

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

**Kurze Zusammenstellung der Ergebnisse des Workshops Deep Borehole
Repository Using Multiple Geological Barriers“**

5. bis 6. Juni 2015 Berlin-Schönefeld

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-27</p>

Kurze Zusammenstellung der Ergebnisse des Workshops „Deep Borehole Repository Using Multiple Geological Barriers“

5.-6.Juni 2015 Berlin-Schönefeld

mit anschließender Gelegenheit zur Besichtigung der kontinentalen Tiefbohrung
in Windischeschenbach (9 101 m Endteufe, $\varnothing > 40$ cm in ca. 3 000 m Tiefe)

Für die Veranstalter: Dr. Frank Schilling, Professor für Technische Petrophysik (KIT)

Zusammenfassung:

Nationale und internationale Spezialisten¹ zu verschiedenen Aspekten der Geologie und Hydrologie sowie der Bohr-, Messtechnik und Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen trafen sich, um den Stand der Technik, ebenso wie den Stand von Forschung und Entwicklung interdisziplinär zu diskutieren. Neben an der Endlagerung beteiligten öffentlichen Einrichtungen, waren Wissenschaftler sowie Firmenvertreter und Vertreter von Genehmigungsbehörden anwesend. In der abschließenden Diskussion wurde festgehalten:

- Die Entwicklung der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Bohrungen hat noch nicht den Reifegrad vergleichbar mit der einer Bergwerkseinlagerung erreicht.
- Für eine Endlagerung muss noch die Prozesskette als Ganzes überprüft werden
 - o Genehmigungsanforderungen
 - o Akzeptanz
 - o Exploration
 - o Erschließung
 - o Rückholbarkeit und Bergbarkeit
 - o Systemverständnis (inkl. Systemstabilität über 500 bzw. eine Mio. Jahre)
 - o Überwachung
- Für die diskutierten Anforderungen an die Tiefbohrtechnik und die Untersuchung von Proben entlang des gesamten Bohrpfad es ist entsprechendes Know-How vorhanden. Ein Beispiel, an dem die gesamte Prozesskette für die Fragen der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen realisiert wurde – mit den Anforderung des nationalen Rechts – existiert nicht, auch wenn es für die Einlagerung von anderen Abfällen – auch radioaktiven – in Bohrlöchern im In- und Ausland Beispiele und Erfahrung gibt.
- In der Tiefenlagerung von Stoffen wird national und international davon ausgegangen, dass die Nutzung unterschiedlicher Barrieren und die Entfernung zum Schutzgut einen Sicherheitsgewinn darstellen kann (das Verlassen auf lediglich eine geologische Barriere wurde in der Legislative [CCS, Fracking] in den vergangenen Jahren in Deutschland verworfen).

Insbesondere von den Teilnehmern, die langjährige nationale und internationale Tiefbohrererfahrung nachweisen können, wurden die Aussagen zur Tiefbohrtechnik der aktuellen DAEF Kurzstellungnahme vom Juni 2015 zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern mit Verwunderung aufgenommen. Für viele der in diesem Report genannten Fragen (z.B. Bohrtechnik) sind heute in der industriellen Praxis bewährte Verfahren gängig, die auch im Workshop beispielhaft präsentiert wurden. Entweder handelt es sich

¹ USA, Österreich (IAEA), Schweiz, Schweden, Großbritannien, Deutschland (TU BA Freiberg, RWTH-Aachen, KIT, GFZ, BGR, DBE, GNS, GRS, IFG, BakerHughes, Herrenknecht)

um den Stand konventioneller Technik (z. B. Ein- und Ausbau oder Bergung zehner Tonnenschwerer Komponenten bei tiefen Bohrungen), die seit Jahrzehnten zum Bohrralltag gehören bzw. die notwendigen Technologien, die bereits im Feld mehrfach erfolgreich erprobt wurden (z. B. Bohrungen im Kristallin mit großem Durchmesser). Gerade in Deutschland besteht mit der KTB und den damit einhergehenden technischen Entwicklungen ein erhebliches Know-How, das noch vorhanden ist und für diese Fragestellungen genutzt werden kann.

Ob gesellschaftlich eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern – möglicherweise dezentral- eine höhere Akzeptanz als die Lagerung in einem tiefen Bergwerkbesitz wurde kontrovers diskutiert. Dies war jedoch nicht zentrales Thema dieses Workshops, sondern der Fokus lag auf den besonderen Anforderungen bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Bezüglich des weiteren Vorgehens wurde angeregt, dass die zu adressierenden Fragestellungen für die Endlagerungstechnologie in tiefen Bohrlöchern, der Stand der Technik und deren Lösungsansätze sowie die noch erforderlichen Forschungsschwerpunkte in einem Dokument („White Book“) zusammengefasst werden sollten.

An einem Pilottest (Vorerkundung, Bohren, Einlagerung, Monitoring) könnten die wissenschaftlichen Fragen ganzheitlich adressiert und die Besonderheit der aktuellen nationalen Anforderung in Deutschland an Rückholbarkeit und Bergbarkeit berücksichtigt werden. Die Kosten für ein entsprechendes Projekt wurden auf ca. 130 Mio. € abgeschätzt (auf der Basis heute verfügbarer Technologie und aktueller Bohrkosten). Das Projekt sollte einen begrenzten zeitlichen Umfang (<10 Jahre) besitzen und nachweisen, dass Bohrlochdurchmesser von mehr als 60 cm bis in über 5 km Tiefe zuverlässig erstellt werden können und dass ein Handling von entsprechenden Containern in einem verrohrten Bohrloch in dieser Teufe sicher beherrscht werden kann.

An existierenden tiefen Bohrungen im Kristallin könnte das zugrundeliegende hydraulische Konzept überprüft, ein radiochemische Überwachungskonzept (auch gemeinsam mit internationalen Partnern) getestet und Bürger von Anfang an in das Projekt eingebunden werden.

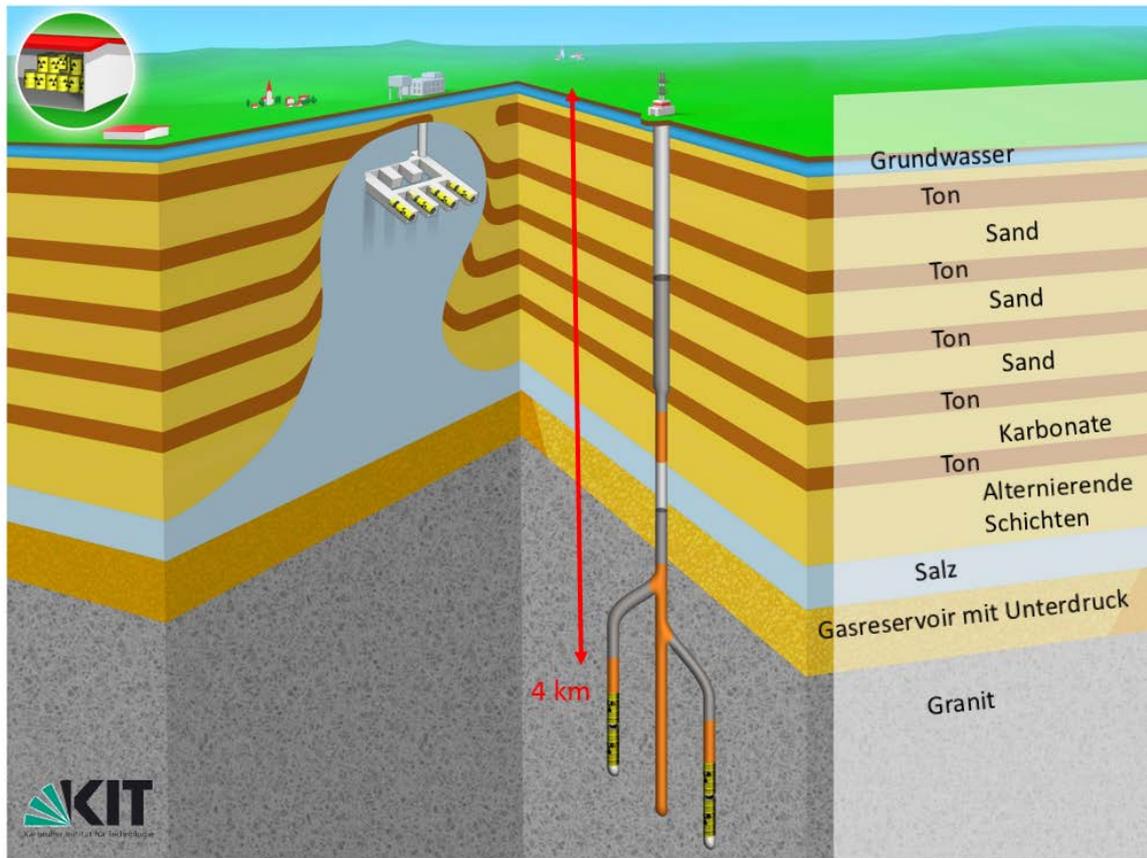


Abb. 1: Endlagerung in tiefen Bohrungen erlaubt die Nutzung eines Multibarrierensystems: Granit wegen Stabilität, Tone und Salze aufgrund ihrer Undurchlässigkeit als geologische Barrieren und ggfs. zusätzlich ein leergefördertes Reservoir als physikalische Barriere um aufsteigende Gase sicher und in großer Entfernung vom Schutzgut Mensch/Trinkwasser einzuschließen.

Die Lagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern stellt eine – aus heutiger Sicht – technisch realisierbare Option dar.

Internationale Perspektive: Diese noch eingehend zu prüfende Option könnte sich, insbesondere für Länder die keine geeigneten geologischen Strukturen für die Endlagerung in Bergwerke besitzen, als eine bezahlbare und an vielen Stellen realisierbare Alternative herausstellen.

Im Folgenden sind einige Ergebnisse zu den einzelnen Themenbereichen zusammen gefasst.

Key Note Presentations

Vorträge:

Andrew Orrell, IAEA Wien: Genesis of the US program for deep well bore proposals (Entstehung des US Programmes der Bohrlochlagerung)

Pat Brady, Sandia National Laboratories: Status of deep wellbore disposal in the US (Stand der Bohrlochlagerung in den USA)

Guido Bracke, GRS: Deep Borehole disposal of radioactive waste for Germany as an alternative option? Safety requirements, criteria, analyses, acceptance, challenges? (Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern als alternative Option für Deutschland? Sicherheitsanforderungen, Kriterien, Analysen, Akzeptanz, Herausforderungen?)

Inhalt der Vorträge und Diskussionen:

- Die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern stellt eine zusätzliche Möglichkeit dar, welche den Entscheidungsspielraum vergrößern kann.
- Die größere Tiefe und damit Entfernung zum Schutzgut kann einen Sicherheitsgewinn darstellen.
- Die Idee wird in USA auch deshalb verfolgt, da sie lange Transportwege von radioaktiven Abfällen verkürzen könnte und dass der Genehmigungsprozess (USA) sich als weniger komplex darstellen könnte.
- Es wurde ein Projektüberblick über die Aktivitäten (USA) gegeben. Aktueller Status: Eine Standortauswahl für ein Pilotprojekt findet zur Zeit statt.
- Als Parameter/Indikatoren für einen Standort wurden unter Anderem diskutiert
 - o Alter der Tiefenwässer (alte Wässer sind ein Hinweis, dass über geologische Zeiträume keine Wasseraustausch mit oberflächennahen Wässern stattfand)
 - o Reduzierende Bedingungen im Einlagerungsbereich
 - o Ausreichende Dichte der Tiefenwässer um eine Konvektion von Fluiden effektiv zu eliminieren und um unabhängig von der Permeabilität des Einschlussbereiches eine Kontamination von Schutzgütern zu verhindern (physikalische Barriere).
 - o Geologische Barrieren, die einen Transport zur Oberfläche unterbinden.
 - o Bei einem Bohrlochverschluss der nahezu ohne Abdichtwirkung („mit Sand gefülltes Rohr“) angenommen wurde ergab eine Sicherheitsanalyse eine deutlich Unterschreitung der Kriterien für die potentielle Strahlenexposition über Tage (Modellbetrachtungen $1,4 \cdot 10^{-12}$ mSv/yr - diffusionskontrolliert).
 - o Multibarrierenkonzepte beim Bohrlochabschluss können zu einem Sicherheitsgewinn führen.
 - o Große Durchmesser wurden bereits erfolgreich gebohrt. Bisher gab es keine Notwendigkeit größere Durchmesser in großer Zahl zu bohren.
 - o Der aktuelle Stand der Diskussion in Deutschland zu den Sicherheitsanforderungen, - Kriterien, Analysen sowie zur Akzeptanz wurde vorgestellt und diskutiert. Neben den technischen Herausforderungen (bei der Lagerung in Bergwerken oder in tiefen Bohrlöchern) und regulatorischen Anforderungen (Sicherheitskonzept) wird die Akzeptanz in der Gesellschaft als große Herausforderung für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gesehen.

Geological and Physical Barriers (Geologische und physikalische Barrieren)

Suitable Geology Excluding Criteria (Geologische Ausschlusskriterien)

Vorträge:

Wolfgang Minkley, IFG Leipzig: Integrity of geological barriers in salt formation (Dichtigkeit von Salzbarrieren)

Ralf Littke, RWTH Aachen: Geological barriers of oil and gas reservoirs (Geologische Barrieren für Erdöl und Erdgas)

Chris Juhlin, Uppsala University: Appraisal of geological barriers in the upper crust based on some crystalline rock drilling projects and geophysical data (Bewertung kristalliner geologischer Barrieren bei Bohrvorhaben im Kristallin auf der Basis geophysikalischer Daten)

Frank Schilling, KIT: Increase of safety by multibarrier systems (Sicherheitsgewinn durch Multibarrierensystemen)

Inhalt der Vorträge und Diskussionen:

- Die Dichtigkeit über geologische Zeiträume von Salz für Gase kann als nachgewiesen angesehen werden. Als Beispiel wurde die fatale CO₂-Eruption im Salzbergwerk Unterbreizbach (2013) angeführt, welche nachgewiesen hat, dass große Gasmengen in Salzstöcken über Jahrtausende eingeschlossen sein können.
- Das plastische Verhalten und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Salz sind große Vorteile für eine geologische Barriere. Dies erlaubt in Salzbergwerk einen sicheren Einschlussbereich zu definieren.
- Über die Erfahrungen im Bereich der Erdöl- und Erdgasgewinnung, sowie durch die Untersuchungen im Rahmen der Endlagerforschung (z.B. NAGRA Schweiz) ist nachgewiesen, dass auch Tonsteine über Jahrtausende eine dichte Barriere darstellen können. Durch ihre mechanischen und chemischen Eigenschaften können Tonsteine eine effektive geologische Barriere darstellen.
- Anhand von Untersuchungen an sogenannten „Cap Rocks“ (häufig Tonsteine oder in Deutschland Salz) von Erdgaslagerstätten wurde nachgewiesen, dass sie auch Gase unter erhöhten Drücken über Jahrtausende sicher einschließen können.
- Die Nutzung von Gesteinen des Grundgebirges (Granit und Gneis) ist nicht unabhängig von lokalen und regionalen Grundwasserbewegungen zu betrachten. Werden über einen längeren Zeitraum auch Hebungen und Senkungen durch Be- und Entlastung bei Vergletscherung betrachtet, werden auch in großen Tiefen Wässer mit geringen Salinitäten und Altern beobachtet. Für die Skandinavischen Länder haben sich die hydraulischen Vorhersagen bisher bestätigt. Ein vertieftes Systemverständnis sollte angestrebt werden.
- Im Grundgebirge sollte nur dort etwas gelagert werden, wo ein ausreichend hohes Alter von Tiefenwässern nachgewiesen werden kann. Dies zeigt an, dass in dem Zeitraum keine Zirkulation mit Kontakt zu Frischwasser stattgefunden hat.
- Die Rolle der Tiefe zum Schutzgut und das Konzept von Multibarrieren wurden anhand der Geologie Deutschlands diskutiert.
- Aufgrund der Stratigraphie sind in Deutschland viele Standorte denkbar, bei denen tiefe Bohrlöcher ins Grundgebirge durch eine mächtige Salzschiefer (und Tonschiefer) abgeteuft werden könnten. Damit kann die Barrierewirkung von Salz und Ton für die Lagerung in tiefen Bohrlöchern zusätzlich genutzt werden.
- Wird diese Salzschiefer in das Einschlusskonzept einer tiefen Bohrlochlagerung integriert, können verschiedene physikalische, chemische und geologische Rückhalte-mechanismen kombiniert werden.

- Die Möglichkeit einer weiteren physikalischen Barriere durch entsprechendes Reservoir-Management wurde diskutiert. So könnte eine weitere physikalische Barriere entstehen (welche größere Gasmengen aufnehmen könnte) die eine zusätzliche Sicherheitsfunktion darstellen könnte.

Deep Drilling / Shaft building (Bohren/Schachtbau)

Vorträge:

Matthias Reich, TU Freiberg: (directional) drilling, well completion, shaft building. Typical operational areas and equipment of deep drilling technology (Typische Einsatzbereiche und Ausrüstungen der Tiefbohrtechnik)

Thomas Roeckel, Piewak&Partner: Drilling with large diameters in crystalline rocks – experience from KTB (Große Durchmesserbohrungen im Kristallin – Erfahrungen aus der KTB)

Helmut Mischo, TU Freiberg: Disposal Technology for Deep Drill Holes – Status and requirements from a miner's point of view (Verwahrung von tiefen Bohrlöchern – Status und Erfordernisse vom Standpunkt eines Bergmanns)

Inhalt der Vorträge und Diskussionen:

- Die meisten Tief-Bohrungen weltweit (allein in den USA gibt es über 1 Mio aktive Bohrungen auf Kohlenwasserstoffe) werden für die Kohlenwasserstoffindustrie abgeteuft. Dort sind aber geringere Enddurchmesser von max. 150 – 250 mm üblich.
- In der Geothermie werden größere Durchmesser wegen der erforderlichen hohen Wasserproduktionsraten schon routinemäßig gebohrt.
- Bohrungen auf Kohlenwasserstoffe werden mit Durchmessern gebohrt, die optimal für die Förderung sind.
- Bis in Tiefen von ca. 5 000 m ist der Durchmesser von Tiefen Bohrungen (bis > 50 cm) vor allem durch die Kosten begrenzt.
- Mit moderner Richtbohrtechnik können beliebige Punkte im dreidimensionalen Raum gezielt angebohrt werden. Die Richtbohrtechnik wurde maßgeblich durch das Kontinentale Tiefbohrprogramm im bayerischen Windischeschenbach beeinflusst.
- Bereits vor 25 Jahren wurden Durchmesser von mehreren Dezimetern auch im Grundgebirge sicher beherrscht (Bsp. KTB: 34 cm Durchmesser in 6 km Tiefe)
- Die Bohrtechnik für große Durchmesser und Tiefen existiert, wird jedoch nicht routinemäßig eingesetzt, da dafür noch kein „Markt“ vorhanden ist.
- Für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern gilt es weitere Anforderungen zu erfüllen und technische Randbedingungen zu definieren u. A.:
 - o Notwendiger Durchmesser
 - o Ist es günstiger, kleine Durchmesser zu bohren oder in kleinere Behälter umzupacken oder mit höherem Kostenaufwand größere Bohrungen abzuteufen
 - o Wie können Behälter wieder geborgen werden.
 - o Wie sollen die Behälter eingebracht werden (Winde, Bohrgestänge, Coiled Tubing)
 - o Soll es eine trockene Bohrung („Schacht“) oder eine mit Bohrspülung gefüllte Bohrung sein.
 - o Welches Konzept soll für die Verfüllung der Bohrlöcher verwendet werden und wie reagiert dieses bei Veränderung der Länge der Behälter.
 - o Welche mineralogischen und chemischen Reaktionen müssen betrachtet werden

Technical Barriers and Emplacement Technology for High P/T conditions (Technische Barrieren, Einbringungs-technologie bei hohen Temperaturen und hohen Drücken)
Canisters, Filling, Integrity, Capacity, Back-fill material, Plugging, Segmentation, Thermal loading limits

Vorträge:

Tim Vietor, NAGRA: Multiple barrier concept for high level waste repository in Switzerland. Scientific basis and demonstration. (Multibarrierenkonzept für die Endlagerung hochradioaktiven Abfalls in der Schweiz - wiss. Grundlagen und Demovorhaben)

Reinhold Graf, GNS: Status of Cask Concepts for Disposal of SF in Germanys (Behälterkonzepte für die Lagerung von radioaktivem Abfall in Deutschland)

Inhalt der Vorträge und Diskussionen:

- Die Möglichkeiten für die geologische Tiefenlagerung in einer intakten Tonschicht wurden von der NAGRA anhand eines konventionellen Tiefenlagerkonzeptes (mined repository) demonstriert.
- Ein aktuelles Projekt zur maßstabsgetreuen Einlagerung von wärmeentwickelnden Behältern und deren Einbettung in eine Kaverne wurde gezeigt.
- Der Status der Endlagersuche, die Zeitplanung und angelegte Kriterien wurden diskutiert.
- Aus der Zusammensetzung der Wässer in den Tonen kann auf die Dichtigkeit der Barrieren geschlossen werden. Die Mobilität der Radionuklide ist diffusionskontrolliert. Bei einem sicheren Einschluss sind die so überprüften Diffusionskonstanten maßgeblich, da das Gestein selbstabdichtende Eigenschaften besitzt.
- Die Einbindung von Bürgern in den Prozess und deren Rolle im Entscheidungsprozess wurde dargelegt. Das Vertrauen in die im Prozess handelnden Akteure wurde als wichtige Randbedingung für die Akzeptanz angesehen.
- Demonstriert wurden der Stand der Behälterentwicklung sowie die Entwicklung und der bisherige Einsatz der Behälter.
- Vorgestellt wurde zudem die Entwicklung der Komponenten (z.B. Winden und Kabel), die für das Einbringen der BSK3 Behälter in 300 m tiefe Bohrungen notwendig sind und die bereits seit den Jahren 1987 bzw. 1997 entwickelt bzw. getestet wurden, sowie das DIREGT Konzept für die Endlagerung in Castor-Behältern.
- Die der Pilotanlage in Gorleben zur Umkonditionierung der radioaktiven Abfälle für Pollux Container ist beispielhaft für entsprechende Anlagen, die radioaktive Abfälle in kleinere Container einschließen können. Für den Fall einer Bohrlocheinlagerung ist abhängig vom Bohrlochdurchmesser und Behältertyp von einer höheren Behälteranzahl auszugehen. Aufgrund des erhöhten Außendrucks im tiefen Untergrund müssten die Behältern für höhere Drücke ausgelegt sein.
- Die verglasten radioaktiven Abfälle können nicht mehr neu konditioniert werden sondern nur in neue Behälter (z. B. BSK 3) verpackt werden. Für deren Einlagerung wären Bohrungen mit einem Durchmesser von ca. 60 cm Ø notwendig.

Recovery (Rückholung/Bergung) und Abandonment (Stilllegung)

Vorträge:

Bernhard Prevedel (GFZ): Brief Overview Fishing Technology (Kurzer Überblick zu Bergungsmöglichkeiten aus tiefen Bohrlöchern)

Dr. Karl Travis (University of Sheffield): Deep Borehole Disposal Research at the University of Sheffield (Untersuchungen zur Tiefen Bohrlochlagerung an der Universität Sheffield) anstelle des kurzfristig ausgefallenen Vortrages von *Matthias Gruner/Wolfram Kudla/Helmut Mischo, TU Freiberg* zum Abandonment

Inhalt der Vorträge und Diskussionen:

- Dargestellt wurde der Stand der Technik zum kontrollierten Ein- und Ausbau von Messsonden – welcher für tief liegende Monitoring-Sonden routinemäßig durchgeführt wird.
- für den Fall von einem Verlust von Komponenten z. B. Bohrgestänge und Logging-Tools aus tiefen und geneigten Bohrungen wurden verschiedene Technologien, die vor allem beim Bohrprozess vorkommen (Fishing), vorgestellt.
- Es existiert ein breites Spektrum an Tools, die beim Fishing zum Einsatz kommen können.
- Selbst bei einem Totalverlust einer Bohrung (z.B. bei Öl & Gas Bohrungen), auch in großer Tiefe und komplexen Randbedingungen (z.B. off-shore), kann durch die heutige Richtbohrtechnik das Bohrloch kontrolliert gesichert/verschlossen und sogar weiter genutzt werden (von außen das alte Bohrloch angebohrt werden). Unter diesen Voraussetzungen ist auch ein Wiederfinden und Anfahren von „alten“ und tiefen Entsorgungslokalationen zur sicheren Bergung der Container schon heute als realistisches Szenario anzusehen.
- Vorgestellt wurden die Voruntersuchungen für die Tiefbohrlagerung der sogenannten Hanford Capsules. Die Forschergruppe um Karl Travis und Fergus Gibb sehen in der Tiefbohrlagerung insbesondere für radioaktive Abfälle mit vergleichsweise kurzlebigen Radionukliden ein großes Potenzial. Sie werden 2016 eine Versuchsbohrung zu ihrem speziellen Konzept durchführen, bei der keine Rückholbarkeit/Bergbarkeit vorgesehen ist. Dabei sollen verschiedene Verfahren, die sich noch in der Entwicklung befinden, getestet werden.

Hydro-geochemistry (Hydrogeochemie), Radionuclide mobility (Mobility der Radionuklide), Migration at P&T (Migration bei hohen Drücken und hoher Temperatur), Robust monitoring technology (Monitoringtechnologie), Nuclear Safeguards (Sicherheitsvorkehrungen)

Vorträge:

Bernhard Prevedel (GFZ): Logging Tools Overview (Messverfahren in Tiefbohrungen)

Thorsten Schäfer/Bernhard Kienzler (KIT): Conceptual ideas about the radio-geochemical monitoring during the operational phase (Konzeptionelle Ideen für das radio-geochemische Monitoring in der Betriebsphase)

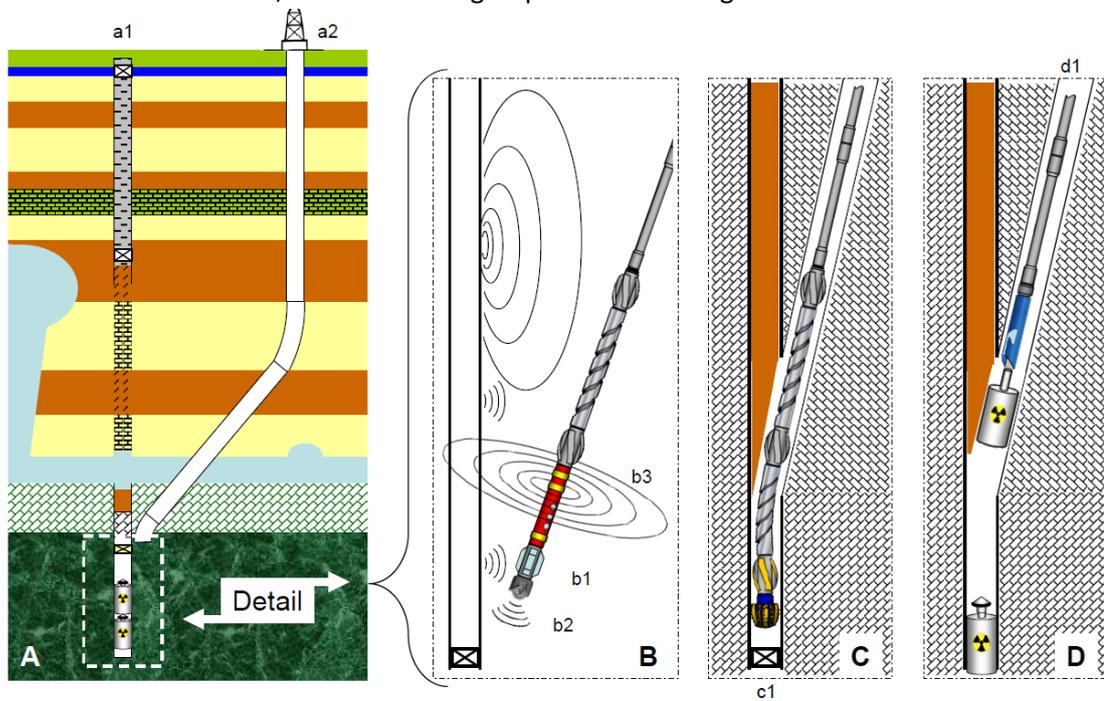
Florian Eichinger (Hydroisotop): Diffusion of dissolved constituents in low permeable bedrock within the nuclear waste deposition in deep boreholes (Diffusion von gelösten Inhaltsstoffen in wenig durchlässigem Gestein bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern)

Broder Merkel, TU Freiberg: Thermodynamic data for the range 0 to 300°C and 1 to 80 MPa (Thermodynamische Daten für den Bereich 0 bis 300°C und 1 bis 80 MPa)

Inhalt der Vorträge und Diskussionen:

- In der Erdöl/Erdgasindustrie steht ein großes Spektrum an Messgeräten (Logging Tools) auch für hohe Druck- und Temperaturbereiche (auch > 200°C) kommerziell zur Verfügung. Diese nutzen unterschiedliche physikalische Prinzipien oder dienen zur *in-situ* Beprobung.
- Für unterschiedliche Eindringtiefen werden unterschiedliche Logging Tools verwendet, diese können z.B. über die Porosität, die Art der Porenfüllung, die Dichte des Gesteins, Mineralzusammensetzung, Klüftigkeit, das Spannungsfeld im nahen und fernen Umfeld der Bohrung Aussagen liefern.
- Diese Technologie wird auch in Deutschland für den Weltmarkt entwickelt und gefertigt.
- Die Standard-Logging-Geräte sind für Bohrungen von 12.25 und 17 inch Durchmesser vorhanden. Für größere Durchmesser gibt es momentan noch nicht alle Messgeräte. Dies liegt am bisherigen Bedarf. Die Adaption aller Tools für größere Durchmesser ist mit geringem maschinentechnischen Aufwand möglich („geometrische Anpassung“).
- Für die Charakterisierung der umgebenen Gesteinsformationen (z.B. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) befinden sich Tools mit größeren Eindringtiefen und höherer vertikaler Auflösungen in Entwicklung wie z.B. das SPWD-Tool des GFZ (Seismic-Prediction-While-Drilling mit einer Eindringtiefe von bis zu 200 m Umkreisradius und einer Messwertauflösung im Zentimeterbereich).
- Der Stand des (radio-)geochemischen Monitorings und die damit beobachtbaren Prozesse wurden vorgestellt. Für Tiefbohrungen ist z. B. notwendig die möglichen Reaktionen der Bohrspülung mit Radionukliden und Behältern zu untersuchen.
- Dargestellt wurden Laboruntersuchungen als auch *in situ* Experimente z. B. zur Quantifizierung von Transporteigenschaften in den Wirtsgesteinen gegenüber natürlichen als auch künstlichen Tracern, um die Retardationseigenschaften der anvisierten Wirtsgesteine zu quantifizieren.
- Für die Überwachung der Bohrungen wurde vorgeschlagen, ein Monitoring des He^3/He^4 Verhältnisses als Indikator für das Versagen der Container zu nutzen. In der Diskussion wurden verschiedene weitere gasförmige Tracer angesprochen, die genutzt werden könnten.

- Durch die Herausforderung, den Eintrag von Radionukliden in die Biosphäre für Zeiträume von mehreren Hunderttausenden von Jahren zu vermeiden, ist die Rekonstruktion der palaeohydrogeologischen Geschichte von Untersuchungsgebieten notwendig.
- Vorgeschlagen wurde das Bohren mit getracierter Bohrspülung, um Einflüsse von Druckentlastung und des Bohrprozesses auf die petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine quantifizieren zu können.
- Die Teilnehmer am Workshop waren sich einig, dass Diffusion ein wesentlicher Transportprozess für den Transport von Radionukliden in den verschiedenen diskutierten Einlagerungsbedingungen im Untergrund darstellt.
- Gefordert wurde das Gewinnen von hochqualitativen Bohrkernen für Laborversuche zur Bestimmung der Transporteigenschaften von Gesteinen. Die Teilnehmer des Workshops wiesen auch auf die Bedeutung der Beprobungsstrategie von Grundwasser hin (u. a. Klüfte, Porenraum, Porenfluide, Porendruck). Von Seiten der Vertreter der Industrie wurde angeführt, dass entsprechende Probennahmetools bereits existieren und eingesetzt werden. Inwieweit diese Tools für die zu erwartenden geringen Wassermengen geeignet sind, ist zu prüfen.
- Konsens bestand darin, dass Monitoring zu potenziellen Wegsamkeiten führen kann.



Graphic: B. Prevedel – GFZ Potsdam

Abb. 2: Auffinden einer permanent verschlossenen Endlagerbohrung (a1) durch eine Bergungsbohrung (a2), vergleichbar einer Entlastungsbohrung in der Öl & Gas Industrie zur untertägigen Reparatur von Blow-out Havarien (A). In unmittelbarer Nähe zur Endlagerkammer erfolgt die exakte Ortung dieser, mit Stahl-Casing verrohrten, Bohrlochsektion mittels akustischer (b1) und elektrischer Messverfahren (b2) während des Bohrens (B). Danach erfolgt das Auffahren der Futterrohre im Deckgebirge mittels einer Fräsgarnitur und Einfädeln der neuen Bergungsbohrung in die alte Endlagerbohrung oberhalb der Container (C), gefolgt von einer Aufwältigung bis zum mechanischen Verschluss (c1) oberhalb der Endlagerkammer. Öffnen und Ziehen des Verschlussmechanismus und Einfahren einer Fanggarnitur (d1) zur Bergung der Container durch die Bergungsbohrung nach Obertage (D).