



Vor der Verfüllung des Stollens: Der Versuchsbehälter wird auf einem Sockel exakt positioniert.

Tiefenlager für Atomabfälle

Experimente in 300 Metern Tiefe

Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum geologischen Tiefenlager ist das laufende «Full-Scale Emplacement»-Experiment im Felslabor Mont Terri JU. Zum ersten Mal werden dabei Versuchsbehälter in Originalgrösse im Opalinuston eingelagert.

Von Urs Binder

Auch wenn die betroffenen Kantone prinzipiell mit Skepsis reagieren, wenn es um den Standort für ein geologisches Tiefenlager geht, und auch wenn die Schweiz sich mittelfristig für die Abkehr von der Nuklearenergie entschieden hat: Radioaktive Abfälle existieren, und sie müssen zum Schutz von Mensch und Umwelt bis zum Abklingen der Strahlung auf ein natürliches Niveau während hunderten bis hunderttausenden von Jahren sicher gelagert und von der Umgebung so abgeschirmt werden, dass

keine ständige Überwachung durch den Menschen nötig ist. Geologische Tiefenlager sind nach aktuellem Wissensstand die einzige Methode, die dies gewährleistet.

Die mit der Entsorgung beauftragte Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) rechnet mit einer Gesamtmenge von rund 100 000 Kubikmetern, die es gemäss dem Kernenergiegesetz auf Schweizer Gebiet unterzubringen gilt – das entspricht etwa dem Volumen der Bahnhofshalle des HB Zürich. Bis

zur Eröffnung der Tiefenlager lagern die konditionierten Abfälle direkt auf den Geländen der Kernkraftwerke sowie im Zwischenlager Würenlingen.

Schwach- und mittelaktive Abfälle aus dem Betrieb der Kernkraftwerke und aus Medizin, Industrie und Forschung sollen um 2050 ins Tiefenlager überführt werden. Das Lager für hochaktive Abfälle wie abgebrannte Brennelemente und verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufbereitung soll gemäss Planung um 2060 in Betrieb gehen. Die Gesamtkosten für die Tiefen-

lager belaufen sich laut dem Bundesamt für Energie (BFE) auf 8,7 Milliarden Franken.

Stahlbehälter und Opalinuston

Als Ziel der sicheren Entsorgung gilt, dass die freigesetzte Radioaktivität die Individualdosis von 0,1 Millisievert pro Jahr nicht überschreitet – das entspricht einigen Prozenten der natürlichen Strahlung. Damit dies während der gesamten Lagerungsdauer gewährleistet bleibt, sind gestaffelte Sicherheitsbarrieren vorgesehen: Die Abfälle werden zuerst konditioniert und in geeignete Lagerbehälter verpackt, zum Beispiel in Stahlkanister oder in Kupferbehälter mit Gusseisen-Einsatz. Diese technische Barriere wird durch eine natürliche Barriere ergänzt, indem die Behälter in eine dichte Gesteinsschicht eingelagert werden. In der Schweiz kommt als Wirtgestein, so die Erkenntnis der Geologen, in erster Linie – und für hochaktive Abfälle sogar ausschliesslich – der Opalinuston in Frage. Für schwach- und mittelaktive Abfälle eignen sich auch andere Tongesteine wie etwa helvetische Mergel.

Opalinustonschichten sind in der Jurazeit vor rund 175 Millionen Jahren aus Schlammablagerungen auf dem damaligen Meeresboden entstanden, rund 100 Meter mächtig und kommen in der gewünschten Tiefe von 200 bis 900 Meter vor allem in der Nordwestschweiz vor. Opalinuston ist mit einem Gehalt von 40 bis 80 Prozent sehr reich an Tonmineralen, sehr homogen strukturiert und nahezu wasserundurchlässig. Risse dichten sich dank rund 10 Prozent quellfähigen Bestandteilen weitgehend von selbst wieder ab. Aufgrund seiner Struktur ist er zudem in der Lage, Radionuklide an den Tonmineraloberflächen zu binden: 1 Gramm Opalinuston hat eine spezifische Oberfläche von 100 Quadratmetern. Mit all diesen Eigenschaften bietet das Gestein das bestmögliche Rückhaltevermögen für radioaktive Stoffe.

Opalinuston hat allerdings auch Nachteile: Das Gestein ist mechanisch nicht sehr stabil, was hohe Ansprüche an die Bohr- und Bautechnik stellt. Und es leitet die Wärme eher schlecht ab – eigentlich nicht ideal für die Einlagerung radioaktiver Stoffe, die beim Zerfall Wärme erzeugen.

Theorie und Praxis

Das Verhalten der Gesteinsschichten, der Lagerbehälter sowie der seismischen und anderweitigen geologischen Gegebenheiten lässt sich theoretisch mit Hilfe von Computermodellen prognostizieren. Für ein derart bedeutendes Projekt wie die langfristige Lagerung gefährlicher Stoffe genügt die Theorie aber nicht. Deshalb betreiben verschiedene Projektpartner unter der Direktion des Bundesamtes für Landestopografie (Swisstopo) ein Felslabor, das tief unter der Erdoberfläche realistische Versuchsbedingungen für kurz- und langfristige Experimente im Massstab 1 : 1 ermöglicht.

Das Felslabor Mont Terri liegt nördlich von St-Ursanne im Kanton Jura in 300 Meter Tiefe inmitten einer Opalinustonschicht. Der Zugang erfolgt über den Sicherheitsstollen des Mont-Terri-Autobahnstollens der Transjurane – eine

eindrückliche Fahrt in die Tiefen der jurassischen Geologie. Bereits 1996 fanden in diesem Sicherheitsstollen erste Experimente in acht kleinen Nischen statt. Ab 1998 wurde ein separater Forschungsstollen ausgebrochen und in zwei Etappen 2004 und 2008 erweitert. Die Stollenanlage dient ausschliesslich der Forschung; radioaktives Material wird weder im Rahmen der 46 laufenden Experimente noch zu einem späteren Zeitpunkt eingelagert.

Seit Beginn wird im Felslabor international geforscht. Neben Swisstopo als Betreiber und der Nagra, dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (Ensi) und dem Paul-Scherrer-Institut beteiligen sich rund ein Dutzend weitere Organisationen aus der ganzen Welt von Japan bis Kanada an den Forschungsvorhaben. Denn neben der Schweiz haben auch andere Länder Interesse an Tonschichten als Wirtgestein für geologische Tiefenlager. Ausgewählte Experimente werden zudem von der EU mitfinanziert.

Um den Opalinuston zu charakterisieren und um mögliche Verfahren zur Einlagerung von Abfallbehältern zu demonstrieren, mussten im Felslabor völlig neue Methoden entwickelt werden. Im Tongestein fliesst so gut wie kein Wasser, sodass manche herkömmlichen Messmethoden nicht funktionieren. Auch die Bohr- und Kernentnahmetechniken mussten angepasst werden, um stabile Bohrungen und ungestörte Bohrkern zu ermöglichen.

Testlauf für das Tiefenlager

Das aktuellste Experiment nennt sich FE, was für «Full-Scale Emplacement» steht. Dafür wurde ein neuer, 50 Meter langer Stollen von knapp 3 Metern Durchmesser aufgeföhrt, der im Massstab 1 : 1 einem zukünftigen Tiefenlagerstollen entspricht.

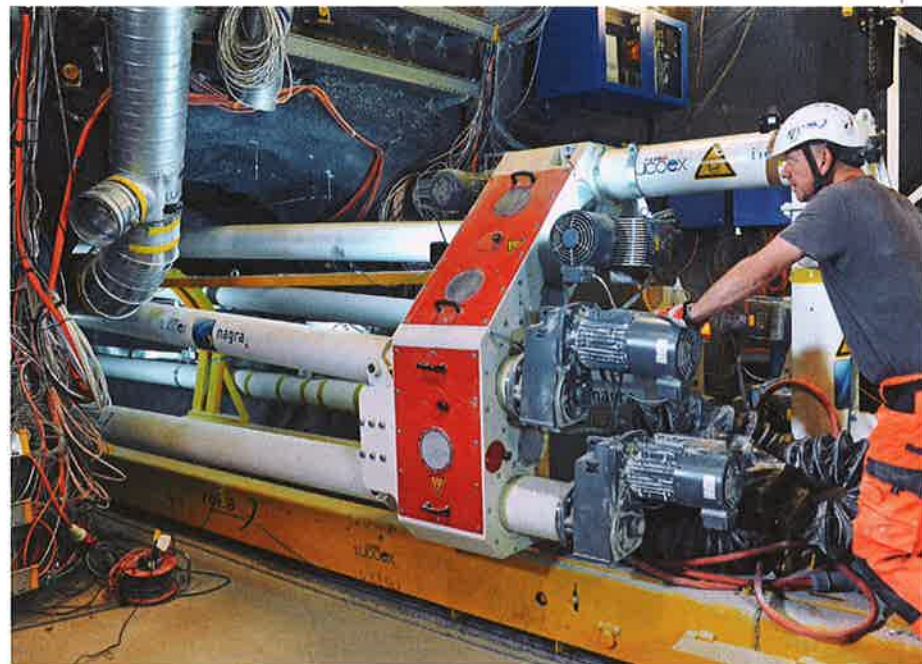
In diesen Stollen lagert die für das Experiment federführende Nagra 2014 und 2015 drei Versuchsbehälter mit je 4,6 Meter Länge und 1 Meter Durchmesser in definierten Abständen



Die Opalinustonschicht verläuft im Gebiet Mont Terri in einem Winkel von rund 45 Grad.



Bilder: Comet Photoshopping / Dieter Erz



Der Prototyp der Verfüllmaschine ist mit fünf Schnecken ausgestattet (oben) und ist 17 Meter lang. Beim verfüllten Bentonit-Granulat handelt es sich um verwitterte Vulkanasche aus Wyoming.

horizontal ein. Das restliche Volumen des Stollens wird mit Bentonit-Granulat verfüllt. Für zusätzliche Abschirmung zwischen den Behältern sorgt ein «Zwischensiegel», im späteren Tiefenlager nach jeder elften Behälterposition geplant. Im Bereich der Zwischensiegel wird der Stollen durch Stahlbögen stabilisiert, rund um die Versuchsbehälter mit Spritzbeton.

Bei dem Experiment geht es darum, die Auswirkungen der beim Zerfall von hochradioaktiven Abfällen entstehenden Wärme auf den Bentonitmantel und den umgebenden Opalinuston zu un-

tersuchen, die Ergebnisse der Computermodelle zu überprüfen, das Konzept eines Tiefenlagers tollens weiter zu optimieren sowie praktische Erfahrungen mit dem Einlagerungsprozess zu sammeln. Selbstverständlich enthalten die Behälter beim FE-Experiment keine radioaktiven Stoffe. Die Wärmeabgabe wird stattdessen mit Heizelementen simuliert. Im kleinen Massstab hatte die Nagra dies bereits zuvor untersucht, nun folgt das praxisnahe Experiment in Originalgrösse.

Gemäss den Computermodellen erwartet man an der Stollenwand Temperaturen von 60

bis 80 Grad. Die Oberfläche der Behälter kann demnach bis zu 150 Grad heiss werden.

Höchste Dichte in jeder Beziehung

Bevor das Experiment mit der Einlagerung der Versuchsbehälter in die heisse Etappe eintrat, haben Messtechniker den Stollen und den umgebenden Opalinuston mit hunderten von Sensoren regelrecht gespickt. Wo der Stollen noch nicht verfüllt ist, sind die Sensoren und Leitungen deutlich zu erkennen. Damit will man später auch kleinste Veränderungen im Stollen und im Gestein erkennen und analysieren.

Die Instrumentierung lief in drei Phasen ab: Mit Hilfe von Bohrungen wurden rund 640 Sensoren im Fernfeld des Opalinustons platziert, dazu kamen in Phase 2 weitere 250 Messpunkte in der direkteren Umgebung des Stollens. An der Stollenwand sowie rund um die Heizelemente im Bentonit fanden in Phase 3 weitere 800 Sensoren ihren Platz.

Aber nicht nur die Sensordichte ist entscheidend. Für das Gelingen des Wärmeleitfähigkeitsexperiments sei äusserst wichtig, dass das Bentonit-Granulat dicht gepackt verfüllt werden könne, halten die FE-Projektleiter Herwig R. Müller und Irina Gaus fest. Angezielt sind mindestens 1,45 Tonnen pro Kubikmeter – das macht für den ganzen Stollen über 200 Tonnen. Beim Bentonit, das im FE-Experiment verwendet wird, handelt es sich um verwitterte Vulkanasche aus Wyoming. Sie enthält verschiedene stark quellfähige Tonminerale.

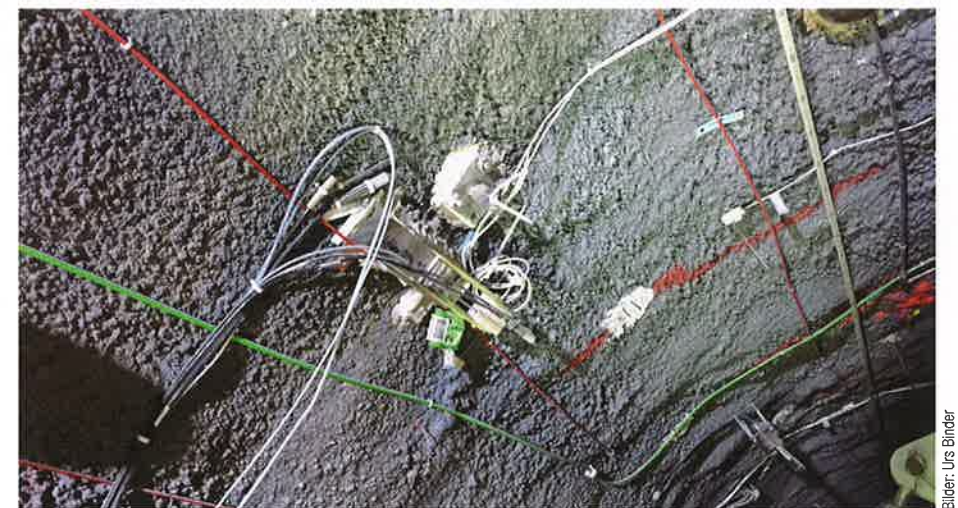
Eine solche Dichte erzielt man nicht mit Schubkarre und Schaufel, vom Arbeitsaufwand ganz abgesehen. Eine weitere Komponente des

FE-Experiments war deshalb die Entwicklung einer Verfüllmaschine. In Zusammenarbeit mit einem Spezialisten für Tunnellogistik entstand ein Prototyp, der das Granulat aus einem Behälter entnimmt und mit fünf Förderschnecken ausreichend kraftvoll in den Stollen presst. Die längste Schnecke misst etwa 8,5 Meter, die ganze Maschine ist 17 Meter lang. In der Enge des Stollens macht sie einen mächtigen Eindruck.

Erste Erkenntnisse vielversprechend

Ob die Verfüllmaschinen im späteren Tiefenlager genau gleich aufgebaut sind, steht noch nicht fest. Das FE-Experiment hat jedoch bereits erste Erkenntnisse geliefert, wie die Nagra anlässlich unseres Besuchs im November 2014 verkündete. Der Bau von Lagerstollen im Opalinuston mit verschiedenen Abschnitten für Behälter und Zwischensiegel ist wie im Konzept vorgesehen möglich. Das Verfüllmaterial konnte hinsichtlich Druckfestigkeit und Stabilität verbessert werden. Und schon der Prototyp der Maschine erreichte die vorgegebenen Verfülldichten.

Wenn alle drei Behälter eingelagert sind und der Stollen verschlossen wurde – das ist für die nächsten Monate geplant – beginnt die Beobachtungsphase. Das FE-Experiment soll während mehreren Jahren laufend Daten liefern, die Rückschlüsse auf die Entwicklung im späteren Tiefenlager für hochaktive Abfälle erlauben. Parameter wie Temperatur, Feuchtigkeit und Druck werden kontinuierlich aufgezeichnet und ausgewertet. Auf dieser Basis können die Annahmen der bestehenden Computermodelle verifiziert und die Algorithmen falls nötig angepasst werden. ■



Bilder: Urs Binder

Auch an den vielen Kabeln deutlich zu sehen: Die Behälteroberfläche und die Stollenwand sind mit hunderten von Sensoren gespickt.

Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt

Ein geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle hat neben den rein technischen Aspekten wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen auf die Standortregion. Das Bundesamt für Energie (BFE) hat seit 2011 in allen sechs Regionen, die für ein Tiefenlager in Frage kommen, eine kantonsübergreifende sozioökonomisch-ökologische Wirkungsstudie (SÖW) durchgeführt.

Die Studien analysieren für jede Region die Situation im Hinblick auf Bau, Betrieb und Verschluss des Tiefenlagers anhand von über 40 Messgrössen und bewerten die Regionen mit einem Punktesystem. Dabei geht es ausschliesslich um objektivierbare Wirkungen – der Einfluss eines Tiefenlagers auf das Image der Region wurde bewusst ausgeklammert und soll in einer separaten Gesellschaftsstudie im Auftrag der Standortkantone thematisiert werden.

Positive und negative Auswirkungen

Seit November 2014 liegt der Schlussbericht zur

SÖW vor. Demnach hängt das Ausmass der wirtschaftlichen Auswirkungen direkt von der Höhe der Baukosten ab. Wertschöpfung, Beschäftigung und Steuereinnahmen profitieren umso stärker, je mehr die Branchen Hoch- und Tiefbau sowie Metallherstellung und Metallbearbeitung in der Region vertreten sind. Negativ betroffen sind Regionen mit einem hohen Anteil an den sensiblen Branchen Tourismus und Landwirtschaft.

Punkto Umwelt wirkt sich ein Tiefenlager gemäss der Studie am meisten bezüglich Flächenverbrauch, Fruchtfolgeflächen, Ausbruchmaterialien und Wildtierkorridoren aus. Auch die Anbindung der Oberflächenstrukturen an das Strassen- und Bahnnetz spielt eine Rolle. Schutzgebiete und Grundwasserschutzzonen seien dagegen wenig betroffen. Diese seien schon bei der Suche der möglichen Standorte weitgehend ausgeschlossen worden.

Hinsichtlich gesellschaftlicher Wirkung wird ein Standort umso negativer bewertet, je dichter das

Siedlungsgebiet, je grösser das angestrebte Siedlungswachstum und je sichtbarer die Oberflächenanlage ist. Wenn sich bereits Industrie und Gewerbe in der Nähe befinden, fällt die Bewertung weniger negativ aus.

Weitere Schritte

Mit dem inzwischen erfolgten Entscheid der Nagra, dem Bundesrat nur die Regionen Zürich Nordost und Jura Ost vorzuschlagen, hat die SÖW nichts zu tun. Bei der Nagra-Empfehlung hat die Sicherheit erste Priorität, wie das BFE mitteilt. Die SÖW-Ergebnisse werden hingegen in die Gesamtbeurteilung für den Bundesratsentscheid über die verbleibenden Standortgebiete einfließen, der im Jahr 2017 erwartet wird. Die definitive Standortwahl erfolgt im Rahmenbewilligungsverfahren. Vom Bundesrat erteilt, muss die Rahmenbewilligung voraussichtlich 2027 vom Parlament abgesegnet werden. Zudem untersteht sie dem fakultativen Referendum. (ubi)