



BGE TECHNOLOGY GmbH

CHRISTA-II

**Strategie und konzeptionelles Vorgehen
zur Sicherheitsbewertung**

BGE TEC 2021-11



BGE TECHNOLOGY GmbH

CHRISTA-II

Strategie und konzeptionelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung

BGE TEC 2021-11

Autoren	Michael Jobmann (Koordinator) Victoria Burlaka Judith Flügge Britta Frenzel Andree Lommerzheim Jobst Maßmann Sabine Mrugalla Christian Müller	Ulrich Noseck André Rübel Eric Simo Jürgen Sönnke Jan Thiedau Axel Weitkamp Jens Wolf
Datum	16.11.2021	
Auftraggeber	BMWi	Vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, KIT
Förderkennzeichen	02E11385A/B	

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes
"Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA-II)".

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projekträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von der BGE TECHNOLOGY GmbH in Kooperation mit der BGR und der GRS durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projekträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Sicherheitsstrategie	2
2.1	Rahmenbedingungen	2
2.1.1	Richtlinien der IAEA	2
2.1.1.1	Sicherheitsanforderungen und Empfehlungen zur Anwendung	2
2.1.1.2	Der 'Safety Case'	6
2.1.2	Empfehlungen der ICRP	7
2.1.3	Empfehlungen der OECD/NEA	8
2.1.3.1	Sicherheitsstrategie	8
2.1.3.2	Sicherheitsanalyse und ihre Datenbasis	9
2.1.3.3	Beweisführung	9
2.1.3.4	Bewertung und Synthese	9
2.1.4	Verordnung über Sicherheitsanforderungen	9
2.1.5	Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten CHRISTA und KONEKD	12
2.1.6	Standortauswahlgesetz	12
2.1.7	Bericht der Endlagerkommission	13
2.1.8	Deutsche Strahlenschutzverordnung	17
2.1.9	Bundesberggesetz	18
2.2	Zielsetzungen für die Sicherheit in der Nachverschlussphase	18
2.2.1	Multipler ewG	20
2.2.1.1	Sicherheitstechnische Zielsetzungen	20
2.2.1.2	Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen	23
2.2.2	Überlagernder ewG	24
2.2.2.1	Sicherheitstechnische Zielsetzungen	24
2.2.2.2	Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen	26
2.2.3	Modifiziertes KBS-3 Konzept	27
2.2.3.1	Sicherheitstechnische Zielsetzungen	27
2.2.3.2	Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen	28
3	Konzeptionelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung	30
3.1	Grundlagenmodule	33
3.1.1	Geologische Standortbeschreibung	33
3.1.2	Modellbildung und Parametrisierung	34
3.1.3	Behälterkonzept	34
3.1.4	Einlagerungskonzept	35
3.1.5	Festlegung ewG (Option multipler ewG und überlagernder ewG)	35
3.1.6	Quantifizierung der Integritätskriterien für einen ewG	36
3.1.7	Quantifizierung der Integritätskriterien für die (geo-)technischen Barrieren	36
3.1.8	Endlagerdesign	36
3.1.9	Verschlusskonzept	37
3.1.10	Geowissenschaftliche Langzeitprognose	37
3.1.11	FEP-Katalog	37
3.2	Bindegliedmodule	38
3.3	Systemanalyse-Module	39

3.3.1	Prüfung der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren	39
3.3.2	Prüfung der Integrität der geologischen Barriere.....	40
3.3.3	Prüfung des sicheren Einschlusses	40
3.3.4	Prüfung der Dosiswerte	41
3.3.5	Ausschluss Kritikalität	41
4	Zusammenfassung	42
5	Literatur	44

1 Einleitung

Das Forschungsprojekt CHRISTA-II hat das Ziel, die Sicherheitsstrategie und das konzeptionelle Vorgehen zur Sicherheitsbewertung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Kristallin zu entwickeln und dessen Anwendbarkeit für generische Endlagermodelle zu testen. Die Methodik soll dabei auf einem ganzheitlichen Ansatz beruhen, der die gesetzlichen und geologischen Randbedingungen sowie die Einlagerungs- und Verschlusskonzepte berücksichtigt.

Grundlage für das konzeptionelle Vorgehen zur Sicherheitsbewertung ist ein Verständnis, durch welche Gegebenheiten und Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager im Kristallin gewährleistet werden und auf welchen wesentlichen, aufeinander aufbauenden Schritten das Vorgehen im Zuge der Bewertung letztendlich beruhen soll. Der vorliegende Bericht beschreibt das abstrakte, standortunabhängige Grundgerüst für das konzeptionelle Vorgehen zur Sicherheitsbewertung eines Endlagersystems im Kristallin in Deutschland. Eine Präzisierung bzw. Quantifizierung des konzeptionellen Vorgehens erfolgt dann abhängig von der jeweiligen Einlagerungsoption in weiteren Berichten des Projekts. Ziel der Konkretisierung und Quantifizierung ist es, exemplarisch das gewählte Vorgehen und damit die prinzipielle Eignung der Methodik zu testen.

Auf Grund des generischen Charakters des Projekts CHRISTA-II liegen den verwendeten geologischen Modellen keine spezifischen Standortuntersuchungen für ein Endlager zu Grunde. Sowohl die in den Modellberichten dargestellten geologischen Gesamtsituationen als auch die definierten Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Simulationen haben lediglich beispielhaften Charakter.

2 Sicherheitsstrategie

Die Sicherheitsstrategie basiert auf den nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen, die die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland festlegen. Das übergeordnete Ziel beim Umgang mit radioaktiven Stoffen wird im Atomgesetz (ATG 2010) §1.2 festgelegt. Es gilt

Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen.

Weitere Rahmenbedingungen für die Endlagerung werden in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2020), dem Bundesberggesetz (BBergG 2021) mit der zugehörigen allgemeinen Bundesbergverordnung (ABBergV 2009) festgelegt. Internationale Empfehlungen existieren von der IAEA, der OECD-NEA und der ICRP (IAEA 2011a, IAEA 2011b, IAEA 2012, NEA 2004, NEA 2013, ICRP 2007 und ICRP 2013).

Entscheidend im Zusammenhang mit der Sicherheitsbewertung für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist die *Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (EndlSiAnfV 2020). Diese Sicherheitsanforderungen wurden im Nachgang zu dem Bericht der Endlagerkommission veröffentlicht, der Ende 2016 herausgegeben wurde (Endlagerkommission 2016), und auf dessen Basis das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) 2017 erlassen wurde. Das Standortauswahlgesetz fordert ein partizipatives, wissenschaftsbasiertes, transparentes, selbstinterfragendes und lernendes Verfahren mit einer umfassenden Öffentlichkeitsbeteiligung und hat die dafür notwendigen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien festgelegt, mit denen in einem vergleichenden Auswahlverfahren ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für die Endlagerung hochradioaktive Abfälle gefunden werden soll (StandAG 2017).

2.1 Rahmenbedingungen

Neben der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung bilden internationale Empfehlungen und Richtlinien sowie nationale regulatorische Vorgaben und Richtlinien weitere Grundlagen für die Entwicklung einer Sicherheitsstrategie.

2.1.1 Richtlinien der IAEA

Aus den Empfehlungen und Richtlinien der IAEA werden die Punkte zusammenfassend dargestellt, die im Zusammenhang mit einer Sicherheitsstrategie stehen bzw. Hinweise für eine Sicherheitsanalyse enthalten und somit relevant für ein Konzept zur sicherheitstechnischen Bewertung sind.

2.1.1.1 Sicherheitsanforderungen und Empfehlungen zur Anwendung

Bei den 'Specific Safety Requirements' SSR-5 (IAEA 2011a) handelt es sich um ein Dokument aus der IAEA 'Safety Standards' Serie. In dem Dokument werden Sicherheitsziele und Kriterien, der Strahlenschutz in der Nachverschlussphase und generell der 'Safety Case' für ein Endlager angesprochen. Letzterer entspricht gemäß deutschem Regelwerk in vielen Aspekten dem Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager. Der 'Specific Safety Guide' SSG-14

(IAEA 2011b) gibt Empfehlungen, in welcher Weise die Anforderungen des SSR-5 berücksichtigt werden sollten.

Sicherheitsziele und Kriterien

Das Sicherheitsziel ist es, ein Endlager so zu platzieren, zu konzipieren, zu errichten, zu betreiben und zu verschließen, dass der Schutz der Biosphäre vor radioaktiven Substanzen nach seinem Verschluss unter Berücksichtigung gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Faktoren optimiert ist. Für die Bevölkerung liegt der Dosisgrenzwert für Dosen aus Expositionssituationen bei einer effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr. Dieser Grenzwert und das entsprechende Expositionsrisiko werden als Kriterien erachtet, die im Nachweiszeitraum nicht überschritten werden dürfen. Um diesen Grenzwert einzuhalten, muss ein Endlager so ausgelegt sein, dass die berechnete Dosis bzw. das Risiko einer möglichen zukünftigen Exposition für eine repräsentative Person aufgrund möglicher natürlicher Prozesse, die das Endlager beeinflussen können, eine Dosisbegrenzung von 0,3 mSv pro Jahr bzw. eine Risikobegrenzung von 10^{-5} pro Jahr nicht überschreiten (IAEA 2011a).

Sicherheitsanforderungen mit Bezug zur Langzeitsicherheit

Im Folgenden werden die Anforderungen und Erläuterungen aus den Dokumenten SSR-5 und SSG-14 in deutscher Sprache zusammengefasst, die einen direkten Bezug zur Langzeitsicherheit haben. Die Nummern entsprechen der Nummerierung in den genannten IAEA-Dokumenten (IAEA 2011a,b).

Anforderung 5: Passive Sicherheit

Der Betreiber muss den Standort bewerten und die Anlage so konzipieren, errichten, betreiben und schließen, dass die Sicherheit, soweit wie möglich, durch passive Mittel gewährleistet und der Handlungsbedarf nach Schließung der Anlage minimiert sind.

Gewisse aktive Überwachungsmaßnahmen müssen zwar während der Betriebsphase eingesetzt werden; nach Schließung der Anlage soll die Sicherheit aber durch passive Systeme wie die geologische und die geotechnischen Barrieren gewährleistet werden. Geologische Endlagerung in ausreichenden Teufen bietet Isolation als inhärentes Sicherheitsmerkmal. Bei der Langzeitsicherheit der Anlage darf man sich nicht auf messtechnische Überwachung oder institutionelle Kontrollen verlassen.

Anforderung 7: Multiple Sicherheitsfunktionen

Die Auswahl des Wirtsgesteins, die Auslegung der geotechnischen Barrieren des Endlagers und der Betrieb der Anlage sollen so gewählt werden, dass die Sicherheit durch multiple Sicherheitsfunktionen gewährleistet ist. Einschluss und Isolierung des Abfalls sollen durch eine Reihe von physikalischen Barrieren des Endlagersystems sichergestellt werden. ... Es ist nachzuweisen, dass sowohl die einzelnen Barrieren als auch das gesamte Endlagersystem in der Lage sind, sowie im Langzeitsicherheitsnachweis angenommen, zu funktionieren. Die Gesamtleistung des Endlagersystems darf nicht übermäßig von einer einzelnen Sicherheitsfunktion abhängig sein.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit (Safety Case) muss die Funktionen, die von jedem einzelnen geotechnischen Element erfüllt werden, erklären und begründen. Die geotechnischen Elemente und ihre Sicherheitsfunktionen können sich ergänzen und in Kombination miteinander wirken. Der Nachweis muss auch die Zeitspannen identifizieren, über die die geotechnischen Komponenten ihre verschiedenen Sicherheitsfunktionen erfüllen sollen sowie die alternativen oder zusätzlichen Sicherheitsfunktionen ausweisen, die zur Verfügung stehen, falls

ein geotechnisches Element nicht richtig funktioniert oder eine andere Sicherheitsfunktion nicht erfüllt wird. Langfristig kann eine fortschreitende Schwächung des geotechnischen Barrierensystems nicht ausgeschlossen werden, so dass Radionuklide in das geologische Umfeld gelangen und irgendwann auch in die Biosphäre übergehen können. Das Endlagersystem sollte eine Kombination von natürlichen und technischen Charakteristika beinhalten. Diese sollen den sicheren Einschluss des Abfalls durch Erhalt der Behälterintegrität, Begrenzung der Löslichkeit der Radionuklide und Abfallmatrix, Minimierung möglichen Grundwasserzuflusses und/oder Erzeugung langer Radionuklidtransportzeiten vom Endlager in die Biosphäre unterstützen.

Anforderung 8: Sicherer Einschluss

Die geotechnischen Barrieren inkl. der Abfallmatrix und -verpackung sollen so ausgelegt und die Wirtsumgebung so gewählt sein, dass sie den Einschluss der mit dem Abfall verbundenen Radionuklide gewährleisten. ...

Der Einschluss des radioaktiven Abfalls impliziert, dass das Endlager so ausgelegt ist, dass eine Freisetzung von Radionukliden minimiert ist. Freisetzungen geringer Mengen gasförmiger Radionuklide und geringer Anteile anderer, äußerst mobiler Fraktionen einiger radioaktiver Abfallarten können unvermeidbar sein. Es muss jedoch durch Sicherheitsanalysen nachgewiesen werden, dass diese Freisetzungen akzeptabel sind. Einschluss kann durch die Eigenschaften der Abfallmatrix und der Verpackung, durch die Eigenschaften anderer geotechnischer Komponenten des Endlagersystems und durch die direkte Wirtsgesteinsumgebung und die geologische Situation insgesamt erwirkt werden.

Anforderung 12: Entwicklung des 'Safety Case' und der Sicherheitsanalysen

Der Betreiber muss an jedem Schritt der Entwicklung eines Endlagers, in der Betriebsphase und nach Verschluss einen 'Safety Case' und entsprechende Sicherheitsanalysen erarbeiten und, wenn nötig, aktualisieren. ...

Ein anlagenspezifischer Sicherheitsnachweis muss schon früh in der Entwicklung eines Endlagers erarbeitet werden, um eine Grundlage für Genehmigungsentscheidungen zu schaffen und Aktivitäten hinsichtlich Forschung und Entwicklung, Standortauswahl und -bewertung und Endlagerauslegung zu unterstützen. Sicherheitsanalysen müssen außerdem sicherheitsrelevante Kernprozesse identifizieren und zur Entwicklung eines Verständnisses der Leistungsfähigkeit von Entsorgungseinrichtungen beitragen.

Anforderung 13: Ziel des 'Safety Case' und der Sicherheitsanalysen

Der 'Safety Case' für ein Endlager soll alle sicherheitsrelevanten Aspekte des Standorts, die Auslegung der Anlage und die Kontrollmaßnahmen von Seiten des Betreibers und die übergeordneten regulatorischen Kontrollen beschreiben. Der 'Safety Case' und die entsprechenden Sicherheitsanalysen sollen das vorgesehene Maß an Schutz für Mensch und Umwelt verdeutlichen und gegenüber der Regulierungsbehörde und anderen Interessengruppen nachweisen, dass die Sicherheitsanforderungen erfüllt werden.

Hinsichtlich der Sicherheit nach Verschluss müssen die erwartete Bandbreite möglicher Entwicklungen, die das Endlagersystem beeinflussen können, und dabei speziell Ereignisse, die seine Leistung beeinträchtigen können, inkl. solcher mit geringer Wahrscheinlichkeit, im 'Safety Case' und den entsprechenden Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden – und zwar durch folgende Mittel:

- (a) durch Nachweis, dass das Endlagersystem, sowie mögliche Entwicklungen und Ereignisse, die es beeinflussen könnten, hinreichend gut verstanden werden,
- (b) durch Nachweis, dass die Umsetzung des Designs machbar ist,
- (c) durch überzeugende Einschätzung des Einschlussvermögens des Endlagersystems und durch Nachweis eines hinreichenden Maßes an Sicherheit, dass alle relevanten Sicherheitsanforderungen erfüllt werden und dass der Strahlenschutz optimiert ist,
- (d) durch Erstellen einer Analyse, die das Ausmaß an verbleibenden Ungewissheiten identifiziert.

Das Einschlussvermögen des Endlagersystems unter den erwarteten Entwicklungen und unter weniger wahrscheinlichen Entwicklungen und Ereignissen, die außerhalb des Auslegungsbereichs der Endlageranlage liegen können, muss in der Sicherheitsanalyse untersucht werden.

Anforderung 16: Endlagerdesign

Das Endlager und seine geotechnischen Barrieren sollen so ausgelegt sein, dass sie die Abfälle und die damit verbundene Gefährdung einschließen, dass sie physikalisch und chemisch kompatibel mit der Wirtsgesteinsformation sind und dass sie nach Verschluss des Englagers Sicherheitsfunktionen bieten, die die Sicherheitseigenschaften der Wirtsgesteinsumgebung ergänzen. ...

Die Sicherheitsauslegung der Anlage für die Zeit nach ihrer Schließung sollte den Regeln der Robustheit, Einfachheit, technischen Machbarkeit und Passivität folgen. Sollte Rückholbarkeit der Abfälle eine Auslegungsanforderung sein, sollte diese so früh wie möglich im Auslegungsprozess berücksichtigt werden, und zwar derart, dass die Sicherheit der Anlage nach Schließung nicht gefährdet ist. Die Konstruktion der geotechnischen Barrieren sollte auf Designanforderungen beruhen, die der jeweiligen Sicherheitsfunktion der Barriere angepasst ist. Das Design sollte die inhärenten Merkmale der Wirtsgesteinsformation optimal nutzen und geotechnische Barrieren einschließen, die das natürliche Barrierensystem ergänzen. Es ist wichtig nachzuweisen, dass sowohl die Herstellung der Abfallbehälter als auch die Herstellung der geotechnischen Barrieren machbar sind, um Vertrauen zu schaffen, dass ein ausreichendes Leistungsniveau erzielt werden kann.

Anforderung 17: Errichtung des Endlagers

Das Endlager soll gemäß dem im genehmigten 'Safety Case' und in der entsprechenden Sicherheitsanalyse aufgeführten Design errichtet werden. Es soll so erstellt werden, dass die Sicherheitsfunktionen der Wirtsgesteinsumgebung, die gemäß 'Safety Case' relevant für die Langzeitsicherheit sind, erhalten bleiben. ...

Auffahrungs- und Errichtungstätigkeiten müssen so ausgeführt werden, dass unnötige Störungen der Wirtsgesteinsumgebung wie z. B. die Entwicklung unnötig ausgedehnter Auflockierungszonen durch Auffahrungen, das Einbringen chemisch ungünstiger Substanzen oder von hydrogeologischen und geochemischen Transienten in das Wirtsgestein vermieden werden. Die inhärenten Einschlussfunktionen des Wirtsgesteins sollten, soweit machbar, erhalten bleiben. Auffahrungs- und Errichtungsarbeiten könnten auch nach Betriebsbeginn in einem Teil der Anlage also während der Einlagerung von Abfallgebinden fortgeführt werden. Eine derartige Überlappung von Errichtung und Betrieb muss so geplant und ausgeführt werden, dass die Sicherheit gewährleistet ist, sowohl während des Betriebs als auch danach.

Anforderung 19: Verschluss des Endlagers

Ein Endlager soll so geschlossen werden, dass die im 'Safety Case' als wichtig für die Nachbetriebsphase ausgewiesenen Sicherheitsfunktionen gewährleistet sind. ...

Die Sicherheit eines Endlagers nach Verschluss hängt von einer Reihe von Aktivitäten und Auslegungsmerkmalen ab, die z. B. das Verfüllen und Abdichten des Endlagers einschließen. Das Verschließen muss im vorläufigen Design der Anlage berücksichtigt werden, und die Pläne für den Verschluss und das Abdichten müssen während der weiteren Entwicklung der Anlage aktualisiert werden. Bevor mit dem Bau begonnen werden kann, muss es, um die Auslegungsanforderungen zu erfüllen, hinreichende Belege dafür geben, dass das Verfüllen und Abdichten wie vorgesehen funktioniert. Verschlussmaßnahmen sind Teil der Betriebsphase der Anlage und bedürfen der Genehmigung durch die Regulierungsbehörde. Der 'Safety Case' sollte regelmäßig aktualisiert werden, um die Verschlussmaßnahmen zu optimieren. Einige Teile der Anlage, wie z. B. die Einlagerungsstrecken, können so früh wie möglich verfüllt werden, um Störungen des Wirtsgesteins zu minimieren. Nach Beendigung der Einlagerung können das Verfüllen und der Einbau von Verschlussbauwerken für eine gewisse Zeit verschoben werden, z. B. um ein Monitoring durchzuführen oder aus Gründen der öffentlichen Akzeptanz.

2.1.1.2 Der 'Safety Case'

Der 'Specific Safety Guide' SSG-23 (IAEA 2012) bietet Richtlinien und Empfehlungen zur Einhaltung der oben genannten Sicherheitsanforderungen in Bezug auf den 'Safety Case' und die entsprechende Sicherheitsanalyse für die Entsorgung radioaktiver Abfälle. Der 'Safety Case' ist eine Sammlung von wissenschaftlichen, technischen, administrativen und betriebswirtschaftlichen Argumenten und Nachweisen im Hinblick auf die Sicherheit eines Endlagers. Diese decken die Eignung des Standorts und des Designs, den Bau, den Betrieb, die Stilllegung und die Nachverschlussphase der Anlage, eine Bewertung der Strahlenrisiken sowie die Angemessenheit und Qualität aller mit der Anlage verbundenen sicherheitsrelevanten Maßnahmen ab. Die Sicherheitsanalyse – ein integraler Teil des 'Safety Case' – ist eine systematische Analyse der Strahlengefährdung und eine wichtige Komponente des 'Safety Case'. Letzterer beinhaltet die Quantifizierung der Strahlendosis und der Strahlenrisiken, die von der Anlage ausgehen könnten, um sie mit den Dosis- und Risikokriterien zu vergleichen. Er liefert Kenntnisse über das Verhalten des Endlagers in der wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklung unter Berücksichtigung der Zeitspannen, über die von den radioaktiven Abfällen eine Gefährdung ausgeht.

Das grundlegende Sicherheitsziel ist der Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung. "Radioaktiver Abfall muss so entsorgt werden, dass künftigen Generationen keine unzumutbaren Lasten auferlegt werden, d. h. die Generationen, die die Abfälle verursachen, müssen sichere, praktikable und umweltgerechte Lösungen für die langfristige Entsorgung dieser Abfälle finden und anwenden". Die bevorzugte Strategie für die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle ist deren Einschluss und Isolierung gegenüber der Biosphäre.

Die Komponenten des 'Safety Case' sind in Abb. 2.1 dargestellt und sollten folgende Aspekte beinhalten: den Kontext, die Sicherheitsstrategie, die Beschreibung der Anlage, die Sicherheitsanalyse, Grenzen, Kontrollen und Bedingungen, Iterationsschleifen und Designoptimierung, Unsicherheitsmanagement und Sicherheitsbelege. Die Entwicklung des 'Safety Case' sollte bereits bei der Auslegung der Anlage begonnen und über deren Lebensdauer bis zur Schließung und Genehmigung fortgeführt werden.

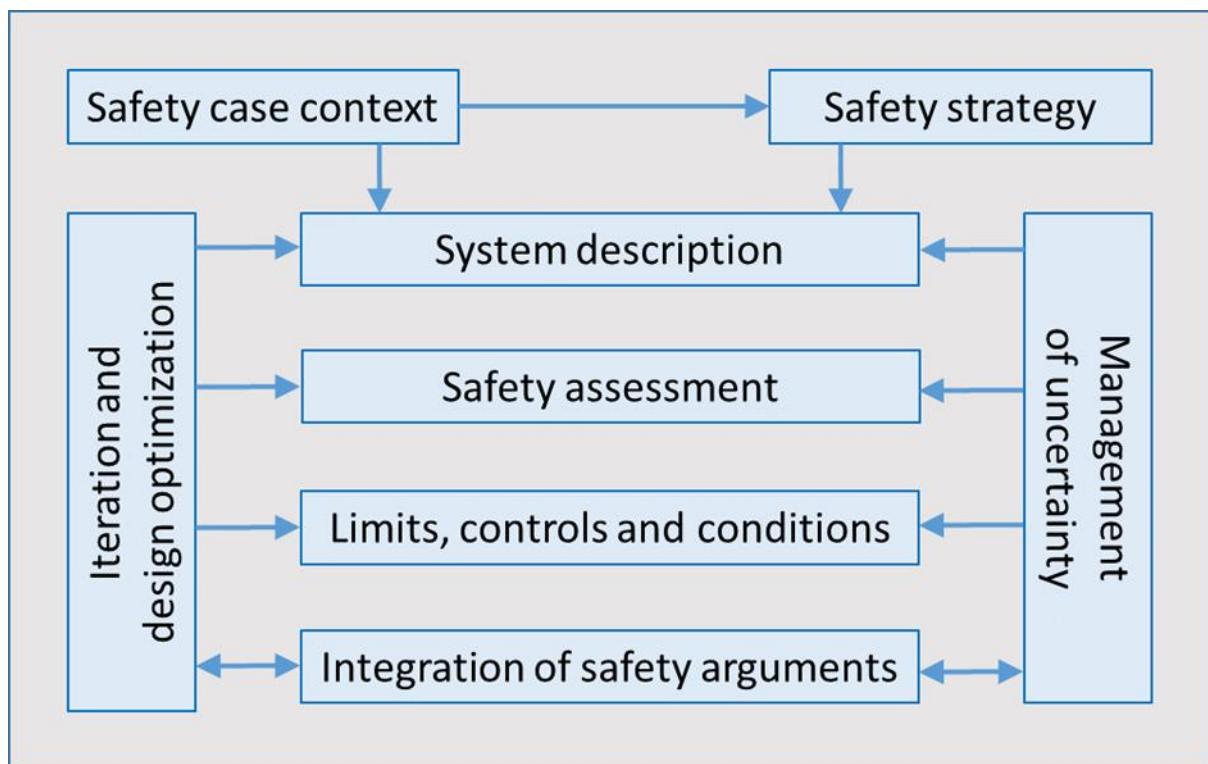


Abb. 2.1: Komponenten eines 'Safety Case' (modifiziert nach IAEA 2012)

Die globale Strategie sollte eine Reihe von Schlüsselementen enthalten. Dies sind: Berücksichtigung mehrfacher Sicherheitsfunktionen und eines gestaffelten Sicherheitskonzeptes, Einschluss der Abfälle, Einsatz passiver Sicherheitsmerkmale, Robustheit des Endlagersystems, Nachweismöglichkeit sicherheitsrelevanter Eigenschaften und Aspekte sowie die Wechselbeziehung mit der Behandlung der Abfälle vor der Endlagerung. Es sollte angegeben werden, wie der Einschluss der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Dabei ist die Art und Weise, wie die Wirksamkeit des Einschlusses im Einklang mit dem regulatorischen Ansatz nachgewiesen werden soll, zu berücksichtigen. Es sollte spezifiziert und begründet werden, über welche Zeitspannen die Einschlussfunktionen bestehen (bleiben) bzw. nachgewiesen werden können. Das Konzept der Isolation beinhaltet im Wesentlichen zwei Aspekte: Die physische Trennung der Abfälle von der zugänglichen Umgebung und die Sicherstellung, dass die Sicherheitsfunktionen gegenüber schädlichen Effekten isoliert sind. In der Sicherheitsstrategie sollte zusammen mit der Art und Weise, wie ihre Wirksamkeit im Einklang mit dem regulatorischen Ansatz nachgewiesen werden soll, erklärt und begründet werden, wie diese Aspekte berücksichtigt werden sollen,

2.1.2 Empfehlungen der ICRP

Die ICRP (Internationale Strahlenschutzkommission) beschreibt in ihrer Publikation 103 (ICRP 2007) das System zum Schutz von Mensch und Umwelt vor den Auswirkungen radioaktiver Strahlung und gibt in ihrer Publikation 122 (ICRP 2013) Hinweise, wie dieses System interpretiert und angewendet werden kann im Hinblick auf die Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle. Die ICRP unterscheidet drei Typen von Strahlenexpositionen:

- geplante Expositionen,
- Expositionen aufgrund von Störfällen und
- existierende Expositionen.

Die Empfehlungen der ICRP fundieren auf drei grundlegenden Prinzipien des Strahlenschutzes:

- Rechtfertigung für Expositionen,
- Optimierung des Strahlenschutzes und
- Anwendung von Dosisgrenzwerten.

Die Publikation 122 (ICRP 2013) bezieht sich auf die verschiedenen Phasen der Endlagerentwicklung und beschreibt die Anwendung relevanter Prinzipien des Strahlenschutzes für jede dieser Phasen in Abhängigkeit der verschiedenen Expositionssituationen, die angetroffen werden können. Der wesentliche Faktor, der die Anwendung des Strahlenschutzsystems beeinflusst, ist der Grad der Beaufsichtigung in den verschiedenen Phasen. In diesem Zusammenhang werden drei Zeitbereiche unterschieden:

- die Zeit der direkten Beaufsichtigung während des Betriebes des Endlagers,
- die Zeit der indirekten Beaufsichtigung, wenn das Endlager verschlossen und versiegelt ist und
- die Zeit der Beaufsichtigung durch die Regulierungsbehörde oder eine eigens dafür bestimmte Institution und die Zeit in der keine Beaufsichtigung mehr durchgeführt wird.

Im Zuge der Beaufsichtigung in den einzelnen Phasen werden verschiedene Dosis- und Risikogrenzwerte im Rahmen der Sicherheitsanalyse und des Strahlenschutzes für ein Endlager für radioaktive Abfälle verwendet. Für Personen wird ein Dosisgrenzwert für Dosen aus allen Expositionssituationen mit einer effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr empfohlen. Um diese Dosisgrenze einzuhalten, muss ein Endlager so ausgelegt sein, dass die berechnete Dosis bzw. das Risiko einer möglichen zukünftigen Endlager-induzierten Exposition einer repräsentativen Person eine Dosisbegrenzung von 0,3 mSv pro Jahr bzw. eine Risikobegrenzung mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-5} pro Jahr nicht überschreiten (ICRP 2013).

2.1.3 Empfehlungen der OECD/NEA

Ähnlich wie die IAEA hat auch die OECD/NEA Empfehlungen entwickelt, wie ein 'Safety Case' zu entwickeln ist bzw. was er beinhalten sollte. In NEA (2004) werden die Elemente eines 'Safety Case' erläutert. Wesentliche Elemente sind auch hier die Sicherheitsstrategie, die Sicherheitsanalysen und ihre Datenbasis, Beweisführung und Bewertung im Rahmen einer Synthese. Die darin dargelegten Aussagen wurden auch auf einem Symposium der NEA im Jahr 2013 bestätigt und anhand praktischer Beispiele aus aktuellen Endlagerprogrammen illustriert (NEA 2013).

2.1.3.1 Sicherheitsstrategie

Die Sicherheitsstrategie ist ein übergeordneter Ansatz mit dem Ziel, sichere Endlagerung zu erreichen, und beinhaltet eine allgemeine Entsorgungsstrategie, eine Standortwahl- und Auslegungsstrategie sowie eine Sicherheitsanalysestrategie. Alle nationalen Entsorgungsprogramme sind auf Managementstrategien ausgerichtet, die im Einklang mit anerkannten Grundsätzen und Regeln der Entsorgung und der Technik stehen. Dies schließt die Erhaltung einer ausreichenden Flexibilität in einem schrittweisen Planungs- und Umsetzungsprozess ein, um unerwartete Standortmerkmale oder technische Schwierigkeiten und Unsicherheiten beherrschen zu können, sowie die Nutzung der neuesten wissenschaftlichen Kenntnisse und technische Verfahren. Die Standortauswahl- und Auslegungsstrategie basiert grundsätzlich auf Prinzipien, die Robustheit bevorzugen und Unsicherheiten minimieren, inkl. dem Einsatz eines Multibarrierensystems. Die Analysestrategie muss gewährleisten, dass die Sicherheitsanalysen Unsicherheiten, die sicherheitsrelevant sind, erfassen, beschreiben und analysieren und deren Auswirkungen untersuchen.

2.1.3.2 Sicherheitsanalyse und ihre Datenbasis

Die Datenbasis für die Sicherheitsanalyse ist eine Sammlung von Informationen und Analysewerkzeugen, die für die Sicherheitsanalyse hilfreich sind. Dies schließt eine umfassende Beschreibung des Endlagersystems ein, das aus dem gewählten Standort und seiner geologischen Umgebung besteht, sowie den für die Analyse der Systemsicherheit relevanten wissenschaftlichen und technischen Daten und Kenntnissen inclusive den für die Bewertung des Systemverhaltens gewählten Analysemethoden, Modellen, Programmen und Datenbanken. Die Qualität und Zuverlässigkeit einer Sicherheitsanalyse hängt von der Qualität und Zuverlässigkeit ihrer Datenbasis ab. Eine Erörterung der Datenbasis in einer detaillierten Präsentation des 'Safety Case' sollte Belege und Argumente für die Qualität und Zuverlässigkeit aller Komponenten der Datenbasis beinhalten.

2.1.3.3 Beweisführung

Die meisten nationalen Regelwerke enthalten Sicherheitskriterien in Form von Dosis- und/oder Risikoindikatoren. Die Analyse dieser Indikatoren – sei es durch mathematische Analysen oder mit Hilfe qualitativer Argumente – für eine Reihe möglicher Entwicklungsszenarien des Endlagersystems spielt eine bedeutende Rolle in allen 'Safety Cases', die einer Prüfung durch Regulierungsbehörden unterliegen. Die Robustheit des 'Safety Case' wird jedoch gestärkt durch multiple Nachweisketten, die zu ergänzenden Sicherheitsargumenten führen, die Schwächen in jedem Einzelargument kompensieren können. Ergänzende Nachweise und Belege zugunsten der Sicherheit schließen

- allgemeine Nachweise über die Effektivität geologischer Endlagerung als Abfallentsorgungsoption,
- Nachweise über die inhärenten Qualitäten des Standorts und des Designs,
- ergänzende Sicherheitsindikatoren zu Dosis und Risiko und
- Belege über die Eignung der Strategie zur Beherrschung von Unsicherheiten und
- offenen Fragen

ein.

2.1.3.4 Bewertung und Synthese

Wenn in einem 'Safety Case' der Schluss gezogen wird, dass ausreichend Vertrauen in die Möglichkeit der Errichtung eines sicheren Endlagers besteht, kann zur nächsten Phase der Planung und Umsetzung übergegangen werden. Dies ist eine Aussage über das Vertrauen von Seiten des Verfassers des 'Safety Case' (normalerweise der Entwickler), basierend auf den erstellten Analysen und Belegen und den zusammengetragenen Nachweisen. Die Empfänger des 'Safety Case' müssen entscheiden, ob sie glauben, dass die ihnen präsentierte Beweisführung adäquat ist und ob sie das Vertrauen des 'Safety-Case'-Verfassers teilen. Zu diesem Zweck werden die verfügbaren Nachweise, Belege und Analysen in einem Syntheserichter zusammengestellt. Dieser sollte die Gründe hervorheben, warum der Verfasser des 'Safety Case' zu dem Urteil gekommen ist, dass die Planung und Entwicklung des Endlagersystems fortgeführt werden soll.

2.1.4 Verordnung über Sicherheitsanforderungen

Gemäß der Sicherheitsanforderungsverordnung (EndISiAnfV 2020) gelten für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gemäß §4 folgende Anforderungen:

- (1) *Die einzulagernden radioaktiven Abfälle sind im Endlagersystem mit dem Ziel zu konzentrieren und sicher einzuschließen, die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Nachweiszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten.*

- (2) Das vorgesehene Endlagersystem hat den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle passiv und wartungsfrei durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten.
- (3) Die wesentlichen Barrieren beim sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle sind
1. ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche im Zusammenwirken mit den zur Abdichtung erforderlichen technischen und geotechnischen Verschlüssen oder
 2. im Falle des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, technische und geotechnische Barrieren in einer für deren Funktion geeigneten geologischen Umgebung.
- (4) Der sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren nach Absatz 3 so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben. Für zu erwartende Entwicklungen ist nachzuweisen, dass im Nachweiszeitraum
1. insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und
 2. jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9} der Masse der eingelagerten Radionuklide einschließlich ihrer Zerfallsprodukte aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird.
- (5) Für die abweichenden Entwicklungen ist nachzuweisen, dass das Endlagersystem im Nachweiszeitraum seine Funktionstüchtigkeit in ausreichendem Maße beibehält.

Demnach basiert die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in erster Linie darauf, einen möglichst weitgehenden, dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich, dem ewG, zu erreichen und zu erhalten.

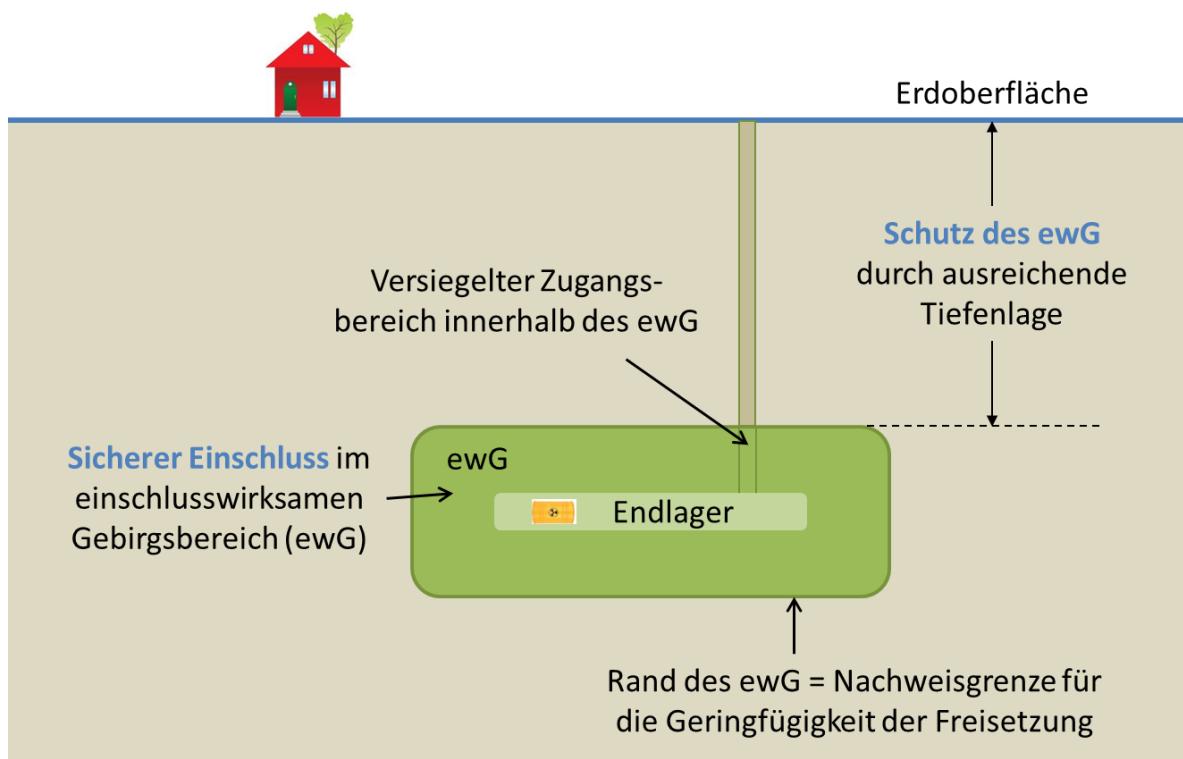


Abb. 2.2: Prinzip des sicheren Einschlusses in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG)

Der Einschluss ist somit die primäre Sicherheitsfunktion des Endlagersystems. Diese ist dadurch charakterisiert, dass die radioaktiven Stoffe im Wesentlichen im ewG verbleiben und

allenfalls in einer Größenordnung, die in den Sicherheitsanforderungen als gering definiert wird, den ewG verlassen (Abb. 2.2).

Zwei weitere Aspekte sind gemäß den Sicherheitsanforderungen zu beachten, wenn es darum geht, ein Sicherheitskonzept zu erstellen. Da ist zum einen die Anforderung nach einer periodischen Optimierung des Endlagersystems. In den Sicherheitsanforderungen heißt es dazu u. a. (EndlSiAnfV 2020, §12 und §10,3):

- (1) *Das Sicherheitskonzept und die technische Auslegung des Endlagers sind unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls und unter Beachtung der Ausgewogenheit der Maßnahmen zur Erreichung folgender Ziele zu optimieren:*
 1. *die Langzeitsicherheit des Endlagers, insbesondere Qualität des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle und Robustheit des Endlagersystems ...*

Dabei wird unter Robustheit

die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen verstanden (EndlSiAnfV 2020, §2).

Zum anderen gilt es, die Überwachung des Endlagers und seiner Umgebung einzuplanen, die einen direkten Bezug zur eben angesprochenen Optimierung des Endlagersystems besitzt. In den Sicherheitsanforderungen heißt es dazu u. a. (EndlSiAnfV 2020, §20):

- (1) *Das Endlager und seine Umgebung sind im Rahmen eines Monitorings kontinuierlich zu überwachen. Das Monitoring hat insbesondere solche beobachtbaren Parameter zu überwachen, die frühzeitig auf Abweichungen von den zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems hindeuten können. ...*

Insbesondere bei der Entwicklung und dem Aufbau des geotechnischen Barrierensystems spielt der Optimierungsprozess eine große Rolle. Die Betriebsphase wird mehrere Jahrzehnte dauern und es werden eine ganze Reihe geotechnischer Barrieren zu errichten sein. Die Entwicklung dieser Barrieren mit einem Monitoring zu verfolgen, daraus zu lernen und die Erkenntnisse zu verwenden, um nachfolgende Abdichtbauwerke zu errichten, ist ein Kernelement des Optimierungsprozesses speziell mit Blick auf die „wesentlichen“ Barrieren und deren Einschlusswirksamkeit. Um die in den Sicherheitsanforderungen geforderten charakterlichen Parameter zu bestimmen, kann auf eine ‘Parameter-Screening-Methode‘ zurückgegriffen werden, die im Rahmen eines europäischen Projektes (MODERN2020, 2019) entwickelt und in Jobmann (2019) auf deutsche Verhältnisse adaptiert wurde.

Die Bewertung der Langzeitsicherheit beruht auf folgenden Säulen:

- Der Integrität und Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentlicher Barriere
- Der Integrität und Robustheit der technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren
- Der Geringfügigkeit des Massenaustrags
- Der Geringfügigkeit der Expositionen im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition
- Dem nachweislichen Ausschluss von Kritikalität im gesamten Grubengebäude

Zum Integritätsnachweis werden die Kriterien aus der Anforderungsverordnung soweit quantifiziert, dass damit rechnerische Nachweise geführt werden können (Jobmann et al. 2021). Schließlich muss das Sicherheitskonzept auch eine sichere Betriebsführung des Endlagerbergs ermöglichen (EndlSiAnfV 2020, §10,5).

2.1.5 Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten CHRISTA und KONEKD

Im Zuge der Machbarkeitsuntersuchung im Forschungsprojekt CHRISTA (Jobmann et al. 2016) wurde die Übertragbarkeit des in den Sicherheitsanforderungen verankerten ewG-Konzeptes für eine Sicherheitsbewertung im Kristallingestein geprüft. Die Überprüfung erfolgte dergestalt, dass zunächst die Grundlagen für die Formulierung eines Bewertungskonzeptes im Kristallingestein untersucht wurden. Dies betrifft die mögliche Ausweisung eines ewG im Kristallin, die Möglichkeit zur Prüfung und Bewertung der Integrität des Wirtsgesteins sowie Berechnungen zur Migration von Radionukliden. Darüber hinaus wurde geprüft, inwieweit bestehende Behälter- bzw. Einlagerungs- und Barrierenkonzepte auf geologische Situationen und regulatorische Verhältnisse in Deutschland übertragbar wären.

Das Vorhaben kam zu dem Ergebnis, dass sich das auf die technischen und geotechnischen Barrieren fokussierende skandinavische KBS-3-Konzept (SKB 2010) nicht ohne Weiteres auf Deutschland übertragen lässt. Eine Übertragung wäre nur mittels spezifischer Modifikationen möglich. Unter Anwendung des ewG-Konzepts, ergeben sich Optionen, bei denen das kristalline Wirtsgestein entweder selbst einen oder mehrere ewG enthält oder wo der ewG durch überlagernde Sedimentgesteine dargestellt wird. Es lassen sich demnach zwei ewG-Typen unterscheiden:

- Typ "**multipler ewG**": Hierbei werden mehrere kleinere ewG ausgewiesen, die in gering geklüfteten Gesteinsblöcken positioniert werden (Abb. 2.3 links).
- Typ "**überlagernder ewG**": Hierbei wird die Einschlussfunktion durch überlagernde Sedimentgesteine mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit (z.B. Salze, Tone) und dem Schacht- oder Rampenverschluss gewährleistet (Abb. 2.3 rechts).

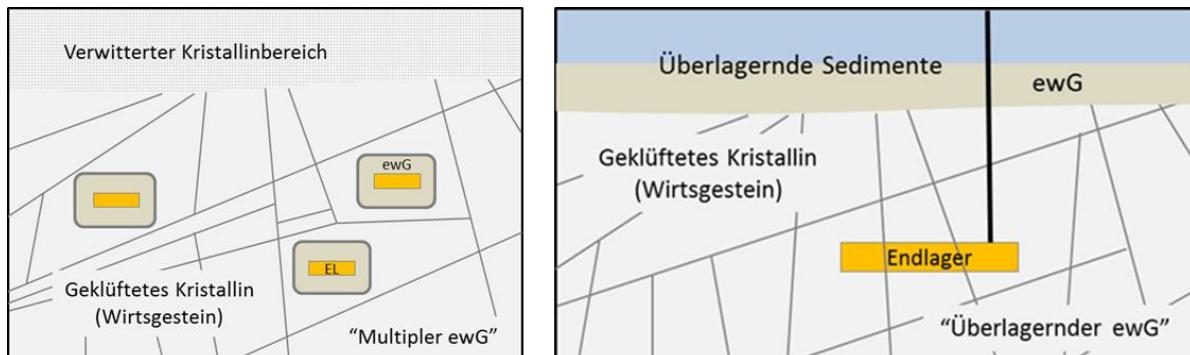


Abb. 2.3: Prinzipskizze für den ewG-Typ 'multipler ewG' (links; EL = Einlagerungsbereich) und den Typ 'überlagernder ewG' (rechts).

Basierend auf den beiden identifizierten ewG-Typen und einem für die Verhältnisse in Deutschland modifizierten KBS-3-Konzept wurden im Rahmen des Projektes KONEKD (Bertrams et al. 2017) **drei** technische Endlagerkonzepte entwickelt, die als erste Grundlage für die Entwicklung eines Bewertungskonzeptes dienen.

2.1.6 Standortauswahlgesetz

Das Standortauswahlgesetz (StandAG 2017) beschreibt den Weg, wie ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ermittelt werden soll. Der Vorhabenträger hat unter Anwendung der in §22 bis 24 festgelegten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Teilgebiete zu ermitteln, die günstige geologische Voraussetzungen

erwarten lassen. Aus diesen Teilgebieten sind dann Standortregionen für die übertägige Erkundung zu ermitteln. Im § 27 des Gesetzes werden für die Teilgebiete vorläufige repräsentative Sicherheitsuntersuchungen vorgeschrieben. Im Rahmen dieser vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist die Bewertung vorzunehmen, inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann. Den Analysen sind die aktuellen Sicherheitsanforderungen zugrunde zu legen.

Das im Rahmen des Forschungsprojektes CHRISTA entwickelte Gedankengut (vgl. voriger Abschnitt) findet sich im StandAG in den Optionen wieder, dass nicht zwingend nur ein ewG zu definieren ist, sondern ggf. auch mehrere, sowie dass das Wirtsgestein überlagernde Sedimentgesteine als ewG definiert werden können, sofern diese die entsprechenden Kriterien erfüllen. Darüber hinaus wurde im StandAG die Option eingeführt, dass der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle auch ausschließlich durch ein technisches und geotechnisches Barrierensystem gewährleistet werden kann.

Generell soll das Endlagersystem in seiner Gesamtheit betrachtet und entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich seiner Sicherheit bewertet werden. Es wird vorgegeben, das Verhalten des Endlagersystems unter verschiedenen Belastungssituationen und unter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten, Fehlfunktionen sowie zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu untersuchen.

Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbstinterfragenden und lernenden Verfahren ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ermittelt werden. An dem auszuwählenden Standort soll dieendlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk erfolgen. Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen. Diese gesetzlichen Vorgaben fußen auf dem abschließenden Bericht der Endlagerkommission "Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes" (Endlagerkommission 2016). Darin wird u. a. auf zukunftsethischen Prinzipien verwiesen verbunden mit der Forderung nach weitgehenden Möglichkeiten der Fehlerkorrektur und damit nach Reversibilität einmal getroffener Entscheidungen im Sinne eines lernenden Verfahrens. Die Möglichkeit zur Umsteuerung im laufenden Verfahren, sei erforderlich, um Fehlerkorrekturen zu ermöglichen, um Handlungsoptionen für zukünftige Generationen offenzuhalten, zum Beispiel zur Berücksichtigung neuer Erkenntnisse, und könne zum Aufbau von Vertrauen in den Prozess beitragen. Konzepte der Rückholbarkeit oder Bergbarkeit der Abfälle beziehungsweise der Reversibilität von Entscheidungen seien dafür zentral.

Der Bericht der Endlagerkommission geht über den Zeitraum der Standortauswahl und damit des StandAG hinaus und gibt Hinweise für den Endlagerbetrieb und für die zu erbringenden Langzeitsicherheitsnachweise, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

2.1.7 Bericht der Endlagerkommission

Für den Zeitraum der Einlagerung wird im Teil A des Kommissionsberichtes empfohlen, dass sobald ein Lagerort befüllt ist, dieser verfüllt wird, damit die endgelagerten Abfälle hinter einem Verschluss von dem weiter im Betrieb befindlichen Teil des Bergwerks, insbesondere von dort arbeitenden Menschen, isoliert werden. Die Verfüllung selbst soll so gestaltet sein, dass eine Wiederöffnung und Rückholung der Abfälle in angemessener Zeit, das heißt in einer Zeitdauer

ähnlich wie die Dauer der Einlagerung, nach einem vorhandenen technischen Konzept möglich ist. Auch die Behälter sollten so ausgelegt sein, dass ihre Rückholung möglich ist. Das Bergwerk selbst verbleibt in dieser Etappe in einem betriebsbereiten Zustand. Diese Betriebsbereitschaft soll zum Zwecke des Monitorings auch nach Abschluss der Einlagerung für einen definierten Zeitraum erhalten bleiben. Mit der Entscheidung zum Verschluss des Endlagers wäre das Ziel eines sicheren und wartungsfreien Einschlusses der radioaktiven Abfälle im Bergwerk erreicht. Das verschlossene Endlagerbergwerk kann durch Monitoring-Maßnahmen weiter beobachtet werden. Inwieweit auch die Vorgänge im Inneren weiter beobachtet werden können, hängt von im Zuge der Einlagerung oder in der Phase vor dem Verschluss vorgesehenen Monitoring-Maßnahmen ab und sollten entsprechend rechtzeitig in die Planungen einbezogen werden.

Nach Meinung der Kommission kann auf diese Weise das Ziel einer sicheren und wartungsfreien Endlagerung unter Berücksichtigung der Reversibilität von Entscheidungen, Rückholbarkeit der Abfälle, Ermöglichung von Fehlerkorrekturen und Lernmöglichkeiten im Prozess erreicht werden.

Im Teil B ihres Berichtes kommt die Kommission zu dem Schluss, dass die bislang in Deutschland verfolgte Option eines Endlagerbergwerks die beste Möglichkeit einer sicheren Entsorgung bietet, allerdings mit der konzeptionellen Änderung der Reversibilität von Entscheidungen und der Rückholbarkeit beziehungsweise Bergbarkeit der Abfälle. Mit Blick auf eine Sicherheitsbewertung für diese Option sagt die Kommission, dass die Langzeitsicherheit eines Endlagers darauf basiert,

... dass der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle dauerhaft gewährleistet wird und eine unzulässige Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre innerhalb des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahren verhindert wird. Dazu ist immer das gesamte Endlagersystem zu betrachten.

Darüber hinaus wird gesagt, dass ein Endlagerkonzept erstellt werden sollte, in dem beschrieben wird, wie das Ziel des langzeitigen Einschlusses der radioaktiven Abfälle durch das geeignete Zusammenwirken geologischer und technischer Barrieren erreicht werden kann. Diese Aussage ist auch im StandAG in §26 formuliert. Folgende Ansätze zum Nachweis des langzeitsicheren Einschlusses wären grundsätzlich möglich:

- Die maßgebliche Einschlussfunktion wird einer geologischen Barriere (dem sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich) zugeordnet.*
- Die maßgebliche Einschlussfunktion wird einer technischen Barriere (basierend auf langzeitstabilen Behältern und ihrer Ummantelung) zugeordnet.*
- Die Einschlusswirkung des Gesamtsystems wird durch eine aufeinander folgende Kombination von Wirtsgesteinseigenschaften und technischen Barrieren erreicht.*

Auf Basis dieser Ansätze ist für jede Wirtsgesteinsart an einem bestimmten Standort ein Endlager- und ein Nachweiskonzept zu entwickeln, mit dem der Nachweis der Langzeitsicherheit über den Nachweiszeitraum geführt werden kann. Im StandAG (und auch in den Sicherheitsanforderungen) ist dieser Nachweiszeitraum auf eine Million Jahre festgelegt.

Prüfung und Bewertung anhand eines oder mehrerer ewG

In den Sicherheitsanforderungen (EndSiAnfV 2020) ist das Konzept des ewG verankert, das seinerzeit vom Arbeitskreis Endlagerung entwickelt wurde (AkEnd 2002). Die Aussage der Kommission stützt sich auf die Ausführungen des AkEnd mit den Worten:

Für den Nachweis, dass eine geologische Barriere den langzeitsicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten kann, wird hierbei ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich innerhalb des Wirtsgesteins um den Ort der Einlagerung der radioaktiven Abfälle bzw. zwischen den Abfällen und der Biosphäre ausgewiesen. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (zum Beispiel Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Versatzmaterial) den Einschluss der Abfälle sicherstellt. Der ewG stellt hierbei die Hauptbarriere (= geologische Barriere) dar. Zur "Heilung" der erforderlichen technischen Eingriffe in den ewG sind geotechnische Barrieren (Schacht- und Streckenverschlüsse, Versatzmaterial) vorgesehen. Der Behälter hat beim ewG-Konzept eine zeitlich begrenzte Funktion als technische Barriere, auf der aber der Nachweis der Langzeitsicherheit nicht beruht. Ein ewG-Konzept ist hinsichtlich der Wirtgesteinstryphen prinzipiell anwendbar für geeignete Steinsalz- und Tonsteinformationen und auch für Kristallinformationen mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit.

An dieser Stelle macht die Kommission ergänzende Ausführungen speziell mit Blick auf eine Endlagerung im kristallinen Gestein:

... Dabei sind je nach örtlicher Situation auch Endlagerkonzepte denkbar, bei denen an einem Standort nicht einer, sondern mehrere räumlich voneinander getrennte einschlusswirksame Gebirgsbereiche ausgewiesen werden, in denen jeweils ein Teil der radioaktiven Abfälle langzeitsicher endgelagert werden kann, sowie Konstellationen, bei denen nicht das Wirtsgestein, sondern überlagernde Schichten den sicheren Einschluss gewährleisten.

Diese Ausführungen entspringen den Gedanken, die in dem Forschungsprojekt CHRISTA hinsichtlich der möglichen Nutzung verschiedener ewG-Typen entwickelt wurden (vgl. Kapitel 2.1.5).

Generell ist es nach Auffassung der Kommission möglich,

... einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich so auszuweisen, dass ein Nachweis seiner Integrität über eine Million Jahre geführt werden kann. Bei ausreichend geringer Durchlässigkeit des Wirtsgesteins gelingt dabei der Nachweis des Einschlusses unmittelbar durch die vollständige Integrität des ewG, einschließlich Versatz und Verschlussbauwerke. In diesem Fall können im Nachweiszeitraum keine Radionuklide den ewG verlassen („vollständiger Einschluss“). Alternativ kann im Nachweisverfahren gezeigt werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich während des Nachweiszeitraums Radionuklide mindestens in dem Maße zurückhält, dass nur geringfügige Freisetzung in die Biosphäre zu erwarten sind, die nicht zu einer Überschreitung der in den Sicherheitsanforderungen des Bundesumweltministeriums genannten Grenzwerten für die effektive Dosis führen können („sicherer Einschluss“).

Hinsichtlich der Sicherheitsfunktionen der Endlagerbehälter sagt die Kommission:

Beim ewG-Konzept haben die Behälter insbesondere die Aufgabe, während des Endlagerbetriebes, in der Regel für einige Jahrzehnte, die Rückhaltung von Radionukliden zu gewährleisten; zudem müssen die Abfallbehälter, ggf. in Kombination mit einem Transferbehälter, eine sichere Handhabung unter Strahlenschutzbedingungen ermöglichen. Dieselben Sicherheitsfunktionen werden von den Behältern für eine (eventuell notwendige) Rückholung in der Betriebsphase gefordert. Nach Verschluss des Endlagers müssen die Abfälle bis zu 500 Jahre bergbar bleiben, woraus sich Anforderungen an die mechanische Stabilität des Behälters und seine ausreichende Korrosionsbeständigkeit ergeben. Ab dem Zeitpunkt, nach dem die Bergbarkeit keine Anforderung mehr ist, muss der Behälter im ewG-Konzept nur noch solange eine Barrierefunktion (einige hundert bzw. tausend Jahre) übernehmen, bis die Langzeitsicherheit

des Endlagersystems vollständig über die Eigenschaften des ewG, also durch die geologische Barriere sowie die Strecken- und Schachtverschlüsse, nachgewiesen wird. Im Sicherheits- und Nachweiskonzept für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre wird danach von langzeitzigigen Eigenschaften der Behälter kein Kredit mehr genommen.

Prüfung und Bewertung langzeitsicherer technischer Barrieren

Eine denkbare Alternative zur Ausweisung eines ewG wäre die Ausweisung eines einschlusswirksamen Bereiches (ewB) anstelle eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG). Dieser Gedanke wurde seitens der Entsorgungskommission (ESK) in dem Diskussionspapier „Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)“ erläutert (ESK 2015). Zu diesem Ansatz macht die Kommission folgende Aussage:

Wenn das Wirtsgestein oder das umgebende Gestein keine ausreichende Barriere darstellen, dann muss, wenn an einem solchen Standort ein Endlager realisiert werden soll, der Nachweis des langzeitsicheren Einschlusses insbesondere über die technischen Barrieren geführt werden. Denkbar ist dies für Endlagersysteme in allen potenziellen Wirtsgesteinstypen, konzeptionell verfolgt wird es hauptsächlich in Ländern, deren Endlagerkonzept auf Kristallingestein beruht.

In erster Linie ist die technische Barriere der Abfallbehälter, der langfristig dicht sein muss. Damit er diese Funktion auch über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre übernehmen kann, wird er in den bekannten Endlagerkonzepten (in Schweden und Finnland) zum Schutz vor Korrosion zusätzlich mit einer Schutzschicht (dem sogenannten "Buffer"), bestehend aus einer mehrere Dezimeter dicken, quellfähigen Bentonitschicht ummantelt. ... Behälter und Buffer müssen bei einem solchen Nachweis über den gesamten Nachweiszeitraum die wesentliche Barrierefunktion übernehmen, wobei Anforderungen an die Rückholbarkeit während des Betriebs und eine sich anschließende Phase der Bergbarkeit nach Verschluss des Endlagers als Anforderungen an den Behälter ebenfalls zu berücksichtigen sind. Der Behälter ist also im Unterschied zu einem Nachweis über einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht nur für die Betriebsphase des Endlagers und einen nachfolgenden kürzeren Zeitraum sicherheitsrelevant, sondern für den gesamten Nachweiszeitraum. ...

Die Anforderung an die Kombination aus den Behältern, dem Buffer und dem umgebenden Wirtsgestein ist so, dass Behälterversagen mit Freisetzung aus dem Behälter nur in einem so geringen Umfang möglich ist, dass damit keine unzulässig hohen Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Biosphäre erfolgen. Das umgebende Wirtsgestein hat bei einer im Wesentlichen auf den technischen Barrieren beruhenden Nachweisführung die Aufgabe, die mechanische Stabilität der Einlagerungshohlräume sicher zu stellen. Darüber hinaus müssen Wirtsgestein und Buffer so gewählt sein, dass die Grundanforderungen hinsichtlich der Permeabilität des Wirtsgesteins auch langfristig eingehalten werden und an der Behälteroberfläche ein stabiles nichtkorrosives geochemisches Milieu herrscht. Die Tiefenlage des Endlagerbergwerks bewirkt in erster Linie den Schutz der eingelagerten Abfälle gegenüber exogenen Einflüssen (Eiszeiten, Erosion). Das Wirtsgestein übernimmt nicht, oder nicht maßgeblich, die Aufgabe, während des Nachweiszeitraums einen Kontakt mit Wasser oder einen Radionuklidaustrag zu verhindern. ...

Die Kommission schließt alternative Nachweisführungen mit einer stärkeren Betonung auf technischen Barrieren nicht grundsätzlich aus. Sie kämen unter den in Deutschland zu erwartenden geologischen Randbedingungen dann zum Tragen, wenn es darum geht, Endlager-

und Nachweiskonzepte für Standorte ohne die Möglichkeit der Ausweisung eines ausreichend integren ewG zu entwickeln. Dabei ist zu zeigen, dass ein auf Behältertechnologie, Buffer und geotechnischen Barrieren basierender Langzeitsicherheitsnachweis, ggf. in Kombination mit günstigen Wirtsgesteinseigenschaften, zu einer gleichwertigen und gleich robusten Sicherheitsaussage führt wie ein Langzeitsicherheitsnachweis, basierend auf einem Nachweiskonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches.

Nachweisführung über die Kombination von Wirtsgesteinseigenschaften und technischen Barrieren

In ihrem Bericht äußert sich die Kommission auch über den Fall, dass der Nachweis nicht allein über einen ewG und auch nicht allein über ein geotechnisches Barrierensystem geführt werden kann:

Unter Ausnutzung sowohl von Wirtsgesteinseigenschaften als auch von technischen Barrieren könnten auch kombinierte Konzepte entwickelt werden, die vorhandene, aber vielleicht nicht vollständig einschlusswirksame Eigenschaften des Wirtsgesteins mit einschlusswirksamen Eigenschaften technischer Barrieren kombinieren und in dieser Kombination eine weitere Nachweismöglichkeit für den langzeitsicheren Einschluss eröffnen. Das gilt für Wirtsgesteinsformationen, die ein relativ hohes Isolationsvermögen gegenüber Einflüssen aus der Biosphäre haben. Charakteristisch ist dabei, dass die geologische(n) und technische(n) Barriere(n) hinsichtlich der Vermeidung bzw. Begrenzung möglicher Freisetzung nacheinander angeordnet sind und so nur gestuft wirken. ...

Der Nachweis des sicheren Einschlusses beruht dann auf einer integrierten Betrachtung des Zusammenspiels von technischen und geotechnischen Barrieren und Wirtsgesteinseigenschaften. Dabei wird in Kauf genommen, dass ein gewisser Prozentsatz an Behälterversagen während des Nachweiszzeitraums nicht ausgeschlossen werden kann. Es ist konzeptionell darzulegen, wie Schwächen der geologischen Barrieren durch technische und geotechnische Vorkehrungen bzw. Schwächen der technischen Barriere durch Anforderungen an die geologischen Eigenschaften des Wirtsgesteins über den Nachweiszzeitraum ausgeglichen werden können, damit höchstens eine Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre unterhalb von Grenzwerten erfolgt.

2.1.8 Deutsche Strahlenschutzverordnung

Zweck dieser Verordnung ist es, zum Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung Grundsätze und Anforderungen für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zu regeln, die bei der Nutzung und Einwirkung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung zivilisatorischen und natürlichen Ursprungs Anwendung finden (StrlSchV 2008). Diese Verordnung trifft u. a. Regelungen für

- die Verwahrung und Aufbewahrung von Kernbrennstoffen, die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung, den sicheren Einschluss sowie den Abbau einer Anlage oder Teilen davon, die Bearbeitung, Verarbeitung und sonstige Verwendung von Kernbrennstoffen, die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, sowie
- für Arbeiten, durch die Personen natürlichen Strahlungsquellen so ausgesetzt werden können, dass die Strahlenexpositionen aus der Sicht des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

Diese Punkte sind beispielsweise zu berücksichtigen, wenn es darum geht, geotechnische Barrieren in der Nähe von Behältern zu errichten.

2.1.9 Bundesberggesetz

Der Zweck des Bundesberggesetzes ist es, neben der Sicherung der Rohstoffversorgung das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzten zu fördern, die Sicherheit der Betriebe und der Beschäftigten des Bergbaus zu gewährleisten sowie die Vorsorge gegen Gefahren, die sich aus bergbaulicher Tätigkeit für Leben, Gesundheit und Sachgüter Dritter ergeben, zu verstärken und den Ausgleich unvermeidbarer Schäden zu verbessern (BBergG 2021).

Ein wesentliches Faktum im Bundesberggesetz ist, dass für die Errichtung und Führung eines Betriebes – das gilt auch für ein Endlagerbergwerk – Hauptbetriebspläne für einen in der Regel zwei Jahre nicht überschreitenden Zeitraum aufzustellen sind. Eine Unterbrechung des Betriebes für einen Zeitraum bis zu zwei Jahren gilt als Führung des Betriebes, eine längere Unterbrechung nur dann, wenn sie von der zuständigen Behörde genehmigt wird. Darüber hinaus kann die zuständige Behörde verlangen, dass

- für einen bestimmten längeren, nach den jeweiligen Umständen bemessenen Zeitraum Rahmenbetriebspläne aufgestellt werden müssen, die allgemeine Angaben über das beabsichtigte Vorhaben, dessen technische Durchführung und voraussichtlichen zeitlichen Ablauf enthalten müssen,
- für bestimmte Teile des Betriebes oder für bestimmte Vorhaben Sonderbetriebspläne aufgestellt werden.

Die Aufstellung eines Rahmenbetriebsplanes ist zu verlangen und für dessen Zulassung ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen, wenn ein Vorhaben einer Umweltverträglichkeitsprüfung bedarf. Jenseits dieser allgemeinen Vorschriften stellt das Bundesberggesetz keine konkreten Anforderungen, die speziell auf ein Endlagerbergwerk ausgerichtet sind.

2.2 Zielsetzungen für die Sicherheit in der Nachverschlussphase

Die zum jetzigen Zeitpunkt regulatorisch bedeutsamste der im vorigen Kapitel beschriebenen Rahmenbedingung stellen die Sicherheitsanforderungen (EndlSiAnfV 2020) und das StandAG (2017) dar. Für eine Konkretisierung und Umsetzung der Sicherheitsprinzipien der Sicherheitsanforderungen werden im Rahmen der Sicherheitsstrategie im Folgenden eine Reihe von Zielsetzungen und technischen Maßnahmen definiert. Ein Teil der Zielsetzungen und technischen Maßnahmen folgt dabei direkt aus den Sicherheitsanforderungen und ist somit unabhängig vom Projekt CHRISTA-II und dem hier betrachteten Wirtsgestein. Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle entsprechend den im Projekt CHRISTA-II betrachteten Endlagerkonzepten im Kristallingestein erfolgt

- im *modifizierten KBS-3 Konzept* primär durch die Behälter sowie, nach deren eventuellen Versagen, die zumindest geringfügige Behinderung des Schadstofftransports durch chemische und physikalische Prozesse (Rückhaltung) innerhalb des den Behälter umgebenden Buffers. Dem kristallinen Wirtsgestein wird in diesem Konzept keine Barrierefunktion zugeordnet und trägt deshalb nicht direkt zum Einschluss bei. Gleichwohl kommt dem Wirtsgestein aber eine Schutzfunktion dergestalt zu, dass Einwirkungen auf das Endlager von der Erdoberfläche aus minimiert werden.
- im *multiplen ewG-Konzept* sowohl durch die Behinderung des Schadstofftransports durch chemische und physikalische Prozesse (Rückhaltung) innerhalb der einzelnen ewG als auch durch die Behälter und das geotechnische Verschlussystem. In diesem Konzept stellen diese verschiedenartigen Barrieren prinzipiell ein diversitär redundantes Barriensystem dar (Jobmann & Burlaka 2021). Nach einem eventuellen Behälterversagen wird

die Rückhaltung durch die entsprechenden Eigenschaften des Kristallingesteins innerhalb der einzelnen ewG im Verbund mit den jeweils darin angeordneten geotechnischen Barrieren gewährleistet.

- im *überlagernden ewG-Konzept* durch die Behinderung des Schadstofftransports durch chemische und physikalische Prozesse (Rückhaltung) innerhalb des überlagernden ewG und nicht durch das kristalline Wirtsgestein selbst. Die laterale Ausdehnung des überlagernden ewG soll gewährleisten, dass im Nachweiszeitraum keine unzulässig große Menge an Radionukliden aus dem Bereich unterhalb des ewG ausgetragen wird. Bei einem entsprechenden Nachweis sind die hydrogeologischen Bedingungen im Wirtsgestein und in den ggf. zwischen Wirtsgestein und ewG vorhandenen Gesteinen sowie die Eigenschaften der Grubenbaue zu berücksichtigen. Die Mächtigkeit des überlagernden Barrieresteins soll gewährleisten, dass im Nachweiszeitraum keine unzulässige Menge von Radionukliden durch die Barriereformation transportiert wird. Die Rückhaltung wird durch die entsprechenden Eigenschaften der überlagernden Sedimente, die als ewG fungieren, im Verbund mit den darin angeordneten geotechnischen Barrieren gewährleistet. Hier spielen also die geotechnischen Barrieren, die die Tageszugänge (Rampen und/oder Schächte) abdichten, eine wichtige Rolle.

Darüber hinaus wird vorgeschlagen, dass für alle drei Optionen folgenden übergeordneten verfahrenstechnischen Zielsetzungen sowie planerischen Festlegungen gleichermaßen gelten sollen, die auf Ausführungen der Endlagerkommission beruhen (Endlagerkommission 2016, Kapitel 6.3) und in Bezug stehen zum §20 „Überwachung des Endlagers“ der EndlSiAnfV.

Verfahrenstechnische Zielsetzungen

- Die Betriebsdauer eines Endlagers wird mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Es ist davon auszugehen, dass in diesem Zeitraum Erkenntniszuwachs entsteht. Dieser soll nutzbringend in die Sicherheitsbewertung eingebracht werden.
- Um eine Korrektur möglicher Fehler zu gewährleisten, soll nach Abschluss der Einlagerung im ersten Einlagerungsbereich durch eine verantwortliche Kommission (z. B. bestehend aus Vorhabenträger, Aufsichtsbehörde und ggf. Stakeholder) entschieden werden, ob eine Wartephase installiert wird, innerhalb derer die Entwicklung im ersten Einlagerungsbereich z. B. durch Monitoring-Systeme beobachtet werden soll. Die Ergebnisse aus der Beobachtungsphase können dann genutzt werden, um mögliche Verbesserungsoptionen speziell im Hinblick auf die Langzeitsicherheit für die Einlagerung und den Verschluss des nächstfolgenden Einlagerungsbereiches zu erarbeiten.
- Ebenfalls im Zusammenhang mit der Möglichkeit einer Fehlerkorrektur soll nach Abschluss der Einlagerung in sämtlichen Einlagerungsbereichen durch eine verantwortliche Kommission (z. B. aus Vorhabenträger, Aufsichtsbehörde, Stakeholder und ggf. der Regierung) entschieden werden, ob eine Wartephase vor dem endgültigen Verschluss des Endlagers und damit auch der Tageszugänge installiert wird. Innerhalb dieser Phase kann die Entwicklung des Endlagers z. B. durch Monitoring-Systeme weiter beobachtet werden.

Festlegungen hinsichtlich der verfahrenstechnischen Zielsetzungen

- Im Zusammenhang mit der Möglichkeit einer Fehlerkorrektur sollen Monitoring-Konzepte entwickelt werden, die in der Lage sind, geeignete Informationen über die Entwicklung des Endlagers bzw. einzelner ewG bereitzustellen (Jobmann 2019). Dies gilt insbesondere für das geotechnische Barrierensystem. Die Ergebnisse eines Monitorings können bei Bedarf genutzt werden, um zu entscheiden, ob einzelne ewG verschlossen, oder ob

längere Beobachtungsphasen eingerichtet werden, bevor das Endlagerprogramm und damit die Einlagerung fortgesetzt wird. In ähnlicher Weise könnten die Ergebnisse genutzt werden, zu entscheiden, ob, und wenn ja wann, das Endlager final verschlossen werden soll.

- Das Monitoring-Konzept wird nicht als ein losgelöstes externes Konzept angesehen, sondern als inhärenter Bestandteil des Sicherheitskonzeptes. Hintergrund ist, dass der Implementierung von Monitoring-Systemen immer eine Bewertung hinsichtlich einer möglichen Beeinträchtigung sicherheitsrelevanter Eigenschaften der Barrieren durch das Monitoring-System vorausgehen muss.

Die spezifischen Zielsetzungen und planerischen Festlegungen für die drei unterschiedlichen Optionen sind in den folgenden Abschnitten explizit beschrieben.

2.2.1 Multipler ewG

Bei dem multiplen ewG ist der ewG Teil des Wirtsgesteins. Daher muss das Wirtsgestein bzw. Teile des Wirtsgesteins die Anforderungen des StandAG und der Sicherheitsanforderungen an den ewG erfüllen, und gleichzeitig die Errichtung eines Endlagerbergwerks ermöglichen. Das Konzept des multiplen ewG stellt eine Variation zu dem bisherigen ewG-Konzept der Sicherheitsanforderungen dar, das vorwiegend auf Tongestein und Steinsalz als Wirtsgestein ausgerichtet war. Nach diesem Konzept wird der Einschluss der Radionuklide durch kristalline Gesteinsbereiche, die Klüfte mit nur sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit enthalten, in Kombination mit technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet. In diesen kristallinen Gesteinsbereichen werden einzelne Einlagerungsbereiche für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle angelegt. Sie müssen von ausreichender Größe sein, um auch das geotechnische Verschlussystem innerhalb des ewG aufnehmen zu können. Das für den multiplen ewG angenommene/vorgesehene Endlagerkonzept basiert auf Einlagerung von Endlagergebinden in kurzen vertikalen Bohrlöchern (Bertrams et al. 2017, Jobmann & Burlaka 2021).

2.2.1.1 Sicherheitstechnische Zielsetzungen

Für die Nachverschlussphase werden gemäß der Sicherheitsstrategie folgende konkrete Zielsetzungen verfolgt:

Für Komponenten und Prozesse innerhalb der ewG

- Die innerhalb der einzelnen ewG einzulagernden Behälter sollen über den gesamten Nachweiszeitraum ihre Einschlussfunktion behalten. Ihre Hülle muss dementsprechend ausreichend korrosionsresistent sein. Außerdem werden die Behälter in geeigneter Weise vor auslegungsüberschreitenden mechanischen Einwirkungen, die aus eventuellen Gebirgsbewegungen resultieren, geschützt.
- Entsprechend der Sicherheitsanforderungen sollen für eine eventuelle Bergung die eingelagerten Abfallgebinde mindestens 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers handhabbar sein und den Einschluss von radioaktiven Aerosolen gewährleisten.
- Die sowohl gemäß dem Abfallmengengerüst als auch der anhand der Integritätskriterien bedingten Auslegung des Endlagers einzulagernde Menge an Endlagergebinden wird auf eine gemäß Standorterkundung geeignete Anzahl von Einlagerungsbereichen und damit ewG am ausgewählten Standort aufgeteilt. Diese Aufteilung stellt sicher, dass eine Einlagerung nur in Bereichen erfolgt, die die Bedingungen für einen ewG erfüllen können. Die

einzelnen ausgewiesenen ewG bleiben im Nachweiszeitraum erhalten und ihre Barrierenfunktion wird weder durch interne, vor allem thermo-hydro-mechanische Effekte, noch durch externe Ereignisse und Prozesse beeinträchtigt. Gemäß der Mindestanforderung 5 im StandAG müssen die einzelnen ewG am ausgewählten Standort eine integrale Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen, die kleiner als 10^{-10} m/s ist.

- Durch die Errichtung der einzelnen Einlagerungsbereiche wird das Wirtsgestein innerhalb der ewG partiell gestört und die positive Eigenschaft seiner geringen Permeabilität lokal nachteilig verändert. Die aufgefahrenen Strecken innerhalb der einzelnen ewG stellen potentielle Wegsamkeiten dar und werden durch Verfüllungen und Verschlussbauwerke abgedichtet. Im Rahmen des Verschlusskonzeptes sollen den Verschlussbauwerken und ihren einzelnen Komponenten explizit Sicherheitsfunktionen zugewiesen werden. Damit die Bauwerke diese Sicherheitsfunktionen erfüllen können, müssen an sie bestimmte Leistungsanforderungen gestellt werden. Diese Leistungsanforderungen werden im Rahmen der Entwicklung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes für jede einzelne Komponente unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit definiert (Jobmann & Burlaka 2021).
- Die Verschlussbauwerke werden so konzipiert, dass sie so weit wie möglich redundant und diversitär aufgebaut sind und dass sie ihre Funktion im Zusammenspiel vom Zeitpunkt ihrer Errichtung über den gesamten Nachweiszeitraum (1 Mio. Jahre) erfüllen können. Durch diese Konzeption wird insbesondere der Tatsache Rechnung getragen, dass unerkannte Behälterdefekte existieren könnten, die zu einer Freisetzung von Radionukliden führen können. Diese Radionuklide sollen durch ein wirksames geotechnisches Barrierensystem in ihrer Ausbreitung behindert werden.
- Das Verschlusskonzept soll neben Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in den Strecken auch Verschlussbauwerke für die einzelnen Einlagerungsbohrlöcher beinhalten. Für alle Verschlussbauwerke sowie für deren Funktionselemente sollen Sicherheitsfunktionen und Leistungsziele definiert und entsprechende Designanforderungen spezifiziert werden. Diese Bohrlochverschlüsse sollen einerseits einen Lösungszutritt zu den Behältern, und damit deren Korrosion, verzögern. Andererseits soll, im Fall einer Freisetzung von Radionukliden aus den Behältern, eine advektive Fluidmigration aus dem Bohrloch heraus ausreichend behindert werden. Außerdem sollen die Bohrlochverschlüsse aus einem Material bestehen, dass Rückhalteeigenschaften gegenüber Radionukliden aufweist.
- Diese geotechnischen Barrieren werden so ausgelegt, dass sie im Zusammenspiel dafür sorgen, dass eine Radionuklidausbreitung durch Advektion im Bohrloch- und Streckensystem im Nachweiszeitraum so gering ist, dass auch allein entlang des Streckensystems, ohne Wechselwirkung mit dem Gebirge, Radionuklide den Rand des jeweiligen ewG nur in solchen Mengen erreichen, dass die Geringfügigkeit der Freisetzung nachgewiesen werden kann.
- Strecken und Einlagerungsbohrlöcher weisen je nach Art der bergmännischen Auffahrung eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Auflockerungszone (ALZ) auf. Da das kristalline Wirtsgestein keine inhärenten Selbstheilungseigenschaften hat, wie beispielsweise Tongestein oder Steinsalz, muss die ALZ über den gesamten Nachweiszeitraum in ihrer hydraulischen Wirksamkeit hinreichend minimiert werden, so dass die vorgegebenen Sicherheitsanforderungen eingehalten werden können.
- Der Transport ggf. mobilisierter Radionuklide innerhalb der ewG erfolgt im überwiegenden Maße durch Diffusion und nur in geringem Maße durch Advektion. Die Diffusionskoeffi-

zienten der Schadstoffe im Porenraum in den ewG sollen niedrige Werte aufweisen. Dabei behindert die geringe Permeabilität der Verschlussbauwerke und der Versatzmaterialien eine advektive Lösungsbewegung entlang der aufgefahrenen Hohlräume.

- Der Transport von Radionukliden innerhalb der einzelnen ewG wird durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert. Die Transportgeschwindigkeit von Radionukliden wird durch die geochemische Rückhaltung der Schadstoffe (Sorption) sowohl an der Oberfläche der Gesteinsmatrix des ewG als auch innerhalb der geotechnischen Verschlussbauwerke reduziert. Eine weitere Verringerung des Schadstoffstroms ergibt sich durch die für kristalline Gesteine typische Matrixdiffusion und durch die Grenzen der maximalen Lösungskonzentration (Löslichkeitsgrenzen) der meisten Schadstoffe im Porenwasser. Dadurch werden die Konzentrationsgradienten der Schadstoffe zwischen dem Einlagerungsort und der Umgebung geringgehalten und damit auch der diffusive Transport begrenzt.
- Eine Gasentwicklung innerhalb der ewG soll soweit begrenzt werden, dass die Funktion der Verschlussbauwerke weder durch die Gasströmung im Streckensystem noch durch die Gasdruckentwicklung beeinträchtigt wird.
- Die im Gestein zu erwartenden thermo-hydro-mechanisch induzierten Beanspruchungen dürfen die Bruchfestigkeit des Wirtsgesteins innerhalb der einzelnen ewG nicht in einer Weise überschreiten, die zu Rissbildung und damit zu einer erhöhten Migration von Lösungen in und aus diesem ewG führt. Eine Ausnahme bildet die aus der Auffahrung resultierende bereits geschädigte Auflockerungszone.
- Die Temperaturentwicklung in den einzelnen ewG soll in einer Weise begrenzt werden, dass die Barrierefunktion der ewG und der dort enthaltenen geotechnischen Barrieren entsprechend den Sicherheitsanforderungen nicht unzulässig beeinflusst wird.
- Mikrobielle Prozesse, speziell in den Einlagerungsbohrlöchern, sollen so weit wie möglich beschränkt werden. Mikrobielle Metallkorrosion durch Lochfraß kann den Rückhol- oder Bergungsprozess gefährden.

Für Komponenten und Prozesse außerhalb der ewG

- Die Strömungsvorgänge im Grubengebäude außerhalb der ewG werden ebenfalls durch Verfüll- und Verschlussmaßnahmen begrenzt. Verschlusselemente in den Tageszugängen (Schächte und/oder Rampen) haben die Aufgabe, das Eindringen oberflächennaher Wässer, die eventuell eine andere hydro-chemische Zusammensetzung haben als die Lösungen im Einlagerungshorizont, soweit wie möglich zu reduzieren. Eine analoge Aufgabe haben Verschlüsse von signifikant wasserführenden Klüften, die im Streckensystem außerhalb der ewG angefahren wurden. Durch diese Verschlussmaßnahmen soll über einen möglichst langen Zeitraum ein stabiles hydro-chemisches Milieu innerhalb der ewG erhalten bleiben. Die übrigen Verfüllmaßnahmen sollen eine Minimierung der Strömungsprozesse innerhalb der Verbindungsstrecken und damit eine Erosion der Baustoffe der geotechnischen Barrieren minimieren.
- Die Anzahl der Tageszugänge zu dem gesamten Endlager in Form von Schächten oder Rampen wird so weit wie möglich beschränkt. Der Anschluss der einzelnen ewG untereinander wird vorzugsweise durch verbindende Strecken zu benachbarten ewG realisiert. Diese Maßnahmen reduzieren die bergtechnisch bedingten Websamkeiten für Radionuklide zur Biosphäre.

2.2.1.2 Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen

Zur Erreichung der oben genannten Zielsetzungen werden entsprechende planerische Festlegungen in Bezug auf die sicherheitstechnischen Zielsetzungen getroffen. Dabei werden verschiedene technische Maßnahmen vorgesehen, die nachfolgend beschrieben sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen gemäß der Sicherheitsstrategie zu erreichen.

- Die einzelnen Einlagerungsbereiche des Endlagerbergwerks werden in Bereichen eines Kristallingesteins angeordnet, die nicht mit großräumigen, hydraulisch wirksamen Störungs- der Kluftzonen durchzogen sind. Diese bilden allenfalls eine Begrenzung eines ewG. Das bedeutet, dass sich jeder einzelne Einlagerungsbereich in einem eigenen, lokalen, ewG befindet.
- Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks, insbesondere der Einlagerungsbereiche, wird so klein wie möglich gehalten. Zwischen den Einlagerungsbohrlöchern wird ein Mindestabstand eingehalten, der die Einhaltung der Integritätskriterien nachweislich gewährleistet.
- Die Auffahrung erfolgt, dort wo es möglich ist, unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das anstehende Kristallingestein und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert.
- Das geotechnische Barrierensystem innerhalb der einzelnen ewG besteht zum einen aus dem Endlagerbehälter und zum anderen aus dem Verschlussystem, das sich aus dem Bohrlochverschluss, dem Streckenversatz und dem Streckenverschluss zusammensetzt. Damit die in dem Verfüll- und Verschlusskonzept zu definierenden Leistungsziele für die einzelnen Barrierekomponenten erreicht werden können, sollen die dafür notwendigen Konstruktionsanforderungen unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit bereits im Verschlusskonzept definiert werden.
- Barrieren- und Behälterbaustoffe werden unter Berücksichtigung des zu erwartenden Grundwasserchemismus ausgewählt, um die chemisch-mineralogische Langzeitstabilität zu gewährleisten.
- Die Behälter werden in einer Weise konzipiert, gebaut und beladen, die sicherstellt, dass die Unterkritikalität im Nachweiszeitraum immer gewährleistet ist.
- Das Einlagerungskonzept wird hinsichtlich der eingesetzten Materialien und technischen Komponenten der gestalt optimiert, dass durch die Bildung von Gasen keine Fließdrücke entstehen, die kein Versagen der Behälter und weder eine Integritätsverletzung der Verschlussbauwerke noch des Wirtsgesteins hervorrufen.
- Um mikrobielle Korrosionsprozesse soweit wie möglich zu limitieren, sollen speziell in der Nähe der Behälteroberfläche lebensfeindliche Umgebungsbedingungen für Mikroben geschaffen werden.
- Die Verschlussbauwerke werden Komponenten aus quellfähigen Materialien enthalten, um einen gebirgsschlüssigen Verbund zu realisieren, so dass Umläufigkeiten minimiert werden. Um Rissbildungen zu vermeiden, soll der gemäß Auslegung zu erwartende Quelldruck dieser Elemente das Minimalspannungskriterium bezogen auf das Wirtsgestein nicht verletzen.
- Im Zuge der Errichtung des Endlagers ist es nicht ausgeschlossen, dass mehr oder weniger stark wasserführende Störungen und Klüfte – außerhalb der einzelnen ewG – durchörtert werden. Beim Verschluss des Endlagers werden diese Bereiche beidseitig

innerhalb der entsprechenden Strecke abgedichtet. Damit wird ein nur sehr begrenzter Zufluss in die Strecke und damit in den Versatz erreicht. Das Strömungssystem in der Strecke ist dadurch so limitiert, dass die Verschlussbauwerke nicht durch Erosion geschädigt werden.

- Im Bereich der Schächte und / oder Rampen werden Maßnahmen implementiert, die dazu dienen sollen, das Risiko eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager zu reduzieren.

2.2.2 Überlagernder ewG

Bei dem überlagernden ewG ist das Wirtsgestein, in dem das Endlagerbergwerk errichtet wird, hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein Bestandteil des ewG (vgl. Abb. 2.3 rechts). Der überlagernde ewG wird durch eine großräumige weitgehend horizontale Überdeckung des Wirtsgesteins gebildet werden. Deckgebirgsgesteine mit sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit (wie z. B. Salze und Tone) können diesen ewG bilden. Das für den überlagernden ewG angenommenen/vorgesehene Endlagerkonzept basiert auf Einlagerung der Endlagergebinde in horizontalen Strecken (Bertrams et al. 2017).

2.2.2.1 Sicherheitstechnische Zielsetzungen

Für die Nachverschlussphase werden mit dem Sicherheitskonzept folgende konkrete Zielsetzungen verfolgt:

- Der sichere Einschluss der Radionuklide wird durch den Einlagerungsbereich überlagernde Gesteinsformationen mit sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit in Kombination mit geotechnischen Barrieren gewährleistet. Gebirgsbereiche dieser Formationen bilden den ewG. Die Eigenschaften des ewG müssen gewährleisten, dass im Bewertungszeitraum keine hinsichtlich ihrer Radiotoxizität unzulässig große Menge an Radionukliden durch den ewG transportiert wird. Gemäß der Mindestanforderung 5 im Standortauswahlgesetz (StandAG 2017) ist davon auszugehen, dass die den ewG bildenden Gesteinsbereiche am ausgewählten Standort eine mittlere Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen, die kleiner als 10^{-10} m/s ist.
- Das Barrieregestein, das den ewG beinhaltet, bleibt im Bewertungszeitraum erhalten. Seine Barrierenfunktion wird weder durch Endlager induzierte, vor allem thermo-hydro-mechanische Effekte, noch durch externe Ereignisse und Prozesse unzulässig beeinträchtigt.
- Der Transport der Radionuklide innerhalb des ewG wird durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert. Für den Großteil der Radionuklide wird die Transportgeschwindigkeit durch die geochemische Rückhaltung der Schadstoffe (Sorption) an der Oberfläche der Gesteinsmatrix reduziert. Eine weitere Verringerung des Schadstoffstroms ergibt sich durch die Grenzen der maximalen Lösungskonzentration (Löslichkeitsgrenzen) der meisten Schadstoffe im Porenwasser. Dadurch werden die Konzentrationsgradienten der Schadstoffe im ewG-Bereich geringgehalten und damit auch der diffusive Transport begrenzt.
- Die zu erwartenden thermo-mechanischen Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeit des ewG bildenden Gesteins nicht in einer Weise überschreiten, dass dies zu einer Rissbildung damit zu einer nachteiligen Erhöhung der Durchlässigkeit des ewG führt. Eine Ausnahme bildet die aus der Auffahrung resultierende Auflockerungszone.

- Endlager-induzierte hydraulische Beanspruchungen dürfen die Fluide druckbelastbarkeit des ewG nicht in einer Weise überschreiten, die zu einer nachteiligen Erhöhung der Durchlässigkeit des ewG führt.
- Die Endlager-induzierte Temperaturentwicklung innerhalb des ewG wird in einer Weise begrenzt, dass die Barrierewirkung des ewG nicht unzulässig beeinflusst wird.
- Durch die Errichtung des Endlagerbergwerkes unterhalb der den ewG bildenden Formationen müssen diese bergmännisch durchörtert werden. Dies geschieht entweder durch den Bau von Schächten oder Rampen oder einer Kombination aus beiden. Bedingt durch diese Durchörterungen werden die den ewG aufbauenden Formationen partiell gestört und deren geringe Permeabilität lokal nachteilig verändert. Diese Durchörterungen werden durch Verschlussbauwerke verschlossen. Diesen Verschlussbauwerken und speziell deren einzelnen Komponenten sollen explizit Sicherheitsfunktionen zugewiesen werden (Jobmann & Burlaka 2021), deren Einhaltung im Rahmen des Bewertungskonzeptes geprüft werden kann.
- Die Verschlussbauwerke werden so konzipiert, dass sie soweit wie möglich redundant und diversitär aufgebaut sind und dass sie ihre Funktion vom Zeitpunkt ihrer Errichtung über den gesamten Bewertungszeitraum (1 Mio. Jahre) erfüllen können. Durch diese Zielsetzung wird der Tatsache Rechnung getragen, dass unerkannte Behälterdefekte vorhanden sein könnten, die zu einer Freisetzung von Radionukliden führen können. Solch kontaminierte Fluide müssen durch ein geotechnisches Barrierensystem innerhalb der ewG-Durchörterungen an einer Ausbreitung in die Schichten oberhalb des ewG gehindert werden.
- Die Verschlussbauwerke sollen, ggf. im Zusammenspiel, dafür sorgen, dass eine advektive Radionuklidausbreitung in den Durchörterungen des ewG im Bewertungszeitraum so gering wie möglich ist.
- Die notwendigen Durchörterungen weisen je nach Art der bergmännischen Auffahrung eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Auflockerungszone auf. Die den ewG aufbauenden Ton- oder Salzgesteinformationen weisen eine hohe Selbstabdichtungskapazität auf. Klüfte oder Risse werden durch die Selbstabdichtung wieder so weit verschlossen, dass die geringe Permeabilität des ewG nicht dauerhaft signifikant erhöht wird.
- Die Anzahl der Tageszugänge zu dem Endlagerbergwerk in Form von Schächten und / oder Rampen wird auf ein für die Betriebssicherheit notwendiges Mindestmaß beschränkt. Diese Maßnahme minimiert durchgehende Wegsamkeiten innerhalb des ewG und somit potenzielle Wegsamkeiten für Radionuklide zur Biosphäre.
- Das kristalline Wirtsgestein stellt in der Option des überlagernden ewG zwar keine geologische Barriere im Sinne der Sicherheitsbewertung dar, trotzdem sollen, insbesondere die Einlagerungsbereiche, in Gesteinsbereichen positioniert werden, die nicht von großräumigen hydraulisch wirksamen Störungs- und Kluftzonen durchzogen sind. Dies trägt dazu bei, eine schnelle Ausbreitung freigesetzter Radionuklide unterhalb des ewG zu minimieren.
- Entsprechend der Sicherheitsanforderungen sollen für eine eventuelle Bergung die eingelagerten Abfallgebinde mindestens 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers handhabbar sein und den Einschluss von radioaktiven Aerosolen gewährleisten.

2.2.2.2 Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen

Zur Erreichung der oben genannten Zielsetzungen werden entsprechende planerische Festlegungen in Bezug auf die sicherheitstechnischen Zielsetzungen getroffen. Dabei werden verschiedene technische Maßnahmen vorgesehen, die nachfolgend beschrieben sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen gemäß der Sicherheitsstrategie zu erreichen. Das Endlagerbergwerk wird unterhalb der den ewG aufbauenden Gesteine im kristallinen Wirtsgestein errichtet. Die Auslegung des Endlagers, insbesondere der Einlagerungsbereiche, erfolgt unter Beachtung der oben genannten Zielsetzungen.

- Im Zuge der Auslegung wird ggf. ein vertikaler Mindestabstand der Einlagerungsbereiche zur Unterkante des ewG festgelegt. Die "Packungsdichte" der Behälter und damit auch die Abstände der einzelnen Einlagerungsstrecken werden unter diesen Randbedingungen minimiert. Dadurch wird auch das aufzufahrende Hohlraumvolumen des gesamten Endlagerbergwerks anforderungsgemäß so klein wie möglich gehalten.
- Die Auffahrung der Tageszugänge in Form von Schächten oder Rampen, die die ewG-bildenden Gesteine durchörtern, erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf die den ewG aufbauenden Gesteine und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert.
- Die Verschlussbauwerke in den Schächten und Rampen innerhalb des überlagernden ewG werden durch Abdichtbauwerke verschlossen, denen dezidierte Sicherheitsfunktionen zugeordnet wurden. Damit diese Verschlussbauwerke ihre Sicherheitsfunktionen erfüllen können, müssen für sie bestimmte Leistungsziele definiert werden. Diese Leistungsziele sollen im Rahmen der Entwicklung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes für jede einzelne Komponente unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit definiert werden. Damit wiederum diese Leistungsziele erreicht werden können, sollen die dafür notwendigen Konstruktionsanforderungen unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit ebenfalls im Verschlusskonzept definiert werden.
- Die Verschlussbauwerke in den Schächten und Rampen innerhalb des überlagernden ewG bestehen prinzipiell aus zwei unterschiedlichen Typen von Verschlussbauwerken. Einerseits ist dies eine Kurzzeitdichtung, die von Beginn an für eine befristete Zeit den Verschluss sicherstellt. Andererseits aus einer Langzeitdichtung aus arteigenem Material (Ausbruchsmaterial/Bentonit für Tongestein, Salzgrus bei Steinsalz), deren Abdichtwirkung sich erst durch Aufsättigung, bzw. Kompaktion mit der Zeit einstellt. Die Verschlussbauwerke der Kurzzeitdichtung müssen solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand der Langzeitdichtung groß genug ist, um eine Lösungsbewegung zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass die Sicherheitsanforderungen erfüllt sind. Bei der Auslegung der Verschlussbauwerke sollen Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Funktionsdauer abdecken, zu Grunde gelegt werden.
- Die offenen Hohlräume in den Strecken der Einlagerungsbereiche werden so verfüllt, dass möglichst schnell ein Kraftschluss zum Gebirge hergestellt wird, so dass eine mögliche Vergrößerung der Auflockerungszone verhindert wird. Gleichzeitig soll das Versatzmaterial bis zum Ende des Bewertungszeitraums durch eine geringe Permeabilität den advektiven Schadstofftransport entlang der Strecken behindern.
- Barrieren- und Behälterbaustoffe werden unter Berücksichtigung des zu erwartenden Grundwasserchemismus ausgewählt, um Korrosionsprozesse zu minimieren.

- Um mikrobielle Korrosionsprozesse zu limitieren, sollen speziell in der Nähe der Behälteroberfläche zumindest zeitlich begrenzt lebensfeindliche Umgebungsbedingungen für Mikroben geschaffen werden. Die zeitliche Begrenzung bezieht sich in erster Linie auf die geforderte Bergbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren.
- Das Einlagerungskonzept wird hinsichtlich der eingesetzten Materialien und technischen Komponenten dergestalt optimiert, dass eine Bildung von Gasen durch Korrosion der Behälter und/oder anderer technischer Komponenten soweit begrenzt wird, dass keine Fluideindrücke entstehen, die eine Integritätsverletzung der Verschlussbauwerke oder des ewG hervorrufen. Dies wird im Zuge der Integritätsanalysen geprüft.
- Die Verschlussbauwerke innerhalb des ewG werden Komponenten aus quellfähigem Material enthalten, um einen gebirgsschlüssigen Verbund zu realisieren, so dass Umläufigkeiten verhindert werden. Um Rissbildungen zu vermeiden, soll der gemäß Auslegung zu erwartende Quelldruck dieser Elemente das Minimalspannungskriterium bezogen auf den ewG nicht verletzen.

2.2.3 Modifiziertes KBS-3 Konzept

Bei dem modifizierten KBS-3-Konzept wird dem Wirtsgestein, in dem das Endlagerbergwerk errichtet wird, hinsichtlich des Einschlusses keine Barrierefunktion zugewiesen. Bei diesem Konzept dient das Wirtsgestein in erster Linie dem Schutz des Behälters und des zugehörigen Buffers, die den Einschluss sicherstellen müssen, der Bereitstellung eines stabilen Grubengebäudes und der Erschwerung eines späteren menschlichen Eindringens (Human Intrusion) und damit einer erschwerten Erreichbarkeit. Das für das modifizierte KBS-3-Konzept angenommene/vorgesehene Endlagerkonzept basiert auf der Einlagerung von Endlagergebinden in kurzen vertikalen Bohrlöchern (Bertrams et al. 2017, Jobmann & Burlaka 2021).

2.2.3.1 Sicherheitstechnische Zielsetzungen

Für die Nachverschlussphase werden mit gemäß der Sicherheitsstrategie folgende konkrete Zielsetzungen verfolgt:

- Der sichere Einschluss der Radionuklide wird durch die Behälter gewährleistet. Dementsprechend muss er die Sicherheitsfunktion des Einschlusses der Radionuklide für eine Million Jahre erfüllen.
- Um diese Sicherheitsfunktion zu erfüllen, werden den Behältern die Leistungsanforderungen zugeschrieben, dass sie zum einen lösungs- und gasdicht sein müssen und zum anderen ausreichend korrosionsresistent im Zusammenhang mit dem im Einlagerungsbereich zu erwartenden hydrochemischen Milieu.
- Die Einschlussfunktion der Behälter soll während des Bewertungszeitraums erhalten bleiben und ihre Barrierefunktion wird weder durch Endlager-induzierte, vor allem thermo-hydro-mechanische Effekte, noch durch externe Ereignisse und Prozesse beeinträchtigt.
- Um die Behälter zu schützen, werden sie mit einem Buffer aus kompaktiertem quellfähigem Material vollständig umschlossen. Auf Grund seiner Eigenschaften liefert er eine mechanische, hydraulische, chemische und biologische Schutzfunktion für den Behälter. Außerdem hat der Buffer Rückhalteigenschaften für Radionuklide, so dass er im Fall eines Behälterdefektes Radionuklide noch eine Zeit lang zurückhalten kann, bevor sie freigesetzt werden.
 - Die mechanische Schutzfunktion bezieht sich auf im Bewertungszeitraum nicht gänzlich auszuschließende Gebirgsbewegungen

- Die hydraulische Schutzfunktion bezieht sich auf die Minimierung der Flüssigkeitsbewegung zu und von den Behältern zur Reduzierung korrosiver Prozesse
- Die chemische Schutzfunktion bezieht sich auf die Stabilisierung des hydrochemischen Milieus
- Die biologische Schutzfunktion bezieht sich auf die Minimierung des Lebensraumes für Mikroben durch hohe Kompaktion des Materials.

Diese Schutzfunktionen bleiben im Nachweiszeitraum weitestgehend erhalten. Zugehörige Leistungs- und Konstruktionsanforderungen sind im Verfüll- und Verschlusskonzept definiert.

- Mikrobielle Prozesse, speziell in den Einlagerungsbohrlöchern, sollen so weit wie möglich beschränkt werden. Im modifizierten KBS-3-Konzept ist dies von besonderer Bedeutung, da dem Behälter die wesentliche Einschlussfunktion zukommt. Mikrobiell beeinflusste Metallkorrosion durch Lochfraß kann den sicheren Einschluss beeinträchtigen.
- Ein advektiver Lösungstransport sowohl in den Bohrlochüberfahrungsstrecken als auch in den Zugangsstrecken soll durch eine entsprechende Verfüllung der Strecken behindert werden. Durch diese Maßnahme kann ein Zutritt von Lösungen anderer hydrochemischer Zusammensetzung behindert werden. Außerdem kann die Verfüllung im Fall einer Freisetzung von Radionukliden aus den Behältern zur Rückhaltung der Radionuklide beitragen.

2.2.3.2 Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen

Zur Erreichung der oben genannten Zielsetzungen werden entsprechende planerische Festlegungen in Bezug auf die sicherheitstechnischen Zielsetzungen getroffen. Dabei werden verschiedene technische Maßnahmen vorgesehen, die nachfolgend beschrieben sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen gemäß der Sicherheitsstrategie zu erreichen. Die planerischen Festlegungen betreffen vor allem die Errichtung des Endlagerbergwerks.

- Um die Sicherheitsfunktion zu erfüllen, werden den Behältern die Leistungsanforderungen zugeschrieben, dass sie zum einen lösungs- und gasdicht sein müssen und zum anderen ausreichend korrosionsresistent im Zusammenhang mit dem im Einlagerungsbereich zu erwartenden hydrochemischen Milieu.
- Das kristalline Wirtsgestein stellt in dieser Option zwar keine geologische Barriere im Sinne der Sicherheitsbewertung dar, trotzdem sollen, insbesondere die Einlagerungsbereiche, in Gebirgsbereichen positioniert werden, die nicht von großräumigen hydraulisch wirksamen Störungs- und Kluftzonen durchzogen sind.
- Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks wird so klein wie möglich gehalten. Die Abstände der einzelnen Einlagerungsbohrlöcher werden im Zuge der Auslegung minimiert.
- Die Auffahrung erfolgt, dort wo es möglich ist, unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das anstehende Kristallingestein insgesamt minimiert. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Platzverhältnisse der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine nicht möglich oder sinnvoll ist, so dass ein gebirgsschonendes Bohr- und Sprengverfahren zum Einsatz kommen soll.
- Die Einlagerungsbohrlöcher werden so positioniert, dass keine signifikant hydraulisch wirksamen Klüfte angeschlossen werden, um lokale Erosionen des Buffers zu vermeiden. Die Position der Einlagerungsbohrungen sollte anhand von Positionierungskriterien erfolgen, die eine Bewertung der lokalen Kluftsituation beinhaltet. In diesem Zusammenhang

sei auf das „Rock Suitability Classification“ System (RSC) der Posiva in Finnland hingewiesen, die ein solches Klassifizierungssystem u. a. für solche Zwecke entwickelt haben (McEwen 2012). Eine Zusammenfassende Darstellung in deutscher Sprache ist in Jobmann et al. (2016) gegeben. Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der Kurzbezeichnung SUSE wird derzeit seitens BGE TECHNOLOGY geprüft, ob, und wenn ja, inwieweit ein solches Klassifizierungssystem auf deutsche Verhältnisse angepasst werden könnte.

- Das Buffermaterial wird in vorkompakter Form eingebaut. Dabei wird die Einbaudichte so eingestellt, dass ein ausreichender Quelldruck entsteht, der einen Kraftschluss zwischen Behälter und Gebirge herstellt. Gleichzeitig wird durch die Quellung eine geringere hydraulische Durchlässigkeit erreicht, die eine nur sehr langsame Flüssigkeitsbewegung zulässt, was einer geringen Korrosionsrate zuträglich ist.
- Um mikrobiell verstärkte Korrosionsprozesse zu minimieren, sollen innerhalb des Buffers, speziell in der Nähe der Behälteroberfläche, sowohl der mögliche Lebensraum für Mikroben durch Kompaktion limitiert als auch generell so weit wie möglich lebensfeindliche Umgebungsbedingungen für Mikroben geschaffen werden. Eine Abschätzung hinsichtlich der bestmöglichen Minimierung der mikrobiellen Aktivität im Buffer bzw. in der Behälterumgebung ist in Meleshyn (2016) Kapitel 5.4.2.5 gegeben.
- Die Wärmeabgabe der Behälter wird durch entsprechende Beladung und Abkühlzeiten soweit limitiert, dass eine Beeinträchtigung des Buffers, speziell seiner Schutzfunktion für den Behälter, weitestgehend vermieden wird und das Kriterium aus den Sicherheitsanforderungen erfüllt ist.
- Im Zuge der Errichtung des Endlagers ist es nicht ausgeschlossen, dass mehr oder weniger stark wasserführende Störungen und Klüfte durchörtert werden. Bei Verschluss des Endlagers werden diese Bereiche beidseitig innerhalb der entsprechenden Strecke abgedichtet. Entsprechende Verschlussmodule werden im Rahmen des Verfüll- und Verschlusskonzeptes beschrieben. Damit wird ein nur sehr begrenzter Zufluss in die Strecke und damit in den Versatz erreicht. Das Strömungssystem in der Strecke ist dadurch so limitiert, dass eine signifikante Erosion des Versatzes vermieden werden kann.

3 Konzeptionelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung

Im Folgenden wird dargestellt, auf Basis welcher Struktur die Sicherheitsbewertung für die drei im Kapitel 2.2.3 beschriebenen Endlageroptionen durchgeführt werden kann. Für die beiden Optionen mit ewG (multipler ewG und überlagernder ewG) ist die Struktur identisch. Anders sieht es bei der Option des modifizierten KBS3-Konzeptes aus. Hier ist die Struktur etwas vereinfacht.

Die Struktur zur sicherheitlichen Bewertung der Optionen „modifiziertes KBS3 Konzept“ ist in Abb. 3.1, die der Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ in Abb. 3.2 dargestellt. In beiden Fällen teil sich die Bewertungsstruktur prinzipiell in drei Teile auf. Es sind dies

- die Grundlagenmodule,
- die Bindeglied-Module und
- die Analysemodule

Das übergeordnete Modul umfasst die Sicherheitsstrategie, deren Inhalte im vorangegangenen Kapitel beschrieben sind. In der Sicherheitsstrategie werden neben den Zielsetzungen auch planerische Festlegungen und technische Maßnahmen in allgemeiner Form angesprochen, die dann in den darunterliegenden Modulen des Bewertungskonzeptes im Detail entwickelt und beschrieben werden.

Angebunden an die Sicherheitsstrategie lassen sich auf der Ebene der Grundlagen zunächst drei Module angeben, die annähernd parallel bearbeitet werden können. Dabei handelt es sich um die Quantifizierung von Integritätskriterien zur rechnerischen Bewertung, um die geologische Standortbeschreibung und das Behälterkonzept. Ist geklärt, mit welchen Behältertypen die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen, kann darauf abgestimmt ein Einlagerungskonzept erstellt werden. Auf Basis der geologischen Standortbeschreibung wird daraufhin ein geologisches Modell entwickelt, das alle wesentlichen geologischen Formationen abbildet, die für die spätere Umsetzung in ein numerisches Modell benötigt werden. In direktem Anschluss erfolgt eine Datenermittlung mit dem Ziel, für die im Modell ausgehaltenen Formationen alle notwendigen thermo-hydro-mechanischen Kenngrößen zu ermitteln, um rechnerische Analysen durchführen zu können.

Im Falle der Option „multipler ewG“ kann mit Vorliegen des geologischen Modells und der darin abgebildeten Kluftstruktur und des Einlagerungskonzeptes die Größe, Lage und Anzahl der notwendigen ewG-Zellen innerhalb des geologischen Modells ermittelt werden. Aus diesen Informationen ergibt sich das Design des Endlagers als Ganzes. Den Abschluss auf der Grundlagenebene bilden die geologische Langzeitprognose und das Verfüll- und Verschlusskonzept, das die Art der Versiegelung der Bohrlöcher, Strecken und Tageszugängen darstellt und erläutert.

Liegen alle Grundlagenmodule vor, müssen die sogenannten Bindegliedermodule entwickelt werden, die zur Aufgabe haben, im Rahmen der Szenarienentwicklung die erwartete und die abweichende Entwicklung des Endlagers zu erarbeiten und zu beschreiben. Wesentliche Grundlage dafür ist ein FEP-Katalog, der standortspezifisch zu erstellen ist. Die abgeleiteten Endlagerentwicklungen bilden die Grundlage für die dann folgende Systemanalyse.

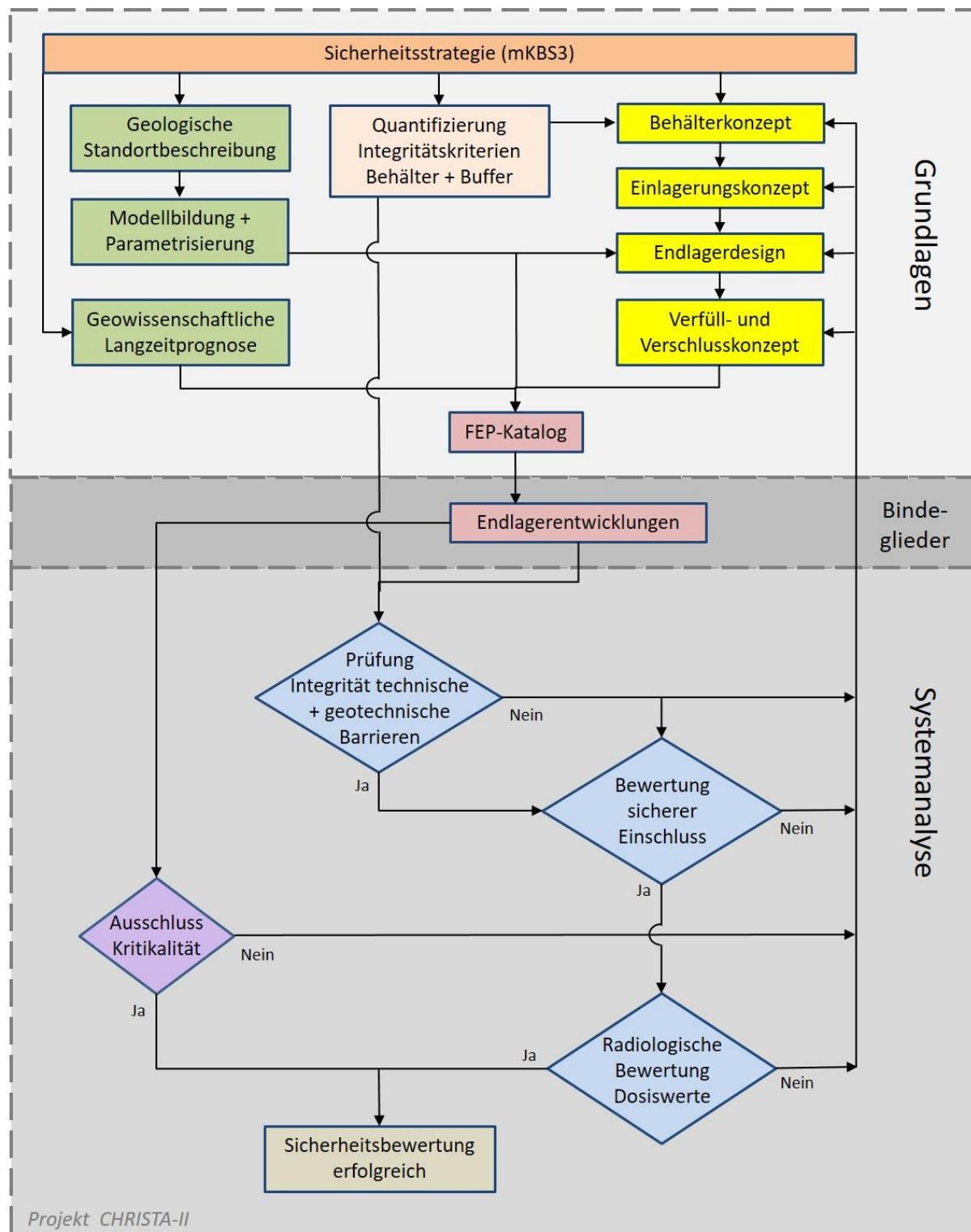


Abb. 3.1: Struktur zur sicherheitlichen Bewertung der Option „modifiziertes KBS3 Konzept“

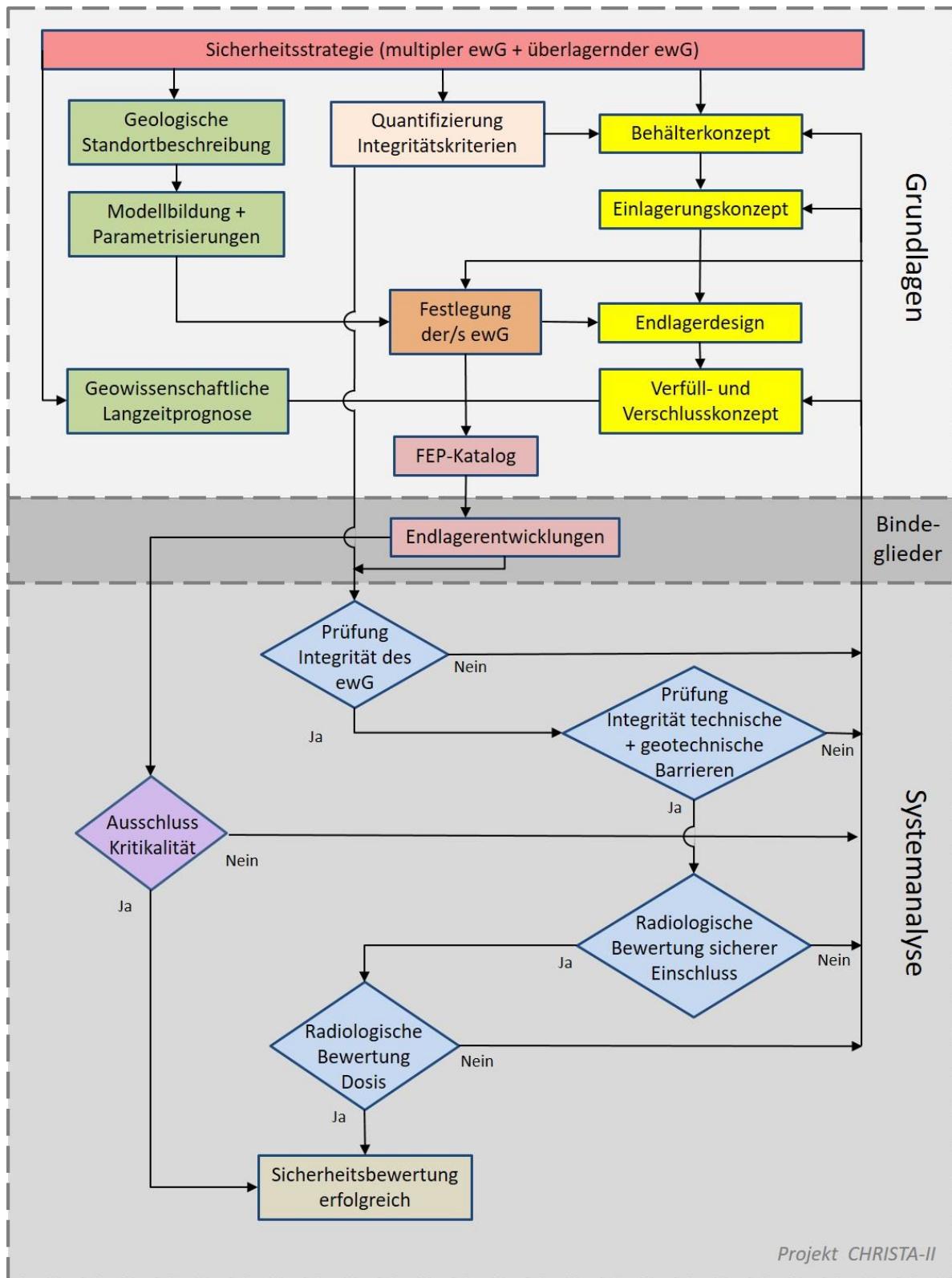


Abb. 3.2: Struktur zur sicherheitlichen Bewertung der Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“

Die Informationen, die die Grundlagen- und die Bindegliedermodule bereitstellen, können dann genutzt werden, um die Einwirkungen auf das Barrierensystem zu spezifizieren. Mit Kenntnis der Einwirkungen können die notwendigen Widerstandseigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren festgelegt und die Integritätsanalysen durchgeführt werden.

Kann im Falle des „modifizierten KBS3 Konzeptes“ (Abb. 3.1) die Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren, also des Behälters und seines Buffers, für den Bewertungszeitraum nicht gezeigt werden, so müssen entweder das Behälterkonzept, das Einlagerungskonzept und/oder das Verschlusskonzept überdacht und geändert werden. Die Spezifizierung der Einwirkungen und die Integritätsanalysen sind entsprechend zu wiederholen. Kann die Integrität ggf. nach mehreren Iterationen gezeigt werden, kann die Sicherheitsbewertung bereits als erfolgreich angesehen werden. Eine Freisetzung aus den Behältern bzw. über den Rand des Buffers hinaus ist dann nicht zu erwarten, jedenfalls nicht für die erwartete Endlagerentwicklung. Für die abweichende Endlagerentwicklung wird unterstellt, dass die Integrität der technischen und geotechnischen Barriere nicht oder nicht vollständig gezeigt werden kann. Eine Freisetzung aus einer bestimmten Anzahl von Behältern ist somit zu berücksichtigen. Im Rahmen der radiologischen Analysen ist demzufolge die Einhaltung der Geringfügigkeit des Massenaustrags zu prüfen sowie die Einhaltung der Dosisgrenzwerte gemäß den Vorgaben der Sicherheitsanforderungen. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte kann ein Rücksprung und damit Anpassungen der Grundlagenmodule notwendig sein.

Im Falle der beiden ewG-Optionen (Abb. 3.2) ist parallel zur Integritätsprüfung der technischen und geotechnischen Barrieren die Integrität und damit der Erhalt der Einschlusswirksamkeit einzelner ewG-Zellen oder der überlagernden ewG-Formation anhand der quantifizierten Kriterien zu zeigen. Kann die Integrität nicht gezeigt werden, so ist zu prüfen, welche Anpassung der Grundlagenmodule nötig sind, damit die Integrität erhalten bleibt. Im Rahmen der radiologischen Analysen ist, unabhängig von den Integritätsprüfungen, die Einhaltung der Geringfügigkeit des Massenaustrags am Rand eines ewG zu prüfen sowie die Einhaltung der Dosisgrenzwerte gemäß den Sicherheitsanforderungen. Auch hierbei kann ein Rücksprung und damit Anpassungen der Grundlagenmodule notwendig sein. Kann abschließend auch der Ausschluss der Kritikalität im gesamten Grubengebäude gezeigt werden, so kann der Sicherheitsbewertung erfolgreich abgeschlossen werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Module aus der Struktur zur sicherheitlichen Bewertung näher erläutert.

3.1 Grundlagenmodule

Die Bewertungsstrukturen beinhalten neben der Sicherheitsstrategie (vgl. Kap. 2) sieben bzw. acht Grundlagenmodule (Abb. 3.2, Abb. 3.2), die im Folgenden beschrieben sind.

3.1.1 Geologische Standortbeschreibung

Dieses Modul wird gern auch als „Basismodul“ bezeichnet, in dem die grundsätzlichen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten am zu bewertenden Standort detailliert zusammengefasst werden. In diesem Modul wird der aktuelle Istzustand, vor allem bezüglich der Strukturgeologie und der (hydro-)geologischen Verhältnisse, am Standort bestmöglich und ausführlich beschrieben. Diese Standortbeschreibung umfasst auch das geographische und regionalgeologische Umfeld. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird dieses Modul nicht bearbeitet, da keine realen Standorte zu beschreiben sind. Für die folgende Modellbildung

werden generische Informationen, allerdings basierend auf realen Situationen in Deutschland, verwendet.

3.1.2 Modellbildung und Parametrisierung

Direkt gekoppelt an die geologische Standortbeschreibung ist die Entwicklung eines 3D-Modells der geologischen Situation im Untersuchungsgebiet. In dem Standortmodell müssen alle bekannten wichtigen geologischen Strukturen enthalten sein, die die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet widerspiegeln. In dem Standortmodell wird der Wirtsgesteinsbereich ausgewiesen, innerhalb derer das Endlager zu positionieren ist. In dem Zusammenhang ist auch die Lage der Tageszugänge zu spezifizieren. Basierend auf ihrer Lage sind stratigraphische und/oder lithologische Vertikalprofile zu erstellen, die benötigt werden, um angepasste geotechnische Verschlussbauwerke für die Tageszugänge zu entwickeln. Diese werden dann im Modul „Verfüll- und Verschlusskonzept“ detailliert erarbeitet und beschrieben.

Im Falle der beiden ewG-Optionen erfolgt eine Beschreibung des einschlussswirksamen Gebirgsbereiches, der im Falle der Option „multipler ewG“ (Mrugalla et al. 2020) aus einer definierten Anzahl einzelner ewG-Zellen besteht und im Falle der Option „überlagernder ewG“ (Weitkamp et al. 2021) aus einer ausgedehnten Formation aus Salz- oder Tongestein, die dem Wirtsgestein überlagert ist. Für die Option „modifiziertes KBS3 Konzept“ erfolgte im Rahmen des Projektes keine eigenständige Modellentwicklung. Hierfür wurde das geologische Modell des multiplen ewG angenommen, ohne Ausweisung von ewGs.

Grundsätzlich sollten die Modelle so gestaltet sein, dass sie die Basis für rechnerische Prüfungen zur Integrität des oder der ewG sowie Analysen zur Radionuklidmigration darstellen können. Das bedeutet, dass bereits bei der Erstellung eines Modells ggf. geeignete Vereinfachungen zu entwickeln sind, die eine handhabbare Überführung des geologischen Modells in ein numerisches Modell ermöglichen ohne wesentliche Faktoren zu vernachlässigen.

Die Durchführung rechnerischer Prüfungen erfordert Kenntnisse über die thermo-hydro-mechanischen Eigenschaften der geologischen Einheiten, so dass die im Standortmodell ausgewiesenen Modelleinheiten mit geeigneten Gesteins- bzw. Modellparametern belegt werden können. Dies gilt insbesondere für die Wirtsgesteinsformation bzw. für den oder die ewG. Aus diesem Grund enthält das Modul auch die Erstellung einer geowissenschaftlichen Datenbasis.

Im Rahmen dieser Datenbasis werden zunächst alle verfügbaren Eigenschaftsinformationen zu den im Modell ausgehaltenen geologischen Einheiten im Detail zusammengetragen und dokumentiert. Zu den geologischen Einheiten gehören explizit auch Störungen und Klüfte, die in kristallinen Wirtsgesteinen eine wichtige Rolle hinsichtlich des hydraulischen und mechanischen Verhaltens spielen. Ist dies erfolgt, wird im Anschluss eine Auswertung der Daten derart vorgenommen, dass die ausgewiesenen Einheiten des 3D-Modells mit geeigneten Parametern belegt werden können. Dieser Prozess gibt erste klare Hinweise über die Qualität des verfügbaren Datenmaterials und erlaubt eine Ausweisung von Kenntnislücken, die im Rahmen weiterer Standorterkundungen zu schließen sind.

3.1.3 Behälterkonzept

Parallel zu den Arbeiten zur Standortbeschreibung und Erstellung des geologischen Modells muss ein Behälterkonzept erarbeitet werden. In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle ist

der Endlagerbehälter einer Vielzahl von mechanischen, thermischen, radiologischen, biologischen und physikalisch-chemischen Randbedingungen ausgesetzt, die kurz- mittel- und/oder langfristig auf ihn einwirken. Je nach Sicherheitskonzept bzw. der Einlagerungsoption im Wirtsgestein Kristallin muss der Behälter für diese Randbedingungen bis zu einem gewissen Zeitpunkt, längstens bis zum Ende des Bewertungszeitraumes von 1 Millionen Jahren, ausgelegt sein. Die generischen Behälterkonzepte für die drei betrachteten Einlagerungsoptionen wurden aus einem früheren Projekt übernommen und sind in Bertrams et al. (2017) sowie in Kurzform im Bericht zum Verfüll- und Verschlusskonzept beschrieben (Jobmann & Burlaka 2021).

3.1.4 Einlagerungskonzept

Angepasst an das jeweilige Behälterkonzept wird für jede der drei Optionen ein Einlagerungskonzept entwickelt. Das Einlagerungskonzept beschreibt, in welcher Form und ggf. unter welchen Strahlenschutzbedingungen die Endlagergebinde in das Wirtsgestein eingelagert werden. Grundsätzlich lassen sich drei verschiedenen Formen unterscheiden: die vertikale Bohrlochlagerung, die horizontale Bohrlochlagerung und die Streckenlagerung. Zunächst muss demnach beschrieben und begründet werden, welche dieser drei Formen gewählt wird. Für die Option des modifizierten KBS3 Konzeptes wird analog dem skandinavischen Konzept je Einlagerungsbohrloch ein Gebinde umgeben von einem Buffer eingelagert. Bei der Option des multiplen ewG wird das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung verfolgt, wobei in diesem generischen Konzept vorgesehen ist, in jedem Bohrloch drei Gebinde übereinander einzulagern. Grundsätzlich muss je nach räumlicher Situation bzw. geometrischer Kluftkonfiguration geprüft werden, welche Anzahl an Gebinden pro Einlagerungsbohrloch und damit welche Tiefe der Einlagerungsbohrungen günstig wäre. Bei der Option des überlagernden ewG wird in diesem Projekt das Konzept der Streckenlagerung verfolgt. Für jede Option ist zu beschreiben, wie die Behälter in die Einlagerungsbohrlöcher bzw. in den Einlagerungsstrecken eingebracht bzw. abgelegt werden.

3.1.5 Festlegung ewG (Option multipler ewG und überlagernder ewG)

Als wesentliches Modul, speziell im Hinblick auf die Prüfung zur Integrität der geologischen Barriere und der radiologischen Analyse ist die Festlegung des ewG durchzuführen. In den Sicherheitsanforderungen ist gefordert, dass vom Antragsteller Lage und Abmessungen des einschlusswirksame Gebirgsbereichs zu definieren ist (EndSiAnfV 2020, §11(1)1a). Die räumliche Festlegung geschieht anhand des geologischen 3D-Modells sowie des Einlagerungskonzeptes und des Verfüll- und Verschlusskonzeptes.

Im Falle der Option „multipler ewG“ gilt es, anhand des geologischen Modells, Bereiche zu selektieren, die geeignet scheinen, eine ewG-Zelle aufzunehmen. Für das generische Modell, das im Rahmen dieses Projektes zur Illustration des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes erstellt wurde, wurde eine Referenz ewG-Zelle definiert (Jobmann & Burlaka 2021). Von diesem Referenz-ewG werden insgesamt 26 Stück benötigt, um alle nach gegenwärtigen Abfallmenngengerüst einzulagernden hochradioaktiven Abfälle im Endlager unterzubringen. Diese ewG-Zellen wurden in das Modell räumlich integriert (Mrugalla et al. 2020).

Im Falle der Option „überlagernder ewG“ besteht der ewG für das im Rahmen dieses Projektes entwickelten geologischen Modells aus einer ausgedehnten flachlagernden Salzformation, die das kristalline Wirtsgestein überdeckt (Weitkamp et al. 2021). Für diese Option wurde im Rahmen eines parallel laufenden Projektes ein zusammenhängendes Grubengebäude konzipiert (Becker et al. 2020). Dieses Grubengebäude wird innerhalb des kristallinen Wirtsgesteins unterhalb der Barriereförderung positioniert. Die Größe bzw. Ausdehnung des ewG wird anhand

des geologischen Modells definiert. Im Zuge der Berechnungen zur Systemanalyse muss dann unter anderem ermittelt werden, ob die Ausdehnung ausreicht, die Radionuklide von der Biosphäre innerhalb des Nachweiszeitraums fernzuhalten.

3.1.6 Quantifizierung der Integritätskriterien für einen ewG

Zum Nachweis der Integrität der geologischen Barriere bzw. des ewG ist es zunächst erforderlich, die in den Sicherheitsanforderungen qualitativ definierten Integritätskriterien soweit zu konkretisieren bzw. zu quantifizieren, dass ein rechnerischer Nachweis anhand konkreter Zahlenwerte im Rahmen der Integritätsprüfung erfolgen kann. Die Ableitung bzw. Quantifizierung der Integritätskriterien setzt eine ausreichende Kenntnis über die thermischen (T), mechanischen (M), hydraulischen (H), chemisch-mineralogischen (C) und biologischen (B) Eigenschaften der Wirtsgesteinsformation voraus. Dieses Modul ist eng verknüpft mit dem Modul Modellbildung + Parametrisierung im Rahmen dessen alle verfügbaren Eigenschaftsinformationen der zu berücksichtigenden geologischen Einheiten zusammengetragen werden. An dieser Stelle werden ggf. Kenntnislücken sichtbar, die im Rahmen weiterer Untersuchungen zu schließen sind. Im Rahmen des Projektes wurde die Ableitung der quantifizierten Kriterien in einem spezifischen Bericht dokumentiert (Jobmann et al. 2021). Auf Basis dieser quantifizierten Nachweiskriterien können dann die numerischen Simulationen zur Integritätsprüfung ausgewertet werden (Thiedau et al. 2021).

3.1.7 Quantifizierung der Integritätskriterien für die (geo-)technischen Barrieren

Die geotechnischen Barrieren dienen dem Verschluss der durchörterten Gebirgsbereiche. Die einzelnen Verschlussbauwerke müssen einen hinreichenden hydraulischen Widerstand zur Minimierung eines potenziellen Fluidtransports in das Endlager hinein bzw. aus diesem heraus aufweisen. In Anlehnung an den international anerkannten Stand der Technik geschieht die Integritätsbewertung unter Anwendung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte. Dieses semi-probabilistische, zuverlässigkeitsoorientierte Sicherheitsbewertungskonzept beruht auf dem Regelwerk der Eurocodes (JRC & DG-ENTR 2008). Für alle Komponenten der Verschlussbauwerke sind quantitative Kriterien zu definieren, anhand deren die strukturelle Integrität geprüft werden kann. Die Integritätsprüfung besteht aus verschiedenen Einzelprüfungen, deren Berechnungsvorschriften in Leon Vargas et al. (2021) beschrieben und erläutert sind.

3.1.8 Endlagerdesign

Das Endlagerdesign wird als technisches Grundlagenmodul entwickelt, das der verfügbaren Ausdehnung und Mächtigkeit sowie Tiefenlage und Eigenschaften der Wirtsgesteinsformation in geeigneter Weise Rechnung trägt. Neben den planerischen Festlegungen innerhalb der Sicherheitsstrategie (vgl. Kap. 2) sind auch die Integritätskriterien für das Wirtsgestein bzw. für den ewG Grundlagen für die Auslegung und damit für das Endlagerdesign. Im Falle der Option „multipler ewG“ ist das Design auch signifikant abhängig von der Größe und räumlichen Lage der einzelnen ewG im Wirtsgestein bzw. im geologischen Modell. Im Falle des „überlagernden ewG“ sollte das Endlager möglichst kompakt und zentral unterhalb der Barriereformation angeordnet sein, um die Isolationswirkung des ewG bestmöglich auszunutzen. Im Falle der Option „modifiziertes KBS3 Konzept“ ist das Endlagerdesign nur insofern von dem Wirtsgestein abhängig, als versucht werden sollte, die einzelnen Einlagerungsbohrlöcher jeweils in möglichst kluftarmen Gesteinsbereichen zu positionieren, um die Lösungszufuhr zum Behälter zu minimieren. In diesem Zusammenhang sei auf das „Rock Suitability Classification“ System (RSC) der Posiva in Finnland hingewiesen, die ein solches Klassifizierungssystem u. a. für solche Zwecke entwickelt haben (McEwen 2012). Eine Zusammenfassende Darstellung in

deutscher Sprache ist in Jobmann et al. (2016) gegeben. Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der Kurzbezeichnung SUSE wird derzeit seitens BGE TECHNOLOGY geprüft, ob, und wenn ja, inwieweit ein solches Klassifizierungssystem auf deutsche Verhältnisse angepasst werden könnte.

3.1.9 Verschlusskonzept

Einem Verschlusskonzept für die bergmännischen Zugänge kommt eine große Bedeutung zu, da selbst der bestmögliche Standort mit oder ohne einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereich(en) nur dann ein sicheres Endlager beherbergen kann, wenn es gelingt, die notwendigen Durchörterungen des ewG und des Wirtsgesteins nach Abschluss der Einlagerung sachgerecht zu verschließen. Daher ist unter Berücksichtigung der geologischen und insbesondere der strukturgeologischen Kluftsituation sowie des daran angepassten Einlagerungskonzeptes und Endlagerdesign als weiteres Grundlagenmodul ein Verfüll- und Verschlusskonzept zu entwickeln (Jobmann & Burlaka 2021). Das Konzept dient dazu, die untertägigen Grubenräume und speziell die Einlagerungsbereiche so zu verfüllen und zu versiegeln, dass weder über das Streckensystem mit den Tageszugängen noch über die zu erwartende Kluftnetzwerke, wenn überhaupt, dann nur eine geringfügige Freisetzung unterhalb der Grenzwerte zu erwarten ist.

Bei dem modifizierten KBS3 Konzept liegt der Schwerpunkt der Verschlussmaßnahmen auf dem Buffer und dem Bohrlochverschluss der einzelnen Einlagerungsbohrlöcher. Bei der Option multipler ewG verteilt sich die Verschlusslast auf drei Teile, den Bohrlochverschluss, den Streckenversatz und den Streckenverschluss am Rand der einzelnen ewG-Zellen. Und bei der Option überlagernder ewG müssen speziell die Verschlusselemente in den Tageszugängen (Schacht, Rampe) hohen Ansprüchen genügen, da die Tageszugänge den ewG durchörtern und diese Durchörterungen adäquat verschlossen werden müssen, damit im ewG keine potenziellen Transportpfade verbleiben.

3.1.10 Geowissenschaftliche Langzeitprognose

Eine wichtige Informationsgrundlage für die Bewertung der Langzeitsicherheit ist die Prognose der geologischen Entwicklung ohne den Einfluss eines Endlagers. Entsprechend den derzeit gültigen Anforderungen, ist die Sicherheitsbewertung für einen Zeitraum von einer Million Jahre zu erbringen, so dass neben der Beschreibung des momentanen Zustandes die zukünftige weitere Entwicklung der Standortregion im Rahmen einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose darzustellen ist.

Generell ist davon auszugehen, dass Veränderungen der Geosphäre im oberflächennahen Bereich der Standortregion, die durch kaltzeitliche Prozesse hervorgerufen werden, zu erwarten. Daran gekoppelt sind Erosions- oder Sedimentationsprozesse sowie eine Veränderung der Grundwasserströmung oder auch der hydrochemischen Verhältnisse. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose stellt eine wichtige Informationsgrundlage für die Beschreibung der geologischen Prozesse in der Szenarienentwicklung dar, die im Rahmen der Systemanalyse durchzuführen ist. Für die rein generischen Standorte erfolgte im Rahmen des Projektes kein Langzeitprognose.

3.1.11 FEP-Katalog

Die wesentliche Grundlage für eine Sicherheitsbewertung besteht darin, eine möglichst umfassende Systembeschreibung zu erstellen. Dies geschieht auf Basis eines lokationsspezifi-

schen FEP-Kataloges, in dem alle Komponenten und Prozesse beschrieben sind, die im Rahmen der Beschreibung und Entwicklung des Standortmodells zu berücksichtigen sind, inklusive einer Einschätzung der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit. Mit Ausnahme der Quantifizierung der Integritätskriterien gehen alle Inhalte der oben beschriebenen Grundlagenmodule in der Erstellung des FEP-Kataloges ein. Dieser Katalog enthält somit eine komplette Systembeschreibung.

Im Zuge des Projektes wurden FEP-Kataloge für alle drei Einlagerungsoptionen erstellt (Mrugalla et al. 2020b,c,d). Diese FEP-Kataloge enthalten zunächst die reine Beschreibung der Systemkomponenten und Prozesse, die in und um das jeweilige Endlager ablaufen. Eine Analyse der Wechselwirkungen der einzelnen FEP, die eine entscheidende Grundlage für eine Szenarienentwicklung darstellt, konnte im Zeitrahmen des Projektes nur für die Option „modifiziertes KBS3 Konzept“ erfolgen.

3.2 Bindegliedmodule

Voraussetzung für die Durchführung von Bewertungen zur Endlagersicherheit sind Vorstellungen zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems. Gemäß der EndlSiAnfV (2020) sind

„die für die Auslegung des Endlagers und die Bewertung der Langzeitsicherheit relevanten Entwicklungen des Endlagersystems und der geologischen Situation am Endlagerstandort innerhalb des Bewertungszeitraumes systematisch zu ermitteln, zu beschreiben und einzuordnen als

1. *zu erwartende Entwicklungen oder*
2. *abweichende Entwicklungen“*

Für die Bewertung des sicheren Einschlusses (§4), der Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren (§5, §6), der Dosisbelastung (§7) und des Ausschlusses sich selbst tragender Kettenreaktionen (§8) stellen diese beiden Entwicklungen die Prüfgrundlage dar.

Die Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems werden einerseits durch die natürlichen Einwirkungen (geologische und klimatische Entwicklungsmöglichkeiten) sowie andererseits durch die endlagerspezifischen Einwirkungen (von den eingelagerten Abfällen und der Auslegung und Konzeption des Endlagers) beeinflusst. Die globalen, regionalen und lokalen geologischen und klimatischen Abläufe in der Vergangenheit können auf der Basis umfangreicher, zumeist empirischer Daten beschrieben und belegt werden. Hieraus ergibt sich ein Verständnis des Zusammenhangs der langzeitlichen Prozesse und der sonstigen Einflussfaktoren, die die Entwicklung eines Standortes in der Vergangenheit bestimmt haben. Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems wird unterstellt, dass dieselben Prozesse und Einflussfaktoren wie in der Vergangenheit auch bei den zukünftigen geologischen und klimatischen Abläufen wirken (Aktualitätsprinzip). Als zusätzliche Einflussfaktoren kommen die Wirkungen hinzu, die durch die Errichtung des Endlagers und die Einlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund hervorgerufen werden.

Die tatsächliche Veränderung, die ein Standort über einen bestimmten Zeitraum durchlaufen wird, kann nur mit Ungewissheiten vorhergesagt werden. Der genaue Zeitpunkt, zu dem ein Ereignis bzw. Prozess eintreten wird, genauso wie seine tatsächliche Ausprägung, kann über lange Zeiträume hinweg nur abgeschätzt werden. Eine Eingrenzung der Entwicklungsmöglichkeiten aufgrund wissenschaftlicher Erkenntnisse und Prognosen ist dabei nur bis zu einem

gewissen Maß möglich. Daher wird es erforderlich, alle über den Bewertungszeitraum relevanten Entwicklungsmöglichkeiten an einem Standort mit der Hilfe einer systematischen Ableitung von Endlagerentwicklungen abzudecken.

Ausgangspunkte für die Ableitung von möglichen Endlagerentwicklungen stellen zum einen spezifische Annahmen und zum anderen der FEP-Katalog dar. Der FEP-Katalog beschreibt den Ausgangszustand des Endlagersystems und enthält alle an einem Standort relevanten Prozesse, ihre erwartete Ausprägung sowie eine Einschätzung zu ihrem Eintreten. Die Wahrscheinlichkeit einer Entwicklung hilft bei der Aufstellung von erwarteten Entwicklungen. Daneben werden auch abweichende Entwicklungen sowie Entwicklungen zur Belegung der Robustheit eines Endlagersystems berücksichtigt. Einander ähnliche Entwicklungen können für die Konsequenzbewertung zu abdeckenden Entwicklungen zusammengefasst werden.

Die Ableitung von Endlagerentwicklungen für einen generischen Standort im Kristallin auf Grundlage der im Rahmen von CHRISTA-II aufgestellten FEP-Kataloge wurde im Projekt nicht realisiert.

3.3 Systemanalyse-Module

Nachdem alle Grundlagenmodule erarbeitet sind und auch die Bindegliedermodule vorliegen, kann mit der Systemanalyse bzw. mit der eigentlichen Sicherheitsbewertung begonnen werden. Die Konzeptstruktur bei dem modifizierten KBS3 Konzept und den beiden ewG-Optionen unterscheidet sich in erster Linie dadurch, dass die Prüfung der Integrität des ewG bei dem modifizierten KBS3 Konzept entfällt und der Prüfung der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren eine vorrangige Bedeutung zukommt.

3.3.1 Prüfung der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren

Zur Prüfung und Bewertung der Integrität der geotechnischen Barrieren wird ein Verfahren vorgeschlagen, das in früheren Forschungsprojekten seitens BGE TECHNOLOGY GmbH entwickelt und angewendet wurde (Müller-Hoeppe et al. 2012). Ziel ist es, für die jeweiligen Verschlussmodule die Einhaltung der Sicherheits- oder Schutzfunktionen entsprechend den gestellten Anforderungen an die jeweilige Barriere deren Funktionsfähigkeit ingenieurtechnisch nachzuweisen. Grundlegende Informationen zu den die Barriere belastenden Prozessen können dem oben beschriebenen standortspezifischen FEP-Katalog und der darauf basierenden Szenarienentwicklung, also der erwarteten und abweichenden Entwicklung, entnommen werden. Schlägt der ingenieurtechnische Nachweis fehl, so kann das Verschlusskonzept überarbeitet oder das Behälter- oder Einlagerungskonzept geändert werden. Diese Prüfschleife ist so lange zu durchlaufen, bis die Integrität der Verschlussbauwerke und all ihrer Komponenten für ihren jeweiligen Funktionszeitraum gezeigt werden kann. Zur Prüfung und Bewertung der Integrität der technischen Barrieren, also der Behälter, wird ein ähnliches Verfahren vorgeschlagen allerdings mit anderen materialspezifischen Kriterien und Berechnungsverfahren (Leon Vargas et al. 2021).

Ist eine Verletzung der Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren im jeweiligen Funktionszeitraum nicht ausgeschlossen, ist über die radiologische Konsequenzanalyse, also über die Prüfung des sicheren Einschlusses und der Einhaltung der Dosisgrenzwerte zu bewerten, ob die Sicherheit gemäß der Anforderungsverordnung trotzdem gewährleistet werden kann.

3.3.2 Prüfung der Integrität der geologischen Barriere

Die Prüfung und Bewertung der Integrität der geologischen Barriere erfolgt gemäß §5 der Anforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020). Demnach ist für die zu erwartenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum die Integrität des oder der ewG zu prüfen und darzustellen und seine Robustheit zu begründen.

Im Falle der Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ erfolgt die Prüfung auf Basis numerischer Berechnungen im groß- und kleinskaligen Maßstab unter konservativen bzw. abdeckenden Bedingungen für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre (Thiedau et al. 2021). Die Bewertung der Berechnungsergebnisse wird unter Anwendung der oben erwähnten quantifizierten Integritätskriterien durchgeführt. Zeigt die Bewertung, dass die Integrität des oder der ewG zweifelhaft ist, ist also mindestens eines der Integritätskriterien nicht erfüllt, so ist, ggf. in mehreren Schleifen, zu prüfen, ob nach Änderungen entweder des Behälterkonzeptes, des Einlagerungskonzeptes und infolge davon ggf. eine neue Festlegung des oder der ewG im Rahmen der geologischen Möglichkeiten eine positive Bewertung erbracht werden kann. Ist eine Verletzung der Integrität der geologischen Barriere im Bewertungszeitraum nicht ausgeschlossen, kann kein sicherer Einschluss durch die Barrierewirkung des ewG gewährleistet werden.

3.3.3 Prüfung des sicheren Einschlusses

Die Prüfung des sicheren Einschlusses erfolgt gemäß §4 der Anforderungsverordnung. Demnach muss der sichere Einschluss innerhalb der wesentlichen Barrieren so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben.

Im Falle der Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ wird bewertet, ob die Geringfügigkeit der Freisetzung über den Rand des oder der ewG gemäß den vorgegebenen Grenzwerten erfüllt ist. Die Prüfung erfolgt auf Basis numerischer Ausbreitungsberechnungen unter konservativen bzw. abdeckenden Bedingungen für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre (Wolf et al. 2021). Im Rahmen dieser radiologischen Analyse kann der Fall eintreten, dass trotz einer positiven Bewertung der Integrität des ewG und der Integrität der Verschlussbauwerke die Geringfügigkeit der Freisetzung gemäß den Kriterien am Rand der oder des ewG nicht gezeigt werden kann. In so einem Fall ist zu prüfen, welche Anforderungen an das Einlagerungskonzept oder an das Verschlusskonzept zu stellen sind, damit die Geringfügigkeit der Freisetzung gezeigt werden kann. Können die Anforderungen erfüllt werden, so sind sie entsprechend umzusetzen und die Prüfung erneut durchzuführen. Auch hier kann, analog zur Integritätsbewertung, alternativ oder in Ergänzung geprüft werden, ob durch eine geeignete Wahl der oder des ewG im Rahmen der geologischen Möglichkeiten eine positive Bewertung erzielt werden kann.

Im Falle der Option „modifiziertes KBS3 Konzept“ ist eine Prüfung bzgl. der Geringfügigkeit der Freisetzung nach §4 nur für die abweichende Endlagerentwicklung zu prüfen. Im Rahmen der erwarteten Endlagerentwicklung wird unterstellt, dass die Integrität der Behälter gewährleistet ist. In diesem Fall kommt es nicht zu einer Freisetzung im Bewertungszeitraum. Im Rahmen der abweichenden Endlagerentwicklung wird der Ausfall der Behälter hinsichtlich Anzahl und Zeitpunkt quantifiziert. Auf dieser Basis werden numerischer Ausbreitungsberechnungen für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren durchgeführt und eine Bewertung des sicheren Einschlusses vorgenommen.

3.3.4 Prüfung der Dosiswerte

Die Prüfung der Einhaltung der Dosisgrenzwerte erfolgt gemäß §7 der Anforderungsverordnung. Demnach ist zu prüfen und darzustellen, dass Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind.

Im Falle der Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ wird bewertet, ob die Geringfügigkeit der Freisetzung über den Rand des oder der ewG gemäß den vorgegebenen Grenzwerten erfüllt ist. Die Prüfung erfolgt auf Basis numerischer Ausbreitungsberechnungen unter konservativen bzw. abdeckenden Bedingungen für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre (Wolf et al. 2021). Im Rahmen dieser radiologischen Analyse kann der Fall eintreten, dass trotz einer positiven Bewertung der Integrität des ewG und der Integrität der Verschlussbauwerke die Geringfügigkeit der Freisetzung in Bezug auf die Dosisgrenzwerte am Rand der oder des ewG nicht gezeigt werden kann. In so einem Fall ist zu prüfen, welche Anforderungen an das Einlagerungskonzept oder an das Verschlusskonzept zu stellen sind, damit die Geringfügigkeit bzw. die Einhaltung der Dosisgrenzwerte gezeigt werden kann. Können die Anforderungen erfüllt werden, so sind sie entsprechend umzusetzen und die Prüfung erneut durchzuführen. Auch hier kann, analog zur Integritätsbewertung, alternativ oder in Ergänzung geprüft werden, ob durch eine geeignete Wahl der oder des ewG im Rahmen der geologischen Möglichkeiten eine positive Bewertung erzielt werden kann.

Im Falle der Option „modifiziertes KBS3 Konzept“ ist eine Prüfung bzgl. der Geringfügigkeit bzw. der Einhaltung der Grenzwerte nach §7 nur für die abweichende Endlagerentwicklung zu prüfen. Im Rahmen der erwarteten Endlagerentwicklung wird unterstellt, dass die Integrität der Behälter gewährleistet ist. In diesem Fall kommt es nicht zu einer Freisetzung im Bewertungszeitraum. Im Rahmen der abweichenden Endlagerentwicklung wird der Ausfall der Behälter hinsichtlich Anzahl und Zeitpunkt quantifiziert. Auf dieser Basis werden numerische Ausbreitungsberechnungen für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre durchgeführt und eine Bewertung zur Einhaltung der Dosisgrenzwerte vorgenommen.

3.3.5 Ausschluss Kritikalität

Als letztes ist noch die Prüfung zum Ausschluss einer Kritikalität durchzuführen. Dies geschieht gemäß §8 der Anforderungsverordnung. Demnach ist zu prüfen und darzustellen, dass sich selbst tragende Kettenreaktionen während des Betriebes und der Stilllegung des Endlagers sowie für die zu erwartenden und die abweichenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum ausgeschlossen sind.

In einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle befindet sich spaltbares Material aus den direkt endgelagerten ausgedienten Brennelementen. Es muss ausgeschlossen werden, dass sich dieses Material in einer kritischen Anordnung sammelt. Dies gilt sowohl für den Bereich innerhalb der Behälter als auch für das gesamte Grubengebäude nach Ausfall eines oder mehrerer Behälter und Migration der Radionuklide. Eine Kritikalität kann nur auftreten, wenn eine genügend große Menge an spaltbarem Material in Gegenwart einer ausreichenden Menge von Wasser, oder einem anderen Moderator, vorhanden ist.

Die Prüfung erfolgt bei allen Einlagerungsoptionen auf Basis numerischer Ausbreitungsberechnungen für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre. Es wird geprüft und bewertet, ob eine Akkumulation innerhalb des Grubengebäudes auftreten kann. Im Rahmen des Projektes wurden zu diesem Thema keine Arbeiten durchgeführt.

4 Zusammenfassung

Für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlagerbergwerk im Kristallin-Gestein wurden drei mögliche Optionen definiert: Die Einlagerung in einem „multiplen ewG“, unter einem „überlagernden ewG“ sowie in einem „modifizierten KBS-3-Konzept“. Lediglich in der Option „multipler ewG“ wird von dem Einschlussvermögen des Kristallin-Gesteins Kredit genommen. Für alle drei Einlagerungsoptionen wurden spezifizierte Zielsetzungen für die Sicherheit in der Nachverschlussphase definiert. Darüber hinaus werden planerische Festlegungen getroffen, mit deren Hilfe die gesetzten Ziele erreicht werden können.

Sowohl in den Zielsetzungen als auch in den planerischen Festlegungen für die Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ spiegeln sich die Sicherheitsanforderungen wider. Wesentliche Forderungen in dem Zusammenhang sind:

- der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle,
- die Errichtung eines robusten geotechnischen Barrierensystems, das die notwendigen Durchhörterungen und Zugänge im Bergwerk sicher verschließt,
- die Prüfung der Integrität sowohl der geologischen als auch der geotechnischen Barrieren,
- die Bewertung der Geringfügigkeit des Massenaustrages von Radionukliden am Rand des oder der ewG und
- die Einhaltung der Dosisgrenzwerte für den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren sowie
- die Rückholbarkeit und die Bergbarkeit der Behälter bis zu einem Zeitraum von 500 Jahren.

Ergänzend dazu wird die Forderung des StandAG widergespiegelt, die auf die Transparenz des gesamten Verfahrens abzielt und besonderen Wert auf die Möglichkeit der Fehlerkorrektur legt. Ein mögliches Tool zu Erkennung möglicher Fehler ist ein transparentes Monitoringsystem. Im §12(4) der Anforderungsverordnung werden Optimierungen des Endlagersystems im Rahmen periodischer Sicherheitsüberprüfungen gefordert. Diese Prüfungen sollen auf Basis umfassender Sicherheitsuntersuchungen erfolgen. Aus den Ergebnissen sind mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit des Endlagers abzuleiten. Durch ein geeignetes Monitoring-Konzept, das gemäß §20 auch gefordert ist, lässt sich die Entwicklung spezifischer Endlagerkomponenten, wie beispielsweise wesentliche geotechnische Barrieren, verfolgen. Die Ergebnisse dieses Monitorings können grundlegende Informationen zu Verfügung stellen, sowohl für Entscheidungsprozesse im Endlagerverfahren als auch für das geforderte Update der Sicherheitsuntersuchungen. Die Entwicklung von Monitoring-Konzepten und die Überprüfung der Sicherheitsanalysen in regelmäßigm Abstand spiegeln sich in den verfahrenstechnischen Zielsetzungen und Festlegungen wider.

Die Punkte der Transparenz des Endlagerverfahrens, der Rückholbarkeit der Abfallbehälter und vor allem das schrittweise Vorgehen sind auch Aspekte, die in den internationalen Richtlinien der IAEA und der OECD/NEA als besonders wichtig angesehen werden (vgl. Kapitel 2.1). Die seitens der IAEA geforderte Erstellung eines 'Safety Case' beinhaltet explizit auch die Entwicklung eines geeigneten Verschlussystems für die untertägigen Einlagerungsbereiche und die Forderung dessen Wirksamkeit nachzuweisen bzw. zu demonstrieren. Dieser Forderung wird durch die genannten Festlegungen im Zusammenhang mit einem robusten geotechnischen Barrierensystem sowie den geplanten Integritätsanalysen explizit Rechnung getragen.

Die hier definierten Zielsetzungen und planerischen Festlegungen zur Sicherheit in der Nachbetriebsphase spiegeln auf breiter Ebene sowohl das deutsche Regelwerk als auch nationale wie internationale Richtlinien wider.

Im Hinblick auf die Systemanalyse wird dargestellt, auf Basis welcher Struktur die Sicherheitsbewertung für die drei betrachteten Einlagerungsoptionen durchgeführt werden kann. Sowohl für die Optionen mit als auch ohne ewG teilt sich die Bewertungsstruktur prinzipiell in drei Teile auf. Es sind dies die Grundlagenmodule, die Bindeglied-Module und die Analysemodule. Die Grundlagen bestehen prinzipiell aus zwei tragenden Säulen. Die erste Säule wird aus den Geologie-Modulen gebildet bestehend aus der geologischen Standortbeschreibung und deren Langzeitprognose sowie den geologischen Modellen. Die zweite Säule besteht aus den Modulen des Endlagerkonzeptes bestehend aus dem Behälterkonzept, dem Einlagerungskonzept, dem Endlagerdesign und dem Verschlusskonzept. Alle Informationen aus beiden Säulen münden in einem FEP-Katalog, der somit eine vollständige Systembeschreibung liefert.

Als sogenannte Bindegliedmodule fungieren die zu erwarteten und die abweichenden Entwicklung des Endlagers. Auf Basis dieser Endlagerentwicklungen kann anschließend im Zuge der Systemanalyse die Sicherheitsbewertung des Standortes auf Basis der vorgegebenen Kriterien erfolgen.

5 Literatur

- ABBergV (2009). Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung).
- AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- ATG (2010). Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz).
- BBergG (2021). Bundesberggesetz, zuletzt geändert durch Artikel 1 G. v. 14.06.2021.
- Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppen, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R. & Wolf, J. (2020). RESUS: Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Salzformation, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, GRS-575.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017). Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. FuE-Projekt KONEKD Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Endlagerkommission (2016). Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin.
- EndSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, 06.10.2020, Berlin.
- ESK (2015). Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsansätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), RSK/ESK-Geschäftsstelle beim BfS.
- IAEA (2011a). Disposal of Radioactive Waste. Disposal of Radioactive Waste(SSR-5). Vienna.
- IAEA (2011b). Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste(SSG-14). Vienna.
- IAEA (2012). The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste (SSG-23). Vienna.
- ICRP (2007). Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission, ICRP-Veröffentlichung 103, verabschiedet im März 2007, Veröffentlichungen der Internationalen Strahlenschutzkommission. Deutsche Ausgabe herausgegeben vom Bundesamt für Strahlenschutz.
- ICRP (2013). Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3).
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021). Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland, Technischer Bericht, BGETEC 2019-05, BGE TECHNOLOGY, Peine.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshy, A., Müller, C. & Thiedau, J. (2021). Quantifizierung von Integritätskriterien für Sicherheitsnachweise an Kristallinstandorten in Deutschland, Technischer Bericht, BGETEC 2019-04, BGR, GRS, BGE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.
- Jobmann, M. (2019). Monitoring von Endlagern für hochradioaktive Abfälle mit Blick auf die Langzeitsicherheit und im Kontext der Partizipation, Forschungsprojekt MONTANARA, Abschlussbericht, BGETEC 2019-02, BGE TECHNOLOGY, Peine.
- Jobmann, M., Becker, D., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppen, N., et al. (2016). Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA, Abschlussbericht, GRS, BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH, Braunschweig, Hannover, Peine.

- JRC & DG-ENTR (2008). The Eurocodes, B1, Implementation and Use, DG Enterprise and Industry, Joint Research Centre, European Commission.
- Leon Vargas, R. P., Jobmann, M. Seidel, D. & Wunderlich, A. (2021). Analysen zur Integrität technischer und geotechnischer Barrieren für Endlager in Kristallinstandorten in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht BGETEC 2021-XX, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- McEwen, T., Aro, S., Kosunen, P., Mattila, J., Pere, T., Käpyaho, A. & Hellä, P. (2012). Rock suitability classification - RSC 2012, Report POSIVA 2012-24, Posiva Oy, Eurajoki, ISBN 978-951-652-205-3.
- Meleshyn, A. (2016). Abschätzung hinsichtlich der bestmöglichen Minimierung der mikrobiellen Aktivität im Buffer bzw. in der Behälterumgebung, in: Jobmann et al. (2016). Spezifische Prozessanalysen, Projekt ANSICHT, Arbeitsbericht, TEC-13-2016-B, DBE TECHNOLOGY, GRS, BGE, Peine.
- MODERN2020 (2019). Project Synthesis Repository Monitoring: Strategies, Technologies and Implementation; Project: Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal. Synthesis Report, Europäische Union, Luxembourg.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Krumbholz, M., Sönnke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020a). CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagersysteme „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht, B3.3/B50112-56/2021-0001/002, 87 S., Hannover.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Noseck, U., Rübel, A., Stark, L., Weitkamp, A., Wolf, J. (2020b): CHRISTA-II, FEP-Katalog zur Einlagerungsoption „multipler ewG“, BGE TEC 2019-03, Peine.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Jobmann, M., Krumbholz, M., Lommerzheim, A., Mayer, K.-M., Meleshyn, A., Noseck, U., Rübel, A., Weitkamp, A., Wolf, J. (2020c): CHRISTA-II, FEP-Katalog zur Einlagerungsoption „modifiziertes KBS-3 Konzept“, BGE TEC 2020-23, Peine.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Noseck, U., Rübel, A., Weitkamp, A. & Wolf, J. (2020d): FEP-Katalog zur Einlagerungsoption „überlagernder ewG“, Forschungsprojekt CHRISTA-II. BGR, GRS, BGE Technology, Technischer Bericht, BGETEC 2020-22; Hannover, Braunschweig, Peine.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K. & Xie, M. (2012). Integrität geotechnischer Barrieren, Teil 1 Vorbemessung, Bericht zum Arbeitspaket 9.2, GRS-287, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Köln.
- NEA (2004). Post Closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose. Technical Report, OECD/NEA.
- NEA (2013). The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art, Symposium Proceedings, OECD/NEA, Paris.
- SKB (2010). Design and production of the KBS 3 repository, Technical Report, SKB, Stockholm.
- StandAG (2017). Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG), Deutscher Bundestag, Bonn.
- StrlSchV (2020). Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung).
- Thiedau, J., Maßmann, J., Guevara, C., Weihmann, S. & Alfarr, A. (2021). Analysen zur Integrität von geologischen Barrieren von Endlagersystemen im Kristallin, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Ergebnisbericht, BGR Hannover.
- Weitkamp, A., Frenzel, B., Krumbholz, M., Mrugalla, S. & Sönnke, J. (2021). CHRISTA-II – Beschreibung des generischen geologischen Models für das Endlagersystem „überlagernder ewG“, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht, Hannover.
- Wolf, J., Becker, D.-A., Flügge, J., Frank, T. & Johnen, M. (2021). Bewertung des sicheren Einschlusses von Radionukliden in Endlagersystemen im Kristallingestein. Ergebnisse aus dem Vorhaben CHRISTA-II, GRS-Bericht, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.

Abkürzungsverzeichnis

ABBergV	Allgemeine Bundesbergverordnung
AkEnd	Arbeitskreis Endlagerung
ALZ	Auflockerungszone
ATG	Atomgesetz
BBergG	Bundesberggesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt
CHRISTA	Kurzbezeichnung für das Forschungsprojekt: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland
ESK	Entsorgungskommission
ewB	Einschlusswirksamer Bereich
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
IAEA	International Atomic Energy Agency Internationale Atomenergiebehörde
ICRP	International Commission on Radiological Protection Internationale Strahlenschutzkommission
KBS-3	Kärnbränslesäkerhet, nuclear fuel Safety Kurzbezeichnung für das Einlagerungskonzept der SKB in Schweden
KONEKD	Kurzbezeichnung für das Forschungsprojekt: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente in Kristallingestein in Deutschland
OECD/NEA	OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung NEA: Nuclear Energy Agency Halb-autonome Institution innerhalb der OECD zur Förderung einer sicheren, umweltschonenden und wirtschaftlichen Nutzung der Kernenergie.
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SSG	Specific Safety Guide Spezifische Sicherheitsrichtlinien
SSR	Specific Safety Requirements Spezifische Sicherheitsanforderungen
StandAG	Standortauswahlgesetz
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB Schwedisches Entsorgungsunternehmen für radioaktive Abfälle
THM	Thermo-Hydro-Mechanisch

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine – Germany
T + 49 5171 43-1520
F + 49 5171 43-1506
info@bge-technology.de
www.bge-technology.de