

**Integritätskriterien
für einen
einschlusswirksamen
Gebirgsbereich
im Tongestein**

Integritätskriterien für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Tongestein

Martin Navarro
Gerd Frieling
Torben Weyand

Januar 2019

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4716E03230 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ausgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

GRS - 522
ISBN 978-3-947685-07-3

Deskriptoren:

ewG, Integrität, Kriterien, Sicherheitsanforderungen, Tongestein, Tonstein

Kurzfassung

Die im Jahr 2010 vom BMU veröffentlichten Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle enthalten Integritätskriterien für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Aufgrund des geringen Konkretisierungsgrades dieser Kriterien lassen sich diese auf unterschiedliche Weise ausdeuten. Die vorliegende Untersuchung betrachtet die Spielräume für eine Konkretisierung der Integritätskriterien, insbesondere für eine Anwendung auf das Wirtsgestein Tongestein. Darüber hinaus werden Empfehlungen zur Konkretisierung und Erweiterung der Integritätskriterien gegeben.

Abstract

In 2010, BMU published safety requirements governing the disposal of heat-generating waste, which include criteria for the integrity of the isolating rock zone. These criteria are open to interpretation owing to their general nature. Focusing on argillaceous host rock, the present investigation examines the latitude in specifying the mentioned criteria. Recommendations on the specification and enhancement of the criteria are made.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Sachstand	3
2.1	Der Integritätsnachweis in den Sicherheitsanforderungen von 2010	3
2.2	Die Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen	4
2.3	Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“	5
2.4	Advektionskriterium	7
2.5	Fluiddruckkriterium	10
2.6	Dilatanzkriterium	12
2.6.1	Übersicht über den Prozess der Dilatanz	12
2.6.2	Zur Definition von Schädigungsgrenzen	13
2.6.3	Kriterien	16
2.7	Temperaturkriterium	17
3	Analyse und Bewertung	21
3.1	Allgemeine Betrachtungen	21
3.1.1	Notwendige Ergänzung oder Erweiterung der Integritätskriterien	21
3.1.2	Zum Integritätsnachweis über den Einschluss	22
3.1.3	Konkretisierungsgrad	23
3.1.4	Toleranzbetrachtung	24
3.1.5	Multiple Lines of Evidence	25
3.1.6	Anmerkung zum EwG-Verständnis	26
3.2	Kriterienspezifische Betrachtung	29
3.2.1	Sekundäre Wegsamkeiten	29
3.2.2	Advektionskriterium	29
3.2.3	Fluiddruckkriterium	32
3.2.4	Dilatanzkriterium	33
3.2.5	Temperaturkriterium	33
4	Zusammenfassung der Bewertung	35

	Literaturverzeichnis	39
	Abbildungsverzeichnis	43
	Tabellenverzeichnis	45
A	Anhang: Transportsimulationen zum Advektionskriterium	47
A.1	Betrachtung eines einzelnen Radionuklids	48
A.2	Betrachtung der Summen der Flüsse aller Radionuklide	50
A.3	Fazit	54

1 Einleitung und Zielsetzung

Die aktuellen Sicherheitsanforderungen von 2010 /BMU 10/ für wärmeentwickelnde Abfälle (nachfolgend „Sicherheitsanforderungen“ genannt) fordern eine „Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“, wobei Integrität als „Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers“ definiert wird. Die Integritätsbetrachtung der Sicherheitsanforderungen beschränkt sich somit auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG).¹ Sie umfasst dabei weit mehr als die rein geomechanische Stabilität, sondern formuliert auch hydraulische und thermische Integritätskriterien.

Eine vollständige Integritätsanalyse im Sinne der Sicherheitsanforderungen wurde erstmalig im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) /FIS 13/ durchgeführt. Dabei wurde die Integrität sowohl der geologischen /KOC 12/ als auch der geotechnischen /MÜL 12/ Barrieren überprüft. Für das Wirtsgestein Steinsalz entsprechen diese Arbeiten weiterhin dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

In dem vom BMWi geförderten Vorhaben „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“ (AnSichT) /JOB 17/ wurden die Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ für das Wirtsgestein Tongestein konkretisiert und angewendet. Diese Arbeiten wurden zur Laufzeit des vorliegenden Vorhabens veröffentlicht und stellen eine wichtige Referenz für den Integritätsnachweis eines ewG in Tongestein dar.

Trotz der Ergebnisse des Vorhabens AnSichT kann die Konkretisierung der Integritätskriterien für Tongestein noch nicht als abgeschlossen gelten, da die weitgehend offen formulierten Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen unterschiedliche Konkretisierungen zulassen. Die vorliegende Arbeit untersucht daher die Interpretations- und Konkretisierungsspielräume der in /BMU 10/ definierten Integritätskriterien und die allgemeinen Aspekte dieser Integritätskriterien, wie etwa Aspekte der Vollständigkeit und Redundanz. Soweit möglich, werden Empfehlungen zur Konkretisierung der Integritäts-

¹ Unter Punkt 7.2.3 (Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems) ist in den Sicherheitsanforderungen auch von der Integrität technischer Komponenten die Rede. In den Begriffsdefinitionen bezieht sich „Integrität“ jedoch nur auf den ewG.

kriterien gegeben, insbesondere in Hinblick auf einen ewG im Tongestein. Grundlage der Betrachtungen bilden die Vorhaben VSG und AnSichT sowie das „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (**Standortauswahlgesetz, StandAG**) /STA 17/. Letzteres formuliert zwar keine Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis, enthält aber Abwägungskriterien, an denen man sich bei der Konkretisierung der Integritätskriterien orientieren könnte.

2 Sachstand

2.1 Der Integritätsnachweis in den Sicherheitsanforderungen von 2010

Der Begriff der Integrität und des Integritätsnachweises wird in der Literatur nicht einheitlich definiert /HOT 10/. Für Deutschland maßgeblich ist das Integritätsverständnis der Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle /BMU 10/. Diese betrachten lediglich die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und definieren den Begriff der Integrität folgendermaßen:

„Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers.“ /BMU 10/

Es ist folgende „Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ zu treffen:

„Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist.“ /BMU 10/

Diese Langzeitaussage wird nachfolgend auch „Integritätsnachweis“ genannt. Sie ist für die wahrscheinlichen Entwicklungen zu prüfen. Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen ist die Integrität nur im Rahmen der radiologischen Langzeitaussage zu betrachten. Dieser zweite Teil der Integritätsanalyse wurde im Vorhaben VSG mit dem Begriff der „Integritätsprüfung“ belegt, um ihn vom Integritätsnachweis für die wahrscheinlichen Entwicklungen abzugrenzen /KOC 12/.

Der Integritätsbegriff der Sicherheitsanforderungen beschränkt sich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) und wird nicht für technische Endlagerkomponenten verwendet. Es ist jedoch zu beachten, dass der Integritätsnachweis nicht ohne Betrachtung technischer Komponenten auskommt. So fordern die Sicherheitsanforderungen:

„Beim Nachweis der Integrität bzw. des Einschlusses sind die technisch unvermeidbaren Barriereperforationen (z. B. Schächte) und die Verfüllung des Endlagers zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass die von der geologischen Barriere geforderte Integrität und

der von ihr zu gewährleistende Einschluss auch bei Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie Verfüllung erhalten bleiben.“

Dennoch beschränken sich die laut den Sicherheitsanforderungen anzuwendenden Integritätskriterien auf die Betrachtung des ewG.

2.2 Die Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen

Nach den Sicherheitsanforderungen müssen für einen ewG im Tongestein fünf Einzelnachweise geführt werden, um dessen Integrität nachzuweisen. Für alle Wirtsgesteine ist zu zeigen, dass

1. *„die Ausbildung von [...] sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass*
2. *ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.“ /BMU 10/*

Für Salinar- und Tongesteine muss zusätzlich Folgendes gezeigt werden:

3. *„Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten.*
4. *Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt.*
5. *Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.“ /BMU 10/*

Diese fünf Punkte stellen Integritätskriterien dar, wobei der Begriff „Kriterium“ in den Sicherheitsanforderungen nur für die letzten drei Punkte verwendet wird. Punkt zwei wird oft „Advektionskriterium“ genannt, Punkt drei „Dilatanzkriterium“, Punkt vier „Fluiddruckkriterium“ und Punkt fünf „Temperaturkriterium“. Diese Nomenklatur wird auch im vorliegenden Bericht verwendet.

Im Folgenden wird auch die Bezeichnung „regulatorische“ Kriterien verwendet, um in kurzer Form auf die Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen zu verweisen. Von einem „quantitativen Kriterium“ wird gesprochen, wenn auf die einem Integritätskriterium zugrunde liegende mathematische Abschätzung der Form $X < Y$ verwiesen wird.

Zu zeigen ist die gleichzeitige Erfüllung aller fünf Integritätskriterien. Die Erfüllung lediglich eines einzelnen Integritätskriteriums ist zum Nachweis der Integrität des ewG nicht hinreichend.

2.3 Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“

Sicherheitsanforderungen

Das in den Sicherheitsanforderungen formulierte Kriterium zu sekundären Wasserwegsamkeiten verlangt, dass *„die Ausbildung von [...] sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können“* /BMU 10/. Das Kriterium lässt offen, um welche Art von sekundären Wasserwegsamkeiten es sich handelt.

Die Bezugnahme auf schadstoffbelastete wässrige Lösungen legt nahe, dass das Kriterium insbesondere die aus dem Endlager heraus gerichteten Grundwasserströmungen anvisiert. Es wird jedoch nicht ausgeschlossen, dass auch ein umgekehrter, zum Endlager hin gerichteter Grundwasserstrom zu betrachten ist.

Vorhaben AnSichT

Das Vorhaben AnSichT formuliert kein eigenständiges Kriterium für den oben genannten Punkt der Sicherheitsanforderungen. Unter sekundären Wasserwegsamkeiten werden im Vorhaben AnSichT offene Makrorisse verstanden, die sich laut /JOB 15/ nur dann ausbilden, wenn die effektiven Spannungen die Zugfestigkeit des Gesteins überschrei-

ten². Als Kriterien für die Bildung sekundärer Wegsamkeiten verwendet das AnSichT-Vorhaben insbesondere das Fluiddruckkriterium und das Dilatanzkriterium. Diese beiden Kriterien werden in den Kapiteln 2.5 und 2.6 vorgestellt.

In AnSichT /JOB 15/ wird folgende Annahme getroffen:

„Die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) ist dann gewährleistet, wenn das Advektions-Kriterium und das Temperatur-Kriterium im gesamten ewG eingehalten werden, sowie das Fluiddruck-Kriterium und das Dilatanz-Kriterium innerhalb des ewG in einem Bereich eingehalten werden, der das Endlager mit einer Mindestausdehnung umschließt.“

Somit wird im Vorhaben AnSichT kein eigenes Kriterium zur Prüfung der Bildung sekundärer Wegsamkeiten eingeführt, sondern das Kriterium gilt als erfüllt, wenn die anderen Integritätskriterien nicht verletzt wurden.

StandAG

Das StandAG /STA 17/ enthält zwei geowissenschaftliche Abwägungskriterien mit Bezug zu sekundären Wasserwegsamkeiten im ewG (Anlage 5 und 6), wobei das „Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ (Anlage 6) konkret genug ist, um zur Diskussion des Integritätskriteriums „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ beitragen zu können. Dieses Abwägungskriterium schreibt vor:

„Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten soll möglichst gering sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit, Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen, die Rückbildbarkeit von Rissen und für den Vergleich von Gebieten die Duktilität des Gesteins nach der unten stehenden Tabelle.“ /STA 17/

Indem das Abwägungskriterium die Rückbildbarkeit von Rissen durch mechanische Rissschließung und Rissheilung (z. B. durch Risszementation) betrachtet, geht es über

² Abweichend hiervon spricht /JOB 17/ auch von der Bildung sekundärer Wegsamkeiten durch Dilatanz. Bei diesem Vorgang sind, zumindest makroskopisch gesehen, Zugspannungen nicht zwingend erforderlich.

die reine Betrachtung der Rissentstehung hinaus, und bringt dabei eine für den Schadstofftransport relevante Bewertungsgröße ein.

Zusätzlich fordert es eine Durchlässigkeitsbetrachtung, bei der die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit (inkl. der Wirkung von Rissen) zu der repräsentativen Gesteinsdurchlässigkeit (ohne Risswirkung) in Beziehung gesetzt wird. Dieser Aspekt des Abwägungskriteriums steht dem oben diskutierten Advektionskriterium nahe.

Das Abwägungskriterium zieht verschiedene bergmännische und hydrogeologische Befunde ein, die als indirekte Hinweise auf die Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden, diese sind nach /STA 17/:

- *„rezente Existenz als wasserlösliches Gestein*
- *fossile Fluideinschlüsse*
- *unterlagernde wasserlösliche Gesteine*
- *unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe*
- *Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken*
- *Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung*
- *Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien“*

2.4 Advektionskriterium

Sicherheitsanforderungen

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ verwenden den Begriff „Advektionskriterium“ nicht, jedoch wird der Begriff in der Regel in /BMU 10/ dem Punkt 2 des Kapitels 7.2.1 „Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ zugeordnet. Danach ist zu zeigen, dass

„ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schad-

stoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.“
/BMU 10/

Der hier angesprochene Vergleich zwischen den advectiven und den diffusiven Transportprozessen (*„wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt“*) ist eine hinreichende, aber keine notwendige Bedingung für den Nachweis, dass *„ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt“*. Ein Vergleich zwischen advectiven und diffusiven Transportprozessen ist also nach den Sicherheitsanforderungen nicht zwingend erforderlich, sofern auf andere Weise nachgewiesen werden kann, dass das Porenwasser des ewG nicht am hydrogeologischen Kreislauf außerhalb des ewG teilnimmt.

Vorhaben AnSichT

Im Vorhaben AnSichT /JOB 17/ wurde die BMU-Forderung, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnehmen solle, dahingehend ausgelegt, *„dass allein durch die Bewegung des Porenwassers kein gelöster Stoff vom Einlagerungsbereich an den Rand des ewG transportiert werden darf“* /JOB 17/. Das Advektionskriterium wurde im Vorhaben AnSichT deshalb folgendermaßen konkretisiert:³

„Das Advektions-Kriterium ist eingehalten, wenn ein gelöster konservativer Tracer innerhalb des Nachweiszeitraums nicht allein auf Grund der Bewegung des Porenwassers vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden kann.“
/JOB 15/, /JOB 17/

³ Dieses Kriterium verzichtet also, anders als die Sicherheitsanforderungen, darauf, den advectiven Schadstofftransport mit dem diffusiven zu vergleichen.

Dieser Nachweis kann über numerische Modellberechnungen geführt werden. Gemäß /JOB 17/ wird das Advektionskriterium über die Abschätzung:

$$\frac{v}{v_{\text{Grenz}}} < 1 \quad (2.1)$$

abgeprüft. Die Geschwindigkeit v_{Grenz} ist die mittlere Abstandsgeschwindigkeit, die einen konservativen Tracer im Nachweiszeitraum über einen repräsentativen Fließpfad an den Rand des ewG befördern würde. Die Geschwindigkeit v ist dagegen eine über den Ort und die Zeit gemittelte Filtergeschwindigkeit (Darcy-Geschwindigkeit) entlang repräsentativer Transportpfade /JOB 17/.

StandAG

Das StandAG /STA 17/ enthält das geowissenschaftliche Abwägungskriterium „*Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich*“ (Anlage 1, /STA 17/), das einem Advektionskriterium nahe kommt. Das Kriterium fordert: „*Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein.*“ Für die Prüfung des Kriteriums werden folgende Bewertungsgrößen (oder Indikatoren) eingeführt:

- Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers (und damit die eines konservativen Tracers),
- die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps,
- der charakteristische effektive Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C und
- die absolute Porosität.

2.5 Fluidruckkriterium

Sicherheitsanforderungen

Die Sicherheitsanforderungen verlangen hinsichtlich der Integrität eines ewG in Salinar- und Tongesteinen:

„Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt.“

Unter einem Fluid wird üblicherweise eine fließfähige Phase verstanden, so dass es sich sowohl um eine Gas- als auch um eine Flüssigkeitsphase handeln kann.

Das Kriterium lässt offen, ab welchen Mengen Grundwasserzutritte als erhöht anzusehen sind und ob räumliche oder zeitliche Toleranzen bezüglich der Verletzung der Bedingung zulässig sind.

Es sei angemerkt, dass die Fluiddruckbelastbarkeit darauf abzielt, dass es zu Rissaufweitungen und -bildungen kommt, wenn die effektiven Spannungen die Zugspannungen des Gesteins überschreiten. Spannungs- und Kohäsionsheterogenitäten auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene können jedoch dafür sorgen, dass sich keine scharfe Spannungsgrenze für Bruchvorgänge ausbildet.

Vorhaben VSG

Das Fluiddruckkriterium des Vorhabens VSG (dort zusätzlich auch Minimalspannungskriterium genannt) verlangt, dass in der abdichtenden Barriere die Summe der kleinsten Gebirgsdruckspannung und der Zugfestigkeit größer ist als der in der entsprechenden Teufenlage hypothetisch mögliche Fluiddruck /KOC 12/. Der Fluiddruck wird dabei dem Druck einer hypothetischen Flüssigkeitssäule über dem Betrachtungsort gleichgesetzt, damit das Kriterium auch auf einen impermeablen ewG im Steinsalz angewendet werden kann. Kock et al. /KOC 12/ verweisen auf das sog. Laugendruckkriterium der BGR, das bis auf die Vernachlässigung der Zugfestigkeit, dem im Vorhaben VSG verwendeten Fluiddruckkriterium entspricht.

Das Fluidruckkriterium des Vorhabens VSG weicht insofern vom Fluidruckkriterium der Sicherheitsanforderungen ab, als dass es keinen „*erwarteten*“ Fluidruck betrachtet. Es betrachtet vielmehr einen Fluidruck im hypothetischen (also nicht erwarteten) Fall, dass aus unbestimmter Ursache ein Fluidzustrom zu der betrachteten Stelle des Wirtsgesteins stattfindet.

Vorhaben AnSichT

Jobmann et al. /JOB 15/ definieren im Vorhaben AnSichT das Fluidruck-Kriterium folgendermaßen:

„Das Fluidruck-Kriterium ist eingehalten, wenn die effektiven Spannungen nicht im Zugspannungsbereich liegen. Dieses Kriterium ist für einen Bereich, der innerhalb des ewG liegt und der das Endlager mit einer Mindestausdehnung umschließt, nachzuweisen.“

Während das Fluidruckkriterium der VSG das Laugendruckkriterium der BGR präzisiert, indem es Zugfestigkeiten berücksichtigt, geht man im AnSichT-Vorhaben einen anderen Weg. Das Fluidruckkriterium des Vorhabens AnSichT vernachlässigt Zugfestigkeiten und betrachtet stattdessen die Anisotropie des Spannungsfeldes. Die Abwesenheit effektiver Zugspannungen wird hier als hinreichend für die Einhaltung des Kriteriums angesehen. Dazu werden effektive Spannungen anhand des Gesetzes von Terzaghi & Fröhlich /TER 43/

$$\sigma^{\text{eff}} = \sigma^{\text{tot}} - \alpha \cdot p \cdot \mathbf{1} \quad (2.2)$$

ermittelt, wobei σ^{tot} und σ^{eff} die totalen und effektiven Spannungen sind, α der Biot-Koeffizient (der die Effektivität der Druckübertragung des Porenfluiddruckes auf das Korngerüst beschreibt), p der Porendruck und $\mathbf{1}$ der Einheitstensor.

Überschreitungen des quantitativen Kriteriums (Abwesenheit effektiver Zugspannungen) sind dabei tolerabel, sofern diese nicht zu raumgreifend sind:

„Treten Zonen mit effektiven Zugspannungen auf, so muss gewährleistet sein, dass eine ausreichende zugspannungsfreie Mächtigkeit innerhalb des ewG (Mindestausdehnung) erhalten bleibt.“ /JOB 15/

Allgemein sollten nach /JOB 15/ folgende Prozesse bei den Modellberechnungen zur Integrität bzw. Einhaltung des Fluidkriteriums berücksichtigt werden:

- Spannungsumlagerungen durch Auffahrung
- Fluidbewegung im deformierbaren porösen Medium
- Wärmetransport
- Thermisch induzierte Ausdehnung des Fluides und des Gesteins
- Schrumpfen des Tonsteins
- Änderungen der Permeabilität
- Porendruckanstieg durch Gasentwicklung

2.6 Dilatanzkriterium

2.6.1 Übersicht über den Prozess der Dilatanz

Dilatanz bezeichnet die Volumenzunahme eines Materials unter Scherbelastung. Dilatanz findet unterhalb der Bruch- und oberhalb der sogenannten Dilatanzgrenze statt. Unter der Dilatanzgrenze (auch Dilatanzfestigkeit genannt) versteht man in der Regel den Spannungszustand, bei dem eine makroskopisch feststellbare Volumenzunahme $\Delta\varepsilon_{Vol}$ beginnt. Dilatanz erhöht die Porosität und damit potentiell auch die Permeabilität für Gase und Flüssigkeiten, sofern die entstehenden Wegsamkeiten miteinander vernetzt sind.

Ursachen dilatanter Verformungen können neben mechanischen Einwirkungen auch Änderungen der effektiven Spannungen aufgrund von Änderungen des Porendrucks sein. Dilatanzkriterium und Fluiddruckkriterium betrachten also teilweise ähnliche Prozesse. Sie unterscheiden sich jedoch darin, dass das Dilatanzkriterium sich auf die Entstehung von Scherdeformationen und -brüchen konzentriert, während das Fluiddruckkriterium vorwiegend die Bildung von Zugrisen aufgrund von Porendruckerhöhungen betrachtet.

Analysen der Einhaltung des Dilatanzkriteriums erfolgen meist anhand mechanischer Modellrechnungen. Die dabei verwendeten mechanischen Stoffmodelle sind physikalisch begründete Extrapolationen der experimentellen Befunde auf den gesamten, relevanten Spannungs- und Verformungsraum. Da Tonsteine ein komplexes mechanisches

Verhalten zeigen, können solche Extrapolationen mit nennenswerten Ungewissheiten verbunden sein. Bei den verwendeten mechanischen Stoffmodellen kann die Wahl daher zum Zwecke einer pessimistischen Abschätzung auf konservative Stoffmodelle fallen, auch wenn diese die experimentellen Befunde nicht exakt abbilden.

2.6.2 Zur Definition von Schädigungsgrenzen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Schädigungsgrenzen für Tonstein festzulegen. Im Folgenden werden diesbezügliche Erläuterungen des Vorhabens AnSichT /JOB 15/ zusammengefasst.

Definition der Schädigungsgrenze anhand des Minimums der Volumenverformung (Dilatanzfestigkeit)

Die Dilatanzfestigkeit wird in uni- oder triaxialen Druckversuchen anhand des Minimums der Volumenverformung bestimmt. Die Abb. 2.1 zeigt exemplarisch das Spannungs-Verformungsverhalten einer COx-Tonsteinprobe aus dem Untertagelabor Bure während eines Triaxialversuchs. Dargestellt ist die radiale (grüne Kurve) und axiale (blaue Kurve) Dehnung in Bezug zur deviatorischen Spannung. Mit beginnender axialer Dehnung der Probe erfährt diese zunächst eine Volumenabnahme, dann eine Volumenzunahme. Die Dilatanzfestigkeit σ_D wird am Minimum der volumetrischen Dehnung (rosa Kurve) abgegriffen. Nach Erreichen der Spitzenfestigkeit kommt es zum Versagen des Materials an der Bruchgrenze σ_F .

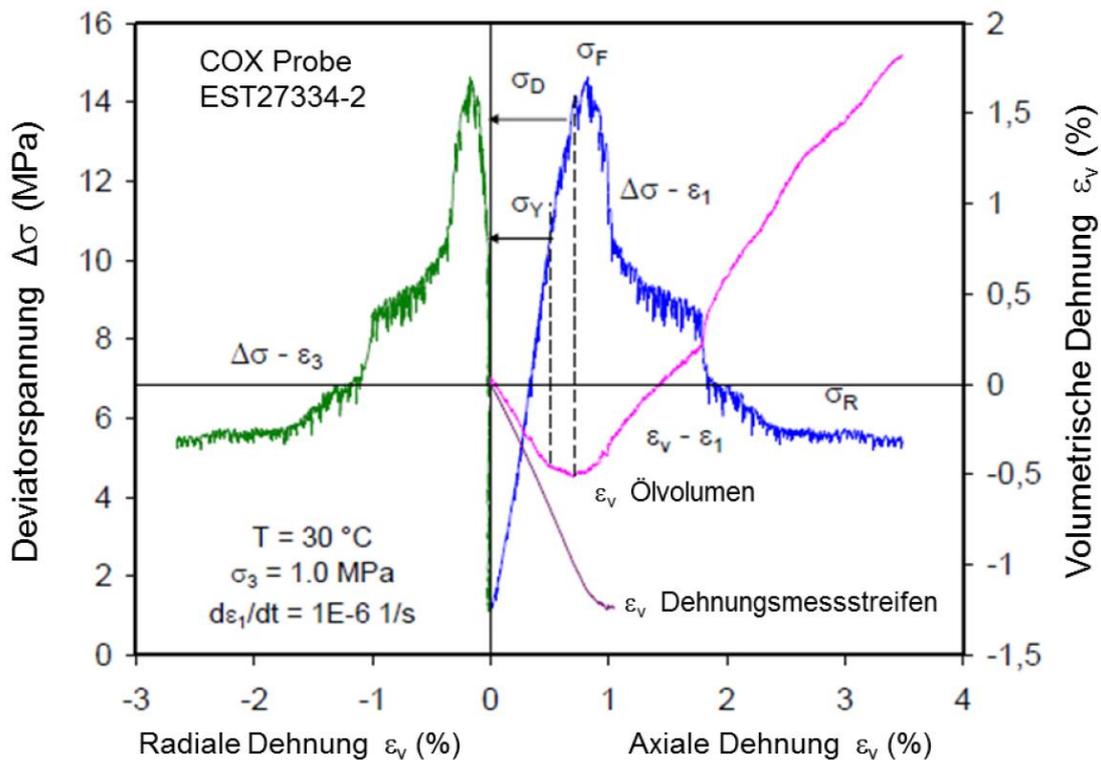


Abb. 2.1 Spannungs- Verformungsverhalten während eines Triaxialtests von Tonstein (COx-Tonstein) aus /ZHA 10/

Die Dilatanzfestigkeit σ_D liegt für verschiedene Tonsteine nahe der Bruchfestigkeit σ_F , wobei /JOB 15/ folgende Befunde zitiert:

- Opalinuton (OPA): $\sigma_D \approx 0,8 \sigma_F$ bis $0,9 \sigma_F$
- Mt. Terri (OPA): $\sigma_D \approx 0,7 \sigma_F$ bzw. $0,96 \sigma_F$ (parallel bzw. senkrecht zur Schichtung)
- Bure (COx): $\sigma_D \approx 0,8 \sigma_F$ bis $0,9 \sigma_F$

Definition der Schädigungsgrenze anhand der Abweichung der Volumenverformung vom linearen Verlauf

Vor Erreichen der eigentlichen Dilatanzfestigkeit σ_D tritt bereits eine Materialschädigung auf. An der Deviatorspannung σ_Y (siehe Abb. 2.1), also noch in der Kompaktionsphase, ändert die Kurve der Volumenverformung ihren linearen Verlauf. Hier endet die elastische Kompaktion aufgrund einsetzender irreversibler Mikrorissbildung.

Untersuchungen an tonreichen und karbonatreichen Fazies des COx-Tonsteins zeigen folgende Beziehungen dieser Schädigungsgrenze σ_y zur Bruchfestigkeit σ_F /JOB 15/:

- Bure (COx), Fazies A (karbonatreich): $\sigma_y \approx 0,9 \cdot \sigma_F - 13$ [MPa] /AND 05/
- Bure (COx), Fazies A (tonreich): $\sigma_y \approx 0,6 \cdot \sigma_F - 2$ [MPa] /AND 05/
- Bure (COx): $\sigma_y \approx 0,7 \cdot \sigma_F$ /ZHA 10/

Definition der Schädigungsgrenze anhand des Maximums der Schallwellengeschwindigkeit („Mikrorissgrenze“)

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung einer Schädigungsgrenze besteht mit der versuchsbegleitenden Untersuchung der Probe mit Ultraschall. Durch dieses Verfahren können lokale Mikrorissbildungen erfasst werden. Die Mikrorissgrenze ist der Beginn der einsetzenden Mikrorissbildung und kann als untere Grenze der mechanischen Schädigung angesehen werden. Mit s-Wellen können nach /JOB 15/ folgende Mikrorissgrenzen ermittelt werden:

- Mt. Terri (OPA), vorrangig S-Proben: $\sigma_{ini\ dam} \approx 0,5 \dots 0,6 \cdot \sigma_F$ /POP 07/
- Mt. Terri (OPA), S-Proben: $\sigma_{ini\ dam} \approx 0,6 \cdot \sigma_F$ (s-Wellen, /NAU 07/)

Mit p-Wellen werden höhere Grenzen ermittelt:

- Mt. Terri (OPA), S-Proben: $\sigma_{ini\ dam} \approx 0,8 \cdot \sigma_F$ (p-Wellen, /NAU 07/)

Jobmann et al. /JOB 15/ merken an, dass in manchen Fällen die Auswertung der p-Wellen nicht erfolgen konnte, weil das Maximum der Schallwellengeschwindigkeit erst nach Überschreitung der Spitzenfestigkeit festzustellen war.

Definition der Schädigungsgrenze anhand der Perkolationsgrenze

Ein Ansteigen der Permeabilität kann laut /JOB 15/ in der Regel nach Überschreiten der Dilatanzfestigkeit ermittelt werden, wobei ein sprunghafter Anstieg nach Überschreiten der Bruchfestigkeit zu verzeichnen ist.

2.6.3 Kriterien

Sicherheitsanforderungen

Das Dilatanzkriterium der Sicherheitsanforderungen verlangt: *„Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten.“* /BMU 10/

Das Dilatanzkriterium orientiert sich somit an der Dilatanzfestigkeit, d. h. an der Dilatanzgrenze. Die Sicherheitsanforderungen lassen dabei offen, in welchem Ausmaß eine räumliche Ausbreitung der Auflockerungszone in der Nachverschlussphase (z. B. durch Dilatanz) zulässig ist.

Vorhaben AnSichT

Im Vorhaben AnSichT wird das Dilatanzkriterium folgendermaßen formuliert:

„Das Dilatanz-Kriterium ist eingehalten, wenn der Spannungszustand unterhalb der Schädigungsgrenzen und somit auch der Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen liegt. Dieses Kriterium ist für einen Bereich, der innerhalb des ewG liegt und der das Endlager mit einer Mindestausdehnung umschließt, nachzuweisen.“ /JOB 17/

Im Gegensatz zu den Sicherheitsanforderungen wird als einzuhaltender Grenzwert nicht die Dilatanzfestigkeit (Dilatanzgrenze), sondern eine Schädigungsgrenze definiert, die unterhalb der Dilatanzfestigkeit liegt und sich an der Entstehung von Mikrorissen orientiert. Ziel ist nach Jobmann et al. /JOB 17/ *„eine nach Möglichkeit konservative (abdeckende) Abschätzung im Rahmen des Integritätsnachweises“*, die auch die Praktikabilität⁴ der numerischen Umsetzung berücksichtigt. Jobmann et al. /JOB 15/ betrachten die auf Basis der s-Wellengeschwindigkeiten ermittelte Mikrorissgrenze als konservativ. Die Formulierung der Dilatanzgrenze bzw. des Dilatanzkriteriums auf dieser Basis liefere den geringsten Betrag der zulässigen Beanspruchung.

⁴ Der Hinweis auf die Praktikabilität bezieht sich laut /JOB 17/ auf die Verwendung eines gängigen Wertes von $\alpha=0,6$ für den Biot-Koeffizienten.

Die Mikrorissgrenze wurde dabei relativ zur Bruchfestigkeit mit

$$\sigma_{dil} = 0,5 \cdot \sigma_F \quad (2.3)$$

σ_{dil} Dilatanzgrenze
 σ_F Bruchfestigkeit

angesetzt. Durch die Korrelation der Dilatanzgrenze mit der Bruchfestigkeit, können damit modelltechnisch auch anisotrope Festigkeiten berücksichtigt werden. Forschungsbedarf gibt es nach /JOB 15/ zu möglichen Skaleneffekten bei der Übertragung von Labor-daten auf In-situ-Verhältnisse und bezüglich der Existenz von Kurzzeit- und Langzeitfestigkeiten.

Nach Jobmann et al. /JOB 15/ bleibt zu prüfen, ob für Tonstein zusätzlich auch ein verformungsbasiertes Kriterium anzuwenden ist, weil sich Tonstein unterhalb der Dilatanzgrenze nicht beliebig stark schädigungsfrei verformen lässt.

2.7 Temperaturkriterium

Sicherheitsanforderungen

Das Temperaturkriterium der Sicherheitsanforderungen lautet:

„Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.“ /BMU 10/

Es untersucht somit Änderungen der Barriereigenschaften des ewG aufgrund temperaturinduzierter Prozesse. Die auslösenden Prozesse bleiben hierbei unbestimmt, ebenso die Bedeutung der „unzulässigen Beeinflussung“.

Vorhaben AnSichT

Nach /JOB 17/ müssen zur Überprüfung einer temperaturbedingten Schädigung der Barrierewirkung folgende Effekte berücksichtigt werden:

- Expansion und Kontraktion des Tonsteins
- mechanische und hydraulische Gesteinseigenschaften

- thermische Eigenschaften
- Dehydrierung quellfähiger Tonminerale
- Erzeugung hydraulischer Gradienten
- Verdampfen von Wasser
- Veränderung des Gasdruckes
- Illitisierung von Smektiten
- Smektitisierung von Illiten
- Zementierung durch Silica- und Illit-Neubildung
- thermochemische Sulfatreduktion
- Sorptionseigenschaften
- Kerogenumwandlung in Erdöl und
- mikrobielle Aktivitäten.

Die thermische Expansion und Kontraktion sowie die Begrenzung der mikrobiellen Aktivität konnten durch Jobmann et al. /JOB 17/ als die bedeutsamsten Prozesse extrahiert werden. Aufgrund thermo-hydro-mechanischer Effekte ist für das in AnSichT untersuchte Tonstein-Konzept keine wesentliche Beeinträchtigung der Barrierewirkung im untersuchten Temperaturbereich bis 150 °C ersichtlich /JOB 17/. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist bei Temperaturen über 122 °C eine mikrobielle Aktivität grundsätzlich ausgeschlossen /BRA 19/.

Als Grenztemperatur wurde im Vorhaben AnSichT eine Temperatur von 150 °C verwendet, da für höhere Temperaturen nur wenige Kenntnisse des Materialverhaltens vorlagen. Das Temperaturkriterium wurde daher wie folgt definiert.

„Das Temperatur-Kriterium ist eingehalten, wenn eine Temperatur von 150 °C im Gestein nicht überschritten wird. Dieses Kriterium ist für den gesamten ewG nachzuweisen.“ /JOB 17/

StandAG

Das StandAG fordert in Anlage 8:

„Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen. Indikatoren hierfür sind die Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen.“ /STA 17/

Diese Forderungen stellen keine Konkretisierung der Sicherheitsanforderungen dar und können daher nicht zu diesem Zwecke genutzt werden.

3 Analyse und Bewertung

Nachfolgend werden zunächst allgemeine und danach kriterienspezifische Aspekte betrachtet und bewertet. Bewertungen, die im allgemeinen Teil (Kap. 3.1) zu einzelnen Kriterien erfolgen, werden im kriterienspezifischen Teil (Kap. 3.2) nicht wiederholt.

3.1 Allgemeine Betrachtungen

3.1.1 Notwendige Ergänzung oder Erweiterung der Integritätskriterien

Die Forderung der Sicherheitsanforderungen nach einem Integritätsnachweis impliziert, dass ein Satz an Integritätskriterien angewendet werden muss, der für einen Integritätsnachweis umfangreich genug ist. Hierzu ist anzumerken, dass die fünf Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen diesen Anspruch zumindest in Bezug auf einen ewG im Tongestein nicht erfüllen, da ...

- ein Integritätskriterium fehlt, das den ausreichenden Erhalt der Sorptionsfähigkeit des ewG überprüft – eine Eigenschaft mit hoher Relevanz für das Einschlussvermögen eines ewG im Tongestein – und
- die Ausbildung erheblicher Gaswegsamkeiten nicht verlässlich erfasst wird, da das Fluidruckkriterium, das Advektionskriterium und das Kriterium „sekundäre Wegsamkeiten“ auf eine Limitierung der Strömung von wässrigen Lösungen, Grundwasser bzw. Porenwasser abzielen.

Zur Durchführung des Integritätsnachweises ist also die Anwendung zusätzlicher Integritätskriterien oder auch eine inhaltliche Erweiterung vorhandener Integritätskriterien notwendig. Das Fehlen weiterer Integritätskriterien kann an dieser Stelle nicht ausgeschlossen werden.

Die Unvollständigkeit der fünf Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen in Bezug auf Tongestein ist kein regulatorischer Mangel, sofern man die Sicherheitsanforderungen nicht dahingehend auslegt, dass die dort formulierten Integritätskriterien vollständig seien und zum Nachweis der Integrität genügen. Die Sicherheitsanforderungen können nicht den Anspruch auf langfristige Vollständigkeit erheben, da das sich weiterentwickelnde Verständnis integritätsgefährdender Prozesse in Zukunft weitere Integritätskriterien erforderlich machen kann.

3.1.2 Zum Integritätsnachweis über den Einschluss

Da Integrität den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers beschreibt /BMU 10/, ist es prinzipiell möglich, den Integritätsnachweis darüber zu führen, dass man das Einschlussvermögen nachweist.

Eine solche Vorgehensweise ist beispielsweise beim Advektionskriterium des Vorhabens AnSichT zu erkennen. Dieses fordert, dass „*ein gelöster konservativer Tracer innerhalb des Nachweiszeitraums nicht allein auf Grund der Bewegung des Porenwassers vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden kann*“ /JOB 17/. Das Kriterium bewertet somit das Einschlussvermögen bei rein advektivem Transport und weist damit die Integrität über das Einschlussvermögen nach. In ähnlicher Weise könnten Einschlussanalysen⁵ dazu genutzt werden, die Integrität des ewG nachzuweisen. Grundsätzlich jedoch führt diese Vorgehensweise, die Integrität des ewG über den Einschluss der Radionuklide nachzuweisen, zu folgenden Schwierigkeiten:

- Strömungs- und Transportbetrachtungen werden bereits in der Konsequenzanalyse und in möglichen Einschlussanalysen durchgeführt. Ein Integritätskriterium, das ähnliche Strömungs- und Transportbetrachtungen auf ähnlicher Datengrundlage durchführt, erzeugt keinen wesentlichen Erkenntnisgewinn zur Sicherheit des Endlagersystems. Der nachweistechische Wert eines Integritätskriteriums, dass die an anderer Stelle bereits durchgeführten Strömungs- und Transportbetrachtungen in leicht abgewandelter Form wiederholt, ist gering, kann aber leicht überschätzt werden.
- Primäres Ziel des Langzeitsicherheitsnachweises ist der Nachweis des Einschlusses, nicht der Nachweis der Integrität, da letzterer ebenfalls auf das Einschlussvermögen und damit auf den Einschluss abzielt. Es erscheint daher nicht zielführend, wenn ein Advektionskriterium anhand von Einschlussbetrachtungen auf die Integrität schließt. Vielmehr entsteht hierdurch die Gefahr eines nachweistechisch wertlosen Zirkelschlusses, wenn vom Einschluss auf die Integrität und

⁵ Gemeint sind Transportrechnungen, die nachweisen, dass ein ausreichender Anteil an Radionukliden während des Nachweiszeitraums im Endlagersystem eingeschlossen bleibt. Die Bewertung kann anhand von quantifizierenden Einschlusskriterien erfolgen.

von der Integrität wieder auf das Einschlussvermögen und den Einschluss geschlossen wird.

- Der Einschluss von Radionukliden hängt auch von äußeren Faktoren ab, insbesondere von der Größe der anliegenden hydraulischen Gradienten. Über den Einschluss lässt sich somit nicht sicher bestimmen, ob die Eigenschaften des ewG unverändert bleiben (was beim Integritätsnachweis gezeigt werden soll). Beispielsweise kann der Radionuklidaustrag auch bei hochgradig gestörtem Tonstein-ewG gering sein, wenn die anliegenden Potentialgradienten nur klein genug sind. Umgekehrt wirkt ein ungestörter Tonstein-ewG nicht mehr einschließend bei sehr hohen hydraulischen Gradienten.

Aus den genannten Gründen erscheint ein Nachweis der Integrität mittels eines Nachweises des Einschlusses nicht empfehlenswert.

3.1.3 Konkretisierungsgrad

Die Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen sind nicht vollständig konkretisiert, weil sie Entscheidungen zu Integritätsindikatoren, zulässigen Wertebereichen, Anwendungsbereichen und Toleranzen überwiegend offen halten⁶. Toleranzangaben, wie etwa die Angabe, ob begrenzte Teile des ewG das quantitative Kriterium verletzen dürfen, können die Sensitivität eines Integritätskriteriums erheblich beeinflussen, vor allem dann, wenn im ewG kleinräumige Kriterienverletzungen wahrscheinlich sind, die das Einschlussvermögen des ewG aber nicht gefährden (z. B. eine sehr kleinräumige Dilatanz).

Weil die Sensitivität der Integritätskriterien insbesondere gegenüber kleinräumigen Verletzungen der in ihnen enthaltenen quantitativen Kriterien unbestimmt ist, wird durch sie auch kein bestimmtes Integritätsniveau festgelegt. Die regulatorische Wirkung der Integritätskriterien besteht vielmehr darin, dass sie zu bestimmten integritätsbezogenen Betrachtungen verpflichten.

⁶ Beispielsweise bleibt beim Fluiddruckkriterium offen, wie der Fluiddruck berechnet wird (tatsächlicher Druck oder Druck einer hypothetischen Flüssigkeitssäule), wie die Fluiddruckbelastbarkeit definiert wird (mit oder ohne Berücksichtigung der Zugfestigkeit), was als erhöhter Zutritt von Grundwasser gelten kann und ob Teile des ewG zumindest zeitweise das quantitative Kriterium verletzen dürfen (also wie tolerant das Kriterium ist).

Aus regulatorischer Perspektive kann der geringe Konkretisierungsgrad der Integritätsindikatoren wünschenswert sein, weil er dem Verfahrensbetreiber Flexibilität gibt, problemspezifische Indikatoren, Berechnungsvorschriften und quantitative Kriterien zu formulieren. Die fehlende regulatorische Festlegung eines Integritätsniveaus ist für den Verfahrensbetreiber jedoch auch ein Nachteil, weil er in der Unsicherheit darüber operieren muss, ob seine Integritätskriterien regulatorisch akzeptabel sind. Dieses Problem kann jedoch durch einen frühzeitigen fachlichen Austausch zwischen Verfahrensbetreiber und Genehmigungsbehörde gemildert werden.

3.1.4 Toleranzbetrachtung

Die Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen lassen weitgehend⁷ offen, ob Kriterienverletzungen unter bestimmten Umständen tolerabel sind.

Das damit verbundene Problem ist weniger, dass hierdurch kein Integritätsniveau festgelegt wird, weil dies bereits wegen der fehlenden Angabe von Wertebereichen für Integritätsindikatoren (Grenzwerten) der Fall ist. Problematisch ist dagegen, dass die fehlenden Toleranzangaben die eigentliche Fragestellung der Integritätsbetrachtungen verkennt, wenn kleinräumige oder kurzzeitige Überschreitungen quantitativer Kriterien wahrscheinlich sind⁸. In diesem Fall nämlich stellt sich im Integritätsnachweis weniger die Frage nach der Existenz als vielmehr nach dem Ausmaß solcher Überschreitungen. Dieser Wechsel der Fragestellung wird durch die Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen nicht abgebildet, die überwiegend die Existenz bestimmter Prozesse abfragen.

Angesichts der primären Zielsetzung des Integritätsnachweises, den Erhalt des Einschlussvermögens des ewG zu belegen, erscheint es sinnvoll, kleinräumige und

⁷ Eine Ausnahme bildet das Fluidruckkriterium, das nur *erhöhte* Zutritte von Grundwässern verhindern soll. Dies könnte dahingehend ausgelegt werden, dass kleinräumige und kurzfristige Verletzungen des quantitativen Kriteriums tolerabel sind.

⁸ Beispielsweise ist ein kleinräumiges Auftreten von Dilatanz bei überkonsolidierten Tonsteinen nicht unwahrscheinlich.

kurzzeitige Überschreitungen quantitativer Kriterien zu tolerieren, solange sie das integrale Einschlussvermögen des ewG nicht gefährden.⁹

3.1.5 Multiple Lines of Evidence

Im Folgenden wird diskutiert, ob Integritätskriterien unabhängige Argumente verwenden und damit eine Nachweisstrategie der Diversität unterstützen können, wie sie unter der Bezeichnung „Multiple Lines of Evidence“ /NEA 04/ für den gesamten Langzeitsicherheitsnachweis angestrebt wird.

Weil Stakeholder die Prognosefähigkeit numerischer Simulationen unterschiedlich einschätzen können, wäre bei den Integritätskriterien ein Einbezug von Befunden, die nicht auf Simulationen beruhen, wünschenswert. Dies ist jedoch schwierig, weil Prognosen zur Entwicklung integritätsrelevanter Eigenschaften oder Zustände aufgrund ihrer Komplexität in der Regel numerische Simulationen erfordern.

In Anlehnung an die Abwägungskriterien des StandAG /STA 17/ (Anlage 6) ließen sich jedoch qualitative Befunde zur bisherigen Barrierenwirksamkeit des ewG heranziehen, um das Vertrauen in die zukünftige Integrität des ewG zu stützen:

- „Unterlagernde wasserlösliche Gesteine
- Unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe
- Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken
- Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung
- Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien“ /STA 17/

⁹ Im AnSichT-Vorhaben werden für das Dilatanz- und das Fluiddruckkriterium Toleranzen eingeführt, indem für diese Kriterien lediglich gefordert wird, dass sie „für einen Bereich, der innerhalb des ewG liegt und der das Endlager mit einer Mindestausdehnung umschließt, nachzuweisen“ sind. Die quantitativen Kriterien wären damit nicht für den gesamten ewG einzuhalten. Hierzu ist anzumerken, dass eine solche Verfahrensweise nur möglich ist, wenn der ewG nicht durch diese Mindestausdehnung definiert wurde. Eine Diskussion verschiedener Möglichkeiten der ewG-Festlegung findet sich in Kapitel 3.1.6.

Solche Befunde könnten qualitativer Teil des Advektionskriteriums sein oder in das Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ integriert werden, um die generelle Robustheit des ewG zu demonstrieren. Sie müssen allerdings nicht im Rahmen von Integritätskriterien behandelt werden, sofern sie in anderen Teilen des Langzeitsicherheitsnachweises Anwendung finden.

Im Sinne eines „Multiple Lines of Evidence“ wäre zumindest der Verzicht auf redundante Betrachtungen. Dies betrifft insbesondere Versionen des Advektionskriteriums, die Argumente der Konsequenzenanalyse und möglicher Einschlussanalysen wiederholen, weil sie ähnliche Strömungs- und Transportbetrachtungen auf ähnlicher Datengrundlage durchführen.

3.1.6 Anmerkung zum ewG-Verständnis

Die Sicherheitsanforderungen definieren den ewG als den Gegenstand des Integritätsnachweises und der Integritätskriterien. Weder die Sicherheitsanforderungen noch das StandAG erläutern, ob der ewG eine Planungsgröße ist oder ob er denjenigen Gebirgsbereich bezeichnet, der tatsächlich einschlusswirksam sein wird (entsprechend der Begriffsbedeutung) bzw. der sich nach den abschließenden Sicherheitsanalysen als tatsächlich einschlusswirksam erweisen wird. Im zweiten Fall ist der ewG keine Planungsgröße, sondern das Ergebnis von Transport- und Rückhalteprozessen.

Diese Unterscheidung ist insofern wichtig, als dass die Ausdehnung eines ewG, der sich allein aus Transport- und Rückhalteprozessen ergibt, keinen (planerischen) Sicherheitsaufschlag beinhalten kann. Jedes lokale Versagen des ewG dürfte dann auch eine Gefährdung seiner Einschlusswirksamkeit mit sich bringen. Versteht man den ewG hingegen als Planungsgröße, dann ist ein Sicherheitsaufschlag durchaus möglich und ein lokales Versagen des ewG unter Umständen tolerabel.

Dass es beim ewG-Verständnis Spielräume gibt, ist kein sicherheitstechnisches Problem, da die Definition des ewG nichts an den tatsächlichen geologischen Gegebenheiten ändert. Es können sich jedoch Kommunikationsprobleme ergeben, insbesondere zwischen Verfahrensbetreiber und Genehmigungsbehörde. Darüber hinaus treten konzeptionelle Inkonsistenzen und praktische Probleme auf, wenn der ewG-Festlegung jegliches Element der Planung abgesprochen und der ewG stattdessen als reines Ergebnis von Transport- und Rückhalteprozessen verstanden wird. Die Gründe hierfür sollen nachfolgend erläutert werden.

Versteht man den ewG als Prozessergebnis, also als denjenigen Gebirgsbereich, der einschlusswirksam sein wird, dann kann dieser ewG per Definition nicht versagen¹⁰. Er kann deshalb auch nicht Gegenstand der Integritätskriterien sein, die ja ein Versagen des ewG abprüfen.

Darüber hinaus gehört ein ewG, der allein durch ein Prozessergebnis bestimmt wird, nicht zu den klassischen Endlagerkomponenten, die ja erstens örtlich fest umrissen sind und zweitens Sicherheitsfunktionen besitzen, die ausfallen können. Wenn für die endgültige Festlegung des ewG abgewartet wird, dass die endgültigen Sicherheitsanalysen vorliegen, dann liegt bis zu diesem Zeitpunkt auch kein fertiges Endlagerkonzept vor (sofern der ewG eine Endlagerkomponente ist). Die konzeptionelle Inkonsistenz besteht darin, dass die Sicherheitsanalysen dann die Sicherheit eines Endlagerkonzeptes bewerten, das noch gar nicht vollständig vorliegt.

Versteht man den ewG als reines Prozessergebnis, dann erfolgt die Festlegung der ewG-Grenzen durch Einschlussbetrachtungen, also zum Beispiel durch eine Betrachtung der im Endlager (inkl. ewG) zurückgehaltenen Radionuklidmengen oder der Radionuklidströme über den ewG-Rand. Hier können praktische Probleme auftreten, welche die Abb. 3.1 für den Fall illustriert, dass die ewG-Festlegung anhand des Anteils der eingeschlossenen Radionuklidmengen erfolgt:

- Die ewG-Grenze kann in einem Bereich liegen, in dem die absoluten Konzentrationsgradienten sehr klein sind (Abb. 3.1A). Dies erschwert eine exakte Grenzziehung.
- Es kann mehrere mögliche ewG-Festlegungen geben, die garantieren, dass ein ausreichender Einschluss gewährleistet ist (Abb. 3.1B). Die ewG-Bestimmung ist in diesem Fall nicht eindeutig.
- Bestehende Ungewissheiten machen eine exakte bzw. deterministische Prognose der Radionuklidverteilung nach Abschluss des Nachweiszeitraumes unmöglich (Abb. 3.1C).

Aufgrund der genannten Punkte dürfte die ewG-Bestimmung immer auch ein Element der Planung enthalten.

¹⁰ Bei einem solchen ewG-Verständnis ist nicht mehr die Frage, ob der ewG versagt, sondern ob er existiert.

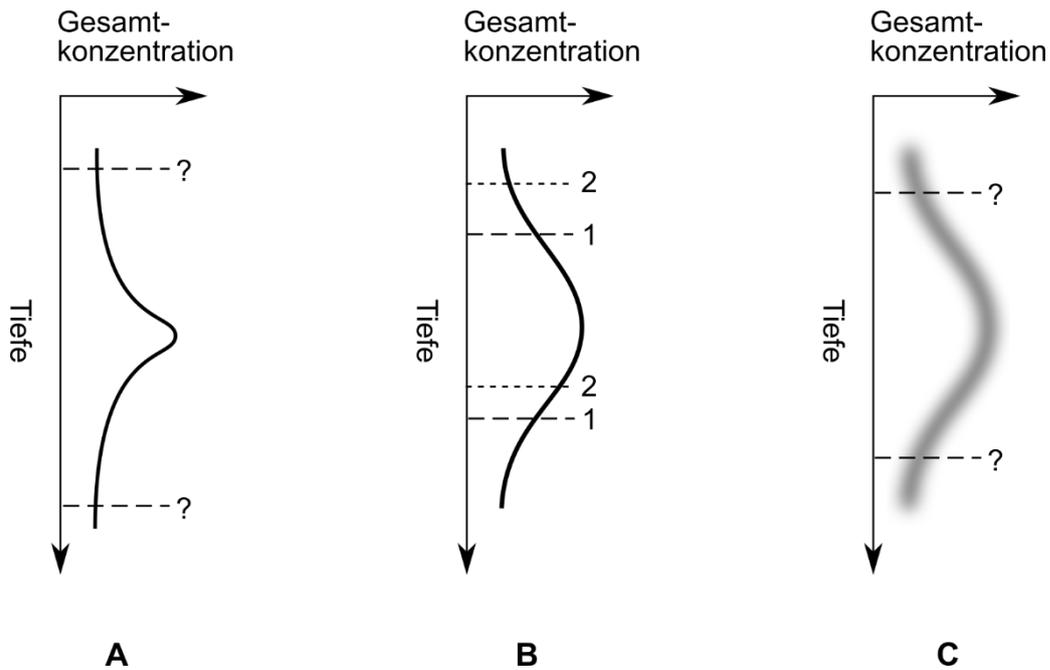


Abb. 3.1 Fälle, in denen ewG-Grenzen nicht oder nicht eindeutig mit Hilfe von Transportrechnungen bestimmt werden können

Dargestellt ist eine hypothetische Konzentrationsverteilung an einem Tonsteinstandort am Ende des Nachweiszeitraums, wobei nicht festgelegt wird, ob es sich um Stoffmengen-, Massen-, Aktivitäts- oder andere Konzentrationen handelt. Es wird in diesen Beispielen angenommen, dass die ewG-Grenzen anhand der im Endlager verbliebenen Radionuklide identifiziert werden. Gestrichelte Linien zeigen mögliche bzw. fragliche Festlegungen von ewG-Grenzen an. Die ewG-Festlegung wird erschwert durch (A) geringe absolute Konzentrationsgradienten, (B) mehrere Möglichkeiten, Einschluss zu erhalten (gleiche Radionuklidmengen innerhalb der Grenzen 1-1 und 2-2), (C) vorhandene Ungewissheiten.

In der Praxis dürfte die Festlegung des ewG auf vorlaufenden Prozessanalysen beruhen, bei denen die Integritätskriterien auf das Wirtsgestein angewendet werden (nicht auf den ewG, der zu diesem Zeitpunkt ja noch nicht definiert ist). Ab dem Zeitpunkt seiner Festlegung ist der ewG eine Planungsgröße.

Je gründlicher die vorlaufenden Prozessanalysen ausfallen, desto eher dürfte der festgelegte ewG die Integritätskriterien nicht verletzen. Der regulatorische Wert der Integritätskriterien wird hierdurch nicht geschmälert, da es aus regulatorischer Sicht genügt, dass der ewG die Integritätskriterien erfüllt.

3.2 Kriterienspezifische Betrachtung

3.2.1 Sekundäre Wegsamkeiten

Wert des Kriteriums

Das Kriterium „sekundäre Wegsamkeiten“ wird teilweise durch das Fluiddruck-, Dilatanzkriterium abgeprüft. Der Wert des Kriteriums besteht allerdings darin, dass es im Gegensatz zum Fluid- und Dilatanzkriterium die auslösenden Prozesse nicht spezifiziert. Somit umfasst es auch diejenigen Prozesse, die erst zukünftig als relevant erachtet werden könnten.

Klärungsbedarf

Im Sinne des Einschlussvermögens des ewG ist nicht unmittelbar einsichtig, warum sich das Kriterium auf ein *Eindringen* oder *Austreten* von Lösungen *in bzw. aus dem ewG* bezieht und nicht ausdrücklich auf den *Durchtritt* von Lösungen *durch den ewG hindurch*. Der Bezug auf das *Eindringen* ist möglicherweise problematisch, da eine Infiltration von Gasen in das Wirtsgestein Tongestein über Mikrorisse (zur Vermeidung integritätsschädigender Gasdrücke) Teil des Sicherheitskonzeptes sein kann und dabei eine begleitende Infiltration von Lösungen nicht sicher ausgeschlossen werden kann.

Erweiterungsmöglichkeiten

Eine Erweiterung des Kriteriums auf das Eindringen bzw. Austreten ggf. schadstoffbelasteter Fluide (also einschließlich einer *Gasphase*) erscheint nicht sinnvoll, da Endlagerkonzepte für Tongestein möglich sind, die von einer Gasinfiltration in den ewG auf druckinduzierten Mikrorissen (pathway dilation) Kredit nehmen. Falls eine solche Erweiterung stattfände, dürfte das Kriterium nicht mehr den *Eintritt* von Fluiden in den ewG, sondern müsste den *Durchtritt* von Fluiden durch den ewG behandeln.

3.2.2 Advektionskriterium

Verzichtbarkeit des Kriteriums

Das Advektionskriterium der Sicherheitsanforderungen soll in erster Linie eine Teilnahme des ewG-Porenwassers am hydrogeologischen Kreislauf verhindern. Das Kriterium tendiert daher zu Strömungs- und evtl. auch zu Transportsimulationen, die hinsicht-

lich Datengrundlage und Modellannahmen den Simulationen der Konsequenzenanalyse und eventueller Einschlussanalysen nahestehen können. Wenn dies der Fall ist, ist durch das Advektionskriterium kein wesentlicher Erkenntnisgewinn gegenüber diesen Analysen zu erwarten, und sein Nachweiswert wäre entsprechend gering.

Zwar ließen sich beim Advektionskriterium Betrachtungen integrieren, die nicht von Strömungs- und Transportsimulationen abhängen, wie z. B. geomechanische oder tektonische Prognosen zur Entwicklung der intrinsischen Permeabilitäten des ewG. Dies wird im Prinzip aber bereits durch das Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ abgedeckt.

Advektionskriterien, die dem Advektionskriterium des Vorhabens AnSichT ähneln, orientieren sich am Einschluss und übernehmen daher Funktionen eines Einschlusskriteriums. Sie wiederholen somit die in der Konsequenzenanalyse bzw. in möglichen Einschlussanalysen durchgeführten Strömungs- und Transportrechnungen. Zudem bergen sie, wie in Kapitel 3.1.2 dargelegt, die Gefahr eines nachweistheoretisch wertlosen Zirkelschlusses, da vom Einschluss auf die Integrität geschlossen wird. Der Folgeschluss von der Integrität auf den Einschluss wäre somit trivial.

Aus diesen Gründen erscheint das Advektionskriterium weitgehend verzichtbar.

Bewertungsgrößen und -maßstäbe

Die Intention des Advektionskriteriums der Sicherheitsanforderungen ist der Nachweis langsamer Grundwasserströmung. Die Sicherheitsanforderungen schlagen dabei als Vergleichsmaßstab für einen langsamen Transport die Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse vor. Ein solcher Vergleich kann anhand Partikelströmen oder -flussdichten erfolgen.¹¹

¹¹ Der Begriff „Langsamkeit des diffusiven Transports“ suggeriert die Existenz einer „Geschwindigkeit der Diffusion“. Eine solche hat jedoch keine physikalische Aussagekraft. Bei der Advektion ist die Strömungsgeschwindigkeit eine mittlere Partikelgeschwindigkeit, an der sich alle Partikel orientieren, weil sie sich im gleichen Potentialfeld bewegen. Die Strömungsgeschwindigkeit fängt damit einen wesentlichen makroskopischen Aspekt des physikalischen Vorgangs ein, weil sie eine Gemeinsamkeit aller Partikelbewegungen charakterisiert. Eine solche Gemeinsamkeit fehlt bei der diffusiven Partikelbewegung, weil Diffusion ein statistischer Vorgang ist, bei dem die einzelnen Partikel unabhängige Bewegungen ausführen. Eine mittlere Partikelgeschwindigkeit würde hier keinen wesentlichen Aspekt des physikalischen Vorgangs erfassen. Diffusiver Transport sollte daher nicht durch Strömungsgeschwindigkeiten, sondern durch Flüsse oder Flussdichten beschrieben werden. Dabei sei angemerkt, dass die Division eines

Aus folgenden Gründen sollte der diffusive Transport dennoch nicht als Maßstab für „Langsamkeit“ verwendet werden:

- Der lokale¹² diffusive Fluss kann nicht nur „langsam“ sein, sondern auch gegen Null gehen, was eine Übersensitivität des Kriteriums zur Folge haben kann. Gemäß dem 1. Fickschen Gesetz verschwindet der diffusive Fluss eines einzelnen Radionuklids am Ort der Konzentrationsmaxima und -minima, was durch die in Anhang A dokumentierten Transportsimulationen bestätigt wird. Wenn sich ein Konzentrationsmaximum advektiv bewegt, ergibt sich daraus eine räumlich wandernde, lokale Verletzung des Advektionskriteriums – und zwar auch dann, wenn der ewG seine Eigenschaften nicht ändert.¹³

Wie die Simulationen in Anhang A zeigen, wird das Verschwinden diffusiver Flüsse erschwert, wenn als Referenzgröße die Summe der diffusiven Flüsse aller Radionuklide gewählt wird. Wie aber der Rechenfall „weniger günstig“ in Anhang A zeigt, können die summierten diffusiven Flüsse unter bestimmten Umständen ebenfalls so klein werden, dass sich daraus eine Übersensitivität des Kriteriums ergibt.

- Sowohl beim rein advektiven als auch beim rein diffusiven Transport gelöster Schadstoffe *über größere Transportstrecken* handelt es sich um einen hypothetischen Vorgang, der im Endlager nicht existiert, weil der Schadstofftransport durch das gemeinsame Wirken von Advektion, Diffusion und Rückhaltung zustande kommt. Solche Bewertungsgrößen könnten unter Umständen stark von den tatsächlichen Transportvorgängen abweichen.

diffusiven Flusses durch den Strömungsquerschnitt physikalisch gesehen nicht zu einer Geschwindigkeit führt, sondern zu einer Flussdichte.

¹² Um diffusive Flüsse nicht lokal, sondern auf größerer Skala zu ermitteln, müsste eine Mittelung lokaler Flüsse erfolgen. Die Anwendung des 1. Fickschen Gesetzes auf großräumige Konzentrationsunterschiede bewirkt allerdings keine Mittelung, sondern führt lediglich Diskretisierungsungenauigkeiten ein. Eine Betrachtung lokaler Flüsse ist daher nicht vermeidbar. Ein weiterer Grund für eine lokale Betrachtung ist, dass die theoretisch begründete Trennung zwischen advektivem und diffusivem Transportanteil nur lokal erfolgen kann. Reine Diffusion über größere Distanzen hinweg ist ein Vorgang, der im Endlager bei Anwesenheit von Advektion nicht vorkommt. Auch reine Advektion über größere Distanzen hinweg ist kein realer Vorgang.

¹³ Das Advektionskriterium des AnSichT-Vorhabens umgeht dieses Problem, indem es advektive Flüsse anhand ihrer potentiellen Transportleistung bewertet und nicht anhand eines Vergleichs mit diffusiven Flüssen. Auf das Problem, dass das Advektionskriterium auf diese Weise Funktionen eines Einschlusskriteriums übernimmt, wurde bereits hingewiesen.

3.2.3 Fluidruckkriterium

Wert des Kriteriums

Das Fluidruckkriterium der Sicherheitsanforderungen prüft das Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ in Bezug auf fluiddynamisch-mechanische Prozesse ab. Es deckt damit eine wichtige, potentiell integritätsgefährdende Prozessgruppe für das Wirtsgestein Tongestein ab.

Eine Erweiterung des Fluidruckkriteriums zur Limitierung auch eines erhöhten Gaszutritts sollte vermieden werden, da Sicherheitskonzepte für Tongestein vom Vorgang des Gastransports auf druckinduzierten Mikrorissen (pathway dilation) Kredit nehmen können.

Klärungsbedarf

Das Fluidruckkriterium der Sicherheitsanforderungen lässt offen, was unter erhöhten Grundwasserzutritten zu verstehen ist und warum ein Zutritt von Wässern in den ewG zwingend die Einschlussfähigkeit des ewG gefährden muss.¹⁴

Bewertungsgrößen und -maßstäbe in bisherigen Anwendungen

Das Fluidruckkriterium des Vorhabens AnSichT bildet mit dem Biot-Koeffizienten den Einfluss der Porendrücke auf die effektiven Spannungen genauer ab als der im Vorhaben VSG verwendete Indikator. Die Vernachlässigung der Zugfestigkeiten erscheint vor dem Hintergrund adäquat, dass über die Existenz von Zugfestigkeiten auf Zeitskalen, die weit über die Zeitskalen von Laborversuchen hinausgehen, wenig bekannt ist.

Während das Fluidruckkriterium aus AnSichT den tatsächlichen Fluidruck betrachtet, untersucht das Fluidruckkriterium des VSG-Vorhabens den Fluidruck einer hypothetischen statischen Flüssigkeitssäule über dem Betrachtungsort.

Der VSG-Ansatz ist der Abwesenheit von Fluiden im Steinsalz geschuldet. Der hypothetische Fluidruck bewertet die Integrität im Falle eines unerwarteten hydraulischen Kurzschlusses mit einem Aquifer. Er betrachtet somit auch die Gefahr eines „Durchreißen“

¹⁴ Ein „Durchtritt“ durch den ewG würde dies sicherlich tun.

des ewG, falls die Bereiche, in denen das Kriterium verletzt wird, an einen Aquifer angrenzen. Diese Betrachtung ist auch für einen ewG im Tongestein sinnvoll.

Die Verwendung des hypothetischen Fluiddrucks ist allerdings nicht konservativ, wenn der hypothetische Fluiddruck kleiner ist als der tatsächliche Fluiddruck (zum Beispiel bei einer Druckerhöhung im ewG aufgrund einer Gasbildung im Endlager). Insofern erscheint ein Kriterium, das den Maximalwert der beiden Fluiddrücke als Indikator verwendet, empfehlenswert.

3.2.4 Dilatanzkriterium

Wert des Kriteriums

Das Dilatanzkriterium der Sicherheitsanforderungen prüft das Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ in Hinblick auf mechanische Deformationen. Es deckt damit eine wichtige, potentiell integritätsgefährdende Prozessgruppe ab. Es vernachlässigt allerdings die mögliche Existenz von Selbstheilungsmechanismen, die z. B. in Tonstein auftreten können.

Grenzwerte

Die Sicherheitsanforderungen definieren eine Grenzbelastung durch die Dilatanzfestigkeit. Dies erscheint plausibel, weil Dilatanz erforderlich ist, um Raum für das Eindringen eines Fluid zu schaffen. Ob darüber hinaus eine Präzisierung der Schädigungsgrenze erforderlich ist (siehe dazu die im Vorhaben AnSichT geführte Diskussion), erscheint fraglich, da Tonsteine ein komplexes mechanisches Verhalten aufweisen, dessen geomechanische Prognose anhand vereinfachender Stoffmodelle mit nennenswerten Prognoseungewissheiten verbunden sein dürfte.

3.2.5 Temperaturkriterium

Wert des Kriteriums

Der Wert des Temperaturkriteriums der Sicherheitsanforderungen besteht darin, dass es Untersuchungen zu Temperaturwirkungen einfordert. Die unkonkrete Formulierung in den Sicherheitsanforderungen erscheint zweckmäßig, weil konkrete Temperaturbegrenzungen erst im Rahmen der Erstellung eines Sicherheits- und Endlagerkonzepts festgelegt werden sollten, da sie prozess- und standortabhängig sind. So schreiben Weyand

und Kock /WEY 16/, die in ihrer Betrachtung nationaler Anforderungen zu Temperatur-
obergrenzen auch technische Barrieren betrachtet haben:

*„Aus den unterschiedlichen Angaben in den internationalen Sicherheitskonzepten wird
ersichtlich, dass eine grundsätzliche Festlegung einer maximalen Grenztemperatur für
Tonstein nur standort-, gesteins- und sicherheitskonzeptspezifisch an bestimmten Loka-
tionen (z. B. Behälteroberfläche) festgelegt werden kann. Inwiefern bei unterschiedli-
chen Temperaturen integritätsgefährdende thermisch induzierte Prozesse stattfinden
und das Temperaturkriterium im Tonstein ausgelegt werden soll, ist offen und auch Be-
standteil aktueller Forschungs- und Entwicklungsvorhaben.“ /WEY 16/*

Ein aktuelles Vorhaben, das sich mit dem Thema der Temperaturbegrenzungen be-
schäftigt, ist das BfE-Vorhaben 4717E03241 /BRA 19/, /BRA 18/.

4 Zusammenfassung der Bewertung

Die vorangegangenen Bewertungen werden im Folgenden kurz zusammengefasst, wobei die Begründungen nicht wiederholt werden. Auf die jeweiligen Begründungskapitel wird jeweils verwiesen.

Bewertung allgemeiner Aspekte

1. Das Kriterium „sekundäre Wegsamkeiten“, das Fluiddruck-, das Dilatanz- und das Temperaturkriterium der Sicherheitsanforderungen besitzen einen hohen nachweis-technischen Wert. Das Advektionskriterium erscheint dagegen aufgrund seiner Redundanz verzichtbar. (Kapitel 3.1.2 und 3.2.2)
2. Die fünf Integritätskriterien der Sicherheitsanforderungen reichen für einen Integritätsnachweis für Tongestein nicht aus, weil sie den Erhalt der Sorptionsfähigkeit des ewG – ein wesentlicher Grund für die Radionuklidrückhaltung im Wirtsgestein – nicht berücksichtigen. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird der Durchtritt erheblicher Mengen potenziell schadstoffbelasteter Gase durch den ewG, da das Fluiddruck- und das Advektionskriterium sowie das Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ nur auf eine Limitierung der Strömung von *wässrigen Lösungen*, *Grundwasser* bzw. *Porrenwasser* abzielen (Kapitel 3.1.1).
3. In den Sicherheitsanforderungen bleibt die Sensitivität der Integritätskriterien (insbesondere gegenüber kleinräumigen Verletzungen der in ihnen enthaltenen quantitativen Kriterien¹⁵) wegen fehlender Toleranzangaben weitgehend unbestimmt. Die Integritätskriterien legen daher kein bestimmtes Integritätsniveau fest. Ihr regulatorischer Wert besteht darin, zu bestimmten integritätsbezogenen Betrachtungen zu verpflichten. (Kapitel 3.1.3)
4. Der geringe Konkretisierungsgrad der in den Sicherheitsanforderungen formulierten Integritätskriterien gibt dem Verfahrensbetreiber Flexibilität zur standortabhängigen Konkretisierung der Integritätskriterien. Die fehlende regulatorische Festlegung eines Integritätsniveaus lässt den Verfahrensbetreiber jedoch in Unsicherheit darüber, ob seine Integritätskriterien regulatorisch akzeptabel sind. Dieses Problem kann

¹⁵ Als „quantitatives Kriterium“ wird hier die einem Integritätskriterium zugrunde liegende mathematische Abschätzung der Form $X < Y$ bezeichnet.

durch einen frühzeitigen fachlichen Austausch zwischen Verfahrensbetreiber und Genehmigungsbehörde gemildert werden. (Kapitel 3.1.3)

5. Bei Endlagersystemen, in denen kurzzeitige oder kleinräumige Verletzungen der quantitativen Kriterien zu erwarten sind (etwa durch kleinräumig auftretende Dilatanz), stellt sich beim Integritätsnachweis weniger die Frage nach der Existenz einer Kriterienverletzung, als vielmehr nach ihrem Ausmaß. Die Sicherheitsanforderungen reflektieren dies nicht, da sie Toleranzen kaum thematisieren und überwiegend nur die Existenz integritätsgefährdender Prozesse abfragen. (Kapitel 3.1.4).
6. Um Integritätskriterien im Sinne der Nachweisstrategie „Multiple Lines of Evidence“ /NEA 04/ zu gestalten, könnten unabhängige Befunde einbezogen werden. Beispielsweise könnten in Anlehnung an die Abwägungskriterien des StandAG /STA 17/ qualitative Befunde zur bisherigen Barrierewirksamkeit des ewG integriert werden, um das Vertrauen in die zukünftige Integrität des ewG zu stärken (Kapitel 3.1.5). Im Sinne der Strategie des „Multiple Lines of Evidence“ wäre auch ein Verzicht auf redundante Betrachtungen. Dies betrifft insbesondere Versionen des Advektionskriteriums, die Argumente der Konsequenzenanalyse und möglicher Einschlussanalysen wiederholen, weil sie ähnliche Strömungs- und Transportbetrachtungen auf ähnlicher Datengrundlage durchführen.
7. Die Sicherheitsanforderungen lassen ungeklärt, inwieweit die Festlegung des ewG das Ergebnis von Planungs- oder von Transport- und Rückhalteprozessen ist. Dies führt weniger zu praktischen, als vielmehr zu konzeptionellen Problemen, da der ewG nicht als reines Ergebnis von Transport- und Rückhalteprozessen definiert werden kann, ohne dass es zu konzeptionellen Inkonsistenzen kommt. (Kapitel 3.1.6).

Bewertungen des Kriteriums „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ (Kapitel 3.2.1)

8. Der besondere Wert des Kriteriums besteht darin, dass es im Gegensatz zum Fluid- und Dilatanzkriterium die auslösenden Prozesse nicht spezifiziert. Somit umfasst es auch diejenigen Prozesse, die erst in der Zukunft als relevant identifiziert werden.
9. Das Kriterium der Sicherheitsanforderungen bezieht sich auf das *Eindringen* und *Austreten* von Lösungen. Es könnte sich stattdessen auch auf den *Durchtritt* von Lösungen beziehen, was der für das Einschlussvermögen relevantere Vorgang ist. Der derzeitige Bezug auf das *Eindringen* ist möglicherweise problematisch, da eine Infiltration von Gasen in das Wirtsgestein Tongestein über Mikrorisse Teil des

Sicherheitskonzeptes sein kann und dabei eine begleitende Infiltration von Lösungen nicht sicher ausgeschlossen werden kann.

10. Eine Erweiterung des Kriteriums auf das Eindringen bzw. Austreten ggf. schadstoffbelasteter Fluide (also einschließlich einer *Gasphase*) erscheint nicht empfehlenswert, da Sicherheitskonzepte für Tongestein von einer Gasinfiltration in den ewG auf druckinduzierten Mikrorissen (*pathway dilation*) Kredit nehmen können. Diesem Problem ließe sich jedoch begegnen, wenn das Kriterium nicht den *Eintritt* von Fluiden in den ewG, sondern den *Durchtritt* von Fluiden durch den ewG behandelte.

Bewertungen des Advektionskriteriums (Kapitel 3.2.2)

11. Das Advektionskriterium besitzt nur einen geringen Nachweiswert, da es dazu neigt, die Analysen der Konsequenzenanalyse und möglicher Einschlussanalysen zu reproduzieren. Es erscheint damit verzichtbar. Zwar ließen sich beim Advektionskriterium Betrachtungen integrieren, die nicht von Strömungs- und Transportsimulationen abhängen, wie z. B. geomechanische oder tektonische Prognosen zur Entwicklung der intrinsischen Permeabilitäten des ewG. Dies wird im Prinzip aber bereits durch das Kriterium „sekundäre Wasserwegsamkeiten“ abgedeckt.
12. Das Advektionskriterium sollte nicht (wie das Advektionskriterium des Vorhabens AnSichT) die Integrität über den Einschluss nachweisen, sondern den Einschluss über die Integrität.
13. Der diffusive Schadstofftransport ist als Maßstab für einen langsamen advektiven Schadstofftransport je nach Wahl des Indikators nicht oder nicht sicher geeignet (siehe auch Anhang A).

Bewertungen des Fluidruckkriteriums (Kapitel 3.2.3)

14. Eine Erweiterung des Fluidruckkriteriums zur Limitierung eines erhöhten Gaszutritts sollte vermieden werden, da Sicherheitskonzepte für Tongestein vom Vorgang des Gastransports auf druckinduzierten Mikrorissen (*pathway dilation*) Kredit nehmen können.
15. Das Fluidruckkriterium der Sicherheitsanforderungen lässt offen, warum der *Zutritt* von Wässern in den ewG bewertet wird und nicht ihr *Durchtritt durch den ewG*.
16. Als Indikator empfiehlt sich der Maximalwert des tatsächlichen Fluiddruckes und des Fluiddruckes einer hypothetischen statischen Flüssigkeitssäule über dem Betracht-

tungsort, weil hierdurch verschiedene Schädigungsmechanismen abgefragt werden. Während der tatsächliche Fluiddruck unmittelbar untersucht, ob Schädigung auftritt, bewertet der hypothetische Fluiddruck die Integrität im Falle eines unerwarteten hydraulischen Kurzschlusses mit einem Aquifer. Er betrachtet somit auch die Gefahr eines „Durchreißens“ des ewG, falls die Bereiche, in denen das Kriterium verletzt wird, an einen Aquifer angrenzen.

Bewertungen des Dilatanzkriteriums (Kapitel 3.2.4)

17. Die Sicherheitsanforderungen definieren mit Hilfe der Dilatanzfestigkeit eine Grenzbelastung. Ob darüber hinaus eine Präzisierung der Grenzbelastung erforderlich ist, erscheint fraglich, da Tongesteine ein komplexes mechanisches Verhalten aufweisen, dessen geomechanische Prognose anhand vereinfachender Stoffmodelle mit nennenswerten Prognoseungewissheiten verbunden sein dürfte.

Bewertungen des Temperaturkriteriums (Kapitel 3.2.5)

18. Die unkonkrete Formulierung des Kriteriums in den Sicherheitsanforderungen erscheint zweckmäßig, weil konkrete Temperaturbegrenzungen prozess- und standortabhängig sind und daher erst im Rahmen der Erstellung eines Sicherheits- und Endlagerkonzepts festgelegt werden sollten.

Literaturverzeichnis

- /AND 05/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile, Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site. Collection les Rapports, Bd. 268, 241 S., ISBN 2-916162-00-3: Châtenay-Malabry, France, 2005.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BRA 18/ Bracke, G., Weyand, T., Hartwig-Thurat, E., Meleshyn, A., Larue, J., Fischer-Appelt, K.: Untersuchungen zu den "maximalen physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Präsentation, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, DOI 10.13140/RG.2.2.23328., 1. Statuskonferenz Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE): Berlin, 8. November 2018.
- /BRA 19/ Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A., Weyand, T.: Untersuchungen zu den "maximalen physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Januar 2019.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, P.-J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.

- /HOT 10/ Hotzel, S.: Behandlung der Integrität im Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager im Salinar, 3605R02548: Verfolgung und Bewertung der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3447, 50 S.: Köln, Mai 2010.
- /JOB 15/ Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., Polster, M.: Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-08-2013-AP, 38 S.: Peine, 15. Dezember 2015.
- /JOB 17/ Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L., Ziefle, G.: Projekt ANSICHT, Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland, Synthesebericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-19-2016-AB, 30. März 2017.
- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-286, 301 S., ISBN 978-3-939355-62-5: Köln, 2012.
- /MÜL 12/ Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J. W.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2, Vertiefte Nachweisführung, Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-288, 323 S., ISBN 978-3-939355-64-9: Köln, 2012.
- /NAU 07/ Naumann, M., Hunsche, U., Schulze, O.: Experimental investigations on anisotropy in dilatancy, failure and creep of Opalinus Clay. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 32, 8-14, S. 889–895, DOI 10.1016/j.pce.2005.04.006, 2007.

- /NAV 18/ Navarro, M.: User Manual, TOUGH2-GRS Version 2, TOUGH2-MP-GRS Version 0. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2018.
- /NEA 04/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Post-Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and purpose. Radioactive Waste Management, NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6: Paris, Januar 2004.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011), Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-278, 89 S., ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /POP 07/ Popp, T., Salzer, K.: Anisotropy of seismic and mechanical properties of Opalinus clay during triaxial deformation in a multi-anvil apparatus. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 32, 8-14, S. 879–888, DOI 10.1016/j.pce.2006.04.022, 2007.
- /SEH 13/ Seher, H.: Zusammenstellung der Inventare zur Modellierung, Memo im Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 1. März 2013.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808–2838).
- /TER 43/ Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics. Hrsg.: John Wiley & Sons, Inc., 526 S.: New York, 1943.

- /WEY 16/ Weyand, T., Kock, I.: Integritätsgefährdende Prozesse in internationalen Sicherheitskonzepten für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin, Bericht zum Arbeitspaket 3, Weiterentwicklung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik zu Methoden und Werkzeugen für Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise. GRS-428, 71 S., ISBN 978-3-946607-10-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, September 2016.
- /ZHA 10/ Zhang, C.-L., Czaikowski, O., Rothfuchs, T.: Thermo-hydro-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian clay rock within the Framework of GRS/ANDRA Cooperation Programme and the EC TIMODAZ Project, Final report, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10045. GRS-266, 252 S., ISBN 978-3-939355-42-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2010.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Spannungs- Verformungsverhalten während eines Triaxialtests von Tonstein (COx-Tonstein) aus /ZHA 10/	14
Abb. 3.1	Fälle, in denen ewG-Grenzen nicht oder nicht eindeutig mit Hilfe von Transportrechnungen bestimmt werden können.....	28
Abb. A.1	I-129-Konzentrationen und absolute advective und diffusive Flüsse beim Rechenfall „weniger günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung	48
Abb. A.2	I-129-Konzentrationen und absolute advective und diffusive Flüsse beim Rechenfall „bedingt günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung	49
Abb. A.3	I-129-Konzentrationen und absolute advective und diffusive Flüsse beim Rechenfall „günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung	49
Abb. A.4	Summierte Konzentrationen und Summen der absoluten advectiven und diffusiven Flüsse beim Rechenfall „weniger günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung.....	52
Abb. A.5	Summierte Konzentrationen und Summen der absoluten advectiven und diffusiven Flüsse beim Rechenfall „bedingt günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung.....	53
Abb. A.6	Summierte Konzentrationen und Summen der absoluten advectiven und diffusiven Flüsse beim Rechenfall „günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung	53

Tabellenverzeichnis

Tab. A.1	Inventar und radionuklidspezifische Daten	50
----------	---	----

A Anhang: Transportsimulationen zum Advektionskriterium

Zur Bewertung des im Advektionskriterium der Sicherheitsanforderungen verwendeten Vergleiches zwischen advektivem und diffusivem Schadstofftransport wurden eindimensionale Strömungs- und Transportsimulationen für ein Endlager im Tonstein durchgeführt. Zur Simulation des Strömungs- und Transportgeschehens wird der Code TOUGH2-GRS /NAV 18/ verwendet.

Modelliert wird der vertikale diffuse und advektive Transport von Radionukliden durch eine horizontale Tonformation. Die Endlagertiefe beträgt 670 m, das Endlager selbst wird durch ein einziges Gitterelement mit einer Mächtigkeit von 6,6 m (durchschnittliche Streckenhöhe) und einer Porosität von 0,3 repräsentiert. Die Fläche des Endlagers (Strömungsquerschnitte der Säule) beträgt 4.871.000 m². Dieser Parameter ist jedoch im Rahmen der Transportrechnungen irrelevant.

Der das Endlager umgebende Tonstein besitzt eine Porosität von 0,07. In der unmittelbaren Nachbarschaft des Endlagers besitzen die Elemente eine Mächtigkeit von 1 m, die sich jedoch mit zunehmender Entfernung vom Endlager vergrößert. Um die Wirkung des Randes zu vermindern besitzt das Modell eine unrealistische Gesamtmächtigkeit von 2.000 m (das Endlager befindet sich in der Mitte).

Das gesamte Modellgebiet ist wassergesättigt. Das Porenwasser besitzt einen Laugenanteil von 0,555 bei einer Dichte der Referenzlauge von 1.185,1 kg/m³.

Der advektive Transport und die effektive Diffusivität werden in Anlehnung an die Abwägungskriterien des StandAG im Rahmen von drei Rechenfällen variiert:

- **Rechenfall „weniger günstig“:** Abstandsgeschwindigkeit 1 mm/a, effektive Diffusivität $1 \cdot 10^{-10}$ m²/s.
- **Rechenfall „bedingt günstig“:** Abstandsgeschwindigkeit 0,1 mm/a, effektive Diffusivität $5,6 \cdot 10^{-11}$ m²/s.
- **Rechenfall „günstig“:** Abstandsgeschwindigkeit 0,01 mm/a, effektive Diffusivität $1 \cdot 10^{-11}$ m²/s.

Die Abstandsgeschwindigkeiten beziehen sich dabei auf das Wirtsgestein (bei einer Porosität 0,07). Am oberen und unteren Rand werden die Festpotentiale so eingestellt,

dass sich die jeweiligen Abstandsgeschwindigkeiten ergeben und im Endlager ein Druck von 7,44 MPa herrscht.

A.1 Betrachtung eines einzelnen Radionuklids

Zunächst wird der diffusive und advective Transport von I-129 für die drei Rechenfälle betrachtet. I-129 (Halbwertszeit: $1,57 \cdot 10^7$ Jahre) wird mit einer Aktivität von $2,76 \cdot 10^{13}$ Bq im Endlager platziert und instantan freigesetzt. Für die Sorption wird ein K_d -Wert von $3,5 \cdot 10^{-5}$ m³/kg verwendet.

Abb. A.1 bis Abb. A.3 zeigen die I-129-Konzentrationen sowie die absoluten diffusiven und advectiven Flüsse 100.000 Jahre nach Freisetzung. Bei den Rechenfällen „weniger günstig“ und „bedingt günstig“ ist das Verschwinden der diffusiven Flüsse am Ort des Konzentrationsmaximums aufgrund der verschwindenden Konzentrationsgradienten sichtbar. Dass die diffusiven Flüsse im Rechenfall „günstig“ nicht verschwinden, liegt daran, dass das Konzentrationsmaximum sich im Endlager befindet, das gröber diskretisiert ist und damit den Bereich geringer Konzentrationsgradienten nicht abbildet.

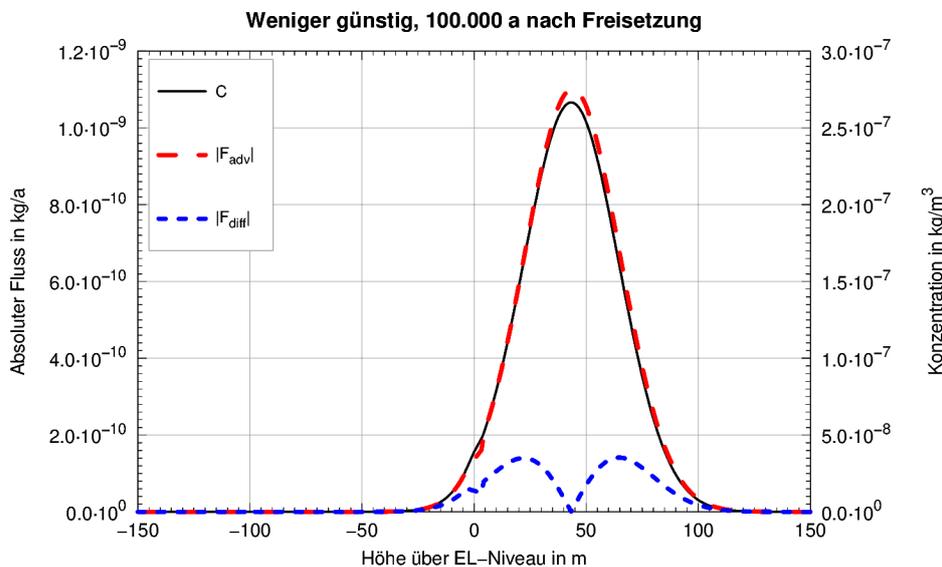


Abb. A.1 I-129-Konzentrationen und absolute advective und diffusive Flüsse beim Rechenfall „weniger günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung

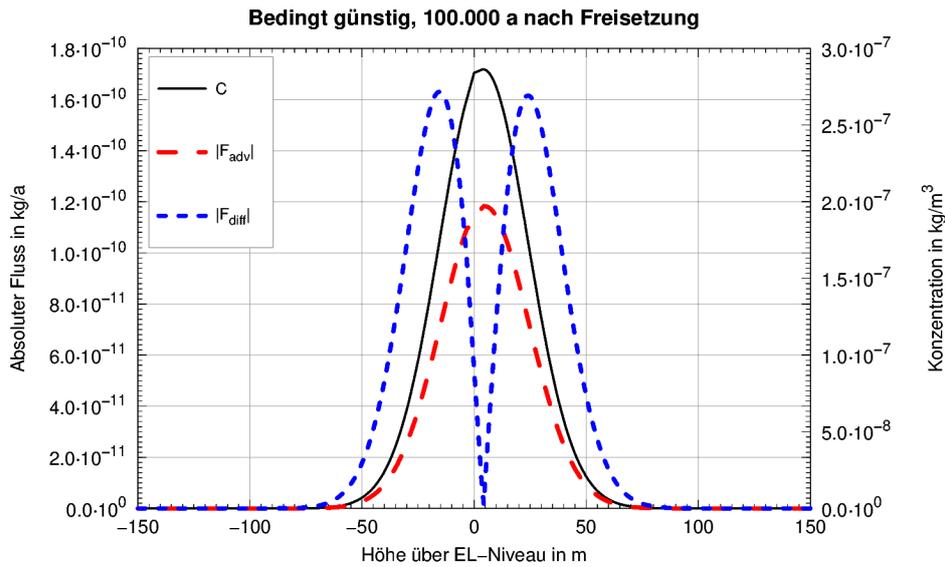


Abb. A.2 I-129-Konzentrationen und absolute advective und diffusive Flüsse beim Rechenfall „bedingt günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung

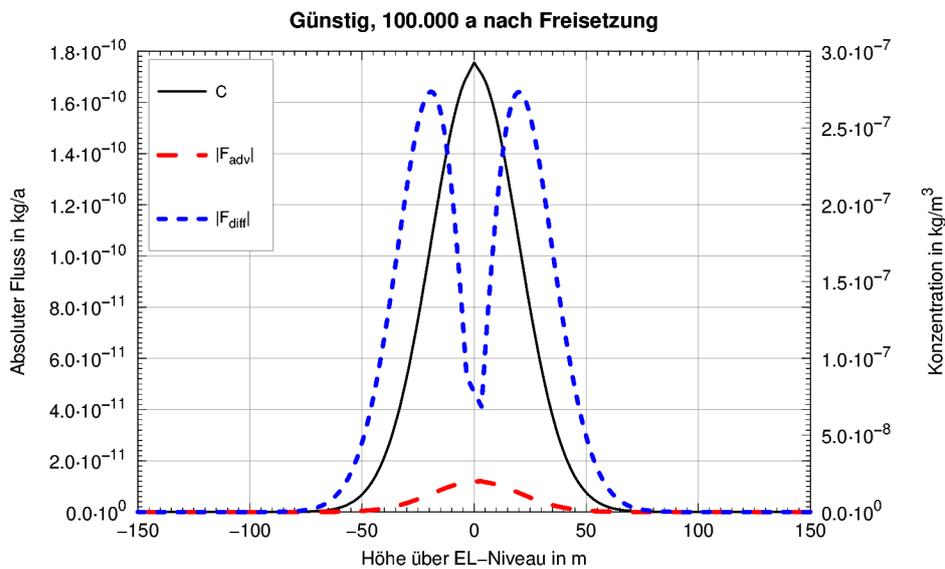


Abb. A.3 I-129-Konzentrationen und absolute advective und diffusive Flüsse beim Rechenfall „günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung

A.2 Betrachtung der Summen der Flüsse aller Radionuklide

Nachfolgend wird der Zusammenhang zwischen advektiven und diffusiven Flüssen untersucht, wenn die Flüsse durch Summation über mehrere Radionuklide berechnet werden. Den Simulationen wird das im Vorhaben VSG verwendete Radionuklidinventar zu Grunde gelegt, das Tab. A.1 zeigt /PEI 11/, /SEH 13/.

Tab. A.1 Inventar und radionuklidspezifische Daten

Radionuklid	Aktivität in Beq	Masse in kg	Halbwertszeit in Jahren	Kd in m ³ /kg
Ac-227	1,27E+11	4,74E-05	2,18E+01	1,70E+01
Ag-108m	5,53E+13	1,89E-01	4,18E+02	0,00E+00
Am-241+	4,23E+18	3,33E+04	4,32E+02	1,70E+01
Am-242m	1,43E+16	3,68E+01	1,41E+02	1,70E+01
Am-243	3,89E+16	5,26E+03	7,36E+03	1,70E+01
Be-10	1,91E+11	2,31E-01	1,60E+06	1,00E+02
C-14	8,14E+14	4,93E+00	5,73E+03	1,60E-03
Ca-41	8,51E+11	2,72E-01	1,03E+05	1,10E-03
Cl-36	1,57E+13	1,28E+01	3,00E+05	0,00E+00
Cm-245	1,58E+15	2,48E+02	8,49E+03	1,70E+01
Cm-246	2,60E+14	2,28E+01	4,73E+03	1,70E+01
Cm-247	1,43E+09	4,16E-01	1,56E+07	1,70E+01
Cm-248	3,66E+09	2,33E-02	3,40E+05	1,70E+01
Cs-135	4,01E+14	8,19E+03	2,00E+06	5,50E-05
Cs-137	2,26E+19	7,07E+03	3,01E+01	5,50E-05
Ho-166m	9,52E+11	1,43E-02	1,20E+03	5,98E+01
I-129	2,76E+13	4,23E+03	1,57E+07	3,50E-05
Mo-93	6,45E+13	1,59E+00	3,50E+03	1,70E-02
Nb-94	4,68E+15	6,65E+02	2,00E+04	4,00E+00
Ni-59	3,55E+15	1,19E+03	7,49E+04	9,30E-01
Ni-63	3,26E+17	1,55E+02	9,99E+01	9,30E-01
Np-237	3,51E+14	1,35E+04	2,14E+06	5,54E+01
Pa-231	1,49E+11	8,53E-02	3,27E+04	5,00E+00

Radionuklid	Aktivität in Beq	Masse in kg	Halbwertszeit in Jahren	Kd in m³/kg
Pd-107	1,13E+14	5,94E+03	6,50E+06	5,00E+00
Pu-238	2,78E+18	4,38E+03	8,77E+01	2,26E+01
Pu-239	2,08E+17	9,07E+04	2,41E+04	2,26E+01
Pu-240	4,58E+17	5,45E+04	6,56E+03	2,26E+01
Pu-242	2,78E+15	1,91E+04	3,75E+05	2,26E+01
Pu-244+	3,33E+11	4,91E+02	7,99E+07	2,26E+01
Ra-226+	1,36E+11	3,72E-03	1,60E+03	7,60E-04
Rb-87	1,75E+10	5,53E+03	4,80E+10	1,00E+02
Se-79	3,84E+13	1,10E+02	4,80E+05	0,00E+00
Sm-147	4,21E+09	4,95E+03	1,06E+11	5,98E+01
Sm-151	1,96E+17	2,08E+02	9,29E+01	5,98E+01
Sn-126	4,87E+14	1,09E+03	2,34E+05	1,10E+02
Sr-90	1,37E+19	2,67E+03	2,86E+01	1,10E-03
Tc-99	1,18E+16	1,85E+04	2,10E+05	5,54E+01
Th-229	4,25E+11	5,79E-02	7,87E+03	5,54E+01
Th-230	5,17E+11	6,78E-01	7,53E+04	5,54E+01
Th-232	2,72E+11	6,70E+04	1,40E+10	5,54E+01
U-232	5,15E+13	6,22E-02	6,89E+01	2,05E+01
U-233	5,80E+13	1,63E+02	1,59E+05	2,05E+01
U-234	1,10E+15	4,79E+03	2,45E+05	2,05E+01
U-235	2,14E+13	2,68E+05	7,03E+08	2,05E+01
U-236	1,40E+14	5,84E+04	2,34E+07	2,05E+01
U-238	1,31E+15	1,05E+08	4,46E+09	2,05E+01
Zr-93	1,58E+15	1,66E+04	1,50E+06	1,09E+01

Abb. A.4 bis Abb. A.6 zeigen die Konzentrationssummen sowie die Summen der absoluten diffusiven und advektiven Flüsse 100.000 Jahre nach Freisetzung. Die Konzentrationen berücksichtigen nur die mobilen Radionuklidanteile, nicht die adsorbierten.

Der Rechenfall „weniger günstig“ (Abb. A.4) zeigt das Verschwinden der diffusiven Flüsse am rechten Konzentrationsmaximum. Hier übersteigen die advektiven Flüsse die

diffusiven. Auffällig ist das linke Konzentrationsmaximum im Endlager, dass durch stärker adsorbierende Radionuklide hervorgerufen wird. Der durch den starken Konzentrationsgradienten erzeugte diffusive Radionuklidstrom übersteigt den advektiven.

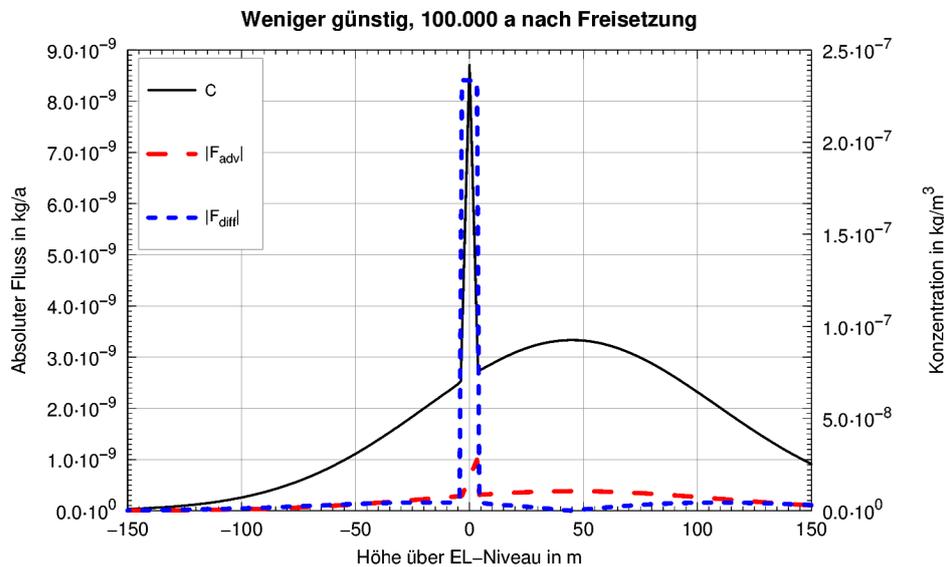


Abb. A.4 Summierte Konzentrationen und Summen der absoluten advektiven und diffusiven Flüsse beim Rechenfall „weniger günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung

Abb. A.5 und Abb. A.6 zeigen die Ergebnisse der Rechenfälle „bedingt günstig“ und „günstig“. Die Konzentrationsmaxima befinden sich hier noch im Endlagerbereich. Die advektiven Flüsse übersteigen daher nicht die diffusiven.

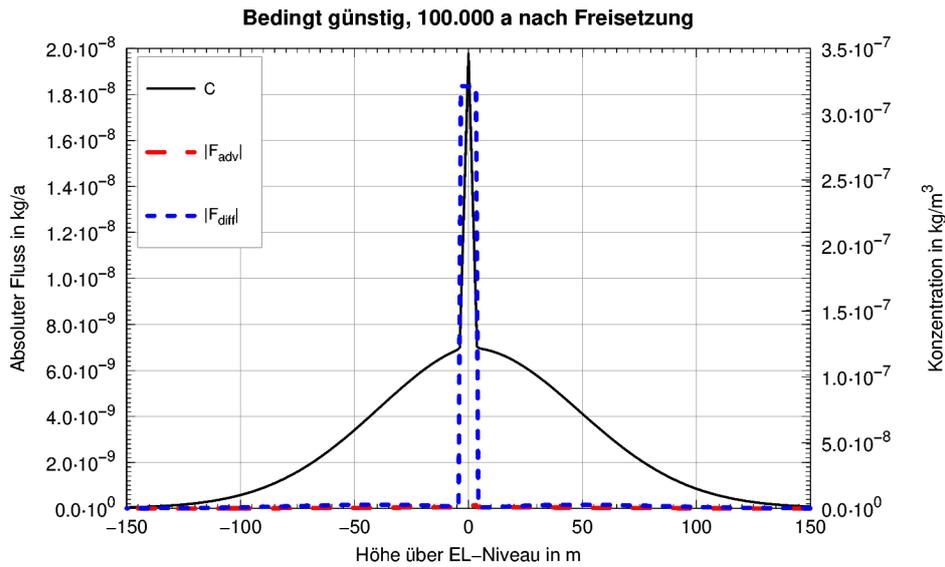


Abb. A.5 Summierte Konzentrationen und Summen der absoluten advektiven und diffusiven Flüsse beim Rechenfall „bedingt günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung

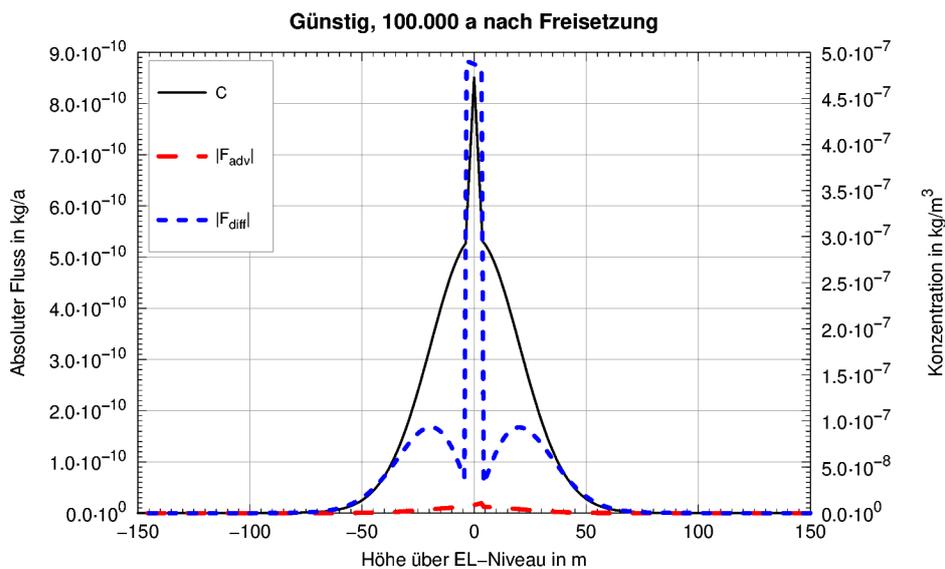


Abb. A.6 Summierte Konzentrationen und Summen der absoluten advektiven und diffusiven Flüsse beim Rechenfall „günstig“, 100.000 Jahre nach Freisetzung

A.3 Fazit

Das im Advektionskriterium der Sicherheitsanforderungen enthaltende hinreichende Kriterium verlangt, dass der advective Transport den diffusiven nicht übersteigt. Der zu benutzende Indikator ist nicht festgelegt, weshalb dieser Vergleich hier einmal anhand eines einzelnen Radionuklids (I-129) und einmal durch Summierung über mehrere Radionuklide durchgeführt wurde.

Die Simulationsrechnungen für ein einzelnes Radionuklid zeigen, dass sich lokale Konzentrationsmaxima ausbilden, an denen der diffusive Fluss verschwindet. In dem Fall, in dem sich das Konzentrationsmaximum im Endlager befand, konnte das Verschwinden der diffusiven Flüsse wegen der zu groben Gitterdiskretisierung nicht untersucht werden. Ein Verschwinden der diffusiven Flüsse ist jedoch aufgrund der allgemeinen Gültigkeit des 1. Fickschen Gesetzes zu erwarten. Das quantitative Kriterium wird demnach am Konzentrationsmaximum immer verletzt, wenn ein advectiver Fluss beliebiger Größe vorliegt.

Die Simulationsrechnungen für mehrere Radionuklide zeigen einen starken Konzentrationspeak im Endlager, der durch die wenig mobilen Radionuklide verursacht wird. Im Modell führt das zu hohen Konzentrationsgradienten und damit zu diffusiven Flüssen, welche die advectiven Flüsse übersteigen. In den Rechenfällen „günstig“ und „bedingt günstig“ bilden auch die mobileren Radionuklide kein weiteres Konzentrationsmaximum aus, weshalb das Kriterium nicht gebrochen wird. Im Rechenfall „weniger günstig“ ist dies jedoch der Fall.

Es lässt sich festhalten, dass die Vorgehensweise, diffusive Radionuklidflüsse als Grenzwerte für advective Radionuklidflüsse zu verwenden, bei Betrachtung eines einzelnen Radionuklids nicht praktikabel ist. Eine Summation der Flüsse mehrerer Radionuklide könnte eventuell zu einem robusten Kriterium führen, wenn gewährleistet werden kann, dass die Summenwerte ihre Maxima- oder Minima nicht im ewG ausbilden und die Summenwerte im ewG nicht konstant sind (denn unter diesen Umständen verschwinden diffusive Flüsse). Dies wäre standort- und konzeptspezifisch zu ermitteln.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de