

1

Einführung

1.1 Vorbemerkung

Zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen gibt es zurzeit keine langfristig sichere und ethisch vertretbare Alternative. In Deutschland ist bisher noch kein Standort bestimmt. Im „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ StandAG ist festgelegt, dass bis 2031 in einem wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahren ein Standort für eine Anlage zur Endlagerung der im Inland verursachten, insbesondere hochradioaktiven Abfälle (gemäß § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes) in der Bundesrepublik Deutschland gefunden werden soll. Ziel ist es, den Standort für das Endlager in Deutschland auszuwählen, der die bestmögliche Sicherheit gegen einen Austrag von Radionukliden in die Biosphäre gewährleistet.

Der dauerhafte Schutz von Menschen und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle muss für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet sein (§ 1 Absatz 2 StandAG). Voraussetzung dafür ist, dass die in den Abfällen enthaltenen radioaktiven und sonstigen Schadstoffe entsprechend lange von der Biosphäre ferngehalten werden. Um dies zu erreichen, wird ein an das jeweilige Wirtsgestein angepasstes Multibarrierensystem entwickelt. Prinzipiell handelt es sich dabei um technische Barrieren (Behälter), geotechnische Barrieren (Versatz in den Einlagerungsstrecken, Verschlussbauwerke in den Strecken, Schachtverschlüsse und Bohrlochverschlüsse) und geologische Barriere (Wirtsgestein und überlagerndes Barrieregestein). Von den nach § 1 Absatz 3 StandAG in Frage kommenden Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein weisen die ersten beiden eine hydraulische und mechanische Barrierewirkung auf, das Kristallingestein im Wesentlichen nur eine mechanische.

Die hydraulische Barrierewirkung wird als entscheidendes Sicherheitsprinzip dadurch gewährleistet, dass die Schadstoffe im sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) mit einem geeigneten Barrieregestein zurückgehalten werden (vgl. Kap. 3.1). Gemäß StandAG ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich der Teil des Gebirges, der im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Barrieren den hydraulischen Einschluss der Abfälle sicherstellt.

Daraus folgt als Anforderung für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines potenziellen Endlagers gemäß § 5 Absatz 1 EndlSiAnfV zwingend: „Im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1¹ ist für die zu erwartenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu prüfen und darzustellen und seine Robustheit zu begründen.“

Der Begriff der Integrität beschreibt dabei das Vorliegen und den Erhalt der für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanter Eigenschaften der Barrieren des Endlagersystems. Robustheit bezeichnet neben Zuverlässigkeit und Qualität die Unempfindlichkeit der Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie gleichzeitig die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen.

Im Mittelpunkt der Bewertung der Langzeitsicherheit steht folgerichtig die systematische Untersuchung des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch die Prüfung und Darstellung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentliche geologische Barriere.

Für die Analyse des Verhaltens des Endlagersystems im Bewertungszeitraum sind hinreichend qualifizierte numerische Modellierungen auf Grundlage realitätsnaher Annahmen durchzuführen (gemäß EndlSiAnfV). Die Prüfung und Darstellung der Integrität und Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentliche Barriere erfordert daher eine auf geotechnischen Grundsätzen basierende Methodik auf dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Zielstellung der vorliegenden Empfehlung ist die Darstellung von wirtsgesteinspezifischen Randbedingungen und den entsprechenden Vorgehensweisen für die Prüfung und Darstellung der Integrität der Barrieregesteine.

Die Ergebnisse dieser geotechnischen Untersuchungen fließen in den Langzeitsicherheitsnachweis ein.²

1.2 Zweck / Anwendungsbereich

Die vorliegende Empfehlung dient dem Zweck, Hilfestellung bei der methodischen Vorgehensweise zur Bewertung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu geben. Für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle sind im Hinblick auf die Schadensvorsorge in regelmäßigen Abständen die Planungen und Nachweise für den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu führen. Dieser

¹ dort: *Die wesentlichen Barrieren zum Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle sind 1. ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche . . .*

² Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers erfolgt komplementär zum geotechnischen Nachweis die Bewertung von Radionuklidfreisetzungen für diejenigen Entwicklungen des Endlagers, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. In Abgrenzung zum geotechnischen Ansatz handelt es sich hierbei um den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis.

entwickelt sich ständig weiter. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass sich die methodische Vorgehensweise des geotechnischen Nachweises für die Integrität der geologischen Barriere in den nächsten Jahren grundlegend ändern wird, so dass die Gültigkeit der Empfehlungen keiner derzeit absehbaren zeitlichen Beschränkung unterliegt. Die zur Erläuterung verwendeten Beispiele und quantitativen Größen entsprechen dem derzeitigen Kenntnisstand. Die Anwendungsfälle und Beispiele dienen der Veranschaulichung.

Gemäß Vorbemerkung beschränkt sich der Anwendungsbereich der Empfehlung auf die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle und konkretisiert weiter auf die geotechnische Nachweisführung der Integrität und Robustheit des Barrieregesteins. Biologische und chemische Prozesse, wie z. B. Sorption, sind nicht Bestandteil dieser Empfehlung.

Das Kristallingestein weist im Wesentlichen nur eine mechanische Barrierewirkung auf. Aufgrund seines hydraulisch wirksamen Trennflächeninventars und der dadurch bedingten vergleichsweise hohen Gebirgsdurchlässigkeit ist zu erwarten, dass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich nur in Ausnahmefällen bei ausreichender Mächtigkeit nicht durch Trennflächen zerlegter Gebirgsbereiche auszuweisen ist (vgl. Kap. 3.1).

Der Schwerpunkt dieser Empfehlung liegt daher auf der Prüfung und Darstellung der Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Salz- und Tongestein für ein Endlager hochradioaktiver Abfälle. Die entsprechende Vorgehensweise für ein Endlager im Kristallingestein wird auf Basis der derzeit in Deutschland vorliegenden Nachweiskonzepte nur skizziert.

1.3 Integritätsnachweis – regulativer Rahmen

Die formale Vorgehensweise zur Durchführung des Integritätsnachweises ist im StandAG beschrieben und wurde hinsichtlich der abzurufenden Indikatoren³ (Kriterien) sowie der Vorgehensweise in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) teilweise noch präzisiert. Mit deren Veröffentlichung und der zugehörigen EndlSiUntV im Herbst des Jahres 2020 wurden die Randbedingungen für die Bewertung von Endlagersystemen fortgeschrieben. Dabei ging es nicht nur um eine Anpassung des verwendeten Vokabulars (z. B. Verzicht auf den Begriff Nachweis bzw. Nachweiskonzept, Ersetzen des Begriffs Nachweiszeitraum durch Bewertungszeitraum und des Begriffs Szenario durch Entwicklung, sowie Einführung neuer Begriffe, wie der wesentlichen und weiteren Barrieren), sondern vor allem um neue oder geänderte Anforderungen, die es zu berücksichtigen gilt.

³ Zum Ausschluss einer begrifflichen Fehlinterpretation handelt es sich dabei nicht um die Indikatoren zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG, sondern um Bewertungsgrößen zur Integrität des Barrieregesteins. Sie werden nachfolgend synonym als Kriterien bezeichnet.

Ausgehend von § 3 „Bewertungszeitraum; Entwicklungen des Endlagersystems“ Absatz 1 EndlSiAnfV beträgt der Bewertungszeitraum eine Million Jahre ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers.

Dafür ist gemäß § 5 „Integrität und Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentlicher Barriere“ Absatz 2 EndlSiAnfV hinsichtlich der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu prüfen und darzustellen, dass:

1. *die Ausbildung von Fluidwegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten von erheblichen Mengen an Flüssigkeiten oder Gasen führen können, innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist; dafür dürfen*
 - a) *die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der auffahrungsbedingten Auflockerungszonen auf Grund von zu erwartenden Beanspruchungen nicht überschritten werden und*
 - b) *die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einer erheblichen Zunahme von Fluidwegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt,*
2. *durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird und*
3. *die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen.*

Der Punkt 1 beschreibt Schädigungen, die zu sekundären Fluidwegsamkeiten führen können. Sekundäre Wegsamkeiten können in einem primär ungeschädigten Barrieregestein nur unter den in 1a) und 1b) konkretisierten Randbedingungen entstehen. Der Nachweis der Vermeidung sekundärer Wegsamkeiten erfolgt mit dem Dilatanzkriterium und dem Fluiddruckkriterium (vgl. Kap. 5.2.1 und Kap. 5.2.2).

Die unter Punkt 2 beschriebene Anforderung wird als Temperaturkriterium bezeichnet (vgl. Kap. 0).

Aus den v. g. Anforderungen an die Integrität und Robustheit des ewG folgt, dass die Nachweisführung zur modelltechnischen Überprüfung dieser Kriterien grundsätzlich die möglichen thermisch-hydraulisch-mechanischen Prozesse und deren Kopplung einbeziehen muss. Bei Ton- und Kristallingestein kann dies durch Veränderungen der Fluiddrücke implizit berücksichtigt werden, während im Salzgestein wegen vernachlässigbarer Porendruckeffekte im ungeschädigten Zustand eine thermisch-mechanische (TM)-Kopplung dann ausreichend ist, wenn zuzitende Fluide (Gase, Lösungen) als Einwirkungen nicht berücksichtigt werden müssen.

Punkt 3 beschreibt geochemische Einwirkungen (u. a. aufgrund von Gasbildung durch Korrosion von Behältern oder durch Änderung des chemischen Milieus durch Einbringen von technischen Baustoffen). Diese werden im Folgenden nur indirekt betrachtet, wenn sich dadurch die geomechanisch-geohydraulischen Randbedingungen (z. B. infolge einer Erhöhung des Porendrucks) verändern.

Darüber hinausgehend war laut Sicherheitsanforderungen BMU (2010) gemäß Kap. 8.3.1 noch explizit nachzuweisen, dass

- ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf teilnimmt (kein Grundwasseraustausch zu oberflächennahen Grundwasservorkommen innerhalb des Nachweiszeitraums von 1 Millionen Jahre, wobei dieser Nachweis in der Regel über eine Alters- oder Herkunftsbestimmung des Porenwassers erfolgt).
- innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kein advektiver Transport stattfindet oder dass innerhalb dieses Gebirgsbereichs die Ausbreitung von Schadstoffen durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.

Dies entspricht der Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 StandAG „Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“. Dort ist die Anforderung: „Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein.“

Diese Anforderung kann somit Teil eines Nachweiskonzepts für die Barrierenintegrität eines Endlagers, insbesondere im Tongestein, sein. Sie wird im Folgenden unter dem Begriff „Advektionskriterium“ beschrieben (vgl. Kap. 5.2.4).