

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 108 (1990)
Heft: 3

Artikel: Entsorgung radioaktiver Abfälle: ausgewählte Aspekte der Projektarbeiten der Nagra
Autor: Knecht, B.E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77348>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mangelware geworden. Hohe spezifische Anforderungen sind aber häufig und häufiger. Es gehört ganz speziell zum Rüstzeug des Grundbauers, die Anforderungen an sein Material vollumfänglich zu erfassen, auf diese einzugehen und die Eigenschaften des Materials auszunutzen. Die Verbesserung, die «Brauchbarmachung» bestehender Materialien mit mechanischen Mitteln, durch Verdichten, Stabilisieren, Entwässern, Verfestigen erspart – richtig eingesetzt – Kosten und bewahrt vor Schäden. Die zweckmässigen Laboruntersuchungen, ausgeklügelte Fundierungen und ergebnisträchtige Messungen richtig einzusetzen, verlangt viel Wissen und «Gespür», – in vielen Fällen auch Kreativität, wenn beispielsweise weder Instrumente noch Methoden bekannt sind und solche erst entwickelt werden müssen. Alle diese Teilelemente sind Mittel und Werkzeuge des Grundbauers.

Die Probleme sind natürlich nie alle gelöst. Die Natur bewegt sich, die Berge und Hänge – so schön sie auch sind – bewegen sich, fallen, gleiten, rutschen zu Tal und mit ihnen die Verkehrsanlagen. Wir können uns an der Natur nicht nur freuen, so gern wir das heute fast alle tun; wir müssen uns auch gegen sie wehren. Es ist eine Frage der Bodenmechanik und der Kunst des Grundbaues, die natürliche Zerstörung der Anlagen zu verhindern oder wenigstens so lange als möglich hinauszuschieben. Die Ver-

kehrslasten nehmen zu, nicht ihre spezifische Grösse – die Achslast wollen wir nicht verändern –, aber ihre Anzahl und Häufigkeit, ihre Dynamik und ihre Verteilung über Tages- und Jahresablauf bei Sommer- und Winterwetter. Erschütterungen und deren Ausbreitungen lassen die Böden und Erdmaterialien nicht mehr unberührt. Die beinahe krankhafte Forderung nach unterirdischen Strassen- und Bahnführungen, Park- und Lagerräumen, auch für wirklich sinnvolle und nötige Verkehrsanlagen – andere wollen wir ja gar nicht mehr bauen – beschert uns Millionen von Kubikmetern Schüttmaterial. Es ist eine Aufgabe für die Bodenmechanik und den Grundbau herauszufinden, wozu und wie diese Ausbruchmaterialien verwendet werden könnten, auch wenn sie beispielsweise vom maschinellen Tunnelbau herstammen.

Auf der Kehrseite unserer Zivilisationsmedaille werden Tausende von Kubikmetern Abfall produziert. Diese Berge sind so zu versorgen, dass sie niemals das Grundwasser, die Umwelt, den Menschen, die Pflanzen und die Tiere gefährden. Es sind wiederum die Fachleute der Bodenmechanik und des Grundbaus, die uns sagen sollten, was der Untergrund verträgt, was wir tun können und was nicht, und wie man Deponien «baut» – wahrlich Neuland für herausfordernde Forschungsgebiete und Neuentwicklungen.

Für jeden Betreiber oder Besitzer einer Verkehrsanlage gibt es einen wichtigen Wunsch oder auch einen Alptraum. Man sollte rechtzeitig, frühzeitig, zum voraus an kleinen, aber klaren Zeichen erkennen können, wenn ein Schaden am Bauwerk bevorsteht. Der Grundbau, die Erdbaumechanik, die Messtechnik oder die Überwachung sollte es möglich machen, das Kommen, das Eintreffen eines Ereignisses, eines Rutschens, eines Einbruchs, eines Einsturzes frühzeitig festzustellen. Keine unvorhersehbare Veränderung, keine «Sprödbrüche», kein Grundbruch an den vom Menschen hergestellten Bauwerken – Damm, Böschungen, Baugruben, Fundation – sollten mehr überraschend eintreten. Der Grundbau und die Bodenmechanik bilden hierzu ein unerschöpfliches, äusserst spannendes und interessantes Arbeitsgebiet.

Ich wünsche Herrn Professor Lang viel Gesundheit und Tatendrang, um auch weiterhin seinem Institut mit Freude und Lust vorzustehen und noch viele junge Bauingenieure in seiner packenden menschlichen Art in die Geheimnisse des Grundbaues und der Erdbaumechanik einzuführen. Zu seinem jugendlichen 60. Geburtstag meine allerherzlichsten Glückwünsche!

K. Suter,
Direktor des Bundesamtes für
Strassenbau, Bern

Entsorgung radioaktiver Abfälle

Ausgewählte Aspekte der Projektarbeiten der Nagra

Die umweltgerechte Entsorgung unserer Abfälle ist ein bedeutendes umweltpolitisches Anliegen. Von den in der Schweiz jährlich anfallenden rund 300 000 Tonnen an gefährlichen Sonderabfällen machen die radioaktiven Abfälle weniger als 1 Prozent aus. Dennoch nehmen sie eine Sonderstellung ein: Ihre Entsorgung wird durch Bundesgesetze geregelt und untersteht den strengen Sicherheitsanforderungen der Kernenergietechnik.

Im folgenden werden die bisherigen Arbeiten der Nagra und ihre heutigen Aufgaben auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle zusammengefasst. Eingebettet in dieser Übersicht sind detailliertere Angaben über die Untersuchungen von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial, welche am Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IBG) der ETH Zürich unter Leitung von Professor H.J. Lang durchgeführt wurden bzw. noch in Bearbeitung sind.

Das Projekt Gewähr 1985

Anfang 1985 hat die Nagra bei den Bundesbehörden das Projekt Gewähr (PG 85) [1] eingereicht, welches ein Endla-

ger (EL) für schwach-/mittelaktive (SMA) sowie eines für hochradioaktive Abfälle (HAA) umfasst. Aus der Wiederaufarbeitung stammende langlebige α -haltige Abfälle (LMA) wurden aus Konservativitätsgründen sowohl im

Endlager SMA wie HAA integriert. Beim EL-SMA ist ein horizontaler Zugang zu den in einem Berg liegenden Endlagerkavernen geplant, während die Lagerstollen für HAA über zwei Vertikalschächte erschlossen werden. Mit der umfassenden Arbeit zum PG 85 ist die Nagra der politischen Forderung nachgekommen, Wege und Lösungen aufzuzeigen, wie radioaktive

**VON BERNARD E. KNECHT
UND ANDREAS L. NOLD,
BADEN**

Abfälle in der Schweiz entsorgt werden könnten. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Sicherheitsanalysen hatten sich auf konkrete Bauprojekte und z.B. durch Bohrungen belegte geologische und hydrogeologische Verhältnisse sowie auf Resultate verschiedenster Laboruntersuchungen abzustützen. Von diesen Untersuchungen sollen insbesondere jene über die An-

wendung von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial, die am Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der ETH Zürich durchgeführt wurden, im Rahmen dieses Beitrages auszugsweise dargestellt werden.

Beim PG 85 lag das Schwergewicht auf dem Machbarkeitsnachweis. Optimierungen beispielsweise bezüglich Kosten waren von untergeordneter Bedeutung. Zum Beispiel wurde eine Anordnung der Abfallbehälter im Endlager für HAA gewählt, welche zwar technisch möglich, von der Wirtschaftlichkeit her gesehen jedoch noch verschiedene Fragen offen lässt, welche aber den Nachweis der sicheren Endlagerung mit verhältnismässig einfachen Berechnungen ermöglichte (Bild 1): Dickwandige Endlagerbehälter aus Stahlguss, welche verglasten hochaktiven Abfall aus der Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente enthalten, sind in Längsrichtung in den Endlagertunnels orientiert; der Raum zwischen den Behältern und der Tunnelwand wird mit hochverdichteten Bentonitblöcken verfüllt. Diese Blöcke bilden einen hervorragenden mechanischen, hydraulischen und chemischen Puffer zwischen dem Abfall und dem Wirtsgestein. Das Material Bentonit wurde aufgrund seiner sehr günstigen Eigenschaften gewählt, welche im Rahmen von eingehenden Untersuchungen in der Schweiz am IGB wie auch im Ausland nachgewiesen werden konnten.

Eigenschaften von Bentonit als Verfüllmaterial

Die wichtigste Aufgabe der Verfüllung der Endlagerstollen im Nahfeld besteht darin, den Transport von Wasser mit gelösten Stoffen, insbesondere Radionukliden, möglichst zu verlangsamen. In dieser Hinsicht weist Bentonit, insbesondere in der hochkomprimierten Form, sehr günstige Eigenschaften auf: Seine hydraulische Leitfähigkeit liegt unterhalb 10^{-13} m/s, entsprechend einer Fließgeschwindigkeit von nur einigen Metern in einer Million Jahren bei einem hydraulischen Gradienten von 1. Dazu bewirkt die Diffusivität des Bentonits für gelöste Ionen durch die Bentonitbarriere, typischerweise 10^{-12} m/s [2], für viele wichtige Radionuklide eine Durchbruchzeit der Größenordnung von 10 000–100 000 Jahren beim Referenzkonzept von Projekt Gewähr.

Die obigen Betrachtungen gehen davon aus, dass die Kennwerte, welche heute im Labor gemessen werden, auch über geologische Zeiträume erhalten bleiben. In dieser Hinsicht ist die Tatsache,

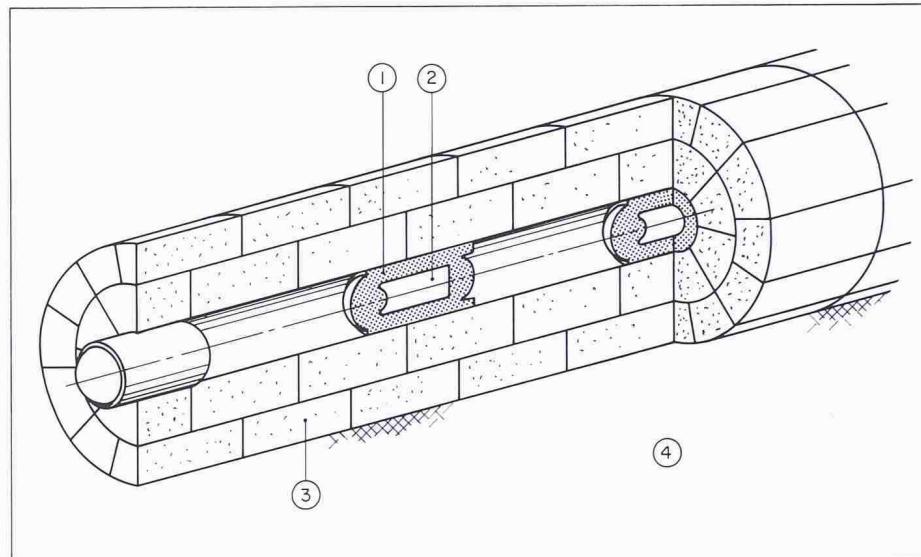


Bild 1. Das System der technischen Barrieren im Nahfeld gemäss dem Konzept von Projekt Gewähr: (1) Verglaster Abfall; (2) Endlagerbehälter aus Stahlguss; (3) Blöcke aus hochkomprimiertem Bentonit als Verfüllung der Stollen zwischen dem Behälter und dem Wirtsgestein (4)

dass Bentonit ein natürliches Material ist, das über Millionen von Jahren stabil bleiben kann, von grosser Bedeutung. Wie detaillierte Untersuchungen am IGB zeigen [3], haben gewisse über 450 Mio. Jahre alte Bentonite ihre günstigen Eigenschaften hinsichtlich Endlagerung behalten.

Neben seiner Wirkung als hydraulisches Puffermaterial und Hindernis zur Diffusion und zum Transport von Radionukliden bildet der Bentonit eine chemische Pufferzone zwischen dem Abfall und dem Wirtsgestein, in welcher der Säuregrad einen konstanten pH-Wert von etwa 9 beträgt. Unter solchen Bedingungen wird die Löslichkeit von vielen Radionukliden auf einem tiefen Niveau konstant gehalten.

Von Bedeutung ist auch die Wirkung von Bentonit als mechanischer Puffer, welche der Plastizität dieses Materials zu verdanken ist: Durch die (allerdings sehr langsame) Bewegung des Wassers zwischen den Tonplättchen stellt sich – unter dem Einfluss mechanischer Kräfte und Differenzen im Wassergehalt – ein homogenes Spannungsfeld ein; zudem schliessen sich allfällige, durch tektonische Bewegungen oder anderweitig verursachte Risse, so dass die Homogenität des Materials erhalten bleibt und keine bevorzugten Wasserwege entstehen können.

Von Bedeutung für die Auslegung der Endlagerbehälter ist der Quelldruck, welcher vom Bentonit auf den Endlagerbehälter und das Wirtsgestein ausgeübt wird. Zur Beschaffung der Grundlagen wurden umfangreiche Quelldruckuntersuchungen im Labor des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) durchgeführt. Dabei

wurden Parameter wie Bentonitart, Einbaudichte, Volumendeforrmation, Wasserart und Wasserdruck untersucht [4]. Es zeigte sich, dass die sogenannte reduzierte Trockendichte (d.h. die Enddichte des Bentonits, nachdem alle Fugen und Spalten durch die Quellung gefüllt wurden) der wichtigste Parameter für die Quelldrücke ist (Bild 2). Im

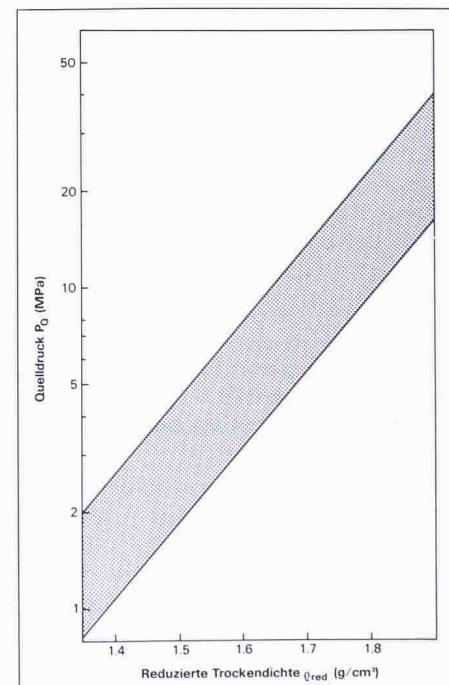


Bild 2. Der Verlauf des Quelldrucks P_Q von hochkomprimiertem Bentonit in Abhängigkeit der sogenannten reduzierten Trockendichte q_{red} (d.h. der Enddichte des Bentonits, nachdem alle Fugen und Spalten durch die Quellung gefüllt wurden). Die schraffierte Fläche zeigt die durch die Messgenauigkeit, die Qualitätsschwankungen und die Temperatur bedingte Bandbreite

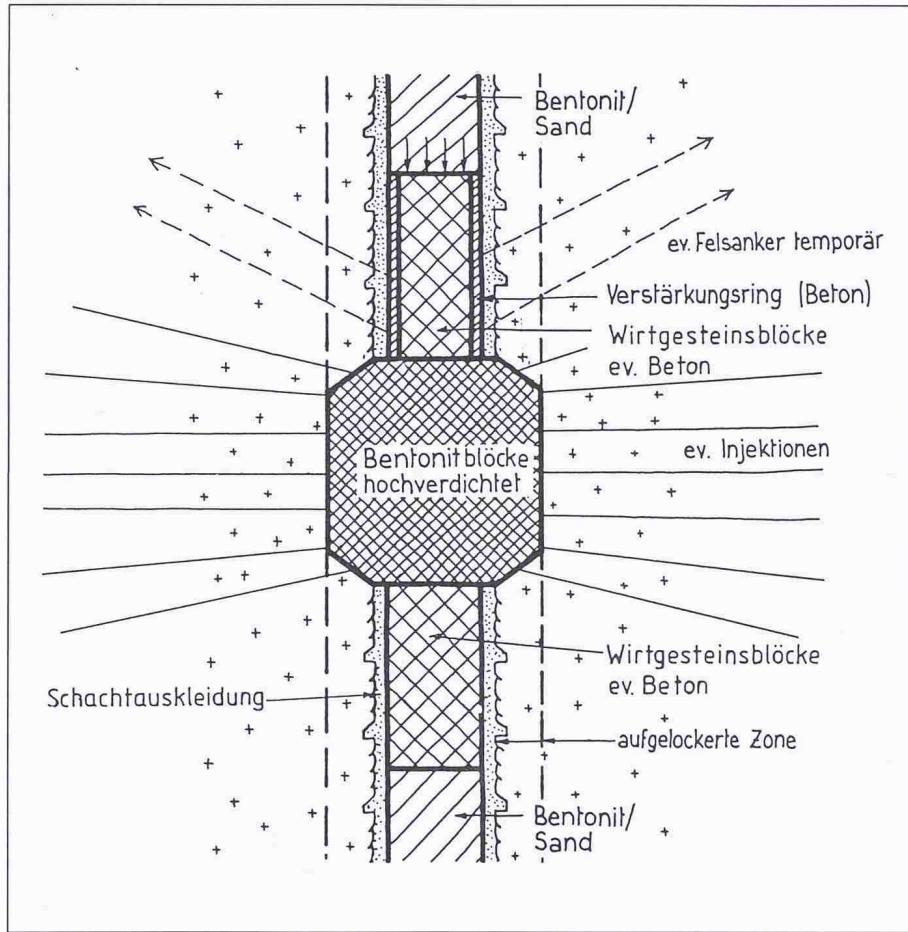


Bild 3. Mögliches Konzept für die Versiegelung einer Schlüsselzone im Schacht eines Endlagers für hochaktive Abfälle

Rahmen dieser Untersuchungen wurden Beobachtungen gemacht, welche gegenüber dem in der Bodenmechanik allgemein verwendeten Gesetz der effektiven Spannungen in Widerspruch stehen. Eine Erklärung für diese Erscheinung bedarf noch weiterer experimenteller und theoretischer Abklärungen.

ste Prinzipvorschläge für die Gestaltung solcher Versiegelungen gemacht [5]. Im Rahmen des internationalen Stripa-Projektes in Schweden, an welchem auch die Schweiz beteiligt ist, wurden zudem Versuche durchgeführt, welche die grundsätzliche Machbarkeit und Funktionsfähigkeit von Versiegelungen in kristallinem Gestein auf der Basis von Bentonit nachgewiesen haben [6].

Versiegelung von Stollen und Schächten mit hochkompaktiertem Bentonit

Bentonit findet nicht nur in der unmittelbaren Nähe des Abfalles in den Endlagerstollen Anwendung. Es soll auch sichergestellt werden, dass die Stollen und/oder Schächte, welche den Endlagerbereich mit der Erdoberfläche verbinden, nach dem Verschluss des Endlagers keinen bevorzugten Weg für den Transport von Wasser und Radionukliden darstellen. Dank seinem Quelldruck, seiner Plastizität und seiner äusserst niedrigen hydraulischen Leitfähigkeit ist Bentonit auch in diesem Zusammenhang ein bevorzugtes Material für hochwertige Versiegelungen dieser Stollen oder Schächte an strategischen Stellen, an sogenannten Schlüsselzonen. Im Rahmen des PG 85 wurden er-

Die Beurteilung des Projektes Gewähr 85

Die Berichte zum Projekt Gewähr wurden in der Zeit von 1985–88 verschiedenen Spezialisten und Experten im In- und Ausland zur Stellungnahme vorgelegt; es fand zudem eine intensive Begutachtung des Projektes durch die Sicherheitsbehörden des Bundes statt. Gestützt darauf fasste der Bundesrat seinen Entscheid vom 3. Juni 1988, in dem folgendes festgestellt wurde:

□ Der Entsorgungsnachweis für schwach- und mittelaktive Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Kernkraftwerke sowie aus dem Bereich ausserhalb der Kernenergienutzung ist erbracht.

□ Der Sicherheitsnachweis für hochaktive Abfälle und für langlebige alpha-haltige Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ist ebenfalls erbracht. Noch nicht erbracht ist dagegen der Standortnachweis für diese Abfälle, d.h. der Nachweis von genügend ausgedehnten Gesteinskörpern mit den erforderlichen Eigenschaften.

Aus bautechnischer Sicht bestehen keine Bedenken gegen die Erstellung des Endlagers. Gegen die Auslegung des Nahfeldes, insbesondere die Handhabung und die sicherheitstechnischen Vorteile des Bentonits, wurden keine Einwände eingebracht.

Bis zum Entscheid des Bundesrates über den Standortnachweis bleiben die Betriebsbewilligungen der bestehenden Kernkraftwerke in Kraft. Die Bewilligungsinhaber haben die Forschungsarbeiten im Hinblick auf eine Endlagerung der radioaktiven Abfälle weiterzuführen. Die Forschungsarbeiten bezüglich der hochaktiven und langlebigen, mittelaktiven Abfälle sind auf nichtkristalline Wirtgesteine (Sedimente) auszudehnen.

Trotz einer harten Interpretation der Projektanforderungen hat der Bundesrat mit seinem Entscheid anerkannt, dass die Machbarkeit einer sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle grundsätzlich nachgewiesen wurde. Bei den kurzlebigen schwach- und mittelaktiven Abfällen bedeutet der vorbehaltlos positive Entscheid grünes Licht für die Fortführung der Arbeiten zur Realisierung eines entsprechenden Endlagers. Die bundesrätliche Auflage, bei den hochaktiven Abfällen die erdwissenschaftlichen Untersuchungen zur Standortwahl weiterzuführen, entspricht der mittelfristigen Arbeitsplanung der Nagra.

In der Zwischenzeit durchgeführte Arbeiten

Von 1985–88 wurden die Methoden der Sicherheitsanalyse weiterentwickelt, das Abfallinventar nachgeführt und die Arbeiten zur Qualitätssicherung konkretisiert. Ferner wurden verschiedene Messverfahren für erdwissenschaftliche Standortuntersuchungen weiterentwickelt und im Felslabor auf der Grimsel getestet sowie die Beteiligung an internationalen Forschungsprogrammen fortgeführt.

An den potentiellen Lagerstandorten für ein EL-SMA konnte am Oberbauensteinstock (UR) und Piz Pian Grand (GR) eine erste Untersuchungsphase abgeschlossen, am Bois de la Glaive (VD) – infolge politisch motiviertem Wider-

stand der Gemeinde – erst zu einem kleinen Teil ausgeführt werden. Ausschlussgründe wurden an keinem der Standorte vorgefunden. Der Abschlussbericht über die Arbeiten der Phase I konnte im Herbst 1988 den Bundesbehörden übergeben werden.

Zusätzlich und unabhängig von den übrigen Standorten erfolgte die Wahl des Wellenbergs (NW) zur Erweiterung der Standortauswahl für SMA und der Option, am gleichen Ort auch LMA zu lagern. Am 31. August 1988 bewilligte der Bundesrat die etappenweise Durchführung der Sondierarbeiten, welche SMA betreffen.

Bei den Arbeiten zur Endlagerung von HAA wurden die Arbeiten zur Interpretation und Synthese aus den bisherigen Felduntersuchungen im Kristallin weitergeführt und die Tiefbohrung Sibblingen realisiert. Mit einer breit abgestützten Studie wurden der Opalinuston und die Untere Süsswassermolasse als potentielle Wirtgesteine identifiziert und damit zwei sedimentäre Formationen in unsere weitere Bearbeitung aufgenommen. Der diesbezügliche Bericht ist den Bundesbehörden ebenfalls im Herbst 1988 eingereicht worden.

Bei der Endlagerprojektierung sind aufgrund der Erkenntnisse aus dem PG 85 sowie der Resultate aus den weitergeführten Feld- und Laboruntersuchungen sowie Sicherheitsanalysen im Sinne eines weiteren Iterationsschrittes die Konzepte sowohl für ein Endlager SMA wie HAA angepasst worden.

Am hochkompaktierten Bentonit wurden durch das Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der ETH-Zürich ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Insbesondere wurden in Versuchen in einem Modellmassstab 1:20 die Wasseraufnahme durch Diffusion, die dabei sich aufbauenden Quelldrücke [7] und der Einfluss des Temperaturgradienten auf die Wasseraufnahme untersucht. Auch war der Einfluss

von Eisenionen (zum Beispiel infolge korrodierender Stahlbehälter) auf den Bentonit Gegenstand umfangreicher tonmineralogischer Abklärungen [8].

Mittelfristige Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte

Mit erster Priorität sind die Arbeiten zur Realisierung eines Endlagers SMA weiterzuführen. Die Inbetriebnahme eines solchen Endlagers soll noch vor Ablauf dieses Jahrhunderts erfolgen.

Mit zweiter Priorität soll für LMA und HAA ein Standort bestimmt und soweit charakterisiert werden, dass ausführungsreife Projekte erstellt werden können.

Die Aufgaben, welche mittelfristig zur Erreichung dieser Ziele notwendig sind, lassen sich in folgende fünf Gruppen zusammenfassen:

- Erhebung von Daten für die Standortcharakterisierung, soweit sie für die Standortwahl und die Sicherheitsanalysen sowie die Projektierung benötigt werden.
- Konkretisierung der technischen Konzepte zur Gestaltung der Endlagersysteme und Auslegung der künstlichen Barrieren.
- Schliessung einiger bekannter Lücken in der Datenbasis und der Methodik zur Analyse des Verhaltens der Endlagersysteme
- Weitere Verifizierung und Validierung der Daten und Modelle der Sicherheitsanalysen.
- Abfallcharakterisierung und Erarbeitung von Abfallspezifikationen sowie deren laufende Kontrolle im Hinblick auf die Realisierung der Lagerprojekte.

Neben der technischen Arbeit zur Erreichung der vorgegebenen Ziele ist der Bau eines schweizerischen Endlagers aber letztlich nur möglich, wenn sich

Literatur

- [1] Nagra: Projekt Gewähr, Technische Berichte NGB 85-01 bis 85-09, Baden, Nagra, 1985
- [2] G. Kahr, R. Hasenpatt, M. Müller-Vonmoos: Ionendiffusion in hochverdichtetem Bentonit, Technischer Bericht NTB 85-23, Baden, Nagra, 1985
- [3] M. Müller-Vonmoos, G. Kahr: Langzeitstabilität von Bentonit unter Endlagerbedingungen, Technischer Bericht NTB 85-25, Baden, Nagra, 1985
- [4] F. Bucher, U. Spiegel: Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten, Technischer Bericht NTB 84-18, Baden, Nagra, 1984
- [5] J. Studer, W. Ammann, P. Meier, Ch. Müller, E. Glauser: Verfüllen und Versiegeln von Stollen, Schächten und Bohrlöchern, Technischer Bericht NTB 84-33, Baden, Nagra, 1984
- [6] R. Pusch, L. Börgessen, G. Ramqvist: Final Report of the Borehole Shaft and Tunnel Sealing Test, Technische Berichte NTB 87-25, 87-26, 87-27, Baden, Nagra, 1987
- [7] F. Bucher, M. Müller-Vonmoos: Bentonit als technische Barriere bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, in Mitteilung Nr. 133 des IGB, Zürich, 1988
- [8] M. Müller-Vonmoos et al.: Bentonit unter Endlagerbedingungen in Kontakt mit Magnetit und Eisen, Technischer Bericht Nagra (in Vorbereitung)

die politische Einsicht und das Verständnis durchsetzen, dass wir das auch tun müssen.

Adresse des Verfassers: Dr. B.E. Knecht, dipl. Physiker, und A.L. Nold, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Nagra, Parkstrasse 23, 5401 Baden.