

# Tiefenlagerungen radioaktiver Abfälle in der Schweiz : eine geologische Perspektive

Autor(en): **Mazurek, Martin**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern**

Band (Jahr): **79 (2022)**

PDF erstellt am: **23.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-1049725>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz – Eine geologische Perspektive

Autor

Martin Mazurek

## Kernenergie: Segen oder Fluch?

Die Frage der Entsorgung nuklearer Abfälle aus Industrie, Forschung und Medizin ist ein viel diskutiertes Thema, wobei die Argumentation vielfach auf einer eher emotionalen Ebene stattfindet. Die friedliche Nutzung von Kernenergie ist zweifellos nicht ohne Gefahren, wie Unfälle in der Vergangenheit gezeigt haben. Allerdings ist keine Art der Energiegewinnung ohne Risiken. Im Falle fossiler Energien erfolgt die Beeinträchtigung eher schleichend und jedenfalls weniger spektakulär als im Fall von Atomunfällen, ist deswegen aber nicht weniger einschneidend. Solange die Menschheit ihren Wohlstand behalten bzw. auf weitere Bevölkerungsgruppen ausweiten will, geht das nicht ohne Einflüsse auf Mensch und Umwelt. Die entscheidende Frage ist das Verhältnis von Nutzen zu Risiko, und spätestens hier wird die Diskussion fachspezifisch, zahlenlastig und somit für weite Teile der Bevölkerung unverständlich. Das Unverständnis wird nur allzuoft durch Bauchgefühle und Ideologien ersetzt, was eine sinnvolle Entscheidungsfindung erschwert.

Kernenergie birgt drei Gruppen von potenziellen Gefahren. Erstens ist der Betrieb von Kernkraftwerken nicht risikolos, wie die bekannten Unfälle illustrieren. Hier sei angemerkt, dass mit jeder Reaktorgeneration die Wahrscheinlichkeit schwerer Unfälle wesentlich sinkt. Eine Möglichkeit wäre, ältere bzw. sicherheitstechnisch nicht aufgerüstete Anlagen durch Kraftwerke der neuesten Technologie zu ersetzen, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit einer unkontrollierten Kernschmelze um Größenordnungen reduzieren liesse. Zweitens entsteht beim Betrieb eines Kernkraftwerks in Form von Plutonium neues spaltbares Material, welches sich im Prinzip für militärische Zwecke nutzen lässt. Diese Gefahr einer Proliferation besteht heute in gewissen Ländern. Drittens fallen bekanntermassen radioaktive Abfälle an, welche, je nach Abfalltyp, bis einige 100 000 Jahre von Mensch und Umwelt ferngehalten werden müssen. Dies ist eine unvorstellbar lange Zeit, für einen Geologen, der in Jahrillionen denkt, aber eher ein Augenblick. In der Fachwelt besteht weitgehende Einigkeit, dass von den drei Gefahrenkategorien das Abfallproblem das

kleinste ist. Weil aber im Verlauf der Suche nach geeigneten Standorten die Anwohner jeweils konkret betroffen sind, erhitzten sich die Gemüter eher als bei abstrakten Gedankenspielen zu Atomunfällen – oder den schleichenden Konsequenzen der Klimaerwärmung.

### Entsorgungsstrategien

Für die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle wurden international verschiedene Optionen ins Auge gefasst. Dazu gehörten unter anderem heute eher exotisch anmutende Optionen wie Versenkung in der Tiefsee, Einschmelzen ins antarktische Eis oder gar Schiessen ins All. Heute besteht der Konsensus, dass zumindest für die stark radioaktiven Abfallkategorien die geologische Tiefenlagerung der zielführende Lösungsansatz ist. In der Schweiz wurde bereits 1972 die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) gegründet, mit dem Auftrag, geeignete Gesteinseinheiten und Standortgebiete zu erkunden und konkrete Lagerkonzepte zu entwickeln. In den 80er-Jahren wurde ein grosses Untersuchungsprogramm in der Nordschweiz (Raum Schaffhausen bis Olten) lanciert, unter anderem mit seismischen Methoden und 12 geplanten Tiefbohrungen. Die Beschränkung auf die Nordschweiz war u. a. durch die regionalen Hebungsraten begründet, welche in diesem Raum gering bis

vernachlässigbar sind. Im Alpenraum erreichen sie hingegen bis über 1 mm pro Jahr und werden weitgehend durch Erosion wieder ausgeglichen. Das heisst, dass nach 100 000 Jahren bis 100 m Gestein abgetragen werden, und nach 1 Million Jahren, dem für die Lagerung hochradioaktiver Abfälle betrachteten Zeitraum, wären es 1000 m. Ein Tiefenlager im Alpenraum würde somit nach einigen 100 000 Jahren an der Oberfläche exhumiert.

### Das Schweizer Kristallin-Programm

Das Untersuchungsziel der Tiefbohrungen der 1980er-Jahre, teilweise bis über 2000 m tief, war das kristalline Grundgebirge, welches im Schwarzwald an der Oberfläche aufgeschlossen ist und in der Nordschweiz mit einer gegen Süden mächtiger werdenden, in Alpennähe bis 6 km mächtigen Abfolge von Sedimentgesteinen überdeckt ist (Abb. 1). Nach damaliger Planung waren als Wirtgesteine für das Tiefenlager tiefgelegene, geringdurchlässige, wenig geklüftete Blöcke im Kristallin vorgesehen, welche von bekannten grossen Bruchzonen begrenzt waren. Die erste Tiefbohrung in Böttstein (AG) ergab unterhalb von 900 m Tiefe tatsächlich standfestes, geringdurchlässiges und wenig geklüftetes Gebirge und entsprach somit den Erwartungen. Im Verlauf der Bohrkampagne kamen dann allerdings Überraschungen zu Tage. In der Bohrung Weiach (ZH)

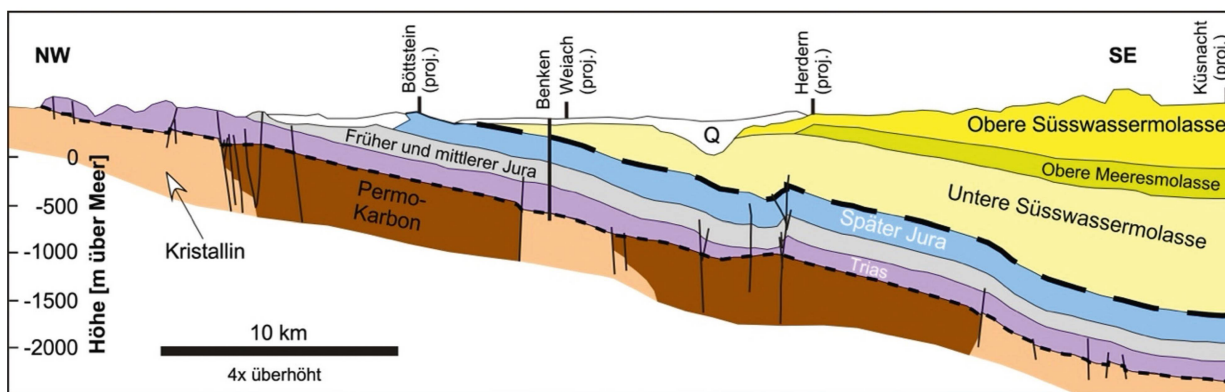


Abb. 1: Geologisches Profil durch die zentrale Nordschweiz. Profilspur: Randen (SH)–Winterthur–Hörnli (ZH). Der Opalinuston befindet sich innerhalb der grauen Schicht (Früher und mittlerer Jura).

Abgeändert nach MAZUREK ET AL. (2006)

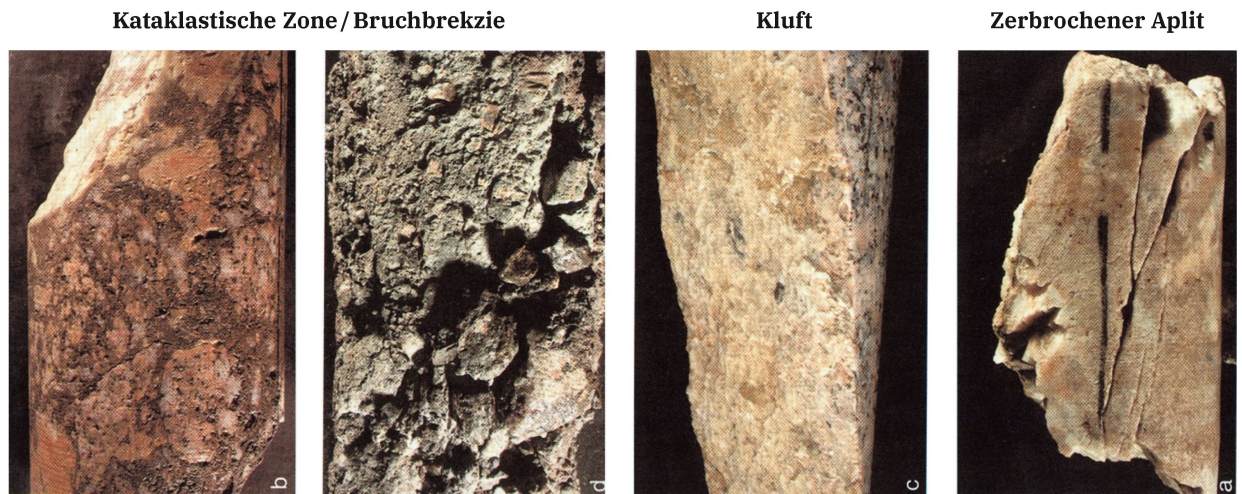


Abb. 2: Beispiele von Bruchstrukturen in Bohrkernen des Kristallins der Nordschweiz.

wurde ein über 1000 m mächtiger Trog mit permokarbonischen Sedimentgesteinen durchbohrt, bevor erst in einer Tiefe von über 2000 m das Kristallin erreicht wurde. Solche Tröge sind in ganz Mitteleuropa verbreitet und enthalten die z.B. im Ruhrgebiet oder Südengland abgebauten Kohlevorkommen, welche am Anfang der Industrialisierung gestanden haben. Der Grossteil der Tröge besteht allerdings aus klastischen Gesteinen (Sand- oder Siltsteine, Grauwacken), deren petrophysikalische Eigenschaften denjenigen des Kristallins ähnlich und daher in den seismischen Profilen schwer zu unterscheiden sind. Die zweite Überraschung war die Identifikation stark geklüfteter (Abb. 2) und hoch durchlässiger Bereiche auch in Tiefen weit unterhalb von 1000 m, womit die vielversprechenden Befunde von Böttstein nicht bestätigt werden konnten. Nach Abteufen von 7 Bohrungen kam die zuständige Behörde (damals Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen, HSK) zum Schluss, dass die von der Nagra erarbeitete geologisch-hydrogeologische Synthese zwar den prinzipiellen Machbarkeitsnachweis erbracht hat, hingegen nicht den Standortnachweis. Etwas vereinfacht formuliert bedeutet dies, dass in der behördlichen Beurteilung zwar anerkannt wird, dass es im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz geeignete Blöcke gibt, in welchen ein sicheres Lager realisiert werden kann, dass diese Blöcke von der Ober-

fläche aus (d. h. mittels Bohrungen und seismischen Methoden) nicht mit hinreichender Sicherheit lokalisiert werden können. Die sedimentäre Bedeckung erwies sich hier als Nachteil, indem sie das Kristallin der direkten Beobachtung in Oberflächenaufschlüssen entzieht.

### Hinwendung zu tonreichen Sedimentgesteinen

Nach dem Abbruch des Entsorgungsprogramms im Kristallin verschob sich der Fokus hin zu Sedimentgesteinen. Man erhoffte sich in diesen eine wesentlich geringere räumliche Heterogenität der geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften und somit eine verbesserte Explorierbarkeit. Insbesondere der Opalinuston, eine 100–130 m mächtige Schicht im mesozoischen Sedimentstapel (Abb. 1), zeichnet sich durch eine sehr beschränkte Heterogenität in der Horizontalen (vom Westschweizer Faltenjura bis zum Bodensee) wie auch in der Vertikalen aus. Wie alle mesozoischen Schichten fällt der Opalinuston mit ca. 4–5° nach S-SE ein und liegt in den Voralpen in einer Tiefe von mehreren km. Das heisst auch, dass man die gewünschte Tiefe des Tiefenlagers durch eine entsprechende geographische Lokalisierung steuern kann – je südlicher, umso tiefer. Opalinuston zeigt in seismischen Profilen einen guten Kontrast zu den umliegenden Gesteinsschichten, d. h. er

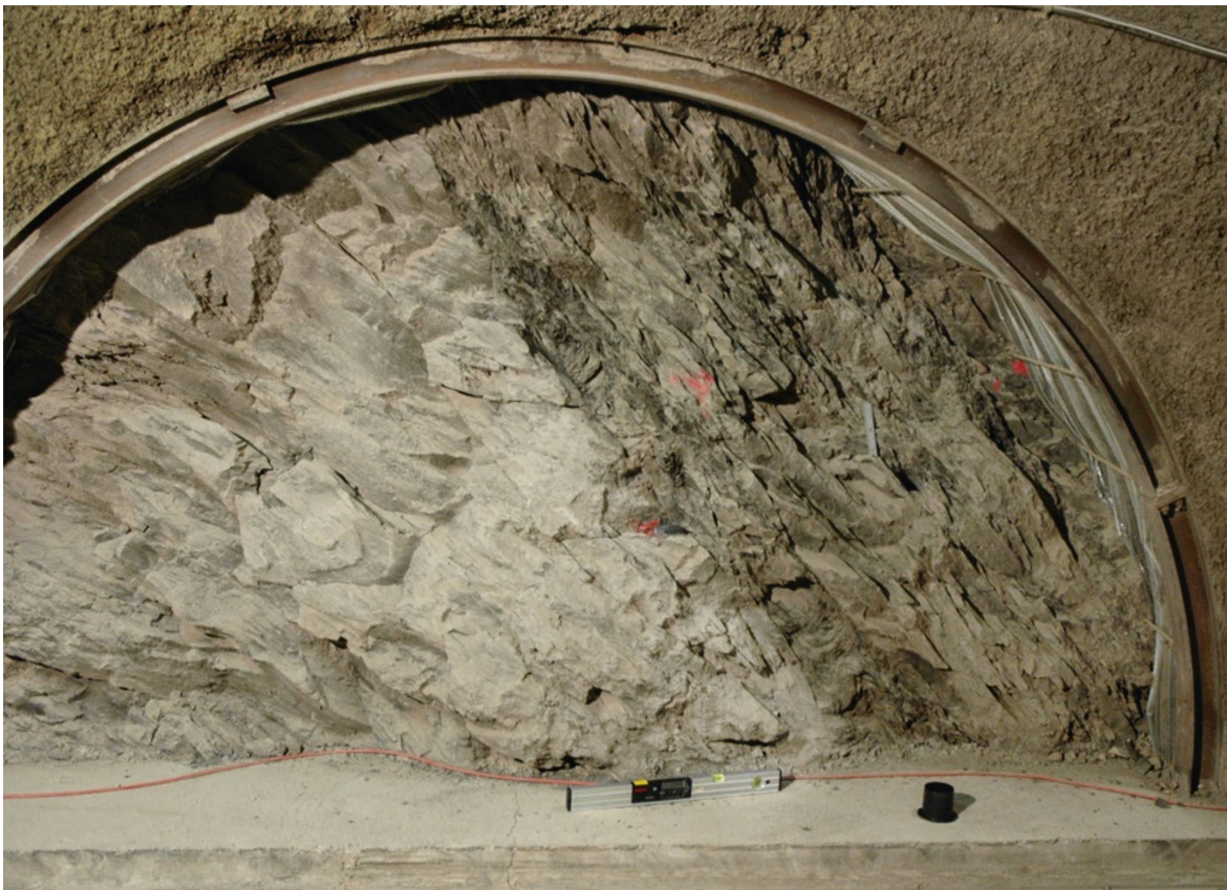


lässt sich mit dieser Methode sehr gut abbilden. Allfällig vorhandene Brüche mit einem Vertikalversatz von  $\geq 4$  m lassen sich ebenfalls erkennen. Somit ist der Opalinuston wesentlich besser explorierbar als etwa das unterliegende Kristallin – ein entscheidender Vorteil bei der Suche nach einem Tiefenlager und der sicherheitstechnischen Argumentation.

### Quellfähigkeit und Selbstversiegelung im Opalinuston

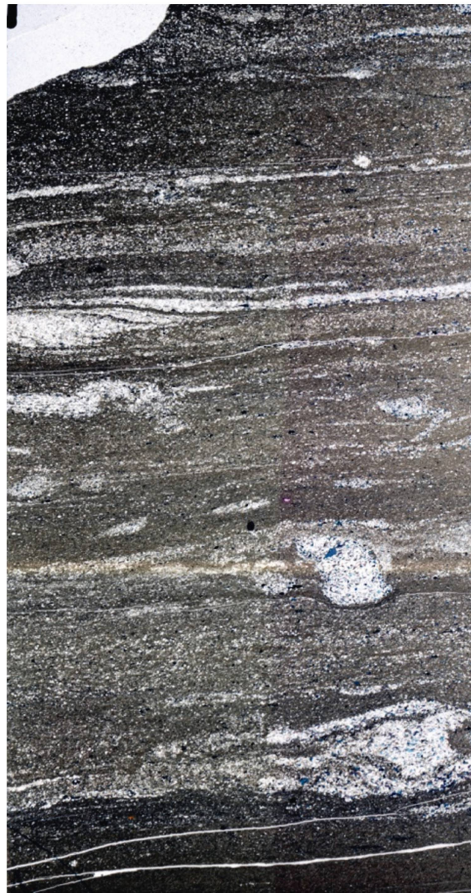
Tonreiche Gesteine im Allgemeinen und Opalinuston im Speziellen zeichnen sich durch eine gewisse Quellfähigkeit aus. Wir alle kennen das Phänomen, dass ein tonreicher Boden bei Austrocknung Schrumpfrisse bekommt, welche sich nach dem nächs-

ten Regenfall durch Quellung schliessen. Analoges geschieht auch in der Tiefe: wenn durch eine Bruchbewegung (z.B. bei Erdbeben) die Öffnungsweite von Brüchen zunimmt und somit die Durchlässigkeit für Wasserfluss erhöht wird, sorgt Quellung für das Verschliessen der tektonisch erzeugten Hohlräume. Dieser Prozess der Selbstversiegelung ist für Gesteine mit  $\geq 40\%$  Tongehalt sehr effizient und durch eine grosse Anzahl von Beobachtungen gestützt. Im Faltenjura mit seinen zahlreichen Tunneln wurde der Opalinuston auf einer kumulierten Strecke von 6.6 km durchfahren. Bei einer Überdeckung von  $\geq 200$  m wurden trotz starker Deformation des Gesteins keine Wasserzutritte identifiziert (Gautschi 2001). *Abb. 3* zeigt eine ca. 1 m mächtige Bruchzone im Opalinuston, welche bei der Faltung des Jurage-



**Abb. 3:** Aufschluss des Opalinustons unter einem Stahlbogen im Felslabor Mont Terri (JU). Links (heller) ist das Gestein wenig bis gar nicht deformiert, rechts (dunkler) ist eine grosse,  $45^\circ$  nach rechts einfallende Bruchzone erkennbar. Bildbreite ca. 3 m.

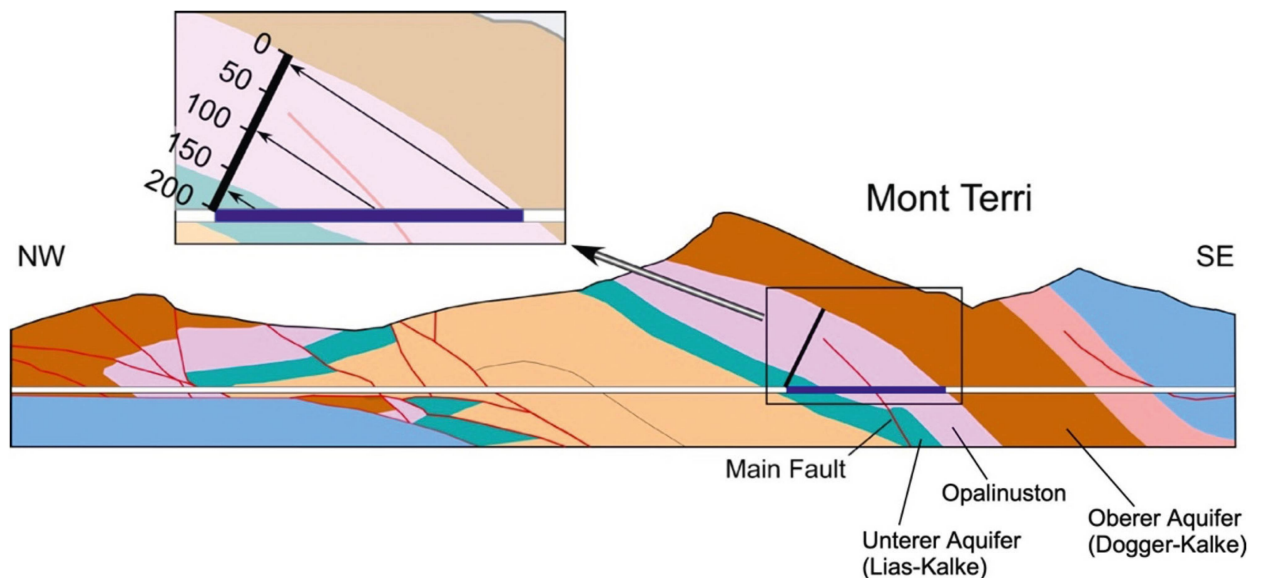
**Abb. 4: Dünnschliffbild einer besonders Quarz-reichen Fazies des Opalinustons im Felslabor Mont Terri. Dunkle Lagen bestehen weitgehend aus Tonmineralien, helle Lagen sind Quarz-reich. Von den 12 % Porosität ist auf diesem Massstab nichts zu sehen (die Risse am unteren Bildrand sind bei der Probenpräparation entstanden). Bildformat 4 × 2.5 cm<sup>2</sup>.**



birges entstanden ist. Diese Struktur wurde in unmittelbarer Nähe des illustrierten Aufschlusses mehrfach durchbohrt und hydraulisch betestet. Die Wasserdurchlässigkeit der Bruchzone war nicht von derjenigen des undeformierten Opalinustons unterscheidbar, also extrem tief – dies trotz des hohen Deformationsgrads.

In den potenziellen Lagerstandorten der Nordschweiz ist die Gesteinsdeformation im Vergleich zum Faltenjura gering, und grösseren Strukturen, die seismisch erkennbar sind, kann zudem durch entsprechende Platzierung ausgewichen werden. In der Ölindustrie sind tonreiche Gesteine weltweit bekannt als «Caprocks», d.h. Schichten, welche das Aufsteigen von Öl und Gas zur Oberfläche wegen ihrer abdichtenden Eigenschaften aufhalten und zur Akkumulation von nutzbaren Kohlenwasserstoff-Vorkommen führen.

Dank Selbstversiegelung sind die hydrogeologischen Eigenschaften des Opalinustons, vorab die Durchlässigkeit, im Wesentlichen unabhängig vom Vorkommen von Bruchstrukturen. Dies bedeutet, dass aus hydrogeologischer Perspektive der Opalinuston als Schicht mit im weitgehend homogenen Eigenschaften betrachtet werden



**Abb. 5: Geologisches Profil durch die Mont Terri-Antiklinale. Die Position des Felslabors ist blau markiert.**



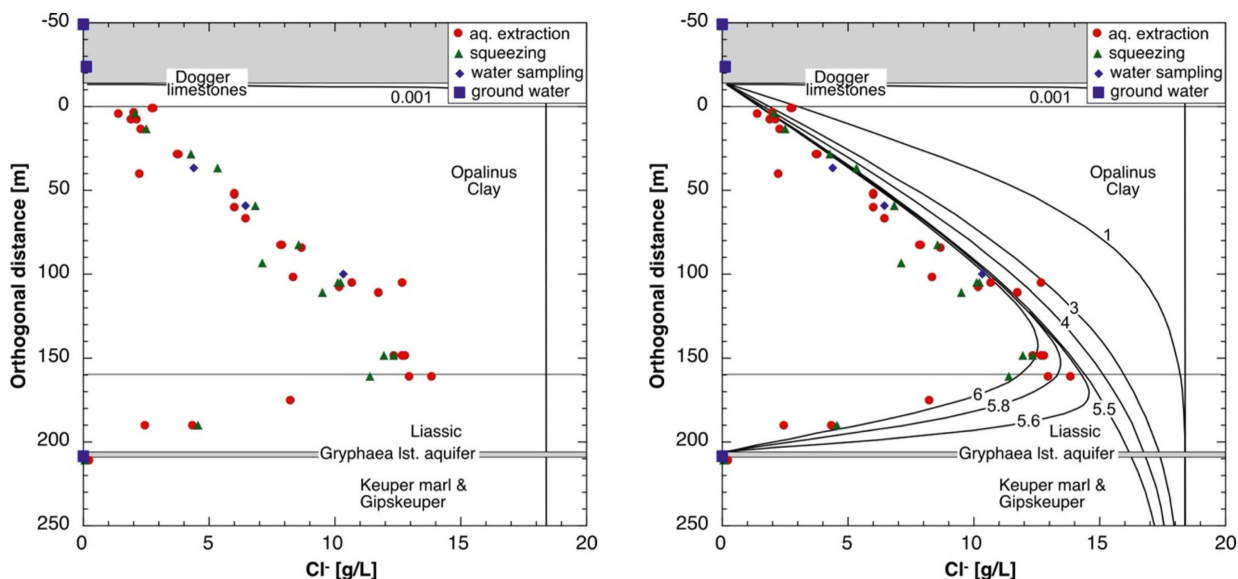


Abb. 6: Cl<sup>-</sup>-Gehalte im Porenwasser des Opalinustons im Felslabor Mont Terri. Nach MAZUREK ET AL. (2011). Zahlen bei den modellierten Kurven markieren die Zeitdauer seit Aktivierung des oberen Aquifers in Millionen Jahren.

kann, mit entsprechenden vorteilhaften Konsequenzen für die Explorierbarkeit. In einem homogenen Medium braucht es weniger Aufwand (z.B. Tiefbohrungen), um eine robuste Charakterisierung des Lagersystems herzuleiten.

### Das Felslabor Mont Terri

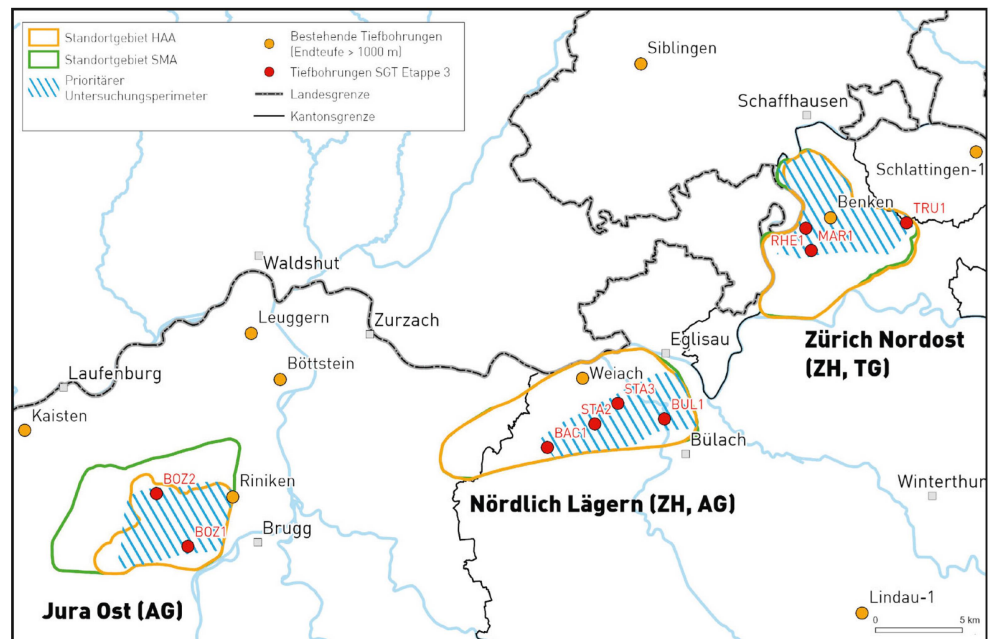
Im Jahre 1996 wurde auf Schweizer Initiative hin das Internationale Felslabor Mont Terri ([mont-terri.ch](http://mont-terri.ch)) gegründet. Es wird vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo betrieben, und derzeit beteiligen sich 22 Organisationen aus aller Welt an einer Vielzahl von Experimenten (THURY & BOSSART 1999, BOSSART & THURY 2007). Im Rahmen der Endlagerforschung steht die Wissenschaft vor dem Problem, Aussagen über das Systemverhalten über lange Zeiträume und Dimensionen im Bereich von Hunderten von Metern zu machen. Experimente im Labor sind demgegenüber kleinskalig in Raum und Zeit. In situ-Experimente im Felslabor dienen unter anderem dazu, diese Lücke teilweise zu füllen. Zudem können Untersuchungsmethoden und -geräte entwickelt und getestet werden. Seit einigen

Jahren finden auch Experimente in den Bereichen Geothermie und CO<sub>2</sub>-Speicherung statt.

### Porenwasserprofile als natürliche Experimente

Opalinuston entstand durch Ablagerung feiner Sedimentpartikel als Schlamm am Boden eines flachen Meeres. Anschliessend wurde er von jüngeren Sedimenten überdeckt und somit stark kompaktiert. Heute hat er eine wassergefüllte Porosität von ca. 12 Vol.-%. Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers liefert Information über die geochemische Entwicklung der letzten Tausende bis Millionen von Jahren: welche Prozesse haben den Stofftransport im wassergefüllten Porenraum bestimmt, wie hat das Porenwasser mit den mobilen Grundwässern interagiert, und über welche Zeiträume? Dies sind Fragen, welche für die Endlagerforschung von zentraler Bedeutung sind. Wenn wir die Prozesse in der Vergangenheit verstehen, können wir daraus für die Zukunft lernen – Paläohydrogeologie als prognostisches Werkzeug sozusagen.

Abb. 7: In Etappe 3 des Sachplanverfahrens untersuchte potenzielle Standortgebiete.



Leider gibt der Opalinuston seine Geheimnisse nicht auf einfache Art und Weise preis. Obwohl  $1 \text{ dm}^3$  Opalinuston  $0.12$  Liter Wasser enthält – mehr als genug für eine vollständige chemische und Isotopen-Analyse – lässt sich dieses nur schwer extrahieren. Dies liegt an der Architektur des Porenraums mit einer mittleren Porengrösse von gerade mal  $2 \text{ nm}$  ( $0.000002 \text{ mm}$ ). Dies ist weit unterhalb der Auflösung optischer Bildgebungsverfahren – man kann den Porenraum also nicht direkt sehen (Abb. 4). Am Institut für Geologie der Universität Bern wurden zahlreiche Methoden entwickelt und angewendet, um Porenwasser aus einem derart feingliedrigen Porenraum mit möglichst wenigen experimentellen Artefakten zu erhalten. Diese umfassen unter anderem das Anlegen eines hydraulischen Gradienten oder die Verwendung einer Presse, um einige Milliliter Wasser aus dem Gestein auszupressen. Dazu kommt eine Vielzahl weiterer Methoden (Übersicht in SACCHI ET AL. 2001 und im Anhang von MAZUREK ET AL. 2009). Ein Anwendungsbeispiel ist in Abb. 5 und Abb. 6 illustriert.

Abb. 5 zeigt ein geologisches Profil durch die Mont Terri-Antiklinale sowie in blau die Position des Felslabors. Die Figur zeigt, dass die Falte teilweise erodiert ist und auch der

Opalinuston im zentralen Teil vollständig fehlt. Aus hydrogeologischer Perspektive lässt sich die Entwicklung wie folgt beschreiben: Die Faltung des Juras (3–10 Millionen Jahre vor heute) erzeugt eine Topographie, welche die treibende Kraft für die nachfolgende Erosion darstellt. Zunächst werden die Kalke des oberen Doggers exhumiert, was zur Aktivierung dieses Aquifers führt. Damit gelangen schwach mineralisierte Oberflächenwässer in die Tiefe, und der Cl-Gehalt an der oberen Grenze des Opalinustons sinkt drastisch. Mit fortschreitender Erosion wird der Opalinuston selbst teilweise erodiert und danach der unterliegende Aquifer freigelegt und ebenfalls hydrogeologisch aktiviert, was ebenfalls mit einer abrupten Abnahme der Salinität bzw. des Cl-Gehalts einhergeht.

Entlang des Laborstollens wurden Analysen des Porenwassers durchgeführt, und Abb. 6 links zeigt die Verteilung der Cl-Konzentration, projiziert auf eine Ebene senkrecht zur Schichtung (wie im Einschub von Abb. 5 dargestellt). Die verschiedenen Methoden ergeben konsistente Resultate und zeigen ein asymmetrisches Profil, welches ein Maximum im unteren Drittel und ein steiles Abfallen zu den beiden einbettenden Aquiferen (grau) über und unter dem Opali-



nuston hin. Man kann nun versuchen, das Profil mit einem einfachen Diffusionsmodell zu erklären. Ausgehend von einer anfänglich konstanten Cl-Konzentration um 18 g/L wird zunächst der obere Aquifer aktiviert, was zu einer Ausdiffusion von Cl<sup>-</sup> gegen oben führt. Wie *Abb. 6* rechts zeigt, kann man nach einer Diffusionszeit von 5.5 Millionen Jahren den oberen Teil des beobachteten Profils gut reproduzieren. Zu diesem Zeitpunkt wird nun auch der untere Aquifer aktiviert, und nach einer Diffusionszeit von total 6 Millionen Jahren lässt sich das ganze Profil allein durch Diffusion erklären. Die Asymmetrie des Profils ist also die Folge der zeitlichen Verzögerung zwischen der Aktivierung des oberen und unteren Aquifers. Aus diesem Fallbeispiel kann man verschiedene Schlussfolgerungen ziehen, welche für den Stofftransport im Opalinuston eine Bedeutung haben:

- Es gibt starke Hinweise, dass molekulare Diffusion (getrieben durch Konzentrationsgradienten) der dominante Transportprozess im Opalinuston ist. Es wurden auch Modellrechnungen unter Berücksichtigung von Advektion (getrieben von Druckgradienten) gemacht, allerdings waren die Fits auf die Daten durchwegs schlechter.
- Die Diffusionszeiten (5.5 + 0.5 Millionen Jahre) wurden bei den Rechnungen als

unabhängige Fitparameter verwendet. Sie liegen innerhalb des Bereichs, welcher durch die (mit anderen Methoden zeitlich eingegrenzte) Erosionsgeschichte der Antiklinale abgeleitet worden ist. Dies bestätigt, dass die im Labor gemessenen Diffusionskoeffizienten für Cl<sup>-</sup>, welche der Modellrechnung zugrundeliegen, auch auf einer grossräumigen Skala gültig sind.

- Innerhalb des Profils befindet sich eine grosse Bruchzone im Opalinuston («Main Fault», s. *Abb. 3 und Abb. 5*). Diese findet aber keinen Ausdruck im Cl-Profil, was die oben beschriebene Selbstversiegelung illustriert.

### Einige Herausforderungen des Opalinustons

Dennoch, der Opalinuston hat nicht nur Vorteile. Seine Quellfähigkeit, ein Segen für die Selbstversiegelung, macht verschiedene Experimente im Labor wie auch in situ anspruchsvoller. Bohrlochstabilität ist ein vieldiskutiertes Thema auch in der Ölindustrie und erfordert angepasste Bohrverfahren. Untertagebauwerke wie Tunnel und Schächte sind, wie zahlreiche Beispiele im Faltenjura zeigen, machbar, wenn auch im Bau aufwändiger als in standfesteren Gesteinen.



**Abb. 8:** Ein frisch erbohrter Gesteinskern wird vom Bohrturm abgeholt (links). Ein Bohrstellengeologe untersucht den Kern und wählt Proben für Laboruntersuchungen aus (rechts).

Hochradioaktive Abfälle erzeugen nach der Einlagerung noch Jahrhunderte lang Wärme. In tonreichen Gesteinen mit ihrer im Vergleich geringen Wärmeleitfähigkeit führt dies zu einer lokalen Wärmeakkumulation und Temperaturen von >100 °C in unmittelbarer Nähe der Abfallkanister. Potenzielle Effekte dieses Hitzepulses, auch wenn dieser im Vergleich zur Lebensdauer des Lagersystems sehr kurz ist, werden in der Schweiz wie auch international untersucht. Ein einfacher Ansatz zur Bewältigung dieses Phänomens ist ein Lagerdesign mit grösseren Abständen zwischen den einzelnen Abfallkanistern.

### Aktueller Projektstand in der Schweiz

Der Prozess von Planung bis Realisierung eines Tiefenlagers beansprucht mehrere Jahrzehnte. Der «Sachplan geologische Tiefenlager» wurde vom Bundesamt für Energie entwickelt und in 3 Etappen unterteilt. Die fachliche Kompetenz liegt weitgehend bei der Nagra (einschliesslich deren unterstützenden Organisationen, Firmen und Beratern), und das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) ist die zuständige regulatorische Behörde. Etappe 1 (2008–2011) begann mit einer weissen Karte der Schweiz, gefolgt von einer geographischen Einengung nach klar festgelegten Kriterien. In Etappe 2 (2011–2018) erfolgte eine vertiefte Untersuchung der ausgewählten Standortregionen und eine weitere Einengung auf die Gebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost (*Abb. 7*). In allen 3 Gebieten ist Opalinuston das angepeilte Wirtgestein für das Tiefenlager. Derzeit läuft Etappe 3, welche eine vertiefte Charakterisierung dieser 3 Gebiete beinhaltet, unter anderem mittels 3D-Seismik und einer Bohrkampagne (*Abb. 8*). Die letzte der total 9 Tiefbohrungen wurde im Frühling 2022 abgeschlossen, und eine Standortwahl auf der Basis der erhaltenen Resultate wird Ende Jahr erwartet. Im Jahr 2024 soll ein Rahmenbewilligungsgesuch für den Bau des Tiefenlagers eingereicht werden.

### Literatur

- BOSSART, P., THURY, M., 2007. Research in the Mont Terri Rock laboratory: Quo vadis? *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 19–31.
- GAUTSCHI, A., 2001. Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay) – implications for the deep disposal of radioactive wastes. *Hydrogeol. J.* 9, 97–107.
- MAZUREK, M., HURFORD, A.J., LEU, W., 2006. Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. *Basin Res.* 18, 27–50.
- MAZUREK, M., ALT-EPPING, P., BATH, A., GIMMI, T., WABER, H.N., 2009. Natural tracer profiles across argillaceous formations: The CLAYTRAC project. OECD/NEA Rep. 6253, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France. [www.oecdbookshop.org](http://www.oecdbookshop.org).
- MAZUREK, M., ALT-EPPING, P., BATH, A., GIMMI, T., WABER, H.N., BUSCHAERT, S., DE CANNI RE, P., DE CRAEN, M., GAUTSCHI, A., SAVOYE, S., VINSOT, A., WEMAERE, I., WOUTERS, L., 2011. Natural tracer profiles across argillaceous formations. *Appl. Geochem.* 26, 1035–1064.
- SACCHI, E., MICHELOT, J.L., PITSCH, H., LALIEUX, P., ARANYOSSY, J.F., 2001. Extraction of water and solutes from argillaceous rocks for geochemical characterisation: methods, processes and current understanding. *Hydrogeol. J.* 9, 17–33.
- THURY, M., BOSSART, P., 1999. The Mont Terri rock laboratory, a new international research project in a Mesozoic shale formation, in Switzerland. *Engineering Geology* 52, 347–359.

### Martin Mazurek



Martin Mazurek promovierte 1988 an der Universität Basel in metamorpher Petrologie. Danach war er in verschiedenen Funktionen am Institut für Geologie der Universität Bern tätig, seit 2011 als assoziierter Professor im Themenbereich Geochemie und Angewandte Geologie. Geochemische Wechselwirkungen zwischen geringdurchlässigen, oft tonreichen Gesteinen und deren Porenwässern sowie die Beziehung zwischen bruchhafter Gesteinsdeformation und Wasserfluss gehören zu den Forschungsschwerpunkten.

Kontakt: mazurek@geo.unibe.ch



**Weisheit ist nicht das Ergebnis der Schulbildung, sondern des lebenslangen Versuchs, sie zu erwerben.**

Quelle: Einstein sagt – Zitate, Einfälle, Gedanken,  
Herausgegeben von Alice Calaprice; 1997 Piper Verlag München,  
ISBN 978-3-492-25089-4, 4. Auflage Februar 2013.