

Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit

STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission

INHALTSVERZEICHNIS

1	Hintergrund	2
2	Beratungshergang.....	2
3	Regulatorische Vorgaben an das Barrierensystem.....	3
3.1	Vorgaben an die Barrieren im Standortauswahlgesetz	3
3.2	Weitere Vorgaben an die Barrieren.....	4
4	Aufgabe des Barrierensystems	6
5	Anforderungen an das Barrierensystem	6
6	Das Barrierensystem in Kristallingestein.....	8
6.1	Sicherheitskonzept und Barrierensystem	8
6.2	Umsetzbarkeit der Anforderungen.....	12
7	Das Barrierensystem in Steinsalz.....	15
7.1	Sicherheitskonzept und Barrierensystem	15
7.2	Umsetzbarkeit der Anforderungen.....	19
8	Das Barrierensystem in Tongestein	21
8.1	Sicherheitskonzept und Barrierensystem	21
8.2	Umsetzbarkeit der Anforderungen.....	26
9	Fazit.....	29
10	Unterlagen/Literatur.....	31

1 Hintergrund

Gemäß § 1 Abs. 3 des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz, StandAG) [1] kommen in Deutschland grundsätzlich die Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein¹ für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Betracht. Die drei potenziellen Wirtsgesteine unterscheiden sich u. a. insbesondere darin, in welchem Maße wenig durchlässige bis undurchlässige geologische Schichten (geologische Barriere) zum Einschluss der Radionuklide und damit zur Langzeitsicherheit des Endlagers beitragen (vgl. § 23 Abs. 1 [1]). Während bei Endlagersystemen im Steinsalz und im Tongestein die geologische Barriere die Hauptbarriere darstellt, sind im Kristallingestein die technischen Barrieren die Hauptbarrieren.

Das Sicherheitskonzept beschreibt die an die Komponenten des Endlagersystems zu stellenden Anforderungen unter Berücksichtigung der entsprechenden Wirkungszeiträume. Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich konkrete Anforderungen an den Endlagerstandort, das Endlagerkonzept, die Endlagerauslegung und die zu erbringenden Bewertungen ab. Für die oben genannten Wirtsgesteine sind international unterschiedliche Sicherheitskonzepte entwickelt worden. Dabei ist bei einem auf Deutschland zugeschnittenen Vergleich der Barrierensysteme zu berücksichtigen, dass in unterschiedlichen Ländern unterschiedliche regulatorische Rahmenbedingungen bestehen. Wenn diese im Ausland entwickelten Sicherheitskonzepte auch in Deutschland übernommen werden sollen, ist zu beachten, unter welchen Randbedingungen ein Wirtsgestein im Ausland ausgewählt und ein Konzept für ein Barrierensystem für dieses Wirtsgestein entwickelt worden ist.

Im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens müssen verschiedene Standorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen und unterschiedlichen Sicherheitskonzepten miteinander verglichen werden. Deshalb ist es notwendig, sich mit den Anforderungen an die Barrierensysteme im Allgemeinen auseinander zusetzen und darzulegen, inwiefern mit den dargelegten Barrierensystemen die Anforderungen in [1] prinzipiell erfüllbar sind. Dies wird als Grundlage für weitere regulatorische Arbeiten insbesondere auch zum sicherheitsanalytischen Nachweis des Einschlusses angesehen. Die konkrete Erfüllung der Anforderungen kann jedoch nur standortspezifisch gezeigt werden. Standortspezifisch könnten sich außerdem weitere zu erfüllende Anforderungen an das Barrierensystem stellen.

2 Beratungshergang

Der Ausschuss ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (EL) der Entsorgungskommission (ESK) hatte in seiner 59. Sitzung am 07.09.2017 beschlossen, die Betrachtung der sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an das Barrierensystem von den Betrachtungen zum Vorgehen zur Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) zu trennen und für die Bearbeitung des Themas „Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem“ eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe zur Verfassung einer Stellungnahme einzusetzen. Das vorliegende Dokument wurde in der 64. bis 67. Sitzung des

¹ Im Folgenden wird der Einfachheit halber jeweils von „Steinsalz“, „Tongestein“ und „Kristallingestein“ gesprochen (vgl. § 1 Abs. 3 in [1]), unabhängig davon, dass alle drei potenziellen Wirtsgesteine üblicherweise abhängig von ihrer mineralogischen Zusammensetzung und dem räumlichen Aufbau des Vorkommens auch eine gewisse Variation ihrer barrierenwirksamen Eigenschaften aufweisen und daher aufgrund der lokaler Gegebenheiten bewertet werden müssen.

Ausschusses EL am 07.06.2018, 06.09.2018, 18.10.2018 und 05.12.2018 sowie in der 73. und 74. Sitzung der ESK am 24.01.2019 und 21.02.2019 diskutiert und in der 74. Sitzung der ESK am 21.02.2019 verabschiedet.

3 Regulatorische Vorgaben an das Barrierensystem

3.1 Vorgaben an die Barrieren im Standortauswahlgesetz

Als Endlagerbarrieren sind diejenigen Bestandteile eines Endlagersystems zu verstehen, die eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern (§ 2 Abs. 7 und 8 in [1]). Zu den geologischen Barrieren zählen diejenigen Gebirgsbereiche, die zum Einschluss oder zur Rückhaltung der Radionuklide beitragen. Als technische und geotechnische Barrieren gelten ingenieurtechnisch erstellte Einheiten, die ebenfalls die Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern (§ 2 Abs. 8 in [1]). Geotechnische Barrieren sind beispielsweise Strecken- und Schachtverschlüsse. Technische Barrieren sind z. B. Abfallbehälter und die Abfallmatrix selbst.

Innerhalb des Barrierensystems sind die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe zu konzentrieren und einzuschließen, um sie von der Biosphäre fernzuhalten (§ 26 Abs. 2 in [1]). Die Barrieren in ihrem Zusammenwirken müssen den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten, d. h. es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche den Erhalt der Barrierewirkung über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen (§ 23 Abs. 5 in [1]). Dazu sind Erkenntnisse zur Fertigungsqualität der technischen und geotechnischen Barrieren sowie zu deren Alterung unter Endlagerbedingungen am jeweiligen Standort zu berücksichtigen (§ 24 Abs. 2 in [1]).

Gebiete, in denen prinzipiell ein bestmöglicher Standort vorliegen kann, sind vor Veränderungen zu schützen, die ihre Eignung beeinträchtigen könnten. Zum Schutz der geologischen Barriere wird das Abteufen von Bohrungen in die geologische Barriere eingeschränkt. Darüber hinaus wird gefordert, dass durch die Bohrungen oder durch die mit diesen Bohrungen in Verbindung stehenden Maßnahmen keine Gesteinsschichten erheblich geschädigt werden können, die den langfristigen Schutz darunter liegender, für die Endlagerung geeigneter Schichten bewirken können oder langfristig im Sinne einer zusätzlichen Barriere für das Endlager wirken können (§ 21 Abs. 2 in [1]). Ebenso müssen Einflüsse aus früherer bergbaulicher Tätigkeit berücksichtigt werden, die die Barrierewirkung beeinträchtigen. Auch vorhandene alte Bohrungen dürfen die Barrieren eines Endlagers in ihrer Einschlussfunktion nicht nachweislich beeinträchtigen (§ 22 Abs. 2 in [1]).

Bei Endlagersystemen, die wesentlich auf einer geologischen Barriere beruhen (also bei Endlagern in Steinsalz und Tongestein), wird ein ewG als der Teil des Gebirges definiert, der (zusammen mit den technischen und geotechnischen Barrieren/Verschlüssen) den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet (§ 2 Abs. 9 in [1]). Für alle Endlagersysteme, d. h. auch diejenigen, deren Einschlussvermögen wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, wird ein Einlagerungsbereich definiert, zu dem auch der Bereich des Gebirges zählt, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt des Barrierensystems gewährleistet (§ 2 Abs. 10 in [1]). Das Endlagersystem besteht aus verschiedenen Komponenten, deren Zusammenwirken den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle bewirkt; diese umfassen das Endlagerbergwerk, die Barrieren und die das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder

überlagernden geologischen Schichten (§ 2 Abs. 11 in [1]). Da der Einschluss für ein wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem (also für ein Endlager in Kristallingestein) durch ebendiese Barrieren sichergestellt wird, muss für dieses Endlagersystem anstelle einer geringen Gebirgsdurchlässigkeit der sichere Einschluss durch die geotechnischen und technischen Barrieren über eine Million Jahre (§ 23 Abs. 4 in [1]) nachgewiesen werden. Dabei ist abzuleiten, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren leisten können, wobei die zu erwartende Alterung der Komponenten standortabhängig berücksichtigt werden muss. Der Nachweis der Qualität des Einschluss durch das Barrierensystem muss robust sein (§ 24 Abs. 3 in [1]).

Der ewG ist das zentrale Element für ein wesentlich auf einer geologischen Barriere beruhendes Endlagersystem. In §§ 22 bis 24 in [1] werden für die Standortauswahl Kriterien und Anforderungen an den ewG festgelegt. Für Endlagersysteme, in denen der Einschluss im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, erfolgt weitgehend eine sinngemäße Anwendung der mit Bezug auf den ewG formulierten Kriterien. Für solche Endlagerkonzepte umfasst die Betrachtung auch den Bereich des Gebirges, der die Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet. Dies ist insbesondere die Gesteinsschicht unmittelbar um die Einlagerungshohlräume, die die Behälter und das Puffermaterial vor äußeren Einwirkungen schützt.

Die Barrierenwirksamkeit wird bei einem auf einer geologischen Barriere beruhendem Endlagersystem u. a. anhand der Barrierenmächtigkeit und dem Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs bewertet (Anlage 2 in [1]). Hinzu kommen die Tiefenlage des ewG (sofern definierbar) sowie die mögliche Beeinträchtigung seiner Barrierewirkung durch die Nähe zu Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial. Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren soll zuverlässig möglich sein. Indikatoren hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften, die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften (Anlage 3 in [1]) sowie die Erfahrungen zu den Barriereigenschaften und zu der Barrierenwirksamkeit der Gebirgsformationen (Anlage 6 in [1]). Die barrierewirksamen Gesteine eines ewG sollen eine möglichst geringe Gebirgsdurchlässigkeit und ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden besitzen (Anlage 9 in [1]). Das Material technischer und geotechnischer Barrieren sollte sich weitgehend chemisch inert verhalten gegenüber den vorhandenen Tiefenwässern und Mineralphasen des umgebenen Gebirgsbereiches (Anlage 10 in [1]). Gemäß § 22 in [1] sind außerdem geologisch aktive Störungszonen ein Ausschlusskriterium, wenn diese in den Gebirgsbereichen, die als Endlagerbereich in Betracht kommen, einschließlich eines abdeckenden Sicherheitsabstands vorhanden sind, und sie das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen können.

3.2 Weitere Vorgaben an die Barrieren

Auf der Basis von § 26 in [1] wird gegenwärtig durch das BMU eine Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle erarbeitet. Der ESK liegt diese Verordnung im Entwurf vor; sie hat daraus weitere Vorgaben an ein Barrierensystem entnommen.

Ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren soll die Anforderungen passiv und wartungsfrei gewährleisten. Es wird dabei unterschieden zwischen „wesentlichen“ und „weiteren“ Barrieren. Die

wesentlichen Barrieren sind diejenigen Barrieren, auf denen der Einschluss im Endlagersystem im Wesentlichen beruht; diese sind entweder

- a die geologische Barriere und die geotechnischen Barrieren (im Steinsalz oder Tongestein) oder
- b die technischen und geotechnischen Barrieren (im Kristallingestein) – sofern im Kristallingestein kein ewG ausgewiesen werden kann.

Die weiteren Barrieren sind alle geologischen, technischen und geotechnischen Barrieren, die in einem Endlagersystem zusätzlich zu und im Zusammenwirken mit den wesentlichen Barrieren eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern. Die wesentlichen und weiteren Barrieren des Endlagersystems müssen so zusammenwirken, dass das Endlagersystem auch für abweichende Entwicklungen seine Funktionstüchtigkeit in ausreichendem Maße beibehält und Austragungen von Radionukliden aus den radioaktiven Abfällen gering gehalten werden.

Der Ausschluss der Kritikalität ist mit dem gewählten Barrierensystem zu gewährleisten. Es ist nachzuweisen, dass für die Betriebsphase sowie für zu erwartende und abweichende Entwicklungen im Nachweiszeitraum sich selbst tragende Kettenreaktionen ausgeschlossen sind. Das Barrierensystem hat als unmittelbare Umgebung der Abfälle wesentlich zu dieser Anforderung beizutragen.

Das Barrierensystem aus (den wesentlichen) geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren muss den Einschluss der radioaktiven Abfälle im Nachweiszeitraum sicherstellen. Für die einzelnen Barrieren wesentlich sind dessen Funktionsfähigkeit und das Zusammenwirken der Barrieren im Barrierensystem. Dazu ist nachzuweisen, dass das Barrierensystem integral die Anforderungen des Einschlusses und des Erhalts der Einschlusseigenschaften während des Nachweiszeitraums erfüllt.

Die Eigenschaften der Barrieren müssen daher überprüfbar sein. Es ist nachzuweisen, dass die relevanten Eigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren mindestens über den Zeitraum erhalten bleiben, während dessen diese Barrieren für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach dem Sicherheitskonzept erforderlich sind. Es ist weiter nachzuweisen, dass die Herstellung und Errichtung der Barrieren in der erforderlichen Anzahl einschließlich einer Qualitätssicherung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik möglich ist. Herstellung, Errichtung und Funktion dieser Barrieren müssen erfolgreich erprobt sein, soweit ihre Robustheit nicht anderweitig nachgewiesen werden kann. Es ist außerdem nachzuweisen, dass die für den Erhalt der Integrität relevanten Eigenschaften der weiteren Barrieren des Endlagersystems mindestens über den Zeitraum erhalten bleiben, der für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach dem Sicherheitskonzept erforderlich ist.

Das gesamte Barrierensystem muss robust ausgelegt sein. Als Robustheit wird die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet. Teil der Robustheit sind auch die im Barrierensystem vorhandenen Sicherheitsreserven. Die Robustheit und der Erhalt der Integrität des ewG sind für den Nachweiszeitraum bezüglich der zu erwartenden Entwicklungen nachzuweisen.

4 Aufgabe des Barrierensystems

Das Barrierensystem eines Endlagers umfasst alle technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren. Dabei müssen die wesentlichen Barrieren den Einschluss der Radionuklide gewährleisten. Das Barrierensystem trennt die Abfälle von der umgebenden Geosphäre bzw. dem Teil der Geosphäre, der nicht zum Einschluss der Abfälle beiträgt. Aufgabe des Barrierensystems ist der Einschluss der Radionuklide im Endlager sowie die Isolation der radioaktiven Abfälle vom Einfluss von außen wirkender chemischer und physikalischer Prozesse (Abbildung 4.1).

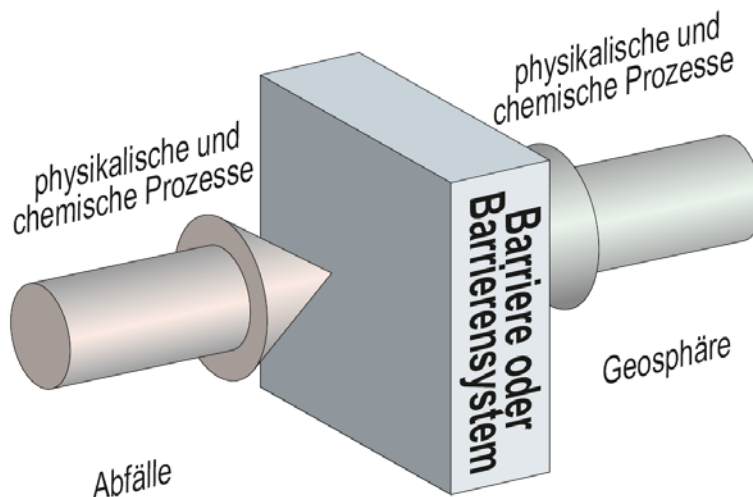


Abbildung 4.1: Prinzip einer Barriere oder eines Barrierensystems als trennendes Element zwischen Abfällen und dem Teil der Geosphäre, der nicht den Einschluss bewirkt.

Über einen Zeitraum von einer Million Jahre (§ 1 Abs. 2 in [1]) kann sich die Wirksamkeit einzelner Barrieren ändern. Das Barrierensystem ist so auszurichten, dass der Transport radioaktiver Stoffe aus dem Endlager bzw. der Transport von Stoffen, die den Transport nach außen beschleunigen können (insbesondere Wasser oder Lösungen), in das Endlager langfristig ver-, behindert bzw. verzögert wird.

5 Anforderungen an das Barrierensystem

Zur Umsetzung des in Kapitel 4 formulierten Ziels werden an das Barrierensystem Anforderungen gestellt. Diese lassen sich in gemäß StandAG [1] zu erfüllende regulatorische Anforderungen an die Barrieren (vgl. Kapitel 3.1) und darüber hinaus zu betrachtende Anforderungen an die Barrieren (vgl. Kapitel 3.2) unterteilen:

Zu erfüllende Anforderungen aus StandAG [1]:

- **Einschlusswirksamkeit:** Das Barrierensystem hat den Zutritt von Wasser/Lösungen zu den Abfällen und die Ausbreitung der Radionuklide aus dem Lager zu verhindern bzw. so lange wie möglich aufzuhalten und Prozesse, die zur erhöhten Ausbreitung der Radionuklide beitragen, zu verlangsamen (vgl. § 26 Abs. 2 in [1]).

- **Dauerhaftigkeit:** Das Barrierensystem muss als ein dauerhaft wirksames System etabliert werden (vgl. § 1 Abs. 2 in [1]). Die radiologischen Schutzziele müssen durch Rückhaltung der Radionuklide über den gesetzlich geforderten Zeitraum eingehalten werden. Dabei sollen die Barrieren sich in ihrer Dauerhaftigkeit gegenseitig unterstützen.
- **Verträglichkeit:** Die einzelnen Barrieren müssen aufeinander abgestimmt sein und es darf zwischen den Barrieren durch interne oder externe Prozesse nicht zu einer maßgeblichen gegenseitigen Beeinträchtigung der Wirksamkeit der Barrieren kommen (z. B. Temperaturverträglichkeit, Anlage 8 in [1], chemische Wechselwirkungen, Anlage 10 in [1]).
- **Technische Umsetzbarkeit:** Das vorgesehene Barrierensystem muss technisch umgesetzt werden können. Einfache Umsetzungen sind gegenüber komplexen vorzuziehen, wenn damit die gleiche Wirkung erzielt werden kann.
- **Rückholbarkeit:** Das Barrierensystem muss die Möglichkeit der Rückholung der Abfälle während der Betriebsphase (§ 26 Abs. 2 in [1]) zulassen. Durch Vorkehrungen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit darf die Wirksamkeit des Barrierensystems nicht beeinträchtigt werden.
- **Ermöglichung der Bergung:** Für eine mögliche Bergung (§ 26 Abs. 2 in [1]) müssen ausreichende Vorkehrungen getroffen werden. Durch solche Vorkehrungen darf die Wirksamkeit des Barrierensystems nicht beeinträchtigt werden.
- **Wartungsfreiheit:** Nach Verschluss des Endlagers dürfen keine weiteren Arbeiten am Barrierensystem mehr notwendig sein; dieses muss passiv seine Wirkung entfalten können (§ 26 Abs. 2 in [1]).

Darüber hinaus sind aus Sicht der ESK die folgenden Anforderungen einzuhalten:

- **Ausschluss Kritikalität:** Das Barrierensystem muss sicherstellen, dass trotz vorhandener Konzentrierung der Abfälle und langfristig auftretender Prozesse nie ein Zustand erreicht wird, der zu einer Kritikalität führen kann.
- **Funktionsfähigkeit:** Mit Lagerverschluss hat das Barrierensystem seine Wirkung zu entfalten. Das bedeutet, dass bei geotechnischen Barrieren zum Zeitpunkt des Endlagerverschlusses mindestens ein Funktionselement eine abdichtende Wirkung nachweisbar übernimmt (sofort wirksames Verschlusselement). Weitere Funktionselemente können zeitverzögert ihre abdichtende Wirkung entfalten.
- **Überprüfbarkeit:** Die für die Langzeitsicherheit relevanten natürlichen Verhältnisse (z. B. Geometrien von Wirtsgesteinskörpern, Störungsverläufe) müssen überprüft werden können. Die Konformität der vorhandenen bzw. eingebauten Barrieren mit den Anforderungen/Spezifikationen muss vor Inbetriebnahme des Endlagers möglichst abdeckend überprüfbar sein.

- **Robustheit:** Das Barrierensystem ist so auszulegen, dass deren Sicherheitsfunktionen gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen unempfindlich sind.

In den folgenden Kapiteln werden für die Wirtsgesteine Kristallingestein (Kapitel 6), Steinsalz (Kapitel 7) und Tongestein (Kapitel 8) exemplarisch in Endlagerprojekten verfolgte Barrierensysteme vorgestellt. Dabei wurde für Kristallingestein von den bestehenden Konzepten in Schweden und Finnland, für Steinsalz vom Konzept in Deutschland und für Tongestein von den bestehenden Konzepten in Frankreich und der Schweiz ausgegangen. Die oben formulierten Anforderungen werden an den diesen Barrierensystemen zugrunde liegenden Sicherheitskonzepten der Endlagersysteme in diesen Wirtsgesteinen gespiegelt. Dabei wird überprüft, inwieweit die formulierten Anforderungen prinzipiell erfüllbar sind.

Es ist nicht Gegenstand dieses Diskussionspapiers aufzuzeigen, dass die hier beispielhaft aus dem internationalen Kontext verwendeten Barrierensysteme dem deutschen Regelwerk entsprechen. Es wird lediglich eine prinzipielle Erfüllbarkeit geprüft. Eine grundlegende Überprüfung kann mit den hier gemachten prinzipiellen Überlegungen nicht vorweggenommen werden. Sie bleibt dem Standortauswahlprozess für konkrete Standorte und Sicherheitskonzepte vorbehalten. Ob die formulierten Anforderungen an einem gewählten Standort tatsächlich erfüllt werden, ist außerdem unter Berücksichtigung der standortspezifischen Erkundungsergebnisse (und den sich daraus ggf. zusätzlich ergebenden Anforderungen an das Barrierensystem) zu überprüfen.

Es ist auch nicht Gegenstand des Diskussionspapiers zu beurteilen, inwiefern für die einzelnen vorgeschlagenen technischen und geotechnischen Barrieren bereits geprüfte und genehmigungsfähige Umsetzungen vorhanden sind. Dies gilt insbesondere für die Barriere des Endlagerbehälters, die abhängig vom gewählten Barrierensystem entsprechende Anforderungen u. a. an einen langfristigen Einschluss, an die Rückholbarkeit oder an die Möglichkeit zur Bergung erfüllen müssen. Die ESK beschränkt sich darauf, eine technische Abschätzung vorzunehmen.

6 Das Barrierensystem in Kristallingestein

6.1 Sicherheitskonzept und Barrierensystem

Ungeklüftete Kristallingesteine sind Gesteine mit hohem Einschlussvermögen. Ausgehend von der geologischen Geschichte kristalliner Gesteine und deren sprödem mechanischem Verhalten in den obersten Kilometern der Erdkruste, den geologischen Befunden (dank Oberflächenkartierungen und Bergbau) sowie der in Deutschland vorhandenen tektonischen Überprägung der alten Kristallinmassive sind ungeklüftete Gesteine in Endlagerteufe und in notwendiger Ausdehnung nicht zu erwarten.

Für Kristallingesteine mit mineralisierten Kluftsystemen (d. h. Kluftsystemen, entlang derer beispielsweise Mineralumwandlungen und Tonmineralneubildungen stattgefunden haben) sind je nach Grad und Art der Kluftfüllung ggf. wieder erhöhte einschlusswirksame bzw. rückhaltende Eigenschaften denkbar. Die Wahrscheinlichkeit, dass entstandene Klüfte aufgrund der Entstehungsgeschichte der Kristallingesteine mineralisiert wurden, ist zwar hoch; der Nachweis einer vorhandenen Klüftung und einer dort vorhandenen

Mineralisation ist mit den bestehenden Methoden der Geophysik jedoch grundsätzlich nur sehr eingeschränkt möglich. Darüber hinaus muss damit gerechnet werden, dass im Laufe des zu betrachtenden langen Nachweiszeitraums wieder neue Klüfte gebildet werden.

Das hier angenommene Sicherheitskonzept eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle im Kristallingestein beruht auf dem Prinzip des Konzentrierens und langfristigen Einschlusses der radioaktiven Abfälle im Endlagerbehälter, der hier (im Unterschied zu den Barrierensystemen für Steinsalz und Tongestein) die Hauptbarriere darstellt (vgl. § 23 Abs. 4 in [1]). Innerhalb eines Endlagerbehälters haben ggf. auch die Abfallformen, z. B. Brennstoffmatrix und Hüllrohre, oder Glasmatrix und Edelstahlkokille weitere Barrierenfunktionen (Abbildung 6.1). Außerhalb des Endlagerbehälters wird dieser von der Barriere eines quellfähigen Mantels aus eingespanntem und hochverdichtetem Bentonit geschützt. Der Bentonit dient auch zum Schutz vor mechanischen Einflüssen und soll als hydrochemischer Puffer den Zutritt von Wasser und korrosiven Grundwasserbestandteilen zur Behälteroberfläche begrenzen. Der Bentonit besitzt eine hohe Rückhaltefähigkeit für evtl. freigesetzte Radionuklide. Der Barriere Wirtsgestein kommt nur eine untergeordnete Rückhaltefunktion zu. Kristallingestein bietet jedoch einen langzeitstabilen mechanischen Schutz der inneren Barrieren.

Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich konkrete Anforderungen an den Endlagerstandort, das Endlagerkonzept, die Endlagerauslegung und die zu erbringenden Bewertungen ab.

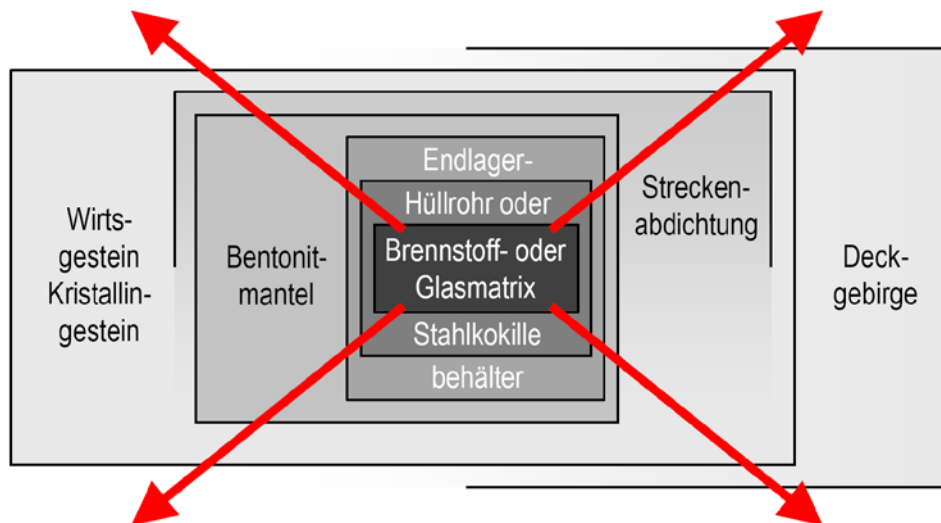


Abbildung 6.1: Konzept eines Barrierensystems in Kristallingestein. Die roten Linien deuten auf verschiedene Transportpfade hin, die zum Teil nicht alle Teile des Barrierensystems sequenziell durchlaufen bzw. Teile der lokalen geologischen Gegebenheiten (vorhandenes oder fehlendes Deckgebirge) betreffen, die nicht zum Einschluss beitragen.

Die wesentlichen Elemente des Sicherheitskonzepts für Endlagersysteme in Kristallingestein beruhen auf nachfolgenden Eigenschaften des Kristallingesteins (vgl. Tabelle 3-4 in [2]):

- Kristallingestein verfügt über gute gebirgsmechanische Eigenschaften, was Auffahrungen ohne Ausbau mit hoher Standsicherheit ermöglicht,
- Kristallingesteine können ausgedehnte Körper mit großer lateraler und vertikaler Ausdehnung und oft zentral guter Homogenität bilden, in denen flexibel ein Lager platziert werden kann,
- Kristallingestein hat eine mittlere Wärmeleitfähigkeit (verglichen mit anderen Gesteinen, [3]) und einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, was bei der Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle nur beschränkte thermisch induzierte Spannungen verursacht,
- Kristallingestein hat in ungestörten Bereichen eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und Wassergehalte $< 0,5 \%$,
- Kristallingestein ist sehr gering wasserlöslich und sehr erosionsresistent,
- in den Kluftsystemen von Kristallingesteinen können sich sekundäre Tonminerale bilden, die erhöhte Sorptionskapazität haben.

Es ist dabei zu beachten, dass

- Kristallingestein oft schwach alkalische, vergleichsweise gering mineralisierte Porenwässer besitzt und unter derartigen Bedingungen kolloidale Radionuklidverbindungen in Lösung stabilisiert und mobilisiert werden,
- Kristallingestein praktisch ausschließlich in geklüftetem Zustand vorliegt und die vorhandenen vernetzten Kluftsysteme nur sehr beschränkt detektiert werden können.

Die wichtigsten sich daraus ergebenden technischen und konzeptionellen Maßnahmen sind im Einzelnen:

- Zur Einlagerung wird ein wenig geklüfteter und möglichst bzgl. vorhandener Klüfte gut prognostizierbarer Gesteinskörper gesucht, der in einem tektonisch ruhigen Umfeld liegt (geringe Hebung, geringe Seismizität).
- Für den Einschluss der Radionuklide ist ein Endlagerbehältersystem mit einer Lebensdauer von etwa einer Million Jahren (sehr geringen Korrosionsraten) und kontrollierbar hoher Produktionsqualität vorzusehen.
- Zur Verringerung des Effekts der Wasserzuflüsse durch Kluftsysteme sind die einzelnen Endlagerbehälter mit weiteren Barrieren aus hinreichend isolierendem und rückhaltendem Material (Bentonitmantel) zu umschließen.

Der sichere Einschluss (bzw. die langfristige Retardierung des Radionuklidtransports) wird durch eine Abfolge von Barrieren gewährleistet. Das System gestaffelter sicherheitsrelevanter Komponenten besteht aus mehreren technischen und mindestens einer geotechnischen Barriere. Die natürliche Barriere hat unterstützende Funktion. Das Barrierensystem umfasst angelehnt an das schwedische KBS-3-Konzept [4] folgende Barrieren:

- die Abfallform, bestehend aus den radioaktiven Abfällen (Brennstoffpellets), welche in mit wenigen Ausnahmen intakten Brennstabhüllrohren vorliegen, sowie in Deutschland aus der Glasmatrix mit Abfallprodukten aus der Wiederaufarbeitung, die sich in dicht verschweißten Edelstahlkokillen befinden,
- den Endlagerbehälter als wichtigste Barriere, der die Radionuklide über einen langen Zeitraum einschließen soll (in Deutschland über den Zeitraum von einer Million Jahre),
- einen Bentonitmantel, der Hohlräume in den Einlagerungsbohrlöchern ausfüllen, zum sicheren Einschluss der Abfallgebände beitragen, den Zutritt von Wasser minimieren, günstige hydrogeochemische Verhältnisse für eine möglichst langsame Korrosion der Endlagerbehälter schaffen, mikrobielles Wachstum behindern und langfristig Radionuklide bei beginnender Undichte der Endlagerbehälter zurückhalten soll,
- Streckenabdichtungen (als Widerlager für den Bentonit und zur hydraulischen Abtrennung der versetzten Transport- und Zugangsstrecken gegenüber nicht sicherheitsrelevanten Lagerteilen und Zugängen nach Übertage, zur Begrenzung der Strömung von Kluftwässern und zur thermischen Pufferung und Sorption austretender Radionuklide) sowie
- das geklüftete Kristallingestein (u. a. zum langfristigen mechanischen Schutz der wesentlichen Barrieren).

Varianten des KBS-3-Konzepts unterscheiden sich dahingehend, dass die Einlagerung der Endlagerbehälter vertikal (KBS-3V-Konzept [4]) oder horizontal (KBS-3H-Konzept [5]) erfolgt. Dabei sind seitens Finnland und Schweden zur horizontalen Lagerung auch leicht abweichende Barrierensysteme mit Einsatz von sogenannten „Supercontainern“ (kupferummantelten Endlagerbehältern, umgeben von Bentonit und einem äußeren perforierten Metallzylinder aus Titan) vorgeschlagen worden [5]. Alternativ sind auch Konzepte vorgeschlagen worden, in denen oberhalb des Bentonitmantels ein Hartgesteinswiderlager eingesetzt wird (Kapitel 9.1 in [6]). Dieses Widerlager kann aus zerkleinertem Ausbruchsmaterial erstellt werden und dient insbesondere dazu, den Bentonitmantel in seiner Position zu fixieren. Zur Verbesserung der Rückholbarkeit und Ermöglichung der Bergung ist darüber hinaus auch ein Gusseisenliner, der die Einlagerungsstrecke gegen das Wirtsgestein auskleidet (Kapitel 9.2 in [6]), vorgeschlagen worden. Der Bentonitmantel würde in diesem Konzept durch Sand ersetzt. Zwischen Sandfüllung und Hartgesteinswiderlager wäre ein mehrere Meter mächtiges „Bentonit-Dichtelement“ vorgesehen. Eine detaillierte Darstellung der Anforderungen an die einzelnen Barrieren dieses Konzepts findet sich in Kapitel 9 in [6].



Abbildung 6.2: Wesentliche Barrieren und deren erwarteter prinzipieller Wirkungszeitraum in Kristallingestein gemäß schwedischem KBS-3-Konzept [4]. Der Schattierungsverlauf entspricht keiner exakten Lebensdauer der Barriere, sondern soll lediglich einen Trend andeuten (dunkle Schattierung bedeutet Wirksamkeit).

* (Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkokille)

6.2 Umsetzbarkeit der Anforderungen

Im Folgenden wird geprüft, inwieweit mit dem in Abbildung 6.1 dargestellten Barrierensystem im Kristallingestein die Anforderungen gemäß Kapitel 5 prinzipiell erfüllbar sind. Ein Nachweis, dass die in Kapitel 5 genannten Anforderungen tatsächlich erfüllt werden, muss später im Rahmen des durchzuführenden Genehmigungsverfahrens erfolgen.

Zu erfüllende Anforderungen aus StandAG [1]:

- **Einschlusswirksamkeit:** Die isolierende Eigenschaft des Barrierensystems stützt sich langfristig insbesondere auf den Endlagerbehälter, dessen Dicke und Korrosionseigenschaften. Der Einschluss wird durch den Bentonitmantel unterstützt, der den Wasserzutritt minimiert, ein korrosionshemmendes geochemisches Milieu aufrechterhält und langfristig auch den Transport der meisten migrierenden Radionuklide verzögern kann. Das Wirtsgestein (mechanischer Schutz) sowie günstige hydrogeologische und hydrogeochemische Verhältnisse tragen zur langfristigen Aufrechterhaltung des Einschlusses bei; entsprechende Studien (z. B. [6]) legen nahe, dass diese Anforderung unter bestimmten Bedingungen erfüllbar ist. Um die Einschlusswirksamkeit zu gewährleisten, ist ein entsprechend gebrauchstauglicher Abfallbehälter für eine Million Jahre noch zu entwickeln. Inwiefern die Einschlusswirksamkeit, die insbesondere durch den Behälter gewährleistet wird, über den vom StandAG geforderten Zeitraum von eine Million Jahre (§ 1 Abs. 2 in [1]) nachgewiesen werden kann, muss jedoch erst überprüft werden. Es kann deshalb derzeit nicht (weder positiv noch negativ) festgestellt werden, ob die Anforderung prinzipiell erfüllbar ist oder nicht.

- **Dauerhaftigkeit:** Die Einschlusswirksamkeit ist dauerhaft gegeben, sofern die Barrieren nicht durch geologische Prozesse (Erdbeben, wechselnde geochemische Bedingungen, Erosion der Bentonitbarriere) während des Nachweiszeitraumes sicherheitsrelevant geschädigt werden. Die Anforderung der Dauerhaftigkeit ist prinzipiell erfüllbar, muss aber durch eine geeignete Standortwahl erreicht werden.
- **Verträglichkeit:** Zwischen den einzelnen Barrieren bestehen keine gravierenden Triebkräfte für chemische Reaktionen, die das Endlagersystem negativ beeinflussen. Der Bentonitmantel soll korrosionshemmende geochemische Verhältnisse bewirken. Die Anforderung ist prinzipiell erfüllbar.
- **Technische Umsetzbarkeit:** Zur Herstellung der verschiedenen Barrieren (Endlagerbehälter, Bentonitmantel, Verschlussbauwerke) liegen aus Schweden (z. B. [7]) bereits Erfahrungen in der Umsetzbarkeit vor und es kann bei Bedarf auf diese Erfahrungen zurückgegriffen werden. Vor diesem Hintergrund ist die Anforderung Technische Umsetzbarkeit prinzipiell erfüllbar.
- **Rückholbarkeit:** Bis zum Lagerverschluss können die Einlagerungsschritte mit relativ geringem Aufwand rückgängig gemacht werden. Da die Endlagerbehälter auch über den Verschluss des Lagers hinaus Ihre Integrität beibehalten sollen, wird davon ausgegangen, dass die Endlagerbehälter auch rückgeholt werden können [8]. Für eine verbesserte Rückholbarkeit wurde in [6] das zusätzliche Einbringen eines Gusseisenliners vorgeschlagen (dafür wird auf eine direkte Bentonitummantelung der Endlagerbehälter verzichtet). Die Anforderung der Rückholbarkeit ist prinzipiell erfüllbar.
- **Ermöglichung der Bergung:** Für die Endlagerbehälter wird über einen Zeitraum von 500 Jahren von dessen Integrität bzgl. Radionuklidfreisetzung ausgegangen. Die Anforderung ist prinzipiell erfüllbar.
- **Wartungsfreiheit:** Das hier skizzierte Barrierensystem ist auf Wartungsfreiheit nach dem Lagerverschluss ausgerichtet. Die Anforderung ist prinzipiell erfüllbar.

Zusätzlich zu betrachtende Anforderungen:

- **Ausschluss Kritikalität:** Das Barrierensystem ist auf den Ausschluss von Kritikalität über den Betrachtungszeitraum ausgerichtet. Unter Berücksichtigung der Einlagerung des Brennstoffs in kleine, räumlich getrennte Einheiten und der im Endlagersystem langfristig auftretenden Prozesse ist ausschließbar, dass der Zustand der Kritikalität erreicht wird. Die Anforderung ist prinzipiell erfüllbar.
- **Funktionsfähigkeit:** Mit Ausnahme des zu Beginn nicht aufgesättigten Bentonitmantels und der ebenfalls aus Bentonit bzw. alternativ aus einem Bentonit-/Sandgemisch bestehenden Streckenabdichtung stehen alle Barrieren und insbesondere der Behälter sofort funktionsfähig zur Verfügung (Abbildung 6.2). Auch für den Bentonitmantel wird davon ausgegangen, dass dessen Abdichtfunktion aufgrund zufließenden Kluftwassers im Verhältnis zum Betrachtungszeitraum kurzfristig erfolgt. Die anzustrebende Anforderung nach der Funktionsfähigkeit des Barrierensystems ist prinzipiell erfüllbar.

- **Überprüfbarkeit:** Die für die stabilen geochemischen Verhältnisse wichtige Zerklüftung des Wirtsgesteins kann nur ungenügend erfasst werden. Bezüglich der wesentlichen Barrieren kann auf die schwedischen Arbeiten abgestützt werden, die entsprechende Programme zur Sicherstellung der Qualität vorsehen [4]. Auch hier gilt der Vorbehalt, dass die Einschlusswirksamkeit insbesondere der technischen Barriere Behälter über einen Zeitraum von einer Million Jahre überprüfbar sein muss. Die Anforderung ist daher prinzipiell nur teilerfüllbar.
- **Robustheit:** Die Abfallmatrix und das Hüllrohr gewährleisten gemeinsam mit dem von einer Bentonithülle ummantelten Endlagerbehälter den Einschluss. Im Versagensfall des Endlagerbehälters (d. h. falls dieser nicht über den gesamten Nachweiszeitraum stabil bleibt) kann sich die Rückhaltung nur noch auf die Bentonitbarriere abstützen, denn die Radionuklide können durch die geologische Barriere nur beschränkt rückgehalten werden. Die geologischen Randbedingungen müssen für einen langfristigen Einschluss im Endlagerbehälter auch langfristig stabile Verhältnisse bieten. Das Barrierensystem erscheint gegenüber einer Vielzahl von physikalischen und chemischen Prozessen robust und bietet unter stabilen geologischen Randbedingungen und einer beschränkten Klüftung des Wirtsgesteins (Standortwahl!) eine gewisse Robustheit. Das Ausmaß der Klüftung des Wirtsgesteins und deren zukünftige Entwicklung sind jedoch bei der Standortcharakterisierung nur beschränkt erfass- bzw. beschreibbar. Die Anforderung ist damit prinzipiell nur teilerfüllbar bzw. deren Erfüllung nur beschränkt nachweisbar.

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Anforderungen aus dem StandAG [1] prinzipiell mit den betrachteten Barrierensystemen erfüllt werden können. Jedoch ergeben sich kritische Aspekte aus der Forderung des StandAG nach einem Nachweis für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle über eine Million Jahre. In einem Endlager im Kristallingestein ist das Behälter/Bentonitmantel-System wesentliche Barriere, die diesen Einschluss gewährleisten muss. Wie die Bewertung der langfristigen Einschlussfähigkeit dieses technischen Barrierensystems erfolgen kann, ist derzeit offen. Eine Bewertung der Rückhaltefähigkeit der Radionuklide in der geologischen Barriere ist nur bedingt möglich, da die Zerklüftung des Wirtsgesteins, die in bedeutender Weise die Wasserverhältnisse um das Lager, die Möglichkeit der Erosion des Bentonitmantels sowie die lokalen geochemischen Verhältnisse und die langfristige Migration von Radionukliden mitbestimmt, nur eingeschränkt überprüfbar ist. Inwiefern ein Konzept wie es in Skandinavien verfolgt wird, die Anforderung des StandAG erfüllen kann, muss daher noch geklärt werden.

Die wichtigste Aufgabe des Wirtsgesteins ist es, die wesentlichen Barrieren vor Einflüssen von außen zu schützen. Die Sicherheitsfunktionen in einem Endlager im Kristallingestein werden damit nahezu vollständig durch technische Barrierensystemen getragen, deren Funktionsfähigkeit in einem hohen Maße auch auf der fehler- und mängelfreien Herstellung der Behälter, der Bentonitblöcke und der Bentonitbarriere insgesamt beruht.

Im Vergleich zwischen den schwedischen Vorgaben [9, 10] und den Anforderungen in Deutschland [1, 2] ist anzumerken, dass der Nachweiszeitraum gemäß § 1 Abs. 2 [1] eine Million Jahre umfasst, wohingegen die Vorgaben in Schweden eine gestufte Betrachtung vorsehen. Eine quantitative Risikoanalyse wird nur für 100.000 Jahre gefordert. Der Nachweis einer Eignung des schwedischen KBS3-Konzepts unter dem in [1] geforderten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre ist zum jetzigen Zeitpunkt noch ausstehend, aber es ist

nicht prinzipiell auszuschließen, dass er geführt werden kann. Alternativ ist ein eigenes Behälterkonzept zu entwickeln.

7 Das Barriersystem in Steinsalz

7.1 Sicherheitskonzept und Barriersystem

Das Sicherheitskonzept für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Steinsalz beruht auf dem Prinzip des Konzentrierens und des langfristigen Einschlusses der radioaktiven Abfälle in einem ewG. Die eingelagerten Abfallgebinde sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit technischen und geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden. Der langfristige Einschluss soll durch den ewG, d. h. die geologische Barriere im Verbund mit den geotechnischen Barrieren nachsorgefrei und dauerhaft sichergestellt werden. Dazu soll die Barrierenfunktion des ewG im Nachweiszeitraum weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt werden.

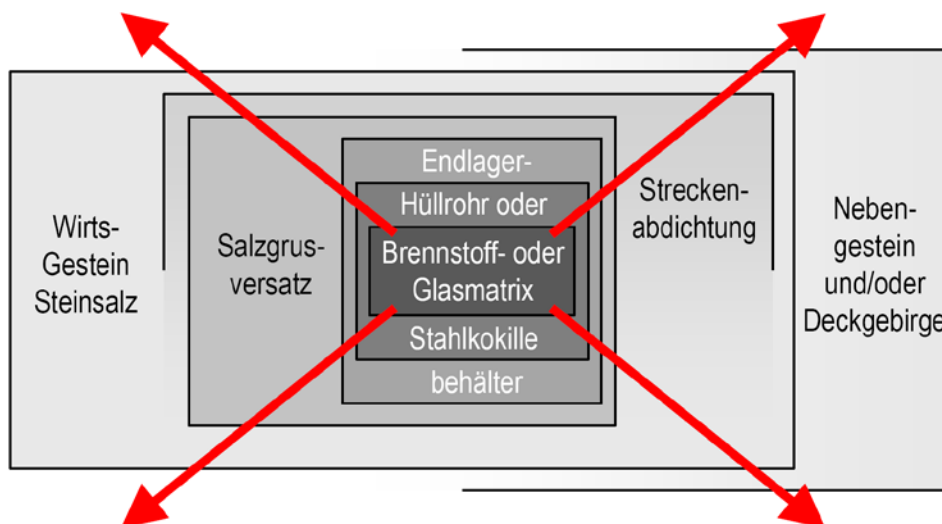


Abbildung 7.1: Konzept eines Barriersystems in Steinsalz. Die roten Linien deuten auf verschiedene Transportpfade hin, die zum Teil nicht alle Teile des Barriersystems sequenziell durchlaufen bzw. Teile der lokalen geologischen Gegebenheiten (vorhandenes oder fehlendes Deckgebirge) betreffen, die nicht zum Einschluss beitragen.

Das Sicherheitskonzept wird aus den Anforderungen in Kapitel 5 unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Wirtsgesteins Steinsalz entwickelt, indem die konkreten Zielsetzungen (Anforderungen an das Endlagerkonzept) abgeleitet und die für die Zielerreichung erforderlichen strategischen, planerischen Maßnahmen festgelegt werden.

Das Wirtsgestein Steinsalz tritt meist als großräumiger Homogenbereich auf (Steinsalz in steiler und in flacher Lagerung). Die Auswirkungen des Eingriffs in diesen Homogenbereich – durch die Auffahrung des

Endlagerbergwerks – können bei geeigneter Planung des Einlagerungs- und Verschlusskonzepts und unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Salzes minimiert werden.

Die wesentlichen Elemente des Sicherheitskonzepts für Endlagersysteme in Steinsalz beruhen auf den Eigenschaften des Steinsalzes im Hinblick auf den langfristigen Einschluss. Diese sind:

- Steinsalz verfügt über eine geringe hydraulische Durchlässigkeit, advective und diffusive Transporte von Radionukliden sind vernachlässigbar klein,
- Steinsalz liegt in großer räumlicher Ausdehnung und Mächtigkeit als Homogengestein vor,
- Steinsalz verhält sich unter Druck plastisch, d. h. vernetzte Kluftsysteme treten in den Homogenbereichen nicht auf, Hohlraumkonvergenz führt langfristig zum Verschluss der bergbaulichen Auffahrungen wie Schächte und Strecken,
- Steinsalz besitzt nur eine geringe Eigenfeuchte,
- Steinsalz zeichnet sich durch eine hohe Temperaturverträglichkeit, verbunden mit einer guten Wärmeleitfähigkeit aus, was den Abbau von Thermospannungen begünstigt,
- Steinsalz verfügt über gute gebirgsmechanische Eigenschaften, was Auffahrungen nahezu ohne speziellen Ausbau ermöglicht.

Es ist dabei zu beachten, dass

- Steinsalz bei einem Wasserzutritt von außen, verglichen mit anderen Wirtsgesteinen, relativ gut löslich ist, sodass Auf- und Umlöseprozesse möglich sind,
- Steinsalz im Falle eines Salzlösungskontakts mit Abfällen eine nur geringe Rückhaltefähigkeit für Radionuklide besitzt.

Die Umsetzung des Sicherheitskonzepts in ein Barrierensystem führt zur Ableitung von technischen und konzeptionellen Maßnahmen, die je nach Einlagerungskonzept unterschiedlich sind. Die wichtigsten technischen und konzeptionellen Maßnahmen sind:

- Zur Einlagerung wird ein gut explorierbarer Gesteinskörper in einem tektonisch ruhigen Umfeld (geringe großräumige Hebung, geringe Salzstockhebung, geringe Seismizität) gesucht.
- Bei der Endlagerauslegung wird ein ewG ausgewiesen, der im Nachweiszeitraum integer bleiben muss und dessen Barrierenfunktion weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt werden soll.

- Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in Salzgesteinsbereichen mit homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf ihre Einschlusseigenschaften, aufgeföhren. Die Bereiche sollen frei von sicherheitsrelevanten Lösungseinschlüssen sein und günstige Kriecheigenschaften aufweisen, um eine schnelle Umschließung der Abfälle zu erreichen.
- Bei der Planung und Auslegung des Verfüll- und Verschlusskonzepts wird auf Materialien zurückgegriffen, die kompatibel mit dem Wirtsgestein sind. Insbesondere ist der Einsatz von arteigenem Material wie Salzgrus oder Salzformsteine vorgesehen.
- Die hohe Plastizität des Steinsalzes, insbesondere unter Temperatureinfluss, führt einerseits zu einer schnellen Umschließung der eingelagerten Abfälle und andererseits zu einer schnellen Konvergenz der Hohlräume und damit zur Kompaktion des Salzgrusversatzes mit maßgeblicher Verringerung seiner Porosität und Permeabilität. Nach einer Übergangsphase erreicht der Salzgrusversatz eine Einschlusswirksamkeit, die vergleichbar ist mit der des ungestörten Steinsalzes.
- Tagesschächte und Zugangsstrecken werden mit Abdichtbauwerken (Barrieren) versehen. Für die Verschlussbauwerke gelangen soweit wie möglich arteigene Materialien zum Einsatz.
- Die mit den Abfällen bzw. dem Versatz in die Einlagerungsbereiche eingebrachte Feuchtigkeit wird minimiert, um die Korrosion der Endlagerbehälter zu reduzieren.
- Sicherheitsabstände zu anderen Gesteinsschichten (Carnallit, Hauptanhydrit, Salzstockflanken) sowie eine ausreichende Mächtigkeit der hangenden Gesteinsschichten zum Schutz des ewG (z. B. ausreichende Teufe) werden berücksichtigt.
- Eine Kritikalität wird durch entsprechende Beladung und Einlagerungsplanung ausgeschlossen.

Der sichere Einschluss wird durch die Abfolge von Barrieren gewährleistet. Es handelt sich um ein Barrierensystem gestaffelter sicherheitsrelevanter Komponenten, bestehend aus technischen und natürlichen Barrieren. Das Barrierensystem umfasst dabei mindestens folgende Barrieren:

- die Abfallform, bestehend aus den radioaktiven Abfällen (Brennstoffpellets), welche in mit wenigen Ausnahmen intakten Brennstabhüllrohren vorliegen, sowie aus der Glasmatrix mit Abfallprodukten aus der Wiederaufarbeitung, die sich in dicht verschweißten Edelstahlkokillen befinden,
- den Endlagerbehälter, der den vollständigen Einschluss der Radionuklide über den Zeitraum sicherstellt, bis die Strecken- und Schachtverschlüsse wirksam sind,
- den Salzgrusversatz der Einlagerungshohlräume, welcher der Hohlraumverfüllung dient und nach seiner Kompaktion nahezu die Einschlusseigenschaften des Steinsalzes aufweist, und so einerseits den vollständigen Einschluss der Abfallbehälter und andererseits eine hydraulische Abschirmung gegen externe Lösungen bewirkt,

- die Streckenverschlüsse, die als frühzeitig wirkende Barrieren eine hydraulische Abschirmung der Einlagerungsbereiche (insbesondere der Einlagerungshohlräume) gegen externe Lösungen bewirken,
- den Salzgrusversatz im restlichen Endlagerbergwerk (z. B. Transportstrecken, Infrastrukturbereiche), welcher der Hohlraumreduzierung dient und nach seiner Kompaktion einerseits zur Stabilisierung beiträgt und andererseits langfristig eine hydraulische Abschirmung gegen externe Lösungen bewirkt,
- die Schachtverschlüsse mit ihren Abdichtungen, die als frühzeitig wirkende Barrieren eine hydraulische Abschirmung des Endlagerbergwerks gegen externe Lösungen bewirken,
- das Wirtsgestein des ewG, das aufgrund seiner langfristigen Einschlusseigenschaften die Freisetzung von Radionukliden durch Migration verhindert und die Abfälle vor dem Zutritt von Fluiden schützt, die einen Radionuklidtransport begünstigen (hydraulische Abschirmung),
- die weiteren geologischen Barrieren (der nicht zum ewG gehörige Anteil des Wirtsgesteins und, wenn vorhanden, das Deck- und Nebengebirge), welche den langfristigen (hydraulischen und mechanischen) Schutz des ewG übernehmen.

In Abbildung 7.2 ist schematisch dargestellt, wie die einzelnen Barrieren über den Nachweiszeitraum wirken und sich in ihrer Wirkung ergänzen sollen. Die Farbintensität spiegelt für die einzelnen Barrieren jeweils die Zu- bzw. Abnahme ihrer Barrierewirkung nach Verschluss des Endlagers wider.

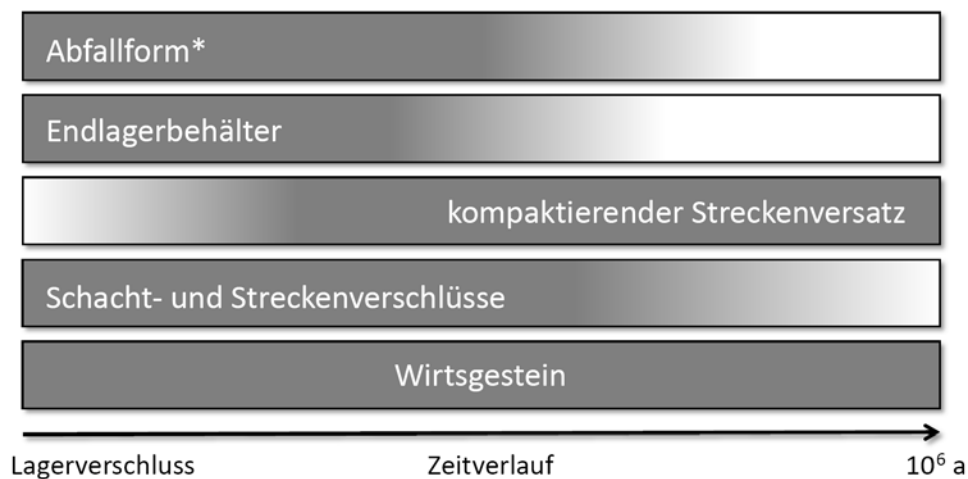


Abbildung 7.2: Wesentliche Barrieren und deren erwarteter individueller Wirkungszeitraum in Steinsalz [11]. Der Schattierungsverlauf entspricht keiner exakten Lebensdauer der Barriere, sondern soll lediglich einen Trend andeuten (dunkle Schattierung bedeutet Wirksamkeit).

* (Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkockille)

7.2 Umsetzbarkeit der Anforderungen

Im Folgenden wird geprüft, inwieweit mit dem in Abbildung 7.1 dargestellten Barrierensystem in Steinsalz die Anforderungen gemäß Kapitel 5 prinzipiell erfüllbar sind. Ein Nachweis, dass die in Kapitel 5 genannten Anforderungen tatsächlich erfüllt werden, muss später im Rahmen des durchzuführenden Genehmigungsverfahrens erfolgen.

Zu erfüllende Anforderungen aus StandAG [1]:

- **Einschlusswirksamkeit:** Die Einschlusswirksamkeit des Barrierensystems wird im gesamten Nachweiszeitraum durch die Eigenschaften des ewG gewährleistet. Hierbei ist die geologische Barriere (Steinsalz) im gesamten Nachweiszeitraum wirksam. Das Deck- und Nebengestein wirkt schützend und erhaltend auf den ewG. Die technischen Barrierenkomponenten, wie die Abfallmatrix, das Abfallgebände sowie die Verschlüsse, wirken zeitlich gestaffelt für die Zeitspanne, bis der Versatz aufgrund der Konvergenz des Wirtsgesteins soweit verdichtet ist, dass er seine Einschlusswirksamkeit erreicht. Seine Wirkungsdauer reicht bis zum Ende des Nachweiszeitraums (Abbildung 7.2). Die Anforderung ist damit bei geeigneter Standortauswahl prinzipiell erfüllbar.
- **Dauerhaftigkeit:** Nach der Auswahl eines geeigneten Standorts und Ausweisung eines ewG wird unter Berücksichtigung der zu unterstellenden Entwicklungen des Endlagersystems das technische und geotechnische Barrierensystem so ausgelegt, dass für das Gesamtsystem die Dauerhaftigkeit des Einschlusses sowie die Begrenzung eines Zutritts von externen Lösungen über den gesamten Nachweiszeitraum gemäß § 1 Abs. 2 [1] gewährleistet werden kann. Die Anforderung ist bei geeigneter Standortwahl prinzipiell erfüllbar.
- **Verträglichkeit:** Die einzelnen Barrieren werden so ausgelegt und durch Materialauswahl und Auslegung so aufeinander abgestimmt, dass eine maßgebliche Beeinträchtigung ihrer Barrierenwirksamkeit durch interne und externe Prozesse (z. B. Temperaturentwicklung, chemische Wechselwirkung, Korrosion) in ihrem Wirkungszeitraum nicht zu besorgen ist. So ist beispielsweise das geotechnische Barrierensystem keinen gravierenden Triebkräften für chemische Reaktionen ausgesetzt, wenn arteigene Materialien für die Verschlüsse und den Versatz verwendet werden. Die Verschlüsse müssen so positioniert werden, dass die Temperaturbelastung der Verschlüsse begrenzt bleibt. Ebenso tragen die Verschlussysteme in Materialwahl und Auslegung den zu erwartenden Korrosionsbedingungen Rechnung. Die Anforderung Verträglichkeit ist bei geeigneter Planung des Endlagers und des Barrierensystems prinzipiell erfüllbar.
- **Technische Umsetzbarkeit:** Zur Herstellung der technischen und geotechnischen Barrieren (Endlagerbehälter, Versatztechnik, Verschlussbauwerke) liegen bereits Erfahrungen zur technischen Umsetzung vor, insbesondere für die Verschlussbauwerke und die Versatztechnologie. In großmaßstäblichen Experimenten konnten die technische Umsetzbarkeit der Barrieren sowie die Erfüllung der an sie gestellten Anforderungen prinzipiell gezeigt werden (z. B. [12]). Es kann somit sowohl für die geologische als auch für die technischen Barrieren auf weitgehende Erfahrungen zurückgegriffen werden. Die Anforderung Technische Umsetzbarkeit ist bei entsprechender Endlagerplanung prinzipiell erfüllbar.

- **Rückholbarkeit:** Bislang liegen Konzeptplanungen zur Rückholbarkeit vor [11]. Diese zeigen auf, dass bis zum Lagerverschluss die Einlagerungsschritte prinzipiell mit Aufwand rückgängig gemacht werden können, da das gesamte Equipment für die Einlagerung noch verfügbar ist. Die Konzeptplanungen lassen erwarten, dass die Anforderung prinzipiell erfüllbar ist.
- **Ermöglichung der Bergung:** Für die Bergung der Abfälle in einem Zeitraum bis 500 Jahren ist ein entsprechend gebrauchstauglicher Abfallbehälter zu entwickeln. Die Anforderung Ermöglichung der Bergung ist prinzipiell erfüllbar.
- **Wartungsfreiheit:** Die Auslegung des Barrierensystems ist auf eine langfristige Wartungsfreiheit ausgerichtet. Die Anforderung ist prinzipiell erfüllbar.

Zusätzlich zu betrachtende Anforderungen:

- **Ausschluss Kritikalität:** Das Barrierensystem ist auf den Ausschluss von Kritikalität über den Betrachtungszeitraum ausgerichtet. Das Einlagerungskonzept muss vorsehen, den abgebrannter Brennstoff in kleine, räumlich getrennte Einheiten einzulagern und die Konzentrierung des spaltbaren Materials in den Abfällen gering zu halten, sodass auch unter den langfristig ablaufenden Prozessen Kritikalität ausgeschlossen werden kann. Die Anforderung ist bei geeigneter Endlagerplanung prinzipiell erfüllbar.
- **Funktionsfähigkeit:** Zu Beginn der Nachbetriebsphase, bei dem der Versatz noch keine ausreichende Barrierenwirksamkeit erreicht hat, wirken die Barrieren Steinsalz, Behälter und Verschlussbauwerke abdichtend. In der Nachverschlussphase entfaltet der Versatz seine volle Barrierenwirksamkeit und stellt den Einschluss im Verbund mit der Steinsalzbarriere langfristig sicher. Die Funktionsfähigkeit des Barrierensystems wird durch die Summe der Wirksamkeiten der einzelnen Barrieren zu jedem Zeitpunkt gewährleistet (Abbildung 7.2). Die Anforderung ist bei Auswahl eines geeigneten Endlagerstandorts und bei geeigneter Endlagerplanung prinzipiell erfüllbar.
- **Überprüfbarkeit:** Die Geometrie des Steinsalzkörpers kann gut durch entsprechende Messverfahren von übertage erfasst und auf die erforderlichen Abmessungen (Volumen des Salzkörpers) überprüft werden. Über die Innenstruktur eines Salzkörpers kann von übertage nur bedingt eine Aussage gemacht werden. Daher sind zur Konformitätsüberprüfung der Eigenschaften des Wirtsgesteins (z. B. dessen Abmessungen, Homogenität, Dichtheit) Untersuchungen von untertage erforderlich. Mit diesen können Homogenbereiche ausgewiesen und Fazieswechsel erkannt werden. Zur Überprüfung der technischen und geotechnischen Barrieren liegen aus den großmaßstäblichen Experimenten Erfahrungen vor, wie die Spezifikationen der einzelnen Barrieren sicher zu erreichen sind. Die Dauerhaftigkeit der Barrierenwirksamkeit innerhalb ihrer Wirkungsdauer ist direkt nicht überprüfbar. Sie kann dennoch aus den Eigenschaften der Einzelbarrieren sowie des Barrierensystems begründet abgeleitet werden. Die Anforderung ist bei entsprechender Endlagerplanung prinzipiell erfüllbar.

- **Robustheit:** Die technischen und geotechnischen Komponenten des Barrierensystems werden nach einschlägigen technischen Regeln unter Berücksichtigung von konservativen Annahmen ausgelegt und dadurch Robustheit eingeplant. Im Salinar ist davon auszugehen, dass der ewG nur einen Teil des Wirtsgesteins einnimmt, das wiederum von Deck- und Nebengesteinen eingeschlossen sein kann. Das über den ewG hinausgehende Wirtsgestein als auch das Deck- und Nebengebirge können eine zusätzliche Robustheit beim Schutz des ewG darstellen. Bei geeigneter Standortauswahl und geeigneter Endlagerplanung sowie durch die günstigen Wirtsgesteinseigenschaften kann das Barrierensystem derart ausgelegt werden, dass auch unter extremen Entwicklungen des Endlagersystems mit seinen physikalischen und chemischen Prozessen der Einschluss gewährleistet werden kann. Insbesondere die aus unterschiedlichen Materialien aufgebauten jeweiligen Barrieren mit sich überschneidenden Wirkungen und Wirkzeiträumen (Abbildung 7.2) tragen wesentlich zur Robustheit des Systems bei. Die Anforderung ist damit prinzipiell erfüllbar.

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass bei geeigneter Standortauswahl und Endlagerplanung alle Anforderungen aus [1] sowie die zusätzlich betrachteten Anforderungen prinzipiell mit dem betrachteten Barrierensystem in Steinsalz als erfüllbar angesehen werden. Die dauerhafte Wirksamkeit des Barrierensystems kann durch die Wahl zeitlich gestaffelt wirkender Komponenten, deren Wirkung und Wirkungsdauer zeitlich aufeinander abgestimmt sind, gewährleistet werden. So wird die verzögert einsetzende Wirkung des Streckenversatzes durch frühzeitig wirkende Barrieren (Behälter, Strecken- und Schachtabdichtungen) in der Übergangsphase aufgefangen.

8 Das Barrierensystem in Tongestein

8.1 Sicherheitskonzept und Barrierensystem

Tonreiche Gesteine werden in mehreren Ländern (Belgien, Frankreich, Schweiz) aufgrund ihres hohen Einschlussvermögens als Wirtsgesteinsoption für die Lagerung hoch radioaktiver Abfälle verfolgt. Der Begriff „tonreich“ bedeutet, dass das Gestein zu signifikanten Anteilen aus quellfähigen Tonmineralen besteht. Dabei sind insbesondere geologische Randbedingungen von Vorteil, bei denen das Gestein in seiner geologischen Geschichte möglichst wenig deformiert (laterale Extrapolierbarkeit der lithologischen Bedingungen) und erwärmt worden ist (Erhalt der Quellfähigkeit der Tonminerale). Aufgrund der geomechanischen Eigenschaften von Tongestein (Festigkeit, Steifigkeit) ist bei zunehmender Tiefe beim Auffahren untertägiger Hohlräume mit einer zunehmenden Größe der Auflockerungszonen zu rechnen, in denen die Eigenschaften des Tongesteins nachweislich geschädigt werden [13]. Infrage kommende Tongesteinsoptionen für die Endlagerung zeigen jedoch andererseits, dass durch tektonische Bewegungen entstandene Strukturen im Gestein aufgrund der Quellfähigkeit der Tonminerale wieder abgedichtet werden können [14].

Das Sicherheitskonzept eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle in einem tonreichen Wirtsgestein beruht wie bei Kristallingestein und Steinsalz auf dem Prinzip des Konzentrierens und langfristigen Einschlusses der radioaktiven Abfälle. Innerhalb des Endlagerbehälters ist die Abfallform (d. h. Brennstoffmatrix mit Hüllrohren oder Glasmatrix mit Edelstahlkokillen) für die langzeitliche Entwicklung als Barriere relevant (Abbildung 8.1). Der Endlagerbehälter wird von den Barrieren der Streckenverfüllung aus Bentonit und dem Wirtsgestein geschützt. Der Barriere Tongestein kommt aufgrund ihrer Ausdehnung, Abdichtung (aufgrund

der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit und der Quellfähigkeit) und Rückhalteigenschaften (langfristige Immobilisierung durch Sorption der meisten migrierenden Radionuklide auf den Oberflächen der Tonminerale in den Streckenverfüllungen und im Wirtsgestein) eine übergeordnete Funktion zu. Wie beim Barriersystem für Steinsalz stellt das Wirtsgestein die Hauptbarriere dar. Wie bei einem Endlager im Steinsalz wird auch bei einem Endlager im Tongestein ein ewG ausgewiesen, der jedoch ggf. auch ober- und unterhalb des Wirtsgesteins weitere tonreiche Gesteinsschichten einbeziehen kann.

Zwischen den aktuellen französischen und schweizerischen Barriersystemen für ein Endlager in Tongestein zeigen sich Unterschiede: Das französische Konzept geht von horizontalen, ca. 40 m langen Einlagerungsbohrlöchern von ca. 70 cm Durchmesser aus, deren Hohlraum zunächst durch einen eingepressten Eisenliner gesichert und in den anschließend der Endlagerbehälter eingeschoben wird [15]. Dabei sind die einzelnen Endlagerbehälter maximal 1,6 m lang. Das schweizerische Konzept geht von einem Stollenausbau mittels Spritzbeton oder vorgefertigten Zementelementen (Tübbing) aus, die eine horizontale Einlagerungsstrecke von 3 m Durchmesser sichern, in die ein Endlagerbehälter achsenmittig auf einem Sockel aus gepressten Bentonitblöcken gestellt und die Strecke anschließend mit Bentonitgranulat verfüllt wird [16]. Während gemäß dem französischen Konzept nur Edelstahlkokillen mit hoch radioaktiven Gläsern eingelagert werden, ist das schweizerische Konzept auf die Einlagerung von abgebrannten Brennelementen und hoch radioaktiven Gläsern ausgerichtet, wodurch der schweizerische Endlagerbehälter einen Durchmesser von 1 m hat und ca. 5 m lang ist. Die Einlagerungsstrecken im französischen Konzept sind mit 40 m deutlich kürzer als die schweizerischen (300 bis 1.000 m lang [16]), in denen die einzelnen Endlagerbehälter auch durch nur mit Bentonitgranulat verfüllte horizontale Abschnitte voneinander getrennt werden.

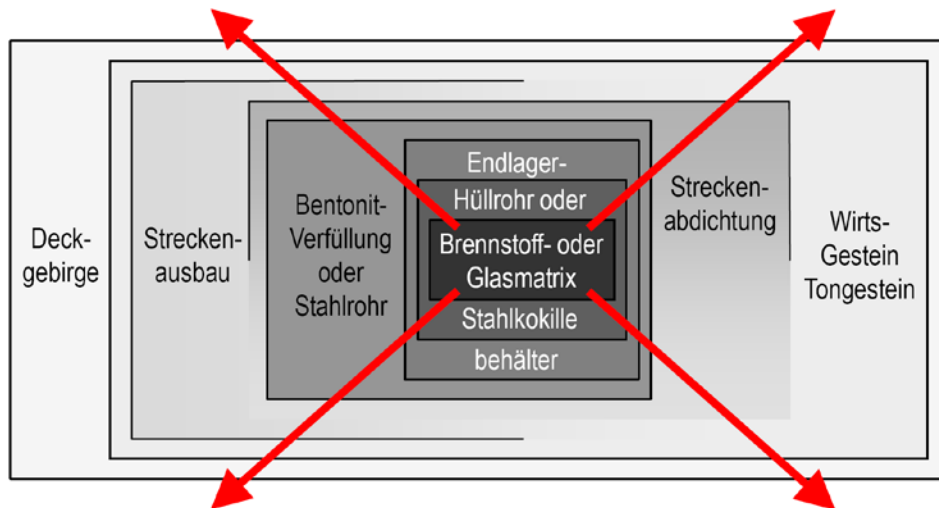


Abbildung 8.1: Konzept eines Barriersystems in einem Tongestein. Die roten Linien deuten auf verschiedene Transportpfade hin, die zum Teil nicht alle Teile des Barriersystems sequenziell durchlaufen bzw. Teile der lokalen geologischen Gegebenheiten (vorhandenes oder fehlendes Deckgebirge) betreffen, die nicht zum Einschluss beitragen.

Die wesentlichen Elemente des Sicherheitskonzepts für Endlagersysteme in Tongestein beruhen auf den Eigenschaften des Tongesteins (vgl. Tabelle 3-3 in [2]). Aufgrund der Sedimentations- und Diageneseprozesse

können die Eigenschaften von Tongesteinen jedoch erheblich variieren und müssen deshalb standortspezifisch bewertet werden. Unter günstigen Bedingungen können folgende Eigenschaften vorhanden sein, die im Hinblick auf den langfristigen Einschluss von Radionukliden von Bedeutung sind:

- ausgedehnte laterale Homogenität in marinen Tongesteinen,
- geringe hydraulische Durchlässigkeit und Grundwasserfließgeschwindigkeit (diffusionsdominierter Stofftransport, stabiles hydrodynamisches Regime),
- geringe Porosität und sehr kleine Porengrößen,
- plastisches Verhalten und Selbstabdichtung von einmal gebildeten Klüften,
- hohe innere Kornoberfläche mit leicht negativer Ladung und daher guten Sorptionseigenschaften für die meisten im Porenwasser gelösten relevanten Radionuklide,
- reduzierende Eigenschaften des Porenwassers in Tongestein, wodurch die Korrosionsraten gering gehalten und die Radionuklidrückhaltung begünstigt werden.

Es ist dabei zu beachten, dass

- Tongesteine oft eine vertikal beschränkte und lateral schwankende Ausdehnung haben,
- die laterale Homogenität von nicht-marinen Tongesteinen oft beschränkt ist und der Gehalt an quellbaren Tonmineralen darin variabel sein kann (höhere Ansprüche an die Erkundung),
- Tongesteine mit zunehmender Versenkungstiefe bzw. ansteigenden Temperaturen ihre Plastizität verlieren und zunehmend spröde auf Deformation reagieren, bei höheren Temperaturen Porenwasser freigesetzt wird und die Quellfähigkeit abnimmt (S. 32 in [2]),
- Tongesteine eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben,
- Tonminerale bei hohen pH-Werten nicht stabil sind (Reaktionen mit Zementstrukturen),
- Tongesteine (auch überkonsolidierte) beschränkte Festigkeiten und Steifigkeiten aufweisen und daher bautechnisch anspruchsvoll sind.

Aus dem Sicherheitskonzept für Tongestein leiten sich konkrete Anforderungen an den Endlagerstandort, das Endlagerkonzept, die Endlagerauslegung und die zu erbringenden Bewertungen ab. Wesentliche Elemente des Sicherheitskonzepts für ein Endlagersystem in Tongestein beruhen auf den langfristigen Rückhalteeigenschaften des Tongesteins, seinem abdichtenden Verhalten und seiner geringen hydraulischen Durchlässigkeit. Diese Elemente des Sicherheitskonzepts können bei einem geeigneten Standort umfassen:

- die im Gestein aufgrund der hohen Anteile von Tonmineralen große Oberfläche, auf der aufgrund der leicht negativen Ladung ein großes Potenzial zur Sorption von positiv geladenen Radionukliden vorhanden ist,
- die hohe Dichtheit von Tongestein, die zu geringer hydraulischer Durchlässigkeit führt und dadurch die Advektion von Fluid innerhalb des Gesteins stark unterbindet bzw. den Stofftransport praktisch auf Diffusion beschränkt und damit die langfristige Korrosion der Endlagerbehälter begrenzt,
- die gute laterale Prognostizierbarkeit mariner toniger Schichten im Untergrund mittels seismischer Untersuchungen und, darauf aufbauend, die Reduktion von Ungewissheiten in den lateralen Ausbreitungsmöglichkeiten der Radionuklide innerhalb des Wirtsgesteins,
- das plastische Verhalten von Tongestein (bei beschränkter Überlagerung), was in der geologischen Vergangenheit zum Verschließen gebildeter Klüfte geführt hat (entsprechende Nachweise sind aus dem Felslabor Mont Terri bekannt und standortspezifisch zu führen) und bei zukünftiger Erdbebenwirkung neugebildete Klüfte aufgrund der Quellbarkeit der vorhandenen Tonminerale abdichten wird,
- die beschränkten Festigkeiten und Steifigkeiten, die beim Auffahren untertägiger Bauten entlang der Strecken zu Auflockerungszonen führen und in großen Tiefen bautechnisch erhebliche Sicherungsmaßnahmen erfordern (zusätzliche Barriere „Streckenausbau“, Abbildung 8.1), in Gebieten starker Erosion in der Nähe der Oberfläche außerdem zur Bildung von Dekompaktionszonen mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit führen können,
- die Empfindlichkeit der Gesteine gegenüber hohen Temperatureinwirkungen (Wasserverlust der Tonminerale) und hohen pH-Werten (Instabilität der Tonminerale bei $\text{pH} > 10$).

Die wichtigsten sich daraus ergebenden technischen und konzeptionellen Maßnahmen sind im Einzelnen:

- Zur Einlagerung wird ein marin abgelagertes Gestein mit möglichst hohem Tonmineralgehalt und in der geologischen Vergangenheit beschränkter Temperatureinwirkung gesucht, das in einem tektonisch möglichst gering gestörten Umfeld liegt. Von Vorteil sind eine große vertikale und laterale Homogenität, eine große Mächtigkeit und ggf. nach unten und oben folgende, ebenfalls tonreiche Gesteine.
- Für die Begrenzung der Korrosion der Endlagerbehälter und den Einschluss der Radionuklide ist einem Gestein mit möglichst geringer hydraulischer Durchlässigkeit der Vorzug zu geben.
- Aufgrund geringer geomechanischer Festigkeiten sind Tongesteine vorzuziehen, die aufgrund zusätzlicher Mineralanteile wie Quarz und/oder Kalzit aus der geologischen Vergangenheit eine gewisse Verfestigung aufweisen (erhöhte Festigkeiten). Es sind tunnelbautechnische Vortriebsmethoden vorzusehen, die nur eine minimale Schädigung des Gesteins verursachen.

Der sichere Einschluss (bzw. die langfristige Rückhaltung von Radionukliden) ist auch für dieses Wirtsgestein durch ein Mehrfachbarrierensystem zu gewährleisten (Abbildung 8.1). Das System gestaffelter sicherheitsrelevanter Komponenten besteht aus mehreren technischen, mindestens einer geotechnischen und einer natürlichen Barriere. Es kann beispielhaft folgende Barrieren umfassen:

- die Abfallform, bestehend aus den radioaktiven Abfällen (Brennstoffpellets), welche in mit wenigen Ausnahmen intakten Brennstabhüllrohren vorliegen, sowie aus der Glasmatrix mit Abfallprodukten aus der Wiederaufarbeitung, die sich in dicht verschweißten Edelstahlkokillen befinden,
- den Endlagerbehälter (vollständiger Einschluss der Radionuklide über einen möglichst langen Zeitraum, in der Schweiz wird ein vollständiger Einschluss über mindestens 1.000 Jahre gefordert [18]),
- eine Bentonitverfüllung (nur im schweizerischen Konzept: Bentonitblöcke und -granulat, welche die Hohlräume in den Einlagerungsstrecken ausfüllen, nach einer Aufsättigungszeit für den vollständigen Einschluss der Endlagerbehälter und für eine hydraulische Trennung zwischen den Behältern sorgen, die Wasserzufuhr zu diesen und damit deren Korrosion minimieren, für eine minimale Korrosion des Endlagerbehälters günstige geochemische Verhältnisse schaffen, nach Aufsättigung in Abhängigkeit der eintretenden Verformung einen Quelldruck auf den Gebirgsstoß ausüben und langfristig aus undichten Endlagerbehältern migrierende Radionuklide zurückhalten),
- Streckenausbauten mittels Eisenliner (nur im französischen Konzept) bzw. zementbasiertem Innenausbau (nur im schweizerischen Konzept, Stabilisierung der Stollengeometrie gegenüber dem Bergdruck zur Sicherstellung einer kontrollierten Einlagerung der Endlagerbehälter und zur Sicherstellung der Rückholbarkeit) sowie
- das Wirtsgestein (langfristiger mechanischer Schutz der inneren Barrieren und Erosionsschutz für das Lager, Sorption von Radionukliden, die nach Verlust der Endlagerbehälterintegrität aus diesem migrieren und nicht in der Bentonitbarriere sorbiert worden sind, Aufrechterhalten des geochemisch günstigen Milieus zur Minimierung der Korrosionsraten).

Als Alternative wird im schweizerischen Konzept auch die Möglichkeit erwähnt, den Bentonit vollständig durch eine Verfüllung der Stollen mit Zementmörtel zu ersetzen [17]. In diesem Fall würden zwar die geochemischen Gradienten zwischen Verfüllung und Wirtsgestein erhöht, die geochemischen Verhältnisse würden jedoch weiterhin nur geringe Korrosionsraten für den Endlagerbehälter bewirken. Mit einer solchen Zementmörtelverfüllung wären die Einlagerungsstrecken auch langfristig stabilisiert. Die Korrosionsraten auf der Oberfläche des Endlagerbehälters wären aufgrund der hohen pH-Werte weiterhin niedrig, wohingegen die geochemischen Gradienten zwischen Verfüllung und Wirtsgestein deutlich höher und die hydraulische Durchlässigkeit entlang der Einlagerungsstrecke um Größenordnungen höher als im angrenzenden Wirtsgestein wären.

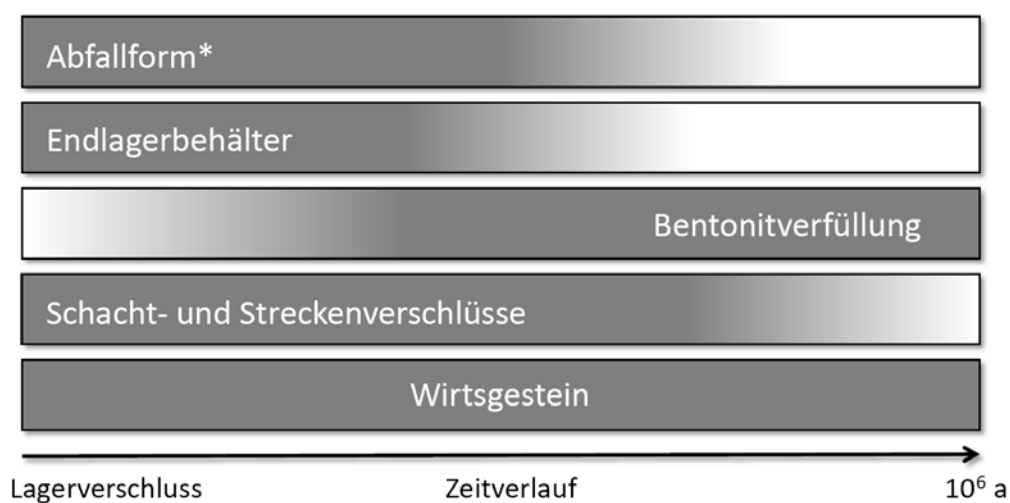


Abbildung 8.2: Wesentliche Barrieren und deren erwarteter individueller Wirkungszeitraum in Tongestein (schweizerisches Konzept). Der Schattierungsverlauf entspricht keiner exakten Lebensdauer der Barriere, sondern soll lediglich einen Trend andeuten (dunkle Schattierung bedeutet Wirksamkeit).
* (Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkokille)

8.2 Umsetzbarkeit der Anforderungen

Im Folgenden wird geprüft, inwieweit mit dem oben beschriebenen und in Abbildung 8.1 dargestellten Barrierensystem in Tongestein die Anforderungen gemäß Kapitel 5 prinzipiell erfüllbar sind. Ein Nachweis, dass die in Kapitel 5 genannten Anforderungen tatsächlich erfüllt werden, muss später im Rahmen des durchzuführenden Genehmigungsverfahrens erfolgen.

Zu erfüllende Anforderungen aus StandAG [1]:

- **Einschlusswirksamkeit:** Die isolierende Eigenschaft des Barrierensystems stützt sich mittelfristig auf Design, Dicke und Korrosionseigenschaften des Endlagerbehälters (im schweizerischen Konzept müssen die Behälter für mindestens 1.000 Jahre dicht bleiben [18], im belgischen Konzept wird der Endlagerbehälter als Supercontainer aus Zement vorgeschlagen [19]). Das Wirtsgestein (und im Fall des schweizerischen Konzepts auch die Bentonitverfüllung) hält begünstigend dazu langfristig ein korrosionshemmendes geochemisches Milieu aufrecht. Der Transport der meisten Radionuklide wird außerdem durch das Wirtsgestein (und die Bentonitverfüllung) verzögert bis langfristig verhindert. Es sind Maßnahmen zu treffen, die aufgrund ausbruchsbedingter Auflockerungszonen um die Einlagerungsstrecken und die erhöhte Porosität in einem Streckenausbau (wenn vorhanden) Umläufigkeiten verhindern. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen vorausgesetzt, ist die Anforderung prinzipiell erfüllbar.
- **Dauerhaftigkeit:** Diese Anforderung ist bei einem geeigneten Standort und bei geeigneter Endlagerplanung prinzipiell erfüllbar, da der ewG in seiner Einschlusswirksamkeit bei geologischen

Prozessen (z. B. Erdbeben) prinzipiell erhalten bleibt. Wasserwegsamkeiten würden am Ort des eindringenden Wassers durch die Quellfähigkeit des Gesteins wieder abgedichtet. Die Dauerhaftigkeit der Barriere des Wirtsgesteins (inklusive Ausbildung einer tiefgreifenden Dekompaktionszone) muss insbesondere durch die Tiefenlage und die Wahl des Standorts in einem tektonisch ruhigen Gebiet (geringe Hebung, geringe Erosion) erreicht werden. Die Anforderung ist damit prinzipiell erfüllbar.

- **Verträglichkeit:** Die Redoxverhältnisse sowie die Bindung von Wasser durch Bentonit und Wirtsgestein unterstützen geringe Korrosionsraten für die Einbauten aus Metall. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Gasproduktion und der Gastransport ein Gleichgewicht erreichen, das keine sicherheitsrelevanten mechanischen Schäden im Wirtsgestein verursacht. Die Bentonitverfüllung wirkt wärmeisolierend, so dass die inneren Teile dieser Verfüllung durch die Zerfallswärme geschädigt werden könnte [20]. Die Bentonitverfüllung und das Wirtsgestein zeigen gegenüber dem Streckenausbau auf Zementbasis einen scharfen pH-Gradient, der zur lokalen Destabilisierung von Tonmineralen (pH-Fahne) führen kann. Aufgrund der volumetrischen Beschränktheit der zu erwartenden Effekte (beschränkte Verfügbarkeit von Porenwasser und Fließwegen) ist die Anforderung prinzipiell erfüllbar.
- **Technische Umsetzbarkeit:** Für die Endlagerbehälter aus Stahl kann aufgrund der Erfahrung mit diesem Werkstoff und seiner Verarbeitung davon ausgegangen werden, dass fehlerarme Abdichtungen technisch herstellbar sind. Für das Einpressen der Eisenliner im französischen Barrierensystem liegen noch keine Erfahrungen vor. Sowohl bei diesem Konzept wie bei beim Ausbau der Einlagerungsstrecken mit zementbasierter Sicherung und eventuell einer Innenschale ist die detaillierte Umsetzung einer kompletten Hinterfüllung technisch noch unklar. Das Verfüllen einer Strecke mit Bentonitgranulat im schweizerischen Konzept wurde im Felslabor Mont Terri bereits demonstriert. Das Auffahren und Sichern entsprechend dimensionierter Tunnelsysteme wurde im Felslabor Bure gezeigt. Vor diesem Hintergrund erscheint eine technische Umsetzung machbar und die Anforderung ist prinzipiell erfüllbar.
- **Rückholbarkeit:** Bis zum Lagerverschluss können die Einlagerungsschritte rückgängig gemacht werden. Für eine bessere Rückholbarkeit hat die Andra [15] das zusätzliche Einbringen eines Eisenliners vorgesehen, der bündig zur Ausbruchsinnenfläche in den Fels gepresst wird. Dafür wird im aktuellen französischen Konzept auf eine Bentonitbarriere verzichtet. Die Anforderung nach Rückholbarkeit ist damit prinzipiell erfüllbar.
- **Ermöglichung der Bergung:** Bis zu einem Zeitraum von 500 Jahren (gemäß § 1 Abs. 4 in [1]) kann von der Integrität der Endlagerbehälter ausgegangen werden, insbesondere, wenn dieser gemäß schweizerischem Konzept über 1.000 Jahre dicht sein muss (und Korrosionsexperimente eher darauf hindeuten, dass ein Versagen der Behälter erst nach ca. 10.000 Jahren erfolgen wird) [21]. Die Bentonitverfüllung (im schweizerischen Konzept) könnte trotz Aufsättigung bergmännisch wieder entfernt werden. Dem französischen Konzept mit Eisenliner folgend wäre dieser entsprechend auszulegen, um ein Herausholen der horizontal eingelagerten Endlagerbehälter garantieren zu können. Die Anforderung ist prinzipiell erfüllbar.

- **Wartungsfreiheit:** Die in Frankreich und der Schweiz vorgeschlagenen Barrierensysteme gehen von Wartungsfreiheit nach dem Lagerverschluss aus. Die Anforderung ist damit prinzipiell erfüllbar.

Zusätzlich zu betrachtende Anforderungen:

- **Ausschluss Kritikalität:** Das Barrierensystem ist auf den Ausschluss von Kritikalität über den Betrachtungszeitraum ausgerichtet. Das Einlagerungskonzept muss vorsehen, den Brennstoff in kleine, räumlich getrennte Einheiten einzulagern und die Konzentrierung des spaltbaren Materials in den Abfällen gering zu halten, so dass auch unter den langfristig ablaufenden Prozessen die Entstehung von Kritikalität ausgeschlossen werden kann. Die Anforderung ist bei geeigneter Endlagerplanung prinzipiell erfüllbar.
- **Funktionsfähigkeit:** Mit Ausnahme der zu Beginn noch nicht aufgesättigten Bentonitverfüllung (schweizerisches Konzept) in den Einlagerungsstrecken stehen alle Barrieren sofort funktionsfähig zur Verfügung (Abbildung 8.2). Für eine Bentonitverfüllung wird davon ausgegangen, dass deren Aufsättigung mittelfristig aufgrund hineinmigrierender Bergfeuchte erfolgt. Im schweizerischen Konzept muss der Streckenausbau über diese Zeit die Stabilität der Strecken garantieren, im Falle des französischen Konzepts wird die Streckengeometrie durch den Eisenliner sichergestellt. Die Anforderung ist damit prinzipiell erfüllbar.
- **Überprüfbarkeit:** Die Geometrie des Wirtsgesteinskörpers kann bei günstigen Standortverhältnissen (marine Tongesteine) mit seismischer Erkundung gut erfasst und die Eigenschaften des Wirtsgesteins aufgrund der marinen Ablagerungsgeschichte gut lateral extrapoliert werden. Zur Konformitätsüberprüfung der einzelnen Barrieren liegt eine große Anzahl von experimentellen Ergebnissen vor, die Zeiträume von bis zu mehreren Dekaden abdecken. Am Felslabor Mont Terri wurde gezeigt, dass sich eine Bentonitverfüllung unter Zufuhr von Wasser zu einer einheitlichen Masse entwickelt. Erfahrungen zu langfristigen Korrosionsraten (Endlagerbehälter, Eisenliner) bzw. zur Alterung des Zementausbaus liegen über einen Zeitbereich von 100 Jahren vor. Die Anforderung ist damit prinzipiell erfüllbar.
- **Robustheit:** Durch die Abfallform (Brennstoffmatrix/Hüllrohr bzw. Glasmatrix/Edelstahlkokille, Abbildung 8.1) einerseits sowie durch den Endlagerbehälter andererseits ist ein robuster Einschluss über den ersten Abschnitt des Nachweiszeitraumes gewährleistet. Die rückhaltenden Eigenschaften der Bentonitverfüllung (schweizerisches Konzept) werden durch die sorbierenden Eigenschaften des Wirtsgesteins (und ggf. des gesamten ewG, d. h. einschließlich der unter- und überliegenden tonreichen Gesteine) verstärkt. Die Barrieren zeigen stark überlappende Wirkungszeiträume (Abbildung 8.2). Sowohl im schweizerischen als auch französischen Konzept kann der Wärmeeintrag aus den Abfällen nachteilig für das Wirtsgestein sein. In beiden Konzepten können die Auflockerungszonen entlang der untertägigen Bauten Nachteile für die Langzeitsicherheit darstellen. Die Effekte daraus auf die Langzeitsicherheit sind daher aufzuzeigen und im Sinne einer Robustheit des Systems zu minimieren. Die Anforderung zur Robustheit ist prinzipiell erfüllbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anforderungen aus [1] und die zusätzlich betrachteten Anforderungen bei günstigen Standortverhältnissen und bei geeigneter Endlagerplanung prinzipiell durch ein Barrierensystem in Tongestein erfüllbar sind. Kritische Aspekte umfassen die reduzierte Funktionalität der Bentonitbarriere zu Beginn der Nachverschlussphase (verzögerte Aufsättigung) und der mögliche Transport entlang des Streckenausbaus und der Auflockerungszonen (verstärkt durch die Schwierigkeit einer vollständigen Hinterfüllung des Streckenausbaus). Unter erhöhten Tiefenlagen ist ein Rauben des Streckenausbaus und, wie in der Schweiz vorgeschlagen, der Einsatz von Zwischensiegeln (unter Herstellung eines direkten Kontakts zwischen Bentonitverfüllung und Wirtsgestein), technisch noch nicht abschließend gelöst [22]. Zur technischen Umsetzung wurde jedoch bereits eine Reihe von erfolgreichen Experimenten durchgeführt [23]. Das Innere der wärmeisolierenden Bentonitbarriere könnte aufgrund der Zerfallswärme teilweise Schaden nehmen [20], wohingegen der pH-Gradient zwischen Streckenausbau einerseits und Bentonit/Wirtsgestein andererseits aus heutiger Sicht nur sehr lokale Veränderungen im Wirtsgestein verursachen dürfte [22].

9 Fazit

Auf der Basis des Standortauswahlgesetzes vom 5. Mai 2017 [1] und zusätzlich betrachteter Anforderungen wurden das Ziel eines Barrierensystems und Anforderungen an dieses formuliert. Die Prüfung einer prinzipiellen Erfüllbarkeit der Anforderungen für bestehende Konzepte von Barrierensystemen in den Wirtsgesteinen Kristallingestein (unter Verweis auf bestehende Konzepte in Schweden und Finnland), Steinsalz (unter Verweis auf Konzepte in Deutschland) und Tongestein (unter Verweis auf Konzepte in Frankreich und der Schweiz) zeigt, dass die Barrierensysteme bei günstigen Standortverhältnissen und geeigneter Endlagerplanung alle gesetzlichen Anforderungen [1] prinzipiell erfüllen können. Die zusätzlich betrachteten Anforderungen sind für Kristallingestein mehrheitlich, für Steinsalz und Tongestein hingegen alle prinzipiell erfüllbar. Einzelne Barrieren (z. B. der für 500 Jahre bergbare Endlagerbehälter im Steinsalz- bzw. Tongesteinkonzept und insbesondere der für eine Million Jahre langzeitstabile Endlagerbehälter im Kristallingesteinkonzept) müssen erst noch entwickelt werden. Ob die Anforderungen tatsächlich erfüllt werden, hängt vor allem von der Wahl eines geeigneten Endlagerstandorts und einer dazugehörigen geeigneten Endlagerplanung sowie von der erfolgreichen Entwicklung der betreffenden technischen Systeme für die Endlagerung ab. Die ESK hat keine prinzipiell nicht erfüllbaren Anforderungen an ein Barrierensystem in den in Deutschland zur Diskussion stehenden Wirtsgesteinen gefunden.

Alle im Gesetz vorgesehenen Wirtsgesteine (Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein, vgl. § 1 Abs. 3 in [1]) zeigen in ihren Eigenschaften bei einer Lagerplatzierung Vor- und Nachteile. Es ist Aufgabe eines Barrierensystems, insbesondere die Nachteile durch geeignete Barrieren bzw. Barrierenabfolgen zu kompensieren. Die Überprüfung der formulierten Anforderungen zeigt für die einzelnen Barrieren in den jeweiligen Wirtsgesteinen kritische Aspekte und Anforderungen, die prinzipiell auch nur teilerfüllt sein könnten. Durch Kombination unterschiedlicher Barrieren in Barrierensystemen kann es gelingen, alle Anforderungen, die im Standortauswahlgesetz [1] enthalten sind und in Kapitel 5 zusätzlich betrachtet wurden, weitgehend zu erfüllen und damit ungünstige Eigenschaften des Wirtsgesteins einerseits und durch die Lagerplatzierung ausgelöste Prozesse andererseits ohne langfristig potenziell kritische Aspekte zu kompensieren.

Eine direkte Übernahme bestehender Konzepte, wie sie im Ausland entwickelt worden sind, bleibt standortspezifisch und auf Basis der gesetzlichen deutschen Vorgaben und Abfallinventare sorgfältig zu prüfen. Aufgrund standortspezifischer geologischer und hydrogeologischer Bedingungen potenzieller Standorte einerseits und der deutschen gesetzlichen Rahmenbedingungen andererseits sind ggf. entsprechende Modifikationen an den einzelnen Konzepten für Barrierensysteme notwendig, um diese optimal an die Gegebenheiten und die standortbezogene langzeitliche Entwicklung anzupassen. Solche Anpassungen können anhand der hier formulierten Anforderungen beurteilt werden.

10 **Unterlagen/Literatur**

- [1] Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [2] Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA),
Synthesebericht
BGR, DBE Tec, November 2011, Berichtsnummer TEC-29-2008-AB.
- [3] Thermal properties of rocks
E. C. Robertson
United States Department of the Interior, 1988, Open-File Report Nr. 88-441.
- [4] System design and full-scale testing of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels
- Main report
P. Grahm, R. Malm, D. Eriksson
Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-14-23.
- [5] KBS-3H System Design Phase 2011–2016: Final Report
Posiva und Svensk Kärnbränslehantering AB, Report 06, Juli 2017.
- [6] Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland - Abschlussbericht
N. Bertrams, P. Herold, M. Herold, J. Krone, A. Lommerzheim, S. Prignitz, E. Simo Kuate
DBE TECHNOLOGY GmbH, September 2017.
- [7] Full scale Buffer Swelling Test at dry backfill conditions in Äspö HRL - In situ test and related laboratory tests
T. Sandén, L. Börgesson, U. Nilsson, A. Dueck
Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-16-07, Dezember 2017.
- [8] Canister Retrieval Test - Final report
O. Kristensson, L. Börgesson
Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-14-19, Januar 2015.

- [9] The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste
Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, SSMFS 2008:21.
- [10] The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice Concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste
Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, SSMFS 2008:37.
- [11] Synthesebericht für die VSG - Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
GRS 290, März 2013, ISBN 978-3-939355-66-3.
- [12] In-situ-Versuch für ein Abdichtbauwerk im Steinsalz im ERAM - aktuelle Ergebnisse und Erkenntnisgewinn
R. Mauke, J. Wollrath, M. Kreienmeyer, F. Manthee,
In: Verschlussysteme – Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung
Fachgespräch Freiberg, 03.-04.05.2017 - Materialienband - KIT 2017, 363-384
- [13] Charakterisierung der Auflockerungszone um Strecken im Opalinuston mit seismischen und geoelektrischen Verfahren
H.J. Alheid, S. Kruschwitz, K. Schuster, U. Yaramanci
Zeitschrift für Angewandte Geologie 2002, 48-55.
- [14] Self-sealing of Fractures in Argillaceous Formations in the Context of Geological Disposal of Radioactive Waste – Review and Synthesis
H. Bock, B. Dehandschutter, C. D. Martin, M. Mazurek, A. de Haller, F. Skoczylas, C. Davy
Nuclear Energy Agency 2010, NEA No. 6184.
- [15] Andra research on the geological disposal of high-level long-lived radioactive waste. Results and Perspectives
Andra, Dossier 2005, Juni 2005.
- [16] ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2, Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung
Nagra-Arbeitsbericht, NAB 16-45, Juli 2016.

- [17] ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2, Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte Nagra-Arbeitsbericht, NAB 16-42, Juli 2016.
- [18] Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis
ENSI-Richtlinie, ENSI-G03, April 2009.
- [19] The Belgian supercontainer concept: Study of the concrete buffer behaviour in service life
S. Poyet (2006)
J. Phys. IV France 136, 167–175.
- [20] ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2, Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte Nagra-Arbeitsbericht, NAB 16-42, Juli 2016.
- [21] The anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters.
N. R. Smart, D. J. Blackwood, L. O. Werme (2001)
Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-01-22.
- [22] Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager Gutachten ENSI 33/540, April 2017.
- [23] Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory
H. R. Müller, B. Garitte, T. Vogt, S. Köhler, T. Sakaki, H. Weber, T. Spillmann, M. Hertrich, J. K. Becker, N. Giroud, V. Cloet, N. Diomidis, T. Vietor (2017)
Swiss Journal of Geosciences 110, 287–306.