

**Bewertung der
Abhängigkeiten
zwischen dem sicheren
Bau und Betrieb
eines Endlagers für
hochradioaktive
Abfälle und der
Langzeitsicherheit**

**Synthese der Ergebnisse
aus dem Vorhaben BASEL**

**Bewertung der
Abhängigkeiten
zwischen dem sicheren
Bau und Betrieb
eines Endlagers für
hochradioaktive
Abfälle und der
Langzeitsicherheit**

**Synthese der Ergebnisse
aus dem Vorhaben BASEL**

Jens Wolf (GRS)
Andree Lommerzheim (BGE TEC)
Niklas Bertrams (BGE TEC)
Dieter Buhmann (GRS)
Wolfgang Filbert (BGE TEC)
Bernd Förster (GRS)
Philipp Herold (BGE TEC)
Juliane Leonhard (BGE TEC)
Ulrich Noseck (GRS)
Sabine Prignitz (BGE TEC)

September 2020

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger Karlsruhe (PTKA) unter dem Förderkennzeichen 02E11486 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMWi übereinstimmen.

Deskriptoren

Betriebssicherheit, Einwirkungen, FEP, Langzeitsicherheit, radioaktive Abfälle, Safety Case, Sicherheitsanforderungen, Störfälle

Abstract

The interaction between the post-closure safety and the operational safety has become of vital importance for the safety assessment of geological disposal facilities. The numerous links between pre- and post-closure arguments of the safety case call for a methodology to analyse and document the relationships and to determine the conditions of the repository at the time of closure, which form the basis of the demonstration that the facility is safe over the long term. In the German R&D project BASEL the interactions between pre- and post-closure phase were analyzed by a FEP analysis. Therefore, a FEP catalogue for the operational phase was developed based on generic technical disposal concepts for repositories in clay, crystalline and salt rock. The FEP catalogue was then used to derive internal hazards for the operational phase and discuss appropriate potential prevention and mitigation measures and their influence on long-term safety.

The objectives of the R&D project BASEL were triggered by discussions from the international activities of BGE TECHNOLOGY and GRS in the Integration Group for the Safety Case and the Expert Group on Operational Safety of the OECD/NEA, as well as the GEOSAF project of the IAEA. For the past four years there has been an intensive exchange with these activities in the course of the BASEL project. Annex B provides a detailed English summary of the results, including a translation of the FEP and derived internal hazards, in order to make the results of the BASEL project available internationally.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorgehensweise	5
3	Internationale Aktivitäten	9
3.1	Aktivitäten bei der IAEA	12
3.2	Aktivitäten bei der OECD/NEA.....	13
4	Sicherheit beim Bau und Betrieb eines Endlagers.....	17
4.1	Rechtlicher Rahmen	17
4.2	Grundzüge eines Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase.....	19
5	Identifizierung der Anforderungen der Langzeitsicherheit an den Bau und Betrieb eines Endlagers	25
6	Identifizierung der Auswirkungen der Bau- und Betriebsphase auf die Langzeitsicherheit	33
6.1	Entwicklung eines FEP-Kataloges für die Betriebsphase	34
6.2	Ableitung von Einwirkungen von innen	39
6.2.1	Methodik.....	39
6.2.2	Ergebnisse.....	43
6.3	Maßnahmen zur Beherrschung von Einwirkungen von innen	46
6.4	Einfluss von Bau und Betrieb eines Endlagers auf die Langzeitsicherheit.....	47
7	Verwertung der Ergebnisse	57
	Literaturverzeichnis.....	61
	Abbildungsverzeichnis.....	67
	Tabellenverzeichnis.....	69

A	Anlage: Externe Faktoren, FEP und EVI für den Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle.....	71
B	Anlage: Extended Summary	81

1 Einleitung

Die sichere Entsorgung von hochradioaktiven¹ Abfällen in tiefen geologischen Formationen hat den dauerhaften Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle sowie die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen zum Ziel. Zum Nachweis der Zielerreichung ist ein Sicherheitsnachweis erforderlich, der die Prüfung und Bewertung von Daten, Maßnahmen, Analysen und Argumenten beinhaltet, die die Sicherheit des Endlagers aufzeigen.

Bei der Führung eines Sicherheitsnachweises für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle werden gemäß nationalen und internationalen Vorgaben und Empfehlungen mehrere Phasen ausgewiesen /BMU 10/, /BMU 20/², /IAEA 06/, /IAEA 11a/, /IAEA 12/, /ICRP 13/. Nach Standortauswahl und Errichtung des Endlagers beginnt die Betriebsphase mit der Einlagerung der Abfälle in das Endlager und endet mit dem endgültigen Verschluss der Schächte bzw. der Rampen und dem Rückbau der übertägigen Anlagen im Rahmen der Stilllegung (Abb. 1.1). Ziel ist die Herstellung eines wartungsfreien Zustandes, der die Langzeitsicherheit des Endlagers gewährleistet.

Für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen stellt die Möglichkeit, die Abfälle während der Betriebsphase rückzuholen oder nach Verschluss des Endlagers bergen zu können, eine Komponente des Sicherheitskonzeptes dar. Es erfolgte im Vorhaben BASEL keine detaillierte Betrachtung der betrieblichen Abläufe für eine Rückholung oder Bergung.

¹ Im Bericht wird für die ausgedienten Brennelemente und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle der Begriff „hochradioaktive Abfälle“ verwendet.

² Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung lag ein Entwurf der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. April 2020 vor. Dieser Entwurf wird in diesem Bericht auch berücksichtigt, aber größtenteils beziehen sich die Aussagen auf die Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010. Hinsichtlich der grundlegenden Vorgehensweise bei den Sicherheitsanalysen ergibt sich kein Unterschied zwischen den Verordnungen. Wichtige geänderte Anforderungen werden im Bericht erläutert. Der Bundestag hat am 16.09.2020 der Verordnung über die Anforderungen an die Sicherheit eines künftigen Endlagers für hochradioaktive Abfälle zugestimmt.

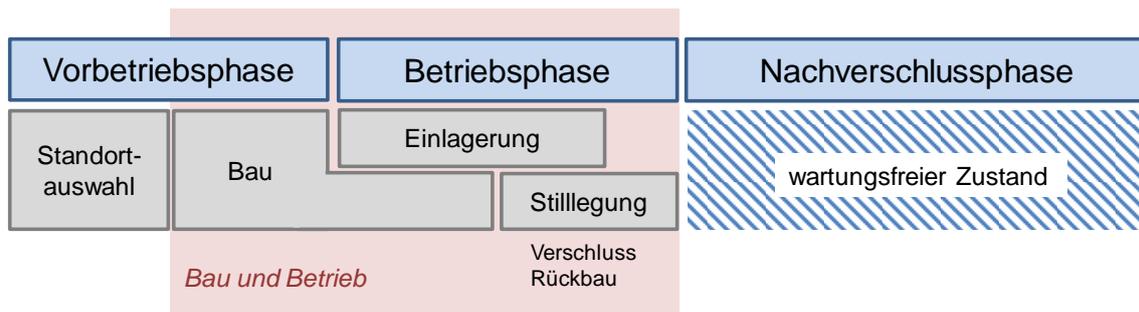


Abb. 1.1 Unterschiedliche Phasen eines Endlagers im Sicherheitsnachweis, Verwendung der Begriffe im Vorhaben BASEL

Die Nachverschlussphase beginnt nach dem Ende der Stilllegungsarbeiten. Für die Betriebs- und Nachverschlussphase wird ein umfassender Sicherheitsnachweis in den Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gefordert /BMU 10/, /BMU 20/:

- **Betriebsphase³:** Im Sicherheitskonzept ist darzulegen und zu begründen, mit welchen technischen und organisatorischen Maßnahmen die Sicherheit während des Endlagerbetriebes gewährleistet werden soll. Dies betrifft alle konventionellen Arbeiten, wie z. B. das Auffahren von Strecken sowie alle für den Strahlenschutz relevanten Aktivitäten beim Transport, bei der Einlagerung von Abfallgebinden sowie dem Verschließen und Abwerfen befüllter Einlagerungsfelder. Es ist zu analysieren, welche Betriebsstörungen und Störfälle im Endlager auftreten können. Für den Transport- und Einlagerungsbetrieb sind anlagenspezifische Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung von definierten Störfällen durchzuführen, die den gemäß Strahlenschutzverordnung notwendigen Schutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt belegen. Die Entscheidung, welche Ereignisse zu bewerten sind, hat sich an den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse und an den Auswirkungen in der Umgebung des Endlagers zu orientieren.
- **Nachverschlussphase:** Zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist eine umfassende, standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung, die einen Zeitraum von einer Million Jahre umfasst, vorzunehmen. Sie umfasst alle

³ In der EndlSiAnfV umfasst die Betriebsphase die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers. Diese Einteilung weicht von der im Vorhaben BASEL verwendeten Aufteilung (Abb. 1.1) ab.

Informationen, Analysen und Argumente, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen, und hat darzulegen, wodurch das Vertrauen in diese Bewertung begründet ist.

Bei der Entwicklung der Sicherheitsnachweise ist die Zusammenführung aller Analysen und Argumente in einem Safety Case Stand von Wissenschaft und Technik /IAEA 12/, /NEA 13/. Die Diskussion zur Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Safety Case hat sich in der Vergangenheit allerdings sehr stark an der Langzeitsicherheit orientiert /NEA 16/. Dabei wurde der Tatsache bisher wenig Beachtung geschenkt, dass der Ablauf beim Bau und Betrieb eines Endlagers letztlich darüber entscheidet, wie sich der Ausgangszustand bei der Analyse der Langzeitsicherheit darstellt (siehe auch Abb. 4.2 und Abb. 4.3 in Kapitel 4). Allein aus diesem Grund liegt eine starke Abhängigkeit zwischen Betriebsphase und Nachverschlussphase vor. Auf der anderen Seite haben viele Anforderungen für den Nachweis der Langzeitsicherheit Auswirkungen auf das technische Endlagerkonzept und auf die Betriebs- und Bergbausicherheit beim Bau und Betrieb eines Endlagers. In den letzten Jahren ist der Fokus des Safety Case verstärkt auf die Phase des Baues und Betriebes gerichtet. Das wird vor allem durch die internationalen Aktivitäten der IAEA und der OECD/NEA deutlich (Kapitel 3). Die internationalen Diskussionen haben auch nationale Auswirkungen: Der Paradigmenwechsel in der Führung des Safety Cases wird auch an zwei Stellen im Entwurf der überarbeiteten Sicherheitsanforderungen /BMU 20/ deutlich:

1. In Artikel 1 (EndlSiAnfV) § 10 wird für das Sicherheitskonzept die Berücksichtigung des gesamten Endlagersystems während der Errichtung, des Betriebes und der Stilllegung sowie im Bewertungszeitraum (eine Million Jahre) gefordert.
2. In § 17 Absatz 4 der EndlSiAnfV wird explizit gefordert, dass Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht erheblich und nicht mehr als unvermeidlich beeinträchtigen dürfen.

Zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen ist es wichtig, die Schnittstellen zwischen Bau und Betrieb eines Endlagers und der Nachverschlussphase zu identifizieren und in einem Safety Case genau zu analysieren und aufbauend auf dieser Analyse Methoden

und Werkzeuge zu entwickeln, die es ermöglichen, die Wechselwirkungen zwischen Betriebssicherheit⁴ und Langzeitsicherheit zu analysieren und ggf. sicherheitsrelevante Beeinträchtigungen auf die Sicherheit insgesamt zu minimieren. Die Abhängigkeiten in den Anforderungen an den Bau und Betrieb eines Endlagers und an die Nachverschlussphase sind eindeutig und nachvollziehbar in einem Safety Case darzustellen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2016 das Vorhaben BASEL gestartet, dessen Ziel es war, Werkzeuge zu entwickeln, die die Abhängigkeiten zwischen den Anforderungen an die Sicherheit während des Baus und Betriebs eines Endlagers und der Langzeitsicherheit im Safety Case darstellen und analysieren können. Die Vorgehensweise im Vorhaben BASEL wird in Kapitel 2 erläutert.

⁴ Im vorliegenden Bericht umfasst die Betriebssicherheit die Sicherheit beim Bau und Betrieb eines Endlagers.

2 Vorgehensweise

Ausgangspunkte der Entwicklung von Werkzeugen, die die Abhängigkeiten zwischen den Anforderungen an die Sicherheit während des Baus und Betriebs eines Endlagers und der Langzeitsicherheit im Safety Case darstellen und analysieren können, waren folgende Fragen:

- Welche Anforderungen resultieren aus der Gewährleistung der Langzeitsicherheit an die Entwicklung des Endlagersystems während Bau und Betrieb eines Endlagers?
- Welche potenziellen Einwirkungen auf den Endlagerbetrieb gibt es und welche grundlegenden Maßnahmen zur Vermeidung/Beherrschung dieser Einwirkungen lassen sich anführen, um Gefährdungen der Betriebssicherheit und Störungen des Betriebsablaufs (z. B. Behälterabsturz, Brand, etc.) zu reduzieren?
- Welche Aspekte der Betriebssicherheit und Maßnahmen für deren Gewährleistung haben Auswirkungen auf das Langzeitverhalten des Endlagersystems?
- Werden diese Aspekte von wichtigen Eigenschaften des Endlagersystems, d.h. dem Wirtsgestein bzw. Standort und dem entsprechenden Endlagerkonzept beeinflusst?
- Wie lassen sich die Wechselwirkungen zwischen Bau und Betrieb und der Nachverschlussphase darstellen und bewerten?

Als wesentliches Werkzeug zur Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Bau und Betrieb eines Endlagers und der Nachverschlussphase wurde auf eine Vorgehensweise aus der Langzeitsicherheit zurückgegriffen, das sich bereits zur Dokumentation komplexer Inhalte und zur Darstellung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in der Nachverschlussphase als nützlich erwiesen hat. Hierbei handelt es um die Identifizierung und Dokumentation von im Endlagersystem auftretenden Merkmalen (engl. features), Ereignissen (engl. events) und Prozessen (engl. processes), die zusammenfassend den englischen Begriffen entsprechend als FEP (features, events and processes) bezeichnet werden. Die Bedeutung der FEP liegt in der umfassenden Systembeschreibung und der Möglichkeit, mit ihrer Hilfe die Grundlagen des Sicherheitsnachweises transparent und nachvollziehbar zu dokumentieren sowie die Abhängigkeiten (Wechselwirkungen) zwischen den wesentlichen Komponenten und sicherheitsrelevanten Prozessen darzulegen. Ist allein die Identifizierung von sicherheitsrelevanten FEP das Ziel (z.B. über Sicherheitsfunktionen) spricht man von einem Top-down-Ansatz; ist eine umfassende Systemanalyse das Ziel (im Sinne einer Vollständigkeitsprüfung) von einem Bottom-up-

Ansatz. Beide Ansätze lassen sich miteinander kombinieren. Mit der Etablierung der Methode (siehe z.B. Ausführungen in /NEA 92/) und der internationalen FEP-Liste der OECD/NEA /NEA 00/ (aktuelle Version /NEA 19/) ist der Nachweis der Vollständigkeit eines Sicherheitsnachweises nach Stand von Wissenschaft und Technik durch die Möglichkeit des Abgleiches eines nationalen FEP-Kataloges mit dieser Liste in den Vordergrund gerückt, so dass alle nationalen Programme heute eine Kombination beider Ansätze verwenden /NEA 15/. Das gilt auch für die in Deutschland entwickelten FEP-Kataloge aus den Vorhaben VSG (Salz in steiler Lagerung, /WOL 12/, /BEU 12/), ANSICHT (Tongestein, /STA 14/, /STA 16/) sowie dem laufenden Vorhaben CHRISTA-II⁵ (Kristallingestein). Die FEP-Kataloge aus diesen Vorhaben wurden auch dem Vorhaben BASEL zu Grunde gelegt (Kapitel 5). Dabei wurde, wie im Vorhaben ANSICHT empfohlen /JOB 17/, auf eine eindeutige Trennung der Komponenten und ihrer Eigenschaften („features“ = Zustand-FEP) auf der einen Seite und der Ereignisse und Prozesse („events and processes“ = Prozess-FEP) auf der anderen Seite geachtet (Kapitel 6.1).

Im Vorhaben BASEL wurde unter Berücksichtigung der genannten FEP-Kataloge für die Nachverschlussphase folgendes Vorgehen zur Beantwortung der eingangs genannten Fragestellungen gewählt:

1. Erstellung eines allgemeinen FEP-Kataloges für den Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle (subsummiert die Endlagerkonzepte aus allen Wirtsgesteinen).
2. Ableitung übergreifender Einwirkungen von innen aus den FEP für den Bau und Betrieb eines Endlagers.
3. Zuordnung von Maßnahmen zur Vorbeugung (Prävention) und Verminderung (Mitigation) zu den identifizierten übergreifenden Einwirkungen.
4. Zusammenstellung der FEP für die Nachverschlussphase für eine Identifizierung der Anforderungen der Langzeitsicherheit an den Bau und Betrieb eines Endlagers

⁵ Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (FKZ 02E11617)

Die Analysen und Ergebnisse des Vorhabens BASEL sind in mehreren Berichten dokumentiert:

- Bericht zu den Endlagersystemen einschließlich der Endlagerkonzepte und der FEP-Tabellen (Bau und Betrieb eines Endlagers, Nachverschlussphase) /HER 20/
- Bericht zu den Tagesanlagen eines Endlagerbergwerkes /LEO 19/.
- Bericht zur Ableitung von übergreifenden Einwirkungen in der Betriebsphase auf das Endlagersystem einschließlich möglicher Gegenmaßnahmen /LOM 20/.
- Synthesebericht (vorliegender Bericht)

In /HER 20/ sind die FEP der Endlagersysteme und auch die für die Arbeiten zugrunde gelegten technischen Endlagerkonzepte dargelegt. Um dem im Standortauswahlgesetz (StandAG) festgelegten Auswahlprozess für einen Standort des zukünftigen Endlagers für hochradioaktive Abfälle in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein gerecht zu werden, wurden technische Endlagerkonzepte aus allen drei Wirtsgesteinstypen berücksichtigt. In /LEO 19/ erfolgte erstmals eine weitgehend wirtsgesteinsunabhängige Beschreibung der wesentlichen Komponenten der Tagesanlagen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Basierend auf /LEO 19/ und /HER 20/ erfolgte in /LOM 20/ eine Zusammenstellung von Einwirkungen von außen (EVA), eine umfassende systematische Ableitung von Einwirkungen von innen (EVI) sowie eine Zusammenstellung von organisatorischen und technischen Maßnahmen zur Prävention oder Mitigation der abgeleiteten EVI.

Die in /HER 20/ und /LOM 20/ zusammengestellten bzw. abgeleiteten FEP, EVI und EVA sind in diesem Synthesebericht im Anhang A aufgeführt. Zudem werden in dem vorliegenden Bericht wichtige internationale Aktivitäten (Kapitel 3) und wesentliche Aspekte der Sicherheit beim Bau und Betrieb eines Endlagers (Kapitel 4) zusammengestellt.

Basierend auf diesen Grundlagen werden in diesem Synthesebericht folgende Auswertungen vorgenommen:

1. Identifizierung der Anforderungen aus der Gewährleistung der Langzeitsicherheit an den Bau und Betrieb eines Endlagers (Kapitel 5).
2. Identifizierung von relevanten Auswirkungen der FEP, EVI und EVA der Bau- und Betriebsphase sowie Maßnahmen zu deren Prävention und Mitigation auf die Langzeitsicherheit (Kapitel 6). Die Relevanz ergibt sich dabei aus den Anforderungen der Langzeitsicherheit in Kapitel 5.

Eine Bewertung der erzielten Ergebnisse erfolgt abschließend in Kapitel 7.

3 Internationale Aktivitäten

Generell wurde in den meisten nationalen und internationalen Endlagerprogrammen sowie FuE-Vorhaben zum Safety Case schwerpunktmäßig die Langzeitsicherheit betrachtet /NEA 16/. Die Untersuchungen zur Betriebssicherheit wurden – falls überhaupt thematisiert – in separaten Unterlagen zusammengestellt, siehe z. B. auch die vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) /FAP 13/. In der VSG wurde die Betriebssicherheit in einem eigenen Bericht behandelt /PEI 12/. Es gab keine spezielle Diskussion zu den Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit.

Durch die Zunahme konkreter Endlagerplanungen, die mit dem Beginn des Baus von Endlagern einhergehen, wurde in den vergangenen ca. zehn Jahren deutlich, dass Vorgaben in der Planung, die aus Erfordernissen der Langzeitsicherheit resultieren, die betrieblichen Abläufe stark beeinflussen können, z. B. wenn gebirgsschonende Auffahrungsmethoden verwendet werden müssen. Auch Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit, insbesondere der Ausbau von Grubenbauen, können die Bewertung der Langzeitsicherheit signifikant beeinflussen.

Gleichzeitig haben Störfälle in Endlagern, wie beispielsweise in der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in den USA im Februar 2014 /DOE 14a/, /DOE 14b/, /DOE 15/, gezeigt, dass die Maßnahmen zur Beherrschung der Störfälle im Endlagerbetrieb bzw. die Konsequenzen der Störfälle einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung eines Endlagersystems haben können. So resultierte aus dem Störfall in der WIPP eine längere Unterbrechung des Betriebsablaufes und damit eine fehlende Möglichkeit der Instandhaltung des Grubengebäudes, so dass durch Konvergenzprozesse einige Grubenbaue nach Wiederinbetriebnahme nicht mehr zur Einlagerung genutzt werden können. Letztlich führte der Störfall in der WIPP zu einem deutlich geänderten Design des Grubengebäudes. Durch solche Vorgänge wird deutlich, dass Störfälle in der Betriebsphase nicht nur für den Betriebsablauf bedeutsam sind, sondern auch Einfluss auf die Nachverschlussphase haben können.

Zu den Ländern, in denen die Planungen für Endlager für hochradioaktive Abfälle weit fortgeschritten sind, gehören Finnland /POS 12/ und Schweden /SKB 11/. Die Abb. 3.1 zeigt schematisch, wie sich die beiden Länder die Wechselwirkung von Betriebs- und Nachverschlussphase vorstellen.

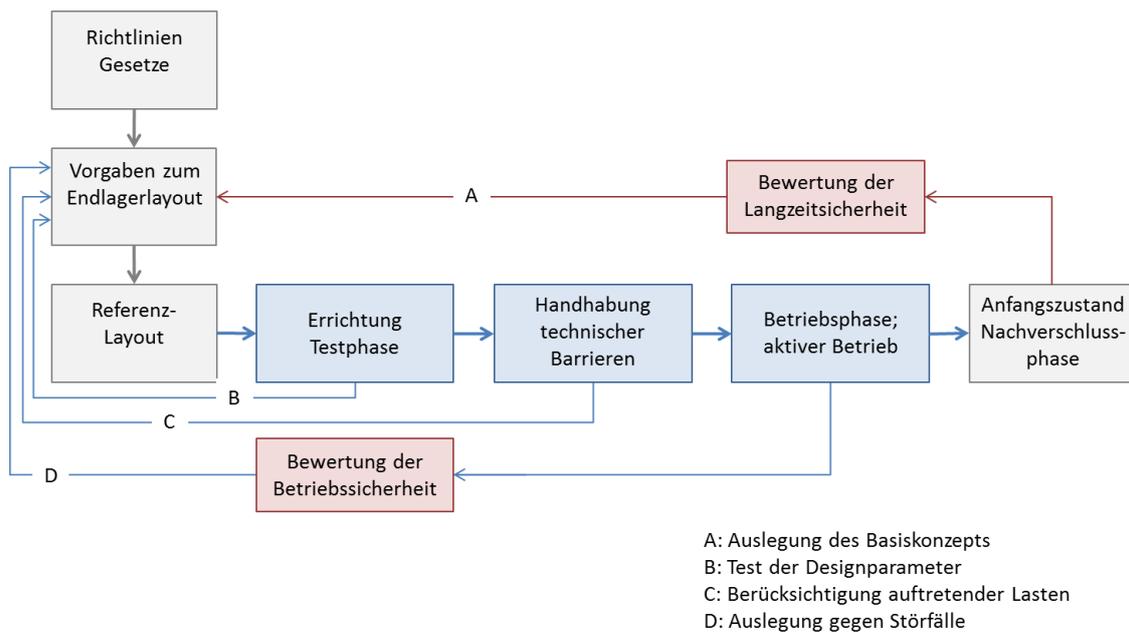


Abb. 3.1 Iterative Vorgehensweise bei der Entwicklung des Endlagerdesigns; in Anlehnung an das Konzept von SKB und Posiva, nach /NEA 16/

Auch in der Schweiz wurden im Rahmen der Etappe 2 des Sachplans geologischer Tiefenlager Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase durchgeführt und dabei die Auswirkungen der Betriebsphase auf die Langzeitsicherheit berücksichtigt /NAG 14/. Dies beinhaltet eine Prüfung, ob es in der Betriebsphase während des Einlagerungs-, Verfüll- und Versiegelungsvorgangs zu einer Beschädigung eines Endlagerbehälters oder der Verfüllung bzw. Versiegelung kommen kann. Weiter wird auch geprüft, ob es während der Betriebsphase bei Eintritt entsprechender Störfälle zu einer Schädigung der technischen und geologischen Barrieren der noch offenen und der bereits verfüllten Lagerkammern kommen kann. Es ist aufzuzeigen, wie durch eine geeignete Auslegung bzw. durch geeignete Maßnahmen auftretende Schädigungen klein gehalten werden können oder – falls notwendig – wie aufgetretene Schäden behoben werden können, so dass die verschiedenen Komponenten die an sie gestellten Anforderungen bezüglich Barrierenwirkung nach Verschluss der Anlage zuverlässig erfüllen werden.

Ebenso wie bei POSIVA und SKB wird bei diesen Sicherheitsbetrachtungen in /NAG 14/ für die Untertageanlagen und der damit einhergehenden sicherheitsgerichteten Optimierung der Anlagenauslegung und der Betriebsabläufe ein schrittweises iteratives Vorgehen gewählt, bei dem eine Anpassung der Anlagenauslegung mit gleichzeitiger Überprüfung der Sicherheit und bei Bedarf deren gezielter Verbesserung erfolgt (Abb. 3.2).

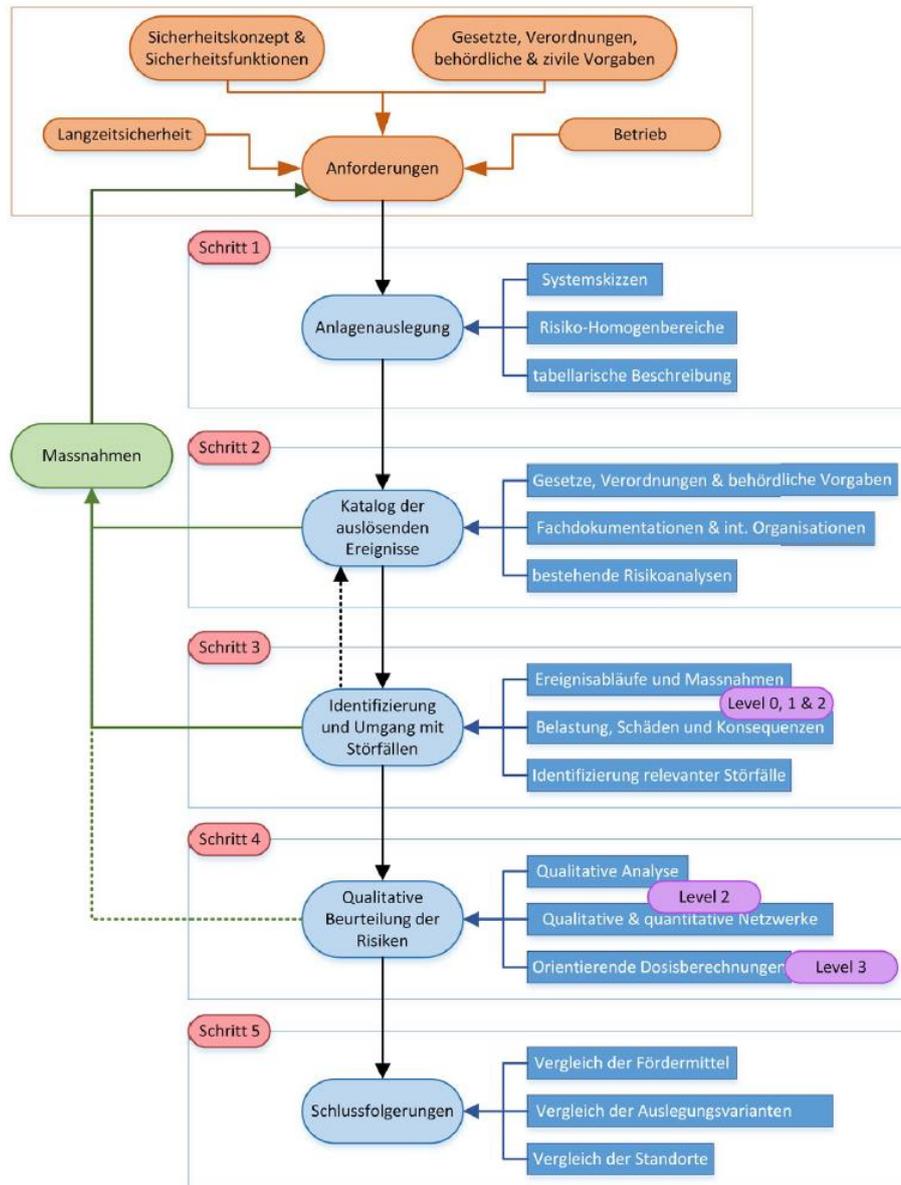


Abb. 3.2 Schematische Darstellung des schrittweisen Vorgehens bei der Festlegung der zu treffenden Maßnahmen zur sicherheitsgerichteten Optimierung der Auslegung des Endlagers und der Betriebsabläufe /NAG 14/

Da die Arbeiten im Vorhaben BASEL vor allem durch Diskussionen aus internationalen Aktivitäten der BGE TECHNOLOGY und der GRS in der Integration Group for the Safety Case (IGSC) und der Expert Group on Operational Safety (EGOS) der OECD/NEA, und dem Vorhaben GEOSAF der IAEA angestoßen wurden, sind in den folgenden Unterkapiteln wichtige Aktivitäten, die Einfluss auf das Vorhaben BASEL gehabt haben, zusammengefasst. Da im Verlauf des Vorhabens BASEL ein intensiver Austausch mit diesen Aktivitäten bestand, wird mit Anhang B eine ausführliche englische Zusammenfassung

der Ergebnisse aus dem Vorhaben inklusive einer Übersetzung der FEP und abgeleiteten EVI geliefert, um die Ergebnisse aus dem Vorhaben BASEL auch international verfügbar zu machen.

3.1 Aktivitäten bei der IAEA

Bei der IAEA wurde im Jahr 2008 das Projekt International Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal (GEOSAF) begonnen, das untersucht, wie der Safety-Case-Gedanke weiterentwickelt werden kann, u. a. bezüglich der Wechselwirkung von Betriebs- und Nachverschlussphase. GEOSAF ist primär als Forum gedacht, indem Ideen und Erfahrungen für die Entwicklung und Bewertung von Safety Cases für geologische Endlager ausgetauscht werden können. Dabei behandelt die IAEA das Thema hauptsächlich aus dem Blickwinkel der Genehmigungsbehörden. Die Mitarbeit in GEOSAF ist aber auch offen für Organisationen, die sich mit der Entwicklung und dem Betrieb von geologischen Endlagern befassen.

Im Jahr 2010 wurde beschlossen, der Betriebsphase verstärkte Aufmerksamkeit zu widmen, und eine GEOSAF-Arbeitsgruppe zur Betriebssicherheit gebildet. Im Jahr 2011 wurde ein erster Bericht /IAEA 11b/ dieser Arbeitsgruppe sowie ein Positionspapier /IAEA 11c/ veröffentlicht sowie der Abschlussbericht zum Gesamtprojekt GEOSAF erstellt /IAEA 11d/. Im Positionspapier wurde vor allem die Bedeutung der Identifizierung von Störfällen (Hazards identification and assessment methodology) sowie die Schnittstelle zur Langzeitsicherheit (Relationships between post-closure safety and operational safety) hervorgehoben.

Im Jahr 2012 begann die zweite Phase (GEOSAF-II) mit dem Schwerpunkt der Harmonisierung der Ansichten und Erwartungen bezüglich der Behandlung der Sicherheit in der Betriebsphase. Dabei wurde speziell untersucht, wie sich die Betriebssicherheit in den Kontext des umfassenden Safety Cases einfügt, wobei der „umfassende Safety Case“ (englisch: „integrated safety case“) ein neuer Begriff ist, der verdeutlichen soll, dass der Safety Case sowohl die Betriebsphase als auch die Nachverschlussphase umfasst.

Im GEOSAF-Projekt wurde erkannt, dass es eine große Herausforderung ist, eine Schnittstelle zwischen den Sicherheitsregimen in der Betriebsphase und der Nachverschlussphase zu entwickeln. In der zweiten Phase des Projekts wurden daher erste

Ideen für eine Struktur für einen umfassenden Safety Case und eine Methode für dessen Erstellung entwickelt /IAEA 16a/. Die wesentlichen Ergebnisse wurden während eines Workshops in Paris vorgestellt, siehe Kapitel 3.2.

Die wesentlichen Ergebnisse der GEOSAF-Arbeitsgruppe zur Betriebssicherheit wurden 2016 in einem Fortschrittsbericht veröffentlicht /IAEA 16b/. Seit dem Jahr 2017 läuft die dritte Phase von GEOSAF, in der vor allem die praktische Anwendung der in den ersten Phasen entwickelten Ergebnisse für den umfassenden Safety Case im Mittelpunkt steht.

3.2 Aktivitäten bei der OECD/NEA

Von der OECD/NEA wurde das Thema der Wechselwirkungen zwischen Betriebs- und Nachverschlussphase im Jahr 2008 erstmalig stärker thematisiert und dieser Aspekt im Rahmen einer Topical Session der IGSC (Balancing Operational and Long-Term Safety Considerations /IGSC 08/) beleuchtet. Ziel war es, zu eruieren, welche Aspekte der Betriebssicherheit Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben können. Dazu wurden die Erfahrungen der einzelnen Mitgliedsorganisationen ausgetauscht. Ein Ergebnis dieser Sitzung war, dass die Erfahrungen auf dem Gebiet bisher begrenzt sind und es keine allgemeingültigen Prinzipien gibt, anhand derer zwischen den Anforderungen aus der Betriebssicherheit und der Langzeitsicherheit abgewogen wird. Entsprechende Entscheidungen werden eher für jeden Einzelfall separat getroffen. Bei den Entscheidungen spielen auch ökonomische Faktoren eine Rolle, insbesondere dann, wenn Unterschiede hinsichtlich der Sicherheit nicht groß sind und gezeigt werden kann, dass die Anlage während des Baus und Betriebs und in der Nachverschlussphase ausreichend sicher ist. Es wurde betont, dass auf jeden Fall eine Planung erfolgen muss, bei der die relevanten Sicherheitsaspekte sowohl für die Betriebsphase als auch für die Langzeitsicherheit identifiziert und dokumentiert werden. Eine kontinuierliche Optimierung hinsichtlich der Langzeitsicherheit und auch der Endlagerauslegung kann durchaus bis in die Betriebsphase erfolgen. Es zeigte sich auch, dass es in den einzelnen Ländern verschiedene Ansätze gibt, wie die Betriebssicherheit behandelt wird, insbesondere, ob sie in einem umfassenden Safety Case mit der Langzeitsicherheit dokumentiert wird oder in einer separaten Lizenzentscheidung behandelt wird. Das hängt von den jeweiligen nationalen Regularien ab. Unabhängig davon, wie beide Themen angesprochen werden, ist es notwendig die Sicherheitsaspekte von beiden umfassend zu dokumentieren und die Wechselwirkungen zwischen beiden zu identifizieren /IGSC 08/.

Das Thema wurde von Seiten der IGSC als sehr wichtig eingestuft, insbesondere, da in einigen Mitgliedsländern das Endlagerprogramm weit fortgeschritten ist und Aspekte des Betriebs und der Betriebssicherheit eines Endlagers stärker in den Vordergrund rücken. Entsprechend wurde dann im Jahr 2012 die Arbeitsgruppe Expert Group on Operational Safety (EGOS) von der IGSC gegründet. Die Arbeitsgruppe hat sich seitdem mit folgenden Themen beschäftigt:

- Erfahrungsaustausch zur Betriebssicherheit in Bezug auf Technik, Gesetzgebung und Interessenvertreter (Stakeholder),
- Identifizierung plausibler Störfälle während der Betriebsphase,
- Austausch und Verbesserung des Know-hows bei der praktischen Bewertung von Störfällen,
- Definition bester Vorgehensweisen und technischer Lösungen zur Risikovermeidung,
- Vorbereitung für die IGSC, um einen vertieften Austausch mit anderen internationalen Organisationen auf dem Gebiet der Betriebssicherheit zu ermöglichen.
- Annahmekriterien für radioaktive Abfälle,
- Bewertung von Feuern,
- Bewetterung in Untertageeinrichtungen und
- Entwicklung einer NEA-Datenbank für Störfälle
- Abhängigkeiten zwischen Betriebs- und Langzeitsicherheit.

Ergebnisse wurden bisher noch nicht veröffentlicht.

Im Jahr 2016 fand in Paris ein gemeinsamer Workshop der IAEA und OECD-NEA (EGOS) zum Thema Betriebssicherheit von Endlagerbergwerken statt /NEA 16/. Er diente dem Erfahrungsaustausch der GEOSAF- und EGOS-Mitglieder. Dabei wurde der Stand der Entwicklungen bei Planung, Bau und Betrieb von Endlagern in einzelnen Ländern dargestellt, z. B. USA, Kanada, Japan, Frankreich, Tschechien und Deutschland. Ein Schwerpunkt beim Thema Betriebssicherheit für Endlagerbergwerke ist die Vermeidung von Feuer in den Anlagen. Am Beispiel von Schweden und Finnland wurden regulatorische Rahmenbedingungen vorgestellt, die die Betriebs- und Nachverschlussphase betreffen. Themen waren dabei Monitoring- und Managementsysteme, um Abweichungen im geplanten Betriebsablauf feststellen und in Bezug auf Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit bewerten zu können. An Beispielen aus Frankreich, Belgien und der Schweiz wurden Ansätze vorgestellt, wie Wechselwirkungen zwischen der Betriebs- und Nachverschlussphase behandelt werden können. In Belgien wird z. B. überlegt, wie

durch Optimierung des Endlagerlayouts die Betriebssicherheit verbessert werden kann, ohne die Langzeitsicherheit negativ zu beeinflussen. Ein wichtiger Diskussionspunkt in einigen Ländern ist die sogenannte Co-Activity, d. h. die Einlagerung parallel zum konventionellen Grubenbetrieb.

4 Sicherheit beim Bau und Betrieb eines Endlagers

4.1 Rechtlicher Rahmen

Den nationalen gesetzlichen Rahmen für den Umgang mit radioaktiven Abfällen bilden das Atomgesetz (AtG) und das Strahlenschutzgesetz (StrSchG). Gemäß § 9a Absatz 3 AtG ist der Bund verpflichtet, Anlagen zur Endlagerung bereitzustellen. Gemäß §9a Absatz 1 AtG ist die Abgabe abgebrannter Brennelemente an eine Wiederaufarbeitungsanlage seit dem Jahr 2005 unzulässig. Die hochradioaktiven Abfälle bestehen daher neben den bereits existierenden verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung auch aus direkt endzulagernden Brennelementen. Maßgebend für eine ausreichende Vorsorge gegen Schäden durch die Verwendung der Kernbrennstoffe ist nach §9 AtG der Stand von Wissenschaft und Technik.

Das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) gilt gemäß § 1 Absatz 1 auch für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern. Im § 80 StrlSchG ist die zulässige effektive Dosis für die Bevölkerung für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung von Anlagen gemäß § 9a Absatz 3 geregelt. Die Grenzwerte für die Ableitung radioaktiver Stoffe sind im § 99 der das StrlSchG konkretisierenden Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegt. Emissionen und Expositionen nach Verschließen des Endlagers sind nicht im StrlSchG bzw. in der StrlSchV geregelt.

In dem Entwurf der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV) sind neben Anforderungen an den Betrieb auch Dosiswerte für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren festgelegt. Demnach muss nachgewiesen werden, dass die Exposition auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition geringfügig ist. Im § 104 StrlSchV sind die für die Planung baulicher oder sonstiger technischer Schutzmaßnahmen gegen Störfälle in einem Endlager zugrunde zu legenden Körperdosen durch Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung festgelegt.

Grundsätzlich gelten in Deutschland für Bergwerke, auch für Endlagerbergwerke, das Bundesberggesetz (BBergG), Bundesbergverordnungen und Landesbergverordnungen. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich, entsprechend dem Ziel des Vorhabens, auf die bergrechtlichen Bereiche, die für den sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers

für radioaktive Abfallstoffe relevant sind. Damit werden z. B. Regelungen über Genehmigungsverfahren oder über die Aneignung von Bodenschätzen aus dem BBergG nicht betrachtet. Abb. 4.1 zeigt die hierarchische Struktur des Bergrechts in Deutschland. Die wesentlichen rechtlichen Regelungen werden im Folgenden in Hinblick auf ihre relevanten Inhalte und Ziele kurz erläutert.

Bundesberggesetz (BBergG)		
Allgemeine Bundesbergverordnung (ABergV)	Gesundheitsschutz- Bergverordnung (GesBergV)	Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (KlimaBergV)
(Landes-)Bergverordnungen z. B. Verordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS)		

Abb. 4.1 Hierarchie des Bergrechts in Deutschland

Nach §1 BBergG ist der Zweck des Gesetzes „*die Sicherheit der Betriebe und der Beschäftigten des Bergbaus zu gewährleisten*“ sowie „*Vorsorge gegen Gefahren, die sich aus bergbaulicher Tätigkeit für Leben, Gesundheit und Sachgüter Dritter ergeben, zu verstärken und den Ausgleich unvermeidbarer Schäden zu verbessern*“.

Die Allgemeine Bundesbergverordnung (ABergV) setzt Vorschriften der Europäischen Union in Bezug auf die Sicherheit unter Tage um. Die allgemeinen Schutzziele der ABergV gelten auch für ein Endlagerbergwerk. Diese betreffen z. B.

- die Pflicht, den Ausbau fachgerecht einzubringen und instand zu halten,
- die Aufgabe der Bewetterung und Sonderbewetterung,
- und das Bereitstellen von persönlicher Schutzausrüstung

Nach § 15 ABergV muss jeder untertägige Betrieb durch mindestens zwei getrennte Zugänge erschlossen sein. Dies gilt ebenfalls für einzelne Arbeitsstätten.

Die Gesundheitsschutz-Bergverordnung (GesBergV) enthält allgemeine Hinweise für den Umgang mit Gefahrstoffen unter Tage und die Zulassungsverfahren für deren Anwendung. Darüber hinaus enthält sie Bestimmungen über Staub, Lärm und Vibrationen.

Die Klimabergverordnung (KlimaBergV) regelt insbesondere in § 3 und § 4 das Verhältnis von Wettertemperaturen unter Tage, Aufenthaltsdauer in festgelegten Temperaturzonen und die daraus resultierende maximale Beschäftigungszeit des Personals bis hin zum Beschäftigungsverbot. Weitere Regelungen schützen das Personal zusätzlich vor dem Arbeiten bei hohen Temperaturen.

Die Bergverordnung für Schacht- und Schrägförderanlagen (BVOS) enthält Vorschriften für die Errichtung und den Betrieb von Schacht- und Schrägförderanlagen, Anweisungen für die Arbeit in Schächten sowie für die Prüfung von Seilen und anderen Teilen der Förderanlagen.

Weiterhin gelten für den Bau und Betrieb eines Endlagers eine Reihe von Normen, technischen Regeln und berufsgenossenschaftlichen Vorschriften. Ihre Relevanz muss im Einzelfall je nach Endlagerkonzept und Standortbedingungen ermittelt werden.

4.2 Grundzüge eines Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase

Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, sind die zu berücksichtigenden Regularien in Deutschland auf verschiedene Gesetzgebungen und Zuständigkeiten verteilt. Das unterscheidet die Erstellung von Sicherheitskonzepten für den Bau und Betrieb eines Endlagers im Vergleich zu den Sicherheitskonzepten, die bereits für die Nachverschlussphase existieren, z. B. /MOE 12/, /RUE 14/. Die Diversität bei den Zuständigkeiten ist auch international zu beobachten /NEA 16/. Die existierenden Regularien aus dem Bergbau und von konventionellen Nuklearanlagen berücksichtigen auch nicht die für ein Endlager typischen parallel ablaufenden Aktivitäten von Auffahrung, Errichtung und Einlagerung (Abb. 4.2 und Abb. 4.3).

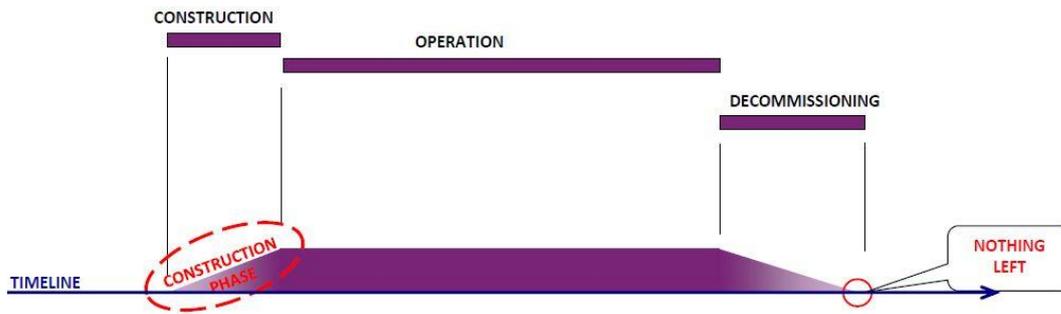


Abb. 4.2 Schematische Illustration der Entwicklung einer konventionellen Nuklearanlage nach /NEA 16/

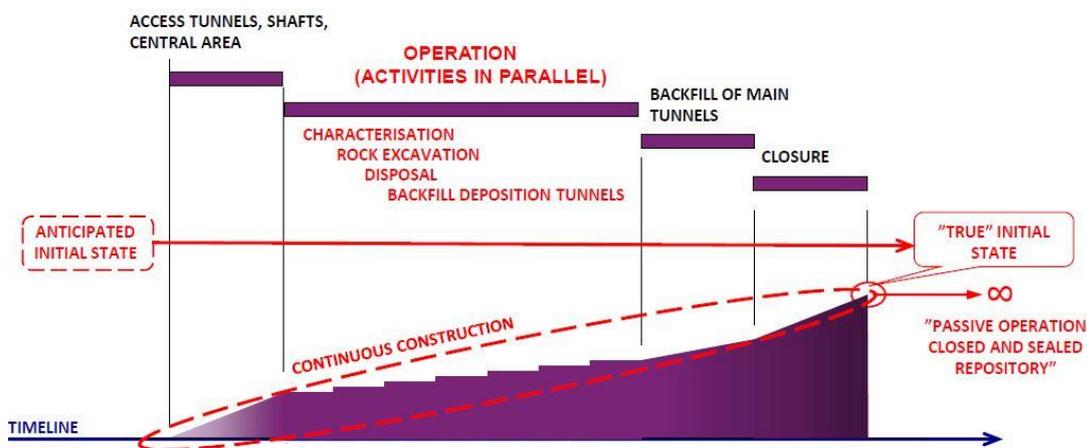


Abb. 4.3 Schematische Illustration der Entwicklung eines Endlagerbergwerkes für radioaktive Abfälle nach /NEA 16/

Gemäß Kapitel 7.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ ist „ein umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers einschließlich der übertägigen Anlagen zu führen. Insbesondere sind für den Einlagerungsbetrieb und die Stilllegung anlagenspezifische Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung von definierten Auslegungstörfällen durchzuführen, die den gemäß Strahlenschutzverordnung notwendigen Schutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt belegen. Dazu gehört, dass die Robustheit des Endlagersystems analysiert und dargestellt wird. Außerdem sind für die sicherheitsbezogenen Systeme, Teilsysteme oder Einzelkomponenten die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten von Einwirkungen, Ausfällen oder von Abweichungen vom Erwartungsfall (Referenzfall) soweit möglich zu berechnen oder abzuschätzen und die Auswirkungen auf die jeweils zugehörige Sicherheitsfunktion zu analysieren. Die Relevanz der untersuchten Ausfälle auf die Betriebssicherheit ist mit probabilistischen Methoden zu untersuchen.“

Der Schutz von Betriebspersonal, der Bevölkerung und der Umwelt ist somit primäres Ziel des Sicherheitskonzeptes für den Bau und Betrieb eines Endlagers. Anders als bei anderen kerntechnischen Anlagen ist bei einem Endlager zusätzlich ein weiteres wichtiges Ziel gegeben: Bau und Betrieb der kerntechnischen Anlage (Endlager) müssen die Langzeitsicherheit gewährleisten. Sie definieren den Anfangszustand für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfallstoffe (Abb. 4.2 und Abb. 4.3). Mit § 17 Absatz 4 der EndSiAnfV wird dieser Tatsache Rechnung getragen, indem dort explizit gefordert wird, „dass Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht erheblich und nicht mehr als unvermeidlich beeinträchtigen dürfen“.

Ziel des Sicherheitskonzeptes ist es, verbalargumentativ darzulegen, wie die Sicherheit an einem Standort gewährleistet werden soll. In Anlehnung an das Vorgehen für Sicherheitskonzepte zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit, z. B. /MOE 12/, können Sicherheitsziele definiert werden, denen entsprechende Maßnahmen zugeordnet werden. Die Sicherheitsziele für die Betriebsphase sind für den umfassenden Safety Case (siehe Kapitel 3.1) noch darzulegen. Aus den oben genannten Anforderungen wird deutlich, dass die Sicherheitsziele für die Betriebsphase eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland denen aus /NAG 14/ ähneln werden:

- Nukleare Betriebssicherheit und Strahlenschutz,
- Personensicherheit, Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz während der Betriebsphase,
- Auswirkungen der Betriebsphase auf die Langzeitsicherheit,
- Auswirkungen der Betriebsphase auf die Umwelt.

Um diese Schutzziele erreichen zu können, werden z.B. den Komponenten im Endlagersystem Sicherheitsfunktionen zugewiesen. Für die im Vorhaben BASEL untersuchten Endlagersysteme sind diese Sicherheitsfunktionen in Tab. 6.1 bis Tab. 6.3 dargelegt.

Im Sicherheitskonzept für die Betriebsphase ist gemäß Kapitel 8.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ darzulegen und zu begründen, *„welche Betriebsstörungen und Störfälle im Endlager auftreten können. Die Entscheidung, welche Ereignisse als Ausleuchtungsstörfälle im Sinne des § 49 StrlSchV⁶ zu bewerten sind, hat sich insbesondere an*

⁶ Jetzt § 104 StrlSchV (siehe Kapitel 4.1)

den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse und an Auswirkungen in der Umgebung des Endlagers zu orientieren. Es ist darzulegen, gegen welche Störfälle das Endlagersystem auszulegen ist. Menschliches Fehlverhalten ist bei der Analyse der Störfallmöglichkeiten zu berücksichtigen. Ereignisse, die wegen ihrer geringen Eintrittshäufigkeit nicht als Auslegungstörfälle eingestuft werden, sind zu bewerten und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verringerung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. ihrer Auswirkungen vorzuschlagen.“ Die Maßnahmen werden dazu genutzt, ein gestaffeltes Sicherheitskonzept (defence in depth) zu entwickeln.

In Anlehnung an die Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke /BMU 15/ sind gemäß EndlSiAnfV § 17 die für die Sicherheit des Endlagers relevanten Anlagenzustände während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung **systematisch** zu ermitteln und zu beschreiben und entsprechend gestaffelte Abwehr- und Schutzmaßnahmen als Teil des Sicherheitskonzeptes zu entwickeln und umzusetzen:

- für den **Normalbetrieb** sind Maßnahmen vorzusehen, die den bestimmungsgemäßen Betrieb des Endlagers gewährleisten und das Eintreten anderer Anlagenzustände vermeiden,
- für den **anormalen Betrieb** sind Maßnahmen vorzusehen, die das Eintreten von Störfällen verhindern und das Endlager in den Normalbetrieb zurückführen,
- für **Auslegungstörfälle** sind Maßnahmen vorzusehen, die den Störfall beherrschen und das Endlager in einen sichereren Anlagenzustand zurückführen,
- für **auslegungsüberschreitende Unfälle und Ereignisse** sind Maßnahmen vorzusehen, die die Auswirkungen des Ereignisses auf die Umgebung soweit wie möglich begrenzen.

Die zu ermittelnden Anlagenzustände sind im Entwurf der EndlSiAnfV und den bisher geltenden Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ identisch definiert. Neu aufgenommen ist in der EndlSiAnfV die Forderung nach einer systematischen Ermittlung dieser Anlagenzustände.

Aus den geltenden Anforderungen wird deutlich, dass das Sicherheitskonzept darauf basiert, das Endlagerbergwerk und seine Umgebung „während der gesamten Betriebsdauer in einem solchen Zustand zu halten, dass bei allen Ereignissen oder Anlagenzuständen auf den verschiedenen Sicherheitsebenen im Zusammenwirken mit den Maßnahmen und Einrichtungen der jeweiligen Sicherheitsebenen und den dabei auftretenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen

Einwirkungen die jeweiligen (...) Sicherheitsziele eingehalten werden“ /BMU 15/. Zu diesem Zweck müssen entsprechende sogenannte **übergreifende Einwirkungen** identifiziert werden. Als übergreifende Einwirkungen werden diejenigen Einwirkungen bezeichnet, die unabhängig vom Anlagenbetriebszustand auftreten und die Anlage schädigend beeinflussen können /FAS 18/. Diese übergreifenden Einwirkungen werden im folgenden Bericht in Anlehnung an /BMU 15/ in Einwirkungen von innen und Einwirkungen von außen unterschieden. Übergreifende Einwirkungen von außen (EVA) haben ihre Ursache außerhalb des Anlagengeländes. Bei übergreifenden Einwirkungen von innen (EVI) handelt es sich um Einwirkungen (wie Brand, Explosion oder Absturz schwerer Lasten), die auf dem Anlagengelände innerhalb oder auch außerhalb von Gebäuden auftreten /FAS 18/.

Ein gestaffeltes Sicherheitskonzept (defence in depth) kann erst mit einem ausgereiften technischen Konzept und genauen Kenntnissen der speziellen Umgebung eines Endlagers erstellt werden. Zur Identifizierung der Maßnahmen müssen aus einer umfassenden Systemanalyse die EVI und EVA, die während der Betriebsphase auf das System wirken, abgeleitet werden. Dabei spielt es zunächst noch keine Rolle, welchem Betriebszustand sie zugewiesen werden können. Ziel des ersten Schrittes ist die möglichst umfassende Ableitung der übergreifenden Einwirkungen. Bei der Betrachtung generischer Konzepte können zudem auch nur grundlegende Anlagenzustände beschrieben werden.

In diesem Zusammenhang ging es im Vorhaben BASEL ging es daher vor allem um die möglichst umfassende Identifizierung dieser grundlegenden Anlagenzustände. Dafür wurden einerseits alle Komponenten und Prozesse im Endlagersystem erfasst (FEP-Katalog, Kapitel 6.1) und andererseits die Betriebsabläufe beschrieben. In /LOM 20/ wird eine Methode beschrieben, wie EVI systematisch aus dem FEP-Katalog abgeleitet werden können. Zu berücksichtigende EVA werden im Regelwerk festgelegt und hier übernommen /BMU 15/.

5 Identifizierung der Anforderungen der Langzeitsicherheit an den Bau und Betrieb eines Endlagers

Zur Erreichung der Langzeitsicherheit wird national wie international das Konzept der Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre verfolgt. Gemäß den deutschen Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ /BMU 20/ wird dieses Ziel durch den sicheren Einschluss im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) erreicht. Im Kristallingestein kann gemäß den EndlSiAnfV /BMU 20/ der sichere Einschluss auch durch einen oder mehrere ewG oder durch geotechnische und technische Barrieren erreicht werden.

Die Grundanforderungen des sicheren Einschlusses können durch folgende Anforderungen der Langzeitsicherheit allgemein beschrieben werden:

1. geeignetes geochemisches Milieu
2. geringe Durchlässigkeit der Barrieren
3. keine Bildung neuer Wegsamkeiten
4. geringe Gasbildung
5. allenfalls geringfügige Radionuklidmobilisierung
6. begrenzter Radionuklidtransport
7. mechanische Stabilität der Barrieren
8. chemisch-mineralogische Stabilität der Barrieren
9. Vermeidung einer kritischen Ansammlung

Für das Vorhaben BASEL wurden 120 FEP aus den vorhandenen FEP-Katalogen aus den Vorhaben VSG (Salz in steiler Lagerung, /WOL 12/) und ANSICHT (Tongestein, /STA 14/, /STA 16/) sowie erste Ergebnisse zu FEP in Kristallin aus dem laufenden Vorhaben CHRISTA-II dahingehend ausgewertet, welche Anforderungen sich aus diesen FEP ergeben und welche Maßnahmen daraus für den Bau und Betrieb eines Endlagers abgeleitet werden können. Für das Vorhaben KOSINA (Salz in flacher Lagerung) wurde kein FEP Katalog erstellt. Es ist aber zu erwarten, dass die FEP-Liste sehr ähnlich der VSG-FEP-Liste sein wird, da sich die Unterschiede weniger aus den FEP als aus deren Inhalt ergeben (z.B. FEP Wirtsgestein unterschiedlich in VSG und KOSINA).

Tab. 5.1 fasst diese Auswertung zusammen. Dabei werden in der ersten Spalte die Prozess-FEP aufgeführt, aus denen die Anforderungen direkt abgeleitet werden. Die Komponenten-FEP, die mit den Prozess-FEP wechselwirken und aus denen sich in gleicher Weise die Anforderungen ableiten lassen können, werden *kursiv* unter den Prozess-FEP genannt. Die verschiedenen Verschlussbauwerke aus den einzelnen Konzepten (Streckenverschlüssen, Bohrlochverschlüsse, Migrationssperren etc.) sind nicht einzeln aufgeführt, sondern als FEP-Gruppe „Verschlussbauwerke“ angegeben. Regionale geologische FEP, wie z.B. Magmatismus oder Erosion sind nicht aufgeführt, da ihre Ausprägung an einem konkreten Standort durch die in Deutschland durchgeführte Standortauswahl mit entsprechenden Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen sowie geowissenschaftlichen Abwägungskriterien minimiert bzw. ihr Auftreten ausgeschlossen wird. Durch Maßnahmen beim Bau und Betrieb eines Endlagers lassen sich solche geologischen Prozesse nicht beeinflussen. Eine Ausnahme sind Erdbeben. Für die Auslegung der relevanten Komponenten nach KTA ist ein Bemessungserdbeben zu berücksichtigen. Die für die Langzeitsicherheit essentielle Durchführung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung (QS) bei der Herstellung der technischen Einrichtungen, der technischen und geotechnischen Barrieren, der Erstellung eines Ausbaus oder von Erkundungsbohrungen sind nicht bei jedem FEP als Maßnahmen genannt, sondern nur dort, wo es aus Sicht der Autoren besonders hervorzuheben ist.

Tab. 5.1 Ableitung von Maßnahmen für den Bau und Betrieb eines Endlagers aus den Anforderungen der Langzeitsicherheit

FEP bzw. FEP-Gruppe	Anforderung Langzeitsicherheit	Maßnahmen beim Bau und Betrieb des Endlagers
Chemische Prozesse		
Metallkorrosion <i>Brennelementbehälter</i> <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> <i>Bohrlochverrohrung</i> <i>Innenliner</i> <i>Streckenausbau</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i> <i>Technische Einrichtungen</i>	geringe Gasbildung	Begrenzung der im Endlager verbleibenden Metallmengen Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen QS Behälterherstellung, Behältermaterialien
Metallkorrosion <i>Abfallmatrix</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	allenfalls geringfügige Radionuklidmobilisierung	Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen QS Behälterherstellung

FEP bzw. FEP-Gruppe	Anforderung Langzeitsicherheit	Maßnahmen beim Bau und Betrieb des Endlagers
Zersetzung von Organika <i>Brennelementbehälter</i> <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> <i>Technische Einrichtungen</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	geringe Gasbildung	Begrenzung der im Endlager verbleibenden Organika Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen
Korrosion der Brennstoffmatrix <i>Abfallmatrix</i> <i>Buffer</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	allenfalls geringfügige Radionuklidmobilisierung	Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen Stabilisierung des geochemischen Milieus durch einen Buffer QS Behälterherstellung
Korrosion von Glas <i>Abfallmatrix</i> <i>Buffer</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	allenfalls geringfügige Radionuklidmobilisierung	Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen Stabilisierung des geochemischen Milieus durch einen Buffer QS Behälterherstellung
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen <i>Ausbau</i> <i>Technische Einrichtungen</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Erkundungsbohrungen</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	keine Bildung neuer Wegsamkeiten	Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen QS Rezeptur und Design
Auflösung und Ausfällung <i>Versatz</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i> <i>Gase im Grubenbau</i>	chemische Stabilität der Barrieren	Kompatibilitätsprüfung zwischen Baumaterialien und zutretenden Lösungen Standorterkundung Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen
Deflagration und Detonation <i>Versatz</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i> <i>Gase im Grubenbau</i>	mechanische Stabilität des Wirtsgesteins und der technischen sowie geotechnischen Barrieren	Begrenzung der verbleibenden gasbildenden Stoffe Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen Verfüllung der Hohlräume

FEP bzw. FEP-Gruppe	Anforderung Langzeitsicherheit	Maßnahmen beim Bau und Betrieb des Endlagers
Thermische Prozesse		
Wärmefluss <i>Radioaktive Abfälle</i> <i>Abfallmatrix</i> <i>Brennelementbehälter</i> <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> <i>Buffer</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Versatz</i>	mechanische und chemische Stabilität des Wirtsgesteins und der technischen sowie geotechnischen Barrieren	Produktkontrolle Design von Barrieren (z.B. Abfallmatrix, Behälter, Buffer und Versatz) Behälterbeladung, Thermische Endlagerauslegung (Grenztemperatur)
Thermische Expansion oder Kontraktion <i>Abfallmatrix</i> <i>Brennelementbehälter</i> <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> <i>Buffer</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Versatz</i> <i>ALZ</i>	mechanische Stabilität des Wirtsgesteins und der technischen sowie geotechnischen Barrieren	Produktkontrolle Design von Barrieren (z.B. Abfallmatrix, Behälter, Buffer und Versatz) Thermische Endlagerauslegung (Grenztemperatur)
Mechanische Prozesse		
Konvergenz <i>ALZ</i> <i>Wirtsgestein</i> <i>Ausbau</i> <i>Versatz</i> <i>Verschlussbauwerke</i> <i>Buffer</i> <i>Bohrlochverrohrung</i>	mechanische Stabilität des Wirtsgesteins und der technischen sowie geotechnischen Barrieren	Ausbau der Grubenbaue Verfüllung der Grubenbaue

FEP bzw. FEP-Gruppe	Anforderung Langzeitsicherheit	Maßnahmen beim Bau und Betrieb des Endlagers
Konvergenz ALZ Wirtsgestein Streckenausbau Versatz Verschlussbauwerke Lösungen im Grubenbau Gase im Grubenbau	begrenzter Radionuklidtransport ⁷	Ausbau der Grubenbaue Verfüllung der Grubenbaue Einlagerungsbereiche in Gesteinen mit hohen Konvergenzraten (nur Salz)
Versatzkompaktion Versatz Sandverfüllung Lösungen im Grubenbau Gase im Grubenbau	geringe Durchlässigkeit der geotechnischen Barrieren	Vermeidung / Entfernung eines geschlossenen Ausbaus in relevanten Bereichen vollständig Verfüllung der Grubenbaue Versatzrezepturen z.B. quellfähige Materialien Zuschlagstoff / Anfeuchten ⁸
Spannungsänderungen <i>alle Komponenten</i>	mechanische Stabilität des Wirtsgesteins und der technischen sowie geotechnischen Barrieren	Schonende Auffahrung Ausbau der Grubenbaue Verfüllung der Grubenbaue
Radiologische Prozesse		
Radioaktiver Zerfall Radioaktive Abfälle Abfallmatrix Brennelementbehälter Sonstige Endlagerbehälter	Vermeidung einer kritischen Ansammlung	Produktkontrolle Beladung Verfüllung der Behälter

⁷ Je nach Zustand des Endlagersystems kann der Einfluss der Konvergenz auf den Radionuklidtransport unterschiedlich sein: Sind noch transportrelevante, lösungsgefüllte Hohlräume vorhanden, kann die Konvergenz im Falle einer Radionuklidmobilisierung einen Antriebsmechanismus für einen Transport der Radionuklide darstellen. Für diesen Fall stellen Ausbau und Verfüllung der Grubenbaue Maßnahmen dar, die Konvergenz einzuschränken. Die Konvergenz schließt mit der Zeit aber auch die transportrelevanten Hohlräume, so dass der Radionuklidtransport zum Erliegen kommt. Es kann also auch eine sinnvolle Maßnahme sein, die Einlagerungsbereiche in Gesteinen mit hohen Konvergenzraten aufzuschließen. Welche Maßnahmen man einsetzt, ist letztlich vom Sicherheitskonzept abhängig.

⁸ Insbesondere das Anfeuchten von Salzgrus wird als Maßnahme in Erwägung gezogen. Hier ist darauf zu achten, dass dadurch die Lösungsmengen nicht unzulässig erhöht werden.

FEP bzw. FEP-Gruppe	Anforderung Langzeitsicherheit	Maßnahmen beim Bau und Betrieb des Endlagers
Radiolyse <i>Brennelementbehälter</i> <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> <i>Abfallmatrix</i> <i>Sandverfüllung</i> <i>Innenliner</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i> <i>Gase im Grubenbau</i>	chemische Stabilität des Wirtsgesteins und der technischen sowie geotechnischen Barrieren im Nahfeld	Beladung, Verfüllung und Abschirmung der Behälter
Mikrobielle Prozesse		
Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude <i>Brennelementbehälter</i> <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> <i>Buffer</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Versatz</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i> <i>Gase im Grubenbau</i>	geringe Gasbildung	Begrenzung der im Endlager verbleibenden möglichen Nährstoffe Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmengen Begrenzung des für die Mikroben zur Verfügung stehenden Hohlraums Erhöhung der Temperatur im Endlager
Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude <i>Brennelementbehälter</i> <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> <i>Buffer</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Versatz</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	chemische Stabilität der technischen und geotechnischen Barrieren	Begrenzung der im Endlager verbleibenden möglichen Nährstoffe Begrenzung der im Endlager verbleibenden Lösungsmenge Stabilisierung des geochemischen Milieus durch einen Buffer Begrenzung des für die Mikroben zur Verfügung stehenden Hohlraums

FEP bzw. FEP-Gruppe	Anforderung Langzeitsicherheit	Maßnahmen beim Bau und Betrieb des Endlagers
Hydraulische Prozesse		
Lösungszutritt ins Grubengebäude <i>Gase im Wirtsgestein</i> <i>Lösungen im Wirtsgestein</i> <i>Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein</i> <i>ALZ</i> <i>Störungen und Klüfte im Wirtsgestein</i>	chemische Stabilität des Wirtsgesteins und der technischen sowie geotechnischen Barrieren	Vorerkundung bei der Auffahrung Lösungsdichter Ausbau Abdichtinjektionen (Er-)Fassung der zutretenden Fluide
Druckgetriebene Infiltration <i>Versatz</i> <i>Verschlussbauwerke</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i> <i>Gase im Grubenbau</i> <i>ALZ</i> <i>Wirtsgestein</i>	keine Bildung neuer Wegsamkeiten	Begrenzung der verbleibenden gasbildenden Stoffe Schaffung von Speicherhöhlenräumen
Transportprozesse		
Sorption und Desorption <i>Korrosionsprodukte</i> <i>Buffer</i> <i>Versatz</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	begrenzter Radionuklidtransport	Verwendung von Dichtmaterialien mit guten Sorptionseigenschaften Stabilisierung des geochemischen Milieus Verwendung von Zuschlagstoffen
Kolloidbildung <i>Radioaktive Abfälle</i> <i>Buffer</i> <i>Versatz</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	begrenzter Radionuklidtransport	Begrenzung der im Endlager verbleibenden kolloidbildenden Stoffe
Komplexbildung <i>Radioaktive Abfälle</i> <i>Versatz</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i>	begrenzter Radionuklidtransport	Stabilisierung des geochemischen Milieus Begrenzung der im Endlager verbleibenden Komplexbildner
Advektion <i>Streckenausbau</i> <i>Versatz</i> <i>Verschlussmaterialien</i> <i>Lösungen im Grubenbau</i> <i>Gase im Grubenbau</i>	keine Bildung neuer Wegsamkeiten	Vermeidung / Entfernung eines geschlossenen Ausbaus in relevanten Bereichen Verfüllung der Grubenbaue

Zusammengefasst zeigt sich, dass von der Langzeitsicherheit grundsätzliche Anforderungen während Planung, Errichtung und Betrieb des Endlagers an folgende Komponenten bestehen:

- die Auslegung, Qualitätssicherung und Nachweis der Funktionalität der Verschlussbauwerke, des Versatzes und des Buffers,
- die Auslegung, Qualitätssicherung und Produktkontrolle der Abfallgebinde,
- die verbleibenden Mengen von gasbildenden Stoffen (Metalle, Organika)
- die verbleibenden Mengen von Lösungen (vor allem im Einlagerungsbereich) sowie
- die verbleibenden Mengen an Nährstoffen für Mikroben

Neben diesen grundsätzlichen Anforderungen gibt es aus Sicht der Langzeitsicherheit in Abhängigkeit vom Wirtsgesteinstyp auch konkurrierende Anforderungen:

- die Notwendigkeit eines Ausbaus auf Grund hoher Spannungen zur Vermeidung der Erweiterung der ALZ im Gegensatz zu der Vermeidung/Entfernung eines Ausbaus zur Vermeidung von potenziellen Wegsamkeiten oder Beeinflussungen des geochemischen Milieus sowie
- an die Verfüllung von Hohlräumen zur Stabilisierung der Grubenbaue und Behinderung von Transportprozessen im Gegensatz zu der Notwendigkeit der Schaffung von Speicherhohlräumen für Fluide.

Diese konkurrierenden Anforderungen sind endlagersystemspezifisch zu diskutieren.

6 Identifizierung der Auswirkungen der Bau- und Betriebsphase auf die Langzeitsicherheit

Eine gemäß § 17 EndlSiAnfV geforderte systematische Ermittlung von Anlagezuständen erfordert ein umfassendes Systemverständnis der Zustände und Abläufe im Endlager während der Betriebsphase, dazu gehören in Anlehnung an /NEA 16/:

- die technischen Konzepte, die eingelagerten Abfälle, das Verhalten der Barrieren, sowie das eingesetzte Equipment zur Errichtung und zum Betrieb des Endlagers,
- die Identifizierung von Ereignissen (Einwirkungen), die den sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers gefährden können,
- die Betriebsabläufe, inklusive der Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit beim Bau und Betrieb des Endlagers.

Grundlage der Analyse im Vorhaben BASEL waren die technischen Endlagerkonzepte für hochradioaktive Abfälle im Tongestein /JOB 15/, /LOM 15/, Steinsalz /BOL 11/, /BOL 12/, /BOL 18/ und Kristallingestein /BER 17/. Die Konzepte sind in /HER 20/ zusammengefasst. Die Endlagerkonzepte werden gegenwärtig weiterentwickelt, z.B. im FuE-Vorhaben CHRISTA-II für Kristallingestein; für das Vorhaben BASEL war ein konkreter Stand als Grundlage der folgenden Analysen festzulegen.

Da die Betriebsphase erst endet, wenn das Endlager vollständig verschlossen ist, werden zu diesem Zeitpunkt in den Einlagerungsbereichen bereits mehrere Jahrzehnte Abfälle eingelagert und die gefüllten Einlagerungsbereiche abgeworfen sein. Daher können Prozesse, wie Gasbildung oder Mobilisierung von Radionukliden, die in der Nachverschlussphase eine große Bedeutung haben, auch schon während des Betriebes auftreten. Um das Endlagersystem für die Sicherheitsbewertung umfassend zu beschreiben und damit auch die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit bewerten zu können, wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise für die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in der Nachverschlussphase im Vorhaben BASEL eine Liste von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (FEP, siehe Erläuterungen in Kapitel 2) für die Betriebsphase eines solchen Endlagers identifiziert. Diese beinhaltet sowohl FEP zum Betrieb des Endlagers als auch FEP zur Entwicklung der abgeworfenen Einlagerungsbereiche.

6.1 Entwicklung eines FEP-Kataloges für die Betriebsphase

Bei der Identifizierung entsprechender FEP wurde zwischen Zuständen (Komponenten und ihren Eigenschaften, Zustand-FEP) einerseits sowie Prozessen und Ereignissen (vereinfachend Prozesse, Prozess-FEP) andererseits unterschieden. Die Erfahrungen aus der Anwendung von FEP für die Nachverschlussphase zeigen, dass eine eindeutige Zuordnung der Komponenten erforderlich ist. Zudem ist es sinnvoll, das Endlagersystem zur besseren Übersicht in Teilsysteme zu untergliedern. Für das Vorhaben BASEL wurde das Endlagersystem in vier Teilsysteme untergliedert:

1. Anlagen über Tage (AüT⁹)
2. Schächte und Rampen (SuR)
3. Grubenbaue außerhalb der Einlagerungsbereiche (GB)
4. Einlagerungsbereiche (ELB)

Während die Tagesanlagen einfach von den untertägigen Anlagen abzugrenzen sind, bedarf es bei der Abgrenzung der drei Teilsysteme unter Tage mehrerer Festlegungen. Die Zuordnung der Komponenten zu diesen Teilsystemen ist in Abb. 6.1 dargestellt.

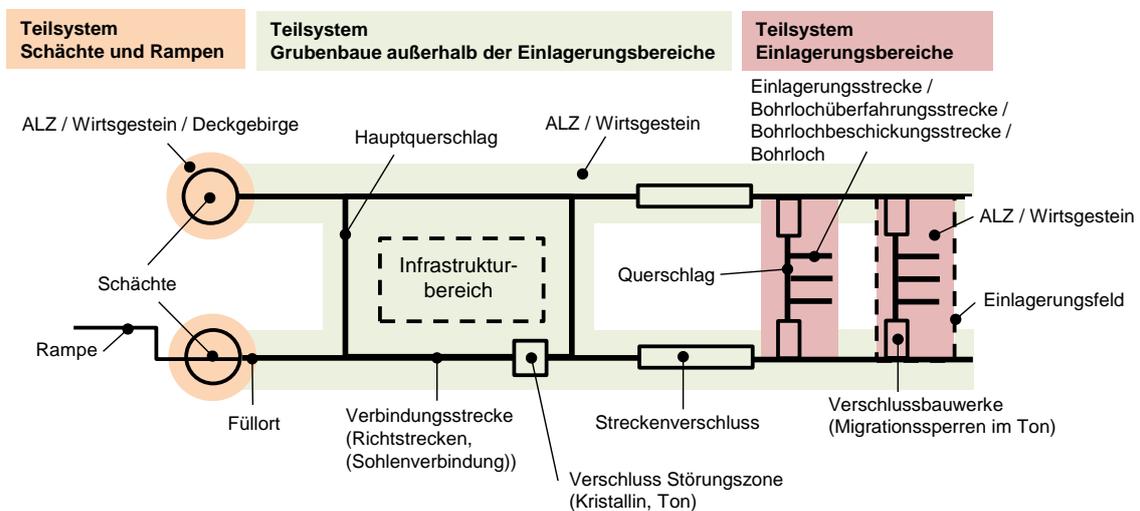


Abb. 6.1 Zuordnung von Komponenten zu den Teilsystemen unter Tage

Schächte und Rampen bilden die Schnittstelle zwischen den über- und untertägigen Einrichtungen. Die Schacht- bzw. Seilförderanlagen sind Teil der Tagesanlagen, während

⁹ Abkürzungen werden im Folgenden in Abbildungen und Tabellen verwendet.

fest eingebaute Komponenten der Schächte und Rampen dem Teilsystem „Schächte und Rampen“ zuzuordnen sind. In den untertägigen Füllrörtern werden die Transportgüter aus den Schächten und Rampen ggf. für den untertägigen Transport umgeladen. Die Füllrörter werden dem Teilsystem „Schächte und Rampen“ zugeordnet.

In Anhang A sind für die vier Teilsysteme die identifizierten Komponenten (Zustands-FEP) und die Prozesse aufgelistet. Es erfolgt zudem eine Zuordnung dieser FEP zu den in /HER 20/ beschriebenen Endlagerkonzepten. In den Tab. 6.1 bis Tab. 6.3 werden die Funktionen der Komponenten für die Betriebssicherheit für die Teilsystem unter Tage zusammengefasst. Die Anforderungen an die Funktion werden in der letzten Spalte unterteilt nach:

- Anforderung a (allgemein) = Anforderung gilt für alle Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte, z.B. Schachtausbau > Sicherheitsfunktionen: Arbeitsschutz, Konturstabilisierung, Begrenzung von Lösungszuflüssen und
- Anforderung s (spezifisch) = Konkretisierung der Anforderungen in den Wirtsgesteinen und Endlagerkonzepten unterschiedlich, z.B. Endlagerbehälter > Streckenlagerung POLLUX-Behälter Salz, Ton, Kristallin; abgeschirmt, Funktionsdauer 500 Jahre.

Tab. 6.1 Funktionen der Komponenten für die Betriebssicherheit im Teilsystem Schächte und Rampen (Teilsystem SuR)

Komponente	Sicherheitsfunktion	Wirtsgestein K = Kristallin T= Tongestein S = Steinsalz	für Rückholung erforderlich	Anforderung a = allgemein s = spezifisch
Schacht-/Rampenausbau	Arbeitsschutz, Konturstabilisierung, Begrenzung von Lösungszuflüssen	K, T, S (Deckgebirge)	nein	a
Schacht-/Rampeneinbauten	Arbeitsschutz	K, T, S	nein	a
Lösung	Aufsättigung der Verschlüsse (Bentonit)	K, T	nein	s
Verschluss von Bohrungen	Verhinderung / Begrenzung von Lösungszuflüssen	K, T, S	nein	s

Komponente	Sicherheitsfunktion	Wirtsgestein K = Kristallin T= Tongestein S = Steinsalz	für Rückholung erforderlich	Anforderung a = allgemein s = spezifisch
Schacht-/ Rampenverschlüsse	Verhinderung / Begrenzung von Lösungszuflüssen	K, T, S	nein	s
Endlagerbehälter	Arbeitsschutz, Strahlenschutz, Einschluss radioaktiver Stoffe	K, T, S	nein	s

Tab. 6.2 Funktionen der Komponenten für die Betriebssicherheit in den Grubenbauen (Teilsystem GB)

Komponente	Sicherheitsfunktion	Wirtsgestein K = Kristallin T= Tongestein S = Steinsalz	für Rückholung erforderlich	Anforderung a = allgemein s = spezifisch
Ausbau Strecken	Arbeitsschutz, Konturstabilisierung, Begrenzung von Lösungszuflüssen	K, T, S	nein	a
Ausbau Infrastrukturbereiche	Arbeitsschutz, Konturstabilisierung, Begrenzung von Lösungszuflüssen	K, T, S	nein	a
Technische Einrichtungen	Arbeitsschutz	K, T, S	nein	a
Lösung	Aufsättigung Versatz / Verschlüsse (Bentonit)	K, T	nein	s
Verschluss von Bohrungen	Verhinderung / Begrenzung von Lösungszuflüssen bzw. Freisetzung kontaminierter Lösungen	K, T, S	nein	s
Verschlüsse der Störungszonen	Verhinderung von starken Lösungszuflüssen	K, T	nein	s
Behälter	Arbeitsschutz, Strahlenschutz, Einschluss radioaktiver Stoffe	K, T, S	nein	s

Tab. 6.3 Funktionen der Komponenten für die Betriebssicherheit in den Einlagerungsbereichen (Teilsystem ELB)

Komponente	Sicherheitsfunktion	Wirtsgestein K = Kristallin T= Tongestein S = Steinsalz	für Rückholung erforderlich	Anforderung a = allgemein s = spezifisch
Ausbau Querschlag, Bohrlochüberfahungsstrecke, Einlagerungsstrecke	Arbeitsschutz, Konturstabilisierung, Begrenzung von Lösungszuflüssen	K, T, S	nein	a
Ausbau vertikales Bohrloch	Rückholung der Gebinde, Konturstabilisierung, Lagestabilisierung Gebinde, Verzögerung/Begrenzung der Lösungszuflüsse, Rückhaltung freigesetzter Schadstoffe aus Behältern mit unerkannten Defekten	K, T, S	ja	s
Bohrlochverschluss	Konturstabilisierung, Verzögerung/Begrenzung der Lösungszuflüsse, Strahlenschutz, Rückhaltung freigesetzter Schadstoffe aus Behältern mit unerkannten Defekten	K, T	nein	s
Ausbau horizontales Bohrloch	Rückholung der Gebinde, Konturstabilisierung, Verzögerung/Begrenzung der Lösungszuflüsse	S	ja	s
Bohrlocheinbauten, Schlitten	Einlagerung der Abfallgebände	S	ja	s

Komponente	Sicherheitsfunktion	Wirtsgestein K = Kristallin T= Tongestein S = Steinsalz	für Rückholung erforderlich	Anforderung a = allgemein s = spezifisch
Technische Einrichtungen	Arbeitsschutz	K, T, S	nein	a
Lösung	Aufsättigung Buffer, Versatz, Verschlüsse (Bentonit)	K, T	nein	s
Versatz	Konturstabilisierung, Flammensperre	K, T, S	nein	a
Buffer	Konturstabilisierung, Strahlenschutz, Rückhaltung freigesetzter Schadstoffe aus Behältern mit unerkannten Defekten	K, T	nein	a
Verschluss von Bohrungen	Verhinderung / Begrenzung von Lösungszuflüssen bzw. Freisetzung kontaminierter Lösungen	K, T, S	nein	s
Verschlussbauwerke	Konturstabilisierung, Verhinderung/ Begrenzung von Fluidbewegungen, Rückhaltung freigesetzter Schadstoffe aus Behältern mit unerkannten Defekten	K, T	nein	s
Endlagerbehälter	Arbeitsschutz, Strahlenschutz, Einschluss radioaktiver Stoffe	K, T, S	ja	s

6.2 Ableitung von Einwirkungen von innen

6.2.1 Methodik

Bei der im Vorhaben BASEL entwickelten Vorgehensweise handelt es sich um einen „Bottom-Up“-Ansatz. Das Ziel der Methodik ist, eine möglichst umfassende Menge an Einzelereignissen zu generieren, um herauszufinden, welche Auswirkungen diese Ereignisse im Endlagersystem haben. Dieser Ansatz hat sich für eine vollständige Systemanalyse bei der Durchführung eines Langzeitsicherheitsnachweises bewährt und wird daher auf den Bau und Betrieb eines Endlagers erweitert.

Um eine umfassende Liste von EVI zu erstellen, die systematisch und nachvollziehbar abgeleitet ist, wird für jedes Teilsystem geprüft, ob durch die Einwirkung eines Prozesses auf eine Komponente Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb – also EVI – entstehen können (Abb. 6.2).

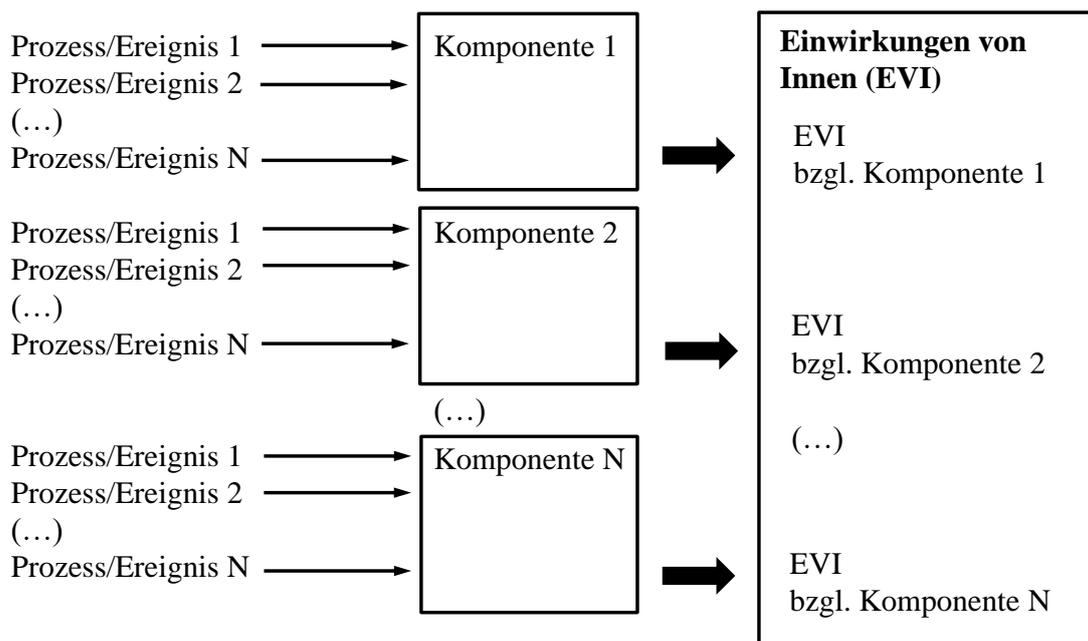


Abb. 6.2 Formalisiertes Vorgehen zur Ermittlung von EVI innerhalb eines Teilsystems

Wird ein EVI abgeleitet, ist es entsprechend zu begründen. Die Begründungen sind in /LOM 20/ dokumentiert.

Um die Analyse handhabbar zu halten, wurden in /LOM 20/ einige Festlegungen für die Ableitung getroffen, die für das Verständnis des Vorgehens und die Einordnung der Ergebnisse wichtig sind:

- Unfälle von Menschen (Absturz, Verletzung beim Arbeiten, etc.), die beim Betrieb eines Endlagers durch diverse Maßnahmen wie Schulungen/Sensibilisierungen und technische Vorsichtsmaßnahmen immer vermieden werden sollen aber passieren können, wurden bei der Analyse nicht abgeleitet. Die dem Vorhaben BASEL zu Grunde gelegten technischen Endlagerkonzepte haben nicht den Detaillierungsgrad, um entsprechende Betriebsstörungsanalysen durchzuführen. Es ist zu erwarten, dass entsprechende EVI in ihren Auswirkungen auf den Endlagerbetrieb durch den übergeordneten Faktor „Unterbrechungen im Betriebsablauf“ abgedeckt sind.
- Menschliche Einwirkungen sind eine häufige Ursache für das Auftreten eines EVI (fehlerhafte Durchführung eines Prozesses, Verursachung von Unfällen). Sie wurden dementsprechend bei der Begründung zur Ableitung eines EVI auf einem abstrakten Niveau (als „menschliche Fehler“) herangezogen. Eine detaillierte Analyse war allerdings nicht handhabbar, da die Möglichkeiten menschlicher Einwirkungen auf dem vorliegenden Abstraktionsniveau nahezu unbegrenzt sind.
- Die Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit ist eine Genehmigungsvoraussetzung nach AtG. Sie ist auch für die Betriebsphase des Endlagers entscheidend. Der entsprechende Nachweis ist für jedes mit Brennstoff beladene Endlagergebäude zu führen und wird vor der Annahme im Endlager geprüft (Einhaltung der technischen Annahmebedingungen). Präventivmaßnahmen zur Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit in der Nachverschlussphase des Endlagers sind in der Betriebsphase umzusetzen. Sie können ggf. – neben der Behälterbeladung – auch die Auslegung der Einlagerungsbereiche betreffen.
- Das absichtliche negative Einwirken (Sabotage) durch den Menschen auf den Einlagerungsbetrieb wurde im Vorhaben BASEL nicht berücksichtigt.
- Unerkannte Defekte an Behältern sind nach heutigem Stand der Technik nicht auszuschließen. Die Einlagerung undichter Behälter ist auf Grund der radiologischen Überwachung aber als sehr gering wahrscheinlich einzuschätzen. Ohne weitere Einwirkung wurden die Behälter als dicht angenommen. Aufgrund des unerkannten Defektes wird jedoch angenommen, dass Behälter auch bei Einwirkungen versagen können, gegen die anforderungsgerecht gefertigte Behälter ausgelegt sind.

- Schwerpunkt der Ableitung lag auf den Bereichen des Endlagers, in denen radioaktive Abfälle transportiert und gehandhabt werden. Im Infrastrukturbereich und in den Tagesanlagen wurden die betrieblichen Abläufe in den konventionellen Bereichen, z. B. entsprechende in Werkstätten, nicht im Detail untersucht.
- Die Ableitung von EVI für die Komponenten Lösungen, Gase und Kohlenwasserstoffe (KWS) aus dem Wirtsgestein und aus dem Deck- und Nebengebirge erforderte eine besondere Behandlung, da diese Fluide sich in Komponenten befinden, aus diesen austreten und in andere Komponenten übertreten können. Daraus folgt, dass gerade für Fluide an vielen Komponenten die gleichen oder in ihrer Bewertung sehr ähnliche EVI abgeleitet würde (z. B. „Flutung des Grubengebäudes“). Zur Vermeidung von Wiederholungen wurden Fluidzutritte in das Grubengebäude nur der Komponente zugeordnet, aus der sie austreten (Wirtsgestein oder Deck- und Nebengebirge) und nicht dem Prozess Fluidzutritt. Die EVI „Feuer“ und „Explosion“ wurden immer abgeleitet, wenn brennbare Fluide (Brandlasten) vorliegen und gezündet werden können.
- Die Ableitung von EVI, die aus dem Betrieb von Maschinen herrühren, ist bei vielen Prozessen möglich, z. B. Einbringen von Versatz, Erstellung einer Erkundungsbohrung etc. Diese EVI wurden nur bei der Komponente „Fahrzeuge“ abgeleitet und nicht beim Einwirken dieser Prozesse auf andere Komponenten.
- Ein Großteil der abgeleiteten EVI bezieht sich auf die Beeinträchtigung von technischen oder geotechnischen Komponenten des Bergwerkes. Diese EVI werden einheitlich als „Versagen“ dieser Komponente bezeichnet, um deutlich zu machen, dass es sich um eine sicherheitstechnisch relevante Beeinträchtigung handelt.
- Das Monitoring (Beobachtungssysteme für Langzeitentwicklungen) ist nicht Bestandteil der technischen Endlagerkonzepte und wird nicht berücksichtigt. Beobachtungssysteme für die Betriebsüberwachung sind Bestandteil der technischen Einrichtungen in allen Teilsystemen.
- Bei der radiologischen Betriebssicherheit wurden eingelagerte und natürliche Radionuklide berücksichtigt und in gleicher Weise behandelt. Durch die radiologische Überwachung wird im bestimmungsgemäßen Betrieb gewährleistet, dass keine unzulässigen Strahlenexpositionen des Betriebspersonals auftreten.

- Auf Grund der kurzen Zeiträume, in denen die Einlagerungsräume offenstehen, wurde davon ausgegangen, dass keine Wartungsarbeiten im Teilsystem „Einlagerungsbereiche“ notwendig sind.

Nachdem im ersten Schritt EVI abgeleitet wurden, erfolgte in /LOM 20/ in einem zweiten Schritt eine Bewertung der Konsequenzen der abgeleiteten EVI, d.h. welche Auswirkungen jedes einzelne EVI auf die Komponenten des Endlagersystems hat und welche möglichen weiteren EVI daraus resultieren können. Im letzten Schritt erfolgte beispielhaft am Teilsystem Einlagerungsbereiche eine systematische Kombination aller im ersten Schritt abgeleiteten EVI und der in /BMU 15/ vorgegebenen EVA. Die im zweiten Schritt vorgenommene Bewertung der Konsequenzen wird bei Kombination mit jeweils einem weiteren EVI kontrolliert. Bei diesen Kombinationen sind keine neuen EVI abgeleitet worden, allerdings sind die Konsequenzen bei der Kombination von EVI z. T. erheblich schwerwiegender. Die Kombination von EVI und deren Bewertung könnte weiter fortgeführt werden, z. B. durch Kombination von mehr als zwei EVI, durch fortlaufende Kombinationen von EVI etc. Für das Vorhaben BASEL wurde an dieser Stelle der einfachen Kombination die Ableitung von EVI beendet, weil keine neuen EVI abgeleitet wurden. Weitere Kombinationen müssen nur dann unterstellt werden, wenn die zu kombinierenden Ereignisse in einem kausalen Zusammenhang stehen können oder wenn ihr gleichzeitiges Eintreten auf Grund der Wahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes in Betracht zu ziehen ist /BMU 15/.

Die abgeleiteten EVI beschreiben Einwirkungen, für die erwartet wird, dass sie außerhalb des bestimmungsgemäßen Betriebs liegen. Darüber hinaus wird in dieser grundlegenden Analyse keine Einstufung in Störfall oder ähnliches vorgenommen. Es wird auch keine Eintrittswahrscheinlichkeit für das EVI angegeben. Bei der Ableitung der EVI „Freisetzung von radioaktiven bzw. chemotoxischen Stoffen“ wird nicht geprüft, ob mögliche Freisetzungen noch unterhalb heute gültiger Grenzwerte liegen und damit dem bestimmungsgemäßen Betrieb entsprechen. Im Sinne einer umfassenden Betrachtung wurden jeweils EVI abgeleitet, wenn aus der Einwirkung eine Gefahr für das Betriebspersonal und/oder eine signifikante Freisetzung von Radionukliden oder chemotoxischen Stoffen zumindest möglich erscheint.

6.2.2 Ergebnisse

Für die vier Teilbereiche (Aüt, SuR, GB und ELB) wurden für alle Komponenten und auftretenden Prozesse EVI abgeleitet. Sie sind in Tab. 6.4 zusammengefasst.

Die für jedes EVI angegebenen Zahlenwerte zeigen die Anzahl, wie oft ein EVI in einem Teilsystem abgeleitet wurde (Auslöser). Eine ausführliche Beschreibung der EVI ist in /LOM 20/ dokumentiert.

Tab. 6.4 Abgeleitete EVI in den vier Teilsystemen und Anzahl der Auslöser

Einwirkung von Innen	AÜT	SuR	GB	ELB
Versagen der Schachtfördertechnik +	3	6		
Versagen der Seilbahntechnik	3	5		
Versagen des Schachtausbaus		9		
Versagen des Rampenausbaus		9		
Versagen der Schachteinbauten		5		
Versagen der Rampeneinbauten		6		
Versagen des Ausbaus Infrastrukturbereiche*			9	
Versagen des Streckenausbaus*			9	24
Versagen des Ausbaus im Querschlag*				9
Versagen des Versatzes			3	3
Versagen des Buffers				8
Versagen technischer Einrichtungen +			12	10
Versagen des Schacht- oder Rampenverschlusses		8		
Versagen des Verschlusses im Bereich von Störungszonen			10	
Versagen des Streckenverschlusses			11	10
Versagen des Verschlusses einer Erkundungs- oder Überwachungsbohrung		7	9	8
Versagen des Bohrlochverschlusses				7
Versagen der Bohrlocheinbauten				3
Versagen des Schlittens				2
Versagen des Ausbausystems vertikales Bohrloch				10
Versagen des Ausbausystems horizontales Bohrloch				7
Versagen des Endlagergebindes			1	4
Versagen des Transferbehälters			1	1
Versagen von Bergbaumaschinen		(10)	(10)	10
Versagen von Transportfahrzeugen		(2)	(2)	2
Versagen von Einlagerungsmaschinen		(2)	(2)	2
Abschalungen und Löser		3	6	5
Flutung der Grubenbaue		6	6	5
Feuer		18	11	8
Explosion		14	10	7
Bläser		8	5	5
Freisetzung radioaktiver Stoffe		8	5	5
Freisetzung chemotoxischer Stoffe		9	6	8

(x) Zahlen in Klammern sind indirekt ermittelt; z. B. werden Fahrzeuge nur in Einlagerungsbereichen diskutiert, sind aber auch in den Grubenbauen außerhalb der ELB vorhanden.

(+) Schachtfördertechnik gehört auch zu den technischen Einrichtungen, wird aber separat behandelt.

(*) Diese drei EVI werden unter dem EVI „Versagen des Streckenausbaus“ subsumiert.

Fett markiert sind die EVI, deren Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit in Tab. 6.5 zusammengefasst sind.

Da im Jahr 2017 in Deutschland ein Auswahlverfahren für einen Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Steinsalz, Tongestein sowie in Kristallingestein neu gestartet wurde, wurde festgelegt, die Analyse der EVI auf der Grundlage eines umfassenden FEP-Kataloges für alle Wirtsgesteine durchzuführen (siehe Kapitel 1). Es hat sich gezeigt, dass dies eine sehr komplexe Aufgabe ist, da eine Vielzahl von technischen Konzepten in diesen Wirtsgesteinen möglich ist. Da eine Beschränkung auf ein Wirtsgestein oder ein Endlagersystem nicht beabsichtigt war, wurde für das Vorhaben BASEL kein Referenzkonzept festgelegt. Stattdessen wurde eine Auswahl von technischen Konzepten verwendet /HER 20/, die gewährleistet, dass alle Wirtsgesteine bei der Analyse einbezogen sind. Die entwickelte Methode wurde auf alle ausgewählten Konzepte gleichzeitig angewendet. Eine separate Betrachtung der Wirtsgesteine bzw. Endlagersysteme wurde nicht vorgenommen.

Bei dieser Vorgehensweise ist erschwerend, dass geogene Prozesse in den verschiedenen Wirtsgesteinen unterschiedliche Ausprägungen haben (z. B. hohe Konvergenz im Salz, fast keine Konvergenz im Kristallin) und dementsprechend sind auch die technischen Maßnahmen beim Auffahren des Bergwerks (z. B. Ausbau bei geringer mechanischer Gebirgsstabilität) und die Endlagerkonzepte sehr unterschiedlich. Die betrieblichen Abläufe sind in den verschiedenen Endlagerkonzepten deshalb sehr verschieden. Die gleichzeitige Berücksichtigung all dieser Endlagersysteme stellte sich als nachteilig heraus und erschwerte im Vorhaben BASEL vor allem die umfassende und nachvollziehbare Darstellung der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und Prozessen.

Bei der strikten Anwendung der Methode wurden Schwachstellen identifiziert. Durch die Einteilung des Endlagersystems in Komponenten und Prozesse wird das Gesamtsystem Endlager in kleinere, scheinbar handhabbare Einheiten zerlegt. Dies ist vor allem bei der Vermischung mehrerer technischer Konzepte schwierig. Durch die methodisch vorgegebene ausschließliche Berücksichtigung des unmittelbaren Zusammenhangs von einem Prozess mit einer Komponente war die Ableitung der EVI eine große Herausforderung. Als Ursache wurden nicht ausreichend klare Definitionen (aufgrund der Vielzahl der Konzepte) und Abgrenzungen

der FEP untereinander identifiziert, z. B. technische Einrichtungen oder Fahrzeuge. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine Vielzahl von methodischen Festlegungen getroffen, die während der Anwendung ergänzt wurden und dann systematisch zu berücksichtigen waren. Die Folgen waren vielfältig: Die Ableitung der EVI musste häufig iterativ korrigiert werden, wodurch mehrfache Wiederholungen, Inkonsistenzen und Fehler auftraten. Der für die Dokumentation einer Kausalkette vorteilhafte Ansatz, Querverweise von einer Komponenten-Prozess-Verknüpfung zu anderen Prozessen und/oder Komponenten aufzunehmen und für die Ableitung von EVI zu berücksichtigen, konnte aufgrund der Komplexität der erwarteten Wechselwirkungen nicht systematisch und konsequent durchgeführt werden.

Um diese Schwierigkeiten zu reduzieren, wird empfohlen, weitergehende Analysen zur Ableitung von EVI zukünftig für jeweils einzelne Endlagerkonzepte separat durchzuführen und von Beginn an durch die Pflege der Ergebnisse in einer Datenbank begleitet werden.

6.3 Maßnahmen zur Beherrschung von Einwirkungen von innen

Gemäß Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ /BMU 20/ sind auf Basis von Sicherheitsanalysen EVI und EVA festzulegen, welche als Auslegungsstörfälle zu bewerten und bei der Auslegung des Bergwerks zu berücksichtigen sind (Kapitel 4). Menschliches Fehlverhalten ist als mögliche Ursache eines Störfalls zu betrachten. Gering wahrscheinliche Ereignisse sind nicht als Auslegungsstörfälle einzustufen, aber zu bewerten und ggf. Maßnahmen zur Verringerung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. Auswirkungen vorzuschlagen. Demnach basiert das Sicherheitskonzept auf dem Management der identifizierten übergreifenden Einwirkungen, Sicherheitsziele sind den identifizierten Einwirkungen zugeordnet und diese Einwirkungen müssen durch Prävention und/oder Mitigation (Gegenmaßnahmen beim Eintreten eines EVI) beherrschbar sein.

Im Ergebnis der abgeleiteten EVI wurden im Vorhaben BASEL organisatorische und technische Maßnahmen benannt, die der Vermeidung und der Beherrschung der EVI in einem Endlagerbergwerk für hochradioaktive Abfälle dienen. Es wurde auf das Expertenwissen der Autoren sowie das Vorgehen und die Erfahrungen in den Endlagerbergwerken Asse, Morsleben und Konrad sowie auf Planungen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle für den potenziellen Standort Gorleben zurückgegriffen.

Einschränkungen hierbei ergeben sich zum einen dadurch, dass das Sicherheitsmanagement immer projektspezifisch ist, im Vorhaben BASEL aber generische Endlagerkonzepte mit einem geringen Detaillierungsgrad betrachtet wurden. Zum anderen wurden im Vorhaben BASEL Untersuchungen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle durchgeführt, während in den o. g. Endlagerbergwerken schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert werden. Die Liste der Maßnahmen kann daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Um Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs eines Bergwerkes zu vermeiden oder die Auswirkungen auf das Endlagersystem einzuschränken bzw. zu minimieren, sind in den untertägigen Teilsysteme (SuR, GB, ELB) teils unterschiedliche Gegenmaßnahmen für den Erhalt bzw. die Wiederherstellung der Betriebssicherheit möglich bzw. erforderlich. Mögliche Gegenmaßnahmen beim Auftreten von EVI sowohl für Prävention als auch für Mitigation sind in /LOM 20/ für die verschiedenen Teilsysteme aufgeführt. Letztlich wird auf mögliche Auswirkungen der Gegenmaßnahmen auf das Endlagersystem in der Nachverschlussphase, d. h. auf die Langzeitsicherheit, hingewiesen.

6.4 Einfluss von Bau und Betrieb eines Endlagers auf die Langzeitsicherheit

Erstes Ziel der Ableitung von EVI und der Identifizierung von Präventions- oder Mitigationsmaßnahmen ist die Sicherstellung der Betriebssicherheit (Kapitel 4). Hier unterscheidet sich ein Endlager nicht von anderen nuklearen Anlagen. Eine Besonderheit des Endlagers ist allerdings, dass es zum Ende der Betriebsphase nur teilweise (Tagesanlagen) zurückgebaut wird, und die untertägige Anlage erst dann seinem eigentlichen Zweck dient, nämlich der sicheren Aufbewahrung von radioaktiven Abfällen (Abb. 4.2 und Abb. 4.3). Die Bewertung der Langzeitsicherheit ist wesentlich vom Ausgangszustand des Endlagersystems zum Zeitpunkt der Stilllegung abhängig. Dieser Ausgangszustand ist mit Ungewissheiten behaftet, die auf Grund der dazu vergleichsweise kurzen Betriebsphase weniger durch natürliche Prozesse (z.B. Alteration von Materialien, Konvergenz)¹⁰ als vielmehr durch technische Ereignisse und Vorgänge aus dem Bau und Betrieb eines Endlagers resultieren. Präventionsmaßnahmen tragen zur Betriebssicherheit bei. Diese

¹⁰ Bei der Bewertung der Langzeitsicherheit wird der Verlauf dieser Prozesse während der Betriebsphase mitberücksichtigt.

technischen Maßnahmen können aber die Entwicklung des Endlagersystems in der Betriebsphase und den Anfangszustand des Endlagersystems in der Nachverschlussphase beeinflussen. Präventionsmaßnahmen und ihre Auswirkungen sind relativ gut zu prognostizieren und in die Systembeschreibung aufzunehmen. Ob überhaupt bzw. zu welchem Zeitpunkt Mitigationsmaßnahmen angewendet werden und welche Auswirkungen diese auf die Entwicklung des Endlagersystems haben werden, ist dagegen heute nur sehr schwer prognostizierbar. Dies bedingt zum jetzigen Zeitpunkt die fehlenden Kenntnisse über die Standortbedingungen und Standorteigenschaften bei der Entwicklung des Endlagersystems. Mit voranschreitender Entwicklung des Endlagerprogramms werden diese Ungewissheiten abnehmen.

In /LOM 20/ wurden für die abgeleiteten EVI Präventions- und Mitigationsmaßnahmen beschrieben und deren Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit bewertet. Tab. 6.5 gibt eine Zusammenfassung der Bewertung für die EVI, die bei der Analyse besonders häufig abgeleitet wurden (für das Teilsystem SuR wurde ein frei gewählter Schwellenwert > 7 , für die Teilsysteme GB und ELB > 10 angenommen). Eine häufige Ableitung zeigt die Anzahl der Auslöser eines EVI an und kann somit als Indikator der Bedeutung eines EVI herangezogen werden. Ein direkter Zusammenhang besteht allerdings nicht, da die Anzahl der Ableitung von EVI vor allem auch in der gewählten Spezifizierung der jeweiligen FEP begründet ist.

Tab. 6.5 Bewertung der Auswirkung von EVI und entsprechender Maßnahmen auf die Langzeitsicherheit

EVI <i>Komponente</i>	Technische Maßnahme P: Prävention, M: Mitigation	Auswirkung auf die LZS
Teilsystem SuR		
Versagen des Schachtausbaus <i>Schachtausbau</i>	P: Erkundung und Überwachung mit Bohrungen und Geophysik; Verwendung korrosionsbeständiger Materialien M: Temporäre Absicherung des Ausbaus bis zur Reparatur; Abpumpen von Fluidzutritten; Anpassung des Ausbausystem; bei Unmöglichkeit der Schachtsanierung: Abwerfen des Schachtes	falls eine Reparatur des Ausbaus nicht möglich ist, würde durch das Teufen eines neuen Schachtes eine zusätzliche potenzielle Wegsamkeit zwischen Einlagerungssohle und Biosphäre geschaffen ggf. Beeinflussung des geochemischen Milieus
Versagen des Rampenausbaus <i>Rampenausbau</i>	P: Erkundung und Überwachung mit Bohrungen und Geophysik; Verwendung korrosionsbeständiger Materialien, Verwendung wasserdichter und erosionsresistenter Baumaterialien M: Temporäre Absicherung des Ausbaus bis zur Reparatur; Abpumpen von Fluidzutritten; Anpassung des Ausbausystem	falls eine Reparatur des Ausbaus nicht möglich ist, würde durch das Teufen einer neuen Rampe eine zusätzliche potenzielle Wegsamkeit zwischen Einlagerungssohle und Biosphäre geschaffen ggf. Beeinflussung des geochemischen Milieus
Feuer <i>Schachteinbauten</i> <i>Rampeneinbauten</i> <i>Wirtsgestein</i> <i>Deck- und Nebengebirge</i> <i>Gase</i> <i>Flüssige Kohlenwasserstoffe</i> <i>Erkundungs- oder Überwachungsbohrungen</i>	P: Einsatz schwer entflammbarer Isoliermaterialien; Minimierung der Brandlast; Entgasungsbohrungen, gebirgsschonende Auffahrung, Schlagwetterschutz der eingesetzten Maschinen; Preventer; ausreichende Bewetterung M: Brandmelder, Schließen von Brandklappen und Wassertüren unter Tage; Löscheinrichtungen; Schutzräume für Personal (Rampe)	da alle Brandbekämpfungseinrichtungen vor der Stilllegung entfernt werden, hierdurch keine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit Erkundungs-, und Entgasungsbohrungen beeinflussen die Eigenschaften des Gebirges.

EVI Komponente	Technische Maßnahme P: Prävention, M: Mitigation	Auswirkung auf die LZS
Explosion <i>Wirtsgestein</i> <i>Deck- und Nebengebirge</i> <i>Gase</i> <i>Flüssige Kohlenwasserstoffe</i> <i>Erkundungs- oder Überwachungsbohrungen</i>	<p>P: Dem Abteufen/Vortrieb vorlaufende Erkundung; Entgasungsbohrungen; gebirgsschonende Auffahrung; Schlagwetterschutz der eingesetzten Maschinen; ausreichende Bewetterung (zur Vermeidung explosionsfähiger Gasgemische)</p> <p>M: Einsatz geeigneter Messtechnik zur Detektion explosiver Gase; Schließen von Brandklappen und Wettertüren; Löscheinrichtungen im Schacht/in der Rampe; Schutzräume für Personal (Rampe)</p>	<p>die Lösch- und Detektionseinrichtungen werden vor der Stilllegung demonstriert</p> <p>Erkundungs-, und Entgasungsbohrungen beeinflussen die Eigenschaften des Gebirges</p>
Teilsystem GB		
Versagen des Streckenausbau <i>Ausbau Richt- und Wetterstrecken</i> <i>Ausbau Infrastrukturbereich</i>	<p>P: gut einsehbare „Gefahrenstellen“; Fahrbahnen mit stoßdämpfender Wirkung; verstärkter Ausbau an Verkehrsknotenpunkten; Hinweisschilder Gefahrenstellen; Ampelanlagen; Spiegel Kurven und Kreuzungen; korrosionsbeständige Materialien; Oberflächenbeschichtung; Überwachungsmesstechnik</p> <p>M: Ertüchtigung des Streckenausbau; Temporäre Abdichtung bei Lösungszutritt; Stabilisierung bis dauerhafte Abdichtung / Stabilisierung erfolgt; Abwerfen der Strecke</p>	<p>Erhöhung des Ausbruchsvolumens</p> <p>eingesetzte Materialien beeinflussen hydrochemische Verhältnisse und führen ggf. zur Gasbildung</p> <p>Fehler bei Bohrarbeiten können die Integrität des Gebirges beeinträchtigen</p> <p>ein vorzeitiges Abwerfen der Strecke <u>vor</u> der Einlagerung von Abfällen führt zur Vergrößerung der Einlagerungsbereiche (Auffahrung, ALZ etc.), ein vorzeitiges Abwerfen <u>nach</u> Einlagerung von Abfällen bedingt vorzeitigen Verschluss / Verfüllung der Strecke</p>
Versagen technischer Einrichtungen <i>Technische Einrichtungen</i>	<p>P: gut einsehbare „Gefahrenstellen“; Fahrbahnen mit stoßdämpfender Wirkung; verstärkter Ausbau an Verkehrsknotenpunkten;</p>	<p>Erhöhung des Ausbruchsvolumens</p> <p>Änderung hydrochemischer Verhältnisse durch</p>

EVI Komponente	Technische Maßnahme P: Prävention, M: Mitigation	Auswirkung auf die LZS
	<p>Hinweisschilder an Gefahrenstellen; Ampelanlagen; Spiegel an Kurven und Kreuzungen; Wettermessungen; Temperaturfeldmessungen; Kühlung der Anlagen; korrosionsbeständige Materialien; Oberflächenbeschichtung; Isolierung; Injektionen; Einbau temporärer Dichtelemente; Überwachungsmesstechnik</p> <p>M: Reparatur und Austausch von defekten Komponenten, Absperren und Abdichten von Gefahrenbereichen, Verschluss und Überbohren</p>	<p>verbleibende Einbauten/Materialien</p> <p>Fehler bei Bohrarbeiten können die Integrität des Gebirges beeinträchtigen</p>
<p>Versagen des Verschlusses im Bereich von Störungszonen</p> <p><i>Verschlüsse im Bereich von Störungszonen</i></p>	<p>P: Überwachungsmesstechnik; korrosionsbeständiger Baustoff, redundante Verschlussysteme; Verwendung von wasserfestem Beton; Opferschichten; Funktionstest im In-situ-Versuch; zertifizierte Technik; gebirgsschonende Auffahrung; Berauben der Streckenkontur, Vergütung durch Injektionen</p> <p>M: Ertüchtigung (Injektionen) bzw. Erneuerung des Verschlusses</p>	<p>verbleibende Materialien beeinflussen das geochemische Milieu</p>

EVI <i>Komponente</i>	Technische Maßnahme P: Prävention, M: Mitigation	Auswirkung auf die LZS
Versagen des Streckenschlusses <i>Streckenschluss</i>	P: gebirgsschonende Auf- fahung; Überwachungs- messtechnik; korrosions- beständiger Baustoff; Opferschichten; redun- dante Verschlussysteme; Funktionstest im In-situ- Versuch; Überwachungs- messtechnik; Laborana- lyen unter Standortbedin- gungen; Berauben der Streckenkontur; Vergü- tung durch Injektionen M: Ertüchtigung (Injektio- nen) bzw. Erneuerung des Verschlusses	verbleibende Materialien beeinflussen das geoche- mische Milieu
Feuer <i>Technische Einrichtungen</i> <i>Wirtsgestein</i> <i>Flüssige Kohlenwasser- stoffe</i> <i>Gase</i> <i>Fahrzeuge</i>	P: Maschinenauslegung zur Minimierung der Funkenbildung; Einsatz zertifizierter Bauteile; Mini- mierung von Brandlasten; nicht-brennbaren Materia- lien; Wetter- und Tempe- raturfeldmessungen; Küh- lung der Anlagen; vorausseilende Erkundung (Bohrung, Geophysik); Überwachungsmesstech- nik wie Gasetektoren; Preventer; Schlagwetter- schutz; automatische Feu- erlöschsysteme M: Feuertüren; Wasser- trogsperren; Schutzräume; Feuerlöscher; Rauch- und Feuermelder	verbleibende Materialien beeinflussen das geoche- mische Milieu

EVI Komponente	Technische Maßnahme P: Prävention, M: Mitigation	Auswirkung auf die LZS
Explosion <i>Technische Einrichtungen</i> <i>Wirtsgestein</i> <i>Flüssige Kohlenwasserstoffe</i> <i>Gase</i> <i>Fahrzeuge</i>	P: Maschinenauslegung zur Minimierung der Funkenbildung; Einsatz zertifizierter Bauteile; nicht-brennbare und robuste Materialien; Explosionsschutz an Geräten; Gas- und Rauchdetektoren; automatische Feuerlöschsysteme, vorseilende Erkundung (Bohrung, Geophysik); Überwachungsmesstechnik wie Gasdetektoren; Preventer; Schlagwetterchutz M: Feuertüren; Wassertragsperren; Schutzräume; Feuersperren; Rauch- und Feuermelder	verbleibende Materialien beeinflussen das geochemische Milieu
Teilsystem ELB		
Versagen des Streckenausbaus <i>Ausbau Querschlag</i> <i>Ausbau Einlagerungsstrecken und -kammern</i> <i>Ausbau Bohrlochüberfahrungsstrecke</i> <i>Ausbau Strecken im Salz</i>	P: Einsatz korrosionsbeständige Materialien; Drainage zur Vermeidung von Lösungskontakt M: Stabilisierung / Ertüchtigung des Streckenausbaus; Abwerfen der Strecke	Materialien führen bei Verbleib nach Stilllegung zu einer Beeinflussung des geochemischen Milieus und ggf. zur Gasbildung Fehler bei Bohrarbeiten können die Integrität des Gebirges beeinträchtigen ein vorzeitiges Abwerfen der Strecke <u>vor</u> Einlagerung von Abfällen führt zu einer Vergrößerung der Einlagerungsbereiches (Neuauffahrung, Vergrößerung ALZ etc.) ein vorzeitiges Abwerfen <u>nach</u> Einlagerung von Abfällen der Strecke führt zu einem nicht vorgesehenen Verschluss / Verfüllung der Strecke
Versagen technischer Einrichtungen <i>Technische Einrichtungen</i>	P: Überwachungsmesstechnik; Isolierung; Einsatz korrosionsbeständiger Materialien	unsachgemäß erstellte Bohrungen beeinträchtigen die Integrität des Wirtsgesteins oder stellen

EVI Komponente	Technische Maßnahme P: Prävention, M: Mitigation	Auswirkung auf die LZS
	M: Reparatur; Abdichtung durch Injektionen oder wasserdichten Ausbau	Wegsamkeiten im Gebirge dar
Versagen des Streckenverschlusses <i>Verschlussbauwerke</i>	P: gebirgsschonende Streckenauffahrung; Erprobung der betrieblichen Abläufe durch Errichtung eines In-situ-Bauwerkes; Überwachungsmesstechnik; Vergütung aufgelockerter Gebirgsbereiche durch Zementinjektionen M: Stabilisierung / Ertüchtigung des Streckenverschlusses	Materialien führen bei Verbleib nach Stilllegung zu einer Beeinflussung des geochemischen Milieus und ggf. zur Gasbildung
Versagen des Ausbausystems vertikales Bohrloch <i>Ausbausystem vertikales Bohrloch</i>	P: Überwachungsmesstechnik; Einsatz korrosionsbeständiger Materialien M: Rauben und Neueinbau der Ausbauten; Rückholen des Einlagerungsgebindes; Nacharbeiten des Bohrloches; Verschließen des Bohrloches; ggf. Abwurf des Bohrloches	Technische Fehler bei Bohrarbeiten können die Integrität des Gebirges beeinträchtigen ein vorzeitiges Abwerfen des Bohrloches <u>vor</u> Einlagerung von Abfällen führt zu einer Vergrößerung des Einlagerungsbereiches (Neuauffahrung, Vergrößerung ALZ etc.) ein vorzeitiges Abwerfen des Bohrloches <u>nach</u> Einlagerung von Abfällen führt zu einem nicht vorgesehenen Verschluss / Verfüllung des Bohrloches
Versagen von Bergbaumaschinen <i>Fahrzeuge</i>	P: offener oder geschlossener Ausbau zur Vermeidung von Löserfällen (Betonchalen, Spritzbeton, Schutzbleche, Anker / Stahlnetze); Fahrzeuge mit Schutzeinrichtungen (Aufprallblechen und Stahlgittern); Berauben der Firste M: Reparatur oder Tausch defekter Komponenten	keine

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass folgende Einflüsse auf die Langzeitsicherheit durch die Maßnahmen in der Betriebsphase auftreten können:

- Die für die Maßnahmen eingesetzten Materialien beeinflussen das geochemische Milieu in jedem Fall während der Betriebsphase, bei Verbleib der Materialien auch langfristig in der Nachverschlussphase. Ein wichtiger Einfluss ist beispielsweise der Einsatz von Zement (Ausbau, Injektionen) und dessen Einfluss auf den pH-Wert. Der Einfluss ist im Einzelfall nicht gravierend, jedes zusätzlich eingebrachte Material erhöht aber die Komplexität des Systems und erschwert damit die Bewertung des geochemischen Milieus im Endlagersystem und damit der Langzeitsicherheit insgesamt.
- Neben ihrem Einfluss auf das geochemische Milieu können einige der eingesetzten und verbleibenden Stoffe (Metalle und Organika) zu einer signifikanten Gasbildung im Endlager führen. Eine wichtige Quelle verbleibender gasbildender Materialien sind dabei auch die Endlagergebäude selbst (Stahl oder Gusseisen der Behälter, Polyethylen in der Behälterwand zur Neutronenmoderation).
- Ein korrodierter Ausbau kann Auswirkungen auf die mechanischen und hydraulischen Entwicklungen in der Nachverschlussphase haben und ggf. zu Wegsamkeiten im Endlagersystem führen.
- Jede Bohrtätigkeit (Erkundung, Überwachung, Drainage) beeinflusst das umliegende Gebirge. Bei fehlerhafter Durchführung oder Verfüllung kann das letztlich auch zu einer Beeinträchtigung der Integrität des Barrieregesteins führen.
- Jede Erhöhung des Ausbruchsvolumens (Fluchtwege, ausreichend Platz zur Vermeidung von Arbeitsunfällen etc.) reduziert die Mächtigkeit des umliegenden Gebirges bzw. ist ggf. als potenzielle Wegsamkeit zu betrachten.
- Ist es notwendig, neue, nicht geplante Grubenbaue aufzufahren (z.B. Umfahrung von Störungen, Abwerfen von nicht geeigneten Einlagerungsgrubenbauen) sind diese Grubenbaue als potenzielle Wegsamkeit zu betrachten.
- Die technischen Einrichtungen zur Gewährleistung der Rückholung (Liner, Verfüllung) beeinflussen die mechanischen und hydraulischen Entwicklungen im Einlagerungsbohrloch.

7 Verwertung der Ergebnisse

Im Vorhaben BASEL wurde eine Methode entwickelt, um für den Safety Case eine Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und der Langzeitsicherheit durchführen zu können. Mit diesen Werkzeugen soll die in § 17 der EndSiAnfV erhobene Anforderungen, dass

- die für die Sicherheit des Endlagers relevanten Anlagenzustände während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung systematisch zu ermitteln sind und
- Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht erheblich und nicht mehr als unvermeidlich beeinträchtigen dürfen,

entsprochen werden. Basierend auf in den FuE-Vorhaben ANSICHT, KONEKD, KOSINA und VSG entwickelten technischen Endlagerkonzepten wurden im Vorhaben BASEL die folgenden Werkzeuge für die Bewertung der Auswirkungen von Bau und Betrieb auf die Nachverschlussphase erarbeitet (Abb. 7.1):

- Grundzüge eines Sicherheitskonzeptes für den Bau und Betrieb eines Endlagers (Kapitel 4.2)
- Entwicklung eines FEP-Kataloges für den Bau und Betrieb eines Endlagers (Kapitel 6.1)
- Ableitung von EVI mit Hilfe des FEP-Kataloges (Kapitel 6.2)
- Identifizierung von Maßnahmen zur Beherrschung der EVI (Kapitel 6.3)
- Bewertung möglicher Auswirkungen der Maßnahmen auf die Langzeitsicherheit (Kapitel 6.4)

Die Ableitung der Anforderungen der Langzeitsicherheit an Bau und Betrieb des Endlagers basiert auf (Abb. 7.1):

- Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase (Nutzung vorhandener Ergebnisse aus den FuE-Vorhaben ANSICHT, CHRISTA-II und VSG)
- Entwicklung eines FEP-Kataloges für die Nachverschlussphase (Nutzung vorhandener Ergebnisse aus den FuE-Vorhaben ANSICHT, CHRISTA-II und VSG)
- Identifizierung von Anforderung an die Betriebsphase aus der Nachverschlussphase (Kapitel 5)

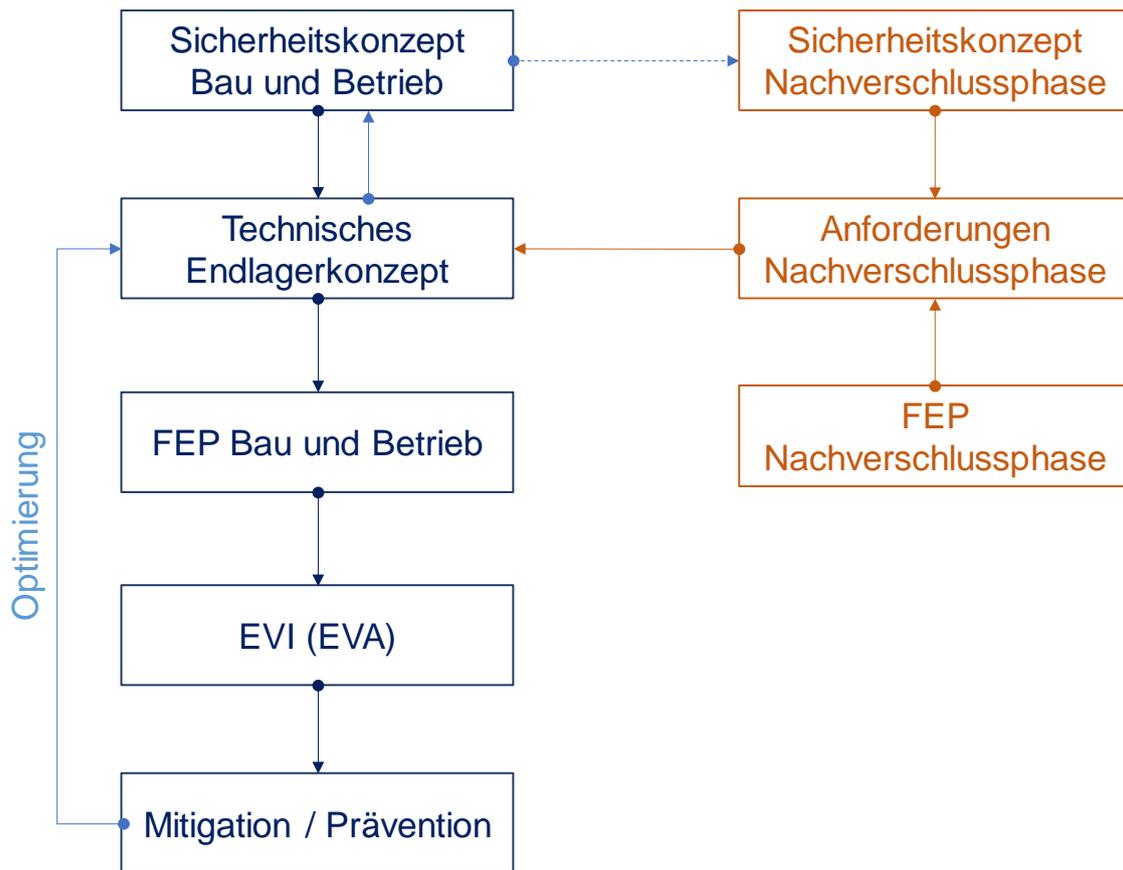


Abb. 7.1 Iteratives Vorgehen zur Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und der Langzeitsicherheit (Nachverschlussphase)

Zwei Prozessschritte in dem beschriebenen iterativen Prozess konnten im Vorhaben BASEL auf Grund der Verwendung generischer Konzepte nicht durchgeführt werden:

1. Bewertung der Wechselwirkungen hinsichtlich einer Optimierung des technischen Endlagerkonzeptes
2. Bewertung der technischen Maßnahmen dahingehend, ob damit die EVI beherrschbar sind und eine Abwägung der Maßnahmen gegeneinander (Kapitel 2)

Der neue methodische Ansatz der Verwendung eines FEP-Katalogs analog zur Vorgehensweise im Langzeitsicherheitsnachweis hat sich als geeignete Vorgehensweise für die Erstellung einer umfassenden und nachvollziehbaren System- bzw. Anlagenbeschreibung für den Bau und Betrieb eines Endlagers ergeben. Der auf dem FEP-Katalog aufbauende Ansatz zur systematischen Ableitung der EVI stellt die umfassende Berücksichtigung

sichtigung der Informationen aus den FEP sicher. Zwei Prozessschritte in dem in beschriebenen iterativen Prozess konnten im Vorhaben BASEL auf Grund der Verwendung generischer Konzepte nicht durchgeführt werden:

- Bewertung der Wechselwirkungen hinsichtlich einer Optimierung des technischen Endlagerkonzeptes
- Bewertung der technischen Maßnahmen dahingehend, ob damit die EVI beherrschbar sind und eine Abwägung der Maßnahmen gegeneinander (Kapitel 2)

Aus den gleichen Gründen erfolgte auch keine Rückkopplung eines optimierten technischen Endlagerkonzeptes auf die Sicherheitskonzepte für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase (siehe Abb. 7.1).

Bei einer Fortführung der Arbeiten wird empfohlen, bei weiteren Untersuchungen ein konkretes Konzept festzulegen. Dies ermöglicht eine klarere und nachvollziehbarere Abgrenzung der FEP und der Diskussion der Wechselwirkungen der FEP. Die Darstellung und Diskussion möglicher Maßnahmen zur Prävention oder Mitigation der Konsequenzen der EVI ist ansonsten durch die gemeinsame Betrachtung vieler verschiedener Endlagerkonzepte mit geringem Detaillierungsgrad zu stark eingeschränkt. Hier wäre durch die detailliertere Betrachtung eines einzelnen Konzeptes eine konkretere Diskussion möglich.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur effektiven Nutzung eines projektspezifischen FEP-Katalogs wäre die Nutzung einer FEP-Datenbank. Dafür müssten die für den Langzeitsicherheitsnachweis entwickelten Datenbankkonzepte an die Anforderungen der Betriebssicherheitsanalyse angepasst werden. Der methodische Ansatz zur systematischen Ableitung der EVI stellt die umfassende Berücksichtigung der Informationen aus der FEP-Datenbank sicher. Zur Weiterentwicklung der Methodik wird vorgeschlagen, bei der Ableitung der EVI eine Art der Dokumentation zu wählen, die das mehrfache Beschreiben identischer Zusammenhänge minimiert oder Zusammenhänge, Kausalitäten und Verknüpfungen effektiver erkennen lässt. Die Wechselwirkungen zwischen Komponenten und Prozessen können so transparenter dargestellt werden. Darüber hinaus müssen bereits bestehende Verknüpfungen erkannt und mögliche Rückschlüsse aus Zusammenhängen übertragen werden. Der Bottom-up-Ansatz der Methodik zur EVI-Ableitung beschränkt sich auf eine Verknüpfungsebene zwischen Komponenten und Prozessen. Wirkungsketten wurden im Vorhaben BASEL nicht berücksichtigt. Ein erster Ansatz zu deren Analyse ist die betrachtete Verknüpfung mehrerer EVI bzw. EVA.

Für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSu) ist gemäß § 7 Absatz 4 der EndlSiUntV nur die grundsätzliche Möglichkeit eines sicheren Betriebes darzustellen, jedoch keine vollständige betriebliche Sicherheitsanalyse durchzuführen. Das bedeutet, dass im Rahmen des Standortauswahlverfahrens frühzeitig betriebliche Sicherheitsanalysen vorzunehmen sind, für die aller Voraussicht nach keine detaillierten technischen Endlagerkonzepte vorliegen werden. Gerade in diesem Verfahrensstand können Ergebnisse aus dem Vorhaben BASEL von Nutzen sein, z. B. die Beschreibung der Anlagen über Tage /LEO 19/. Zur Ermittlung einer Vorgehensweise der betrieblichen Sicherheitsanalyse in den vSu bieten die Ergebnisse aus dem Vorhaben BASEL eine gute Grundlage. Mit einem Referenzkonzept und der datenbankgestützten Auswertung der FEP könnte die Weiterentwicklung einer Vorgehensweise für die betriebliche Sicherheitsanalyse im Rahmen der vSu weitergeführt werden, vor allem durch die Zuordnung der abgeleiteten EVI und technischen Maßnahmen zu den geforderten Anlagenzuständen.

Literaturverzeichnis

- /BER 17/ Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., Simo Kuate, E.: Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB, Peine, 2017.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J. (2012): Szenarientwicklung, Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-284, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 21 S., Bonn, 30. September 2010.
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012, BAnz AT 30.03.2015 B2, Neufassung vom 3. März 2015.
- /BMU 20/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Verordnungsentwurf vom 06.04.2020.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum AP 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2011.

- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- /BOL 18/ Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Minkley, W., Buhmann, D., Mönig, J., Eicke-meier, R., Popp, T., Fahland, S., Prignitz, S., Filbert, W., Reinhold, K., Hammer, j., Simo, E., Kindlein, J., Thiemeyer, T., Knauth, M., Völkner, E., Wenting Liu, Wolf, J.: Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany. BGE Technology GmbH, BGE TEC 2018-13, Peine, 2018.
- /DOE 14a/ US Energy Department: Accident Investigation Report, Underground Salt Haul Truck Fire at the Waste Isolation Pilot Plant, February 5, 2014. Office of Environmental Management, 2014.
- /DOE 14b/ US Energy Department: Accident Investigation Report, Phase 1: Radiological Release Event at the Waste Isolation Pilot Plant, February 14, 2014. Office of Environmental Management, 2014.
- /DOE 15/ US Energy Department: Accident Investigation Report, Phase 2: Radiological Release Event at the Waste Isolation Pilot Plant, February 14, 2014. Office of Environmental Management, 2015.
- /FAP 13/ Fischer-Appelt, K. Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebereicht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2013.
- /FAS 18/ Faßmann, W., Peschke, J.: Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit in PSA für übergreifende Einwirkungen. GRS-516, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2018.

- /HER 20/ Herold, P., Bertrams, N., Buhmann, D., Filbert, W., Förster, B., Leonhard, P., Lommerzheim, A., Noseck, U.: Beschreibung der generischen Endlagersysteme für das Vorhaben BASEL. GRS-619, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2020.
- /IAEA 06/ International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards, Safety Requirements No. WS-R-4. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2006.
- /IAEA 11a/ International Atomic Energy Agency: Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements No. SSR-5, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2011.
- /IAEA 11b/ International Atomic Energy Agency: Report of the GEOSAF Working Group on Operational Safety. GEOSAF project. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2011.
- /IAEA 11c/ International Atomic Energy Agency: Position Paper of the GEOSAF Working Group on Operational Safety. GEOSAF project. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2011.
- /IAEA 11d/ International Atomic Energy Agency: GEOSAF - The International Intercomparison and Harmonisation Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal. Final report. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2011.
- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-23. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2012.
- /IAEA 16a/ International Atomic Energy Agency: Managing integration of post-closure safety and pre-closure activities in the Safety Case for Geological Disposal. Draft TECDOC, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2016.

- /IAEA 16b/ International Atomic Energy Agency: GEOSAF-II: Task Group on Operational Safety. Progress Report. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2016.
- /ICRP 13/ International Commission on Radiological Protection (ICRP) Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 122, Ann. ICRP 42(3), 2013.
- /IGSC 08/ IGSC: Summary record of the topical session of 10th Meeting of the IGSC. Balancing Operational and Long-Term Safety Considerations, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 2008.
- /JOB 15/ Jobmann, M., Lommerzheim, A.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Standortmodell SÜD. Technischer Bericht, FKZ 02E11061, TEC-26-2015-TB, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2015.
- /JOB 17/ Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L., Ziefle, G.: Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland. Synthesebericht, FKZ 02E11061, TEC-19-2016-AB, BGE TECHNOLOGY GmbH Peine, 2017.
- /LEO 19/ Leonhardt, J., Bertrams, N., Herold, P., Lommerzheim, A.: Vorhaben BASEL. Beschreibung eines generischen Modells der Tagesanlagen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Technischer Bericht, FKZ 02E11486, BGE TEC 2019-32, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2019.
- /LOM 15/ Lommerzheim, A., Jobmann, M.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Technischer Bericht, FKZ 02E11061, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-14-2015-TB, Peine, 2015.
- /LOM 20/ Lommerzheim, A., Förster, B., Bertrams, N., Buhmann, D., Herold, P., Leonhardt, J., Noseck, U., Wolf, J.: Ableitung von Einwirkungen von innen für die Betriebsphase eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle. FKZ 02E11486, GRS-618, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2020.

- /MOE 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- /NAG 14/ Nagra: Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase: Vorgaben, Vorgehen und Dokumentation der Ergebnisse. Arbeitsbericht NAB 14-51, Wettingen, Schweiz, 2014.
- /NEA 92/ OECD/NEA: Systematic approaches to scenario development. Report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment. OECD Publications, Paris, 1992.
- /NEA 00/ OECD/NEA: Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Vers. 1.2. OECD/NEA Publ., Radioactive Waste Management, Paris, 2000.
- /NEA 13/ OECD/NEA: The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. Report NEA/RWM/R(2013)1. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 2013.
- /NEA 15/ OECD/NEA: IGSC Scenario Development Workshop. Workshop Proceedings, 01.06.-03.06.2015, Issy-les-Moulineaux, 2015.
- /NEA 16/ OECD/NEA: Joint NEA/IAEA workshop on operational safety of geological repositories. Synopsis. NEA draft document. Paris, 29.06.-01.07.2016.
- /NEA 19/ OECD/NEA: International FEP List Version 3. Paris, 2019.
- /PEI 12/ Peiffer, F., McStocker, B.: Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten. Bericht zum Arbeitspaket 12, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-279, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- /POS 12/ Posiva Oy: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis; Posiva Oy, Technical Report 2012-12, Olkiluoto, 2012.

- /RUE 14/ Rübel, A., Meleshyn, A.: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. FKZ 02E11061, GRS-338, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 2014.
- /SKB 11/ SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Technical Report TR-11-01, SKB, Schweden, 2011.
- /STA 14/ Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Keller, S., Gerardi, J.: FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau. FKZ 02E11061, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR, 2014.
- /STA 16/ Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A. (2016). FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD - Konzept und Aufbau. FKZ 02E11061, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR, 2016.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Unterschiedliche Phasen eines Endlagers im Sicherheitsnachweis, Verwendung der Begriffe im Vorhaben BASEL.....	2
Abb. 3.1	Iterative Vorgehensweise bei der Entwicklung des Endlagerdesigns; in Anlehnung an das Konzept von SKB und Posiva, nach /NEA 16/	10
Abb. 3.2	Schematische Darstellung des schrittweisen Vorgehens bei der Festlegung der zu treffenden Maßnahmen zur sicherheitsgerichteten Optimierung der Auslegung des Endlagers und der Betriebsabläufe /NAG 14/.....	11
Abb. 4.1	Hierarchie des Bergrechts in Deutschland	18
Abb. 4.2	Schematische Illustration der Entwicklung einer konventionellen Nuklearanlage nach /NEA 16/.....	20
Abb. 4.3	Schematische Illustration der Entwicklung eines Endlagerbergwerkes für radioaktive Abfälle nach /NEA 16/.....	20
Abb. 6.1	Zuordnung von Komponenten zu den Teilsystemen unter Tage	34
Abb. 6.2	Formalisiertes Vorgehen zur Ermittlung von EVI innerhalb eines Teilsystems.....	39
Abb. 7.1	Iteratives Vorgehen zur Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und der Langzeitsicherheit (Nachverschlussphase)	58

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Ableitung von Maßnahmen für den Bau und Betrieb eines Endlagers aus den Anforderungen der Langzeitsicherheit.....	26
Tab. 6.1	Funktionen der Komponenten für die Betriebssicherheit im Teilsystem Schächte und Rampen (Teilsystem SuR)	35
Tab. 6.2	Funktionen der Komponenten für die Betriebssicherheit in den Grubenbauen (Teilsystem GB)	36
Tab. 6.3	Funktionen der Komponenten für die Betriebssicherheit in den Einlagerungsbereichen (Teilsystem ELB)	37
Tab. 6.4	Abgeleitete EVI in den vier Teilsystemen und Anzahl der Auslöser	44
Tab. 6.5	Bewertung der Auswirkung von EVI und entsprechender Maßnahmen auf die Langzeitsicherheit	49
Tab. A.1	Externe Faktoren, FEP und EVI für den Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle	72
Tab. B.1	External factors, FEP, and internal hazards during the construction and operation for a HLW repository	85

A Anlage: Externe Faktoren, FEP und EVI für den Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle

Die folgende Tabelle ist anhand der Teilsysteme gegliedert:

- 0: Übergeordnete Faktoren inkl. EVA
- 1: Anlagen über Tage
- 2: Schächte und Rampen
- 3: Grubenbaue außerhalb der Einlagerungsbereiche
- 4: Einlagerungsbereiche

In den Teilsystem 1 bis 4 werden jeweils unter X.1 die Komponenten, unter X.2 die Prozesse und unter X.3 die EVI aufgeführt.

Bedeutung der in der Tabelle für Endlagerkonzepte verwendeten Abkürzungen:

- SL: Streckenlagerung (S: Salz, T: Ton)
- BLT: Bohrlochlagerung in Ton
- VBLS: Vertikale Bohrlochlagerung in Salz
- HBLS: Horizontale Bohrlochlagerung in Salz
- TLB: Direkte Endlagerung: Transport- und Lagerbehälter in Salz
- KBS: modifiziertes skandinavisches Konzept in Kristallingestein mit Bohrlochlagerung
- mewG: Bohrlochlagerung in multiplen ewG in Kristallingestein
- üewG: Streckenlagerung mit überlagerndem ewG in Kristallingestein

Tab. A.1 Externe Faktoren, FEP und EVI für den Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept									
		Ton		Steinsalz				Kristallin			
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLS	TLB	KBS	mewG	üewG	
0	Übergeordnete Faktoren										
0.1	Unterbrechungen im Betriebsablauf										
0.1.1	Unterbrechungen im Betriebsablauf	konzeptunabhängig									
0.2	Menschliche Einwirkungen										
0.2.1	Menschliches Versagen	konzeptunabhängig									
0.2.2	Einflüsse menschlicher Aktivitäten										
0.3	Einwirkungen von außen (EVA)										
0.3.1	Erdbeben	konzeptunabhängig									
0.3.2	Anlagenexterner Stromausfall										
0.3.3	Flutung des Endlagers durch Hochwasser										
0.3.4	Flugzeugabsturz										
0.3.5	Einwirkungen gefährlicher Stoffe										
0.3.6	Anlagenexterne Explosion										
0.3.7	Extreme meteorologische Bedingungen										
0.3.8	Anlagenexterner Brand und sonstige standortbedingte Einwirkungen										
1	FEP: Anlagen über Tage										
1.1	Komponenten										
1.1.1	Gebäude und Fundamente	In der FEP-Liste wird bei den Tagesanlagen nicht nach Einlagerungskonzepten unterschieden									
1.1.2	Endlagergebäude und Transferbehälter (Tagesanlagen)										
1.1.3	Schienenfahrzeuge										
1.1.4	Radfahrzeuge										
1.1.5	Krananlagen										
1.1.6	Trocknungsanlage										
1.1.7	Technische Einrichtungen (Entladehalle)										
1.1.8	Technische Einrichtungen (Pufferhalle)										
1.1.9	Technische Einrichtungen (Heiße Zelle)										
1.1.10	Technische Einrichtungen (Dekontamination)										
1.1.11	Technische Einrichtungen (Werkstatt)										

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz			Kristallin			
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBSL	TLB	KBS	mewG	üewG
1.1.12	Technische Einrichtungen (Sammlung und Behandlung radioaktiver Betriebsabfälle)									
1.1.13	Tore und Schleusen									
1.1.14	Schachtförderanlage									
1.1.15	Antrieb der Seilbahn*									
1.1.16	Hauptgrubenlüfteranlage									
1.1.17	Einrichtungen zur Energieversorgung									
1.1.18	Einrichtungen zur Grubenwasseraufbereitung									
1.1.19	Lösungen (Tagesanlagen)									
1.1.20	Gase (Tagesanlagen)									
1.1.21	Flüssige Kohlenwasserstoffe (Tagesanlagen)									
1.2	Prozesse									
1.2.1	Betrieb der Trocknungsanlage									
1.2.2	Betrieb von Schienenfahrzeugen (außerhalb der Umschlaghalle)									
1.2.3	Betrieb von Schienenfahrzeugen (innerhalb der Umschlaghalle)									
1.2.4	Betrieb von Radfahrzeugen									
1.2.5	Betrieb der Krananlagen									
1.2.6	Betrieb der Tore und Schleusen									
1.2.7	Schachtförderbetrieb									
1.2.8	Seilbahnbetrieb*									
1.2.9	Betrieb der Lüfteranlagen									
1.2.10	Reparaturarbeiten in der Heißen Zelle									
1.2.11	Reparatur und Wartung (Tagesanlagen)									
1.2.12	Betrieb der Wasseraufbereitung									
1.2.13	Radiologische Kontrolle/Überwachung									
1.2.14	Dekontamination									
1.2.15	Konditionierung der Betriebsabfälle									
1.2.16	Mechanische Lasten									
1.2.17	Metallkorrosion (Tagesanlagen)									
1.2.18	Zementkorrosion (Tagesanlagen)									
1.2.19	Wärmestrom (Tagesanlagen)									

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz				Kristallin		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mewG	üewG
1.2.20	Thermische Expansion oder Kontraktion (Tagesanlagen)									
1.3	Einwirkungen von innen (EVI) **									
1.3.1	Versagen der Schachtfördertechnik									
1.3.2	Versagen der Seilbahntechnik*									
2	FEP: Schächte und Rampen									
2.1	Komponenten									
2.1.1	Schacht- und Rampenausbau	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.2	Schachteinbauten	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.3	Rampeneinbauten							x	x	x
2.1.4	Wirtsgestein (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.5	Deck- und Nebengebirge	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.6	Auflockerungszone (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.7	Lösungen (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.8	Flüssige Kohlenwasserstoffe (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.9	Gase (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.10	Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.11	Schacht- und Rampenverschluss	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.12	Endlagergebäude und Transferbehälter (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.13	Fahrzeuge (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2	Prozesse und Ereignisse									
2.2.1	Abteufen und Ausbau des Schachtes	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.2	Auffahren und Ausbauen der Rampe							x	x	x
2.2.3	Montage der Schacht- und Rampeneinbauten	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.4	Schachtbetrieb	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.5	Rampenbetrieb							x	x	x
2.2.6	Bewitterung (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.7	Metallkorrosion (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.8	Zementkorrosion (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.9	Spannungsänderung (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.10	Konvergenz (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz				Kristallin		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mewG	üewG
2.2.11	Fluidzutritt (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.12	Zersetzung von Organika (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.13	Erstellen und Verschließen einer Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.14	Einbringen des Schacht- und Rampenverschlusses	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.15	Wärmestrom (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.16	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.17	Alteration der Auflockerungszone (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.18	Thermische Expansion oder Kontraktion (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.19	Überwachung (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.20	Reparatur und Wartung (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3	Einwirkungen von innen (EVI)									
2.3.1	Versagen der Schachtfördertechnik	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.2	Versagen der Seilbahntechnik							x	x	x
2.3.3	Versagen des Schacht- und Rampenausbaus	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.4	Versagen der Schacht- und Rampeneinbauten	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.5	Versagen des Schacht- oder Rampenverschlusses	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.6	Versagen des Verschlusses einer Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.7	Versagen von Bergbaumaschinen (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.8	Versagen von Transportfahrzeugen (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.9	Versagen von Einlagerungsmaschinen (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.10	Abschalungen und Löser (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.11	Flutung der Grubenbaue (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.12	Feuer (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.13	Explosion (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.14	Bläser (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz				Kristallin		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLS	TLB	KBS	mewG	üewG
2.3.15	Freisetzung radioaktiver Stoffe (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.16	Freisetzung chemotoxischer Stoffe (Schacht und Rampe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	FEP: Grubenbaue außerhalb der Einlagerungsbereiche									
3.1	Komponenten									
3.1.1	Ausbau Richt- und Wetterstrecken	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.2	Ausbau der Infrastrukturbereiche	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.3	Technische Einrichtungen (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.4	Wirtsgestein (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.5	Auflockerungszone (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.6	Lösungen (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.7	Flüssige Kohlenwasserstoffe (Grubenbau)	x	x	x	x	x				
3.1.8	Gase (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.9	Versatz (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.10	Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.11	Streckenverschluss	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.12	Verschlüsse im Bereich von Störungszonen	x	x					x	x	x
3.1.13	Endlagergebäude und Transferbehälter (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.14	Fahrzeuge (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2	Prozesse und Ereignisse									
3.2.1	Auffahrung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.2	Ausbau (Grubenbau)	x	x					x	x	x
3.2.3	Transportverkehr im Überwachungs- und Kontrollbereich	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.4	Bewetterung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.5	Metallkorrosion (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.6	Zementkorrosion (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.7	Spannungsänderung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.8	Konvergenz (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.9	Fluidzutritt (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.10	Zersetzung von Organika (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz				Kristallin		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mewG	üewG
3.2.11	Entfernen von technischen Einrichtungen (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.12	Einbringen von Versatz (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.13	Erstellen und Verschließen einer Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.14	Errichten eines Streckenverschlusses	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.15	Errichten eines Verschlusses im Bereich einer Störungszone	x	x					x	x	x
3.2.16	Wärmestrom (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.17	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen (Grubenbau)	x	x					x	x	x
3.2.18	Alteration der Auflockerungszone (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.19	Thermische Expansion oder Kontraktion (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.20	Überwachung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.21	Reparatur und Wartung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3	Einwirkungen von innen (EVI)									
3.3.1	Versagen des Ausbaus Infrastrukturbereiche	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.2	Versagen des Streckenausbaus (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.3	Versagen des Versatzes (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.4	Versagen technischer Einrichtungen (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.5	Versagen des Verschlusses im Bereich von Störungszonen	x	x					x	x	x
3.3.6	Versagen des Streckenverschlusses	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.7	Versagen des Verschlusses einer Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.8	Versagen des Endlagergebindes oder Transferbehälters (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.9	Versagen von Bergbaumaschinen (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.10	Versagen von Transportfahrzeugen (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.11	Versagen von Einlagerungsmaschinen (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.12	Abschalungen und Löser (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.13	Flutung der Grubenbaue (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.14	Feuer (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz				Kristallin		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mewG	üewG
3.3.15	Explosion (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.16	Bläser (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x			
3.3.17	Freisetzung radioaktiver Stoffe (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.18	Freisetzung chemotoxischer Stoffe (Grubenbau)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	FEP: Einlagerungsbereiche									
4.1	Komponenten									
4.1.1	Ausbau Querschlag	x	x							x
4.1.2	Ausbau der Einlagerungsstrecken und -kammern	x							x	x
4.1.3	Ausbau der Bohrlochüberfahrungsstrecken		x		x			x	x	
4.1.4	Ausbau der Strecken in Salz (Einlagerungsbereich)					x	x			
4.1.5	Ausbausystem vertikales Bohrloch		x		x			x	x	
4.1.6	Ausbausystem horizontales Bohrloch					x				
4.1.7	Bohrlocheinbauten und Schlitten						x			
4.1.8	Technische Einrichtungen (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.9	Wirtsgestein (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.10	Auflockerungszone (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.11	Lösungen (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.12	Flüssige Kohlenwasserstoffe (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x			
4.1.13	Gase (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.14	Versatz (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.15	Buffer in Einlagerungsstrecken	x								x
4.1.16	Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.17	Bohrlochverschluss		x		x	x		x	x	
4.1.18	Verschlussbauwerke	x	x					x	x	
4.1.19	Endlagergebäude und Transferbehälter (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.20	Fahrzeuge (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2	Prozesse und Ereignisse									
4.2.1	Auffahrung von Strecken (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.2	Bohren eines Einlagerungsbohrlochs		x		x	x	x	x	x	
4.2.3	Ausbau von Strecken (Einlagerungsbereich)	x	x					x	x	x

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz				Kristallin		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mewG	üewG
4.2.4	Ausbau eines Einlagerungsbohrlochs		x		x	x			x	
4.2.5	Einlagerungsbetrieb	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.6	Bewetterung (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.7	Metallkorrosion (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.8	Zementkorrosion (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.9	Spannungsänderung (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.10	Konvergenz (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.11	Fluidzutritt (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.12	Zersetzung von Organika (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.13	Einbringen von Buffer und Versatz (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.14	Erstellen und Verschließen einer Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.15	Errichten eines Verschlussbauwerkes (Einlagerungsbereich)	x	x					x	x	
4.2.16	Errichten des Verschlusses einer Einlagerungsbohrung		x			x		x	x	
4.2.17	Radioaktiver Zerfall	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.18	Radiolyse	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.19	Wärmestrom (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.20	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen (Einlagerungsbereich)	x	x					x	x	x
4.2.21	Alteration der Auflockerungszone (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.22	Thermische Expansion oder Kontraktion (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.23	Überwachung (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.24	Reparatur (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3	Einwirkungen von innen (EVI)									
4.3.1	Versagen des Streckenausbaus (Einlagerungsbereich)	x		x				x	x	x
4.3.2	Versagen des Versatzes (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.3	Versagen des Buffers	x	x					x	x	
4.3.4	Versagen technischer Einrichtungen (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Endlagerkonzept								
		Ton		Steinsalz				Kristallin		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBSL	TLB	KBS	mewG	üewG
4.3.5	Versagen des Streckenverschlusses (Einlagerungsbereich)	x	x					x	x	
4.3.6	Versagen des Verschlusses einer Erkundungs- oder Überwachungsbohrung (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.7	Versagen des Bohrlochverschlusses		x		x	x		x	x	
4.3.8	Versagen der Bohrlocheinbauten						x			
4.3.9	Versagen des Schlittens						x			
4.3.10	Versagen des Ausbausystems vertikales Bohrloch		x		x			x	x	
4.3.11	Versagen des Ausbausystems horizontales Bohrloch		x			x		x	x	
4.3.12	Versagen des Endlagergebindes oder Transferbehälters (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.13	Versagen von Bergbaumaschinen (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.14	Versagen von Transportfahrzeugen (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.15	Versagen von Einlagerungsmaschinen (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.16	Abschalungen und Löser (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.17	Flutung der Grubenbaue (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.18	Feuer (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.19	Explosion (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.20	Bläser (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x			
4.3.21	Freisetzung radioaktiver Stoffe (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.22	Freisetzung chemotoxischer Stoffe (Einlagerungsbereich)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.23	Kritikalität	x	x	x	x	x	x	x	x	x

* gilt nur für die Konzepte im Kristallingestein

** für die Anlagen über Tage werden nur solche EVI abgeleitet, die sich auf den Transport in Schächten und Rampen beziehen (2)

B Anlage: Extended Summary

In a safety case, a comprehensive set of safety arguments must be compiled and the operator's confidence in the operational and long-term safety of the disposal facility must be demonstrated and communicated.

During the last decade a paradigm shift can be observed regarding the contents/structure of safety cases for repositories for high-level radioactive waste. It has become more and more obvious that pre-closure safety and post-closure safety are not stand-alone elements of the assessment. Instead it is important to recognize that the human-induced activities and naturally occurring processes and events during the construction and operation (operational phase) define the initial state for the repository system after closure (and therewith its long-term evolution). The operational phase is thus of high importance for the assessment of long-term safety and it is not enough only evaluating hazards regarding their potential consequences for the workers in the repository and men and environment outside. The numerous links between pre- and post-closure arguments of the safety case call for a methodology to analyse and document the relationships and to determine the conditions of the repository at the time of closure, which form the basis of the demonstration that the facility is safe over the long term. For a comprehensive and convincing integrated safety case an assessment and documentation of the interactions between operational safety and post-closure safety is needed.

The need to ensure operational safety including radiation protection during the operational phase will require specific measures that influence the design and operational planning of a deep geological disposal facility. Regulations for operational safety are generally based on methods and measures gained from surface nuclear facilities and underground conventional facilities. Contrary to such facilities, the implementation of a repository has to comply with

- i) regulations from construction and operation of conventional underground installations such as mines or tunnels and additionally
- ii) requirements because post-closure safety must be guaranteed for hundreds of thousands of years.

Operational safety and long-term safety deal with quite different environments, so it is a challenge to compare and balance their needs. Nonetheless the pre-closure (operational) safety analysis and post-closure safety analyses have the same basic risk-based approach asking the three questions:

- What can happen?
- How likely is it?
- What are the consequences?

In order to build convincing arguments for the safety case regarding the first question, the operator should provide a comprehensive analysis of features (components of the repository system), events and processes (FEP) which form the basis for the whole safety case, including the pre-closure and post-closure safety analyses. All further steps in the safety assessment are based on this input. Therefore it should be carried out as comprehensive and thoroughly as possible (completeness can never be proven).

In the post-closure safety analyses the FEP approach is successfully applied and a standard approach to give arguments for the safety case to substantiate:

- the comprehensiveness of the system analyses
- increase transparency by documenting expert judgements
- develop scenarios for the consequence analysis

Due to the safety case requirements regarding transparency, comprehensiveness and traceability, the extension of this approach to the pre-closure safety analysis for a comprehensive system analysis is of high added value.

In the R&D project BASEL, a FEP catalogue for the operational phase was developed based on the national disposal concepts for clay, crystalline and salt rock. The FEP catalogue contains analyses of the processes and events that affect the components (features) of the repository system in its entirety. It was used to identify and document

- hazards and appropriate prevention and mitigation measures for the operational phase,
- the impacts of the FEP on and consequences for post-closure safety.

After identifying and evaluating the FEP of the operational phase, the state of the repository system at the beginning of the post-closure phase can be derived by analysing the interactions of the FEP analogous to the scenario development in the post-closure analysis. To derive a structured FEP catalogue the disposal system for the operational phase has been divided for the FEP catalogue in external factors and four different subsystems: i) external factors (incl. external hazards), ii) surface facilities, iii) shafts and ramps, iv) infrastructural area and transport drifts, and v) disposal area.

In a first step the features and processes/events for every subsystem are identified by analysing nine different disposal concepts for clay (2), crystalline (3) and bedded and domal salt (4). External hazards (such as earthquakes, aircraft crash etc.) given by German regulation for nuclear facilities are added as external factors.

In the next step internal hazards are systematically derived by assessing the interaction of every process/event on every identified feature within the considered subsystem. The assessment of the impact of a process/event on a feature is a systematic comprehensive analysis, but can only be done by expert judgement. The decisions made can be transparently documented. Finally, appropriate prevention and mitigation measures are derived for the identified internal hazards.

The FEP approach described here is a useful way to show that such an analysis is as comprehensive as possible. This is an important argument for the safety case both for the identification of (internal) hazards as well for the documentation and assessment of the impacts of pre-closure phase on the post-closure phase (incl. the impact of prevention and potential mitigation measures). Furthermore the extension of the FEP approach to the operational phase helps to harmonize the methods within the safety case.

It is important to note that the use of a FEP approach in the operational phase is not a replacement of existing methods that has been developed over decades. It should be seen as an useful further element within the safety case to support the discussion on the “completeness” of the basics of the system analysis. The identified hazards can be easily applied in the approaches used in the pre-closure safety analysis.

The following table list all FEP and external and internal hazards identified in the R&D project BASEL. The catalogue is structured using the subsystems:

- 0: external factors (incl. external hazards)
- 1: surface facilities
- 2: shafts and ramps
- 3: infrastructural area and transport drifts
- 4: disposal area

In subsystems 1 to 4 the features are listed under X.1, the processes under X.2 and the internal hazards under X.3. The abbreviations in the table header represent the following disposal concepts:

- SL: drift disposal (S: salt rock, T: clay rock)
- BLT: borehole disposal in clay rock
- VBLS: vertical borehole disposal in salt rock
- HBLS: horizontal borehole disposal in salt rock
- TLB: Direct disposal of transport and storage casks in salt rock
- KBS: modified Scandinavian container concept in crystalline rock with borehole disposal
- mCRZ: concept of multiple CRZ¹¹ in crystalline rock with borehole disposal
- oCRZ: concept of overburden CRZ in crystalline rock with drift disposal

¹¹ CRZ = containment-providing rock zone: part of the repository system which, in conjunction with the technical seals (shaft seals, cavern sealing structures, dam structures, backfill) ensure containment of the waste.

Tab. B.1 External factors, FEP, and internal hazards during the construction and operation for a HLW repository

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept									
		Clay		Rock Salt				Crystalline			
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLS	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ	
0	External Factors										
0.1	Interruption of Operations										
0.1.1	Interruption of Operations	independent									
0.2	Human Actions										
0.2.1	Human Error	independent									
0.2.2	Influence of Human Actions										
0.3	External Hazards										
0.3.1	Earthquake	independent									
0.3.2	External Power Failure										
0.3.3	Mine Flood										
0.3.4	Aircraft Crash										
0.3.5	Impacts from Hazardous Substances										
0.3.6	Shockwave from Chemical Reactions										
0.3.7	Lightning Strikes, Storm, Ice, Snow										
0.3.8	Impact from Exterior Fire and other Site-specific Impacts										
1	FEP: Surface facilities										
1.1	Components										
1.1.1	Buildings and Foundations	The surface facilities are identical for all disposal concepts									
1.1.2	Disposal packages and transfer casks (Surface Facilities)										
1.1.3	Railed Vehicles										
1.1.4	Wheeled Vehicles										
1.1.5	Cranes										
1.1.6	Drying Installations										
1.1.7	Technical Installations (Reloading Hall)										
1.1.8	Technical Installations (Buffer Hall)										
1.1.9	Technical Installations (Hot Cell)										
1.1.10	Technical Installations (Decontamination)										
1.1.11	Technical Installations (Repair Shop)										
1.1.12	Technical Installations (Collection and Conditioning of Operational Waste)										

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt			Crystalline			
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBSL	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
1.1.13	Gates and Locks									
1.1.14	Shaft Hoisting Equipment									
1.1.15	Drive system of cable car*									
1.1.16	Main ventilation system									
1.1.17	Energy Supply Installations									
1.1.18	Water Treatment Installations									
1.1.19	Solutions (Surface Facilities)									
1.1.20	Gases (Surface Facilities)									
1.1.21	Liquid Hydrocarbons (Surface Facilities)									
1.2	Processes and Events									
1.2.1	Operation of Drying Installation									
1.2.2	Operation of Railed Vehicles (Outside Reloading Hall)									
1.2.3	Operation of Railed Vehicles (Inside Reloading Hall)									
1.2.4	Operation of Wheeled Vehicles									
1.2.5	Operation of Cranes									
1.2.6	Operation of Cranes and Locks									
1.2.7	Shaft Hoisting									
1.2.8	Operation of Cable Car*									
1.2.9	Operation of Ventilation System									
1.2.10	Repair Work at Hot Cell									
1.2.11	Repair and Maintenance (Surface Facilities)									
1.2.12	Operation of Water Treatment Installations									
1.2.13	Radiological Control / Monitoring									
1.2.14	Decontamination									
1.2.15	Conditioning of Operational Waste									
1.2.16	Mechanical Loads									
1.2.17	Metal Corrosion (Surface Facilities)									
1.2.18	Concrete Corrosion (Surface Facilities)									
1.2.19	Heat Flow (Surface Facilities)									
1.2.20	Thermal Expansion or Contraction (Surface Facilities)									

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt				Crystalline		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
1.3	Internal Hazards **									
1.3.1	Failure of shaft hoisting equipment									
1.3.2	Failure of cable car technology*									
2	FEP: Shafts and Ramps									
2.1	Components									
2.1.1	Shaft and Ramp Linings	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.2	Shaft Fittings	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.3	Ramp Fittings							x	x	x
2.1.4	Host Rock (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.5	Overburden	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.6	Excavation Damaged Zone (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.7	Solutions (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.8	Liquid Hydrocarbons (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.9	Gases (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.10	Exploration or Observation Borehole (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.11	Shaft and Ramp Seal	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.12	Disposal Package and Transfer Cask (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.1.13	Vehicles (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2	Processes and Events									
2.2.1	Sinking and Lining of Shaft	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.2	Drifting and Stabilization of the Ramp							x	x	x
2.2.3	Installation of Shaft and Ramp Fittings	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.4	Shaft Operations	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.5	Ramp Operations							x	x	x
2.2.6	Ventilation (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.7	Metal Corrosion (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.8	Concrete Corrosion (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.9	Stress Change (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.10	Convergence (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.11	Fluid Intrusion (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.12	Degradation of Organics (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt				Crystalline		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLS	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
2.2.13	Drilling and Sealing of an Exploration or Observation Borehole (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.14	Shaft Seal and Ramp Seal Installation	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.15	Heat Flow (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.16	Swelling and Shrinking of Clay Minerals (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.17	Alteration of Excavation Damaged Zone (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.18	Thermal Expansion or Contraction (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.19	Operational Monitoring (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.2.20	Repair and Maintenance (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3	Internal Hazards									
2.3.1	Failure of Shaft Hoisting Equipment	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.2	Failure of Cable Car Technology							x	x	x
2.3.3	Failure of Shaft and Ramp Support	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.4	Failure of Shaft and Ramp Installations	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.5	Failure of Shaft or Ramp Seal	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.6	Failure of an Exploration or Observation Borehole Seal (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.7	Failure of Mining Equipment (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.8	Failure of Transport Vehicles (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.9	Failure of Emplacement Equipment (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.10	Exfoliations and Rock Falls (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.11	Flooding of Underground Facilities (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.12	Fire (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.13	Explosion (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.14	Gas Blower (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.15	Release of Radioactive Material (Shaft) (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2.3.16	Release of Chemotoxic Material (Shaft and Ramp)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt				Crystalline		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
3	FEP: Underground Openings (Infrastructural Area and Transport Drifts)									
3.1	Components									
3.1.1	Lining of Transport and Ventilation Drifts	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.2	Lining of Infrastructural Area	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.3	Technical Equipment (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.4	Host Rock (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.5	Excavation Damaged Zone (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.6	Solutions (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.7	Liquid Hydrocarbons (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x			
3.1.8	Gases (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.9	Backfill (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.10	Exploration or Observation Borehole (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.11	Drift Seals	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.12	Drift Seals in Fracture Zones	x	x					x	x	x
3.1.13	Disposal Packages and Transfer Casks (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.1.14	Vehicles (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2	Processes and Events									
3.2.1	Excavation (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.2	Support (Underground Openings)	x	x					x	x	x
3.2.3	Transport Traffic in Supervised and Controlled Area	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.4	Ventilation (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.5	Metal corrosion (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.6	Concrete Corrosion (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.7	Stress Change (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.8	Convergence (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.9	Fluid Intrusion (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.10	Degradation of Organics (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.11	Removal of Technical Equipment (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.12	Backfilling (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt				Crystalline		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
3.2.13	Drilling and Sealing of an Exploration or Observation Borehole (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.14	Construction of Seals	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.15	Construction of a Drift Seal in a Fracture Zone	x	x					x	x	x
3.2.16	Heat Flow (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.17	Swelling and Shrinking of Clay Minerals (Underground Openings)	x	x					x	x	x
3.2.18	Alteration der Excavation Damaged Zone (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.19	Thermal Expansion or Contraction (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.20	Operational Monitoring (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2.21	Repair and Maintenance (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3	Internal Hazards									
3.3.1	Failure of Lining of Infrastructural Area	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.2	Failure of Drift Support (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.3	Failure of Backfill (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.4	Failure of Technical Equipment (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.5	Failure of a Drift Seal in a Fracture Zone	x	x					x	x	x
3.3.6	Failure of Drift Seals	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.7	Failure of Exploration or Observation Borehole Seal (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.8	Failure of a Disposal Packages and Transfer Casks (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.9	Failure of Mining Equipment (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.10	Failure von Transport Vehicles (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.11	Failure of Emplacement Equipment (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.12	Exfoliations and Rock Falls (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.13	Flooding of Underground Facilities (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.14	Fire (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt				Crystalline		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBSL	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
3.3.15	Explosion (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.16	Gas Blower (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x			
3.3.17	Release of Radioactive Material (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3.3.18	Release of Chemotoxic Material (Underground Openings)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	FEP: Disposal Area									
4.1	Components									
4.1.1	Lining of Cross Drifts	x	x							x
4.1.2	Lining of Emplacement Drifts and Chambers	x							x	x
4.1.3	Lining of Borehole Crossing Drifts		x		x			x	x	
4.1.4	Lining of Drifts in Salt (Disposal Area)					x	x			
4.1.5	Installations of Vertical Boreholes		x		x			x	x	
4.1.6	Installations of Horizontal Boreholes					x				
4.1.7	Borehole Installations and Sliding Carriages						x			
4.1.8	Technical Equipment (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.9	Host Rock (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.10	Excavation Damaged Zone (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.11	Solutions (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.12	Liquid Hydrocarbons (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x			
4.1.13	Gases (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.14	Backfill (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.15	Buffer in Disposal Drifts	x								x
4.1.16	Exploration or Observation Borehole (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.17	Plugs		x		x	x		x	x	
4.1.18	Seals	x	x					x	x	
4.1.19	Disposal Packages and Transfer Casks (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1.20	Vehicles (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2	Processes and Events									
4.2.1	Excavation of Drifts (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.2	Drilling of Disposal Borehole		x		x	x	x	x	x	
4.2.3	Drift Lining (Disposal Area)	x	x					x	x	x

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt				Crystalline		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBSL	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
4.2.4	Lining of Disposal Borehole		x		x	x			x	
4.2.5	Emplacement operations	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.6	Ventilation (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.7	Metal Corrosion (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.8	Concrete Corrosion (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.9	Stress Change (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.10	Convergence (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.11	Fluid Intrusion (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.12	Degradation of Organics (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.13	Installation of Buffer and Backfill (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.14	Drilling and Sealing of an Exploration or Observation Borehole (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.15	Construction of a Sealing Structure (Disposal Area)	x	x					x	x	
4.2.16	Borehole Seal/Plug Construction		x			x		x	x	
4.2.17	Radioactive Decay	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.18	Radiolysis	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.19	Heat Flow (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.20	Swelling and Shrinking of Clay Minerals (Disposal Area)	x	x					x	x	x
4.2.21	Alteration der Excavation Damaged Zone (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.22	Thermal Expansion or Contraction (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.23	Operational Monitoring (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.2.24	Repair (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3	Internal Hazards									
4.3.1	Failure of Drift Support (Disposal Area)	x		x				x	x	x
4.3.2	Failure of Backfill (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.3	Failure of Buffer	x	x					x	x	
4.3.4	Failure of Technical Equipment (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.3.5	Failure of Drift Seal (Disposal Area)	x	x					x	x	
4.3.6	Failure of Exploration or Observation Borehole Seal (Disposal Area)	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FEP-Nr.	Name	Disposal Concept								
		Clay		Rock Salt				Crystalline		
		SLT	BLT	SLS	VBLS	HBLs	TLB	KBS	mCRZ	oCRZ
4.3.7	Failure of Borehole Plug		X		X	X		X	X	
4.3.8	Failure of Borhole Installations						X			
4.3.9	Failure of Sliding Carriages						X			
4.3.10	Failure of Vertical Borehole Installations		X		X			X	X	
4.3.11	Failure of Horizontal Borehole Installations		X			X		X	X	
4.3.12	Failure of Disposal Packages and Transfer Casks (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.13	Failure of Mining Equipment (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.14	Failure of Transport Vehicles (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.15	Failure of Emplacement Equipment (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.16	Exfoliations and Rock Falls (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.17	Flooding of Underground Facilities (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.18	Fire (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.19	Explosion (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.20	Gas Blower (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X			
4.3.21	Release of Radioactive Material (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.22	Release of Chemotoxic Material (Disposal Area)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4.3.23	Criticality	X	X	X	X	X	X	X	X	X

* only for disposal concepts in crystalline rock

** for surface facilities only internal hazards for shaft and ramp transport were derived (2)

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

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

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

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

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

www.grs.de