



Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung



Prof. Geoffrey Milnes

- International zusammengesetzte Expertengruppe (Schweiz, Deutschland, Österreich)
- Nachfolgeorganisation der KNE
- 7-9 unabhängige Mitglieder aus Universitäten und Forschungsanstalten
- Finanzielle Entschädigung durch ENSI
- Sicherheitstechnische und bautechnische Prüfungen im Sachplanverfahren
- Mitarbeit im Technischen Forum Sicherheit und in Aufsichtsgremien
- Öffentliche Stellungnahmen und Seminare



Prof. Simon Löw, Präsident



Prof. Rolf Kipfer



Prof. Fritz Schlunegger



Prof. Friedemann Wenzel



Dr. Annette Johnson (†)



Prof. Rainer Helmig



Prof. Wulf Schubert

Mediengespräch vom 19.04.2017

Simon Löw



Umfang und Form der Prüfarbeiten der EGT

Die von der Nagra für Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager SGT vorgelegte **Berichterstattung ist sehr umfangreich**, umfasst 3 Hauptberichte (1'700 Seiten) und fast 200 Referenzberichte (15'000 Seiten) sowie eine umfangreiche Nachlieferung zu den bautechnischen Nachforderungen des ENSI (vom November 2015).

Die EGT hat sich während **4 Jahren** intensiv mit der **Prüfung** dieser Unterlagen beschäftigt: 11 Zwischenhalt-Fachsitzungen (März 2013 bis Juli 2014), ein Fachsymposiums an der ETH Zürich (14. Februar 2014), 3 Sitzungen zur Grobprüfung (September bis Dezember 2014) und 12 Sitzungen zur Hauptprüfung (März 2015 bis November 2016).



Transparenz der Untersuchungen und der Dokumentation

Die EGT erachtet die **Transparenz aller Untersuchungen** der Nagra, welche in der allgemeinen Zugänglichkeit aller Auftragnehmerberichte und den offenen Diskussionen im Rahmen der Zwischenhaltfachsitzungen zum Ausdruck kommt, als vorbildlich.

Aufgrund des **Umfangs der vorgelegten Berichte** war die EGT aber nicht in der Lage, alle referenzierten Berichte zu Etappe 2 SGT zu sichten und zu prüfen. Die EGT hat darum nicht alle Kriterien und Indikatoren im Detail geprüft und sich auf die nach ihrer Ansicht wichtigsten Themen konzentriert.

Bezogen auf die zukünftige Berichterstattung zur Etappe 3 diskutiert die EGT mögliche Einschränkungen der Berichte auf die wesentlichsten Themen (**Fokussierung auf kritische Punkte**) der zukünftigen SMA/HAA Standorteinengung.



Fachlicher Tiefgang und fachliche Qualität der Arbeiten in Etappe 2 SGT

Die EGT erachtet den **fachlichen Tiefgang** und die **fachliche Breite** der von der Nagra durchgeführten Untersuchungen als sehr gut, auch im internationalen Vergleich mit anderen Standortauswahlverfahren weltweit.

Die neu erhobenen geologischen und hydrogeologischen **Daten** **sind durchwegs von sehr hoher Qualität** und für die Standorteinengung in Etappe 2 SGT geeignet.

Wichtige **Defizite** erkennt die EGT in den zur Verfügung stehenden felsmechanischen Datensätzen und der Überinterpretation der 2D Seismik.

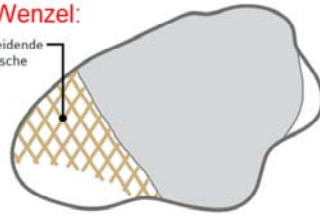




Es folgen drei Kurzreferate zu den wichtigsten Kriterien zur Standorteinengung in Etappe 2

F. Wenzel:

«Zu meidende
tektonische
Zone»

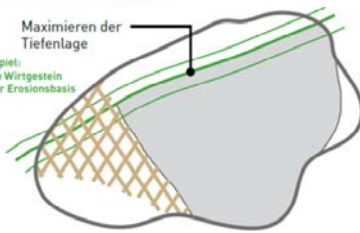


«Zu meidenden tektonischen Zonen» wird bei der Optimierung des Lagerperimeters ausgewichen.

F. Schlunegger:

Maximieren der
Tiefenlage

Beispiel:
Tiefe Wirtgestein
unter Erosionsbasis

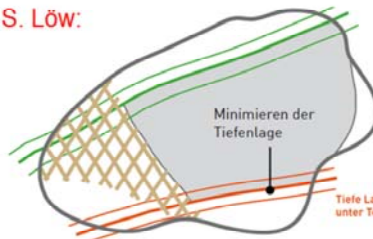


Maximieren der Tiefenlage im Hinblick auf Gesteins-
Dekompression, Erosion und glaziale Tiefenerosion.

S. Löw:

Minimieren der
Tiefenlage

Tiefe Lagerebene
unter Terrain



Minimieren der Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische
Machbarkeit.

(Aus Nagra 2015)

Mediengespräch vom 19.04.2017

Simon Löw

Aufgrund der detaillierten Analyse der Unterlagen kommt die EGT zum Schluss, dass die wichtigsten Indikatoren der Standort-Einengung in Etappe 2 die maximale Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit, die minimale Tiefenlage im Hinblick auf die Gesteinserosion und das räumliche Auftreten der zu meidenden tektonischen Zonen sind. Diese 3 Indikatoren werden in den nachfolgenden Kurzreferaten erläutert. Am Schluss folgt ein Kurzreferat zu einem wichtigen standortunabhängigen Thema, welches zukünftig noch vertieft untersucht werden sollte.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT)

Ausgewählte Resultate der Arbeiten der EGT zur Überprüfung von SGT Etappe 2:

Maximale Endlagertiefe aus bautechnischer Sicht

Simon Löw, ETH Zürich

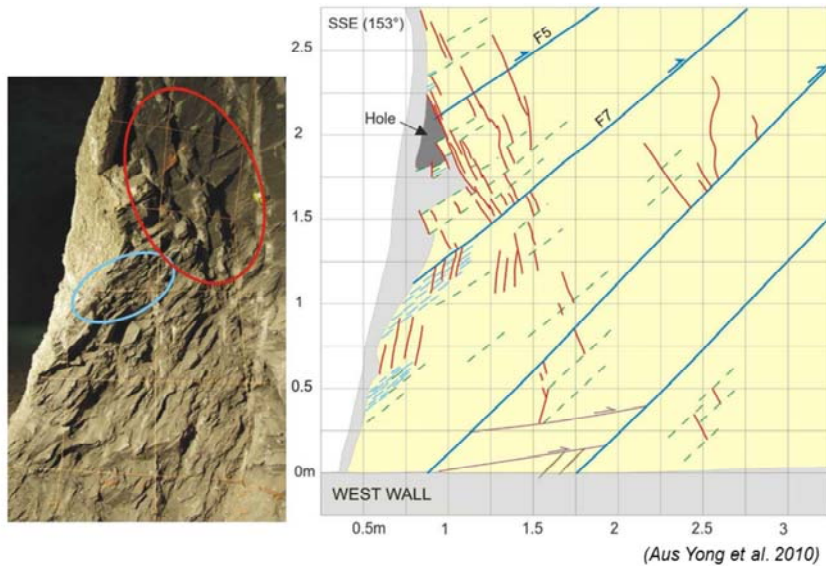




Photo des EZ-B Experimentes im Felslabor Mont Terri (Dissertation Salina Yong 2007). Schematisch eingetragen sind die radialen Spannungen um den Hohlraum (rot) und neue Risse in der Auflockerungszone (schwarze Linien). Diese Risse beeinflussen zumindest kurzfristig die Durchlässigkeiten und positiven Radionuklid-Rückhalteeigenschaften des Opalinustons.



Kartierte Risse in der Auflockerungszone der EZ-B Nische des Felslabors Mont Terri



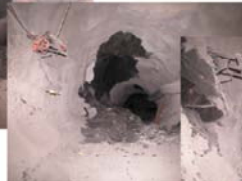
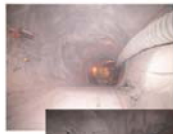
Mediengespräch vom 19.04.2017

Simon Löw

Blick auf die linke Stollenwand am Eingang der EZ-B Nische im Felslabor Mont Terri. Grüne und dunkelblaue, durchgezogene Linien stellen die bestehende Schichtung und Scherflächen im Opalinuston dar. Rote und hellblaue, gestrichelte Linien sind neue Risse der Auflockerungszone, welche im Zuge der Auffahrung der neuen Galerie 04 entstanden sind. Diese Ausdehnung dieser neuen Risse sollte durch geeignete Standortwahl (u.a. begrenzte Lagertiefe), Bauverfahren und Stützmittel möglich gering gehalten werden.



Im Bereich von Störzonen können sich grössere Niederbrüche entwickeln.



(Aus Bossart 2013, NAB 16-41)

1 m

Niederbruch EZ-A Nische
10. – 12. Sept. 2003

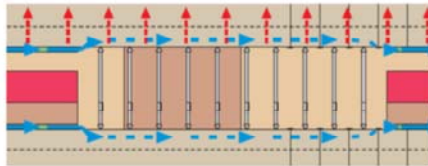
Mediengespräch vom 19.04.2017

Simon Löw

Niederbruch in der EZ-A Nische vom September 2003, ausgelöst durch eine schiefend durchquerte steilstehende Störzone (gebildet während der Entstehung des Faltenjuras). Grösse Niederbrüche können Dimensionen erreichen, welche die vertikale Ausdehnung der geologischen Barriere (Opalinuston) merklich reduzieren und die Langzeitsicherheit des Endlagers beeinflussen könnten. Im heutigen Konzept der Nagra werden Lagerstollen mit grösseren Niederbrüchen für die Lagerung von Abfällen ausgeschlossen.



Bentonit-verfüllte Versiegelungstrecken mit Stahlbögen sollen den Längsfluss von Wasser und den Transport von Radionukliden in der Auflockerungszone unterbinden.



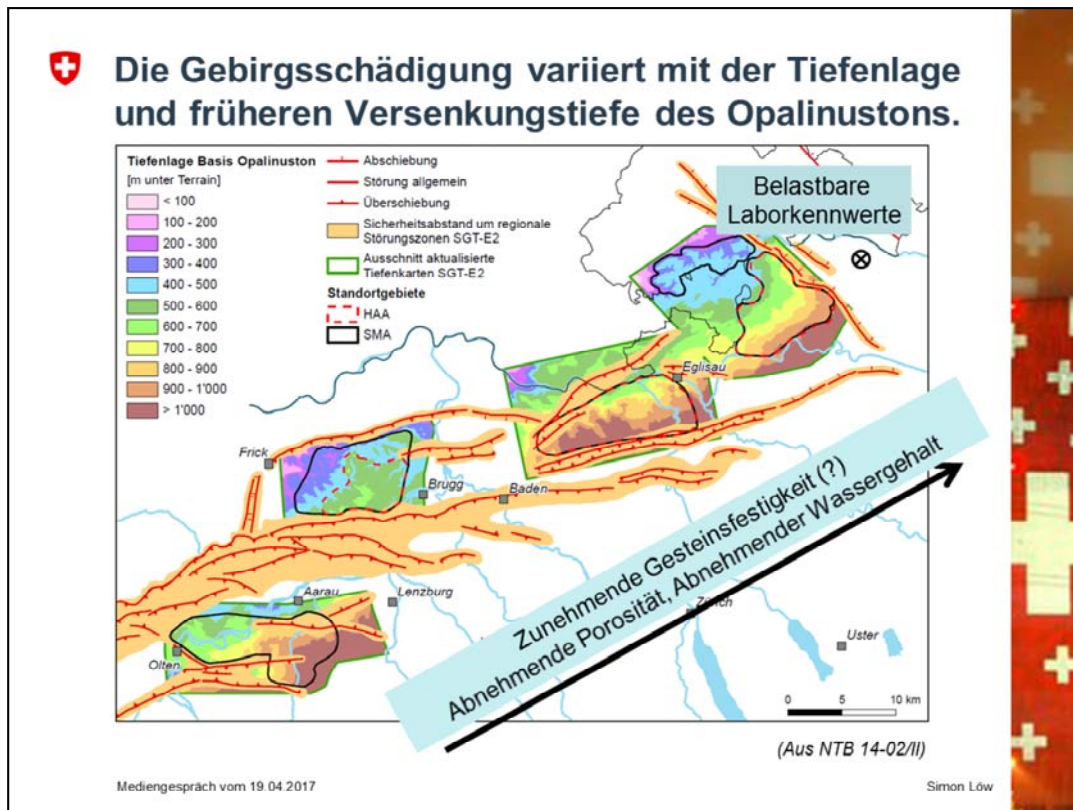
(Aus Nagra Arbeitsbericht)



Mediengespräch vom 19.04.2017

Simon Löw

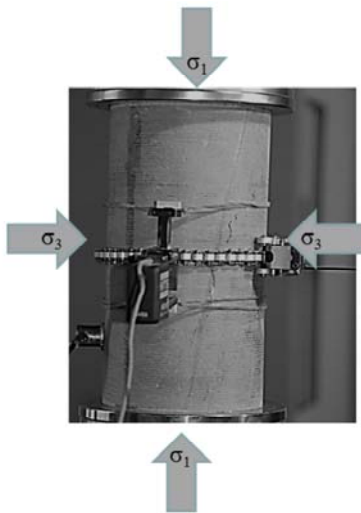
Die Versiegelungstrecken können für die Langzeitsicherheit und die maximale Tiefenlage relevant sein. In den Versiegelungstrecken sind nach Nagra die Mittel für die Stützung der Hohlräume stark eingeschränkt (z.B. kein Spritzbeton, wenig Stahl). Aus sicherheitstechnischen Überlegungen wird gefordert, dass die Bentonit-Verfüllung der Hohlräume optimal eingebracht und verdichtet werden kann und in direktem Kontakt mit dem Wirtgestein steht.



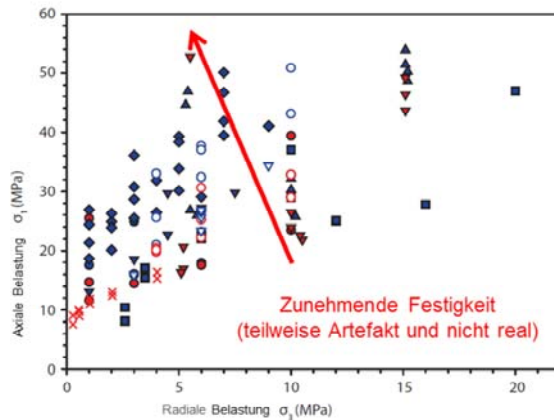
Die Ausdehnung und Eigenschaften der Auflockerungszone sind eine Funktion der felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons. Diese Eigenschaften sind in der Nordschweiz nicht konstant, sondern variieren als Funktion der Tiefe und der geographischen Lage. Der Opalinuston im Standortgebiet Nördlich Lägern liegt in einer Tiefe von 600 bis 1000 m, im Standortgebiet Jura Ost in einer Tiefe von 200 bis 600 m. Die Porosität, der Wassergehalt und vermutlich auch die Festigkeit des Opalinustons verändern sich von West nach Ost. Die felsmechanischen Kennwerte des Felslabors Mont Terri können darum nicht auf die Standortgebiete übertragen werden, das grundlegende Prozessverständnis dieser Zusammenhänge hingegen schon.



Felsmechanische Laborversuche an Bohrkernen des Mont Terri zeigen eine grosse scheinbare Streuung der Bruchfestigkeit.



Mediengespräch vom 19.04.2017



(Aus Wild 2016)

Simon Löw

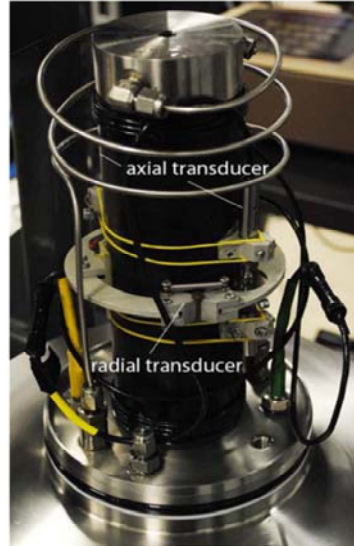
Die Festigkeiten des Opalinustons werden an Bohrkernen aus dem Verhältnis von axialer (σ_1) zu radialer (σ_3) Belastung der Proben beim Bruch ermittelt. Die Streuung der Versuchsergebnisse lässt sich auf eine unzulängliche Versuchsdurchführung und auf eine reale Variabilität der Festigkeiten zurückführen. So wurden z.B. die Wasser-Sättigungen und Porendrücke der Proben während den Versuchen oft nicht kontrolliert, was zu einer grossen Streuung der scheinbaren Festigkeiten führt.



Die Bestimmung zuverlässiger felsmechanischer Kennwerte des Opalinustons ist sehr komplex und zeitaufwendig.



Mediengespräch vom 19.04.2017



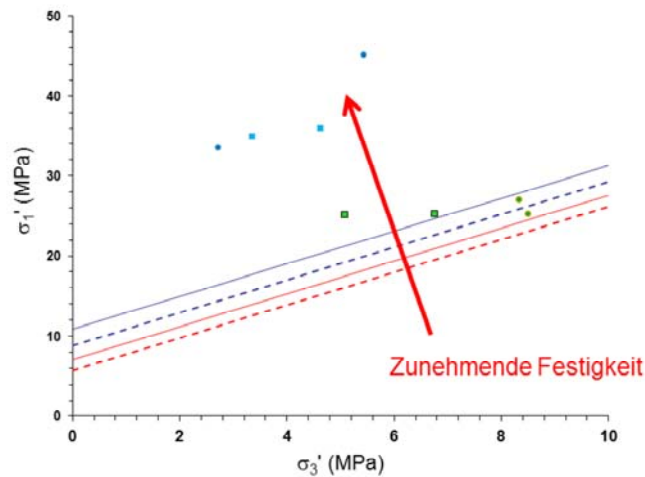
(Aus Wild 2016)

Simon Löw

Sogenannte Triaxialgeräte (linkes Bild) der Technischen Universität von Turin wurden für Versuche der ETH Zürich eingesetzt. Die axialen und radialen Verformungen wurden mit elektronischen Sensoren an der Probe erfasst (rechtes Bild). Die Versuche dauerten pro Probe bis zu einem Monat und wurden durch das ENSI finanziert (Dissertation Katrin Wild, ETH Zürich).



Wenige belastbare Laborversuche der Standortgebiete (Punkte) sind teilweise nicht mit den von der Nagra verwendeten Modellparametern (rote und blaue Linien) konsistent.



(Aus Amann und Löw 2016)

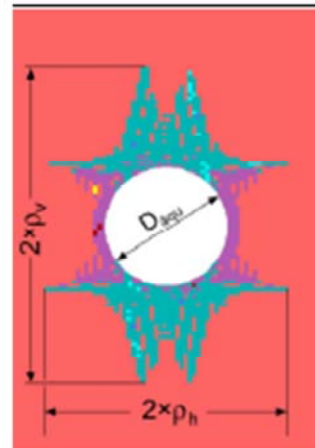
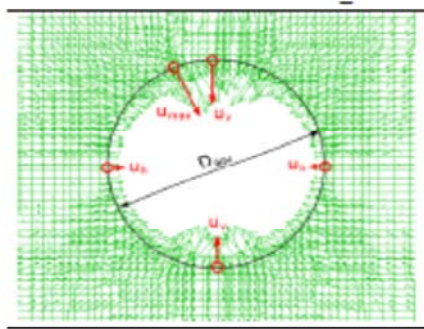
Mediengespräch vom 19.04.2017

Simon Löw

Aus den Standortgebieten liegen aus relevanter Tiefe nur sehr wenige belastbare felsmechanische Versuchsergebnisse vor (Bohrung Schlattingen, siehe Folie 6). Die Figur zeigt eine Gegenüberstellung von Labor-Festigkeiten (effektive radialen und axialen Belastungen, unter Berücksichtigung der Porenwasserdrücke) an Proben der Bohrung Schlattingen (farbige Punkte) mit den von der Nagra (Jahns 2013, NAB 13-18) verwendeten effektiven Höchstfestigkeiten für unterschiedliche Tiefenlagen und Gebirgsqualitäten (rote und blaue Linien). Da die Festigkeiten in Richtung des Pfeiles zunehmen, wurden für die Bewertung der Standortgebiete und maximalen Tiefenlagen teilweise zu geringe Festigkeiten angenommen. Mit den unterschiedlichen Farben sind Spitzenfestigkeiten (blaue Punkte) und Restscherfestigkeiten (grüne Punkte) dargestellt.



Die Auswirkung grösserer Tiefenlagen (> 700 m für HAA) auf das Gebirgsverhalten und die Langzeitsicherheit sind heute ungewiss und stellen keinen erwiesenen eindeutigen Nachteil dar.



(Aus NAB 14-81)

Mediengespräch vom 19.04.2017

Simon Löw

Die Berechnungen der Nagra zum Gebirgsverhalten (linkes Bild) und zur Ausdehnung der Auflockerungszone (rechtes Bild) in den verschiedenen Standortgebieten der Nordschweiz sind heute aufgrund der sehr geringen felsmechanischen Datengrundlagen und der fraglichen Modellannahmen sehr unsicher. Die Reduktion der maximalen Tiefenlage aus bautechnischer Sicht (für HAA von 900 m in der Etappe 1 auf 700 m in der Etappe 2) ist für die EGT heute nicht nachvollziehbar, grössere Tiefenlagen können heute nicht als eindeutige Nachteile bewertet werden. Dieser Befund ist insbesondere für das Standortgebiet Nördlich Lägern kritisch (grosse Tiefenlage, Folie 6).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT)

Erosionsszenarien und minimale Lagertiefe in der Nordschweiz



Photo © 100orte-reisemobil.ch

Fritz Schlunegger, Universität Bern

Durch Erosion werden die Lager für hochradioaktive (HAA) und schwach- bis mittelradioaktive Abfälle (SMA) langfristig sukzessive an die Oberfläche gebracht und damit exhumiert. Je schneller die Erosion voranschreitet, desto früher wird ein solches Tiefenlager an der Oberfläche erscheinen. Je nach den prognostizierten Szenarien über zukünftige Erosionsmechanismen und –geschwindigkeiten muss deshalb ein Lager in *minimale Tiefen* gelegt werden, um die Freisetzung von Radionukliden in den Betrachtungszeiträumen zu verhindern (für SMA-Lager sind dies 100'000 Jahre, für HAA-Lager eine Million Jahre). Prognosen über die zukünftige Erosion führen also zur Bestimmung dieser minimalen Tiefenlagen unter Terrain.



Lokale Erosionsbasis – Flüsse folgen tiefstem Bereich in der Landschaft



Mediengespräch vom 19.04.2017

Fritz Schlunegger

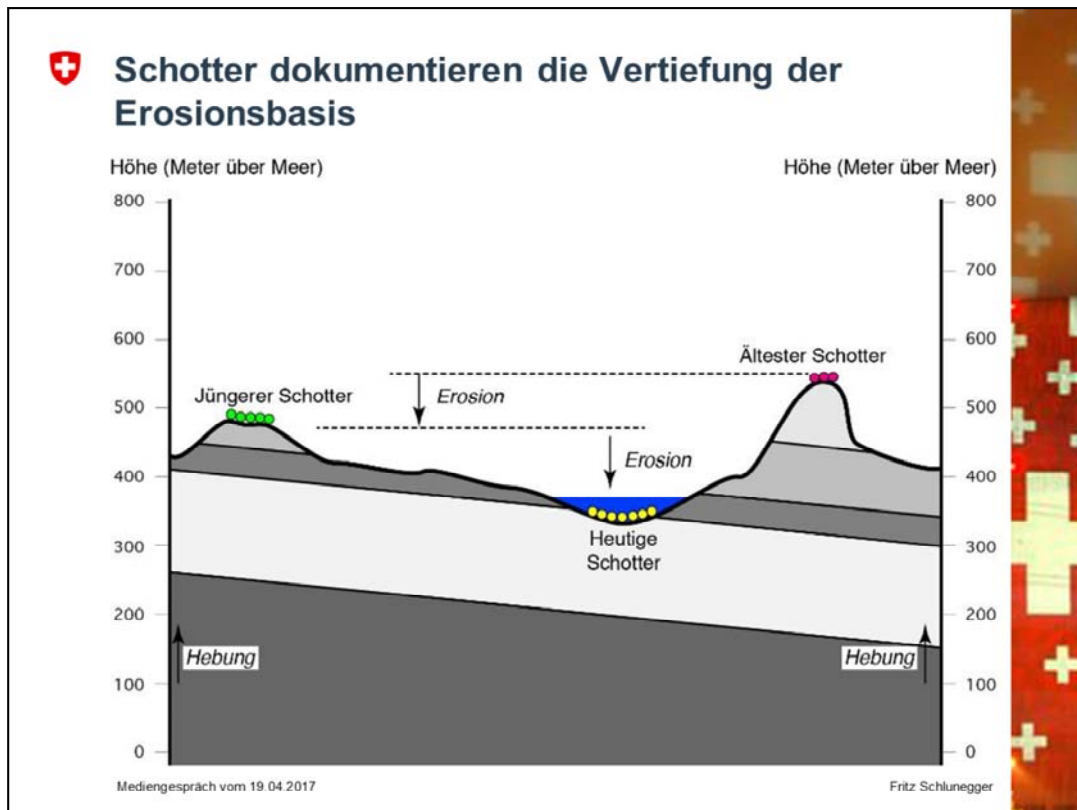
Flüsse liegen im tiefsten Bereich einer Landschaft. Auf dieses Niveau hin richtet sich auch die Erosion in der entsprechenden Region. Deshalb kommt der Höhenlage eines Flusses eine grosse Bedeutung zu. Schneidet sich ein Fluss nun weiter in die Tiefe ein, dann wird auch die Landschaft im Bereich dieses Flusses weiter abgetragen. Die Flüsse bestimmen deshalb die Lage der *lokalen Erosionsbasis*, wie sie die Nagra definiert hat. In der Nordschweiz wird die Höhenlage der Erosionsbasis hauptsächlich durch die Aare und den Rhein bestimmt und liegt zwischen 200 Meter (Basel) und 400 Meter über Meer (Schaffhausen).



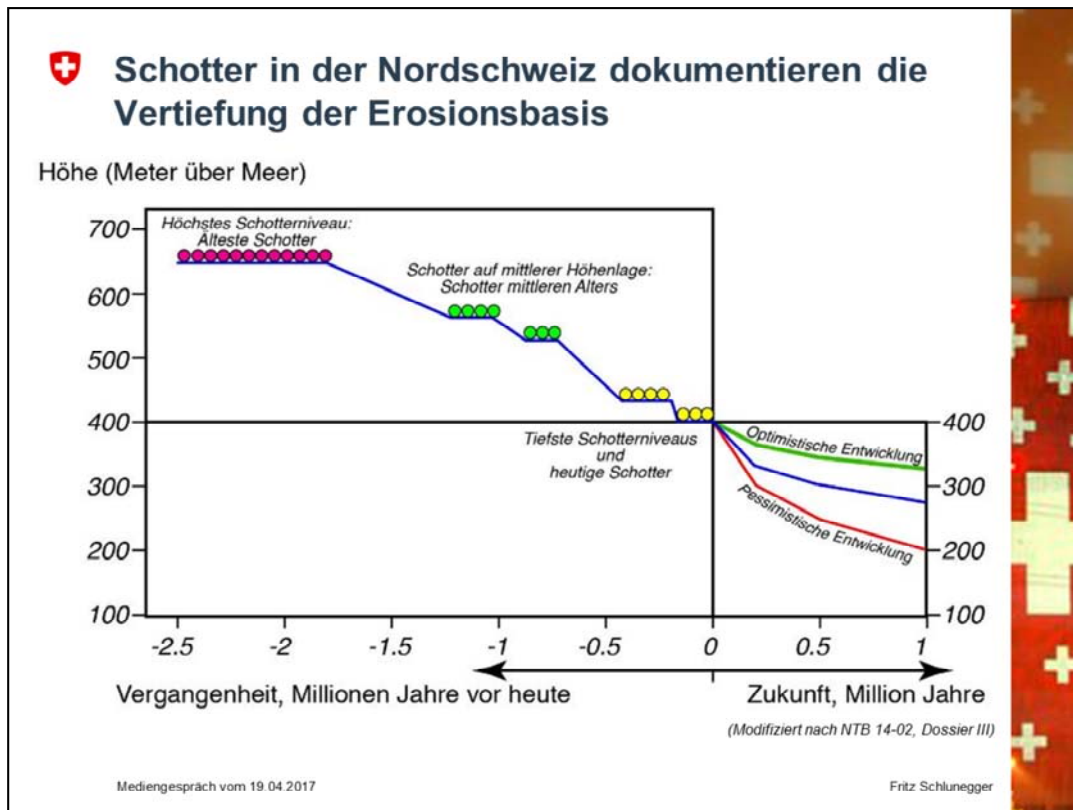
Die grossen Flüsse wie zum Beispiel die Aare, die Thur oder auch der Rhein führen zentimetergrosse Gerölle unterschiedlicher Herkunft aus den Alpen. Diese Fracht lagert sich in Form von Kiesbänken ab und hinterlässt geologische Archive von Flussläufen. Diese Kiesbänke zeichnen damit auch die Höhenlage der Erosionsbasis auf.



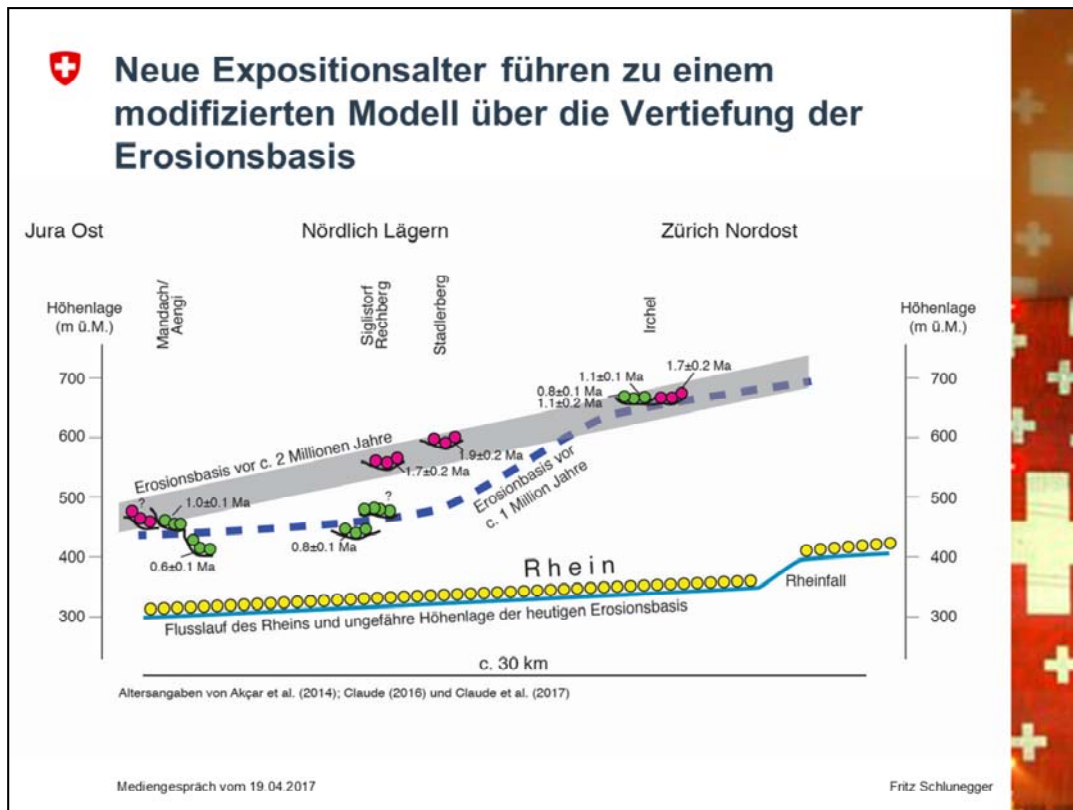
Zeugen ehemaliger Flussläufe finden wir in der Nordschweiz in Kiesgruben und in Form von Schotterablagerungen, so zum Beispiel am Irchel. Diese Schichten sind zwischen 1 und 2 Millionen Jahre alt und liegen ca. 300 Meter oberhalb der Höhenlage des heutigen Rheins. Derartige Archive können nun verwendet werden, um die Landschaftsgeschichte der Nordschweiz während der letzten 2 Millionen Jahre zu rekonstruieren.



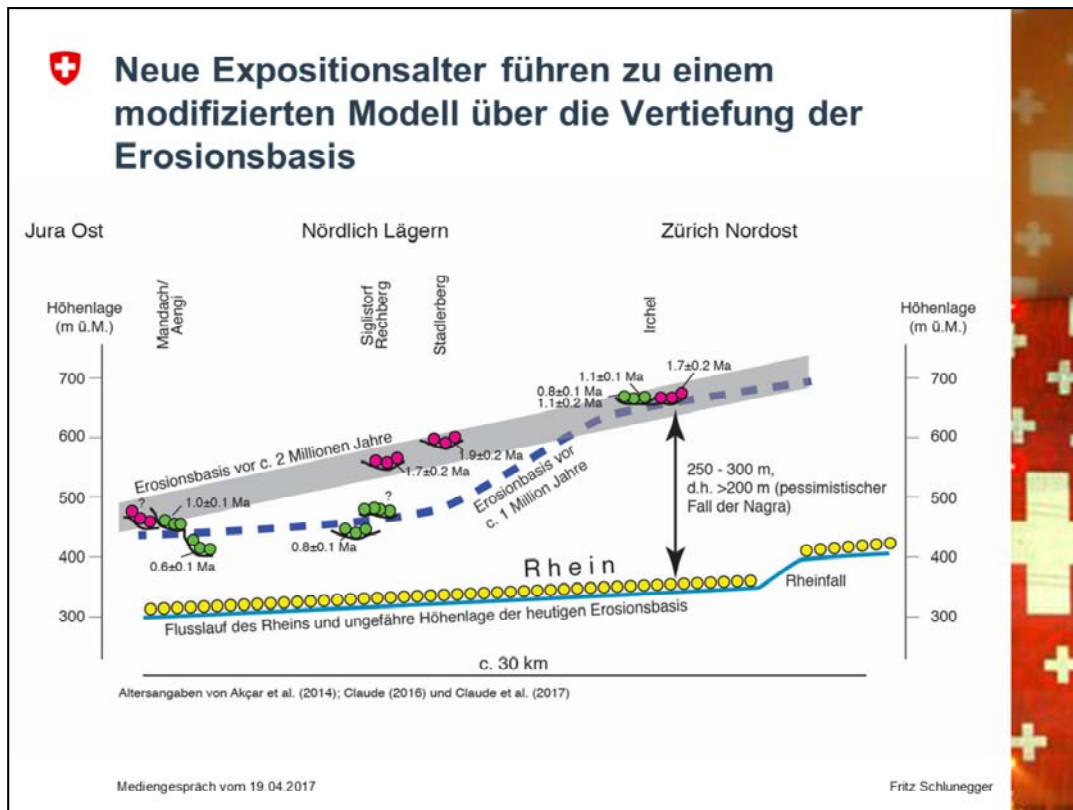
Ein Fluss beginnt sich einzutiefen, wenn der geologische Untergrund gehoben wird. In geologischen Zeiträumen von mehreren Millionen Jahren halten sich Flusserosion und Hebung etwa die Waage. Bei der Eintiefung hinterlassen die Flüsse ihre Spuren in Form von Schotterablagerungen. Diese dokumentieren damit die Erosionsbasis, also die Lage des Flusses, in der geologischen Vergangenheit. Dabei sind die höchsten Schotterablagerungen am ältesten und jüngere Schotterkörper liegen in sukzessiv tieferen Lagen. Kennen wir nun die Alter von solchen Schotterablagerungen, dann kann die Vertiefung der Erosionsbasis in der geologischen Vergangenheit bestimmt werden.



In der Nordschweiz gibt es Schotter und damit Flussablagerungen auf unterschiedlichen Niveaus. Die ältesten Schotter sind ca. 2 Millionen Jahre alt und liegen auf einer Höhe von fast 700 Metern über Meer. Jüngere Flussarchive liegen auf tieferen Niveaus. Daraus lässt sich die Vertiefung der Erosionsbasis während der letzten ca. 2 Millionen Jahre vor heute abschätzen und basierend darauf Szenarien über die weitere Vertiefung für die Zukunft entwickeln. Die Nagra hat mit diesem Konzept drei Prognosen über die zukünftige Vertiefung der Erosionsbasis für die nächste Million Jahre abgeleitet. Für die EGT war insbesondere das pessimistische Szenario relevant, weil dieses die Grundlage für die Festlegung der minimalen Tiefenlage eines HAA- und SMA-Lagers bildet.



Neue, damals nicht publizierte Alter für die Schotterablagerungen führen zu einer Modifikation des Modells über die Vertiefung der Erosionsbasis. Diese Alter standen damals der Nagra noch nicht zur Verfügung. Die Abbildung zeigt den Flussverlauf des Rheins, projiziert auf eine Strecke zwischen Schaffhausen und Waldshut. Dargestellt sind ebenfalls die Bereiche der HAA-Lager sowie die Höhenlagen und Alter von Schotterarchiven. Schotter gleichen Alters dokumentieren damit die Lage der Erosionsbasis zu dieser Zeit. Damit kann der Verlauf der Erosionsbasis vor ca. 2 Millionen Jahre vor heute (grauer Balken) und vor etwa 1 Million Jahre vor heute (blaue gestrichelte Linie) rekonstruiert werden. Offenbar bildete sich ca. 1 Million Jahre vor heute schon eine erste Stufe im Verlauf des Rheins aus. War dies bereits der Proto-Rheinfall?



Die neuen Alter rücken nun das Standortgebiet Zürich Nordost in ein eher ungünstigeres Licht, insbesondere, was die zukünftige Vertiefung der Erosionsbasis und damit die minimale Tiefenlage des HAA-Lagers betrifft. Wird die Vertiefung der Erosionsbasis während der letzten Million Jahre als Grundlage für die Voraussage zukünftiger Erosion verwendet, dann erfüllen die Standortgebiete Jura Ost und Nördlich Lägern die pessimistischen Szenarien der Nagra gemäss dieser Abbildung (175 m bzw. 200 m). Für den aktuell beurteilten Lagerperimeter im Standortgebiet Zürich Nordost dürften die 200 Meter eventuell nicht ausreichen. Es besteht jedoch Spielraum, das Lager in grösserer Tiefe zu realisieren. Allerdings sind bei Weitem nicht alle Schotterablagerungen datiert worden und die neuen Alter sind noch provisorisch. Dieses Beispiel zeigt jedoch, dass die Datierung der Schotterarchive zwingend weitergeführt werden muss. Schritte in diese Richtung werden von der Nagra unternommen.



Schlussfolgerungen: Erosion und minimale Tiefenlage der Endlager

Die verschiedenen Schotterarchive dokumentieren die Lage der Erosionsbasis während der letzten 2 Millionen Jahre.

Die Rekonstruktion der Erosion während der letzten Million Jahre, die sich aus diesen Archiven ergibt, dient als Grundlage für die Prognose der zukünftigen Vertiefung der Erosionsbasis.

Die Prognose über die zukünftige Vertiefung der Erosionsbasis dient dann andererseits als Grundlage, um die minimale Tiefenlage der HAA- und SMA-Lager festzulegen.

Die Schotterarchive sind bei Weitem nicht alle datiert worden. Weitere Untersuchungen in diese Richtung werden zuverlässige Informationen darüber geben, in welchen minimalen Tiefen diese Lager effektiv gebaut werden müssen.





Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT)

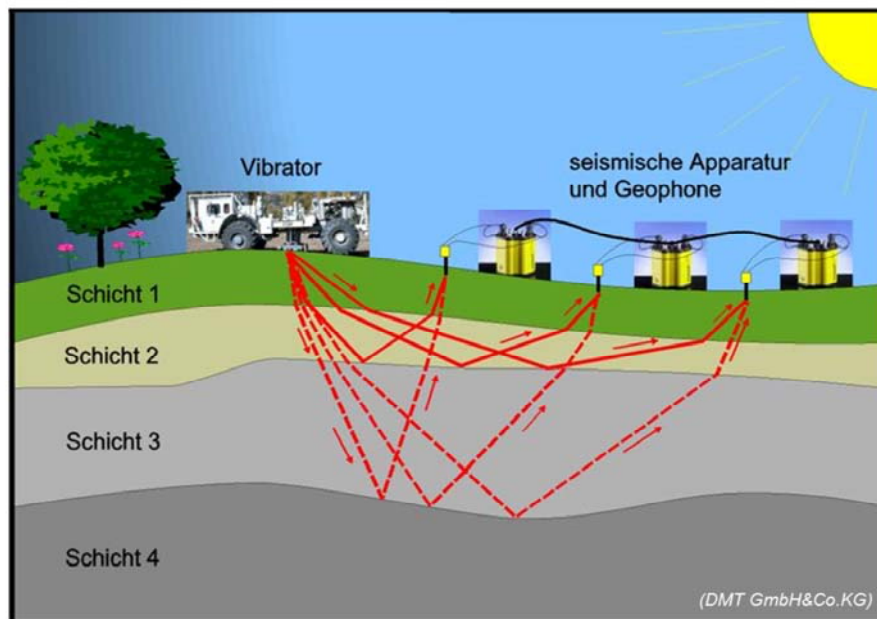
Platzbedarf und Platzangebot im Standortgebiet Nördlich Lägern

**Friedemann Wenzel, Karlsruher Institut für Technologie und
Geoffrey Milnes, ETH Zürich emeritiert**





2D-Seismik - Technik

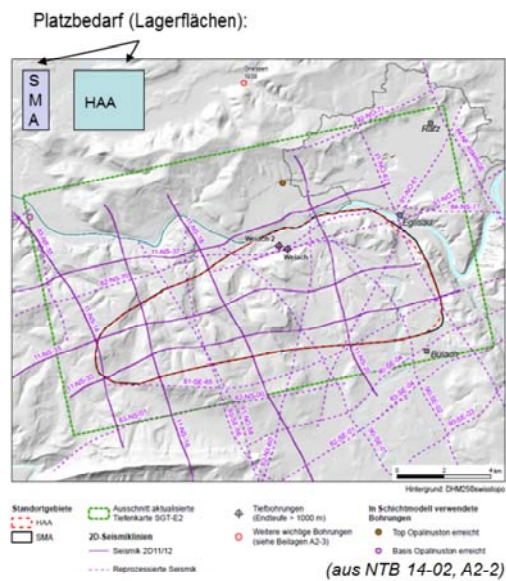


Mediengespräch vom 19.04.2017

Friedemann Wenzel, Geoffrey Milnes

Mit Vibratoren oder kleinen Sprengungen werden Schallwellen an der Oberfläche erzeugt, die sich im Untergrund ausbreiten und von Schichtkontrasten zurück an die Oberfläche reflektiert werden, wo sie mit Sensoren aufgezeichnet werden. Verschiebt man die Schallquellen und Sensoren längs einer Linie, spricht man von 2D-Seismik. Mit erheblich grösserem Aufwand verteilt man die Schallquellen und Sensoren flächenhaft und erhält damit 3D-Bilder der reflektierenden Strukturen des Untergrundes.

2D-Seismik in Nördlich Lägern



Liniennetz mit ca. 1 bis 2 km Abständen

Ausführung (Feld, Datenverarbeitung, Interpretation) sehr gut, hohe Qualität, über Industrie-Standard

Stufengerecht: Standorte vergleichbar

Dissenz mit der Nagra:

Abschätzung der Fehler in der Tiefenlage des Opalinustons

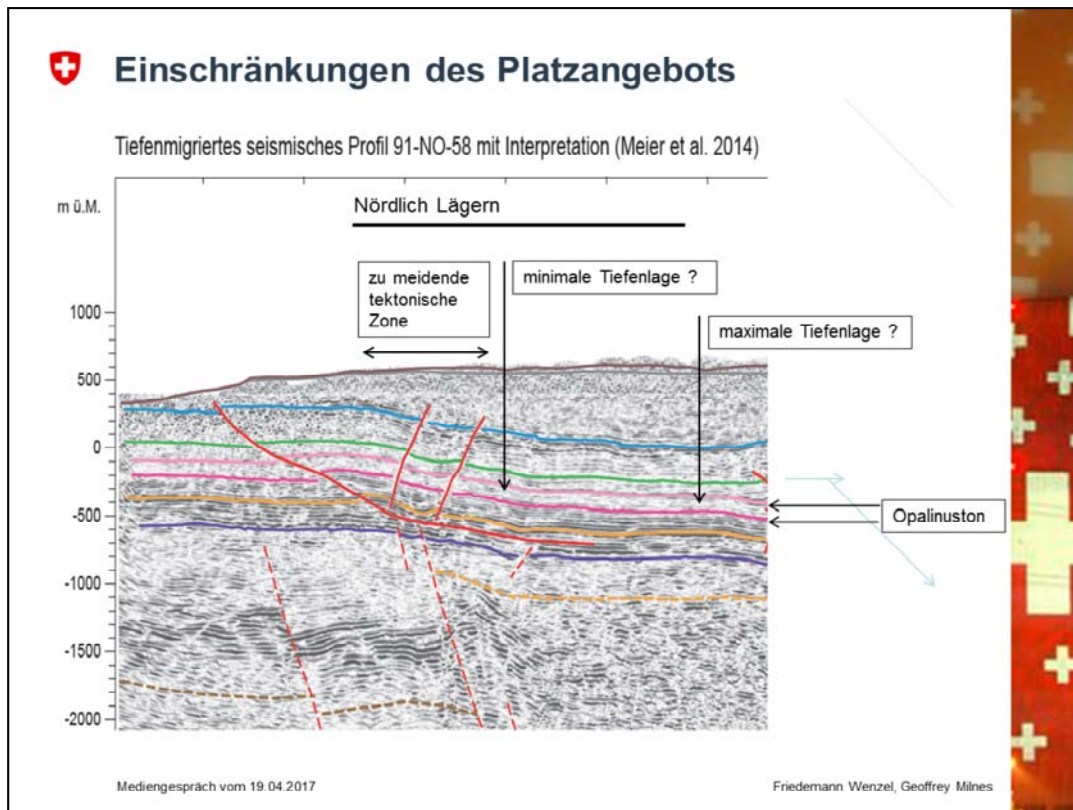
Überinterpretation:

- zu meidende tektonische Zonen
- Platzbedarf

Mediengespräch vom 19.04.2017

Friedemann Wenzel, Geoffrey Milnes

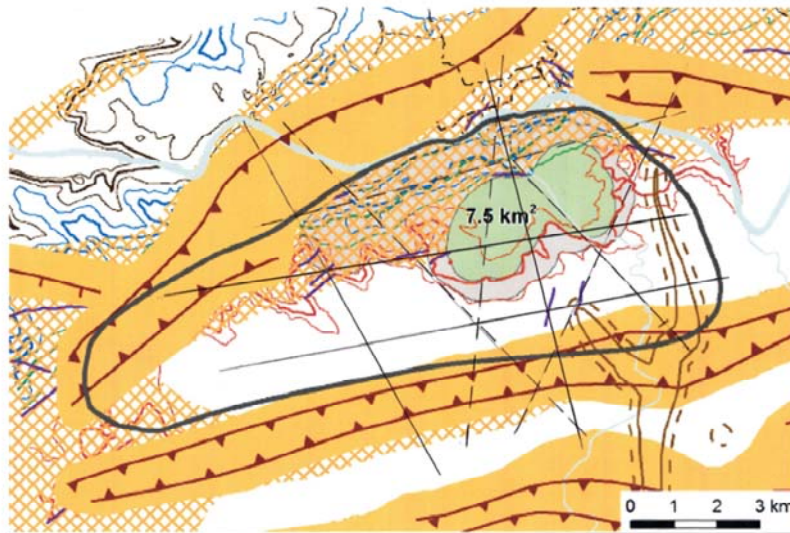
Die Abbildung zeigt den Verlauf der 2D-Seismik-Linien in der Topographie des Standortgebietes Nördlich Lägern. Durchgezogene Linien stellen die Seismik, die in den Jahren 2011/2012 gemessen wurde dar. Die gebrochenen Linien sind älter. Der typische Abstand zwischen den Linien ist ca. 2 km. Ein solcher Linienabstand kann als klein im Vergleich mit dem gesamten Standortgebiet bezeichnet werden, ist aber gross im Vergleich mit dem Platzbedarf für die Tiefenlager (SMA und HAA) wenn diese kompakt gebaut würden. Die gezeigten Flächen stellen den minimalen Platzbedarf für SMA (2 km²) und HAA (4.5 km²) dar. Der tatsächliche Bedarf kann deutlich grösser sein wenn anordnungsbestimmende geologische Elemente im Opalinuston mehrere Lagerfelder erfordern und einlagerungsbestimmende geologische Elemente die Einlagerung in den Lagerkammern beschränken.



Die Abbildung zeigt ein 2D-Seismik Profil nach entsprechender Datenverarbeitung und Interpretation, das in NS-Richtung durch das Standortgebiet NL führt. Die etwa 110 m mächtige Opalinuston-Schicht ist gut erkennbar und fällt nach Süden ein. Das Platzangebot wird durch drei Umstände beschränkt: (1) Die Lagerebene darf nicht zu tief unter Terrain liegen, weil ansonsten der Bau der Tunnel und Kavernen zu erheblichen Schädigungen der Barriere Opalinuston führt. (2) Die Oberkante des Opalinustons darf nicht zu flach unter Terrain liegen um Dekompaktion zu verhindern; sie darf nicht zu flach unter dem heutigen Erosionsniveau liegen damit zukünftige Erosion nicht zum Freilegen des Lagers führt; zudem muss die mögliche Vertiefung glazialer Rinnen bei zukünftigen Vergletscherungen berücksichtigt werden. (3) Zonen mit erkennbaren Störungen in mesozoischer Zeit (= zu meidende tektonische Zonen) sind zu meiden. Im Fall Nördlich Lägern spielen Kriterien (1) und (3) eine Rolle.



Beispiel für Platzangebot (HAA-Lager)



(NAB 16-41 Fig. 3.3-7 modifiziert)

max. Tiefenlage 850 m unter Terrain

Mediengespräch vom 19.04.2017

Friedemann Wenzel, Geoffrey Milnes

Das Verfahren zur Bestimmung von Szenarien für Platzangebote erfordert zunächst die Interpolation der flächenhaften Lage der gut bestimmbareren Unterkante des Opalinustons aus der 2D-Seismik. Die Lagerebene liegt 50 m höher. Die zu meidende tektonische Zone wird ausgegrenzt (schraffierte Regionen). In dem hier gezeigten Szenario liegt die maximal akzeptable Tiefenlage unter Terrain bei 850 m. Die minimal akzeptable Tiefe spielt in Nördlich Lägern keine Rolle. Daraus folgt dann eine Fläche von 7.5 km², die für ein HAA-Lager zur Verfügung stünde. Bei 800 m akzeptabler maximaler Tiefenlage der Lagerebene ergeben sich 4.2 km². Weil nun aber die echte Tiefenlage der Unterkante des Opalinustons nur mit grossen Fehlergrenzen (plus/minus 50 bis 100 m) von der Nagra bestimmt wurde muss man natürlich auch Szenarien betrachten, bei denen die Tiefe des Opalinustons im Vergleich zu dem gezeigten Bild überschätzt wird. Dann entsteht ein erheblich grösseres Platzangebot: Im Fall der maximalen Tiefenlage von 800 m wird aus 4.2 km² ein Platzangebot von 9.8 km². Die Linien in der Abbildung stellen schematisch die 2D-Seismik-Linien dar.



Was kann 2D-Seismik aussagen?

Identifizierung und Lokalisierung regionaler Störungen

Tiefenlage des Opalinustons

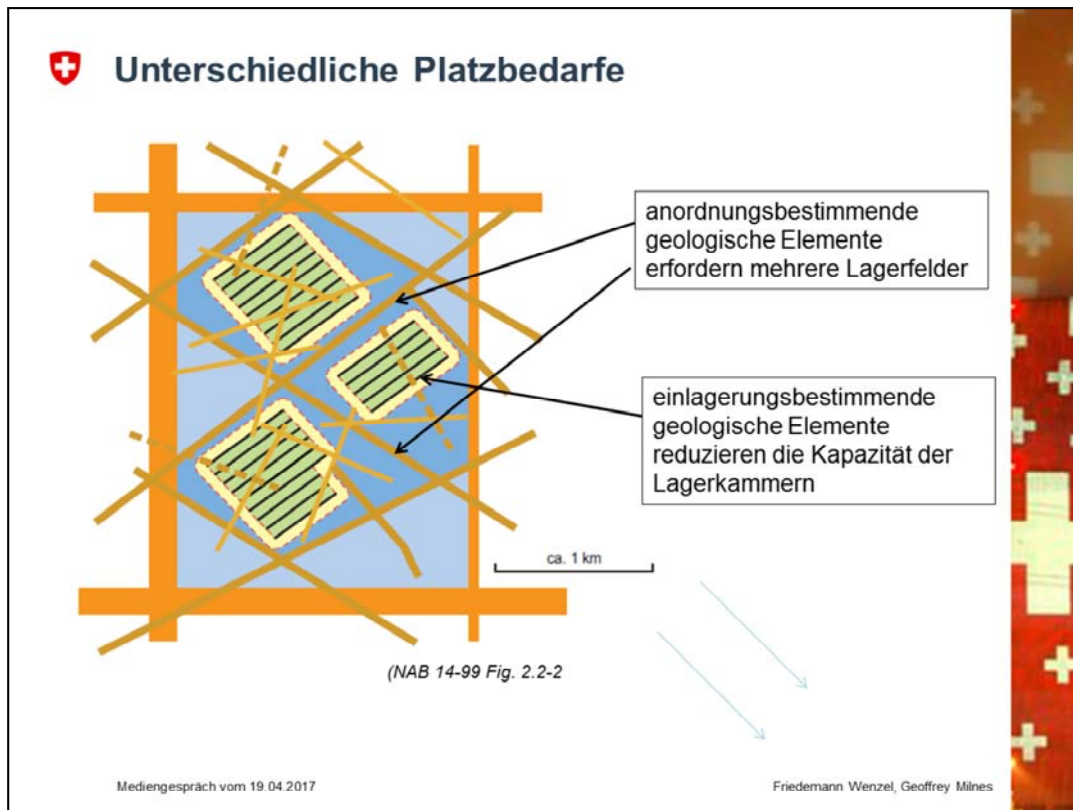
Qualitative Aussagen zur Tektonisierung

Was kann 2D-Seismik NICHT aussagen?

Quantifizierung des Platzangebots mit höherer Präzision als km²

Präzise Bestimmung der zu meidenden tektonischen Zonen

Bestimmung unterschiedlicher Platzbedarfe in den Standorten



Der Platzbedarf für das SMA- und HAA-Lager von ca. 2 km² und 4.5 km² gilt nur dann, wenn das Lager in völlig ungestörtem Opalinuston gebaut werden könnte. Tatsächlich ist der Opalinuston mit kleineren und grösseren Störungen durchsetzt, denen beim Bau ausgewichen werden muss. Der tatsächliche Platzbedarf ist also deutlich grösser und hängt von der Störungsdichte ab. Diese Störungsdichte kann zwar qualitative in der 2D-Seismik ‚gesehen‘ werden und wird dann mit dem Begriff stärkere oder schwächere Tektonisierung belegt. Quantitative Angaben, wie sie die Nagra in NAB 14-99 abgeleitet hat, sind aber wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Daher sind die Angaben zu unterschiedlichen Platzbedarfen in den Standortgebieten plausibel, aber nicht belastbar.



Unterschiedliche Platzbedarfe

Platzbedarf in NTB 14-01 (S.171 und S.188) aus NAB 14-99:

SMA:

SR 3 - 4 km²

Z-NO ca. 3 km²

NL 4 - 5 km²

JO 3 - 4 km²

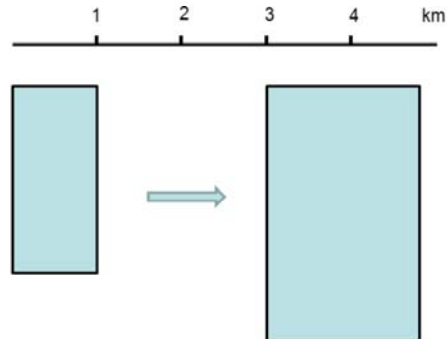
JSF 6 - 8 km²

HAA:

Z-NO ca. 6 km²

NL 8 - 12 km²

JO 6 - 9 km²



Unterschiedliche Platzbedarfe sind plausibel aber nicht belastbar



Schlussfolgerungen

Das Platzangebot im Standortgebiet Nördlich Lägern wird durch die maximale Tiefenlage und untergeordnet durch zu meidende tektonische Zonen so stark eingeschränkt, dass der ausgewiesene Platzbedarf kaum mehr erreicht werden kann. Die maximale Tiefenlage ist aber aus Sicht der EGT heute ungewiss und abhängig von der verfügbaren Bautechnik und den lokalen geotechnischen Verhältnissen.

Eindeutige Nachteile bezüglich des Platzangebots und der Langzeitsicherheit sind also aus der gegenwärtigen Daten- und Kenntnislage zwar möglich, aber heute nicht belastbar nachgewiesen.

Die Zurückstellung eines Standortgebiets in Etappe 2 des SGT ist nur dann möglich, wenn es im Vergleich zu anderen Standortgebieten eindeutige Nachteile aufweist. Die EGT versteht unter eindeutigem Nachteil, dass eines oder mehrere der entscheidungsrelevanten Merkmale (Wirksamkeit der geologischen Barriere, Langzeitstabilität der geologischen Barriere, Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet, bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers) eindeutig schlechter charakterisiert sind und dies durch die Datenlage klar belegt ist. Bei unklarer Datenlage sollte in der Etappe 2 ein Standort nicht zurückgestellt werden. Diese Betrachtung gilt sowohl für SMA- als auch für HAA-Standortgebiete.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

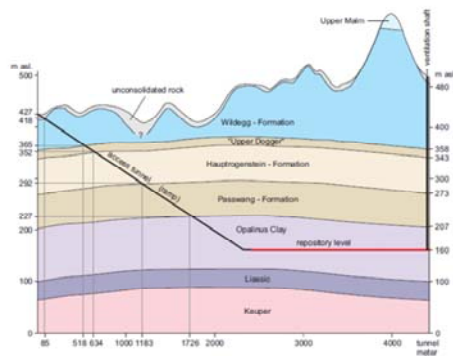
Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT)

Gastransport im Opalinuston und in den technischen Barrieren

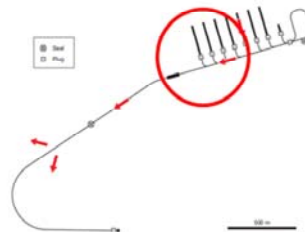
Rainer Helmig, Universität Stuttgart und Rolf Kipfer, EAWAG



Überblick



Geologisches Profil: Opalinuston



(Bilder: Nagra NTB 08-07)

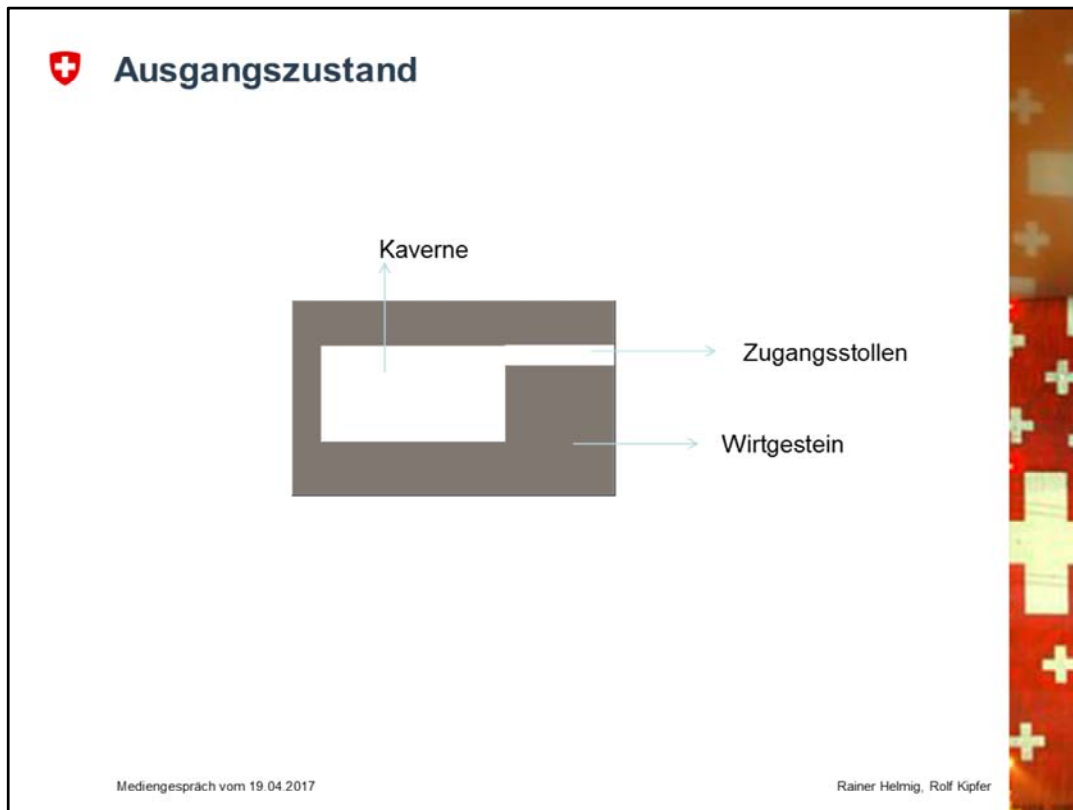
Skizze der Lagerkavernen
mit Zugangsstollen

Mediengespräch vom 19.04.2017

Rainer Helmig, Rolf Kipfer

Opalinuston eignet sich sowohl für HAA- als auch für SMA-Lager. Die sehr feinporige Gesteinsstruktur stellt neben geeigneten Abfallbehältern eine weitere Barriere für den Radionuklidtransport dar.

Wie rechts dargestellt, besteht ein Lagerbauwerk aus mehreren Bestandteilen: Zugangsstollen und Lagerkavernen. Alle Tunnel werden nach der Einlagerung der Abfälle verfüllt und mit speziellen Verfüll-Materialien versiegelt.



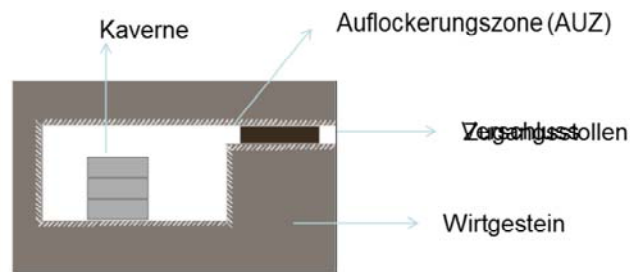
Dargestellt ist stark vereinfacht eine Lagerkaverne, bestehend aus dem Wirtgestein Opalinuston, Zugangsstollen und Lagerkaverne.

Im Zeitraum des Kavernenbaus und der Einlagerung sind die Kavernen mit Luft gefüllt.

Das umgebende Wirtgestein bleibt wegen der feinen Poren und der resultierenden grossen Kapillarkräfte mit Wasser gesättigt.



Ausgangszustand



Störung der Gesteinsstruktur im Nahfeld des Aushubs:
Auflockerungszone (AUZ)

Feine Risse verändern Porosität und Permeabilität

Mediengespräch vom 19.04.2017

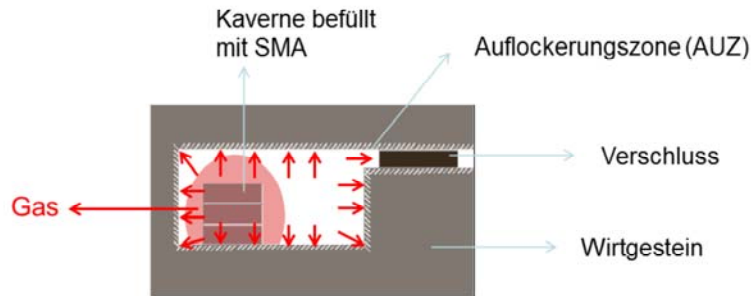
Rainer Helmig, Rolf Kipfer

Durch den Aushub entsteht um die Tunnel (Kavernen und Stollen) eine Auflockerungszone (AUZ, oft auch als «excavation damaged zone, EDZ» bezeichnet). Durch kleine Risse verändern sich hier die Porosität des Gesteins und damit seine Transporteigenschaften für Fluide wie Wasser und Gas.

Nachdem die radioaktiven Abfälle eingelagert sind und die Kaverne verfüllt ist, wird die Kaverne abgedichtet.



Gasentstehung



Gasbildung durch Redox-Prozesse

- Korrosion der Lagerbehälter
 - **Überdruck**
 - Abbau biologischer Abfallbestandteile
- Rissbildung
kontrollierte Entweichung

Mediengespräch vom 19.04.2017

Rainer Helmig, Rolf Kipfer

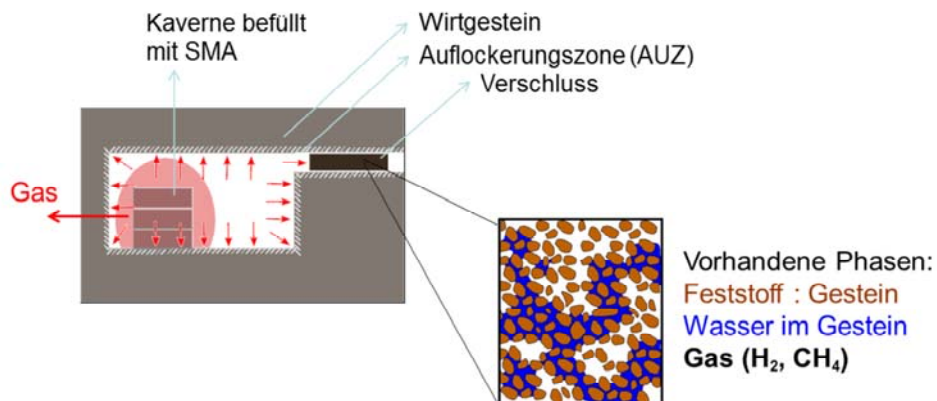
Durch das mit Wasser gesättigte Wirtgestein dringt über einen grossen Zeitraum langsam Wasser in die Lagerkaverne. Dadurch korrodieren die metallenen Abfallcontainer, was Wasserstoffgas freisetzt. Außerdem werden biologische Abfallbestandteile insbesondere der schwach- bis mittelaktiven Abfälle mikrobiologisch abgebaut, welche ebenfalls Gase wie z. B. Wasserstoff und Methan freisetzen.

Durch die Gasentstehung steigt der Druck in der Lagerkaverne. Es entsteht Überdruck. Dieser kann zu vermehrter Rissbildung führen, wenn er nicht kontrolliert abgeführt werden kann.

Die Transportmechanismen von Fluiden (Gas und Wasser) in Gestein werden im Folgenden erklärt.



Transportprozesse



Transportmechanismen für Gas zum Druckabbau:

- Advektion
- Diffusion

Mediengespräch vom 19.04.2017

Rainer Helmig, Rolf Kipfer

Im Verschluss ist ein Mehrphasensystem: In den Poren zwischen den Gesteinskörnern sind die Phasen Wasser und Gas.

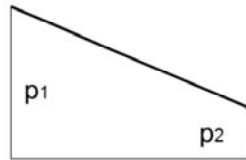
Gas löst sich zum Teil im Wasser und wird hier durch einen Konzentrationsunterschied «diffusiv» transportiert. Durch den Druckunterschied innerhalb und ausserhalb der Kaverne werden Wasser und Gas in Bewegung gesetzt. So wird das Gas auch «advektiv» transportiert.

Diffusion und Advektion werden im Folgenden erklärt.

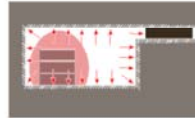


Transportmechanismen

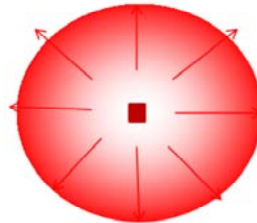
Advektion



Transport durch
Druckgradienten im Fluid
in Richtung der
Geschwindigkeit



Diffusion



Transport durch
Konzentrationsunterschiede
in alle Richtungen

Mediengespräch vom 19.04.2017

Rainer Helmig, Rolf Kipfer

Advektion:

Gibt es einen Druckunterschied in einer Fluidmenge (Gas/Flüssigkeit), entsteht eine Geschwindigkeit, um diesen Druck auszugleichen. Ist ein Stoff in einem Fluid gelöst, bewegt er sich mit der selben Geschwindigkeit mit dem Fluid mit. Advektion ist demnach entlang des Druckgradienten hin zum geringeren Druck (hier p_2) gerichtet.

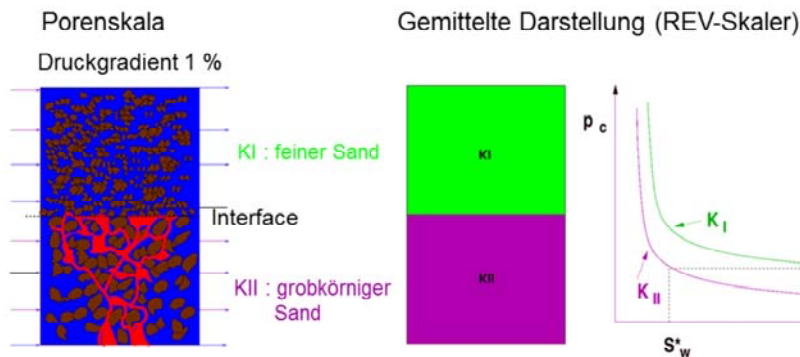
Diffusion:

Gibt es einen Konzentrationsunterschied eines Stoffes innerhalb einer Phase, bewegen sich die Moleküle in alle Richtungen entlang des Konzentrationsgradienten solange, bis der Stoff gleichmäßig in der Phase verteilt ist.

Die Effekte von Diffusion und Advektion können sich überlagern.



Gas-Eindringdruck ins Gestein



Der Eindringdruck ist der minimale Kapillardruck, den die Gasphase benötigt, um in ein anfangs mit Wasser gesättigtes poröses Medium zu gelangen.

Mediengespräch vom 19.04.2017

Rainer Helmig, Rolf Kipfer

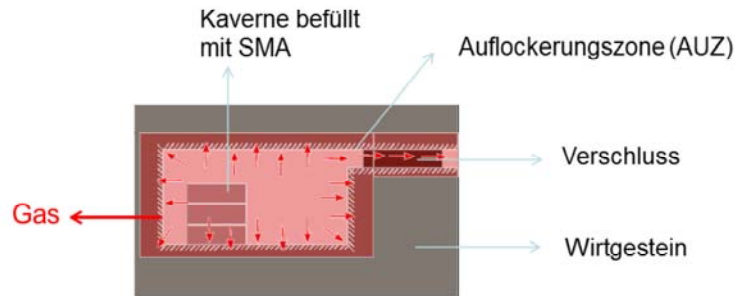
Steigt der Druck weiter an, kann möglicherweise Gas ins Wirtsgestein eindringen. Es wirken allerdings Kapillarkräfte entgegen.

Dargestellt sind zwei unterschiedliche Gesteinsarten, feiner Sand und grober Sand, die an einer Grenzfläche (Interface) aneinander grenzen. Der feine Sand hat durch die feine Struktur eine geringe Durchlässigkeit (K_I) für Fluide. Durch die feinen Gesteinsporen halten grosse Kapillarkräfte das Wasser immobil. Im grobkörnigen Sand allerdings sind auch die Gesteinsporen grösser. Damit steigt die Durchlässigkeit für Fluide (K_{II}). Hier kann sich eine Gasphase (in rot dargestellt) ausbreiten.

Trifft diese Gasphase auf die Grenzfläche zwischen den beiden Gesteinsarten, muss zunächst der große Kapillardruck des feinen Sandes überwunden werden, bevor das Gas hier eindringen kann. Dadurch wirkt feinporiges Gestein, wie der Opalinuston, als Barriere für die Gasausbreitung. Bei sehr grossen Drücken allerdings kann sich das Gas Wege ins feinporige Gestein bahnen. Risse entstehen, die auch für den Radionuklidtransport wirksam werden. Die Barrierenwirksamkeit des feinporigen Gesteins wird somit gestört.



Transportwege des Gases



Gasdruckabbau durch

- Lösung von Gasen im Porenwasser des Wirtgesteins
- Transport über das EGTS (engineered gas transport system)
- Transport in der AUZ

Mediengespräch vom 19.04.2017

Rainer Helmig, Rolf Kipfer

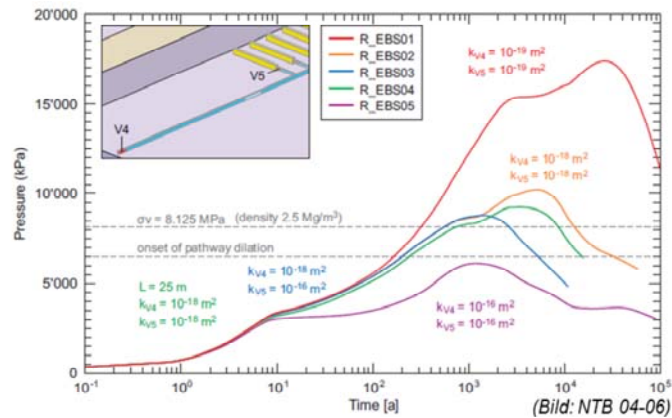
Um den Druckanstieg in der Lagerkaverne zu begrenzen und dadurch Rissbildung zu verhindern, muss das entstehende Gas gezielt abtransportiert werden.

Dafür wurde für die Versiegelung der Lagerkavernen ein sogenanntes EGTS (engineered gas transport system) entwickelt, das den Gastransport entlang der ehemaligen Zugangsbauwerke erlauben soll. Dadurch sollen das entstehende Gas kontrolliert zur Oberfläche geführt, die Radionuklide aber im Lager zurückgehalten werden. Darüber hinaus löst sich ein Teil des Gases im umgebenden Porenwasser und wird über die Konzentrationsunterschiede diffusiv abtransportiert. Weiterhin dringt Gas in die feinen Risse der Auflockerungszone.

Die EGT hat zahlreiche Unsicherheiten in der Datenlage der relevanten Gesteinsparameter, den numerischen Modellannahmen in den Simulationen zur Gasausbreitung und dem grundlegenden Prozessverständnis des Gastransportes im EGTS System identifiziert.



Gasdruckanstieg in den Lagerkavernen



3D-Modell des EGTS (engineered gas transport system)
bei undurchlässigem Wirtgestein: Spektrum der zeitlichen
Entwicklung des Gasdruckanstieges in den Lagerkavernen

Mediengespräch vom 19.04.2017

Rainer Helmig, Rolf Kipfer

Zum Gasdruckabbau wurden von der Nagra Berechnungen durchgeführt. In der Grafik ist die Gasdruckentwicklung über 100'000 Jahre für mehrere Szenarien dargestellt. Ausserdem ist vermerkt, ab welchem Druck eine Rissausbreitung, die sog. pathway dilation, zu erwarten ist, sowie der Druck der Gesteinsauflast, die dem Gasdruck entgegenwirkt.

Es gibt Szenarien, bei denen der Druckanstieg den Schwellwert zur Rissausbreitung übersteigt.



Schlussfolgerungen: Gastransport im Opalinuston und in den technischen Barrieren

- Gasentstehung und der damit verbundene Druckanstieg sowie möglicher Gastransport ist ein potentiell Risiko für die Langzeitsicherheit.
- Es muss sichergestellt werden, dass der mögliche Druckanstieg und der damit verbundene Gastransport technisch handhabbar ist oder keine negativen Auswirkungen auf das umliegende Wirtsgestein hat.
- Die EGT erachtet den Nachweis der Funktionsfähigkeit des EGTS als nicht erbracht und empfiehlt, Alternativen zum EGTS zu entwickeln.

→ Hierzu sind weitere Untersuchungen zur möglichen Rissausbreitung und zur Funktionsfähigkeit einer technischen Lösung notwendig.