

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Beratungsunterlage zu TOP 3

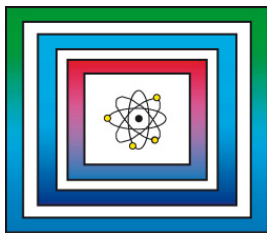
der 6. Sitzung

Zusammenfassung des Kurzvortrags
von Prof. Dr. Hans-Joachim Kümpel

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. 78
--

Wirtsgesteine und geowissenschaftliche Kriterien in internationalen Endlagerkonzepten

Vortrag für die Anhörung in der
6. Sitzung der Kommission
„Lagerung hoch radioaktiver Abfälle“
am 05.12.2014



Hannover, Dezember 2014

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Wirtsgesteine und geowissenschaftliche Kriterien in internationalen
Endlagerkonzepten

Vortrag für die Anhörung in der
6. Sitzung der Kommission
„Lagerung hoch radioaktiver Abfälle“
am 05.12.2014

Prof. Dr. Hans-Joachim Kümpel

Geschäftszeichen:

B3/B50100-09/2014-0002/006

Datum:

05.12.2014

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Betrachtete Wirtsgesteine international „Folie 1“	3
2 Internationale Zusammenarbeit „Folie 2“	3
3 Warum forscht die BGR in Felslabors? „Folie 3“	4
4 Eigenschaften der Wirtsgesteine „Folie 4“	6
5 Geowissenschaftliche Kriterien im StandAG „Folie 5“	7
6 Geowissenschaftliche Kriterien nach AkEnd „Folie 6“	7
7 Geowissenschaftliche Auswahlkriterien in der Schweiz „Folie 7“	8
8 Geowissenschaftliche Auswahlkriterien im Vergleich „Folie 8“	9
9 Ausschlusskriterien nach AkEnd „Folie 9“	10
10 Kriterien in der Praxis: Seismische Aktivität „Folie 10“	11
11 Kriterien in der Praxis: Permeabilität „Folie 11“	11
12 Fazit „Folie 12“	12
Literaturverzeichnis	13
Anhangverzeichnis	16

Gesamtblattzahl: 22

1 Betrachtete Wirtsgesteine international [„Folie 1“](#)

Der langzeitsichere Einschluss hoch radioaktiver Abfälle in einem Endlager und ihre Isolation von der Biosphäre werden in den internationalen Konzepten durch ein Multibarrierensystem gewährleistet. Dieses besteht grundsätzlich aus geologischen und technischen Barrieren. Der Geologie kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu, denn die Voraussetzung für einen geeigneten Endlagerstandort ist in erster Linie eine günstige geologische Gesamtsituation mit einer geeigneten geologischen Barriere. Ihre Wirksamkeit wird durch an sie angepasste technische und geotechnische Komponenten (einerseits Behälter, andererseits Versatz, z. B. Bentonit) im Gesamtbarrierensystem ergänzt (BGR 2007).

In den internationalen Endlagerkonzepten werden als geologische Barrieren (Wirtsgestein) vor allem Steinsalz, Tonstein und Kristallin untersucht. Der Begriff „Kristallin“ wird in der Endlagerung als Synonym für magmatische oder hochmetamorphe Gesteine alumosilikatischer Zusammensetzung verwendet (z. B. Granite, Gneise, Basalt). Vorwiegend aus Kristallen zusammengesetzte Gesteine, wie z. B. Salz- oder Anhydritgesteine, werden nicht darunter verstanden.

International wird die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen priorisiert. Alternativ werden oberirdische Zwischenlager für 60 bis 100 Jahre betrieben (Spanien, Niederlande).

International werden Tonstein, Steinsalz und Kristallin als mögliche Wirtsgesteine untersucht.

2 Internationale Zusammenarbeit [„Folie 2“](#)

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) deckt bei ihrer Beratungstätigkeit für die Bundesressorts die gesamte fachliche Breite der Angewandten Geowissenschaften ab. Sie hält die hierfür erforderliche Kompetenz nach Stand von Wissenschaft und Technik vor.

Das BMUB und das BfS nutzen für die Einrichtung von Anlagen des Bundes nach § 9a Abs. 3 AtG (Verwertung radioaktiver Reststoffe und Beseitigung radioaktiver Abfälle) das Fachwissen der BGR für die Bearbeitung geowissenschaftlicher und geotechnischer Fragenkomplexe zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Die BGR hat **Expertise für alle Wirtsgesteine** und deckt fachlich alle im Barrierensystem Endlagerung zu betrachtenden geowissenschaftlichen Komponenten ab. Sie bearbeitet hierfür in Gänze die Prozesskette von der anwendungsorientierten Grundlagenforschung, über Standorterkundung, Charakterisierung der Wirtsgesteine, Standortbewertung bis hin zu Sicherheitsanalysen.

Die breite geowissenschaftliche Palette, die sie dazu befähigt, resultiert wesentlich aus

- ihrer Funktion als Geologischer Dienst von Deutschland,
- ihre Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer,
- dem wissenschaftlicher Austausch mit der Fachwelt,
- und internationaler Zusammenarbeit, insbesondere in Felslabors.

Ihre Erfahrung und Kompetenz bei der Standortsuche hat die BGR zum einen durch ihre Mitgliedschaft beim Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) eingebracht. Des Weiteren hat sie drei Studien zu den untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsregionen in Deutschland erstellt. Diese BGR-Studien (BRÄUER et al. 1994, KOCKEL et al. 1995, HOTH et al. 2007) stehen der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfälle“ als Arbeitsmaterialien (auf der Homepage als K-MAT 4-6) für die Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen (Sicherheitsanforderungen, Kriterien) im späteren Standortauswahlverfahren zur Verfügung.

Es ist erwiesen, dass die Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein, Kristallin in Deutschland regional vorhanden sind (K-MAT4-6).

3 Warum forscht die BGR in Felslabors? „Folie 3“

In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf dem Wirtsgestein Steinsalz. Seit Mitte der 1980er-Jahre untersucht die BGR auch die Eignung von alternativen Gesteinen als geologische Barriere für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle im tiefen Untergrund. Neben dem Wirtsgestein Tonstein untersucht sie auch das Langzeitverhalten von geotechnischen Tonbarrieren (Bentonit), die dazu dienen, die radioaktiven Abfälle zu umschließen.

Die BGR nutzt die Möglichkeiten internationaler Zusammenarbeit, um die Forschungsarbeiten zur Endlagerung zielorientiert durchführen zu können. Dies geschieht im Wesentlichen in unterirdischen Felslabors, da in Deutschland kein Untertagelabor existiert. Es werden dabei folgende Ziele verfolgt:

- In-situ-Messtechniken für Wirtsgesteine erproben und optimieren
- Internationalen Stand von Wissenschaft und Technik halten
- Daten erheben und Synergien nutzen
- Know-how-Transfer auf Gesteinsformationen in Deutschland
- Entscheidungsgrundlage für die Vorgehensweise in Deutschland

Um diese Ziele zu erreichen, ist die BGR an internationalen Forschungsprojekten in Untertagelabors in Frankreich, Schweden und der Schweiz beteiligt. Weitere Kooperationen bestehen z. B. mit Russland, China und den USA. Sie ist außerdem Mitglied im internationalen SaltClub und dem ClayClub der OECD/NEA.

In der Schweiz hat man sich bereits auf Tonstein als Wirtsgestein für hoch radioaktive Abfälle festgelegt. Zu Forschungszwecken wurde daher das internationale Felslabor Mont Terri im 180 Millionen Jahre alten Opalinuston der Jurazeit eingerichtet. Die BGR führt dort seit 1996 Forschungsarbeiten durch. In die Experimente bringt sie u. a. auch ihr Know-how aus der Salzgesteinsforschung ein. Die BGR ist dabei einer von insgesamt 15 Partnern aus 8 Staaten (Schweiz, Frankreich, Deutschland, Spanien, Belgien, Japan, Kanada, USA), die im Mont Terri Felslabor Experimente durchführen (BOSSART & THURY 2008).

Dabei ist anzumerken, dass sich die Entwicklung von Endlagerkonzepten bzw. die Errichtung derartiger Anlagen in den einzelnen Ländern auf sehr unterschiedlichem Niveau befindet (BOLLINGERFEHR et al. 2011). Der internationale Stand der Endlagerarbeiten wurde u. a. in HAMMER & SÖNNKE 2009; HAMMER et al. 2009) zusammengefasst.

Durch gemeinsame Forschung und den Austausch der wissenschaftlichen Erkenntnisse in internationalen Kooperationen zwischen Deutschland, Frankreich und der Schweiz besteht heute bezüglich der angewandten Methodik zur Untersuchung und Charakterisierung von Endlagerstandorten im Tonstein bereits ein hoher Wissensstand. Das heißt auch, dass für eine Standortsuche und -charakterisierung für ein Endlager im Tonstein die Untersuchungs- und Forschungsergebnisse in Frankreich (ANDRA 2005) und in der Schweiz (NAGRA 2002, 2008a, b) mit herangezogen werden können. Beide Länder veröffentlichen laufend ihre Forschungsergebnisse.

Die Eigenschaften von Tonstein als Wirtsgestein können standortbezogen stark variieren und müssen daher jeweils speziell untersucht werden. Auch das Endlagerkonzept ist an regionale und standortspezifische Eigenschaften anzupassen (z. B. Tiefenlage, Ausdehnung und Einlagerungskonzept). Bei der Übertragung von internationalen, standortspezifischen Forschungsergebnissen muss der Einfluss solcher Randbedingungen daher berücksichtigt werden.

In Kristallingesteinen sind wichtige Standortauswahlparameter die mineralogische Zusammensetzung und das Gefüge des Wirtsgesteins unter besonderer Berücksichtigung des Kluftsystems. Im schwedischen Felslabor Äspö werden daher insbesondere die hydraulischen Eigenschaften des Gesteins und des Kluftsystems sowie die felsmechanischen Gebirgseigenschaften untersucht, um für ein Endlager geeignete Bereiche auszuweisen und um die im Kristallin notwendigen geotechnischen Barrieren (Bentonit) zu testen. Auch hier ist die BGR mit Forschungsvorhaben beteiligt.

Forschungsergebnisse zur Charakterisierung der Wirtsgesteine in internationaler Kooperation sind notwendig.

4 Eigenschaften der Wirtsgesteine „Folie 4“

In den internationalen Forschungsprojekten werden insbesondere die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Wirtsgesteine Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallin untersucht (BGR 2007). Diese sind:

- Temperaturleitfähigkeit
- Hydraulische Durchlässigkeit
- Festigkeit
- Verformungsverhalten
- Hohlraumstabilität
- In-situ Spannungen
- Löslichkeit gegenüber Wasser
- Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden und Schadstoffen
- Temperaturbelastbarkeit

Dabei hat jedes Wirtsgestein günstige und ungünstige Eigenschaften. Steinsalz und Tonstein tragen als geologische Barriere die Hauptlast des langzeitsicheren Einschlusses der Radionuklide. Ein Endlager im Kristallin erfordert ein anderes Endlagerkonzept, in dem technische und geotechnische Barrieren die langzeitliche Isolation der Abfälle übernehmen (z. B. Endlagerbehälter, siehe z. B. HAMMER 2008, JOBMANN et al. 2008). Die geologische Barriere nimmt im Vergleich zu Steinsalz und Tonstein in den Endlagerkonzepten für kristalline Gesteine eine untergeordnete Stellung ein.

Ein ideales Wirtsgestein gibt es nicht. Die Endlagerkonzepte müssen an die Wirtsgesteine angepasst werden.

5 Geowissenschaftliche Kriterien im StandAG [„Folie 5“](#)

Jedes Land definiert und entwickelt eigene Kriterien zu Standortauswahlverfahren für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Nach dem StandAG hat die Kommission u. a. die Aufgabe, Vorschläge zu Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien für die Standortauswahl zu erstellen (§ 4, Absatz 5). Nach § 4, Absatz 2 soll sie Vorschläge erarbeiten für:

- geowissenschaftliche (...) **Ausschlusskriterien** und **Mindestanforderungen** im Hinblick auf die Eignung geologischer Formationen für die Endlagerung,
- wirtsgesteinsspezifische **Ausschluss-** und **Auswahlkriterien** für die möglichen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin,
- wirtsgesteinsunabhängige **Abwägungskriterien**.

Nach § 15, Absatz 1 hat der Vorhabenträger u. a.

- standortbezogene **Prüfkriterien**

zu erstellen.

Hierfür liegt der Kommission die Empfehlung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd 2002) als K-MAT1 zugrunde.

Hinweis: Im StandAG sind unterschiedliche geowissenschaftliche Kriterienarten genannt. Die Definitionen sind nicht eindeutig.

6 Geowissenschaftliche Kriterien nach AkEnd [„Folie 6“](#)

Nach AkEnd (2002, Seite 70ff) sind geowissenschaftliche **Auswahlkriterien** nur an die Schritte 1 und 2 des Verfahrens gebunden:

- Geowissenschaftliche **Ausschlusskriterien** und **Mindestanforderungen** (in Schritt 1),
- Geowissenschaftliche **Abwägungskriterien** (in Schritt 2)

„Die **Ausschlusskriterien** bzw. **Mindestanforderungen** sind während des gesamten Verfahrensablaufs zu beachten. Sie dienen dem Ausschluss nicht geeigneter Flächen. Die **Abwägungskriterien** dienen der vergleichenden Bewertung von Flächen. Sie ermöglichen die Identifizierung von Flächen bzw. Standorten mit relativ günstigeren Voraussetzungen

für die Endlagerung und ermöglichen darüber hinaus die Beachtung des bei der Standortauswahl zu berücksichtigenden Abwägungsgebotes. Nur die relativ günstigeren Flächen oder Standorte werden weiterverfolgt, die übrigen werden zurückgestellt“ (AkEnd 2002).

Zudem findet keine Vorfestlegung auf ein bestimmtes Wirts- oder Barrierengestein (z. B. Ton, Salz) statt, weil ein geeigneter Endlagerstandort nicht allein durch das Wirts- oder das Barrierengestein, sondern durch eine **günstige geologische Gesamtsituation** bestimmt wird. Das Auswahlverfahren hat also das Ziel, solche günstigen geologischen Gesamtsituationen zu identifizieren.

Die BGR schlägt der Kommission vor, die Kriterienarten nach AkEnd einheitlich und klar zu definieren, damit alle Mitglieder und Akteure von diesen Begriffen ein konsistentes Verständnis haben (die gleiche Sprache!).

7 Geowissenschaftliche Auswahlkriterien in der Schweiz „Folie 7“

Die Schweiz hat in Ihrem Sachplanverfahren 13 geowissenschaftliche „Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit“ definiert und ihre Anwendung in den Verfahrensschritten detailliert beschrieben (BFE 2008, Seite 52 – 64). Diesen sicherheitstechnischen Kriterien wird im Standortauswahlverfahren oberste Priorität eingeräumt (ESchT 2006, 2008). Bei der Ausgestaltung eines solchen Standortauswahlverfahrens sind prinzipiell zwei verschiedene Vorgehensweisen möglich (ESchT 2006):

„Zum einen werden die Auswahlkriterien vor Eintritt in die Umsetzung des Auswahlverfahrens festgelegt und quantifiziert, wie dies z. B. die Empfehlungen des deutschen AKEnd vorsehen. Zum anderen erfolgt dagegen wie z. B. beim Schweizer Sachplanentwurf die Operationalisierung der Kriterien und Bewertungsaspekte in den einzelnen Etappen, so dass die Kriterien zunächst nur qualitativ benannt werden und ihre Quantifizierung und Wichtung erst im Prozessverlauf vorgenommen wird, um zu verhindern, dass geeignete Standorte „aufgrund einer unnötig hohen Anforderung an eine einzelne Eigenschaft eliminiert“ werden.“

Der Einengungsprozess im schweizerischen Auswahlverfahren erfolgt nach geowissenschaftlichen Kriterien.

8 Geowissenschaftliche Auswahlkriterien im Vergleich „Folie 8“

Ein Vergleich der geowissenschaftlichen Kriterien der Schweiz mit denen des AkEnd zeigt, dass diese sehr ähnlich sind. International werden in den frühen Phasen der Standortsuche vor allem folgende geowissenschaftliche Ausschlusskriterien bzw. Mindestanforderungen zur Abgrenzung potenziell geeigneter Standortregionen angewendet (HAMMER et al. 2009, HAMMER & SÖNNKE 2009):

- geringe seismische und vulkanische Aktivitäten,
- keine großräumigen Hebungen (kleiner 1 mm/a),
- keine aktiven Störungszonen und geringe tektonische Zerböckung,
- Mächtigkeit des Wirtsgesteins größer 100 m,
- Tiefenlage der geplanten Einlagerungssohle zwischen 300 und 1000 m u. GOK,
- ausreichende Fläche (abhängig vom Wirtsgestein und seinen Eigenschaften, wie z. B. Wärmeleitfähigkeit),
- weitgehende (bergmännisch) Unverritztheit der Struktur,
- geeignete Gebirgstemperaturen im geplanten Endlagerniveau,
- lange Fließzeiten und hohe Alter der Grundwässer im für die Endlagerung vorgesehenen Einlagerungsbereich,
- niedrige hydraulische Gradienten,
- günstige hydrochemische Verhältnisse (gering mineralisierte und reduzierende Grundwässer),
- Homogenität der Gesteine und geringe Anisotropie in ihren endlagerrelevanten Eigenschaften,
- hohe Standfestigkeit,
- gute Wärmeleitfähigkeit und geringe thermische Ausdehnung des Gesteins,
- niedrige, möglichst isotrop verteilte Gebirgsspannungen sowie
- keine Nutzungskonflikte mit Rohstoffen und anderen natürlichen Ressourcen.

In den meisten Ländern, die Endlagerprojekte verfolgen, liegen die für die Anwendung der genannten Auswahlkriterien erforderlichen Informationen beim Start des Auswahlverfahrens zumindest teilweise vor. Die Daten zu Hebungen, Seismizität und Vulkanismus beispielsweise sind meist landesweit vorhanden. Anders sieht es bei Angaben zur Identifizierung

von aktiven Störungszonen oder zur Charakterisierung der hydrogeologischen Rahmenbedingungen aus. Sie existieren meist nur lokal begrenzt.

Weltweit werden ähnliche geowissenschaftlichen Kriterien angewendet.

9 Ausschlusskriterien nach AkEnd „Folie 9“

In Deutschland ist der geologische Untergrund lückenlos kartiert (BGR 2014, K-MAT11). Die vorliegenden geowissenschaftlichen Daten und Informationen bieten eine gute und umfängliche Grundlage für die Auswahl von Standortregionen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle unter Anwendung geologischer Mindestanforderungen. Die Daten zu Seismizität und Vulkanismus beispielsweise sind bereits vorhanden. Entsprechende Karten der BGR wurden im AkEnd-Bericht veröffentlicht (AkEnd 2002, Seite 90 und 92):

„Basis für eine Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten in Deutschland bildet die Karte der Erdbebenzonen Deutschlands (DIN 4149). Dabei wurden Zonen entsprechend der in einem Zeitraum von ca. 500 Jahren maximal zu erwartenden Intensitäten abgegrenzt. Als Grundlage dafür dienten der historische deutsche Erdbebenkatalog, der alle verzeichneten Erdbeben in Deutschland seit dem Jahr 800 aufführt, die Karte der seismotektonischen Einheiten Deutschlands und die Verteilung der beobachteten Schadenbeben in Deutschland. Mit eingeflossen in die Zonenkarte sind auch Annahmen über maximal mögliche Beben in den entsprechenden Gebieten. Bei der Abgrenzung des für die Anlage eines Endlagers offensichtlich ungünstigen Gebietes muss berücksichtigt werden, dass sich die Zonierung auf Schäden an Oberflächenbauwerken bezieht. Die Auswirkungen von Erdbeben auf Untertagebauwerke werden dagegen im Allgemeinen als geringer eingeschätzt. Der AkEnd kam vor diesem Hintergrund überein, dass eine Grenzziehung für ungünstige Gebiete erst ab Erdbebenzone 2 der DIN 4149 sinnvoll ist. Dies entspricht einer maximal beobachteten Erdbebenintensität ab 7.0 an der Oberfläche.“

Für die übertägige Erkundung der Standortregionen ist fallweise zu prüfen, inwieweit die vorliegende Daten- und Informationsgrundlage für die Anwendung weiter ausdifferenzierter geologischer Kriterien ausreichend ist.

Die geologischen Verhältnisse in Deutschland sind gut erschlossen (K-MAT11).

10 Kriterien in der Praxis: Seismische Aktivität [„Folie 10“](#)

Das Kriterium „Seismische Aktivität“ beispielsweise ist sofort anwendbar. Die BGR ist zentrale Sammelstelle und Datenarchiv der seismologischen Einrichtungen in Deutschland. Der „Erdbebenkatalog für Deutschland“ enthält alle verzeichneten Erdbeben für die Jahre 800 bis 2008 und wird seither von der BGR erweitert.

Das Kriterium „Seismische Aktivität“ ist sofort anwendbar.

11 Kriterien in der Praxis: Permeabilität [„Folie 11“](#)

Daten zum Kriterium „Permeabilität“ beispielsweise liegen bereits für verschiedene Wirtsgesteine vor. In internationalen Felslabors wie in Mont Terri, Grimsel (Schweiz), Bure (Frankreich) und Äspö (Schweden) untersucht die BGR die gebirgsmechanischen Eigenschaften von Wirtsgesteinen mittels geophysikalischer und geotechnischer Messungen. Daneben führt die BGR auch Versuche im gesteinsphysikalischen Prüflabor durch, in denen die thermischen, mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von Wirtsgesteinen an Gesteinsproben aus Bohrungen untersucht werden. Auflockerungszonen um untertägige Hohlräume entstehen zwangsläufig bei der Auffahrung. Da sie potenzielle Wegsamkeiten für Schadstoffe bilden und die Standsicherheit von Grubenbauen beeinflussen können, ist deren Erforschung wichtig.

Bei allen Messwerten gilt es zu beachten, wo und mit welcher Methode die Werte gemessen wurden. In-situ untertage im unverritzten Gebirge werden z. B. andere Werte gemessen, als in der Auflockerungszone. Auch Werte, die an Proben des gleichen Gesteins im Labor gemessen wurden, unterscheiden sich oft deutlich von den direkt vor Ort im Gebirge gemessenen Werten. Untertägige Untersuchungen sind daher erforderlich, da sie unter Bedingungen erfolgen, die denen eines künftigen Endlagers am ähnlichsten sind.

Forschungsergebnisse zur Charakterisierung der Wirtsgesteine in internationaler Kooperation helfen, Methoden zu entwickeln und Parameter zu ermitteln, die zur Anwendung von Kriterien herangezogen werden.

12 **Fazit „Folie 12“**

- Es gibt kein ideales Wirtsgestein!
- International werden Tonstein, Steinsalz und kristalline Gesteine als mögliche Wirtsgesteine untersucht (K-MAT7).
- Entscheidend ist die günstige geologische Gesamtsituation.
- Die geologischen Verhältnisse in Deutschland sind gut erschlossen (K-MAT11) und die Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein, Kristallin regional vorhanden (K-MAT4-6).
- Gute Erkundungsmethoden sind vorhanden.
- Forschungsergebnisse zur Charakterisierung der Wirtsgesteine in internationaler Kooperation sind notwendig (Angabe der Ermittlungsmethode).
- Kriterienarten müssen einheitlich und klar definiert sein.

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd.-- Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), 260 S., 30 Abb., 14, Tab., 3 Anh.; Berlin.
- ANDRA (2005): Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. Dossier 2005 Argile, Synthesis.-- Report Series, Andra 266 VA, 241 S., Châtenay-Malabry.
- BOSSART, P. & THURY, M. (Ed.) (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results.-- Swiss Geological Survey (SGS), **3**, 194 S.; Wabern/Schweiz - ISBN 978-3-302-40016-7.
- BFE (2008): Sachplan Geologisches Tiefenlager - Konzeptteil.-- Bundesamt für Energie (BFE): 92 S.; Bern/Schweiz.
- BGR (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen.-- 17 Seiten, Hannover/Berlin.
- BGR (2014): Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland. Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen Vorlage für die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“.-- BGR-Kurzbericht (K-MAT11), 16 Seiten, Hannover.
- BOLLINGERFEHR, W., HERKLOTZ, M., HERZOG, C., JOBMANN, M., LOMMERZHEIM, A., WEISS, E., WOLF, J., ZIEGENHAGEN, J., HAMMER, J., SÖNNKE, J. & MINGERZAHN, G. (2011): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA) - Synthesebericht.-- DBE TECHNOLOGY GmbH & Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Synthesebericht FKZ 02 E 10346: 183 S., 8 Anh.; Peine.
- BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P., SCHUSTER, P. & SPRADO, K. H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen.-- BGR-Bericht, 147 S.; Hannover.
- ESchT (2006): Kurzstellungnahme der Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager zum Konzeptteil „Sachplan Geologische Tiefenlager“ vom 24.8.2006, 7 Seiten.

- ESchT (2008): Pressemitteilung zum Konzeptteil „Sachplan Geologische Tiefenlager“. Basierend auf der vom Schweizer Bundesrat verabschiedeten Fassung vom 02.04.2008, 5 Seiten.
- HAMMER, J. (2008): Aufbau und Schutzfunktionen der granitoiden Barriere am HAW-Endlagerstandort Krasnojarsk, Russland.-- BGR-Bericht, 71 S., 21 Abb., 13 Tab, Hannover.
- HAMMER, J. , SÖNNKE, J. & MINGERZAHN, G. (2009): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA). Teil I: Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen, Abschlussbericht.-- BGR-Bericht, 161 S., 56 Abb.; Hannover.
- HAMMER, J. & SÖNNKE, J. (2009): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA) Teil II: Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen, Abschlussbericht.-- BGR-Bericht, 205 S., 95 Abb., 6 Tab.; Hannover.
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.-- BGR, 118 S., 44 Abb., 5 Tab.; Berlin/Hannover.
- JOBMANN, M., BREWITZ, W., FAHRENHOLZ, CH., FEIN, E., HAMMER, J., KEESMANN, S., KRONE, J., MRUGALLA, S., WOLF, J. & ZIEGENHAGEN, J. (2008): Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen (WIBASTA).-- Abschlussbericht FKZ 02 E 9965/ 02 E 9975, DBE Technology GmbH: 133 S., 65 Abb., 35 Tab.; Peine.
- KOCKEL, F. & KRULL, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen.-- BGR, 48 S., 4 + 1 Anl., 5 Abb., 16 Tab.; Hannover, Berlin.
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston. „Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle“.-- Nagra, NTB02-03: 560 S., 204 Fig., 80 Tab., 7 App.; Wettingen/Schweiz.

NAGRA (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht).-- Nagra Technischer Bericht **NTB 08-03**; Wettingen/Schweiz.

NAGRA (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen.-- Nagra Technischer Bericht **NTB 08-04**; Wettingen/Schweiz.

Anhangverzeichnis	Seite
Folie 1	17
Folie 2	17
Folie 3	18
Folie 4	18
Folie 5	19
Folie 6	19
Folie 7	20
Folie 8	20
Folie 9	21
Folie 10	21
Folie 11	22
Folie 12	22

Folie 1

Betrachtete Wirtsgesteine international

Land	Wirtsgestein für hoch radioaktive Abfälle
Deutschland	Steinsalz, Tonstein, Kristallin
Frankreich	Tonstein
Belgien	Ton
Finnland	Kristallin
Großbritannien	Kristallin, Tonstein, derzeit offen
Schweden	Kristallin
Spanien	Kristallin, Ton, Salzgestein, derzeit 60 J. Zwischenlagerung
Niederlande	Steinsalz, Tonstein, derzeit 100 J. Zwischenlagerung
Kanada	Kalkstein überlagert von Tonstein, Kristallin
Russland	Kristallin
Tschechische Republik	Kristallin
Ungarn	Tonstein
Schweiz	Tonstein, Kristallin
China	Kristallin
USA	Tuff, Steinsalz, derzeit offen
Japan	Kristallin, Sedimentgesteine

Länder beispielhaft

Kristallin: magmatische oder hochmetamorphe Gesteine
(z. B. Granite, Gneise, Basalt)



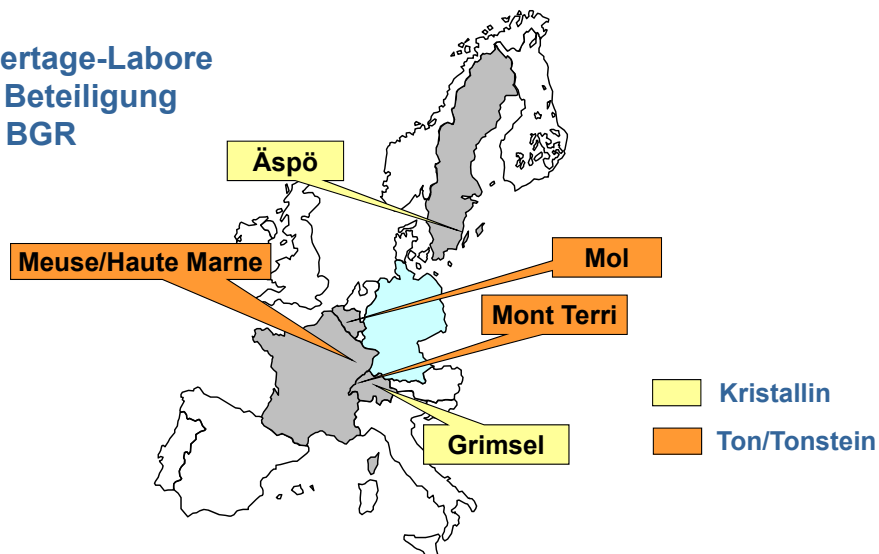
Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Folie 2

Internationale Zusammenarbeit

Untertage-Labore
mit Beteiligung
der BGR



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Folie 3



Warum Forschung in Felslabors?

- In-situ-Messtechniken für Wirtsgesteine erproben und optimieren
- Internationalen Stand von Wissenschaft und Technik halten
- Daten erheben und Synergien nutzen
- Know-how-Transfer auf Gesteinsformationen in Deutschland
- Entscheidungsgrundlage für die Vorgehensweise in Deutschland



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Folie 4

Eigenschaften der Wirtsgesteine

<i>Eigenschaft</i>	<i>Steinsalz</i>	<i>Ton/Tonstein</i>	<i>Kristallingestein (z. B. Granit)</i>
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Hydraul. Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Löslichkeit (in Wasser)	hoch	sehr gering	sehr gering
Rückhaltevermögen	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch



günstig



ungünstig



mittel



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Folie 5

Geowissenschaftliche Kriterien im StandAG

(§ 4, Absatz 2):

- geowissenschaftliche (...) **Ausschlusskriterien** und **Mindestanforderungen** im Hinblick auf die Eignung geologischer Formationen für die Endlagerung
- **wirtsgesteinsspezifische Ausschluss- und Auswahlkriterien** für die möglichen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin
- wirtsgesteinsunabhängige **Abwägungskriterien**

(§ 15, Absatz 1):

- standortbezogene **Prüfkriterien**

Folie 6

Geowissenschaftliche Kriterien nach AkEnd

(AkEnd 2002, Seite 70):

Auswahlkriterien sind:

- Geowissenschaftliche **Ausschlusskriterien** und **Mindestanforderungen** (Schritt 1)
- Geowissenschaftliche **Abwägungskriterien** (Schritt 2)

Sie dienen der Identifizierung und vergleichenden Beurteilung
der „**günstigen geologischen Gesamtsituationen**“
ohne Vorfestlegung auf ein Wirtsgestein.

Folie 7

Geowissenschaftliche Auswahlkriterien in der Schweiz

Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

aus BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager

Folie 8

Geowissenschaftliche Auswahlkriterien im Vergleich

Schweiz (Auszug aus Sachplan)

- 1 Eigenschaften des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches**
 - 1.1 Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, Verbreitung, Tiefenlage, geol.-tekt. Verhältnisse (regionale Störungen, glaziale Rinnen, Fremdeinschlüsse), Platzbedarf
 - 1.2 Geringe hydraulische Durchlässigkeit
 - 1.3 Gutes Radionuklid-Rückhaltevermögen
 - 1.4 Art und Verteilung möglicher Transportpfade
- 2 Langzeitstabilität**
 - 2.1 Geringe Neigung zu Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (durch Neotektonik, Erdbeben, Vulkanismus), bei Deformation Neigung zu Selbstabdichtung von Rissen/Klüften/Störungen
 - 2.2 Geringe Erosion und/oder große Tiefenlage
 - 2.3 Wenig wärmeempfindlich bezüglich hydraulischen, stofflichen und felsmechanischen Eigenschaften
 - 2.4 Nutzungskonflikte
- 3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen**
 - 3.1 Gute Charakterisierbarkeit der Gesteine
 - 3.2 Einfache Lagerungsverhältnisse und Geometrie, räumlich gut inter- und extrapolierbar
 - 3.3 Genügend prognostizierbar über die erforderlichen Zeiträume, Einschluss alter Porenwässer
- 4 Bautechnische Eignung**

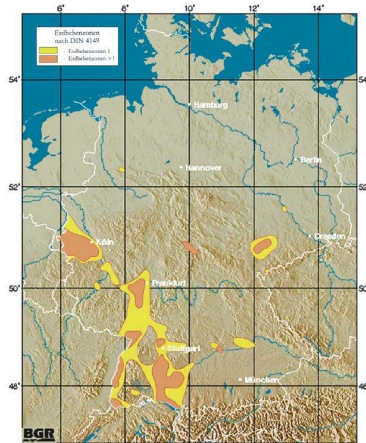
Deutschland (Auszug aus AkEnd)

- 1.1 Ausschlusskriterien**
 - 1.1.1 Großräumige Vertikalbewegungen
 - 1.1.2 Aktive Störungszonen
 - 1.1.3 Seismische Aktivität
 - 1.1.4 Vulkanische Aktivität
 - 1.1.5 Grundwasseralter
- 1.2 Mindestanforderungen**
 - 1.2.1 Gebirgsdurchlässigkeit: $< 10^{-10}$ m/s
 - 1.2.2 Mindestmächtigkeit: 100 m,
 - 1.2.3 Mindestteufe: 300 m, Maximalteufe 1500 m
 - 1.2.4 Mindestausdehnung: Salz 3 km², Ton/Granit 10 km²
 - 1.2.5 Keine Gebirgsschlaggefährdung
 - 1.2.6 Einhaltung der Mindestmächtigkeit, -ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit für 1 Million Jahre
- 2 Abwägungskriterien**
 - 2.1.1 kein oder nur langsamer GW-Transport
 - 2.1.2 günstige Konfiguration von Wirtsgestein und EWG
 - 2.1.3 Gute räumliche Charakterisierbarkeit
 - 2.1.4 gute Prognostizierbarkeit
 - 2.2.1 günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen
 - 2.2.2 Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten
 - 2.3.1 gute Gasverträglichkeit
 - 2.3.2 gute Temperaturverträglichkeit
 - 2.3.3 hohes Rückhaltevermögen
 - 2.3.4 günstige hydrochemische Verhältnisse

Folie 9

Ausschlusskriterien nach AkEnd

Seismische Aktivität



Karte der Erdbebenzonen
Deutschlands nach DIN 4149

Vulkanische Aktivität



Karte der Gebiete in Deutschland mit einer
vulkanischen Gefährdung (1: Vogtland, 2: Eifel)



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

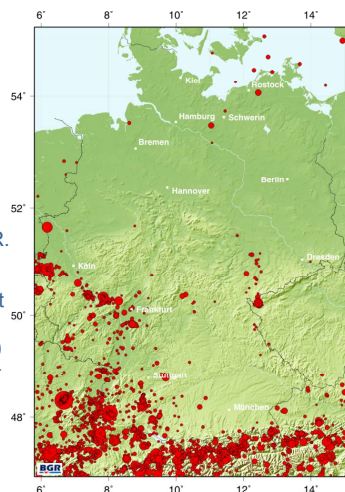
Folie 10

Kriterien in der Praxis: Seismische Aktivität

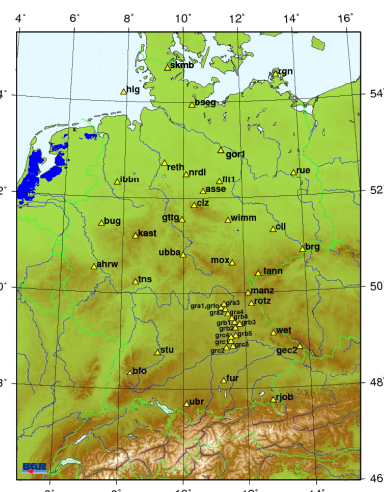
Daten für dieses
Kriterium liegen für
Deutschland vor.

Zentrale Sammelstelle
und Datenarchiv der
seismologischen
Einrichtungen in
Deutschland ist die BGR.

Der „Erdbebenkatalog
für Deutschland“ enthält
alle verzeichneten
Erdbeben der Jahre 800
bis 2008. Er wird seither
von der BGR erweitert.



Erdbebenkarte aller natürlichen Erdbeben seit
1995 ab Magnitude 2



Seismologische Breitbandstationen des Deutschen
Regionalnetzes (GRSN)



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Folie 11

Kriterien in der Praxis: Permeabilität



Permeabilitätsmessungen
der BGR im Tonstein in Mont
Terri (Schweiz)

Daten zu diesem Kriterium liegen für verschiedene
Wirtsgesteine vor. Hierbei gilt es zu beachten, wo
und wie das Kriterium ermittelt wurde.

Permeabilität (k)	Steinsalz	Opalinuston	Granit (ungeklüftet)
Labor:	$k < 10^{-21} \text{ m}^2$	$k < 10^{-19} \text{ m}^2$	$\text{ca. } 10^{-20} \text{ m}^2$
In-situ: "unverritztes" Gebirge	$k < 10^{-20} \text{ m}^2$	$k < 10^{-19} \text{ m}^2$	$k < 10^{-18} \text{ m}^2$
Auflockerungs- bereich	$k < 10^{-14} \text{ m}^2$	$k < 10^{-16} \text{ m}^2$ bis 10^{-13} m^2	$k < 10^{-15} \text{ m}^2$

Datenquelle: BGR

Folie 12

Fazit

- Es gibt kein ideales Wirtsgestein!
International werden Tonstein, Steinsalz und Kristallin als
mögliche Wirtsgesteine untersucht.
Entscheidend ist die günstige geologische Gesamtsituation.
- Die geologischen Verhältnisse in Deutschland sind gut
erschlossen (K-MAT11), die Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein,
Kristallin sind regional vorhanden (K-MAT4-6).
- Gute Erkundungsmethoden sind vorhanden.
- Forschungsergebnisse zur Charakterisierung der Wirtsgesteine
in internationaler Kooperation sind notwendig (Angabe der
Ermittlungsmethode).
- Kriterienarten müssen einheitlich und klar definiert sein.