opalinuston

Gestein, in das die radioaktiven Abfälle der Schweiz sicher eingeschlossen werden sollen. Der Opalinuston wurde vor zirka 173 Millionen Jahren in einem Flachmeer der Jurazeit abgelagert.

Radionuklid

Instabiler Atomkern, der unter Aussendung von radioaktiver Strahlung spontan zerfällt. Es gibt natürlich vorkommende und künstlich erzeugte Radionuklide.

Radiotoxizität

Bezeichnung für die Giftigkeit radioaktiver Stoffe, wenn sie in den menschlichen Körper gelangen.

Sachplan geologische Tiefenlager

Die Standortwahl für ein geologisches Tiefenlager erfolgt mit dem Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) gemäss Kernenergie- und Raumplanungsgesetz in drei Etappen (vgl. Abb. 13).

Seismik

Mit seismischen Messmethoden wird der geologische Untergrund mittels künstlich angeregter Schwingungen abgebildet.

Tiefenlage der Lagerebene

Ein geologisches Tiefenlager sorgt für die räumliche Trennung der Abfälle vom Lebensraum des Menschen. Die Lagerebene muss tief genug liegen, damit das Wirtgestein und die radioaktiven Abfälle ausreichend vor Erosion geschützt bleiben.

Wirtgestein

Das Wirtgestein nimmt die Lagerkammern des geologischen Tiefenlagers auf und trägt massgeblich zur Radionuklidrückhaltung bei.

**Abbildung 13**

Etappen und Abhängigkeiten nach Sachplan geologische Tiefenlager (Abb. gemäss Bundesamt für Energie)

Literaturverzeichnis

Berger, A. (1979): Long-Term Variations of Daily Insolation and Quaternary Climatic Changes. *J. Atmos. Sci.*, 35, 2362 – 2367.

Berger, A. & Loutre, M.-F. (2002): An Exceptionally Long Interglacial Ahead? *Science*, 297, 1287 – 1288.

Einsele, G. & Ricken, W. (eds.) (1993): Eintiefungsgeschichte und Stoffaustrag im Wutachgebiet (SW-Deutschland). *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C*, 15.

Graf, H. R. & Müller, B. U. (1999): Das Quartär: Die Epoche der Eiszeiten. In: Bolliger, T. (ed.): *Geologie des Kantons Zürich*. Ott Verlag, Thun, 71 – 95.

Hooke, R. LeB. & Jennings, C. E. (2006): On the formation of the tunnel valleys of the southern Laurentide ice sheet. *Quaternary Science Reviews*, 25, 1364 – 1372.

Pietsch, J. & Jordan, P. (2014): Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz – Version 2014 (SGT E2) und ausgewählte Auswertungen NAB 14-02.

Piotrowski, J. A. (1994): Tunnel-valley formation in northwest Germany – geology, mechanisms of formation and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley. *Sedimentary Geology*, 89, 107 – 141.

Press, F. & Siever R. (2003): *Allgemeine Geologie, Einführung in das System Erde*, 3. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg – Berlin.

Zum Weiterlesen

Nagra (2014): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage – Geologische Grundlagen Dossier III – Geologische Langzeitentwicklung; NTB 14-02.

Nagra (2014a): Erosion und Landschaftsentwicklung Nordschweiz – Zusammenfassung der Grundlagen im Hinblick auf die Beurteilung der Langzeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers (SGT Etappe 2); NAB 14-25.

«Standortgebiete für geologische Tiefenlager – Sondierbohrungen für Etappe 3», August 2017

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

«Bohrungen für Quartäruntersuchungen», März 2017

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

«Standortgebiete für geologische Tiefenlager – Sicherheitstechnischer Vergleich: Vorschläge für Etappe 3», Januar 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**