



Bewertung von Rückholkonzepten (BeRK)

**Entwicklung einer kriterienbasierten Methode
für Vergleiche von Maßnahmen zur
Umsetzung der Rückholbarkeit
und Durchführung einer Rückholung**

**Abschlussbericht
FKZ 4722B10504**

Eva Hartwig-Thurat
Kerstin Kühn
Matias Krauß
Thorsten Faß
Michael Jendras
Gerd Frieling

Lektorat: Kiril Janev

Bewertung von Rückholkonzepten (BeRK)

Dieser Bericht stellt ein Ergebnis wissenschaftlicher Forschung des BASE zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dar und entfaltet keine Bindungswirkung für das künftige Handeln des BASE, insbesondere nicht für Entscheidungen im Rahmen von Genehmigungs-, Aufsichts- oder Beteiligungsverfahren.

BASE-010/25

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2025102256053

Berlin, Juli 2025

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

**BASE – INHOUSE-FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG**

Eva Hartwig-Thurat
Kerstin Kühn
Matias Krauß
Thorsten Faß
Michael Jendras
Gerd Frieling

Lektorat: Kiril Janev

030 184321-0
www.base.bund.de

Stand: Juli 2025

GZ: F 3 – BASE – BASE62140 4722B10504

Bewertung von Rückholkonzepten

**Entwicklung einer kriterienbasierten Methode für Vergleiche von Maßnahmen
zur Umsetzung der Rückholbarkeit und Durchführung einer Rückholung**

Eva Hartwig-Thurat

Kerstin Kühn

Matias Krauß

Thorsten Faß

Michael Jendras

Gerd Frieling

Lektorat: Kiril Janev

Abstract

The aim of the BeRK project is to develop an evaluation method for retrieval concepts based on criteria. Different measures for retrievability and for carrying out retrieval should be able to be evaluated comparatively on the basis of guiding criteria. The project contributes to understanding the effects of the “retrievability” requirement on the design of final repositories.

Kurzbeschreibung

Ziel des Vorhabens BeRK ist es, anhand von Kriterien eine Bewertungsmethode für Rückholkonzepte zu entwickeln. Unterschiedliche Maßnahmen zur Rückholbarkeit und zur Durchführung einer Rückholung sollen anhand von Leitkriterien vergleichend bewertet werden können. Das Vorhaben trägt zum Verständnis von Auswirkungen der Anforderung „Rückholbarkeit“ auf die Endlagerauslegung bei.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Regulatorische Anforderungen an Rückholbarkeit und Rückholung	4
2.1	Anforderungen aus dem internationalen Regelwerk	4
2.2	Anforderungen in Deutschland	5
2.3	Anforderungen in ausgewählten Staaten mit fortgeschrittenen Endlagerprojekten.....	9
3	Endlager- und Rückholkonzepte	11
3.1	Endlagerkonzepte.....	11
3.2	Rückholkonzepte.....	13
3.3	Rückholstrategien	15
3.4	Internationale Entwicklungen	17
3.5	Zusammenfassung des Kenntnisstandes	20
4	Zusammenhänge zwischen Endlagersystem, Endlagerauslegung und Rückholbarkeit, Rückholung – ganzheitliche Betrachtung	22
4.1	Temperaturen	24
4.2	Langzeitsicherheit	27
4.3	Ausbaumaßnahmen.....	30
4.4	Einsatz von technischen Komponenten / Maschinen.....	31
4.5	Flächenbedarf.....	33
4.6	Zeitaufwand	35
5	Kriterienbasierte Bewertung	39
5.1	Ableitung von Teilzusammenhängen – Systemanalyse	42
5.1.1	Aspekt Wirtsgestein.....	43
5.1.2	Aspekt Behälter.....	45
5.1.3	Aspekt Verfüllmaterial	48
5.1.4	Aspekt Bewetterung / Kühlung	50
5.1.5	Aspekt Technische Komponenten.....	51
5.1.6	Aspekt Ausbaumaßnahmen.....	52
5.1.7	Aspekt Temperatur.....	53
5.1.8	Aspekt Flächenbedarf	54
5.1.9	Aspekt Aufwand.....	56
5.1.10	Aspekt Langzeitsicherheit	59
5.2	Leitkriterien.....	59
5.2.1	Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“.....	60
5.2.1.1	Alternative Indikatoren.....	64

5.2.1.2	Ergänzende Indikatoren	72
5.2.1.3	Erläuterungen zur Anwendung des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“	73
5.2.2	Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“	93
5.2.2.1	Erläuterungen zur Anwendung des Leitkriteriums „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“	95
5.2.3	Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“	98
5.2.3.1	Alternative und ergänzende Indikatoren	103
5.2.3.2	Erläuterungen zur Anwendung des Leitkriteriums „Langzeitsicherheit“	105
5.3	Beispielhafte Anwendung	115
5.3.1	Beispiel 1 – Testanwendung für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“	116
5.3.2	Beispiel 2 – Testanwendung für die Leitkriterien „Aufwand bei Rückholung“ und „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“	124
5.3.3	Beispiel 3 – Testanwendung für das Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“	132
5.4	Möglichkeiten und Grenzen vergleichender Aussagen zu Rückholkonzepten anhand der im Vorhaben BeRK entwickelten Methode	139
6	Zusammenfassung und Ausblick	141
7	Literaturverzeichnis	145
A	Kriterienkatalog	149

Abkürzungen

BeRK	Bewertung von Rückholkonzepten
BSK	Brennstabkokille
CIGEO	Centre industriel de stockage géologique
Diapir	Steilstehendes Steinsalz
EndlSiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
HAW	High Active Waste, hochradioaktiver Abfall
IAEA	International Atomic Energy Agency
LL-MAW	Langlebige mittelradioaktive Abfälle
MAW	Mittelaktive Abfälle
Mt	Megatonne
Overpack	Umverpackung
SMA	Schwach und mittel radioaktive Abfälle
StandAG	Standortauswahlgesetz
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TLR	Technologiereifegrad
u. T.	Unter Tage
W&T	Wissenschaft und Technik

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Begriffs- und Regelwerkszuordnung	6
Abb. 3-1:	Internationale Rückholungsskala („R-scale“) der OECD-NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) 2012).....	18
Abb. 4-1:	Skizzierung der komplexen Zusammenhänge relevanter Aspekte zwischen Endlagersystem, Endlagerauslegung und Rückholbarkeit, Rückholung	23
Abb. 4-2:	Zusammenhänge zwischen Temperaturen, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung.....	26
Abb. 4-3:	Zusammenhänge zwischen Langzeitsicherheit, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung.....	29
Abb. 4-4:	Zusammenhänge zwischen Ausbaumaßnahmen, Rückholung und Endlagerauslegung	31
Abb. 4-5:	Einflüsse auf technische Komponenten bei einer Rückholung	32
Abb. 4-6:	Zusammenhänge zwischen technischen Komponenten, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung.....	33
Abb. 4-7:	Zusammenhänge zwischen Flächenbedarf, Rückholbarkeit, Rückholung, Endlagersystem und Endlagerauslegung	35
Abb. 4-8:	Zusammenhänge zwischen Zeitaufwand, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung.....	37

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1:	Überblick zum Vorgehen im Vorhaben BeRK	3
Tab. 2-1:	Hauptanforderungen an Rückholbarkeit (nach § 13 EndlSiAnfV)	6
Tab. 2-2:	Sicherheitsanforderungen, die von Maßnahmen zur Rückholbarkeit berührt sein können	7
Tab. 3-1:	Überblick zu Endlagerkonzepten in Deutschland	12
Tab. 5-1:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Wirtsgesteins.....	44
Tab. 5-2:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen der Behälter	47
Tab. 5-3:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Verfüllmaterials	49
Tab. 5-4:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von Bewetterung / Kühlung.....	51

Tab. 5-5:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von technischen Komponenten.....	52
Tab. 5-6:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von Ausbaumaßnahmen	53
Tab. 5-7:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen der Temperatur	54
Tab. 5-8:	Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Flächenbedarfs	55
Tab. 5-9:	Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“	63
Tab. 5-10:	Alternative Indikatoren zur Verwendung für das Leitkriterium Aufwand.....	65
Tab. 5-11:	Ergänzende Indikatoren für das Leitkriterium Aufwand	72
Tab. 5-12:	Informationssammlung und Anwendung des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“	74
Tab. 5-13:	Detaillierte Tabelle zur Informationssammlung und zur Bewertung des jeweiligen Aufwands einer Rückholung anhand des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“	75
Tab. 5-14:	Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“	95
Tab. 5-15:	Informationssammlung und Anwendung des Leitkriteriums „Technikverfügbarkeit“	96
Tab. 5-16:	Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“	102
Tab. 5-17:	Alternative Indikatoren zur Verwendung für das Leitkriterium Langzeitsicherheit.....	103
Tab. 5-18:	Ergänzende Indikatoren für das Leitkriterium Langzeitsicherheit.....	104
Tab. 5-19:	Informationssammlung und Anwendung des Leitkriteriums „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“	106
Tab. 5-20:	Detaillierte Tabelle zur Informationssammlung und Bewertung des jeweiligen Aufwands einer Rückholung anhand des Leitkriteriums „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“	107
Tab. 5-21:	Informationssammlung für Beispiel 1 (Endlager A, Endlager B).....	116
Tab. 5-22:	Kurztabelle – Testanwendung für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“	121
Tab. 5-23:	Komprimierte Ergebnisdarstellung der Testanwendung Beispiel 1 für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung	124
Tab. 5-24:	Informationssammlung für Beispiel 2 (Endlager A und Endlager B).....	125
Tab. 5-25:	Kurztabelle – Anwendung des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“	129
Tab. 5-26:	Ergebnisdarstellung von Beispiel 2 „Aufwand bei Rückholung“	131

Tab. 5-27:	Testanwendung für das Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“	132
Tab. 5-28:	Informationssammlung für Beispiel 3 (Endlager A, Endlager B)	133
Tab. 5-29:	Kurztabelle – Anwendung des Leitkriteriums „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“	135
Tab. 5-30:	Ergebnisdarstellung der Testanwendung 3.....	138

1 Einleitung

Das Vorhaben BeRK hat zum Ziel, eine Methode zu entwickeln, die es ermöglicht, unterschiedliche Maßnahmen zur Rückholbarkeit sowie der Durchführung einer Rückholung systematisch und nachvollziehbar zu vergleichen und ihre sicherheitstechnische Bedeutung einzuschätzen. International wird die Option einer Rückholung endgelagerter radioaktiver Abfälle seit den 1990er Jahren insbesondere als eine Form der Rücknahme von Entscheidungen während des Errichtungsprozesses eines Endlagers (Reversibilität) diskutiert (Bracke et al. 2019). Rückholbarkeit findet inzwischen in vielen nationalen Regularien und Entsorgungsprogrammen Berücksichtigung. In Deutschland ist die Option einer Rückholung im Standortauswahlgesetz (StandAG), dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, verankert (§ 1 Abs. 4 StandAG) (Deutscher Bundestag (BT) 28.09.2023). Die Anforderung der Rückholbarkeit hat Auswirkungen auf das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung. Die Maßnahmen und die Konzepte zur Rückholung sind auf komplexe Weise mit der Endlagerauslegung verwoben.

Das Ziel der Endlagerung besteht darin, die hochradioaktiven Abfälle für sehr lange Zeiträume sicher von der Biosphäre zu isolieren. Die Gewährleistung der Langzeitsicherheit hat bei allen sicherheitstechnischen Abwägungen oberste Priorität. Auf die Langzeitsicherheit gerichtete Auslegungsanforderungen eines Endlagers zielen unter anderem auf Folgendes ab:

- den zügigen Verschluss der Einlagerungsbereiche EndLSiAnfV § 18 (2) (EndLSiAnfV, vom 06.10.2020),
- eine optimierte Temperaturentwicklung hinsichtlich des Schutzes von Barrieren sowie
- Minimierung der Durchörterung (Verletzungen des Gebirges im Endlagerbereich nach § 11, Absatz 4 EndLSiAnfV) des Wirtsgesteins, um Wegsamkeiten für Radionuklide zu begrenzen.

Die Implementierung einer Rückholoption im Endlagerkonzept sowie Optimierungen zur Durchführung einer Rückholung stellen einen zusätzlichen Aspekt für die Endlagerauslegung dar. Maßnahmen zur Rückholbarkeit dürfen nicht zu einer Absenkung des Sicherheitsniveaus eines Endlagers führen. Zielkonflikte, die sich aufgrund der Berücksichtigung der Rückholung bei der Auslegung des Endlagers zeigen, sind aufzulösen. Es ist eine Optimierung herbeizuführen, ohne die Langzeitsicherheit sowie weitere von der Rückholbarkeit berührte Sicherheitsanforderungen zu gefährden. Anders ausgedrückt: Die getroffenen Maßnahmen zur Sicherstellung der Rückholung dürfen keinen relevanten Einfluss auf die Verfügbarkeit und den Umfang der Maßnahmen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit

haben. Im Verlauf des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle sind im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen und der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung unter anderem das Sicherheitskonzept und das technische Endlagerkonzept bzw. die Endlagerauslegung zu bewerten (EndlSiAnfV, vom 06.10.2020). Dabei sind auch Maßnahmen zur Rückholbarkeit bzw. Rückholkonzepte zu betrachten. Herausforderungen für die Rückholung der Behälter stellen insbesondere die Temperaturen, die Festigkeit des Wirtsgesteins und die Dosisleistung der Behälter dar.

Der im Vorhaben BeRK entwickelte methodische Ansatz soll dazu beitragen Rückholkonzepte, bzw. einzelne Maßnahmen im Rahmen von Rückholkonzepten, systematisch und nachvollziehbar miteinander vergleichen zu können. Herausforderungen für solch ein methodisches Vorgehen sind zum einen die komplexen Zusammenhänge zwischen Endlagerauslegungen und Maßnahmen für Rückholbarkeit und zum anderen die verfügbaren Detailtiefen und die Informationen zu Rückholkonzepten. Es soll ermöglicht werden, auch bei geringen verfügbaren Informationen zu Rückholkonzepten generische Vergleiche durchzuführen. Jedes Endlagerdesign stellt ein standortabhängiges Unikat dar. Die Methode soll – soweit es möglich ist – wirtsgesteinsübergreifend, einlagerungsvariantenübergreifend und rückholkonzeptübergreifend entwickelt werden. Das heißt, sie sollte offen genug sein, um unterschiedliche Endlagersysteme mit Rückholbarkeit aus dem Blickwinkel der Implementierung von Rückholbarkeit und auch der Durchführung einer Rückholung analysieren und bewerten zu können. Unterschiedliche Konzepte und Zusammenhänge müssen auf vergleichbare Größen und / oder funktionale Zusammenhänge heruntergebrochen werden. Es werden Kriterien benötigt, die es ermöglichen, Maßnahmen, Arbeitsschritte und Konzepte zur Implementierung der Rückholoption und für die Durchführung einer Rückholung als günstiger oder weniger günstig zu bewerten.

Grundlagen für die hier erarbeitete Bewertungsmethode sind die regulatorischen Anforderungen (siehe Kapitel 2), Endlager- und Rückholkonzepte sowie die Aufschlüsselung der komplexen generischen Zusammenhänge zwischen dem Endlagerkonzept auf der einen und dem Rückholkonzept, das heißt den Maßnahmen zur Implementierung der Rückholbarkeit (Planung, Bau und Einlagerung) sowie der Durchführung einer Rückholung (siehe Kapitel 3) auf der anderen Seite. Es werden wesentliche Zusammenhänge der Endlagerkonzeption aus Sicht von Rückholbarkeit (Implementierung der Rückholoption) und der Durchführung einer Rückholung herausgearbeitet. Auf dieser Basis erfolgt in Kapitel 5 die Erarbeitung von sogenannten Leitkriterien. Die Entwicklung dieser übergeordneten Kriterien (Leitkriterien) orientiert sich an den Anforderungen im Regelwerk. Insbesondere werden die in § 13 EndlSiAnfV genannten Anforderungen an eine Rückholung bei der Formulierung der Leitkriterien im Vorhaben BeRK herangezogen.

Für die Leitkriterien sind geeignete Indikatoren zu identifizieren und auszuwählen. Hierzu erfolgt in Kapitel 5.1 die Aufgliederung der in Kapitel 4 herausgearbeiteten komplexen Zusammenhänge zwischen der Rückholbarkeit, der Durchführung

einer Rückholung und derendlagerauslegung in einzelne Teilzusammenhänge. Diese Teilzusammenhänge dienen als Grundlage, geeignete qualitative und quantitative Indikatoren zu bestimmen, die diesen Zusammenhang wiederspiegeln. Im Vorhaben werden in Anlehnung an das Regelwerk ein Leitkriterium für den Aufwand einer Rückholung, ein Leitkriterium für Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung und ein Leitkriterium zur Langzeitsicherheit entwickelt (siehe Kapitel 5.2). In einem Paarvergleich erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der jeweils günstigeren oder weniger günstigen Ausprägungen der Indikatoren in Bezug auf das jeweilige Leitkriterium.

Anhand von beispielhaften Anwendungen (siehe Kapitel 5.3) wird die Aussagekraft der Methodik getestet und es werden umfangreiche Checklisten für die Anwendung der Methodik ausgearbeitet. Eine zusammenfassende Bewertung der entwickelten Methodik erfolgt in Kapitel 5.4. Eine Zusammenfassung der Methodenentwicklung im Vorhaben BeRK sowie ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen sind in Kapitel 6 des Berichts zu finden.

Tab. 1-1: Überblick zum Vorgehen im Vorhaben BeRK

Schritt 1:		Schritt 2:	Schritt 3:	Schritt 4:
Grundlagen	Teilzusammenhänge	Leitkriterien	Testanwendung	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Regulatorische Anforderungen ✓ endlager- und Rückholkonzepte ✓ Komplexe Zusammenhänge zwischen Endlager- und Rückholkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> Ableitung von Teilzusammenhängen - Auflösung komplexer Verkettungen <ul style="list-style-type: none"> ➤ Grundlage zur Ermittlung von Indikatoren und Bewertungsgrößen für die Bewertungskriterien 	<ul style="list-style-type: none"> Erstellung von Leitkriterien <ul style="list-style-type: none"> ➤ Leitkriterium für Aufwand ➤ Leitkriterium für Technikverfügbarkeit ➤ Leitkriterium für Langzeitsicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> Beispielhafte Anwendung und Testung der Methode <ul style="list-style-type: none"> ➤ Checklisten ➤ Ergebnisbewertung 	

2 Regulatorische Anforderungen an Rückholbarkeit und Rückholung

2.1 Anforderungen aus dem internationalen Regelwerk

Als internationales Regelwerk, in dem Anforderungen an die Endlagerung von radioaktiven Abfällen formuliert werden, ist vornehmlich die „Safety Standard Series“ der IAEA zu nennen. Anforderungen an die Endlagerung im Allgemeinen finden sich hier in SSR-5 „Disposal of Radioactive Waste - Specific Safety Requirements“ (International Atomic Energy Agency (IAEA) 2011).

Spezifische Anforderungen an eine Rückholbarkeit sind hier jedoch nicht zu finden. Grund hierfür ist, dass in SSR-5 der Begriff „Disposal“, der im internationalen Sprachgebrauch für den deutschen Begriff „Endlagerung“ steht, dahingehend definiert wird, dass eine Rückholbarkeit per Definition nicht vorgesehen ist (1.8 „[...] *The term disposal implies that retrieval is not intended; it does not mean that retrieval is not possible*“).

In SSR-5 wird aber dennoch in zwei Absätzen (1.22 und 1.25) auf eine mögliche Rückholbarkeit eingegangen, nämlich für den Fall, dass diese als notwendig angesehen wird. Während der Betriebsphase und vor dem Verschluss eines geologischen Endlagers können Rückholmaßnahmen durchgeführt werden, sofern diese als notwendig erachtet werden (1.22 [...] *In the operational period, construction activities may take place at the same time as waste emplacement in, and closure of, other parts of the facility. This period may include activities for waste retrieval, if considered necessary, prior to closure, [...].*).

In Absatz 1.25 wird in SSR-5 darauf eingegangen, dass in einigen Staaten „Rückholbarkeit“ („retrievability“) nach Verschluss des Endlagers (*post-closure retrievability; im Deutschen als „Bergung“ definiert*) eine gesetzliche Anforderung ist (1.25. *Moreover, the development of disposal facilities that incorporate provisions in design or operation to facilitate reversibility, including retrievability, is considered in several national programmes for waste management. In some States, post-closure retrievability is a legal requirement and constitutes a boundary condition on the options available, which must always satisfy the safety requirements for disposal [...].*) Eine zentrale Anforderung ist hier, dass die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung in jedem Falle eingehalten werden müssen. Es dürfen keinerlei Abstriche an die Sicherheitsstandards oder die Sicherheitsanforderungen durch die Machbarkeit einer Rückholung oder einer Bergung zugelassen werden. Es muss sichergestellt werden, dass die Forderung nach Rückholbarkeit oder Bergbarkeit keine unannehbar nachteilige Auswirkung auf die Sicherheit oder auf die Leistung des Entsorgungssystems hat (1.25 [...] *In some States, post-closure retrievability is a legal requirement and constitutes a boundary condition on the options available, which must always satisfy the safety requirements for disposal. No relaxation of safety standards*

or requirements could be allowed on the grounds that waste retrieval may be possible or may be facilitated by a particular provision. It would have to be ensured that any such provision would not have an unacceptable adverse effect on safety or on the performance of the disposal system.).

Eine ähnliche Aussage, mit Bezug auf SRR-5, Absatz 1.25, machen die Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels (SRL) der WENRA (2014) (Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD) 2014). In DI-28 heißt es hier ebenfalls:

„The licensee shall ensure that any provisions to facilitate reversal of disposal operations, or retrieval of waste packages disposed of, have no unacceptable effects on post-closure safety.“

2.2 Anforderungen in Deutschland

Das Ziel der Endlagerung ist der zuverlässige langfristige Einschluss der radioaktiven Abfälle, der durch die dauerhafte tiefengeologische Endlagerung der Abfälle erreicht werden kann. Eine Rückholung ist nicht beabsichtigt; die Rückholbarkeit stellt lediglich eine Option dar, um im Prozess des laufenden Standortauswahlverfahrens eine Umsteuerung im Sinne von Fehlerkorrekturen (nach § 1 Absatz 5 StandAG) zu ermöglichen, falls Sachverhalte eintreten, die dies zwingend notwendig erscheinen lassen. Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit ist während der Betriebsphase des Endlagers vorzusehen (§ 1 Abs. 4 und § 2 Satz 1 StandAG). Es sind Maßnahmen vorzuhalten, mit denen bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers entsprechend der Anforderung nach § 13 EndLSiAnfV eine Rückholbarkeit gewährleistet ist (§ 10 Absatz 6 StandAG). Das heißt, der Zeitraum für eine mögliche Rückholung in der Betriebsphase wird auf den Beginn der Stilllegung des Endlagers begrenzt. Ein späteres Herausholen der Abfälle stellt eine Bergung dar und ist bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers zu gewährleisten (Deutscher Bundestag (BT) 28.09.2023) (siehe Abb. 2-1). Die Bergung ist als Notfallmaßnahme im Sinne eines ungeplanten Herausholens der radioaktiven Abfälle definiert (§ 2 Satz 4 StandAG). Das Thema Bergung wird im Vorhaben BeRK nicht betrachtet.

Rückholbarkeit ist eine geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter aus dem Endlager (siehe Begriffsbestimmungen im § 2 des StandAG). Mit dem Begriff Rückholung wird der konkrete aktive Vorgang der Entnahme von Abfallbehältern aus dem Endlager bezeichnet. Die Betriebsphase des Endlagers beginnt mit dem Auffahren der Schächte und der Strecken (Errichtungsbetrieb), anschließend folgt der Einlagerungsbetrieb, der mit dem Beginn des Stilllegungsbetriebs endet. Mit dem Verschluss des Endlagers (Schachtverschluss) beginnt die Nachverschlussphase.

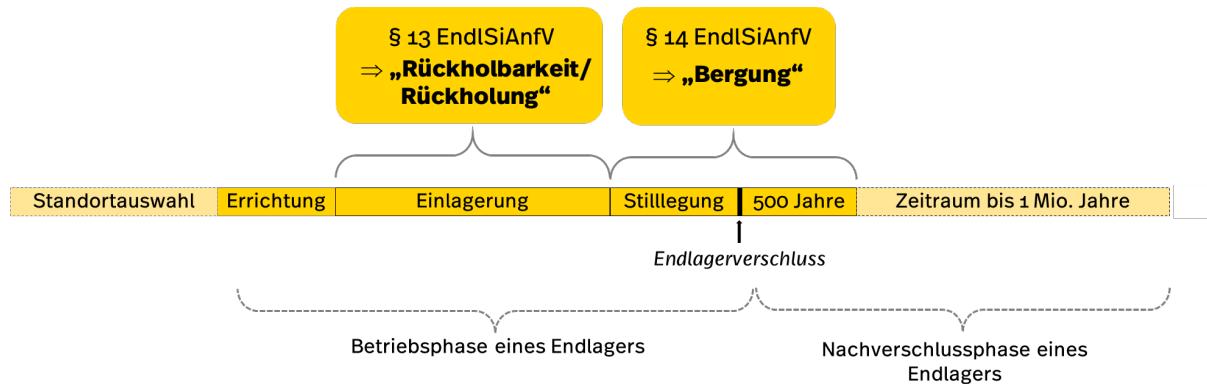


Abb. 2-1: Begriffs- und Regelwerkszuordnung

Folgende Anforderungen an Rückholbarkeit werden nach § 13 EndlSiAnfV gestellt:

1. „Endlagergebinde, die in das Endlager eingelagert wurden, müssen bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers rückholbar sein.“
2. Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den für die Einlagerung erforderlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt. Die für eine Rückholung erforderlichen technischen Einrichtungen sind während des Betriebs vorzuhalten.
3. Maßnahmen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit dienen, dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht gefährden.“

Es ist nicht näher ausgeführt, ab wann eine Unverhältnismäßigkeit des Aufwands gegeben sein könnte. Tab. 2-1 enthält die Zusammenstellung der Hauptanforderungen an Rückholbarkeit nach § 13 EndlSiAnfV.

Tab. 2-1: Hauptanforderungen an Rückholbarkeit (nach § 13 EndlSiAnfV)

Aspekt	Anforderung
Technischer Aufwand	Der für eine Rückholung erforderliche technische Aufwand muss verhältnismäßig zum Aufwand für die Einlagerung sein; er darf diesen nicht unverhältnismäßig übersteigen.
Zeitlicher Aufwand	Der für eine Rückholung erforderliche zeitliche Aufwand muss verhältnismäßig zum Aufwand für die Einlagerung sein; er darf diesen nicht unverhältnismäßig übersteigen.

Aspekt	Anforderung
Vorhaltung technischer Einrichtungen	Für die Rückholbarkeit erforderliche technische Einrichtungen (z. B. Maschinen oder Endlagerkomponenten) sind während des Betriebs des Endlagers vorzuhalten.
Langzeitsicherheit	Die Langzeitsicherheit darf nicht durch Maßnahmen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit dienen, gefährdet werden.

Nach § 11 Absatz 1 EndlSiAnfV ist die technische Auslegung des Endlagers aus dem Sicherheitskonzept abzuleiten und zu optimieren. Insbesondere muss die Endlagerauslegung Maßnahmen zur Gewährleitung der Rückholbarkeit umfassen (§ 11 Absatz 1 Satz 7, EndlSiAnfV). Das heißt, Rückholbarkeit ist von Beginn an mitbestimmend bei der Endlagerauslegung. Sicherheitsanforderungen (nach StandAG und EndlSiAnfV) können somit von Maßnahmen zur Rückholbarkeit berührt sein (siehe Tab. 2-2). Zielkonflikte bei der Auslegung zwischen Rückholbarkeit und Endlagersicherheit (Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit) sind im iterativen Prozess der Endlagerauslegung aufzulösen (§ 12 Absatz 1 und 2 EndlSiAnfV). Dies betrifft unter anderem Anpassungen der Behälteroberflächentemperatur, Auslegungen zur Begrenzung von Temperaturentwicklungen im Endlager, die Berücksichtigung chemischer Verhältnisse im Einlagerungsbereich, die durch eingebrachte Materialien beeinflusst werden können, die Verletzung des Gebirges im Einlagerungsbereich (Durchörterung) sowie den Flächenbedarf des Endlagers.

Tab. 2-2: Sicherheitsanforderungen, die von Maßnahmen zur Rückholbarkeit berührt sein können

Aspekt	Anforderung	Regelwerk
Behälteroberflächentemperatur	Festlegung einer vorläufigen Grenztemperatur an der Außenfläche der Behälter für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren	§ 27 Absatz 4 StandAG
Temperaturentwicklung im Endlager	Die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren dürfen durch die Temperaturentwicklung nicht erheblich beeinträchtigt werden.	§ 6 Absatz 2, Satz 3 EndlSi-AnfV

Aspekt	Anforderung	Regelwerk
Chemische Verhältnisse im Einlagerungsbereich	Mögliche Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere aufgrund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, dürfen die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen.	§ 5 Absatz 2 Satz 3 EndlSi-AnfV
Verletzung des Gebirges im Endlagerbereich	„Die Verletzung des Gebirges im Endlagerbereich, und im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1 insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist auf das für die sichere Errichtung, den sicheren Betrieb und die sichere Stilllegung des Endlagers unvermeidliche Ausmaß zu beschränken.“	§ 11 Absatz 4 EndlSiAnfV
Räumliche Beschränkung des genutzten Einlagerungsbereichs (Flächenbedarf)	„Der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes ist auf das notwendige Maß zu beschränken. Dieser Bereich ist jeweils zügig aufzufahren, zu beladen, zu verfüllen und gemäß dem Verschlusskonzept gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen.“	§ 18 Absatz 2 EndlSiAnfV

Eine ganzheitliche Betrachtung von Auswirkungen verschiedener Maßnahmen für Rückholbarkeit und zur Durchführung einer Rückholung auf die Endlagerauslegung erfolgt in Kapitel 4.

2.3 Anforderungen in ausgewählten Staaten mit fortgeschrittenen Endlagerprojekten

Die hier betrachteten Beispiele wurden aufgrund ihres fortgeschrittenen Endlagerprogrammes gewählt.

- Frankreich

In Frankreich besteht mit dem Planning Act 2006-739 vom 28. Juni 2006 eine gesetzliche Anforderung an eine reversible Endlagerung. Hierbei ist die Reversibilität auf jedes Endlagergebinde bezogen. Reversibel meint hierbei, dass die folgenden Generationen aufgrund der sich über mehrere Generationen hinwegbewegenden Betriebsphase des Endlagers die Möglichkeit haben müssen, bei sich ändernden Randbedingungen gegebenenfalls auch andere Entscheidungen zu treffen. Dies könnte in letzter Instanz auch eine Rückholung von einzelnen, mehreren oder auch allen bereits eingelagerten Gebinden beinhalten (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) 2016).

- Schweiz

Im Kernenergiegesetz der Schweiz (Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft 2018) ist eine Rückholoption bis zum Verschluss des Endlagers vorgeschrieben (KEG Art.37.1.b). Eine Rückholung von radioaktiven Abfällen muss hierbei ohne großen Aufwand möglich sein und es sind Vorkehrungen zur Erleichterung einer Rückholung zu treffen, welche die passiven Sicherheitsbarriären nicht beeinträchtigen. Die Kernenergieverordnung legt zudem fest, dass die konkrete Umsetzung vor Ort vor Inbetriebnahme zu demonstrieren ist (Kernenergieverordnung Art. 11). Die ENSI-Richtlinie G03 sieht vor, dass mit dem Rahmenbetriebsgesuch (RBG) ein Konzept für eine „allfällige Rückholung der radioaktiven Abfälle einzureichen ist“ mit dem die „Art und Weise des Vorgehens in den Grundzügen“ darzustellen ist (Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa) und Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES) 2020).

- Schweden

Anforderungen an eine Rückholbarkeit sind im schwedischen Regelwerk nur insoweit vorhanden, als eine Rückholbarkeit „prinzipiell“ vorgesehen ist. Anforderungen an eine Demonstrierbarkeit werden nicht gestellt (Raiko 2013).

- Finnland

Anforderungen an eine Rückholbarkeit sind im finnischen Regelwerk nur insoweit vorhanden, als eine Rückholbarkeit „prinzipiell“ möglich sein soll, auch nach Verschluss des Endlagers („spent nuclear fuel must be retrievable from the repository if a new treatment method is invented for it“ (The decision in principle by the Government on December 2000 concerning Posiva Oy's application for the construction

of a final disposal facility for spent nuclear fuel produces in Finland 2001)). Für eine Rückholung sind hierbei auch eine Kostenabschätzung sowie eine Gefahrenabschätzung für die Bevölkerung regulatorische Anforderungen (Avolahti 2012).

- Kanada

Eine Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle wird bis zum Verschluss des Endlagers gefordert (Noronha 2016).

3 Endlager- und Rückholkonzepte

Für eine geplante Rückholung von radioaktiven Abfällen aus einem HAW-Endlager sind entsprechende Rückholkonzepte unter Berücksichtigung des Einlagerungskonzepts, des Wirtsgesteins und der verfolgten Rückholstrategie zu entwickeln. Im Kapitel 1 wird zunächst ein Überblick über generische Endlager- und Rückholkonzepte in Deutschland sowie über mögliche Rückholstrategien gegeben. In Kapitel 3.4 erfolgt eine Ergänzung um internationale Entwicklungen von Endlagern. Der Überblick der Konzepte zeigt die weite Spannbreite der Möglichkeiten von Endlagerauslegungen auf. Er dient als Grundlage für die Erläuterungen der Zusammenhänge zwischen Endlagerkonzeption und -auslegung und Rückholbarkeit und Durchführung einer Rückholung in Kapitel 4.

3.1 Endlagerkonzepte

Auf Basis von unterschiedlichen generischen Endlagerkonzepten werden für die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Deutschland Endlagerkonzepte für drei potentiellen Wirtsgesteinstypen (Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein entsprechend StandAG (Deutscher Bundestag (BT) 28.09.2023) entwickelt (siehe Tab. 3-1). Rückholbarkeit als Genehmigungsvoraussetzung ist dabei von Beginn an bei der Endlagerkonzeption zu berücksichtigen. So ist während der Konzeption und der Auslegung eines Endlagers darauf zu achten, dass die technischen Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit die passive Sicherheit und damit die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen (Herold et al. 2018).

Internationaler Stand von W&T ist die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im tiefen Untergrund (International Atomic Energy Agency (IAEA) 2002), (Kommision Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom) 2016). In Deutschland kommen vier verschiedene Einlagerungsvarianten und drei Wirtsgesteine in Frage (Bertrams et al. 2021). Während es für Steinsalz und Tongestein in Deutschland für horizontale Strecken- und vertikale Bohrlochlagerung bereits detaillierte Endlagerkonzepte gibt, die weiter fortentwickelt werden, liegen für Kristallingestein die Entwicklungen noch nicht im gleichen Detaillierungsgrad vor. Gleches gilt für die horizontale Bohrlochlagerung in flachlagerndem Steinsalz (Bollingerfehr et al. 2018) sowie für die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) (Herold et al. 2018). Für die direkte Endlagerung von kupferummantelten CASTOR®-Behältern gibt es erste Überlegungen (Bertrams et al. 2017).

Bei der **horizontalen Streckenlagerung** (Steinsalz / Tongestein / Kristallingestein) werden die Endlagerbehälter in horizontalen Einlagerungstrecken endgelagert. Die Anordnung der Endlagerbehälter sowie Ausbau, Versatz und Verschluss der Einlagerungsbereiche variieren dabei in Abhängigkeit vom Wirtsgesteinstyp. Endlagerkonzepte der „horizontalen Streckenlagerung“ wurden sowohl für

steilstehendes als auch für flachlagerndes Salzgestein sowie für Tongestein entwickelt. Bisher gibt es für Kristallingestein nur Überlegungen zur horizontalen Streckenlagerung bei der geologischen Situation eines überlagernden einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG), welches in Deutschland aber derzeit nicht weiterverfolgt wird (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) 2022).

Bei der **vertikalen Bohrlochlagerung** (Steinsalz / Tongestein / Kristallingestein) werden die Endlagerbehälter in Form von Brennstabkokillen (BSK) für alle drei Wirtsgesteine bzw. als kupferummantelte Behälter für Kristallin in vertikalen Bohrlöchern eingelagert. Ausbau, Versatz und Verschluss der Bohrlöcher und Zugangsstrecken sowie Bohrlochüberfahrungen variieren je nach Konzept und Wirtsgesteinstyp. Im Kristallin werden zwei Konzepte, „*Modifiziertes KBS 3 Konzept*“ und „*Multipler ewG*“, verfolgt.

Ein Konzept für die **horizontale Bohrlochlagerung** wurde bisher nur für Brennstabkokillen in flachlagernden Salzgesteinen untersucht (Bollingerfehr et al. 2018).

Die **direkte Endlagerung** von Transport- und Lagerbehälter (TLB) in steilstehenden Salzgesteinssformationen wurde zunächst vergleichend zur Streckenlagerung von Endlagerbehältern und zur Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen betrachtet. Das Einlagerungskonzept sieht den direkten Einschluss der Behälter in kurzen horizontalen Bohrlöchern senkrecht zum Streckenstoß vor (Herold et al. 2018). Für die Lagerung von kupferummantelten CASTOR®-Behältern in Bohrlöchern im Kristallingestein gibt es erste Überlegungen (Bertrams et al. 2017).

Tab. 3-1: Überblick zu Endlagerkonzepten in Deutschland

Einlagerungskonzept	Wirtsgestein	Behälterkonzept
Horizontale Streckenlagerung	Steil stehendes Salz (Diapir)	POLLUX®-Behälter (auch CASTOR®; MOSAIK®)
	Flach lagerndes Salz	POLLUX®-Behälter (auch CASTOR®; MOSAIK®)
	Tongestein	POLLUX®-Behälter (MOSAIK®)
	Kristallingestein	POLLUX®-Behälter (Überlagernder ewG)

Einlagerungskonzept	Wirtsgestein	Behälterkonzept
Vertikale Bohrlochlagerung	Steil stehendes Salz (Diapir)	BSK
	Tongestein	BSK
	Kristallingestein	Kupferummantelter Behälter (BSK / rückholbare Kölle) für Modifiziertes KBS-3-Konzept (ewG-Konzept) und Multipler ewG
Horizontale Bohrlochlagerung	Flach lagerndes Salz	BSK
Direkte Einlagerung	Steil stehendes Salz (Diapir)	direkter Einschluss TBL in horizontalen Kurzbohrlöchern
	Kristallingestein	Kupferummantelte CASTOR®-Behälter für Multipler ewG (Überlagernder ewG)

3.2 Rückholkonzepte

Die mögliche technische Gestaltung einer Rückholung von Abfallgebinden aus einem Endlager in Steinsalz oder in Tongestein ist ausführlich in Herold (2018) und für Kristallingestein in Herold (2021) dargestellt (Herold et al. 2018; Herold et al. 2021). Neben den technischen Maßnahmen werden auch organisatorische Maßnahmen wie strahlenschutztechnische und betriebliche Maßnahmen bei Rückholkonzepten berücksichtigt (Bollingerfehr et al. 2014). Rückholkonzepte werden auf Basis der unterschiedlichen generischen Endlagerkonzepte (siehe Kapitel 3.1) entwickelt. Der Entwicklungsstand dieser Konzepte ist ebenso wie derjenige der Endlagerkonzepte (siehe Kapitel 3.1) sehr unterschiedlich: Für Steinsalz und auch für Tongestein sind Konzepte weit fortgeschritten, für Kristallingestein gibt es zum Teil nur erste Überlegungen. Konzeptionelle und technische Anpassungen des Einlagerungskonzeptes können zur Erleichterung einer Rückholung beitragen. Anpassungen können helfen, günstige Bedingungen im Rückholungszeitraum für die Durchführung einer Rückholung zu schaffen (Herold et al. 2021).

- Rückholkonzepte für horizontale Streckenlagerung

Die Rückholkonzepte aus der horizontalen Streckenlagerung sehen für Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein jeweils die Neu- bzw. die Wiederauffahrung bereits verfüllter Strecken, die Freilegung der Abfallgebinde und die Entnahme der Behälter vor. Weiterhin soll in allen drei Wirtsgesteinen die Einlagerungstechnik in modifizierter Form zur Rückholung eingesetzt werden. Je nach Wirtsgestein müssen die Rückholkonzepte die unterschiedlichen Eigenschaften von Versatz und gegebenenfalls von Ausbau und Widerlagern berücksichtigen. So ist zum Beispiel bei der Rückholung aus Ton- und Kristallingestein nach Bertrams (2021) parallel zum Entfernen des Versatzes aus dem Streckenquerschnitt die Stabilität des Hohlraumes wiederherzustellen (Bertrams et al. 2021). Anpassungen beispielsweise von Automatisierungsprozessen sowie der technischen Gerätschaften zur Auffahrung von Strecken und zum Behältertransport, die Erfordernisse von Kühlsystemen oder eine angepasste Bewetterung und Errichtung von Kontrollbereichen unter Berücksichtigung von Strahlenschutzaspekten sind in Abhängigkeit von Eigenschaften des Wirtsgesteins zu planen.

- Rückholkonzepte für vertikale Bohrlochlagerung

Rückholkonzepte für die vertikale Bohrlochlagerung werden für steilstehendes Steinsalz (Diapir), für Tongestein und für Kristallingestein entwickelt. Im Kristallingestein werden zwei unterschiedliche Rückholkonzepte (modifiziertes KBS-3 Konzept und multipler ewG) in Betracht gezogen. In allen drei Wirtsgesteinstypen ist – wie bei der horizontalen Streckenlagerung – die Neu- bzw. die Wiederauffahrung bereits verfüllter Strecken vorgesehen. Zusätzlich müssen bei der vertikalen Bohrlochlagerung auch die Bohrlochüberfahrungen wiederaufgefahren sowie gegebenenfalls Bohrlochkeller entfernt werden. Während es für Steinsalz und das Konzept des *multiplen ewG* im Kristallingestein erforderlich ist, das Einlagerungskonzept der Rückholoption anzupassen (zum Beispiel durch Verrohrung des Bohrlochs oder einen nicht kompaktierenden Versatz), ist dies bei dem *modifizierten KBS-3-Konzept* im Kristallin nicht vorgesehen (Herold et al. 2018; Herold et al. 2021; Bertrams et al. 2021). Die Behälterfreilegung erfordert in Abhängigkeit von dem verwendeten Versatz (zum Beispiel Sand oder Bentonit-Buffer) unterschiedliche Methoden in den jeweiligen Wirtsgesteinen. Die Errichtung von Abschirm- und Saugvorrichtungen ist ebenso wie die Errichtung von Transportsystemen, gegebenenfalls die Ertüchtigung des Ausbaus, Anpassungen der Bewetterung und Anforderungen an die Kühlung vom Wirtsgestein abhängig. So ist zum Beispiel im Gegensatz zu den Rückholkonzepten im Steinsalz, im Tongestein und im Kristallingestein keine Anpassung der Einlagerungstechnik für die Rückholung vorgesehen. Hier soll die Technik sowohl für die Einlagerung als auch für die Rückholung identisch sein (Herold et al. 2021).

- Rückholkonzept für horizontale Bohrlochlagerung

Die horizontale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen wurde bisher lediglich für flachlagerndes Steinsalz betrachtet. Dabei ist ein Ausbau des Bohrlochs gegen Gebirgsdruck und Temperatur notwendig. Ebenso muss eine Behälterabschirmung und eine spezielle automatisierte Einlagerungs- und Entnahmetechnik entwickelt werden (Kindlein et al. 2018). Ein konkretes Rückholkonzept liegt bisher nicht vor. Es gibt jedoch diesbezüglich erste Überlegungen.

- Rückholkonzepte für direkte Einlagerung

Ein Rückholkonzept für die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) ist für steilstehendes Steinsalz (Diapir) untersucht worden. Das Einlagerungskonzept sieht den direkten Einschluss der TLB in kurzen horizontalen Bohrlöchern senkrecht zum Streckenstoß vor. Es werden dabei zwei Varianten zur Rückholung in Betracht gezogen: Zum einen die vollständige Freilegung der TLB entsprechend dem Rückholkonzept Streckenlagerung im Steinsalz. Dafür werden große Streckenquerschnitte und eine Neuentwicklung der Rückholvorrichtung benötigt. Alle Einbauten würden entfernt werden. Zum anderen wird die Umkehrung des Einlagerungsvorgangs entsprechend der vertikalen Bohrlochlagerung im Steinsalz in Betracht gezogen. Für das Herausziehen der TLB müssten dabei entweder Verrohrungen in die Bohrlöcher eingebracht werden oder es müsste bei der Einlagerung ein Overpack um den TLB angebracht werden, der die Gesamtmasse erhöht. Verrohrung oder Overpack würde nach der Rückholung im Endlager verbleiben (Herold et al. 2018).

Zur direkten Endlagerung und Rückholung kupferummantelter CASTOR®-Behälter gibt es bisher nur erste Überlegungen (Bertrams et al. 2017).

3.3 Rückholstrategien

Für eine Rückholung werden zwei unterschiedliche Strategien diskutiert. Favorisiert wird derzeit für Steinsalz und Tongestein die so genannte „Re-Mining-Strategie“, bei der das Endlager nach Rückholung der Endlagerbehälter nicht weiter betrieben wird (Herold et al. 2018), (Bollingerfehr et al. 2014).

Werden nur einzelne Behälter oder wird nur eine Teilmenge der Behälter zurückgeholt und wird das Endlager weiterbetrieben, wird von „selektiver Rückholung“ gesprochen. Die Möglichkeit einer selektiven Rückholung wird für Rückholkonzepte in Kristallingestein untersucht (Herold et al. 2021). Für die Wirtsgesteine Steinsalz- und Tongestein ist diese Strategie bisher nicht explizit betrachtet worden (Herold et al. 2018).

- Re-Mining-Strategie

Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung der Endlagerbehälter dürfen die Langzeitsicherheit eines Endlagers nicht gefährden. Sollte in der Einlagerungsphase eine Rückholung vorgenommen werden, ist bei der Re-Mining Strategie vorgesehen, das Endlager nach Entnahme aller Abfallbehälter nicht weiter zu verwenden. Das Endlager würde verworfen werden, nachdem sämtliche Endlagerbehälter zurückgeholt sind. Bei der Durchführung einer Rückholung müsste dementsprechend nicht mehr auf den Erhalt der Langzeitsicherheit des Endlagers geachtet werden. Auf diesem Gedanken aufbauend wurde von der BGE die Re-Mining-Strategie als möglicher Lösungsansatz zur technischen Umsetzung einer Rückholung entwickelt (Bollingerfehr et al. 2014). Das Konzept geht davon aus, dass eine Rückholung zum spätesten möglichen Zeitpunkt, also am Ende der planmäßigen Einlagerung aller Behälter, erfolgt (das heißt zum Beginn der Stilllegungsphase des Endlagers). Zu diesem Zeitpunkt sind bereits der zeitnahe Versatz und der Verschluss der Strecken entsprechend dem Endlagerkonzept erfolgt. Der zeitnahe Versatz von Einlagerungsräumen und -strecken parallel zum Einlagerungsbetrieb soll eine dem jeweiligen Betriebszeitpunkt des Endlagers entsprechende größtmögliche passive Sicherheit gewährleisten, damit bis zu einer eventuellen Entscheidung für eine Rückholung nicht in die vorgesehene Entwicklung des Endlagers eingegriffen wird. Bei einer Entscheidung zur Rückholung würde die bergbauliche Schaffung eines neuen Zugangs zu den Endlagerbehältern und die Entnahme dieser aus dem Gebirgsverbund erfolgen. Konkret umfasst dies die vollständige Neu- bzw. Wiederauffahrung des Grubengebäudes für alle benötigten Strecken. Die Rückholung der Behälter würde dann in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung erfolgen (Herold et al. 2018; Bertrams et al. 2021).

Die späteste mögliche Rückholung bei dieser Strategie bildet für alle Einlagerungskonzepte in Steinsalz und Tongestein das abdeckende Referenzszenario (Bollingerfehr et al. 2014; Herold et al. 2018).

- Selektive Rückholung

Die Strategie der selektiven Rückholung sieht vor, nur eine Teilmenge an Abfallgebinden zurückzuholen. Hierbei bleibt das Endlager bestehen und es wird weiter eingelagert werden. Bei der selektiven Rückholung kann es sich um die Rückholung eines Einzelbehälters oder der Räumung einer Einlagerungsstrecke, eines Einlagerungsfeldes oder mehrerer Einlagerungsfelder handeln. Im Rahmen des Vorhabens KOREKT, das sich mit Konzepten zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein befasst, wird eine mögliche technische Umsetzung konkret beschrieben. Das abdeckende Szenario der Re-Mining-Strategie umfasse bereits alle für eine selektive Rückholung benötigten Arbeitsschritte. Damit sei nach Herold et al. (2021) die Teiltrückholung von Gebinden zu jedem Zeitpunkt der Einlagerung, an dem sich zu einer selektiven Rückholung entschlossen wird, technisch grundsätzlich möglich (Herold et al. 2021). Bei

einer selektiven Rückholung ergeben sich Anforderungen zur Gewährleistung des Erhalts der Langzeitsicherheit und an die Intaktheit der Behälter, die über die Anforderungen bei der Umsetzung der Re-Mining-Strategie hinaus gehen (Herold et al. 2021).

Nach Herold et al. (2021) besteht noch Untersuchungsbedarf hinsichtlich der möglichen Umsetzung bei Rückholung einer Teilmenge von Endlagerbehältern aus einem Einlagerungsfeld, das bereits verfüllt und verschlossen wurde (Herold et al. 2021).

Inwiefern sich das Konzept der selektiven Rückholung auf ein Endlager in Steinsalz oder Tongestein übertragen lässt, konnte der Literatur nicht entnommen werden.

3.4 Internationale Entwicklungen

■ Frankreich

In Frankreich ist das Endlager CIGEO (*Centre industriel de stockage géologique - Industrial Centre for Geological Disposal*) für HAW- und langlebigen MAW-Abfälle in 525 m Tiefe in der Nähe der Ortschaft Bure an der Grenze zwischen den französischen Departements Meuse and Haute-Marne geplant. In voneinander getrennten Einlagerungsfeldern unterschiedlicher Geometrie werden in Tongestein ca. 10.000 m³ hochradioaktive (HAW) und ca. 75.000 m³ langlebige mittelradioaktive (LL-MAW) Abfälle eingelagert. Die hochaktiven Abfälle stammen überwiegend aus dem Betrieb der französischen Kernkraftwerke und werden als verglaste Rückstände aus der Wiederaufbereitung in speziell entwickelten zylindrischen Behältern aus unlegiertem Stahl ferngesteuert – oder zumindest automatisiert – in horizontaler Bohrlochlagerung eingelagert. Die langlebigen mittelradioaktiven Abfälle werden in kubischen Betoncontainern in einem anderen Teil des Endlagers in speziellen hierfür konstruierten Einlagerungskammern, ebenfalls ferngesteuert oder automatisiert, gestapelt eingelagert. Der Transport der Endlagergebinde über eine eigens für diesen Zweck reservierte Rampe nach unter Tage und zu den Einlagerungskammern ist ebenfalls als ferngesteuerter und / oder automatisierter Prozess geplant. Als Betriebszeit des Endlagers ist ein Zeitraum von ca. 100 Jahren vorgesehen, dem sich nach dem endgültigen Verschluss noch eine Monitoring-Phase anschließt. Spätestens mit dem *Planning Act 2006-739* vom 28. Juni 2006 besteht in Frankreich die Anforderung an eine reversible Endlagerung. Reversibel meint hierbei, dass die folgenden Generationen aufgrund der sich über mehrere Generationen hinwegbewegenden Betriebsphase des Endlagers die Möglichkeit haben müssen, bei sich ändernden Randbedingungen gegebenenfalls auch andere Entscheidungen zu treffen. Dies könnte in letzter Instanz auch eine Rückholung von einzelnen, mehreren oder auch allen bereits eingelagerten Gebinden beinhalten. Als Ergebnis der Öffentlichkeitsbeteiligung 2013 (*public debate*)

wurde folgende Definition für „Reversibility“ festgehalten (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) 2016):

“Reversibility is the ability to leave future generations options regarding long-term management of radioactive waste, including sealing off disposal structures or retrieving waste packages. This is ensured in particular by the progressive and flexible development of the disposal facility.”

Bei der Betrachtung von Rückholungsoptionen wird die Rückholungsskala der OECD-NEA herangezogen (Abb. 3-1). Hervorzuheben ist, dass im CIGEO jedes Endlagergebinde während der Betriebszeit des Endlagers bei Bedarf einzeln „zurückgeholt“ werden kann. Dies meint die Rückholung aus der Einlagerungskammer aus beliebigen Gründen. Hierfür soll dieselbe Technik verwendet werden, welche für die Einlagerung verwendet wurde. Für die eindeutige Bezeichnung / Kennzeichnung aller Gebinde sind Keramik-Inlays an den Endlagergebinden vorgesehen. Rückholbarkeit meint hier zudem auch die Möglichkeit, Gebinde bei Bedarf in andere Einlagerungskammern umzulagern.

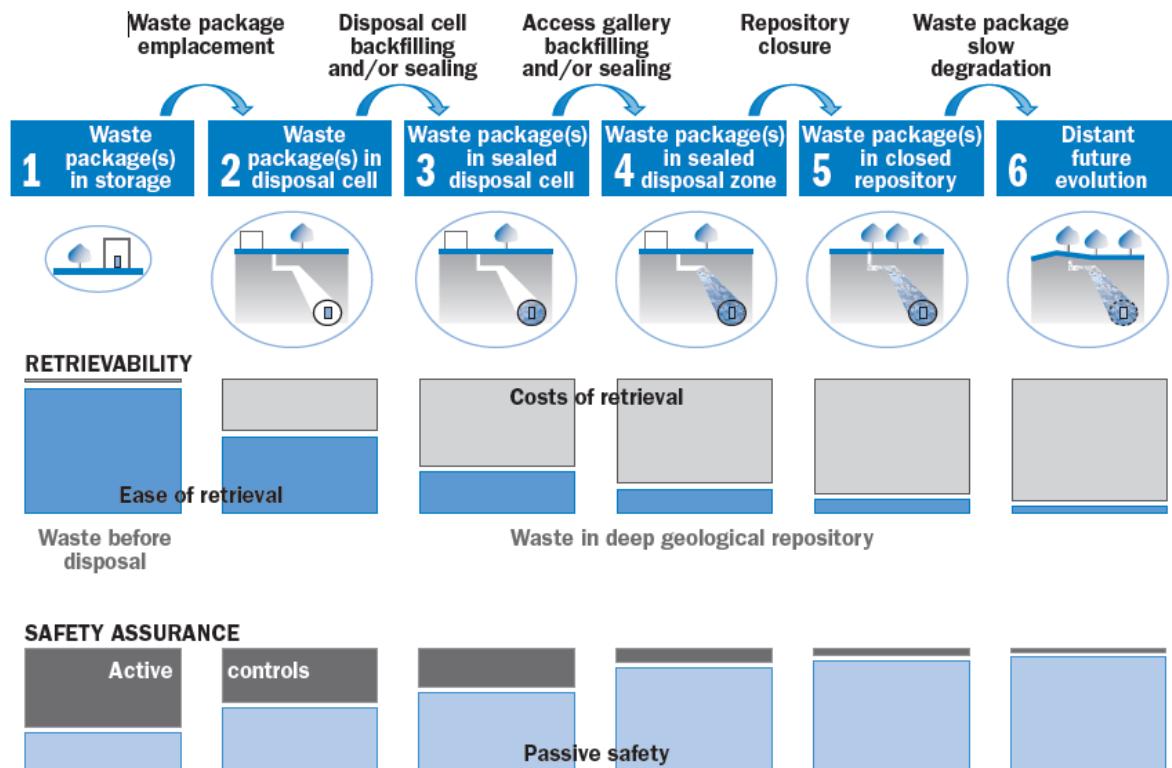


Abb. 3-1: Internationale Rückholungsskala („R-scale“) der OECD-NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) 2012)

Schematisch dargestellt sind der sich verändernde Grad der Rückholbarkeit des radioaktiven Abfalls, die Veränderung der aktiven und der passiven Sicherheitsmaßnahmen und der sich ändernde Grad des Aufwandes gegenüber den Kosten für eine Rückholung.

Bezogen auf die Option einer Rückholung von bereits eingelagerten Gebinden werden verschiedene Szenarien betrachtet:

1. Rückholung von eingelagerten Gebinden aufgrund betrieblicher Szenarien
2. Rückholung aufgrund von „What if“ -Szenarien

Diese Szenarienbetrachtung umfasst unter anderem eine Betrachtung der Kapazität der Anlage, die Rückholungen durchzuführen. Hierbei wird auch betrachtet, ob Rückholungen zum Beispiel einer begrenzten Menge von Gebinden während der Betriebsphase parallel zum weiterlaufenden Einlagerungsbetrieb vorgenommen werden können oder ob Modifikationen der Anlage notwendig sind.

In der Praxis sollen 5 % der Abfälle zunächst in Testbereichen eingelagert werden. Diese Testbereiche sollen dann 50 Jahre beobachtet werden. Anschließend erst erfolgt die Einlagerung der restlichen 95 % der Abfälle. Für eine Rückholung von Abfällen soll dieselbe Technik verwendet werden, die auch für die Einlagerung verwendet wurde. Jedoch ist die Adaption neuer Technik und Technologie („*best available technique*“ (bat)e) Teil des Sicherheitskonzeptes des Endlagers, mit dem unter anderem der auf ca. 100 Jahre postulierten Betriebszeit Rechnung getragen werden soll. Die betrieblichen Vorgänge und Techniken für Einlagerung und Rückholung wurden in Demonstrationsversuchen bereits getestet.

Vor dem endgültigen Verschluss des Endlagers werden unter anderem die technischen Anlagen, die Systeme und die Komponenten zur Einlagerung (und Rückholung) zurückgebaut. Die endgültige Entscheidung zum Verschluss wird jedoch erst nach der Betriebsphase und einer daran anschließenden Beobachtungsphase getroffen.

- Schweiz

Das Rückholungskonzept der NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) 2021) beschreibt, wie die Rückholung der radioaktiven Abfälle (HAW und SMA) erfolgen kann. Zentrale Anforderungen sind hierbei, dass eine Rückholung bis zum Verschluss des Endlagers ohne großen Aufwand und mit heutiger Technik erfolgen kann. Ein aktualisiertes Rückholungskonzept wird mit dem Baugesuch („Bauantrag“) vorgelegt und im Laufe des Endlagerprojektes bis zum Verschluss entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik weiterentwickelt. Der im Rückholungskonzept betrachtete Rückholungszeitpunkt nach Ende des Beobachtungszeitraumes (50 Jahre nach Ende der Einlagerung) und vor dem endgültigen Verschluss des Endlagers ist als abdeckender Zeitpunkt gewählt. Es wird davon ausgegangen, dass zu diesem Zeitpunkt der höchstmögliche Aufwand für eine allfällige (vollständige) Rückholung betrieben werden muss.

Eine Rückholung sei auch nach Verschluss des Endlagers unter Verwendung etablierter Bergbautechnik möglich, dann jedoch mit entsprechend größerem Aufwand. Ein solcher Fall (in Deutschland als „Bergung“ bezeichnet) ist jedoch nicht mehr durch die geforderte abdeckende Rückholungsplanung zu zeigen.

Das derzeitige Rückholungskonzept wird aktuell in NAB-21-12 beschrieben. Im Wesentlichen werden die verfüllten und versiegelten Strecken wieder aufgefahren und die eingelagerten Abfälle mit derselben Technik zurückgeholt, mit der sie eingelagert wurden. Aus Strahlenschutzgründen sollen die Rückholungsmaßnahmen für HAW weitestgehend ferngesteuert durchgeführt werden. Als größte Herausforderung gegenüber dem Einlagerungsbetrieb wird von der NAGRA die hohe Temperatur der Einlagerungsstollen angesehen (bis zu 140 °C). Die Bewetterung müsse daher um Kühlungsmaßnahmen erweitert werden, um das geforderte Raumklima herzustellen.

Für SMA sieht das Rückholungskonzept im Wesentlichen Maßnahmen durch Personal und konventionelle Technik vor, wobei entsprechende Strahlenschutzmaßnahmen umzusetzen sind.

Das Rückholungskonzept wird bis zum Einlagerungsbeginn (ca. 2050) und bis zum Verschluss (ca. 2125) weiterentwickelt, erprobt und aktualisiert. Hierbei sollen technologische Entwicklungen (Automatisierung, Robotik etc.) berücksichtigt werden und Erfahrungen aus Endlagerprojekten anderer Staaten einfließen.

- Schweden und Finnland

Im skandinavischen KBS-3 Endlagerkonzept ist eine Rückholbarkeit nur „prinzipiell“ vorgesehen. Regulatorische Anforderungen an eine Demonstrierbarkeit bestehen nicht. Demonstriert wurde das Herausholen von Endlagergebinde(n) aus einem mit (wassergesättigtem) Bentonit verfüllten Prototyp-Bohrloch. Der den Behälter überdeckende Buffer war hierbei nicht vollständig wassergesättigt. Auch eine Freilegung der Einlagerungsstrecke oder eine Kontamination wurden bei diesem Demonstrationsversuch nicht betrachtet. Eine Bergung nach Verschluss des Endlagers ist nicht vorgesehen, jedoch prinzipiell möglich.

3.5 Zusammenfassung des Kenntnisstandes

Kennzeichnend für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist die Wärmeabgabe dieser Abfälle. Zunächst erhöhen sich die Temperaturen im Nahfeld der endgelagerten Behälter; je nach Anforderungen an die Barrieren unterliegt die Temperaturentwicklung in den verschiedenen Wirtsgesteinen unterschiedlichen Zeitverläufen. Der Rückholzeitpunkt und das Einlagerungskonzept (Behälterabstände, Einlagerung in Strecken oder Bohrlöcher) sind mitentscheidend für die vorherrschenden Temperaturen bei einer Rückholung und müssen unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Auswirkungen zum Beispiel auf Maschinen und

Personal unter Tage geplant bzw. erstellt werden. Die Rückholoption wirkt sich somit von Beginn an unmittelbar auf die Endlagerplanung aus.

- Konzepte zur Rückholbarkeit für die Gewährleistung einer möglichen Durchführung einer Rückholung sind gemäß den Regelwerksanforderungen zu entwickeln.
- Eine Rückholung muss für den Zeitraum des Einlagerungsbetriebs bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers möglich sein. Grundsätzlich soll die Rückholung mittels zur Verfügung stehender Einlagerungstechnik erfolgen. Zum Teil sind Komponenten und / oder Maschinen spezifisch für eine Rückholung anzupassen.
- Entsprechend der für ein HAW-Endlager in Frage kommenden Wirtsgesteine und der Ausgestaltung der Einlagerungskonzepte werden unterschiedliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholung benötigt.
- Die aktuelle Detailtiefe von Endlager- und Rückholkonzepten in Deutschland variiert stark.
- Rückholbarkeit wird auch in fortgeschrittenen Endlagerkonzepten anderer Staaten betrachtet und ist regulatorisch in unterschiedlicher Anforderungstiefe, von der prinzipiellen Machbarkeit bis zu einer Demonstrationspflicht, enthalten.

4 Zusammenhänge zwischen Endlagersystem, Endlagerauslegung und Rückholbarkeit, Rückholung – ganzheitliche Betrachtung

Das im Folgenden aufgezeigte Spektrum an Zusammenhängen (Kapitel 4.1 bis 4.6) dient als Vorbereitung für die zu entwickelnde Methode zum systematischen und nachvollziehbaren Vergleich unterschiedlicher Konzepte und Maßnahmen. Im Folgenden werden generische Zusammenhänge und Auswirkungen von Maßnahmen zur Implementierung einer Rückholungsoption bei der Endlagerplanung als auch zur Optimierung der Bedingungen im Endlager für die Durchführung einer Rückholung aufgezeigt. Zum einen sind bestimmte Maßnahmen bei der Auslegung des Endlagers notwendig, um grundsätzlich eine Rückholung zu ermöglichen. Zum anderen dienen diese Maßnahmen der Herstellung von günstigen Bedingungen unter Tage zum Zeitpunkt einer Rückholung, um die Rückholung umzusetzen oder zu erleichtern. Sämtliche Betrachtungen erfolgen mit dem Fokus auf Rückholbarkeit und die Durchführung einer Rückholung.

Die Auswahl und die Zusammenstellung der genannten Zusammenhänge in diesem Kapitel ist nicht als abschließend zu betrachten, da künftig mit fortschreitender Entwicklung und Konkretisierung von Endlagerkonzepten, einschließlich der Weiterentwicklung von Rückholkonzepten, weitere Informationen und Erkenntnisse zu Wechselwirkungen verschiedener Endlagerauslegungen zu erwarten sind. Die in diesem Vorhaben aufgezeigten Zusammenhänge stellen eine ausreichende Informationsgrundlage für die folgenden methodischen Arbeiten dar (siehe Kapitel 5).

Abb. 4-1 zeigt einen Überblick der komplexen Zusammenhänge zwischen dem Endlagersystem als Ganzes, der Endlagerauslegung, Rückholbarkeit und Rückholung.

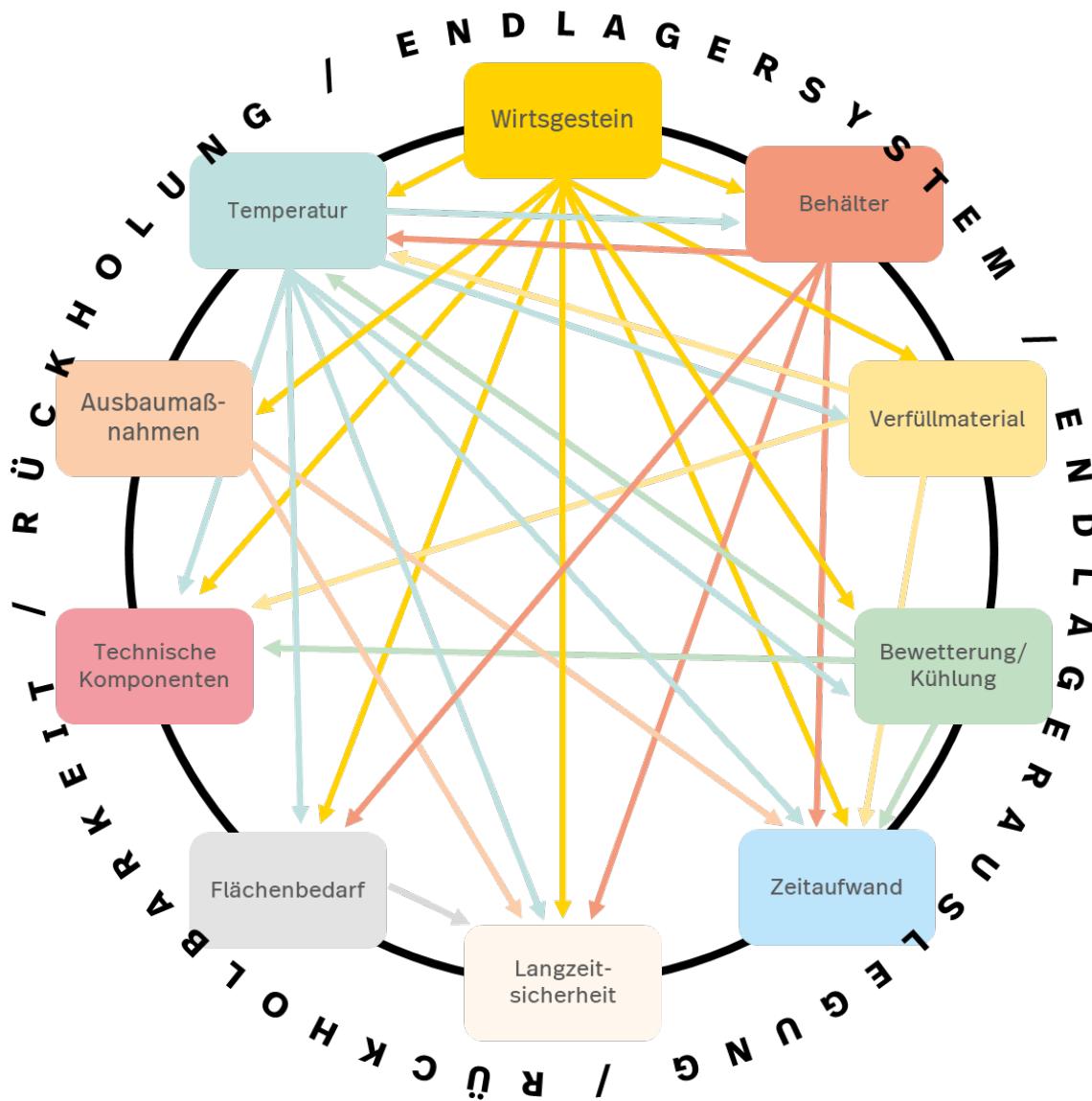


Abb. 4-1: Skizzierung der komplexen Zusammenhänge relevanter Aspekte zwischen Endlagersystem, Endlagerauslegung und Rückholbarkeit, Rückholung und Langzeit-sicherheit

Neben den wärmeleitenden Eigenschaften des Wirtsgesteins und der Behälter kann unter anderem über die Wahl der Behälterbeladung und der Abstände zwischen einzulagernden Behältern Einfluss auf die sich im Endlager entwickelnden Temperaturen genommen werden. Während einer Rückholung können Temperaturen über die Bewetterung und gegebenenfalls den Einsatz einer Kühlung beeinflusst werden. Die Anzahl der benötigten Behälter sowie die gewählten Abstände zwischen den Behältern und den Einlagerungsbereichen wirken sich auf den Gesamtflächenbedarf für das Endlager aus. In Abhängigkeit vom Einlagerungskonzept (Streckenlagerung oder Bohrlochlagerung) unterscheiden sich die für eine Rückholung vorzunehmende Arbeitsschritte und die möglichen zum Einsatz kommenden technischen Komponenten. Die gewählte Geometrie des Einlagerungsbauwerks, die Anzahl von Strecken- und Bohrlöchern oder auch das Volumen und die Längen von Einlagerungsstrecken und Einlagerungsfeldern sind mitentscheidend für den Aufwand und den Umfang der bei einer Rückholung erneut oder auch neu aufzufahrenden Strecken. Bei einer Wiederaufwältigung bereits verfüllter Strecken sind die Eigenschaften der Streckenverfüllungen und der Streckenverschlüsse bei der Wahl der hierzu einzusetzenden Technik zu berücksichtigen.

- Sicherheitstechnische Betrachtungen

Die Auslegung des Endlagers erfolgt sicherheitsgerichtet (Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit). Maßnahmen zur Rückholbarkeit dürfen nicht zu einer Absenkung des Sicherheitsniveaus des Endlagers führen. Zielkonflikte, die sich bei der Auslegung für eine Rückholung zeigen (siehe Ausführungen zu Zusammenhängen zwischen Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagerauslegung in den Unterkapiteln von Kapitel 4), sind aufzulösen und eine Optimierung ist herbeizuführen, ohne die Langzeitsicherheit zu gefährden sowie weitere von der Rückholbarkeit beeinträchtigte Sicherheitsanforderungen zu berühren (Kapitel 2.2). Auch international ist es nach IAEA eine zentrale Anforderung, dass die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung in jedem Falle eingehalten werden müssen. Es dürfen keinerlei Abstriche an die Sicherheitsstandards oder die Sicherheitsanforderungen durch die Machbarkeit einer Rückholung zugelassen werden. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Forderung nach Rückholbarkeit keine unannehmbar nachteilige Auswirkung auf die Sicherheit oder auf die Leistung des Endlagersystems hat (Kapitel Kapitel 2.1.)

In den folgenden Unterkapiteln werden die vielfältigen generischen Zusammenhänge anhand der übergeordneten Themen Temperaturen, Langzeitsicherheit, Ausbaumaßnahmen, Einsatz technischer Komponenten / Maschinen, Strahlenschutzmaßnahmen sowie Flächen- und Zeitbedarf und sicherheitstechnische Be trachtungen intensiver beleuchtet.

4.1 Temperaturen

Während und auch nach der Einlagerung der Endlagerbehälter findet in den hochradioaktiven Abfällen radioaktiver Zerfall statt. Dabei wird Wärme frei. Über die Oberfläche der Abfallbehälter wird diese an die Umgebung (Buffer, Versatz und Wirtsgestein) abgegeben, die sich somit erwärmt. Zunächst erhöhen sich die Temperaturen im Nahfeld der endgelagerten Behälter. Maßgeblich für die Wärmeentwicklung sind die Art, die Beschaffenheit und die Zusammensetzung der Abfälle innerhalb der Behälter. Die zu erwartenden Temperaturen zum Zeitpunkt einer Rückholung haben Einfluss auf die technische Ausgestaltung der Rückholung. Dies betrifft unter anderem die Einsatzmöglichkeiten für Maschinen und Personal, den Aufwand für die Bewetterung und gegebenenfalls die Kühlung und den für eine Rückholung vorzusehenden Zeitaufwand. Durch technische Maßnahmen kann im Rahmen der Endlagerplanung Einfluss auf die sich entwickelnden Temperaturen genommen werden. Beispielsweise können über die Endlagergeometrie (Behälter-, Strecken- und Bohrlochabstände) Temperaturfeldoptimierungen erreicht werden. Bereits bei der Planung werden aufwendige Temperaturfeldberechnungen durchgeführt. Mittels dieser Temperaturfeldberechnungen können zeitliche und räumliche Temperaturverteilungen im Endlagerbergwerk und auch im Wirtsgestein infolge des Wärmeeintrags der Abfallgebinde modelliert und berücksichtigt werden (Bracke et al. 2019).

Thermische Bedingungen können eine Rückholung limitieren. Ein Beispiel hierfür sind Temperaturberechnungen für das Konzept der Streckeneinlagerung im Steinsalz nach dem in der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben betrachteten Endlagerkonzept. Bei den für dieses Konzept vorgesehenen Behälterauslegungstemperaturen bis 200 °C können am Ende des Einlagerungsbetriebs (in den ersten Jahrzehnten nach Einlagerung der Behälter) Temperaturen von etwas unter 200 °C in den Einlagerungsbereichen erreicht werden. Für eine Rückholung am Ende des Einlagerungsbetriebes würden mittels reiner Bewetterung nur klimatische Bedingungen hergestellt werden können, die knapp unterhalb der gesetzlichen Vorgaben für den Bergbau (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 09.06.1983) liegen. Daher könnte zusätzlich zur Bewetterung eine entsprechende Kühlung notwendig werden, um die Wärmeentwicklung der gegebenenfalls notwendigen Vortriebsmaschinen und anderer technischer Anlagen zu kompensieren (Bollingerfehr et al. 2014) . Entsprechend hoch wäre bei diesem Konzept der technische und der zeitliche Aufwand für die Durchführung einer Rückholung.

In Abb. 4-2 werden wesentliche Zusammenhänge zwischen Temperaturen, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung skizziert.

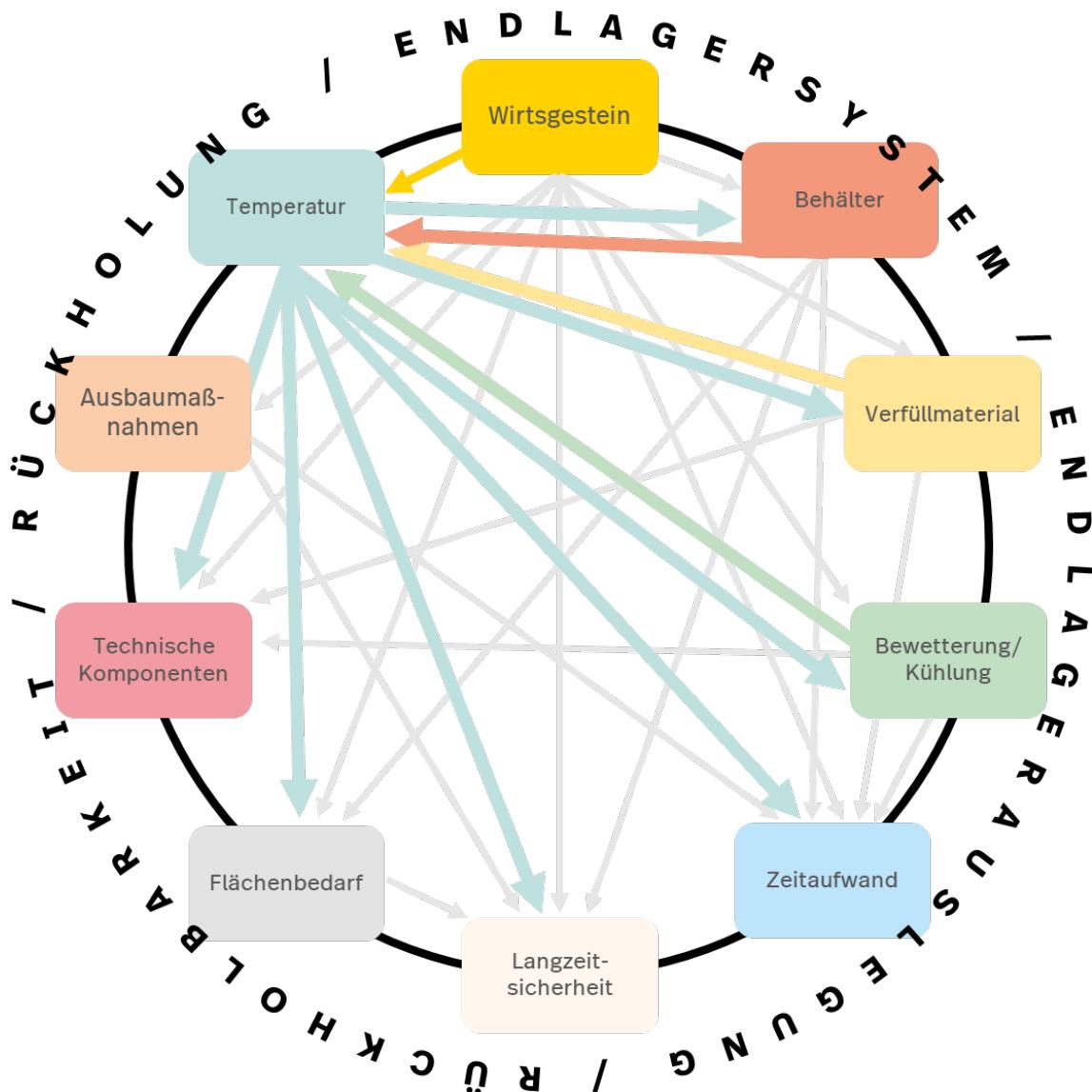


Abb. 4-2: Zusammenhänge zwischen Temperaturen, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung

Je höher die Temperaturen im Endlager zu Beginn einer Rückholung sind, desto mehr Zeitaufwand ist für die Bewetterung erforderlich, um geeignete thermische Bedingungen für Maschinen und Personal herzustellen. Hierfür kann gegebenenfalls auch der Einsatz einer zusätzlichen Kühlung nötig sein. Höhere Temperaturen können auch zu längeren Kühlzeiten und Pausen (also Ausfallzeiten) insbesondere beim Einsatz der Maschinen, die bei der Streckenaufwältigung benötigt werden, führen (Bollingerfehr et al. 2014).

Die Temperaturen, die sich im Endlager entwickeln, haben auch Einfluss auf den Flächenbedarf für ein HAW-Endlager. Dabei sind sowohl die Temperaturen an der Behälteroberfläche als auch die Endlagertiefe relevant, da entsprechend des geothermischen Tiefengradienten mit zunehmender Tiefe die Umgebungstemperaturen zunehmen. Mit zunehmender Tiefe verringert sich die Differenz zwischen der

Gebirgstemperatur und der Temperatur an der Außenwand der Behälter. Dies hat zur Folge, dass für die Einhaltung der gleichen Temperaturen beispielsweise größere Abstände zwischen den eingelagerten Behältern einzuplanen sind, um die geringere Ableitung der Wärme ins Gebirge auszugleichen. Folglich erhöht sich der Flächenbedarf mit zunehmender Tiefe, wenn man die gleiche Grenztemperatur für die Behälteroberfläche beibehält (Rühaak 2023). Die Temperaturen an der Behälteroberfläche können über die Beladung der Behälter beeinflusst werden. Höhere Auslegungstemperaturen an der Behälteroberfläche (Grenztemperatur) führen zu geringen Flächenbedarfen, weil mehr wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in die Behälter verpackt werden können und in der Folge weniger Behälter und damit weniger Fläche für die Einlagerung gebraucht wird.

Einen weiteren Einfluss hat die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins. Bei höherer Wärmeleitfähigkeit kann Wärme schneller abgeführt werden als bei niedriger; dies wirkt sich in Richtung einer Erniedrigung des Flächenbedarfs aus.

In einem Gutachten der DBETec für die *Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe* wurde der Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch-radioaktive Abfälle berechnet (DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC) 2016). Für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein wurde dabei von unterschiedlichen Auslegungstemperaturen an der Außenfläche der Behälter ausgegangen. Die Berechnungen ergaben beispielsweise für ein Endlager in Steinsalz, dass sich die Endlagerfläche bei einer Auslegungstemperatur von 200 °C an der Außenfläche der Behälter gegenüber der benötigten Endlagerfläche bei 100 °C halbiert (Entsorgungskommission (ESK) 2022).

Temperaturen sind auch relevant für die Wahl von Versatz- und Buffermaterial im Endlager. Buffer aus tonhaltigen Materialien, wie sie in Endlagerkonzepten für Tongestein und Kristallingestein vorgesehen sind, verlieren bei höheren Temperaturen wesentliche Eigenschaften für den sicheren Einschluss der Endlagergebinde. Aufgrund der Eigenschaften von Buffer und Versatzmaterial sind bei entsprechenden Endlagerkonzepten die sich im Endlager entwickelnden Temperaturen durch die Auslegung im Vorfeld zu begrenzen, damit gewünschte Barrierewirkungen zur Rückhaltung der Radionuklide erhalten bleiben. In diesem Fall erfolgen Temperaturbegrenzungen zum Schutz von Barrieren und nicht aufgrund der Rückholoption.

4.2 Langzeitsicherheit

Das Ende der Betriebsphase eines Endlagers, das mit dem Verschluss des Endlagers erfolgt, stellt den Ausgangszustand für Betrachtungen zur Langzeitsicherheit dar. Maßnahmen, die in der Betriebsphase zur Gewährleistung der Rückholungsoption getroffen werden, dürfen die Langzeitsicherheit nicht gefährden. Relevante Einflüsse auf die Langzeitsicherheit, die aus der Betriebsphase resultieren, können sich zum Beispiel aufgrund der vorgenommenen Durchörterungen

oder auch der eingebrachten Materialien, die im Endlager verbleiben, ergeben. Die Implementierung der Rückholbarkeit wurde hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Langzeitverhalten eines Endlagersystems unter anderem von Wolf et al. (2020) untersucht (Wolf et al. 2020). Insbesondere bei einem Verbleib von den in der Betriebsphase eingesetzten Materialien unter Tage wird das geochemische Milieu in der Nachbetriebsphase langfristig beeinflusst. Übergeordnet zu nennen sind:

- Verbleibende Mengen an gasbildenden Stoffen (Metalle, Organika)
- Verbleibende Mengen an Lösungen (vor allem im Einlagerungsbereich)
- Verbleibende Mengen an Nährstoffen für Mikroben

So können technische Einrichtungen zur Gewährleistung der Rückholung beispielsweise auch Einfluss auf die Langzeitsicherheit haben. Hierzu zählen der Ausbau von Bohrlöchern (Stahlliner zur Konturstabilisierung und zur Lagestabilisierung der Behälter), die Endlagerbehälter selbst sowie das Verfüllmaterial der Bohrlöcher (Wolf et al. 2020). Die Materialien können neben der mechanischen und der hydraulischen Entwicklung im Einlagerungsbohrloch auch das chemische Milieu im Endlager beeinflussen (Wolf et al. 2020). Einen wichtigen Einfluss auf den pH-Wert hat beispielsweise der Einsatz von Zement (zum Beispiel für Streckenausbauten in Tongesteinen). So führen Endlager in Wirtsgesteinen, die vermehrt Ausbauten zur Stabilisierung benötigen, dazu, dass größere Mengen Zement langfristig im Endlager verbleiben. Dieser sei im Einzelfall nicht gravierend, aber es ist zu beachten, dass jedes zusätzlich eingebrachte Material die Komplexität des Systems erhöht und damit die Bewertung des geochemischen Milieus im Endlagersystem und auch der Langzeitsicherheit insgesamt erschwert (Wolf et al. 2020).

Gasbildung bzw. die Vermeidung von Gasbildung ist ein weiterer wesentlicher Aspekt für die Langzeitsicherheit eines Endlagers. Eingesetzte und verbleibende Stoffe (Metalle und Organika) können neben ihrem Einfluss auf das geochemische Milieu zu einer signifikanten Gasbildung im Endlager führen (Wolf et al. 2020). Als wichtige Quelle gasbildender Materialien werden die Endlagergebinde selbst (Stahl oder Gusseisen der Behälter und Polyethylen in der Behälterwand zur Neutronenmoderation) genannt. Die Quelle für Gasbildung durch diese Materialien ist größer, je mehr von diesen Materialien in das Endlager verbracht werden. Das Endlagerkonzept wirkt sich auf die Art und die Menge der benötigte Behältermaterialien aus (Wolf et al. 2020).

Mechanische und hydraulische Entwicklungen in der Nachverschlussphase können ebenfalls zu nachteiligen Einflüssen auf die Langzeitsicherheit führen; zum Beispiel können durch Korrosion von nicht zurückgebauten Ausbauten Wegsamkeiten für Radionuklide (Transport über Wasser oder Gase) im Endlagersystem entstehen (Wolf et al. 2020).

Auch die sich im Endlager nach dessen Verschluss entwickelnden Temperaturen beeinflussen die Langzeitsicherheit. Temperaturen können günstigere oder auch ungünstigere Einflüsse auf chemische, physikalische und biologische Reaktionen haben.

Im Falle einer selektiven Rückholung, bei der das Endlager nicht verworfen wird und trotz der Rückholungsprozesse die Langzeitsicherheit aufrecht zu erhalten ist, ist bei der Rückholung unter anderem auch zu berücksichtigen, dass über eingesetzte technische Komponenten brennbare Flüssigkeiten in die Einlagerungsstrecke eingebracht werden können. Neben der Brandgefahr könnten solche Flüssigkeiten in der Nachverschlussphase des Endlagers zu für die Langzeitsicherheit nachteiliger Gasentwicklung führen.

In Abb. 4-3 werden wesentliche Zusammenhänge zwischen Rückholbarkeit, Rückholung sowie ihr Einfluss auf das Endlagersystem und die Endlagerauslegung und umgekehrt, sowie der Einfluss auf die Langzeitsicherheit skizziert.

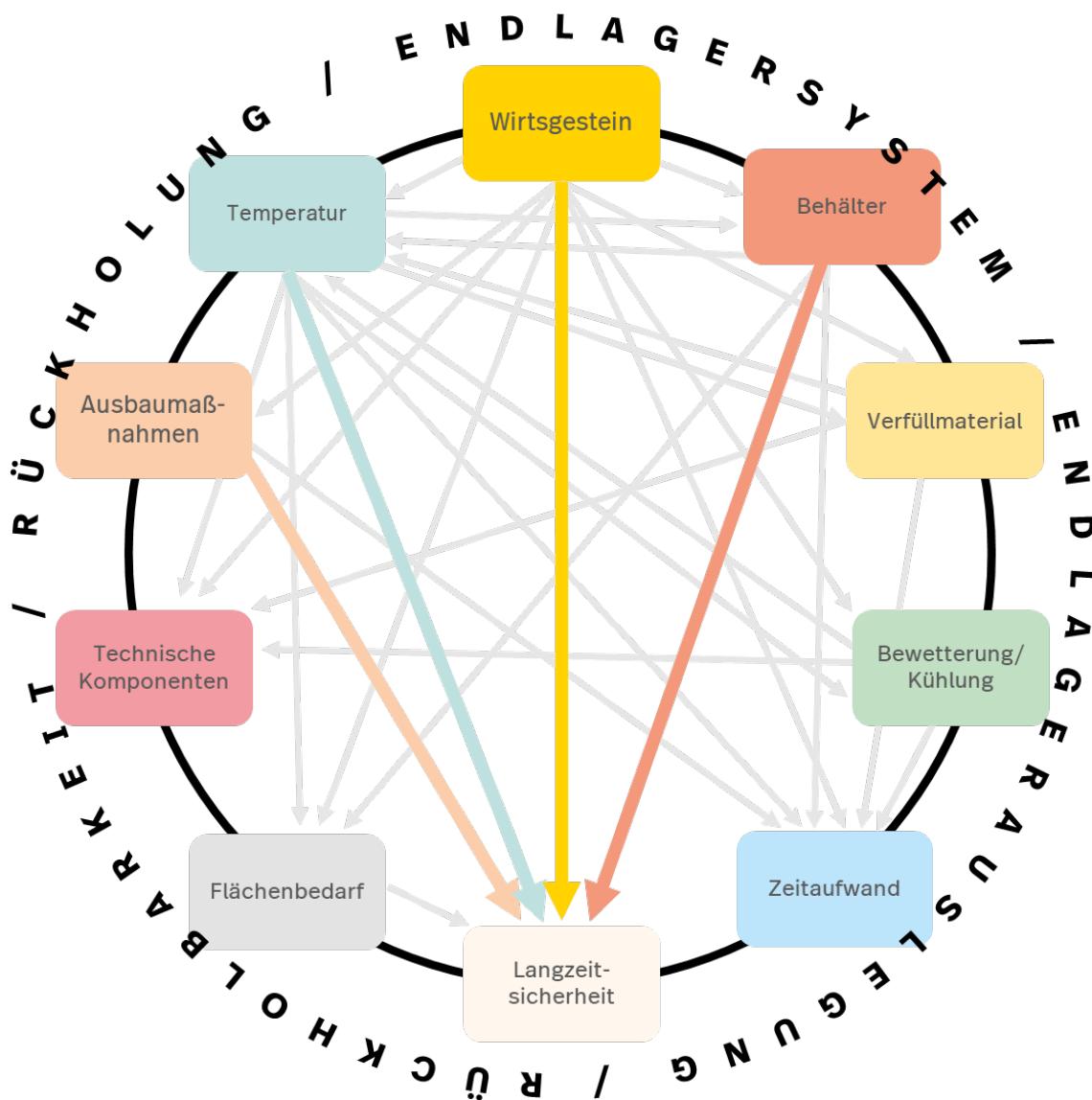


Abb. 4-3: Zusammenhänge zwischen Langzeitsicherheit, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung

4.3 Ausbaumaßnahmen

Aufgrund der gebirgsmechanischen Eigenschaften werden während einer Rückholung in Abhängigkeit vom Wirtsgestein Ausbauten zur Stabilisierung von Strecken und Grubenräumen in unterschiedlichem Ausmaß notwendig. In Steinsalz zum Beispiel können Grubenräume grundsätzlich standsicher und konturstabil aufgefahren werden (Lommerzheim et al. 2020), wobei flache und steile Lagerung sich unterscheiden. In flach lagernden Salzen können Firstsicherungsmaßnahmen notwendig werden. In Tongestein sind die gebirgsmechanischen Eigenschaften ungünstiger, so dass tragende Ausbauten von Grubenräumen vorzunehmen sind (Pöhler et al. 2010). Werden gleisgebundene Rücktransporte der Behälter in Betracht gezogen, sind diese Gleise im Zuge der Aufwältigung bzw. der Wiederaufwältigung von Strecken zu installieren (Herold et al. 2021). Ausbauten des Endlagers, die nach Einlagerung in diesem verbleiben, dürfen nicht zu einer Gefährdung der Langzeitsicherheit führen. Aus Gründen der Betriebssicherheit sei kein planmäßiges Rauben der Ausbauten vorgesehen. Dies kann auch die Neuauffahrung von Strecken bei einer Rückholung beeinflussen und wird aufgrund des daraus folgenden Aufwands als eher hinderlich eingeschätzt (Herold et al. 2020).

Auch für den Fall, dass eine selektive Rückholung durchgeführt werden soll, gilt wie oben unter „Langzeitsicherheit“ (Kapitel 4.2) ausgeführt, dass hierzu benötigte Ausbauten, falls sie im Grubengebäude verbleiben, nicht zu einer Gefährdung der Langzeitsicherheit führen dürfen (siehe auch Kapitel 4.2 zu den Auswirkungen von im Endlager verbleibenden Materialien auf die Langzeitsicherheit).

Ausbaumaßnahmen zur Durchführung einer Rückholung (Wiederauffahrung und / oder Neuauffahrung von Strecken und Hohlräumen zur Freilegung von Behältern) wirken sich auf den Gesamtzeitbedarf einer Rückholung aus.

Endlagerkonzepte mit Bohrlochlagerung benötigen für die Gewährleistung der Rückholungsoption gegebenenfalls Ausbauten der Bohrlöcher, die auch nach Verschluss des Endlagers in diesen verbleiben. Diese Ausbauten dienen zum einen der Konturstabilisierung der Bohrlöcher und zum anderen der Lagestabilisierung der Behälter, damit sie für den Fall der Rückholung sicher auffindbar sind. Zusätzlich dienen Ausbaumaßnahmen der Verhinderung von Lösungszuflüssen und gegebenenfalls der Schadstoff- und Radionuklidrückhaltung (Lommerzheim et al. 2020). Die Verfüllung der Hohlräume zwischen Behältern und Stahlliner zum Beispiel mit Sand hat Einfluss auf die Wärmeabfuhr an den Behälteraußenseiten und damit auf die Entwicklung der Temperaturen im Nahfeld der Behälter. Eingebrachter Sand kann beispielsweise die Wärmeabfuhr verbessern (Lommerzheim et al. 2020). Mögliche Einflüsse von im Endlager verbleibenden Materialien auf die Langzeitsicherheit sind in Kapitel 4.2 beschrieben.

In Abb. 4-4 sind wesentliche Zusammenhänge zwischen Ausbaumaßnahmen bei der Endlagerauslegung und bei einer Rückholung dargestellt.

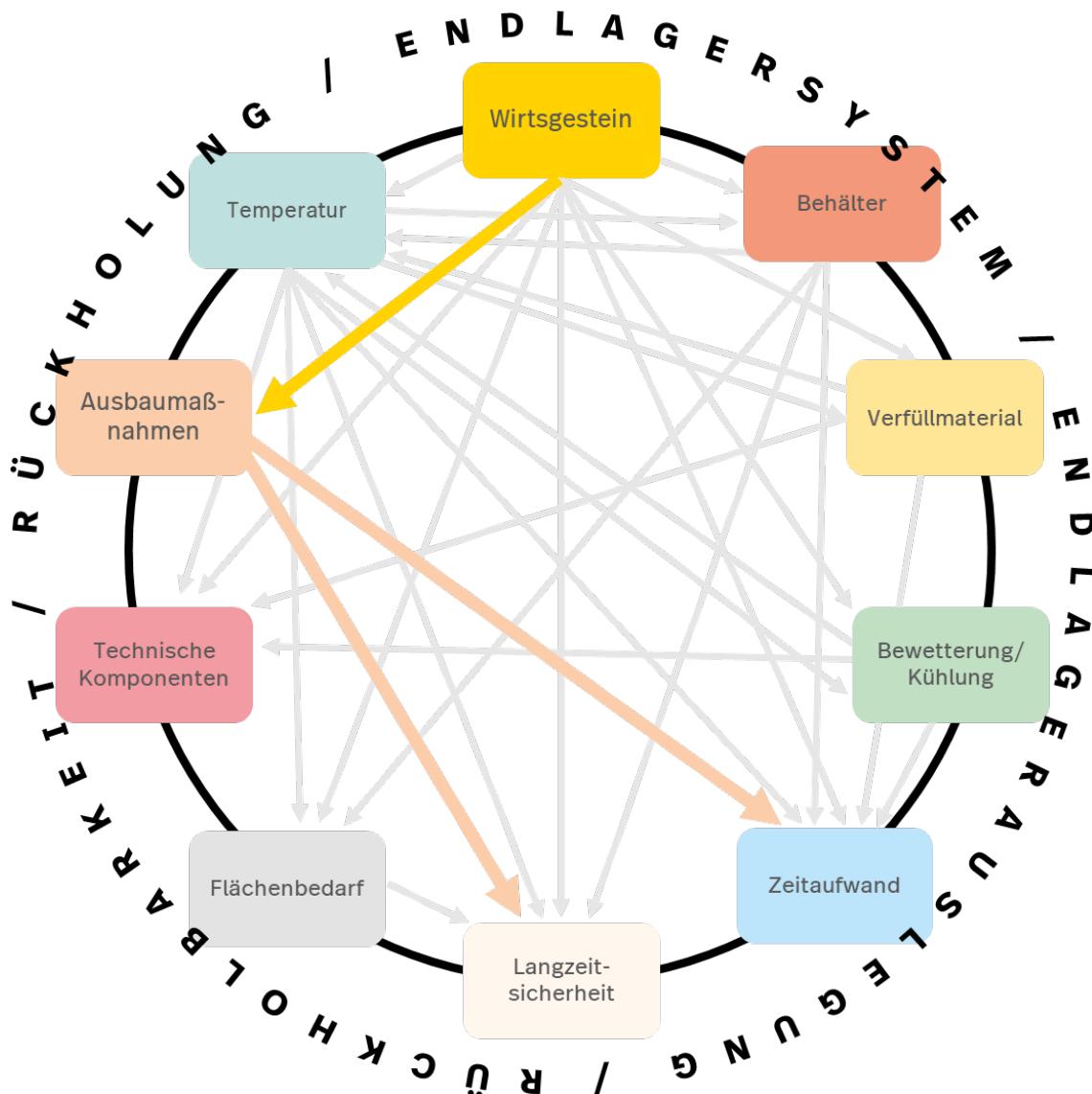


Abb. 4-4: Zusammenhänge zwischen Ausbaumaßnahmen, Rückholung und Endlagerauslegung

4.4 Einsatz von technischen Komponenten / Maschinen

Entsprechend der Anforderungen der EndlSiAnfV (siehe Kapitel 2.2) sollen für eine Rückholung möglichst die gleichen technischen Komponenten wie für die Einlagerung verwendet werden. Je nach Einlagerungs- und Rückholkonzept müssen diese Komponenten allerdings für die Rückholung modifiziert werden. Die Anzahl und die Komplexität der benötigten technischen Komponenten für die Rückholoption unterscheiden sich je nach Rückholkonzept. Gründe und Faktoren hierfür sind die Vielzahl unterschiedlicher Arbeitsschritte, die Einlagerungsform (horizontale Streckenlagerung oder Bohrlochlagerung) als auch die Wirtsgesteins- und die Versatzeigenschaften. Die technischen Herausforderungen einer Rückholung

resultieren insbesondere aus den sich im Endlager entwickelnden Temperaturen, sobald mit fortschreitendem Versatz und Verschluss von Einlagerungskammern und -strecken in Teilen des Endlagers die Bewetterung entfällt und die Temperaturen ansteigen (Bracke et al. 2019). Abb. 4-5 zeigt übergeordnete Einflüsse, die sich auf die Anforderungen an die technischen Komponenten bei einer Rückholung auswirken. Neben den Temperaturen ergeben sich unter anderem aus den mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und den Versatzmaterialen sowie den benötigten Streckenquerschnitten für die Rückholung weitere Randbedingungen für die Auswahl und die Auslegung der einzusetzenden Technik. Beispielsweise können in Ton- und Kristallingestein zur Aufwältigung bereits verfüllter Strecken Tunnelbagger zum Einsatz kommen. Für den Einsatz in Steinsalz wird die Verwendung von Teilschnittmaschinen geplant (Bertrams et al. 2021).

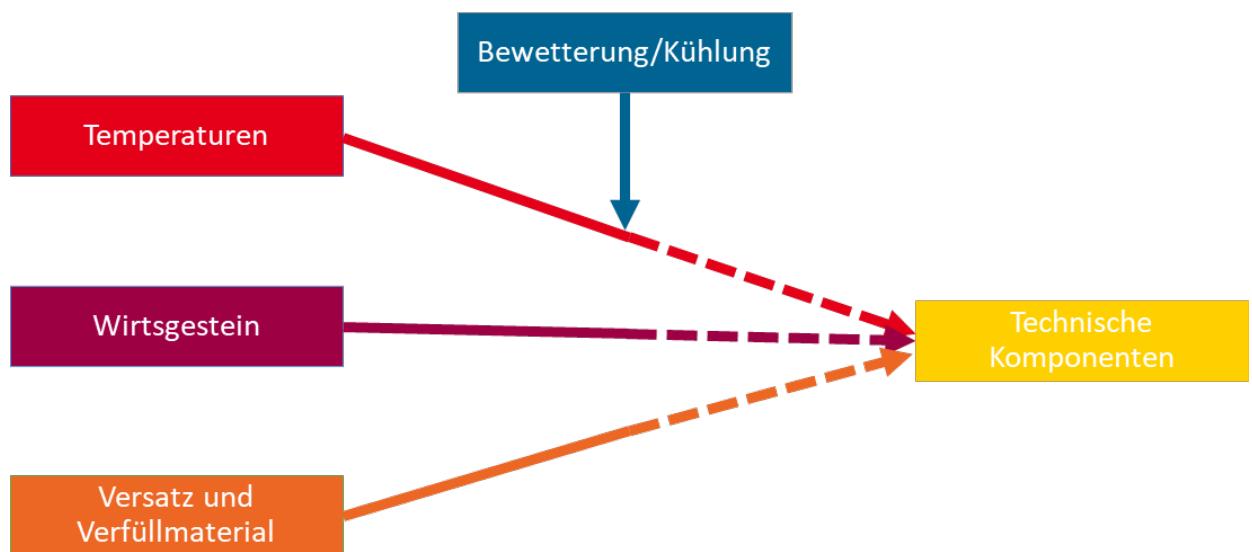


Abb. 4-5: Einflüsse auf technische Komponenten bei einer Rückholung

Maßnahmen zum Strahlenschutz bei einer Rückholung werden hier als Teil des Themenfeldes „Technische Komponenten“ behandelt.

Sowohl das Einlagerungskonzept (Strecken-, Bohrlochlagerung, die Wahl der eingelagerten Behälter und die Anordnung der Einlagerungsfelder (Strecken, Kammern oder Bohrlöcher)) als auch die zu wählenden Zugänge zu den Behältern (Neuauffahrungen, Wiederauffahrung von Einlagerungsstrecken oder Kreuzen von Strecken) haben Auswirkungen auf die zu implementierenden Strahlenschutzmaßnahmen wie zum Beispiel die Errichtung von Strahlenschutzbereichen. Bei der Bohrlochlagerung sind die Behälter beispielsweise nicht selbstabschirmend, so dass bei einer Rückholung vergleichende Abschirmmaßnahmen wie bei der Einlagerung (Bohrlochabschirmung und Transferbehälter) vorzusehen sind.

Während des Rückholungsprozesses sind kontinuierliche Messungen (Versatzbeprobung und Raumluftmessung) erforderlich, da zum Beispiel unerkannte Behälterdefekte nicht ausgeschlossen werden können, was zu einem Austritt von Gasen und Aerosolen aus dem Endlagerbehälter führen könnte. Gegebenenfalls sind

Einhausungen von Bereichen, die von Kontamination betroffen sind, notwendig (Herold et al. 2018).

In Abb. 4-6 werden wesentliche Zusammenhänge zwischen technischen Komponenten, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung skizziert.

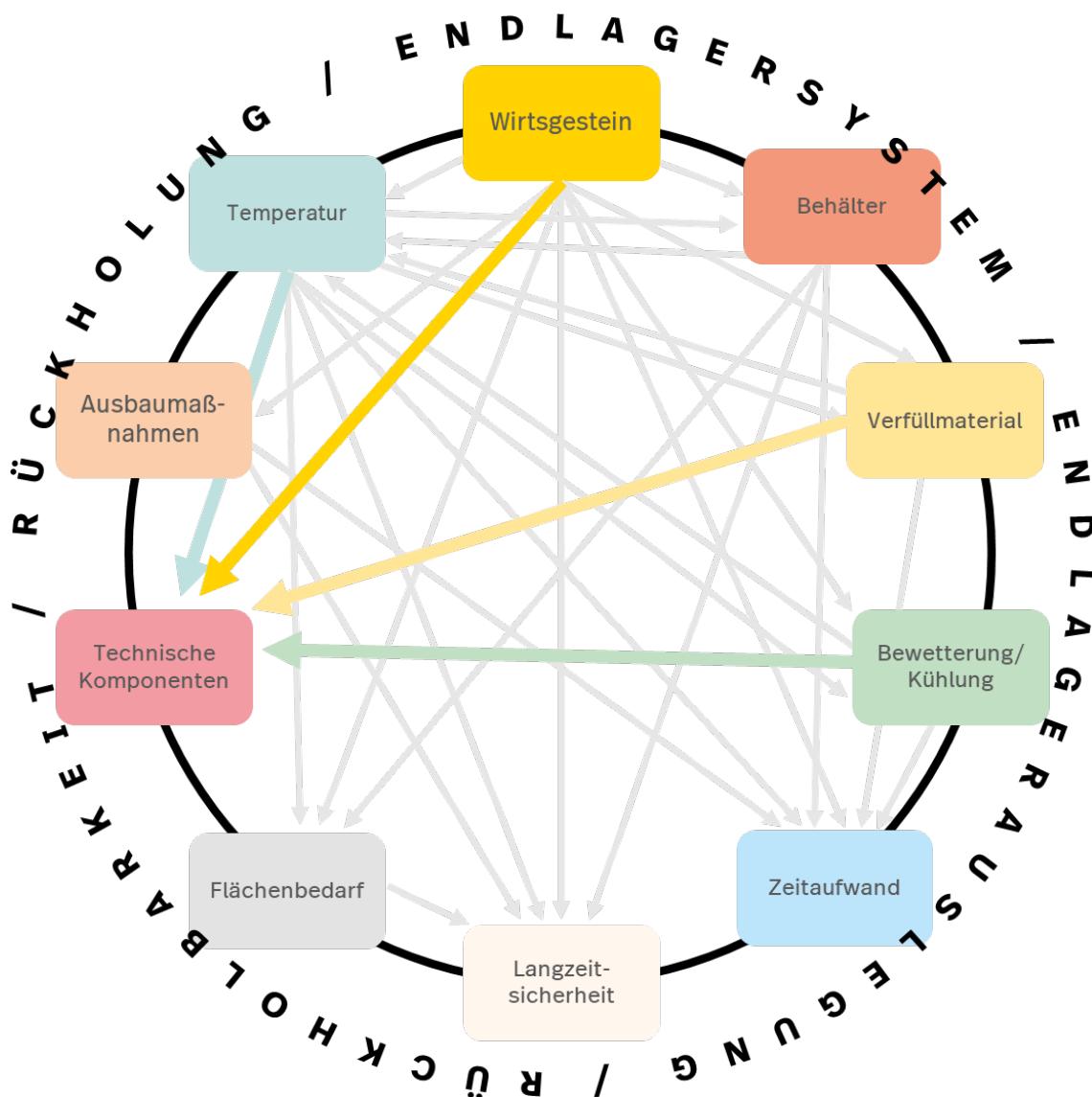


Abb. 4-6: Zusammenhänge zwischen technischen Komponenten, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung

4.5 Flächenbedarf

Für Behälter, Strecken und Bohrlöcher sowie bergbauliche, transport-, einlagerungs- und rückholtechnische Arbeiten als auch für Infrastrukturräume sind Mindestabstände und Mindestraumvolumen einzuhalten, die den Mindestbedarf der Fläche für das unterirdische Grubengebäude ergeben. Einen großen Einfluss auf die für ein Endlager benötigte Fläche haben Temperaturen, die sich an den

Endlagerbehälteroberflächen entwickeln (Auslegungstemperaturen der Behälteroberflächen) (Entsorgungskommission (ESK) 2022) (siehe auch Kapitel 4.1).

Von der DBE Technology GmbH wurden Berechnungen zum potentiellen Flächenbedarf eines Endlagers für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallin gestein auf der Basis des in Deutschland zu erwartenden Gesamtinventars an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen durchgeführt (DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC) 2016). Bei einer einheitlichen Auslegungstemperatur von 100 °C ergaben die Berechnung den geringsten Flächenbedarf für ein Endlager im Steinsalz. Eine Rückholoption und der damit zusammenhängende Flächenbedarf wurden in diesem Beispiel nicht explizit betrachtet. Bei der Bohrlochlagerung hängt der Flächenbedarf des Endlagers damit zusammen, wie viele Kokillen in ein Bohrloch eingelagert werden sollen. Ein Beispiel für einen größeren Flächenbedarf ist das Eingrabenkonzept KBS-3 mit vertikaler Bohrlochlagerung im Kristallin gestein mit multiplen ewG. Hier ist im Gegensatz zu anderen Konzepten für Bohrlochlagerung im Kristallin jeweils nur eine Kokille je Bohrloch vorgesehen. Dadurch werden in Summe mehr Bohrlöcher, mehr Bohrlochüberfahrungsstrecken und insgesamt ein größeres Grubengebäude erforderlich (Herold et al. 2021).

Die Flächengröße eines Endlagers (unterirdisches Grubengebäude) wirkt sich im Falle einer Rückholung aufgrund der Länge und des Volumens neu aufzufahrender bzw. wiederaufzufahrender Strecken auch auf den Zeitbedarf aus. Sind die Endlagerbehälter in größerem Abstand zueinander eingelagert, erhöht sich der Anteil aufzufahrender Bereiche. Ebenfalls erhöht sich der Aufwand für die Bewetterung bei größeren Hohlräumen.

In Abb. 4-7 werden wesentliche Zusammenhänge zwischen Flächenbedarf, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung gezeigt.

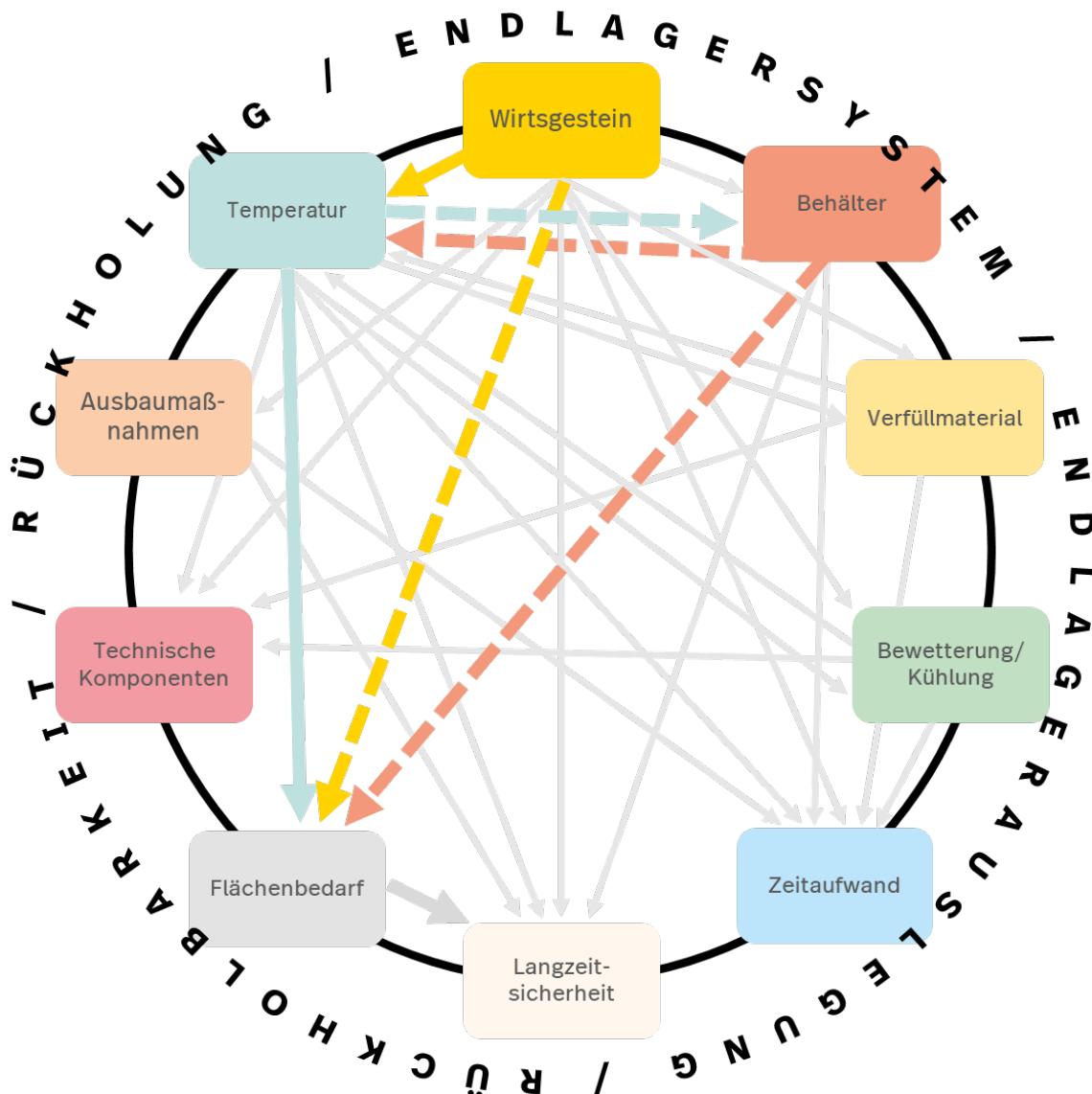


Abb. 4-7: Zusammenhänge zwischen Flächenbedarf, Rückholbarkeit, Rückholung, Endlagersystem und Endlagerauslegung

4.6 Zeitaufwand

Der Zeitbedarf für eine Rückholung hängt eng mit dem Aufwand zusammen, der aufgrund der Einlagerungsgeometrie, der Behälteranzahl und der Wirtsgesteinseigenschaften entsteht. Das Wirtsgestein ist entscheidend dafür, welcher Aufwand für Ausbauten von Strecken nötig ist und welche Vortriebsleistungen der Maschinen aufgrund der Gesteinsfestigkeit erreicht werden können. Die zum Zeitpunkt einer Rückholung im Endlager herrschenden Temperaturen führen zu unterschiedlich langen Zeiten, die für die Bewetterung und gegebenenfalls die Kühlung während der Auffahrungen von Strecken, sowie für die Behälterfreilegung und den Rückholungsprozess einzuplanen sind.

In den Wirtsgesteinen Ton- und Kristallingestein sind aufgrund ihrer Gebirgsegenschaften sowie der geomechanischen Eigenschaften des Versatzes vor einer Rückholung beispielsweise Ausbauten und Instandsetzungen von Firsten und Stößen notwendig (International Atomic Energy Agency (IAEA) 2002; Bertrams et al. 2021). Dies erhöht den Zeitbedarf gegenüber Wirtsgesteinen, die keinen Ausbau benötigen.

Auch die Anzahl der zurückzuholenden Behälter beeinflusst den Zeitbedarf. Je nach Behälteranzahl sind die Vorgänge der Behälterfreilegung, der Behälteraufnahme und des Behältertransports entsprechend oft zu wiederholen. Für ein Endlager in Steinsalz mit Streckenlagerung und einer Auslegungstemperatur von 200° C wird von ca. 3.000 Behältern ausgegangen (Bollingerfehr et al. 2018). Für ein Endlager in Tongestein mit Streckenlagerung bei einer Auslegungstemperatur von 150 °C werden ca. 10.000 Behälter benötigt (Lommerzheim und Jobmann 2015). In einem anderen Vorhaben werden ca. 14.000 Behälter angegeben, die bei einem Endlager im Kristallingestein bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C benötigt werden (Mönig et al. 2020).

Angaben zum Zeitaufwand bei der Endlagerauslegung, um die Rückholoption zu implementieren, werden in der Literatur nicht explizit ausgewiesen. Letztlich ist es nur bei einer ganz konkreten Endlagerplanung seitens des Betreibers möglich hierzu Angaben zu machen.

In Abb. 4-8 werden wesentliche Zusammenhänge zwischen Zeitaufwand, Rückholbarkeit, Rückholung, und Endlagersystem und Endlagerauslegung skizziert.

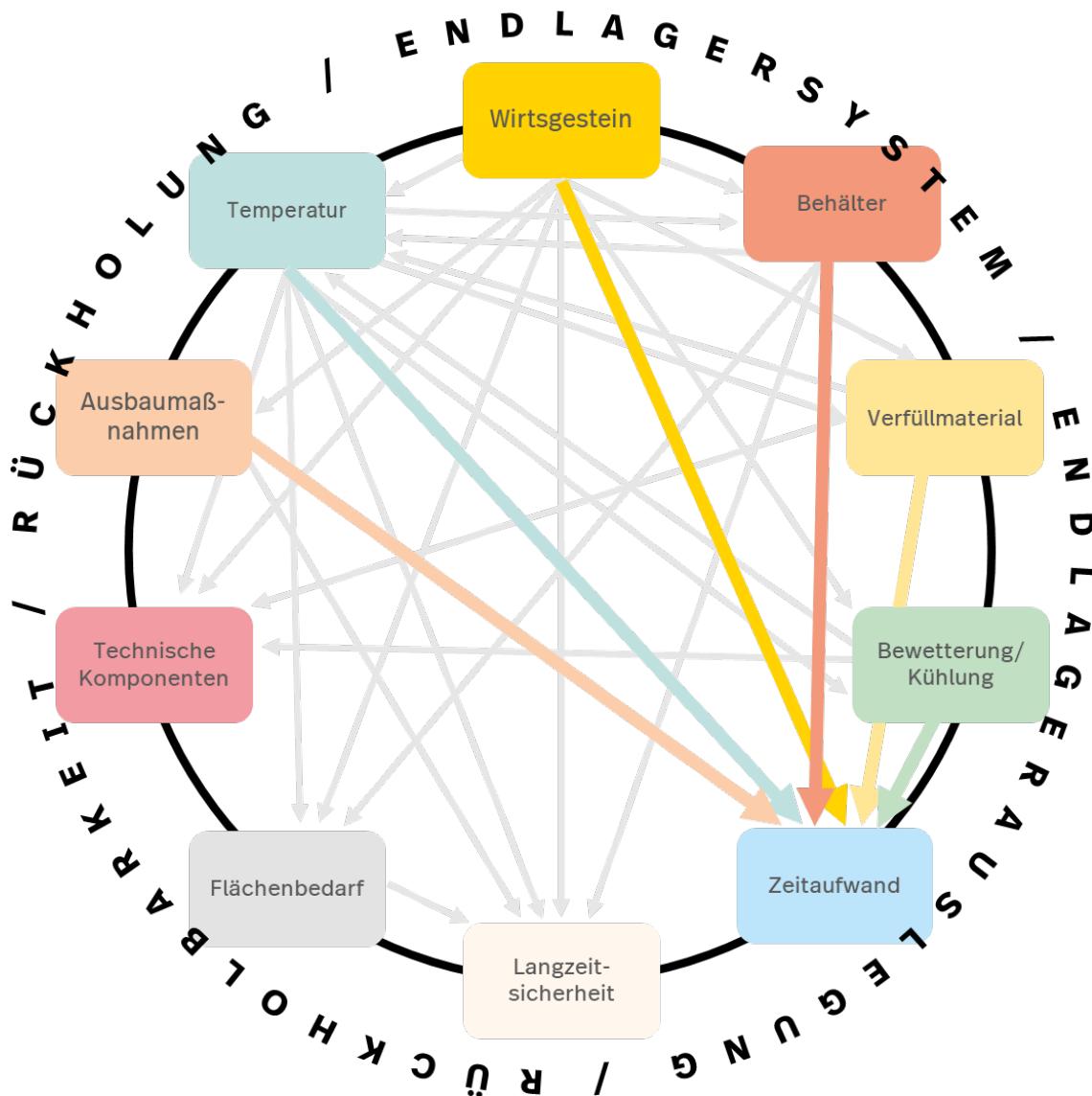


Abb. 4-8: Zusammenhänge zwischen Zeitaufwand, Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagersystem, Endlagerauslegung

5 Kriterienbasierte Bewertung

Eine kriterienbasierte Bewertung soll Transparenz und Nachvollziehbarkeit in Entscheidungsprozessen schaffen. Eine ausführliche Aufarbeitung des Standes von W&T zu generellen sicherheitsgerichteten Bewertungs- und Vergleichsmethoden findet sich unter anderem im Vorhaben Methoden für Sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren (MABeSt) (Frieling et al. 2019). Mit Hilfe der Ausprägungen von Indikatoren wird ein Kriterium selbst messbar gemacht (siehe zum Beispiel die Kriterien im StandAG in den Anlagen 1 bis 11 zum § 24 Abs. 3 bis 5). Im StandAG werden beispielsweise dem Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Anlage 1 zu § 24 Absatz 3, StandAG) bewertungsrelevante Eigenschaften und Bewertungsgrößen beziehungsweise Indikatoren zugeordnet. Der Begriff Indikator bezieht sich somit in der Regel auf eine messbare Bewertungsgröße. Die Ausprägungen von Kriterien und Indikatoren können sowohl quantitativ (zum Beispiel numerischer Wert) als auch qualitativ (zum Beispiel „gut“ oder „schlecht“) sein; das heißt, es können messbare Größen eines Merkmals oder auch bekannte Funktionszusammenhänge herangezogen werden. Zur Verwendung von Funktionszusammenhängen erfolgt im Kapitel 5.1 eine Ausarbeitung von Teilzusammenhängen, um die in Kapitel 4 dargestellten komplexen Zusammenhänge zwischen den dort beschriebenen Hauptaspekten aufzulösen und für die Zuordnung von Indikatoren zu Kriterien nutzen zu können.

Bei der Erstellung von Kriterien und Indikatoren wird sich an den Ausführungen im oben genannten MABeSt Bericht orientiert. In den folgenden Kapiteln wird eine systematische Herleitung einer Bewertungsgrundlage (siehe Teilzusammenhänge in Kap. 5.1) basierend auf Kriterien aufgezeigt. Die Bewertungskriterien anhand derer Vergleiche von Rückholkonzepten (die Durchführung der Rückholung) oder auch Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholung (Auslegungsmaßnahmen) erfolgen können, werden in Kapitel 5.2 dargestellt. Für den Vergleich soll in diesem Vorhaben bewertet werden, in Bezug auf welche Eigenschaft die jeweiligen Kriterien günstiger oder ungünstiger ausgeprägt sind.

Für eine robuste Bewertung ist entscheidend, ob eine ausreichende Menge an Daten vorliegt (Frieling et al. 2019). Neben der Quantität ist auch die Qualität entscheidend. Im Forschungsvorhaben BeRK besteht die Herausforderung, noch nicht vollständig ausgereifte Konzepte und in unterschiedlicher Detailtiefe beschriebene Maßnahmen vergleichbar zu machen. Entsprechend bewegen sich die zu erzielenden Aussagen auf einem eher generischen Niveau. Mit Zunahme der Menge an Daten könnten belastbarere Aussagen erzielt werden.

- Aggregation

Für eine abschließende Bewertung sind alle Teilbewertungsaspekte zusammenzuführen bzw. zu aggregieren (Frieling et al. 2019). Im Vorhaben BeRK erfolgt die Zusammenführung in Form von drei Leitkriterien (gewählter Begriff für die übergeordneten Hauptkriterien), die sich am Regelwerk orientieren (siehe Kapitel 5.2). Die aggregierten Informationen über einzelne Ausprägungen der Indikatoren führen zu einer Verdichtung von Kenntnissen und Fakten hinsichtlich der zu bewertenden Aspekte. Es ist zu beachten, dass mit einer Aggregation eine Reduzierung der Komplexität erfolgt und dies mit einem Informationsverlust verbunden ist. Hier muss abgewogen werden, welcher Aggregationsgrad zielführend ist. Dennoch kann durch eine kriterienbasierte Bewertung eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsunterstützung erfolgen; siehe auch (Frieling et al. 2019).

- Bewertung

Im Vorhaben BeRK werden Leitkriterien entwickelt (siehe Kapitel 5.2). Die Bewertung erfolgt anhand der Methodik des Paarvergleichs, wie sie zum Beispiel beim Optionenvergleich für die ASSE verwendet wurde (Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) 2019). Bei einem Paarvergleich werden die Alternativen (zum Beispiel unterschiedliche Maßnahmen bei einer Rückholung) auf Grundlage der bewertungsrelevanten Kriterien paarweise verglichen und es wird jeweils eine Bewertung durchgeführt. Diese Einzelbewertungen können gegebenenfalls später zu einer Gesamtwertung addiert werden (siehe zum Beispiel Meier oder Eckhardt (Meier 2002; Eckhardt et al. 2018)).

Für jedes der hier identifizierten Leitkriterien (siehe Kapitel 5.2) wird im Paarvergleich der einzelnen Indikatoren ermittelt, welche Maßnahmen bzw. Bestandteile des Rückholkonzepts die jeweils günstigere oder weniger günstige Ausprägung haben. Die Leitkriterien ermöglichen somit Aussagen

- a) in Bezug auf den Aufwand für eine Rückholung,
- b) in Bezug auf die Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung und
- c) in Bezug auf die Langzeitsicherheit aufgrund der Implementierung der Rückholoption.

Eine Zusammenführung oder Wichtung der Leitkriterien untereinander erfolgt nicht. Die Leitkriterien werden in Anlehnung an die Sicherheitsanforderungen zur Rückholung im § 13 EndlSiAnfV gleichberechtigt nebeneinandergestellt.

Herausforderungen

Für die Gewährleistung von Rückholbarkeit und zur Optimierung der Randbedingungen bei einer Rückholung werden Anpassungen des Endlagerdesigns vorgenommen. Diese Anpassungen variieren unter anderem nach Wirtsgestein und

Endlagerkonzept bzw. der Einlagerungsvariante und sind in komplexen Zusammenhängen miteinander verknüpft (siehe Kapitel 4). Die wesentliche Herausforderung im Vorhaben besteht darin, bewertungsrelevante Kriterien und Indikatoren auszuweisen, die für einen Vergleich von Rückholungsmaßnahmen (Maßnahmen bei einer tatsächlichen Rückholung) bzw. Maßnahmen zur Gewährleistung von Rückholbarkeit bei jeglicher Verschiedenheit von Endlager- und Rückholkonzepten verwendbar sind.

Bereits bei der Errichtung und während des Einlagerungsbetriebs des Endlagers erfolgen Maßnahmen zur Umsetzung der Anforderung „Rückholbarkeit“. Dies hat Auswirkungen auf die im Endlager herrschenden Randbedingungen zum Zeitpunkt einer Rückholung. Die Bedingungen, die zum Zeitpunkt einer Rückholung im Endlager herrschen (zum Beispiel Temperaturen) sind bei der Auswahl der Kriterien und Indikatoren für die entwickelte Bewertungsmethode zu berücksichtigen. Hierzu werden die Spannbreite der möglichen Rahmenbedingungen bei einer Rückholung sowie darauf abgestimmte Arbeitsschritte einer Rückholung und für eine Rückholung benötigte technische Komponenten betrachtet.

Maßnahmen zur Implementierung der Rückholbarkeit und zur Optimierung einer möglichen Rückholung dürfen nicht das Pramat der Langzeitsicherheit gefährden. Das primäre Ziel ist die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle und nicht deren Rückholung. Somit sind auch potentielle Einflüsse auf die Langzeitsicherheit aufgrund getroffener Maßnahmen für die Gewährleistung der Rückholbarkeit, zu betrachten.

Lösungsansatz

Basierend auf den in Kapitel 4 aufgezeigten komplexen Verflechtungen zwischen Rückholbarkeit, Endlagerkonzepten und daraus abgeleiteten Endlagerauslegungen wird zunächst eine Vereinfachung der Darstellungen der Zusammenhänge angestrebt. Hierzu werden zu jedem Themenkomplex aus Kapitel 4 (siehe Abb. 4-1) systematisch Teilzusammenhänge beschrieben und die Verkettungen aufgelöst (siehe Kapitel 5.1). Die herausgearbeiteten Teilzusammenhänge bilden dann die Grundlage für die Bestimmung und Zuordnung von Indikatoren zu den Leitkriterien (siehe Kapitel 5.2).

Als Leitkriterien werden in Kapitel 5.2 folgende Kriterien hergeleitet (Kriterienkatalog):

1. Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“
2. Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“
3. Leitkriterium „Langzeitsicherheit“

Die Entwicklung der Leitkriterien wird am Regelwerk, explizit am § 13 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung, orientiert. Dies entspricht dem in Frieling et al. (2019) beschriebenen Vorgehen zur Auswahl von Kriterien mit Fokussierung auf das jeweilige Zielsystem (hier die Regelwerksanforderungen) zur Herleitung bewertungsrelevanter Kriterien und Indikatoren zur Überprüfung bestimmter Einflussgrößen (Frieling et al. 2019). Die Leitkriterien ermöglichen es, Rückholkonzepte (Maßnahmen für Rückholbarkeit, Arbeitsschritte und Maßnahmen bei einer Rückholung) in Bezug auf den technischen und zeitlichen Aufwand einer Rückholung, die Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung und den Einfluss auf Langzeitsicherheitsaspekte aufgrund von Maßnahmen zur Rückholbarkeit oder Rückholung zu bewerten.

Der Aufbau der Leitkriterien richtet sich nach dem Aufbau der im StandAG enthaltenen Kriterien. Auch dort erfolgen Bewertungen mit Hilfe von Indikatoren bzw. den Ausprägungen der jeweiligen Indikatoren. Im Zuge der hier durchgeföhrten Bewertung erfolgt eine Einteilung in günstiger und weniger günstig in Bezug auf die jeweilige Zielgröße. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass zum Teil sehr generische Funktionszusammenhänge und Informationstiefe in der Bewertungsmethode verwendet werden können.

5.1 Ableitung von Teilzusammenhängen – Systemanalyse

Im Arbeitsschritt „Ableitung von Teilzusammenhängen – Systemanalyse –“ werden in den Unterkapiteln (Kapitel 5.1.1 bis Kapitel 5.1.10) die komplexen Verkettungen zwischen Rückholbarkeit, Rückholung und Endlagerdesign (siehe Kapitel 4) aufgelöst. Dazu wird jeder Aspekt (siehe Abb. 4-1) in Teilzusammenhänge untergliedert und deren Eigenschaften und / oder Ausprägungen, die aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung von Relevanz sind werden herausgearbeitet. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, mögliche geeignete Indikatoren für die Ausgestaltung der Leitkriterien in Kapitel 5.2 zu identifizieren. Im Fokus stehen jeweils die Fragen, ob die Eigenschaft und / oder die Ausprägung des jeweiligen Aspektes für die Rückholbarkeit oder die Rückholung von Bedeutung sind und ob es möglich ist, diese Eigenschaften (Ausprägungen) mit geeigneten Bewertungsgrößen zu messen (Ableitung bewertungsrelevanter Parameter).

Für jeden Aspekt wird ein Kurzüberblick der Hauptzusammenhänge gegeben, ebenso für die Teilzusammenhänge. Die Aspekte sind als weit gefassten Themenfelder zu verstehen. Die Zuordnung der Teilzusammenhänge zu den jeweiligen Aspekten könnte in einzelnen Fällen auch anders vorgenommen werden. Für die Ableitung von Indikatoren für die Leitkriterien ist dies nicht wesentlich, weil die übergeordneten Aspekte bei den Leitkriterien nicht mehr benötigt werden.

Auch wenn in Einzelfällen eine andere Zuordnung zu den Aspekten zur Beschreibung der Teilzusammenhänge gewählt würde, ergäben sich die gleichen Indikatoren, welche für die Leitkriterien als Bewertungsgrößen gebraucht werden.

5.1.1 Aspekt Wirtsgestein

Das Einlagerungskonzept, die Endlagerauslegung und die Auslegung technischer Komponenten zur Einhaltung des Sicherheitskonzeptes werden insbesondere durch die Wahl des Wirtsgesteins bestimmt. Je nach Endlagerkonzept ergeben sich wesentliche Randbedingungen für eine Rückholung.

Rolle des Wirtsgesteins für die Implementierung von Rückholbarkeit:

- Anpassungen an **Temperaturen** (Begrenzungen) für eine Ermöglichung der Rückholung bzw. für die Schaffung geeigneter Randbedingungen bei einer Rückholung sind in **Steinsalz** in Abhängigkeit vom gewählten Einlagerungskonzept notwendig / mitzudenken. Bei der Festlegung der Auslegungstemperaturen ist der Zielkonflikt zwischen niedrigeren Temperaturen für die Rückholung und höheren Temperaturen, die zu schnelleren Kompaktionsraten des Salzgruses und damit zu einem schnelleren Einschluss der Behälter führen, aufzulösen. Bei einem Endlager in **Tongestein** oder auch **Kristallingestein** erfolgen aufgrund der Barriereeigenschaften von Buffer und Wirtsgestein Temperaturbegrenzungen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Ungeachtet dieser Wirtsgesteinsspezifika bezüglich der Auslegungstemperaturen des Endlagers für die Implementierung der Rückholbarkeit stellen die Temperaturen zum Zeitpunkt einer möglichen Rückholung bei allen Wirtsgesteinen ganz konkret eine Randbedingung für den Aufwand dar, der zur Herstellung der gewünschten Soll-Temperatur vorzunehmen ist (beispielsweise Dimensionierung der Bewetterungstechnik und Auskühlzeiten).
- **Ausbaumaßnahmen** zur Streckenstabilisierung sind in einer Rückholungsphase in **Tongestein** und gegebenenfalls stark geklüfteten **Kristallingesteinen** notwendig. Die Art und die Menge von Ausbaumaßnahmen kann Auswirkungen auf die Rückholbarkeit haben. Es können Optimierungen vorgenommen werden, um eine Rückholung möglichst wenig zu behindern. Maßnahmen zur Optimierung können beispielsweise das Rauben von Ausbauten nach der Einlagerung oder aber auch der Einsatz von überschneidbaren Ausbauten sein (Bollingerfehr et al. 2014).
- **Streckenauffahrungen** in **Kristallingestein** sollten sich aufgrund des hohen Auffahrungsaufwandes auf Wiederauffahrungen beschränken (Bollingerfehr et al. 2014). Das bedeutet, dass in der Errichtungs- und Einlagerungsphase die Streckenvolumina und die Streckenführung bereits entsprechend der Notwendigkeiten bei einer Rückholung aufzufahren sind. Beispielsweise müssen Streckenquerschnitte bereits für die Einlagerung so groß aufgefahren werden, dass sie allen Anforderungen bei einer Rückholung genügen (Bollingerfehr et al. 2014).

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Wirtsgesteins (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Gesteinsart:** Steinsalz, Tongestein oder Kristallingestein; die Gesteinsart hat wesentlich Einfluss auf das Endlager- und damit auch auf das Rückholungskonzept.
- **Konvergenz:** Die Konvergenz des Wirtsgesteins ist insbesondere bei einem Endlager in Steinsalz relevant. Sie beeinflusst die Häufigkeit von Streckennachschnitten im Rückholungszeitraum.
- **Gesteinsfestigkeit:** Die Gesteinsfestigkeit hat Einfluss auf Auslegung und Art der technischen Komponenten für Auffahrungen bei einer Rückholung.
- **Standfestigkeit:** Die Standfestigkeit des Wirtsgesteins ist insbesondere bei einem Endlager in Tongestein relevant. Sie entscheidet über die Notwendigkeit von Ausbaumaßnahmen zu Strecken- und Hohlraumstabilisierung in der Rückholphase sowie Art und Menge dieser Ausbauten bei Errichtung und Einlagerung.
- **Teufe:** Die Endlagerteufe wirkt sich mit auf die Konvergenz und damit auf die Nachschnitthäufigkeit der Strecken in Steinsalz aus.

Tab. 5-1: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Wirtsgesteins

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
Wirtsgestein	Gesteinsart	Einfluss auf die Auswahl des Endlagerkonzeptes und die Endlagerauslegung und damit auf die Randbedingungen bei einer Rückholung
	Konvergenz	Nachschnitthäufigkeit von Strecken in der Rückholungsphase in Steinsalz
	Gesteinsfestigkeit	Auslegung technischer Komponenten für Auffahrungen und ggf. Beitrag zum Zeitbedarf für Auffahrungen <i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Technische Komponenten</i>

Hauptaspekt / The-menkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
	Standfestigkeit	<p>Aufwand zur Implementierung von Strecken- und Hohlräumausbauten, insbesondere in Tongestein</p> <p>Oder:</p> <p><i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Ausbaumaßnahmen</i></p>
	Teufe	<p>Beitrag zur Konvergenz und damit auf die Nachschnitthäufigkeit von Strecken in Steinsalz</p>

5.1.2 Aspekt Behälter

Der Behälter stellt eine wesentliche Sicherheitskomponente im Endlagersystem dar. Er übernimmt oft wesentliche Barrierefunktionen, insbesondere bei Endlagerkonzepten in Kristallingestein. Wesentlich bei der Auslegung von Behältern ist die Berücksichtigung korrosiver Prozesse vor dem Hintergrund der Langzeitsicherheit und dem Ziel eines möglichst langen Erhalts der Barriere „Behälter“. Dies kann die Art und die Menge der Behälter mitbestimmen. Durch das Behältermaterial ins Endlager eingebrachte Stoffe können Auswirkungen auf chemische und physikalische Prozesse haben, die Aspekte der Langzeitsicherheit berühren.

Die Anzahl an Behältern und die Behälterabstände bestimmen wesentlich die Randbedingungen bei einer Rückholung mit (Bollingerfehr et al. 2014). Über Behälterabstände (Einlagerungsgeometrie) kann Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Endlager genommen werden. Die Ist-Temperatur im Endlager zum Zeitpunkt einer Rückholung bestimmt den Aufwand zur Herstellung der benötigten Soll-Temperatur mit. Eigenschaften des Behälters (Gewicht und Geometrie) beeinflussen Auslegungen der technischen Komponenten bei einer Rückholung beispielsweise für die Aufnahme und den Transport des Behälters. Die Anzahl an Behältern wirkt sich bei einer Rückholung auf den Aufwand aus. Je mehr Behälter zurückzuholen sind, umso häufiger sind dazu notwendige Arbeitsabläufe zu wiederholen.

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen der Behälter (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Anzahl:** Die Gesamtzahl der Behälter ergibt sich unter anderem aus der Abfallmenge, der Behälterbeladung und wärmeleitenden Eigenschaften zur Einhaltung von Temperaturauslegungen des Endlagers. Die Anzahl der Behälter hat im Fall einer Rückholung Auswirkungen auf den zeitlichen Aufwand der zu wiederholenden Arbeitsschritte (Freilegung, Aufnahme und Transport). Werden noch zusätzliche strahlenschutztechnische Komponenten implementiert, wie beispielsweise Overpacks, wirkt sich auch hier die Behälteranzahl unmittelbar auf den Aufwand aus.
- **Abstand:** Behälterabstände wirken sich auf den Gesamtflächenbedarf des Endlagers und damit auf aufzufahrende Streckenlängen (Neu- und Wiederauffahrungen) bei einer Rückholung aus.
- **Materialart und -menge:** Art und Menge der durch die Behälter ins Endlager eingebrachten Materialien sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf chemische und physikalische Prozesse bei der Langzeitsicherheit zu berücksichtigen, wie beispielsweise ihr möglicher Beitrag zur Gasbildung. Dieser Aspekt ist insofern relevant, als aufgrund der Rückholbarkeit (Zusammenhang zwischen den Behältern den Temperaturen und der Rückholbarkeit im Steinsalz) gegebenenfalls eine größere Behälteranzahl gewählt wird, als bei einem Endlager ohne Rückholbarkeit gebraucht werden würde.
- **Inventar:** Das Behälterinventar bzw. die Aktivität des Inventars (wärmeproduzierend) trägt zur Temperaturentwicklung nach Einlagerung der Behälter und somit zur Ist-Temperatur zu Beginn einer optionalen Rückholung bei. Dies ist relevant für Endlager in Steinsalz, bei denen Temperaturauslegungen durch die Rückholbarkeit mitbestimmt werden. Das Inventar pro Behälter bestimmt somit die Gesamtanzahl der benötigten Behälter. Das Inventar in Kombination mit den Abschirmeigenschaften des Behälters (Behälterauslegung) führt zur Dosisleistung des Behälters.
- **Dosisleistung:** Die Dosisleistung der Behälter ist eine Folge der Aktivität und der Abschirmeigenschaften des Behältermaterials (siehe auch Merkmal „Inventar“). Sie erfordert unter Umständen technische Maßnahmen zum Strahlenschutz wie Overpacks bei Einlagerung und Rückholung.

Tab. 5-2: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen der Behälter

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
Behälter	Anzahl	<p>Wiederholung von Arbeitsschritten für Freilegung, Aufnahme, Transport und ggf. Implementierung von Strahlenschutzmaßnahmen (Abschirmung)</p>
		<p>Die Behälteranzahl trägt zum Flächenbedarf des Endlagers und dem Aufwand für Streckenauffahrungen bei. <i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Flächenbedarf.</i></p>
		<p>Beitrag zur Temperaturfeldentwicklung nach Einlagerung und damit zu den Ist-Temperaturen bei einer Rückholung. <i>Siehe Einflüsse bei Hauptaspekten Bewetterung / Kühlung und Temperatur.</i></p>
	Abstand	<p>Auffahrungsaufwand entsprechend der benötigten Streckenlängen</p>
		<p>Beitrag zum Flächenbedarf des Endlagers. <i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Flächenbedarf.</i></p>
		<p>Beitrag zur Temperaturfeldentwicklung nach Einlagerung und damit zu den Ist-Temperaturen bei einer Rückholung. <i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Temperatur.</i></p>

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
	Materialart und -menge	<i>Beitrag zur Langzeitsicherheit</i> Chemische-physikalische Einflüsse bei Verbleib im Endlager und damit ggf. relevant für die Langzeitsicherheit
	Inventar	Beitrag zur Temperaturfeldentwicklung nach Einlagerung und damit zu den Ist-Temperaturen bei einer Rückholung <i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Temperatur</i>
		Inventarmenge bzw. Aktivität wirkt sich auf Behälteranzahl und den Flächenbedarf aus. <i>Siehe Einfluss der Behälteranzahl auf Aufwand bei Rückholung.</i>
	Dosisleistung	Ggf. Bedarf der Nutzung von technischen Komponenten für Strahlenschutz bei Rückholung (Abschirmmaßnahmen); mit entsprechendem Zeitaufwand zur Implementierung <i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Technische Komponenten und Aufwand aufgrund der Behälteranzahl</i>

5.1.3 Aspekt Verfüllmaterial

Unter dem Aspekt Verfüllmaterial werden hier Eigenschaften von dem Verfüllmaterial für die Streckenverfüllung als auch die Bohrlochverfüllung oder die Verfüllungen von Verrohrungen erfasst, die sich auf die Rückholung auswirken können.

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Verfüllmaterials (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Verfestigung:** Nach der Einlagerung können verfestigte Materialien den Aufwand zur Entfernung beeinflussen. Je nach Verfestigung von bei Rückholung zu entfernendem Verfüllmaterial (Streckenverfüllung und Verfüllungen von Verrohrungen), zum Beispiel aufgrund von sich entwickelnden Temperaturen im Endlager, dem Gebirgsdruck oder dem Material selbst (zum Beispiel Beton), werden entsprechend ausgelegte technische Komponenten zur Entfernung benötigt.
- **Art und Menge:** Für die Art und die Menge des zu entfernenden Verfüllmaterials als bei einer Rückholung werden entsprechend ausgelegte technische Komponenten benötigt. Bei Nichtrückholung ist der Einfluss auf die Langzeitsicherheit zu berücksichtigen.

Tab. 5-3: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Verfüllmaterials

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses (Einfluss auf ...)
Verfüllmaterial	Art und Menge	Aufwand zur Entfernung in Rückholungsphase
		Einsatz und Auslegung technischer Komponenten zur Verfüllmaterialentfernung Siehe <i>Einflüsse beim Hauptaspekt Technische Komponenten</i> .
		Beitrag zur Langzeitsicherheit Chemische-physikalische Einflüsse bei Verbleib im Endlager und damit ggf. auf Langzeitsicherheit
	Verfestigung	Aufwand zur Entfernung bei einer Rückholung
		Auslegung technischer Komponenten zur Verfüllmaterialentfernung Siehe <i>Einflüsse beim Hauptaspekt Technische Komponenten</i> .

5.1.4 Aspekt Bewetterung / Kühlung

Aufgrund der wärmeentwickelnden Eigenschaften der hochradioaktiven Abfälle und der sich nach Einlagerung einstellenden Temperaturen im Endlager werden bei einer Rückholung Bewetterungs- und Kühlungskonzepte zur Herstellung von Soll-Temperaturen benötigt, die gegebenenfalls den Aufenthalt von Personal unter Tage als auch eine ausreichende Leistungsfähigkeit von Maschinen ermöglichen. Den Ist-Temperaturen zu Beginn einer Rückholung kommt eine Schlüsselrolle bei der grundsätzlichen „Machbarkeit“ einer Rückholung zu. Temperaturen bestimmen, ob zusätzlich zur Bewetterung auch noch eine Kühlung (Kühlaggregate) einzuplanen ist. Je nach Höhe der vorherrschenden Temperaturen sind Arbeitspausen für die Abkühlung von Maschinen einzuplanen. Dies hat Auswirkungen auf den zeitlichen Aufwand einer Rückholung (Jobmann et al. 2016), (Bracke et al. 2019), (Bollingerfehr et al. 2014). Während einer Rückholung sind die allgemeinen Vorgaben der Klimabergverordnung (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 09.06.1983) einzuhalten. Es gelten unterschiedliche Feucht- und Trockentemperaturen für Grubenbaue in Steinsalz und Tongestein.

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von Bewetterung / Kühlung (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Art und Umfang:** Hierunter werden die für die Bewetterung und gegebenenfalls die Kühlung benötigten technischen Komponenten (beispielsweise Wettertüren und Bewetterungslutten) verstanden. Art und Umfang werden, neben den Ist-Temperaturen, von der Fläche des Endlagers beeinflusst. Die Länge der zu bewetternden Strecken beeinflusst die Menge an Komponenten zur Bewetterung / Kühlung. Die Ist-Temperatur zu Beginn einer Rückholung kann ein Indiz dafür sein, ob reine Bewetterungstechnik zur Erreichung der Soll-Temperaturen für das Rückholkonzept ausreichend ist, oder ob zusätzlich Kühltechnik zu implementieren ist.
- **Bewetterungszeiten:** Hierunter sind Zeiten zu verstehen, während denen keine Arbeiten stattfinden können, weil über die Bewetterung erst Soll-Temperaturen (günstige Temperaturbedingungen) für Personal und Maschinen oder auch zur Behälterhandhabung (Bollingerfehr et al. 2014) hergestellt werden müssen.
- **Kühlung:** Wird bei einer Rückholung zusätzliche Kühltechnik benötigt (Kühlaggregate), um die Soll-Temperaturen für die Arbeiten herzustellen, bedingt dies zusätzlichen Implementierungsaufwand.

Tab. 5-4: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von Bewetterung / Kühlung

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
Bewetterung / Kühlung	Art und Umfang	Je nach benötigter Art und Menge von Bewetterungs- / Kühltechnik bei Rückholung hat dies Aufwand zur Implementierung zur Folge.
	Bewetterungszeiten	Pausen zur Herstellung von Soll-Temperaturen für nachfolgende Arbeitsschritte bei Rückholung
	Kühlung	Zusätzliche Kühltechnik zur Herstellung von Soll-Temperaturen bei Rückholung

5.1.5 Aspekt Technische Komponenten

Technische Komponenten und ihre Auslegung für eine Rückholung werden von dem Wirtsgestein, dem Endlagerkonzept (Einlagerungsvariante und Endlagerauslegungen) und den daraus folgenden Rahmenbedingungen für eine Rückholung (beispielsweise Temperaturen) beeinflusst. Der Auslegungsaufwand für die Technik entscheidet mit über den Aufwand für die Implementierung der Rückholoperation. Der Aufwand für die Entwicklung der Technik zur Einlagerung kann vom Aufwand für die benötigte Technik bei einer Rückholung abweichen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Einlagerungstechnik aufwändige Modifikationen für eine Rückholung voraussetzt. Gegebenenfalls wird zusätzliche zur Einlagerungstechnik Technik für die Rückholung benötigt. Auch die Art und die Anzahl benötigter technischer Komponenten bei einer Rückholung sind mitbestimmend für den Aufwand.

Die unter dem Aspekt „Technische Komponenten“ vorgeschlagenen zu berücksichtigenden Eigenschaften und Ausprägungen können je nach Detailtiefe zu einem Rückholkonzept (Arbeitsschritte und benötigte Technik) ergänzt und konkretisiert werden. Im nächsten Schritt kann für jede Komponentengruppe die benötigte Anzahl, deren Verfügbarkeit / Redundanzen sowie der Technologiereifegrad (TLR) aufgeführt werden.

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von technischen Komponenten (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Anzahl:** Die Anzahl technischer Komponenten, die für eine Rückholung benötigt werden hat Einfluss auf den Aufwand für die Verbringung nach unter Tage oder auch die Implementierung der Komponenten im Endlager.
- **Verfügbarkeit / Redundanzen:** Einsatzbereitschaft von Maschinen für Auffahrungen, Freilegung, Aufnahme und Transport der Behälter in Abhängigkeit von Störanfälligkeit, Wartungsaufwand und vorhandenen Redundanzen
- **Technologiereifegrade (TLR):** Beim Technologiereifegrade geht es um die Zuordnung der verwendeten technischen Komponenten, von bewährter Bergbautechnik bis hin zum Unikat für die Anpassung an eine Rückholung für ein konkretes Endlager (rückholspezifische Auslegung). Der TLR kann gegebenenfalls Indizien für die Verfügbarkeit der technischen Komponenten aufgrund zum Beispiel unbekannter Störfallanfälligkeit und Wartungshäufigkeit und somit Ausfallzeiten für Komponenten liefern.

Tab. 5-5: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von technischen Komponenten

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
Technische Komponenten	Anzahl	Aufwand für die Verbringung nach unter Tage bzw. Implementierung der Komponenten
	Verfügbarkeit / Redundanzen	Einsatzfähigkeit von Komponenten für reibungslose Verläufe von Arbeitsschritten
	Technologiereifegrade (TLR)	Auswirkung auf Zuverlässigkeit / Einsatzbereitschaft

5.1.6 Aspekt Ausbaumaßnahmen

Unter dem Aspekt Ausbaumaßnahmen werden sowohl Ausbauten gefasst, die bei der Endlagererrichtung und / oder bei der Einlagerung der Behälter spezifisch aufgrund der Rückholoption vorgenommen werden (beispielsweise Verrohrungen zur späteren Behälterauffindung (Kindlein et al. 2018) oder Sockel zur besseren Aufnahme der Behälter bei einer Rückholung), als auch Ausbauten, die bei der Durchführung einer Rückholung benötigt werden (zum Beispiel wirtsgesteinsspezifische

Notwendigkeit zur Streckenstabilisierung und -offenhaltung in Tongestein) (Lommerzheim et al. 2020).

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von Ausbaumaßnahmen (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Art und Menge bei Errichtung / Einlagerung** (bei Verbleib von Ausbauten im Endlager nach Einlagerung): Ausbauten, die nach der Einlagerung der Behälter wieder entfernt werden, verursachen keinen Aufwand in einer Rückholphase und leisten keinen Beitrag zur Langzeitsicherheit. Aufwand in der Rückholungsphase kann jedoch entstehen, wenn verbliebene Ausbauten zunächst wieder entfernt werden müssen oder bei der Streckenführung zu umfahren sind.
- **Art und Menge in Rückholphase:** Hier kann Aufwand indirekt aufgrund benötigter technischer Komponenten für den Ausbau entstehen und Zeitaufwand für die Implementierung verursachen. Hier sind gegebenenfalls auch Maßnahmen für Monitoring und Safeguard Maßnahmen mitzudenken.

Tab. 5-6: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen von Ausbaumaßnahmen

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
Ausbaumaßnahmen	Art und Menge bei Errichtung / Einlagerung	<i>Beitrag zur Langzeitsicherheit</i> Chemische-physikalische Einflüsse bei Verbleib im Endlager und damit ggf. auf Langzeitsicherheit
		Bei Notwendigkeit der Entfernung oder der Umfahrung in Rückholphase ergibt sich Zeitaufwand für diesen Arbeitsschritt
	Art und Menge bei einer Rückholung	Aufwand zur Implementierung von Ausbauten

5.1.7 Aspekt Temperatur

Temperaturen kommt bei der Durchführung einer Rückholung eine Schlüsselrolle zu. Thermische Bedingungen können eine Rückholung limitieren. Aufgrund der Temperaturtoleranzen von Wirtsgesteinen und Verfüllmaterialien werden maximale Auslegungstemperaturen für das Endlager festgelegt und entsprechende

Anpassungen von Endlagerkomponenten zur Optimierung der Temperaturentwicklung vorgenommen (Bollingerfehr et al. 2014). Komponenten des Endlagersystems (Barrierefunktionen), die für die Langzeitsicherheit wesentlich sind, dürfen nicht aufgrund der sich entwickelnden Temperaturen beeinträchtigt werden. Zur Implementierung der Rückholbarkeit können weitere Anpassungen an die Temperaturauslegung des Endlagers notwendig sein. Ist-Temperaturen in der Rückholungsphase müssen mittels Bewetterung und Kühlung (siehe auch Aspekt Kühlung, Kapitel 5.1.4) mit angemessenem Aufwand und in einer angemessenen Zeit auf die Soll-Temperaturen, die für die technischen Komponenten für die Rückholung und gegebenenfalls Personal unter Tage gebraucht werden, heruntergekühlt werden können.

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen der Temperatur (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Ist-Temperatur bei Rückholung:** Temperaturen zum Zeitpunkt einer Rückholung, die einen entsprechenden Aufwand für die Herstellung günstiger Soll-Temperaturen für Maschinen und gegebenenfalls Menschen bei einer Rückholung bedingen.

Tab. 5-7: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen der Temperatur

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
Temperatur	Ist-Temperatur bei Rückholung	Aufwand entsteht für die Herstellung der Soll-Temperaturen durch Bewetterung / Kühlung sowie bei der Auslegung des Endlagers (Endlagerkonzept) <i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Bewetterung / Kühlung</i>

5.1.8 Aspekt Flächenbedarf

Der Flächenbedarf des Endlagers ergibt sich aus dem Wirtsgestein, dem Einlagerungskonzept und den Anforderungen an die Temperaturen. Die Einlagerungsgeometrie, die Behälteranzahl und die Behälterabstände sind Ergebnisse von Abwägungsprozessen für die Auslegungsoptimierung eines Endlagers. Dabei konkurriert der Flächenbedarf (Durchörterung des Wirtsgesteins) mit den Sicherheitsanforderungen, die radioaktiven Abfälle möglichst konzentriert zu lagern und das Wirtsgestein so wenig wie nötig zu schädigen sowie der Schaffung möglichst weniger Wegsamkeiten. Der Flächenbedarf (i. W. S.) eines Endlagers ist mitbestimmend für den Aufwand bei einer Rückholung (aufzufahrende Streckenlängen und -volumina).

Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Flächenbedarfs (aus Sicht von Rückholbarkeit und Rückholung):

- **Gesamtfläche des Endlagers:** Die Gesamtfläche des Endlagers wird beeinflusst von Streckenlängen und Hohlraumvolumina. Die Rückholoption kann Einfluss auf den Flächenbedarf nehmen, sofern sie zu Auslegungsanpassungen bei der Behälteranzahl und den Behälterabständen führt (Temperaturoptimierungen im Endlager).
- **Durchörterung:** Die Rückholbarkeit hat Auswirkungen auf die Durchörterung des Wirtsgesteins, wenn aufgrund von Temperaturanpassungen für eine Rückholung die Behälteranzahl und der Behälterabstand entsprechend angepasst werden (hier konkurrieren gegebenenfalls das Sicherheitskonzept und die Rückholoption).
- **Streckenlängen:** Davon ausgehend, dass der Flächenbedarf einen Rückschluss auf die Streckenlängen im Endlager zulässt, haben diese Einfluss auf die Menge der benötigten Ausbauten, die Behälteranzahl, die Behälterabstände und die zu implementierender Bewetterungs- / Kühltechnik. Dies verursacht Aufwand und führt zu Durchörterungen des Wirtsgesteins und hat daher einen Einfluss auf die Langzeitsicherheit. Wenn Flächenanpassungen aufgrund der Rückholbarkeit (siehe Ausführungen zu Endlagern in Steinsalz, beispielsweise Kapitel 5.1.2 oder auch weiter unten im Bericht im Kapitel 5.2.1) erfolgen, lässt sich dies sehr schwer quantitativ aus Endlagerkonzepten ableiten, außer der Unterschied zu einem Endlager ohne Rückholbarkeit wird direkt ausgewiesen.

Tab. 5-8: Relevante Eigenschaften und / oder Ausprägungen des Flächenbedarfs

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmal (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
Flächenbedarf	Gesamtfläche des Endlagers	Indiz für Menge an Ausbaumaßnahmen für aufzufahrende Strecken sowie die Längen zu bewetternder Strecken; nur sehr generisch geeignet, um Rückschlüsse zu ziehen

Hauptaspekt / Themenkomplex	Merkmale (Eigenschaft, Ausprägung)	Art des Einflusses
	Streckenlängen	<p>Aufwand bei Rückholung für Auffahrungen und Implementierung von Bewetterungs- / Kühlkomponenten</p> <p><i>Siehe Einflüsse beim Hauptaspekt Bewetterung / Kühlung, Ausbaumaßnahmen, Behälter (Abstand) und Verfüllmaterial Durchörterung kann Einfluss auf Langzeitsicherheit haben</i></p>

5.1.9 Aspekt Aufwand

Der Aspekt „Aufwand“ beinhaltet zeitlichen als auch technischen Aufwand, der durch die Anforderung zur der Rückholbarkeit und bei der Durchführung einer Rückholung entstehen kann.

Aufwand für Rückholbarkeit

Die Anforderung der Rückholbarkeit ist mitauslegungsbestimmend für ein Endlager. Zur Implementierung der Rückholbarkeit ist Aufwand in der Errichtungs- und Einlagerungsphase zu betreiben.

Mögliche Maßnahmen zur Ermöglichung und / oder Erleichterung einer Rückholung, können beispielsweise Auslegungen für **Temperaturoptimierungen**, **Behälterbeschaffenheiten**, **Verrohrungen** von Bohrlöchern für die Auffindbarkeit von Behältern oder auch **Sockel** zur Ablage von Behältern für die leichtere Behälteraufnahme bei einer Rückholung sein:

- Aufwand für Anpassungen der Endlagerauslegung mit dem Ziel der Temperaturbegrenzungen:
 - Anpassungen der Behälteranzahl (weniger wärmeentwickelndes Inventar pro Behälter und damit eine größere Anzahl an Behältern)
 - Anpassungen der Behälterabstände (Vergrößerung der Abstände, um Überlagerungen der Temperaturentwicklung zu reduzieren)

Folge: Zeitaufwand für höhere Wiederholungsrate der Arbeitsschritte bei Einlagerung der Behälter

- Aufwand für Anpassungen der Streckenausbauten um eine Rückholung zu ermöglichen:
 - Art und Menge der verwendeten Ausbauten
 - Optimierte Auswahl hinsichtlich einer möglichen Überschneidbarkeit bei einer Rückholung

Folge: Zeitaufwand für die Arbeiten zur Implementierung der Ausbauten

- Aufwand in der Errichtungs- und Einlagerungsphase für benötigte Streckenführungen und Streckenquerschnitte bei einer Rückholung:
 - Vergrößerte Streckenquerschnitte bereits in der Einlagerungsphase, die optional bei einer Rückholung benötigt werden

Folge: Zeitaufwand für die Auffahrung größerer Querschnitte und gegebenenfalls sich aus den Querschnitten ergebender Ausbaubedarf zur Stabilisierung

- Aufwand für Anpassungen zur Gewährleistung der Behälter-Auffindbarkeit bei Rückholung:
 - Verrohrungen
 - Verfüllung von Verrohrungen (sofern im Konzept vorgesehen)

Folge: Zeitaufwand für die Implementierung und gegebenenfalls auch Verfüllung von Verrohrungen bei Einlagerung

- Aufwand in der Errichtungs- und Einlagerungsphase zur Optimierung der Behälteraufnahme bei einer Rückholung:
 - Betonsockel zur Behälterablage (sofern im Konzept vorgesehen)

Folge: Zeitaufwand für die Errichtung der Betonsockel, wobei der Aufwand mit der Behälteranzahl korrespondiert

Zusammenfassend ergibt sich Aufwand für die Rückholbarkeit in der Errichtungs- und Einlagerungsphase aus dem Endlagerkonzept, den Wirtsgesteinseigenschaften, den Arbeitsschritten und der benötigten technischen Komponenten. Der Aufwand zur Implementierung der Rückholoption in der Einlagerungsphase kann vom Aufwand für die Durchführung einer Rückholung (Rückholphase) abweichen.

Aufwand bei der Durchführung einer Rückholung

Aufwand bei der Durchführung einer Rückholung ergibt sich aus der Summe der notwendigen Arbeitsschritte, der Dauer dieser Arbeitsschritte sowie der einzusetzenden technischen Komponenten in Abhängigkeit von den zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Randbedingungen wie beispielsweise die vorzufindenden Ist-Temperaturen.

Der zeitliche Aufwand (Gesamtaufwand) für eine Rückholung bestimmt sich nach Art, Anzahl und Dauer der benötigten Arbeitsschritte für Strecken(neu)auffahrungen, gegebenenfalls Hohlraumstabilisierung und / oder den Nachschnitt, die Behälterfreilegung und den Transport an die Erdoberfläche oder die unterirdische Umlagerung (je nach Rückholstrategie, siehe weitere Hauptaspekte / Themenkomplexe). Siehe auch Zeitaufwand für die Implementierung technischer Komponenten.

Relevante Einflüsse auf den Aufwand einer Rückholung:

- **Zeitlicher Aufwand:** Gesamtdauer einer Rückholung
- **Technischer Aufwand:** Technischer Aufwand bei einer Rückholung bezieht sich auf den Einsatz technischer Komponenten (Art und Menge) bei einer Rückholung (Rückholphase).
- **Wirtsgestein:** In Abhängigkeit vom Wirtsgestein ist bei einer Rückholung Aufwand für Streckenauffahrungen, Behälterfreilegungen, Streckenoffenhaltungen und die Herstellung von Soll-Temperaturen zu betreiben.
- **Einlagerungskonzept:** In Abhängigkeit von der Einlagerungsvariante (beispielsweise horizontale Streckenlagerung, horizontale Bohrlochlagerung oder vertikale Bohrlochlagerung) bedarf es unterschiedlichen technischen und zeitlichen Aufwands zur Freilegung und Rückholung der Behälter (siehe auch die Rolle von Behälteranzahl und Arbeitsschritten in Kapitel 5.1.2).
- **Rückholstrategie** (siehe auch Kapitel 3.3): Sollte nur eine Teilmenge der Behältern zurückgeholt und das Endlager anschließend weiter betrieben werden (selektive Rückholung) wäre ein erhöhter Aufwand gegenüber der Re-Mining Strategie (Aufgabe des Endlagers nach Rückholung der Behälter) zu betreiben, da in diesem Fall Anforderungen an die Intaktheit und auch die Wiederherstellung von Barrieren zum Erhalt der Langzeitsicherheit zu stellen wären.

5.1.10 Aspekt Langzeitsicherheit

Die Gewährleistung der Langzeitsicherheit stellt das oberste Sicherheitsprimat dar. Die Langzeitsicherheit kann aufgrund von Anpassungen der Endlagerauslegung mit dem Ziel der Schaffung günstiger Ausgangstemperaturen für eine Rückholung berührt sein. Ebenso können Maßnahmen, die für die Auffindung und die Freilegung sowie die Aufnahme der Behälter implementiert werden, günstigere oder ungünstigere Beiträge zur Langzeitsicherheit beisteuern. Dazu zählen Art und Menge verbleibender Materialien im Endlager sowie der Grad der resultierenden Durchörterung als Folge von Anpassungen der Behälterzahl und des Behälterabstands (die wiederum aus Auslegungsanpassungen zur Optimierung von Temperaturen vorgenommen werden). Die Implementierung der Rückholbarkeit und Anpassungen der Endlagerauslegung wie Optimierungen für die Durchführung einer Rückholung dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht gefährden.

Relevante Einflüsse aufgrund von Endlageranpassungen für Rückholbarkeit:

- **Behälteranzahl und -Abstand:** siehe Hauptaspekt Behälter (Kapitel 5.1.2) und Wirtsgestein (Kapitel 5.1.1)
- **Durchörterung:** siehe Hauptaspekt Flächenbedarf (Kapitel 5.1.8) und Wirtsgestein (Kapitel 5.1.1)
- **Art und Menge im Endlager verbleibender Materialien:** siehe Hauptaspekte Wirtsgestein (Kapitel 5.1.1), Ausbaumaßnahmen (Kapitel 5.1.6), Verfüllmaterial (Kapitel 5.1.3), Behälter (Kapitel 5.1.2).

5.2 Leitkriterien

In den folgenden Kapiteln (5.2.1, 5.2.2 und 5.2.3) erfolgt die Herleitung von Leitkriterien (übergeordnete Kriterien zur Bewertung der Maßnahmen zur Umsetzung der Anforderung der Rückholbarkeit und bei der Durchführung einer Rückholung). Als Basis dienen im § 13 EndlSiAnfV formulierte Anforderungen, die sich auf den Aufwand einer Rückholung (zeitlich und technisch), die Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung und die Nichtgefährdung der Langzeitsicherheit für eines HAW-Endlagers mit Rückholoption beziehen. Anforderungen an den zeitlichen und den technischen Aufwand sowie an die Technikverfügbarkeit betreffen konkret die Rückholung (Durchführung einer Rückholung). Die Langzeitsicherheit wird von Maßnahmen zur Implementierung der Rückholbarkeit (Planungs-, Errichtungs- und Einlagerungsphase) beeinflusst. Einen Sonderfall stellt derzeit die für Kristallgestein diskutierte Möglichkeit der selektiven Rückholung dar, bei der nur eine Teiltrückholung von Abfällen vorgenommen wird. Anschließend wird das Endlager weiterbetrieben (siehe auch Kapitel 3.3 zur selektiven Rückholung).

Für die Leitkriterien sind geeignete Indikatoren zu bestimmen, mit Hilfe derer vergleichende Bewertungen vorgenommen werden können. Diese Indikatoren werden auf Basis der Ausarbeitungen in Kapitel 5.1 (Teilzusammenhänge) entwickelt. Es werden sowohl quantitative (numerisch messbare) als auch qualitative Indikatoren (über bekannte Funktionszusammenhänge) bestimmt (siehe auch Kapitel 1). Die jeweiligen Ausprägungen der Indikatoren werden einander im Paarvergleich gegenübergestellt. Bewertet werden kann jeweils die günstigere oder ungünstigere Ausprägung in Bezug auf das Bewertungsziel des Leitkriteriums. Es wurde darauf verzichtet, Bewertungsgruppen (zum Beispiel „günstig“, „mittel“ und „ungünstig“) zu bilden, da dies eine Genauigkeit der Bewertungsaussagen suggerieren würden, die nicht gegeben ist. Die Anwendung der Leitkriterien in Verbindung mit dem generischen Charakter der verwendbaren Informationen liefert verdichtete Aussagen zu günstigeren und weniger günstigen Maßnahmen, kann jedoch zu keiner absoluten Bewertung gesamter Rückholkonzepte führen. Für die Auswahl der Indikatoren und ihrer jeweiligen Zuordnung zu den Leitkriterien wurde berücksichtigt, dass anhand der Ausprägung der Indikatoren eine unterscheidbare Bewertung vorgenommen werden kann und dass diese geeignet sind, die Zusammenhänge aus Sicht der Rückholbarkeit und der Rückholung abzubilden. Den Indikatoren werden Bewertungsgrößen (qualitative und quantitative) zugeordnet; anhand ihrer Ausprägung kann eine Bewertung vorgenommen werden.

Günstig bewertet werden können beispielsweise niedrigere Temperaturen, die zu weniger Aufwand führen, um geeignete Arbeitsbedingungen für Maschinen und Menschen bei einer Rückholung herzustellen. Hinsichtlich des Aufwands zur Herstellung gewünschter Temperaturen bei einer Rückholung ist es von Vorteil, wenn die zu bewetternden Strecken kürzer sind und wenn keine zusätzlichen Kühlaggregate eingesetzt werden müssen. Wirtsgesteine sind günstiger hinsichtlich des Aufwands zu bewerten, wenn keine stabilisierenden Ausbaumaßnahmen der Strecken benötigt werden. Als günstig hinsichtlich des Aufwands einer Rückholung ist auch einzustufen, wenn geringere Zeitbedarfe für Arbeitsschritte oder weniger Arbeitsschritte bei einer Rückholung benötigt werden. Für den Strahlenschutz zu implementierende Maßnahmen wie die Verwendung von Overpacks oder die Einrichtung von Bohrlochschleusen sind als eher ungünstiger hinsichtlich des Aufwands bei einer Rückholung einzustufen. Bezuglich der Technikverfügbarkeit für eine Rückholung ist es als günstig zu bewerten, wenn die Einlagerungstechnik bei einer Rückholung unverändert verwendet werden kann. Für die Langzeitsicherheit ist es von Vorteil, wenn keine größeren Materialmengen aufgrund der Rückholbarkeit im Endlager verbleiben, da diese zur Behälterkorrosion und / oder zur Bildung von Wegsamkeiten beitragen können.

5.2.1 Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“

Unter „Aufwand“ wird hier technischer als auch zeitlicher Aufwand verstanden, da ohne detaillierte Informationen zu Endlager- und Rückholkonzepten keine eindeutige Abgrenzung voneinander möglich ist (siehe auch Kapitel 5.1.9).

Der mit der Rückholbarkeit verbundene Aufwand wird im Regelwerk nicht explizit betrachtet; behandelt wird nur der Aufwand für eine Rückholung. Nach § 13 Endl-SiAnfV sollen der zeitliche und der technische Aufwand einer Rückholung nicht den Aufwand der Einlagerung unverhältnismäßig übersteigen (siehe auch Kapitel 2.2). Beim Aufwand der Einlagerung wird nicht auf den Aufwand zur Implementierung der Rückholbarkeit abgehoben, auch wenn der Gesamtaufwand von der Planung desendlagers über die Errichtung bis zur Einlagerung der Abfallgebinde wesentlich durch die Rückholbarkeitsanforderung mitbestimmt sein kann. Dementsprechend wird das Leitkriterium zur Bewertung des Aufwands bei einer Rückholung entwickelt. Auch wenn die Betriebssicherheit bei der Aufwandsbetrachtung nicht explizit adressiert wird, entsteht der Aufwand zur Herstellung von zulässigen Temperaturen, der Streckenoffenhaltung und dem Strahlenschutz bei einer Rückholung insbesondere aufgrund von betrieblichen Sicherheitsaspekten.

Der Aufwand einer Rückholung ist abhängig von den Randbedingungen, die zu Beginn einer Rückholung bestehen. Je nach Wirtsgestein, Einlagerungskonzept, der Endlagerauslegung, einschließlich Maßnahmen zur Implementierung oder Optimierung einer Rückholung, und auch der gewählten Rückholstrategie können diese sehr unterschiedlich ausfallen. Aufwand ergibt sich insbesondere aus der Anzahl an durchzuführenden Arbeitsschritten als auch aus der Anzahl an Wiederholungen der einzelnen Arbeitsschritte aufgrund der Behälteranzahl. Zu den Arbeitsschritten bei einer Rückholung zählen Streckenauffahrungen, Ausbauten oder Nachschnitte von Strecken, die Implementierung von Bewetterung und gegebenenfalls die Kühlung, Maßnahmen zum Strahlenschutz wie Bohrlochschleusen und gegebenenfalls Overpacks für den Behältertransport.

1. Aufwand zur Auffahrung von Strecken in Abhängigkeit von:

- Streckenlängen
- Notwendigkeit von Neuauffahrungen

2. Aufwand zur Wiederauffahrung von Strecken in Abhängigkeit von:

- Streckenlängen
- Eigenschaften von Streckenverfüllungen (Verfestigungsgrad des Verfüllmaterials) bei Wiederauffahrungen
- Eigenschaften von Streckenausbauten aus der Einlagerungsphase (Überschneidbarkeit)

3. Aufwand zur Neuauffahrung von Strecken in Abhängigkeit von:

- Streckenlängen
- Eigenschaften des Wirtsgesteins (Härte des Gesteins)

4. Aufwand für Streckenausbauten oder Streckennachschnitte zur Offenhaltung der Strecken in Abhängigkeit von:

- Streckenlängen
- Streckennachschnitte im Steinsalz
- Streckenausbauten im Tongestein (gegebenenfalls in Kristallingestein)

5. Aufwand für Bewetterung / Kühlung zur Herstellung von Soll-Temperaturen in Abhängigkeit von:

- Streckenlängen (Endlagerfläche)
- Ist-Temperaturen zu Beginn einer Rückholung
- Soll-Temperaturen je nach Wirtsgestein
- Implementierung von Kühlgregatten

6. Aufwand zur Freilegung und Transport von Behältern in Abhängigkeit von:

- Anzahl der Arbeitsschritte pro Behälter
- Verfüllmaterialentfernung bei Verfüllung von Verrohrungen
- Implementierung von Strahlenschutzmaßnahmen (beispielsweise Bohrlochschleusen, Abschirmungen oder Overpacks)

7. Aufwand für Verfügbarhaltung technischer Komponenten in Abhängigkeit von:

- Wartungs- und Reparaturbedarf (Störanfälligkeit der Komponenten)
- Verfügbarkeit (Redundanzen, Wiederbeschaffbarkeit am Markt)

Die skizzierten Maßnahmen und Arbeitsschritte können je nach Verfügbarkeit an Information ergänzt bzw. angepasst werden.

Tab. 5-9: Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“

Kriterium	Indikator (bewertungsrelevante Ausprägung)	Bewertungs-größe	Bewertung	
			Günsti-ger	Weniger günstig
Aufwand bei Auffahrungen	Aufzufahrende Streckenlänge	m	kürzer	länger
	Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen	niedrig / hoch	niedriger	höher
	Neuauffahrungen von Strecken	m	kürzer	länger
	Verbliebene Streckenausbauten	ja / nein	nein	ja
Aufwand für Offenhaltung	Häufigkeit von Streckennachschnitten	Anzahl	niedriger	höher
	Nachzuschneidende Streckenlänge	m	kürzer	länger
	Auszubauende Streckenlänge	m	kürzer	länger
Aufwand für Bewetterung / Kühlung	Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung	m	kürzer	länger
	Implementierung von Kühlgregatten	Anzahl	kleiner	größer
	Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur	Zeitangabe	kürzer	länger
Aufwand für Behälterfreilegung, -	Behälteranzahl	Anzahl	kleiner	größer
	Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen	Anzahl	kleiner	größer

Kriterium	Indikator (bewertungsrelevante Ausprägung)	Bewertungsgröße	Bewertung	
			Günstiger	Weniger günstig
aufnahme und -transport	Einurichtende Bohrlochschleusen	Anzahl	kleiner	größer
	Nutzung von Overpacks	Anzahl	kleiner	größer

*Eine Ergänzung von weiteren Arbeitsschritten zum Beispiel beim Aufwand für Behälterfreilegung, -aufnahme und -transport ist möglich.

5.2.1.1 Alternative Indikatoren

Wenn Angaben zu Indikatoren fehlen, ist es bei einigen Indikatoren möglich auf Basis der Funktionszusammenhänge (siehe Teilzusammenhänge in Kapitel 5.1) plausible Rückschlüsse auf die mögliche Ausprägung des Indikators zu ziehen. Hierzu werden in der nachfolgenden Tabelle alternative Indikatoren zusammengestellt. Diese können je nach Bedarf einen oder mehrere Indikatoren im Leitkriterium Aufwand ersetzen. Zu beachten ist, dass die Nutzung alternativer Indikatoren zu stärkeren Verallgemeinerungen der Aussage führt. Bei Fehlen von Detailinformationen besteht die (eher generische) Möglichkeit, den Aufwand von zwei Konzepten mittels alternativer Indikatoren zu vergleichen und hierdurch tendenzielle Aussagen zu treffen. Nicht für alle Indikatoren gibt es sinnvolle Alternativen.

Für die alternativen Indikatoren wird davon ausgegangen, dass gegebenenfalls nur Informationen zum Wirtsgestein und allgemeine Informationen zum Einlagerungskonzept (Auslegungstemperatur und Einlagerungsvariante) verfügbar sind. Ausführlichere Ausarbeitungen der komplexen Zusammenhänge zwischen dem Wirtsgestein und der Endlagerauslegung finden sich in den Kapiteln 4 und 5.1.

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 5-10) finden sich Vorschläge für alternative Indikatoren. In der ersten Spalte steht der zu ersetzenende Indikator des Leitkriteriums, in der zweiten Spalte die mögliche(n) Alternative(n). Die dritte Spalte zeigt kurz die erwartbaren Rückschlüsse hinsichtlich der Ausprägung des zu ersetzenen Indikators auf. In der vierten Spalte ist der (Teil-)Zusammenhang kurz dargestellt.

Tab. 5-10: Alternative Indikatoren zur Verwendung für das Leitkriterium Aufwand

Indikator	Alternative Indikatoren und zu gehörige Be wertungsgrö ßen	Erwartbare Rück schlüsse hinsicht lich der Ausprä gung des erset zten Indikators	Zusammenhang
Aufzufahrende Streckenlänge	Wirtsgestein (Steinsalz, Tongestein, Kristallingestein)	Steinsalz => kürzere Strecken Tongestein => längere Strecken, Kristallingestein => mittlere Strecken	In Abhängigkeit von Behälteranzahl und Behälterabständen sind bei einem Endlager in Steinsalz kürzere, bei einem Endlager in Tongestein längere und bei einem Endlager in Kristallingestein mittlere Längen der Rückholstrecken zu erwarten
	Endlager-Auslegungstemperatur (Temperatur in °C oder qualitativ „höher / niedriger“)	Höhere Auslegungstemperaturen => kürzere Strecken erwartbar Niedrigere Auslegungstemperaturen => längere Strecken erwartbar	Zur Einhaltung niedrigerer Auslegungstemperaturen können eine höhere Behälterzahl und größere Behälterabstände gewählt werden.
	Behälteranzahl (Anzahl oder qualitativ „höher / niedriger“)	Höhere Behälteranzahl => längere Strecken erwartbar Niedrigere Behälteranzahl => kürzere Strecken erwartbar	Bei höheren Behälterzahlen sind längere Rückholstrecken erwartbar
	Behälterabstände	Größere Behälterabstände =>	Größere Behälterabstände lassen längere Strecken

Indikator	Alternative Indikatoren und zu gehörige Be wertungsgrö ßen	Erwartbare Rück schlüsse hinsicht lich der Ausprä gung des erset zten Indikators	Zusammenhang
		<p>längere Strecken erwartbar</p> <p>Kleinere Behälterabstände => kürzere Strecken erwartbar</p>	<p>(Rückholstrecken) erwarten.</p>
Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen	<p>Endlager Ausle gungstempera tur</p> <p>(°C oder qualita tiv [höher / nied riger])</p>	<p>Höhere Tempera tur => höherer Ver festigungsgrad der Streckenverfüllun gen erwartbar</p> <p>Niedrigere Tempe ratur => niedrige rer Verfestigungs grad der Strecken verfüllungen er wartbar</p>	<p>Höhere Endlagertem peraturen lassen ei nen höheren Verfes tigungsgrad der Streckenverfüllungen er warten.</p>
	<p>Temperatur zu Beginn einer Rückholung</p> <p>(°C oder qualita tiv [höher / nied riger])</p>	<p>Höhere Tempera tur => höherer Ver festigungsgrad der Streckenverfüllun gen erwartbar</p> <p>Niedrigere Tempe ratur => niedrige rer Verfestigungs grad der Strecken verfüllungen er wartbar</p>	<p>Höhere Temperatu ren zu Beginn der Rückholung lassen einen höheren Ver festigungsgrad er warten.</p>

Indikator	Alternative Indikatoren und zu gehörige Be wertungsgrö ßen	Erwartbare Rück schlüsse hinsicht lich der Ausprä gung des ersetzen Indikators	Zusammenhang
Härte des Gesteins	Wirtsgestein (Steinsalz, Tongestein, Kristallingestein)	<p>Steinsalz => mittlere Gesteinshärte</p> <p>Tongestein => geringe bis mittlere Gesteinshärte</p> <p>Kristallingestein => hohe Gesteinshärte</p>	<p>Tongesteine haben in der Regel eine geringere Härte als Steinsalz, können aber auch ähnlich sein. Kristallingestein ist am härtesten.</p>
Verbliebene Stre ckenausbauten	Keine	./.	<p>Insbesondere Tongestein benötigt Streckenausbauten im Einlagerungsbetrieb. Verbleiben diese nach Einlagerung im Endlager müssen sie bei einer Rückholung – falls sie nicht überschneidbar sind – umfahren werden. Keine alternativen Indikatoren aufgrund generischer Rückschlüsse.</p>

Indikator	Alternative Indikatoren und zu gehörige Be wertungsgrö ßen	Erwartbare Rück schlüsse hinsicht lich der Ausprä gung des ersetzen Indikators	Zusammenhang
Häufigkeit von Streckennachschnitten	Wirtsgestein (Steinsalz, Tongestein, Kristallingestein)	<p>Steinsalz => höhere Anzahl an Streckennachschnitten erwartbar</p> <p>Tongestein => kleinere Anzahl bzw. gar keine Streckennachschnitte erwartbar</p> <p>Kristallingestein => kleinere Anzahl bzw. gar keine Streckennachschnitte erwartbar</p>	<p>Nur bei einem Endlager in Steinsalz sind Streckennachschnitte im Rückholzeitraum zu erwarten.</p> <p>(Endlager in Tongestein (ggf. auch in stark geklüftetem Kristallingestein) brauchen zur Offenhaltung von Strecken während des -Zeitraums der Rückholung Ausbaumaßnahmen; Endlager in Steinsalz erfordern hingegen Nachschnittmaßnahmen.)</p>
Auszubauende Streckentängen	Wirtsgestein (Steinsalz, Tongestein, Kristallingestein)	<p>Steinsalz, steile Lagerung => keine Streckenausbauten erwartbar</p> <p>Steinsalz, flache Lagerung => Ausbauten zur Firstsicherung erwartbar</p> <p>Tongestein => Streckenausbauten zu erwarten</p> <p>Kristallingestein => eher keine Streckenausbauten zu erwarten</p>	<p>Streckenausbauten für die Rückholung sind insbesondere bei einem Endlager in Tongestein und ggf. in stark geklüftetem Kristallingestein zu erwarten</p> <p>Bei Endlagern in Steinsalz flacher Lagerung ist mit Firstsicherungsmaßnahmen zu rechnen (Bsp.: WIPP in den USA).</p>

Indikator	Alternative Indikatoren und zu gehörige Be wertungsgrö ßen	Erwartbare Rück schlüsse hinsicht lich der Ausprä gung des ersetzen Indikators	Zusammenhang
Implementierung von Kühl aggregaten	Differenz zwi schen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (°C oder nur qualita tiv: [„höher“, „niedriger“])	Höhere Tempera tur Differenz => Kühl aggregaten eher erwartbar Niedrigere Tem pe ratur-Differenz => Kühl aggregaten eher nicht erwart bar (bzw. eine klei nere Anzahl als bei höheren Tempera turen erwartbar)	Aus dem Delta der Temperatur könnte bei höherem Delta indirekt der Bedarf zur Verwendung von Kühl aggregaten zur Herstellung von Soll-Temperaturen bei ei ner Rückholung ab geleitet werden.
Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur	Differenz zwi schen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (°C oder nur qualita tiv: [„höher“, „niedriger“])	Höhere Tempera tur-Differenz => längere Abkühlzei ten erwartbar Niedrigere Tem pe ratur-Differenz => kürzere Abkühlzei ten erwartbar	Bei einem größeren Temperatur-Delta sind längere Abkühlzeiten zu erwarten.
	Temperatur zu Beginn der Rück holung (höher / niedri ger)	Höhere Tempera tur-Differenz => längere Abkühlzei ten erwartbar Niedrigere Tem pe ratur-Differenz => kürzere Abkühlzei ten erwartbar	Höhere Temperatu ren erfordern gene risch betrachtet eher längere Abkühlzeiten (hier sind Abhängig keiten vom Einsatz von Kühl aggregaten zu berücksichtigen).

Indikator	Alternative Indikatoren und zu gehörige Be wertungsgrö ßen	Erwartbare Rück schlüsse hinsicht lich der Ausprä gung des ersetzen Indikators	Zusammenhang
Behälteranzahl	Endlager-Ausle gungstempera tur (höher / nied riger)	Höhere Ausle gungstemperatu ren => kleinere An zahl an Behältern erwartbar Niedrigere Ausle gungstemperatu ren => größere An zahl an Behältern erwartbar	Höhere Auslegungs temperaturen eines Endlagers lassen da rauf schließen, dass eine geringere Anzahl an Behältern für die Einlagerung der Ab fälle benötigt wird.
	Abfallvolumen (kleiner / größer)	Kleinere Abfallvo lumina => kleinere Anzahl an Behältern Größere Abfallvo lumina => größere Anzahl an Behältern	Wenn die Anzahl der Behälter nicht ver fügbar ist, kann an hand der Abfallvolumina eine Abschät zung erfolgen. Es ist erwartbar, dass klei nere Abfallvolumina zu einer kleineren Anzahl an Behältern führen.
EL-Auslegungstem peratur	Wirtsgestein (Steinsalz, Ton gestein, Kristal lingestein)	Steinsalz => höhere Auslegungs temperaturen er wartbar Ton gestein, Kris tallingestein => niedrigere Ausle gungstemperatu ren erwartbar	Vom Wirtsgestein kann auf die Ausle gungstemperatur ge schlossen werden, die für Steinsalz hö her als für Ton- und Kristallingestein an gesetzt werden kann.

Indikator	Alternative Indikatoren und zu gehörige Be wertungsgrößen	Erwartbare Rück schlüsse hinsichtlich der Ausprä gung des ersetzen Indikators	Zusammenhang
Entfernung von Verrohrungsverfüllungen	Einlagerungskonzept (horizontale Streckenlagerung, vertikale Bohrlochlagerung)	<p>Horizontale Streckenlagerung => kein Arbeitsschritt zur Entfernung von Verrohrungsverfüllungen erwartbar</p> <p>Vertikale Bohrlochlagerung => Arbeitsschritt zur Entfernung von Verrohrungsverfüllungen erwartbar</p>	Beispielsweise Einlagerungskonzept „Vertikale Bohrlochlagerung“ der BGETEC, welches das Einbringen und Verfüllen von Verrohrungen vorsieht
Einrichtung von Bohrschleusen	Einlagerungskonzept (horizontale Streckenlagerung, vertikale Bohrlochlagerung)	<p>Horizontale Streckenlagerung => keine Einrichtung von Bohrlochschleusen</p> <p>Vertikale Bohrlochlagerung => Einrichtung von Bohrlochschleusen erwartbar</p>	Beispielsweise Einlagerungskonzept „Vertikale Bohrlochlagerung“ der BGETEC, welches die Einrichtung von Bohrlochschleusen vorsieht
Nutzung von Overpacks	Einlagerungskonzept (horizontale Streckenlagerung, vertikale Bohrlochlagerung)	<p>Horizontale Streckenlagerung => eher keine Overpacks erwartbar</p> <p>Vertikale Bohrlochlagerung => Overpacks erwartbar</p>	Beispielsweise Einlagerungskonzept „Vertikale Bohrlochlagerung“ der BGETEC, welches die Nutzung von Overpacks vorsieht

5.2.1.2 Ergänzende Indikatoren

Je nach verfügbaren Informationen über die zu vergleichenden Konzepte können weitere Indikatoren ergänzt werden. Dies kann sinnvoll sein, wenn Arbeitsschritte aufgeschlüsselt oder auch wenn beim Aufwand konkrete Zeitbedarfe verglichen werden können. Je konkreter die zu vergleichenden Informationen sind, desto Aussagekräftiger fällt der Vergleich aus.

Ergänzungen sind zum Beispiel zum Thema Monitoring oder auch Safeguards denkbar. Hier wäre jeweils zu prüfen, ob bestimmte Maßnahmen die vorgesehen sind, einen Aufwand für die Rückholung darstellen. Sehen die Rückholkonzepte beispielsweise Neuauffahrungen vor, so kann es sinnvoll sein, die jeweilige Härte des Gesteins in den Vergleich einzubeziehen.

Tab. 5-11: Ergänzende Indikatoren für das Leitkriterium Aufwand

Ergänzende Indikatoren (optional)	Bewertungsgröße	Erwartbare Rückschlüsse bei Hinzunahme des Indikators	Zusammenhang
Härte des Gesteins	weich / mittel / hart	weicher => günstiger bzgl. des Aufwandes für Streckenauffahrungen härter => ungünstiger bzgl. des Aufwandes für Streckenauffahrungen	Bei gleicher Länge von Neuauffahrungen kann zusätzlich die Härte des Gesteins für eine Aufwandsabschätzung herangezogen werden.
Überschneidbarkeit verbliebener Streckenausbauten	ja / nein	ja = günstiger bzgl. des Aufwandes für Streckenauffahrungen nein = ungünstiger bzgl. des Aufwandes für Streckenauffahrungen	Es ist zu erwarten, dass die Umfahrung verbliebener Streckenausbauten mehr Aufwand bedeutet als die Überschneidung.

Ergänzende Indikatoren (optional)	Bewertungsgröße	Erwartbare Rückschlüsse bei Hinzunahme des Indikators	Zusammenhang
Nachzuschneidende Streckenlänge	m	<p>kürzer = günstiger bzgl. des Aufwands für Streckennachschnitte zur Offenhaltung</p> <p>länger = ungünstiger</p>	Es ist zu erwarten, dass längere nachzuschneidende Strecken, bei gleicher Häufigkeit von Nachschnitten, einen höheren Aufwand bedeuten.

**Weitere Ergänzungen von Indikatoren sind denkbar, je nach Kenntnisstand zu den zu vergleichenden Konzepten oder auch, wenn zum Beispiel die Maximaltemperatur nach „x“ für den Fall deutlicher zeitlicher Verlängerungen der Einlagerungsphase Jahren berücksichtigt werden soll.*

5.2.1.3 Erläuterungen zur Anwendung des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“

Für die Anwendung des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“ sind zunächst möglichst umfassende Informationen für einen anschließenden Paarvergleich zusammenzustellen. Als Hilfestellung sind die nachfolgenden Tabellen (Tab. 5-12 und Tab. 5-13) erarbeitet worden. Sie greifen kurz die Zusammenhänge, die Relevanz, alternative und ergänzende Indikatoren sowie die Bewertungsregeln für jeden Indikator auf. Zusätzlich wird zu jedem Indikator eine Texterläuterung mit Ausfüllhinweisen für die Tabellen gegeben.

Tab. 5-12 gibt einen Überblick über die für einen Paarvergleich benötigten Informationen und die Bewertung mit Hilfe der Indikatoren. Es werden Informationen der beiden zu vergleichenden Konzepte (Endlager A und Endlager B), eine Zuordnung der Ausprägung der Indikatoren für das jeweilige Endlager (größer, kleiner oder gleich) und eine Bewertung benötigt, bei welchem Endlager der Indikator zum Aufwand günstiger ausgeprägt ist (letzte Spalte).

Es kann notwendig sein (siehe Kapitel 5.3.1: Testanwendung 1, Verwendung alternativer Indikatoren nach Tab. 5-10), dass Informationen aus Teilzusammenhängen (Kapitel 5.1) abgeleitet werden, um eine hinreichende Aussage über die Leitkriterien zu erhalten, da Informationen zu den Endlager- und Rückholkonzepten, die für die Indikatoren benötigt werden, oft fehlen.

Tab. 5-12: Informationssammlung und Anwendung des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“

Nr.	Indikator	Bewer-tungsgröße	Informa-tionen Endla-ger A	Informa-tionen End-lager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je-weils günsti-gere Aus-prägung
1	Aufzufahrende Streckenlänge	m				
2	Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen	niedrig / hoch				
3	Neuauffahrungen von Strecken	m				
4	Verbliebene Streckenausbauten	ja / nein				
5	Häufigkeit von Streckennachschnitten	Anzahl				
6	Auszubauende Streckenlänge	m				
7	Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung	m				
8	Implementierung von Kühlaggregaten	Anzahl				
9	Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur	Zeitan-gabe				
10	Behälteranzahl	Anzahl				
11	Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen	Anzahl				

Nr.	Indikator	Bewer-tungsgröße	Informa-tionen Endla-ger A	Informa-tionen End-lager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je-weils günsti-gere Aus-prägung
12	Einzurichtende Bohrlochschleusen	Anzahl				
13	Nutzung von Over-packs	Anzahl				

Tab. 5-13 bietet eine detailliertere Darstellung. Sie enthält neben den Indikatoren aus dem Leitkriterium auch die möglichen alternativen Indikatoren (siehe Tab. 5-10) sowie Ergänzungsmöglichkeiten (siehe Tab. 5-11). Die jeweiligen heranzuziehenden Bewertungsgrößen sind in die Spalte „Indikator“ miteingefügt. Die vorletzte Spalte („Bewertung“) enthält die dem jeweiligen Indikator zugrunde gelegte Bewertungsregel in Kurzform. Ausführlich ist dies in den Ausfüllhinweisen und Erläuterungen für die Nutzung der Tabelle im Anschluss an die Tabelle nachzulesen.

Tab. 5-13: Detaillierte Tabelle zur Informationssammlung und zur Bewertung des jeweiligen Aufwands einer Rückholung anhand des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“

Nr.	Indikator	Informa-tionen Endlager A	Informa-tionen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Bewer-tung	Vergleich A, B: Günsti-gere Aus-prägung
A) AUFWAND BEI AUFFAHRUNGEN	1	Aufzufahrende Streckenlänge [m]			kürzer = günstiger	
	1a	Wirtsgestein (Alternative): ➤ Steinsalz => <u>kürzere</u> Strecke ➤ Tongestein => längere Strecke ➤ Kristallin-gestein => mittlere Strecke			s. Nr. 1	
	1b	Endlager-Aus-legungstempe-ratur (Alterna-tive):			s. Nr. 1	

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Bewer-tung	Vergleich A, B: Günsti-gere Aus-prägung
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ höher => <u>kürzere</u> Strecke ➤ niedriger => längere Strecke 					
1c	Behälteranzahl (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>kürzere</u> Strecke ➤ höher => längere Strecke 				s. Nr. 1	
1d	Behälterabstände (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ kleiner => <u>kürzere</u> Strecke ➤ größer => längere Strecke 				s. Nr. 1	
2	Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen [niedrig / hoch]				niedriger = günstiger	
2a	Endlager-Auslegungstemperatur (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>niedrigere</u> Verfestigung ➤ höher => höhere Verfestigung 				s. Nr. 2	
2b	Temperatur zu Beginn der Rückholung (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => 				s. Nr. 2	

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Bewer-tung	Vergleich A, B: Günsti-gere Aus-prägung
B) AUFWAND FÜR OFFENHALTUNG		niedrigere Verfestigung ➤ höher => höhere Verfestigung				
	3	Neuauffahrungen von Strecken [m]			kürzer = günstiger	
	3a	Ergänzungsmöglichkeit: Härte des Ge-steins			weicher = günstiger	
	4	Verbliebene Streckenausbauten [ja / nein]			nein = günstiger	
	4a	Ergänzungsmöglichkeit: Überschneidbarkeit verbliebener Streckenausbauten			ja = günstiger	
	5	Häufigkeit von Streckennachschnitten [Anzahl]			kleiner = günstiger	
	5a	Wirtsgestein (Alternative): ➤ Ton-, Kris-tallinge-stein => kleinere Anzahl ➤ Steinsalz => größere Anzahl			s. Nr.5	
	5b	Ergänzungsmöglichkeit: Nachzuschneidende Streckenlänge			kürzer = günstiger	
	6	Auszubauende Streckenlänge [m]			kürzer = günstiger	

	Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Bewer-tung	Vergleich A, B: Günsti-gere Aus-prägung
C) AUFWAND FÜR BEWETTERUNG / KÜHLUNG	6a	Wirtsgestein (Alternative): ➤ Steinsalz => <u>kürzere</u> Strecke ➤ Tongestein => längere Strecke				s. Nr. 6	
	7	Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung [m]				kürzer = günstiger	
	8	Implementierung von Kühl-aggregaten [Anzahl]				kleiner = günstiger	
	8a	zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (Alternative): ➤ niedriger => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ höher => größere Anzahl				s. Nr. 8	
	9	Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur [Zeitangabe]				kürzer = günstiger	
	9a	Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (Alternative): ➤ niedriger => <u>kürzere</u> Zeit ➤ höher => längere Zeit				s. Nr. 9	

	Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver- gleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Günsti- gere Aus- prägung
D) AUFWAND FÜR BEHÄLTERFREILEGUNG, -AUFNAHME, -TRANSPORT		9b Temperatur zu Beginn einer Rückholung (Alternative): ➤ niedriger => kürzere Zeit ➤ höher => längere Zeit				s. Nr. 9	
	10	Behälteranzahl [Anzahl]				kleiner = günstiger	
	10a	Endlager-Auslegungstemperatur (Alternative): ➤ höher => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ niedriger => <u>größere</u> Anzahl				s. Nr. 10	
	10b	Abfallvolumen (Alternative): ➤ kleiner => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ größer => <u>größere</u> Anzahl				s. Nr. 10	
	11	Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen [Anzahl]				kleiner = günstiger	
	11a	Einlagerungskonzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlagerung => kleinere Anzahl ➤ Vertikale Bohrlochlagerung				s. Nr. 11	

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Bewer-tung	Vergleich A, B: Günsti-gere Aus-prägung
	=> größere Anzahl					
12	Einzurichtende Bohrloch-schleusen [Anzahl]				kleiner = günstiger	
12a	Einlagerungs-konzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlage-rung => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ Vertikale Bohrloch-lagerung => größere Anzahl				s. Nr. 12	
13	Nutzung von Overpacks [Anzahl]				kleiner = günstiger	
13a	Einlagerungs-konzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlage-rung => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ Vertikale Bohrloch-lagerung => größere Anzahl				s. Nr. 13	

Allgemeine Hinweise:

- 1. Zur Verwendung von alternativen Indikatoren siehe auch Tab. 5-10.**
- 2. Alternative Indikatoren können herangezogen werden, wenn keine Informa-tionen zum Indikator des Leitkriteriums verfügbar sind.**
- 3. Zur Verwendung von ergänzenden Indikatoren siehe auch Tab. 5-11.**

4. Je nach zu vergleichenden Endlagern könnten nach dem hier aufgezeigten Muster weitere Arbeitsschritte ergänzt werden. Zu vergleichen ist dann, ob der entsprechende Arbeitsschritt vorgesehen ist (und damit Aufwand verursacht) oder ob nicht.

Ausfüllhinweise und Erläuterungen für die Nutzung der Tab. 5-13:

A) Aufwand bei Auffahrung

Indikator Nr. 1: Aufzufahrende Streckenlänge

Gesamtstreckenlänge, die bei Rückholung aufzufahren ist (Einlagerungsstrecken und Rückholstrecken in km): Je länger die aufzufahrende Gesamtstreckenlänge, desto mehr Aufwand ist für die Auffahrung zu erwarten.

Bewertung in Bezug auf den Aufwand bei Auffahrung:

- kürzer = günstiger
- länger = weniger günstig

1a – Alternative: Angabe zum Wirtsgestein (siehe Tab. 5-10)

In Steinsalz sind kürzere, in Kristallingestein mittlere und in Tongestein längere Strecken zu erwarten; diese Alternative ist nur sinnvoll anzuwenden, wenn die Abfallmengen der zu vergleichenden Konzepte gleich oder zumindest ähnlich sind.

Rückschluss auf die aufzufahrende Streckenlänge:

- Steinsalz => kürzere Strecken erwartbar als in Kristallingestein und in Tongestein
- Kristallingestein => kürzere Strecken erwartbar als in Tongestein
- Tongestein => längere Strecken erwartbar

1b – Alternative: Angabe der Endlager-Auslegungstemperatur (siehe Tab. 5-10)

Zur Einhaltung niedrigerer Auslegungstemperaturen können eine höhere Behälterzahl und größere Behälterabstände gewählt werden, die generische Aussagen zu längeren oder kürzeren zu erwartenden Strecken zulassen.

Rückschluss auf die aufzufahrende Streckenlänge:

- Höhere Auslegungstemperaturen => kürzere Strecken erwartbar
- Niedrigere Auslegungstemperatur => kürzere Strecken erwartbar

1c – Alternative: Angabe der Behälteranzahl (siehe Tab. 5-10)

Bei höheren Behälterzahlen sind längere Rückholstrecken erwartbar.

Rückschluss auf die aufzufahrende Streckenlänge:

- Niedrigere Behälteranzahl => kürzere Strecken erwartbar
- Höhere Behälteranzahl => längere Strecken erwartbar

1d – Alternative: Angabe der Behälterabstände (siehe Tab. 5-10)

Größere Behälterabstände lassen längere Strecken (Rückholstrecken) erwarten

Rückschluss auf die aufzufahrende Streckenlänge:

- Kleinere Behälterabstände => kürzere Strecken erwartbar
- Größere Behälterabstände => längere Strecken erwartbar

Indikator Nr. 2: Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen

Der Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen lässt erwarten, dass der Aufwand mit Zunahme der Verfestigung wächst.

Bewertung in Bezug auf den Aufwand bei Auffahrung:

- niedrigerer Verfestigungsgrad = günstiger
- höherer Verfestigungsgrad = weniger günstig

2a – Alternative: Endlager-Auslegungstemperatur (siehe Tab. 5-10)

Höhere Temperaturen im Endlager (Auslegung) lassen einen höheren Verfestigungsgrad der Streckenverfüllungen erwarten.

Rückschluss auf den Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen:

- Niedrigere Temperatur => niedrigerer Verfestigungsgrad der Streckenverfüllungen erwartbar
- Höhere Temperatur => höherer Verfestigungsgrad der Streckenverfüllungen erwartbar

2b – Alternative: Temperatur zu Beginn einer Rückholung (siehe Tab. 5-10)

Höhere Temperaturen zu Beginn der Rückholung lassen einen höheren Verfestigungsgrad der Streckenverfüllungen erwarten

Rückschluss auf den Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen:

- Niedrigere Temperatur => niedrigerer Verfestigungsgrad der Streckenverfüllungen erwartbar
- Höhere Temperatur => höherer Verfestigungsgrad der Streckenverfüllungen erwartbar

Indikator Nr. 3: Neuauffahrungen von Strecken

Bei Neuauffahrungen von Strecken ist mehr Aufwand als bei Wiederauffahrungen von Strecken zu erwarten; Neuauffahrungen sind somit ungünstiger bzgl. des Aufwands zur Streckenauffahrung bei einer Rückholung.

Ausfüllhinweis:

- Wenn nicht bekannt ist, ob Neuauffahrungen für die Rückholung geplant sind, entfällt der Indikator.
- Wenn keine neuen Strecken aufgefahren werden, ist „0 m“ einzusetzen.
- Wenn neue Strecken aufgefahren werden, aber die Streckenlänge nicht bekannt ist, ist „> 0 m“ einzusetzen.

Bewertung in Bezug auf den Aufwand bei Auffahrung:

- kürzer = günstiger
- länger = weniger günstig

3a – Ergänzungsmöglichkeit: Härte des Gesteins (siehe Tab. 5-11)

Bei gleicher Länge von Neuauffahrungen, kann zusätzlich die Härte des Gesteins für eine Aufwandsabschätzung herangezogen werden. Zu erwarten ist, dass Neuauffahrungen in härterem Gestein aufwändiger als in weicherem sind.

Bewertung in Bezug auf den Aufwand bei Auffahrung:

- Weich = günstiger
- Mittel = günstiger als hart, aber weniger günstig als weich
- Hart = weniger günstig

Indikator Nr. 4: Verbliebene Streckenausbauten

Manche Einlagerungskonzepte sehen vor, dass Streckenausbauten zur Streckenstabilisierung nach der Einlagerung nicht geraubt werden, sondern im Endlager verbleiben. Es ist zu erwarten, dass verbliebene Streckenausbauten den Auffahraufwand bei Rückholung erhöhen.

Bewertung in Bezug auf den Aufwand bei Auffahrung:

- nein = günstiger
- ja = weniger günstig

4a – Ergänzungsmöglichkeit: Überschneidbarkeit verbliebener Streckenausbauten (siehe Tab. 5-11)

Verbliebene Streckenausbauten sind bei der Auffahrung von Strecken für eine Rückholung zu überschneiden oder zu umfahren. Es ist zu erwarten, dass die Umfahrung mehr Aufwand bedeutet als die Überschneidung.

Bewertung in Bezug auf Aufwand bei Streckenauffahrungen:

- ja = günstiger
- nein = weniger günstig

B) Aufwand für Offenhaltung

Indikator Nr. 5: Häufigkeit von Streckennachschnitten

Dieser Indikator kann für den Vergleich zweier Rückholkonzepte von Endlagern im Wirtsgestein Salz herangezogen werden. Es sind Streckennachschnitte im Rückholzeitraum zu erwarten, die sich auf den Aufwand auswirken.

Auch wenn die Wirtsgesteine unterschiedlich sind, kann zum Beispiel beim Vergleich von einem Endlager in Steinsalz mit einem Endlager in Kristallingestein eine Aussage getroffen werden.

Ausfüllhinweis:

Wenn nur das Wirtsgestein und nicht die Anzahl von Nachschnitten bekannt ist, dann kann erwartbar der Wert „> 0“ bei Steinsalz und „0“ bei Ton- und Kristallingestein eingesetzt werden.

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Offenhaltung:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

5a – Alternative: Wirtsgestein (siehe Tab. 5-10)

Nur bei einem Endlager in Steinsalz (insbesondere Steinsalz in steiler Lagerung) sind Streckennachschnitte im Rückholzeitraum zu erwarten. Bei Endlager in Tongestein und Kristallingestein ist eher nicht mit Streckennachschnitten zu rechnen –, und wenn doch, mit dann ist von einer kleineren Anzahl auszugehen.

Ausfüllhinweis:

Sind keine Angaben zur Anzahl der Nachschnitte verfügbar, würde kein Nachschnitt mit dem Wert „0 m“ und Nachschnitte würden mit dem Wert „> 0“ in die Tabelle eingetragen.

Rückschluss auf die Häufigkeit von Streckennachschnitten:

- Tongestein, Kristallingestein => mit kleinerer Anzahl (vermutlich „0“) an Streckennachschnitten zu rechnen
- Steinsalz => Anzahl an Streckennachschnitten > 0 (Anzahl kleiner als in Ton- und Kristallingestein)

5b – Ergänzungsmöglichkeit: Nachzuschneidende Streckenlänge (siehe Tab. 5-11)

Zusätzlich zur Häufigkeit von Streckennachschnitten kann noch die nachzuschneidende Streckenlänge für den Vergleich herangezogen werden. Längere nachzuschneidende Strecken bedeuten einen höheren Aufwand.

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Offenhaltung:

- kürzere Strecken = günstiger
- längere Strecken = weniger günstig

Indikator Nr. 6: Auszubauende Streckenlängen

Streckenausbauten für die Rückholung sind bei einem Endlager in Tongestein und gegebenenfalls in stark geklüftetem Kristallingestein zu erwarten. Auch bei Endlagern in flach lagernden Salzen (beispielsweise WIPP in den USA) sind zumindest Firstsicherungsmaßnahmen erwartbar.

Ausfüllhinweis:

Sind keine Angaben zu den auszubauenden Streckenlängen verfügbar, würde kein Ausbau als „0 m“ und Ausbau als „> 0“ in die Tabelle eingetragen werden.

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Offenhaltung:

- kürzer = günstiger
- länger = weniger günstig

6a – Alternative: Wirtsgestein (siehe Tab. 5-10)

Streckenausbauten für die Rückholung sind insbesondere bei einem Endlager in Tongestein und gegebenenfalls in stark geklüftetem Kristallingestein zu erwarten. Bei Steinsalz in flacher Lagerung ist mit Ausbauten zur Firstsicherung zu rechnen.

Ausfüllhinweis:

Wenn nur das Wirtsgestein bekannt ist (und keine auszubauenden Streckenlängen), dann ist folgendermaßen vorzugehen: Wenn keine Streckenausbauten zu erwarten sind, wird der Wert „0“ eingetragen; wenn Streckenausbauten zu erwarten sind, dann wird und der Wert „> 0“ eingetragen.

Rückschluss auf auszubauende Streckenlängen:

- Steinsalz = „0“ zu erwarten => kaum oder keine auszubauenden Strecken
- Tongestein = „> 0“ zu erwarten => deutlich längere auszubauende Strecken (wobei Ausbauten auch in stark geklüftetem Kristallingestein notwendig sein können)

C) Aufwand für Bewetterung / Kühlung

Indikator Nr. 7: Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung

Der Aufwand zur Implementierung von Bewetterungskomponenten wächst erwartbar mit der Länge der wieder und / oder neu zu bewetternden Strecken bei der Rückholung.

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Bewetterung / Kühlung:

- kürzer = günstiger
- länger = weniger günstig

Indikator Nr. 8: Implementierung von Kühlaggregaten

Zusätzlicher Bedarf an Kühlaggregaten zur Bewetterung und deren Implementierung erhöhen den Aufwand für Bewetterung und Kühlung.

Ausfüllhinweis:

Liegt nur die Information vor, dass Kühlaggregate eingesetzt oder nicht eingesetzt werden, aber nicht die Anzahl, so wird für den Nichteinsatz der Wert „0“ und für den Einsatz von Kühlaggregaten der Wert „> 0“ in die Tabelle eingetragen.

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Bewetterung / Kühlung:

- kleinere Anzahl = günstiger
- größere Anzahl = weniger günstig

8a – Alternative: Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (siehe Tab. 5-10)

Aus dem Delta der Temperatur könnte bei höherem Delta indirekt der Bedarf zur Verwendung von Kühlaggregaten zur Herstellung von Soll-Temperaturen bei einer Rückholung abgeleitet werden.

Rückschluss auf die Implementierung von Kühlaggregaten:

- Niedrigere Temperatur-Differenz => Kühlaggregate eher nicht erwartbar bzw. eine geringere Anzahl an Kühlaggregaten erwartbar => „0“
- Höhere Temperatur-Differenz => Kühlaggregate eher erwartbar bzw. höhere Anzahl an Kühlaggregaten erwartbar => „> 0“

Indikator Nr. 9: Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur

Abkühlzeiten tragen zeitlich zum Aufwand bei.

Ausfüllhinweis:

Liegen keine Informationen zur Dauer von Abkühlzeiten vor, sondern nur eine Information dazu, ob Abkühlzeiten benötigt werden oder nicht, ist folgendermaßen vorzugehen: Wenn keine Abkühlzeiten benötigt werden, ist der Wert „0“ einzusetzen; wenn Abkühlzeiten vorgesehen sind, wird der Wert „> 0“, eingetragen.

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Bewetterung / Kühlung:

- kürzer = günstiger
- länger = weniger günstig

Wenn keine Angabe zu den Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur vorliegen, kann man folgende alternative Indikatoren zur Abschätzung heranziehen:

9a – Alternative: Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (siehe Tab. 5-10)

Bei einem größeren Temperatur-Delta sind längere Abkühlzeiten zu erwarten als bei einem kleineren. Der Rückschluss erfolgt auf Basis der Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung.

Rückschluss auf Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur:

- Niedrigere Temperatur-Differenz => kürzere Abkühlzeiten erwartbar
- Höhere Temperatur-Differenz => längere Abkühlzeiten erwartbar

9b – Alternative: Temperatur zu Beginn einer Rückholung

Höhere Temperaturen lassen eher längere Abkühlzeiten erwarten (hier sind Abhängigkeiten vom Einsatz von Kühlaggregaten zu berücksichtigen). Der Rückschluss erfolgt auf Basis der Temperatur zu Beginn der Rückholung.

Rückschluss auf Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur:

- Niedrigere Temperatur-Differenz => kürzere Abkühlzeiten erwartbar
- Höhere Temperatur-Differenz => längere Abkühlzeiten erwartbar

D) Aufwand für Behälterfreilegung, -aufnahme, -transport u. T.

Indikator Nr. 10: Behälteranzahl

Die Behälteranzahl bestimmt, wie oft die einzelnen Arbeitsschritte für Behälterfreilegung, -aufnahme, -transport u. T. zu wiederholen sind. Mit zunehmender Anzahl an Behältern erhöhen sich die Wiederholungen der Arbeitsschritte und damit erhöht sich auch der Aufwand.

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Behälterfreilegung, -aufnahme, -transport u. T.:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

10a – Alternative: Vergleich der Auslegungstemperaturen der Endlager (siehe Tab. 5-10)

Wenn keine Angabe zur Behälterzahl vorliegt, kann man die Auslegungstemperatur alternativ als Indikatoren zur Abschätzung heranziehen.

Höhere Auslegungstemperaturen eines Endlagers lassen darauf schließen, dass eine geringere Anzahl an Behältern für die Einlagerung der Abfälle benötigt wird.

Anmerkung: Die Verwendung dieser alternativen Angabe ist nur dann sinnvoll, wenn die Abfallvolumina der zu vergleichenden Endlager ähnlich sind.

Rückschluss auf die Behälteranzahl:

- Höhere Auslegungstemperaturen => kleinere Anzahl an Behältern erwartbar
- Niedrigere Auslegungstemperaturen => größere Anzahl an Behältern erwartbar

10b – Alternative: Vergleich der Abfallvolumina der Endlager (siehe Tab. 5-10)

Wenn die Anzahl der Behälter nicht verfügbar ist, kann anhand der Abfallvolumina eine Abschätzung erfolgen. Es ist erwartbar, dass kleinere Abfallvolumina zu einer kleineren Anzahl an Behältern führen.

Rückschluss auf die Behälteranzahl:

- Kleinere Abfallvolumina => kleinere Anzahl an Behältern
- Größere Abfallvolumina => größere Anzahl an Behältern

Indikator Nr. 11: Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen

Verrohrungen in einem Endlager führen dann bei einer Rückholung zu einem erwartbar erhöhten Aufwand, wenn diese verfüllt wurden und die Verfüllung zur Behälteraufnahme zu entfernen ist. Die Anzahl der zu entfernenden Verrohrungsverfüllungen ist somit ein Indikator für Aufwand.

Ausfüllhinweis:

- Wenn in einem Endlager keine Verrohrungen vorgesehen sind oder diese nicht verfüllt werden, so ist bei der Anzahl „0“ einzusetzen.
- Wenn bei einem Endlager für die Rückholung Verrohrungsverfüllungen vorgesehen sind, aber die Anzahl nicht bekannt ist, so ist „> 0“ als Wert einzusetzen

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Behälterfreilegung, -aufnahme, -transport u. T.:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

11a – Alternative: Einlagerungskonzept (siehe Tab. 5-10)

Wenn keine Angaben über Verrohrungsverfüllungen vorliegen, kann man das Einlagerungskonzept als alternativen Indikator zur Abschätzung heranziehen.

Die Einlagerungskonzepte für Deutschland (horizontale Streckenlagerung oder vertikale Bohrlochlagerung) sehen nach derzeitigem Stand (siehe Kapitel 3.1) Folgendes vor: Bei vertikaler Bohrlochlagerung werden Verrohrungen verfüllt; bei horizontaler Streckenlagerung sind keine Verrohrungen vorgesehen. Somit erhöht sich der Aufwand einer Rückholung bei vertikaler Bohrlochlagerung um den Arbeitsschritt „Entfernung von Verrohrungsverfüllungen“.

Ausfüllhinweis:

Bei Nichtvorliegen einer Anzahl: Siehe oben bei Indikator Nr. 11

Rückschluss auf zu entfernende Verrohrungsverfüllungen:

- Horizontale Streckenlagerung (keine Verrohrungsverfüllung zu erwarten)
=> kleinere Anzahl
- Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl= weniger günstig

Indikator Nr. 12: Einzurichtende Bohrlochschleusen

Wenn für die Rückholung von Behältern Bohrlochschleusen an Bohrlöchern einzurichten sind, so trägt dies erwartbar zur Erhöhung des Aufwands gegenüber Konzepten ohne Bohrlochschleusen bei.

Ausfüllhinweis:

- Wenn in einem Endlager keine Bohrlochschleusen für die Rückholung vorgesehen sind, so ist bei der Anzahl „0“ einzusetzen.
- Wenn bei einem Endlager für die Rückholung Bohrlochschleusen vorgesehen sind, aber die Anzahl nicht bekannt ist, so ist „> 0“ als Wert einzusetzen

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Behälterfreilegung, -aufnahme, -transport u. T.:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

12a – Alternative: Einlagerungskonzept (siehe Tab. 5-10)

Wenn keine Angaben über das Vorhandensein oder das Nichtvorhandensein von Bohrlochschleusen vorliegen, kann man das Einlagerungskonzept als alternativen Indikator zur Abschätzung heranziehen.

Die Einlagerungskonzepte für Deutschland (horizontale Streckenlagerung, vertikale Bohrlochlagerung) sehen nach derzeitigem Stand (siehe Kapitel 3.1) vor, dass vertikale Bohrlochlagerung die Einrichtung von Bohrlochschleusen vor der Rückholung von Behältern benötigt und horizontale Streckenlagerung nicht. Somit erhöht sich der Aufwand einer Rückholung bei vertikaler Bohrlochlagerung um den Arbeitsschritt „Einrichtung von Bohrlochschleusen“.

Ausfüllhinweis:

Bei Nichtvorliegen einer Anzahl, sondern nur einer qualitativen Information (Bohrlochschleusen ja / nein): Siehe Indikator Nr. 12

Rückschluss auf die Einrichtung von Bohrlochschleusen:

- Horizontale Streckenlagerung (keine Bohrlochschleusen zu erwarten) => kleinere Anzahl
- Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl an Bohrlochschleusen zu erwarten

Indikator Nr. 13: Nutzung von Overpacks

Je nach Einlagerungskonzept werden aus Strahlenschutzgründen „Overpacks“ für die Behälter benötigt. Der Arbeitsschritt zur Implementierung von Overpacks verursacht Aufwand gegenüber Konzepten ohne Overpacks.

Ausfüllhinweis:

- Wenn in einem Endlager keine Overpacks für die Rückholung vorgesehen sind, so ist bei der Anzahl „0“ einzusetzen.
- Wenn bei einem Endlager für die Rückholung Overpacks vorgesehen sind, aber die Anzahl nicht bekannt ist, so ist „> 0“ als Wert einzusetzen (dies kann passieren, wenn die Behälterzahl über alternative Indikatoren abgeschätzt werden muss).

Bewertung in Bezug auf Aufwand für Behälterfreilegung, -aufnahme, -transport u. T.:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

13a – Alternative: Einlagerungskonzept (siehe Tab. 5-10)

Wenn keine Angabe über die Verwendung von Overpacks vorliegen, kann man das Einlagerungskonzept als alternativen Indikator zur Abschätzung heranziehen.

Die Einlagerungskonzepte für Deutschland (horizontale Streckenlagerung oder vertikale Bohrlochlagerung) sehen nach derzeitigem Stand (siehe Kapitel 3.1) vor, dass bei vertikaler Bohrlochlagerung Overpacks genutzt werden und bei horizontaler Streckenlagerung nicht. Somit erhöht sich der Aufwand einer Rückholung bei vertikaler Bohrlochlagerung um den Arbeitsschritt „Implementierung von Overpacks“.

Ausfüllhinweis:

Bei nicht Vorliegen einer Anzahl, sondern nur einer qualitativen Information (Overpacks ja / nein): Siehe Indikator Nr. 13

Rückschluss auf die Nutzung von Overpacks:

- Horizontale Streckenlagerung (keine Overpacks zu erwarten) => kleinere Anzahl
- Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl an Overpacks zu erwarten

5.2.2 Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“

Für das Leitkriterium „Technikverfügbarkeit“ werden Indikatoren zusammengestellt, die es ermöglichen, im Paarvergleich zu bewerten, ob die jeweiligen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Verfügbarkeit technischer Anlagen, Systeme und Komponenten günstiger oder ungünstiger sind. Unter Verfügbarkeit wird hier insbesondere die Einsatzbereitschaft und die Wiederbeschaffbarkeit im Falle eines Ausfalls verstanden. Indikatoren für die Verfügbarkeit im Rückholungsbetrieb können beispielsweise Wartungsbedarfe, die technologische Reife und Redundanzen sowie die Marktverfügbarkeit von technischen Komponenten darstellen. Bei bewährter Technik zum Beispiel aus dem Bergbau sind günstigere Verfügbarkeiten hinsichtlich Ausfallwahrscheinlichkeiten und der Möglichkeit der Wiederbeschaffung bei Ausfall zu erwarten als bei technischen Unikaten, die nur in Demonstrationsversuchen vor einer Rückholung zur Anwendung kommen. Die für eine Rückholung einzusetzende Technologie kann zunächst folgendermaßen untergliedert werden:

- technische Komponenten aus dem Einlagerungsbetrieb, die unverändert bei einer Rückholung zum Einsatz kommen (Einlagerungstechnik),
- technische Komponenten des Einlagerungsbetriebs, die für die Rückholung modifiziert werden (modifizierte Einlagerungstechnik) und
- technische Komponenten, die speziell für die Rückholung entwickelt werden (für Rückholung entwickelte Technik).

Zunächst wird eine Übersicht der Arbeitsschritte bei Rückholung sowie über die für diesen Arbeitsschritt geplanten technischen Komponenten oder Komponentengruppen gebraucht.

Mögliche Arbeitsschritte bei einer Rückholung (siehe auch Kapitel 3.2):

- Streckenauffahrungen
- Entfernung von Streckenverfüllungen
- Behälterfreilegung
- Entfernung von Verfüllmaterial bei verfüllten Verrohrungen
- Behälteraufnahme
- Implementierung von Behälterabschirmungen
- Behältertransport

In Abhängigkeit von Wirtsgestein und Einlagerungskonzept können Arbeitsschritte entfallen oder zu ergänzen sein.

Für jede technische Komponente (bzw. Komponentengruppe) können folgende Indikatoren zur Bewertung der Verfügbarkeit herangezogen werden:

- Technische Komponente für die Rückholung entspricht der Einlagerungstechnik
- Technische Komponente für die Rückholung entspricht modifizierter Einlagerungstechnik
- Die technische Komponente für die Rückholung wird ausschließlich für die Rückholung entwickelt
- Redundanzen technischer Komponenten
- Marktverfügbarkeit technischer Komponenten
- Technische Komponenten für die Rückholbarkeit, die ein Unikat darstellen

Tab. 5-14: Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“

Indikator	Bewer-tungs-größe	Bewertung	
		günstiger	weniger günstig
Für die Rückholung modifizierte technische Komponenten	Anzahl	Kleiner	Größer
Nur für die Rückholung entwickelte technische Komponenten	Anzahl	Kleiner	Größer
Redundanz der Komponenten	Anzahl	Größer	Kleiner
Marktverfügbarkeit	ja / nein	ja	nein

Die vorgenommenen Bewertungsvorschläge (die Spalten „günstiger“ und „weniger günstig“) geben Hinweise zur möglichen Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung. Sie basieren auf folgenden erwartbaren Einschätzungen:

- Die Verfügbarkeit von Technik ist günstiger, wenn es sich bei ihr um bewährte Technik anstelle von Sonderlösungen handelt.
- Die Verfügbarkeit von Technik ist günstiger, wenn sie im Fall eines Ausfalls leicht am Markt beschaffbar ist.
- Die Verfügbarkeit von Technik ist günstiger, wenn Redundanzen vorgehalten werden, so dass es bei Ausfällen nicht zu längeren Betriebsunterbrechungen kommt.

Bei der Anwendung des Leitkriteriums „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“ auf konkrete Rückholkonzepte kann es gegebenenfalls zu begründbaren Abweichungen bei der Bewertung der Technikverfügbarkeit kommen. In diesem Falle ändert sich das Ergebnis, jedoch nicht die hier vorgeschlagene Methodik, um zu einer Bewertung zu kommen. Es erscheint sinnvoll, bei der Anwendung dieses Leitkriteriums die Rückholung in Arbeitsschritte zu unterteilen und die jeweils für einen Arbeitsschritt benötigten technischen Komponenten zu bewerten.

5.2.2.1 Erläuterungen zur Anwendung des Leitkriteriums „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“

Für die Anwendung des Leitkriteriums „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“ sind zunächst möglichst umfassende Informationen für den anschließenden Paarvergleich zusammenzustellen. Als Hilfestellung ist die nachfolgende Tabelle erarbeitet worden. Sie verschafft einen Überblick über die Zusammenhänge, die

Relevanz der Indikatoren sowie die Bewertungsregeln. Zu jedem Indikator wird eine Texterläuterung mit Ausfüllhinweisen für die Tabellen gegeben.

Für die Anwendung des Leitkriteriums zur Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung ist es sinnvoll, bei entsprechender Verfügbarkeit von Informationen jeweils die einzelnen Arbeitsschritte zu betrachten.

Eine mögliche Untergliederung der Arbeiten (Arbeitsschritte) kann wie folgt vorgenommen werden (bei Bedarf können weitere Arbeitsschritte ergänzt werden):

- Streckenauffahrung und Entfernung von Versatzmaterial
- Behälterfreilegung
- Behälteraufnahme
- Behältertransport unter Tage

Werden für die einzelnen Arbeitsschritte mehrere technische Komponenten benötigt, kann es sinnvoll sein, diese für einen Vergleich bei Indikator 3 und 4 gesondert aufzulisten (Hinzufügen von Zeilen).

Tab. 5-15: Informationssammlung und Anwendung des Leitkriteriums „Technikverfügbarkeit“

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver- gleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Günsti- gere Aus- prägung
1	Für die Rückholung modifizierte technische Komponenten [Anzahl]				kleiner = günstiger	
2	Nur für die Rückholung entwickelte technische Komponenten [Anzahl]				kleiner = günstiger	
3	Redundanz der Komponenten [Anzahl]				größer = günstiger	
4	Marktverfügbarkeit [ja / nein]				ja = günstiger	

Allgemeine Hinweise:

- 1. Die Tabelle sollte gesondert für jeden Arbeitsschritt ausgefüllt werden (wenn genug Informationen vorliegen).**
- 2. Für jede technische Komponente kann bei Indikator 3 und Indikator 4 eine eigene Zeile eingefügt werden.**

Ausfüllhinweise und Erläuterungen für die Nutzung der Tab. 5-15:

Indikator Nr. 1: Anzahl für die Rückholung modifizierter technischer Komponenten

Die Anzahl an für die Rückholung modifizierten Komponenten ist ein Indikator dafür, wie stark die Rückholtechnik von der Einlagerungstechnik abweicht. Je stärker die Rückholtechnik von der Einlagerungstechnik abweicht, umso eher ist eine geringere technische Verfügbarkeit zu erwarten. Das heißt, je mehr technische Komponenten für die Rückholung modifiziert (und damit nicht im Einlagerungsbetrieb erprobt) sind, desto ungünstiger ist dies in Bezug auf die Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung.

Bewertung in Bezug auf Verfügbarkeit der technischen Komponenten

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

Indikator Nr. 2: Anzahl der nur für die Rückholung entwickelten technischen Komponenten

Die Anzahl an für die Rückholung neu entwickelten Komponenten ist ein Indikator dafür, wie stark die Rückholtechnik von der Einlagerungstechnik abweicht. Je stärker die Rückholtechnik von der Einlagerungstechnik abweicht, umso eher ist eine geringere technische Verfügbarkeit zu erwarten. Das heißt, je mehr technische Komponenten eigens für die Rückholung zu entwickeln (und damit nicht im Einlagerungsbetrieb erprobt) sind, desto ungünstiger ist dies in Bezug auf die Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung.

Bewertung in Bezug auf Verfügbarkeit der technischen Komponenten

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

Indikator Nr. 3: Anzahl der Redundanz der Komponenten

Technische Komponenten können aufgrund von Störungen, Verschleiß und / oder Wartungszeiten ausfallen. Je größer die Anzahl an Redundanzen ist, desto höher ist die erwartbare Verfügbarkeit für den Rückholbetrieb.

Bewertung in Bezug auf Verfügbarkeit der technischen Komponenten

- größer = günstiger
- kleiner = weniger günstig

Indikator Nr. 4: Marktverfügbarkeit

Die Marktverfügbarkeit von technischen Komponenten sagt zum einen etwas darüber aus, ob es sich um bewährte Technik handelt, und zum anderen etwas über die Wiederbeschaffungsmöglichkeit einer Komponente, sollte diese ausfallen. Es ist erwartbar, dass am Markt verfügbare Komponenten zum einen bewährte Technik sind und zum anderen zu kürzeren Wiederbeschaffungszeiten führen. Beides wirkt sich günstig auf die Technikverfügbarkeit aus.

Bewertung in Bezug auf Verfügbarkeit der technischen Komponenten

- ja = günstiger
- nein = weniger günstig

5.2.3 Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“

Die Auslegung des Endlagers erfolgt sicherheitsgerichtet. Insbesondere muss die Langzeitsicherheit des Endlagers auch bei Auslegungen für eine Rückholbarkeit gewährleistet bleiben. Divergenzen zwischen der Rückholungsanforderung und den Sicherheitsanforderungen (Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit) sind vom Betreiber in einem iterativen Prozess aufzulösen.

Grundsätzliche langzeitsicherheitsgerichtete Auslegungsanforderungen, die von der gesetzlichen Anforderung der Rückholbarkeit betroffen sein können, beziehen sich auf

- den zügigen Einschluss der eingelagerten Behälter,
- den Schutz geologischer und technischer Barrieren (beispielsweise über Auslegungstemperaturen oder Auswahl und Menge ins Endlager eingebrachter Materialien) und

- Begrenzungen der Durchörterung des Wirtsgesteins auf ein Minimum, um Wegsamkeiten für Wasserzutritte und Radionuklide zu vermeiden.

Das Leitkriterium „Langzeitsicherheit“ soll die Möglichkeit geben, Endlagerauslegungen zu vergleichen, die aufgrund der Rückholoption vorgenommen werden und die Aspekte der Langzeitsicherheit berühren können (siehe oben). Zu betrachten sind Endlageranpassungen für die Rückholbarkeit, die Einfluss auf die Durchörterung des Wirtsgesteins, die Barrieren und den schnellen Einschluss der Behälter nehmen können (siehe auch Erläuterungen in Kapitel 5.1).

Die Durchörterung des Wirtsgesteins hängt eng zusammen mit der Behälteranzahl und den Behälterabständen sowie den Streckenführungen und den Streckenquerschnitten. Barrieren können von der Art und der Menge im Endlager verbleibender Materialien beeinflusst werden. Für den zügigen Einschluss der Behälter spielen bei Endlagern in Steinsalz Temperaturen eine Rolle. Für die Beurteilung des Einflusses von Maßnahmen zur Rückholbarkeit auf die Langzeitsicherheit sind folgende wirtsgesteinsspezifische Zusammenhänge zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 5.1.1):

- Im Steinsalz ist es je nach Einlagerungskonzept und Endlagerauslegungstemperatur notwendig, einen Zielkonflikt zwischen Temperaturanpassungen zur Ermöglichung oder Optimierungen einer Rückholung (niedrigere Temperaturen von Vorteil) und Temperaturen für den schnellstmöglichen Einschluss der Behälter aufzulösen (höhere Temperaturen von Vorteil). Temperaturbegrenzungen zur Erreichung beherrschbarer Temperaturen bei einer Rückholung verlangsamen die Salzgruskompaktion und damit den zügigen Einschluss der Behälter (Bollingerfehr et al. 2014). Bei Endlagern in den Wirtsgesteinen Tongestein und Kristallingestein ist nicht die Rückholbarkeit der Grund für Temperaturanpassungen, sondern der Schutz toniger Barrieren (Buffer, Verfüllmaterial und Wirtsgestein). Anpassungen der Temperaturen durch Änderungen von Behälteranzahl und Behälterabständen haben Auswirkungen auf den schnellen Einschluss der Behälter (bei niedrigeren Temperaturen), den Materialeintrag in das Endlager sowie auf die Durchörterung.
- Streckenausbauten (Art und Menge), die im Endlager verbleiben (relevant für Endlager in Tongestein), sind weniger günstig für die Langzeitsicherheit. Rückholbarkeit kann zu Materialanpassungen bei Streckenausbauten führen. Die verwendeten Materialien können unter Umständen zu chemischen und physikalischen Prozessen beitragen die zum Beispiel zur Bildung von Wegsamkeiten für Wasser und Radionuklide beitragen und auf Auswirkungen auf die Versatzkompaktion und damit gegebenenfalls auf die Langzeitsicherheit bezüglich des schnellen Einschlusses haben (Bollingerfehr et al. 2014).
- Für Endlager in Kristallingestein gibt es Überlegungen, dass die für eine Rückholung benötigten Streckenführungen (längere Strecken) und Streckenquer schnitte (größere Querschnitte) schon bei der Errichtung und Einlagerung

aufgefahren werden sollten. Dies hätte Einfluss auf die Wirtsgesteinsdurchörterung. Allerdings wird bei einem Endlager im Kristallingestein von der Barriere Wirtsgestein nicht wie bei Steinsalz und Tongestein Kredit genommen, so dass dieser Aspekt hinsichtlich der Langzeitsicherheit hier nicht weiter betrachtet wird.

In das Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“ gehen die Kriterien Durchörterung, Barrierenerhalt (bzw. Schutz der Barrieren) und sicherer Einchluss ein. Für diese werden jeweils geeignete Indikatoren zusammengestellt, die einen Vergleich und eine Zuordnung in günstiger oder weniger günstig ermöglichen (Paarvergleich der jeweiligen Ausprägungen). Abhängigkeiten zwischen Wirtsgestein und Anpassungen der Endlagerauslegung für Rückholbarkeit (siehe Kapitel 5.1.1) werden im Leitkriterium zur Langzeitsicherheit qualitativ berücksichtigt.

Folgende Kriterien und Indikatoren werden in das Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“ aufgenommen:

Kriterium „Durchörterung“ – Indikatoren:

- **Streckenlängen** (für Endlager in Steinsalz aus Sicht der Rückholbarkeit relevant, Stichworte: Anpassung der Temperaturen über Behälteranzahl und Behälterabstände): Indikator für die Durchörterung und somit die Schaffung möglicher Wegsamkeiten (als alternativer Indikator für Streckenlängen können bei nicht verfügbaren Informationen auch Behälteranzahl und Behälterabstand verwendet werden, siehe auch die alternativen Indikatoren für das Leitkriterium zum Aufwand bei einer Rückholung in Kapitel 5.2.1.1).
- **Schächte für Rückholbarkeit:** Indikator für die Durchörterung aufgrund der Rückholbarkeit, wenn Schächte bereits während der Errichtung für eine optionale Rückholung aufgefahren werden.
- **Rampen für Rückholbarkeit:** Indikator für die Durchörterung, wenn Rampen bereits während der Errichtung für eine optionale Rückholung aufgefahren werden.
- **Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wegen Rückholbarkeit:** Indikator für die Durchörterung und somit die Schaffung möglicher Wegsamkeiten.

Kriterium „Barrierenerhalt“ – Indikatoren:

- **Behälteranzahl** (für Endlager in Steinsalz aus Sicht der Rückholbarkeit relevant, Stichworte: Anpassung der Temperaturen über Behälteranzahl und Behälterabstände): als Indikator für ins Endlager eingebrachte Materialmengen; Beitrag zu chemisch-physikalischen Prozessen im Endlager, die zu

Barrienschädigungen beitragen können (bei Kenntnis und Bedarf können Angaben zu Materialart und -Menge im Leitkriterium ergänzt werden).

- **Verrohrungen wegen Rückholbarkeit:** Indikator für ins Endlager eingebrachte Materialmengen; Beitrag zu chemisch-physikalischen Prozessen im Endlager, die zu Barrienschädigungen beitragen können (bei Kenntnis und Bedarf können Angaben zu Materialart und -Menge im Leitkriterium ergänzt werden).
- **Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wegen Rückholbarkeit:** Indikator für ins Endlager eingebrachte Materialmengen; Beitrag zu chemisch-physikalischen Prozessen im Endlager, die zu Barrienschädigungen beitragen können (bei Kenntnis und Bedarf können Angaben zu Materialart und -menge im Leitkriterium ergänzt werden).
- **Rückholstrategie:** Indikator für Einfluss auf die Langzeitsicherheit (Barrierenerhalt); bei einer selektiven Rückholung ergeben sich Anforderungen zur Gewährleistung des Erhalts der Langzeitsicherheit und an die Intaktheit der Behälter, die über die Anforderungen bei der Umsetzung der Re-Mining-Strategie hinaus gehen (siehe Kapitel 3.3).

Kriterium „Schneller Einschluss“ – Indikatoren:

- **Auslegungstemperatur Behälteroberfläche** (nur für Endlager in Steinsalz relevant): Indikator für den schnellen Einschluss aufgrund des Einflusses der Temperatur auf die Salzgruskompaktion und damit auf den schnelleren Einschluss bei höheren Temperaturen.
- **Streckenausbauten – angepasste Materialien wegen Rückholbarkeit** (nur für Endlager in Tongestein relevant): Indikator für den schnellen Einschluss; im Endlager verbleibende Ausbauten stehen dem schnellen und sicheren Einschluss der Endlagerbehälter entgegen (Bollingerfehr et al. 2014).

Streckenausbauten, die in Endlagern in Tongestein aufgrund der Rückholbarkeit angepasst werden (veränderte Materialien und Materialmengen), können unter Umständen zu chemischen und physikalischen Prozessen mit Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit beitragen (siehe Kapitel 5.2.3). Diese sehr spezifischen Zusammenhänge sind generisch jedoch kaum zu beurteilen. Allein der Umstand, dass solche Anpassungen erfolgen, kann nicht als günstiger oder weniger günstig beurteilt werden. Insofern findet dieser Zusammenhang keine Berücksichtigung als Indikator für den Barrierenerhalt im Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“.

Tab. 5-16: Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“

Kriterium	Indikator (bewertungsrelevante Ausprägung)	Bewertungs-größe	Bewertung	
			Günsti-ger	Weniger günstig
Durchörterung	Verlängerung von Einlagerungsstrecken wg. Rückholoption	ja / nein	nein	ja
	Schächte für Rückholbarkeit	Anzahl	kleiner	größer
	Rampen für Rückholbarkeit	Anzahl	kleiner	größer
	Monitoring Instrumentierung des Wirtschaftsteins wg. Rückholbarkeit	Anzahl	kleiner	größer
Barrierenerhalt	Behälteranzahl angepasst wg. Rückholoption	ja / nein	nein	ja
	Verrohrungen wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja
	Monitoring Instrumentierung des Wirtschaftsteins wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja
	Rückholstrategie	Re-Mining / selektive Rückholung	Re-Mining	Selektive Rückholung
Schneller Einschluss	Auslegungstemperatur Behälteroberfläche angepasst wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja
	Streckenausbauten - angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja

5.2.3.1 Alternative und ergänzende Indikatoren

Auch beim Kriterium zur Langzeitsicherheit ist es möglich, bei fehlenden Informationen zur Streckenlänge alternativ Aussagen anhand von Behälteranzahl und Behälterabstand (siehe Tab. 5-17) zu treffen (siehe auch Vorgehen beim Leitkriterium zum Aufwand in Kapitel 5.2.1.1).

Optional sind Ergänzungen zu imendlager verbleibenden Materialien denkbar, sofern Informationen dazu verfügbar sind (siehe Tab. 5-18). Dies können Angaben zu Materialart und -mengen sein. Die Bewertung erfolgt mit der Annahme, dass der Eintrag kleinerer Materialmengen weniger Einfluss auf die Langzeitsicherheit hat als größere Materialmengen. Im Vergleich sind kleinere Materialmengen dann als günstiger und größere als weniger günstig zu bewerten. Dies ist eine sehr generische und tendenzielle Bewertung, weil sie nicht die spezifischen chemischen und physikalischen Auswirkungen unterschiedlicher Materialien erfasst.

Tab. 5-17: Alternative Indikatoren zur Verwendung für das Leitkriterium Langzeitsicherheit

Indikator	Alternative Indikatoren und zugehörige Bewertungsgrößen	Erwartbare Rückschlüsse hinsichtlich der Ausprägung des erzielten Indikators	Zusammenhang
Streckenlänge Einlagerungsstrecken	Behälteranzahl (Anzahl oder qualitativ „höher / niedriger“)	Höhere Behälteranzahl => längere Strecken erwartbar Niedrigere Behälteranzahl => kürzere Strecken erwartbar	Bei höheren Behälterzahlen sind längere Rückholstrecken erwartbar
	Behälterabstände	Größere Behälterabstände => längere Strecken erwartbar Kleinere Behälterabstände => kürzere Strecken erwartbar	Größere Behälterabstände lassen längere Strecken (Rückholstrecken) erwarten

Tab. 5-18: Ergänzende Indikatoren für das Leitkriterium Langzeitsicherheit

Ergänzende Indikatoren (optional)	Bewertungsgröße	Erwartbare Rückschlüsse bei Hinzunahme des Indikators	Zusammenhang
Verlängerung der Einlagerungsstrecken wg. Rückholung	Längenangabe	<p>Bei größeren Behälterabständen für Temperaturoptimierungen sind längere Einlagerungsstrecken erwartbar (Steinsalz).</p> <p>Anpassungen der Streckenführung für eine Rückholung in Kristallgestein lassen verlängerte Einlagerungsstrecken aufgrund der Rückholbarkeit erwarten.</p>	<p>Bei einem Endlager in Steinsalz werden ggf. für Optimierungen der Ist-Temperaturen bei einer Rückholung Anpassungen der Behälteranzahl und der Behälterabstände vorgenommen, die zu längeren Einlagerungsstrecken führen.</p> <p>Bei Endlagern in Kristallgestein werden Einlagerungsstrecken (Streckenführung und Streckenvolumen) bereits in der Einlagerungsphase an die Bedarfe im Fall einer Rückholung angepasst.</p>
Behälteranzahl (wenn Anpassungen aufgrund von Rückholbarkeit)	Anzahl	Weniger Behälter haben weniger Einfluss auf die Langzeitsicherheit.	Mit steigender Behälteranzahl erhöht sich die Menge der ins Endlager eingebrachten Materialien.
Behältermaterial (wenn Anpassungen aufgrund von Rückholbarkeit)	Mengenangabe	Kleinere Materialmengen haben weniger Einfluss auf die	Falls gleiche Materialien vorliegen, kann hier zusätzlich eine Aussage darüber getroffen werden, bei welchem Konzept aufgrund der

Ergänzende Indikatoren (optional)	Bewertungsgröße	Erwartbare Rückschlüsse bei Hinzunahme des Indikators	Zusammenhang
Verrohrungsma- terial (wenn Anpassun- gen aufgrund von Rückholbarkeit)	Mengenangabe	Langzeitsicher- heit	ins Endlager eingebrachten Mengen die Langzeitsicher- heit (Beitrag zu chemischen und physikalischen Prozes- sen) stärker berührt wird.
Material für Mo- nitoringinstru- mentierung (wenn Anpassun- gen aufgrund von Rückholbarkeit)	Mengenangabe		
Auslegungstem- peratur Behälter- oberfläche (wenn Anpassun- gen aufgrund von Rückholbarkeit)	°C	Je höher die Temperatur, desto schneller erfolgt der Ein- schluss der Be- hälter.	Höhere Temperaturen las- sen eine schnellere Kom- paktion des Versatzes und damit einen schnelleren Einschluss der Behälter er- warten.
Streckenausbau- ten - angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit (wenn Anpassun- gen aufgrund von Rückholbarkeit)	Mengenangabe	Kleinere Mate- rialmengen ha- ben weniger Einfluss auf die Langzeitsicher- heit	Falls gleiche Materialien vorliegen, kann hier zusätz- lich eine Aussage darüber getroffen werden, bei wel- chem Konzept aufgrund der ins Endlager eingebrachten Mengen die Langzeitsicher- heit (Beitrag zu chemischen und physikalischen Prozes- sen) stärker berührt wird.

5.2.3.2 Erläuterungen zur Anwendung des Leitkriteriums „Langzeitsicherheit“

Für die Anwendung des Leitkriteriums „Langzeitsicherheit“ sind zunächst möglichst umfassende Informationen für den anschließenden Paarvergleich zusammenzustellen. Als Hilfestellung sind die nachfolgenden Tabellen (Tab. 5-19 und Tab. 5-20) erarbeitet worden. Sie verschaffen einen Überblick über die Zusammenhänge, die Relevanz der Indikatoren sowie die Bewertungsregeln. Zusätzlich

wird zu jedem Indikator eine Texterläuterung mit Ausfüllhinweisen für die Tabel-
len gegeben.

Tab. 5-19 gibt einen Überblick über die für einen Paarvergleich benötigten Infor-
mationen und die Bewertung mit Hilfe der Indikatoren. Es werden Informationen
der beiden zu vergleichenden Konzepte (Endlager A und Endlager B), eine Zuord-
nung der Ausprägung der Indikatoren für das jeweilige Endlager (größer, kleiner
oder gleich) und einer Bewertung benötigt, bei welchem Endlager der Indikator
zum Aufwand günstiger ausgeprägt ist (letzte Spalte).

Tab. 5-19: Informationssammlung und Anwendung des Leitkriteriums „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“

Nr.	Indikator	Bewer- tungs- größe	Informa- tionen Endla- ger A	Informa- tionen Endla- ger B	Ver- gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je- weils günsti- gere Aus- prägung
1	Verlängerung von Einlagerungsstrecken wg. Rückholbarkeit	ja / nein				
2	Schächte für Rückholbarkeit	Anzahl				
3	Rampen für Rückholbarkeit	Anzahl				
4	Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit	Anzahl				
5	Behälteranzahl angepasst wg. Rückholoption	ja / nein				
6	Verrohrungen wg. Rückholbarkeit	ja / nein				
7	Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit	ja / nein				

Nr.	Indikator	Bewertungsgröße	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je weils günstigere Ausprägung
8	Rückholstrategie	Re-Mining / selektive Rückholung				
9	Auslegungstemperatur der Behälteroberfläche angepasst wg. Rückholbarkeit	ja / nein				
10	Streckenausbauten - angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit	ja / nein				

Tab. 5-20 detailliertere Darstellung. Tab. 5-20 enthält neben den Indikatoren aus dem Leitkriterium auch die möglichen alternativen Indikatoren (Tab. 5-17) sowie Ergänzungsmöglichkeiten (siehe Tab. 5-18). Die jeweiligen heranzuziehenden Bewertungsgrößen wurden in die Spalte „Indikator“ eingefügt. Die vorletzte Spalte („Bewertung“) enthält die dem jeweiligen Indikator zugrunde gelegte Bewertungsregel in Kurzform. Ausführlich ist dies in den Ausfüllhinweisen und Erläuterungen für die Nutzung der Tabelle im Anschluss an die Tabelle nachzulesen.

Tab. 5-20: Detaillierte Tabelle zur Informationssammlung und Bewertung des jeweiligen Aufwands einer Rückholung anhand des Leitkriteriums Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver gleich A, B (<, >, =)	Bewertung	Ver gleich A, B: Günstigere Ausprägung
A) DURCHÖRTERUNG	1	Verlängerung von Einlagerungsstrecken wg. Rückholbarkeit [ja / nein]			nein = günstiger	
	1a	Ergänzungsmöglichkeit: Verlängerung der Einlagerungsstrecken wg. Rückholung [m]			kürzer = günstiger	

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver- gleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Ver- gleich A, B: Güns- tigere Ausprä- gung
B) BARRIERENBEINFLUSSUNG	1b Behälteranzahl (Alternative zu 1a): ➤ kleinere Anzahl => <u>kürzere</u> Strecke ➤ größere Anzahl => <u>längere</u> Strecke				s. Nr. 1a	
	1c Behälterabstände (Alternative zu 1a): ➤ kleinere Abstände => <u>kürzere</u> Strecke ➤ größere Abstände => <u>längere</u> Strecke				s. Nr. 1a	
	2 Schächte für Rückholbarkeit [Anzahl]				kleiner = günstiger	
	3 Rampen für Rückholbarkeit [Anzahl]				kleiner = günstiger	
	4 Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit [Anzahl]				kleiner = günstiger	
	5 Behälteranzahl angepasst wg. Rückholoption [ja / nein]				nein = günstiger	
	5a Ergänzungsmöglichkeit: Behälteranzahl* [Anzahl]				kleiner = günstiger	
	5b Ergänzungsmöglichkeit: Behältermaterial [Mengenangabe]				kleiner = günstiger	
	6 Verrohrungen wg. Rückholbarkeit [ja / nein]				nein = günstiger	
	6a Ergänzungsmöglichkeit: Verrohrungsmaterial [Mengenangabe]				kleiner = günstiger	
C) SCHNELLEREINSCHLIESSUNG	7 Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit [ja / nein]				nein = günstiger	
	7a Ergänzungsmöglichkeit: Material für Monitoringinstrumentierung [Mengenangabe]				kleiner = günstiger	
C) SCHNELLEREINSCHLIESSUNG	8 Rückholstrategie [Re-Mining / selektive Rückholung]				Re-Mining = günstiger	
	9 Auslegungstemperatur der Behälteroberfläche angepasst wg. Rückholbarkeit [ja / nein]				nein = günstiger	
	9a Ergänzungsmöglichkeit: Auslegungstemperatur Behälteroberfläche*				höher = günstiger	

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Güns- tigere Ausprä- gung
	[°C]					
10	Streckenausbauten - angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit [ja / nein]				nein = günstiger	
10a	<i>Ergänzungsmöglichkeit: Streckenausbauten - angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit [Mengenangabe]</i>				kleiner = günstiger	

Allgemeine Hinweise:

- 1. Zur Verwendung von alternativen Indikatoren siehe auch Tab. 5-17.**
- 2. Alternative Indikatoren sind nur heranzuziehen, wenn keine Informationen zum Indikator des Leitkriteriums verfügbar sind.**
- 3. Zur Verwendung von ergänzenden Indikatoren siehe auch Tab. 5-18.**

Ausfüllhinweise und Erläuterungen für die Nutzung der Tab. 5-20:

A) Durchörterung

Indikator Nr. 1: Verlängerung von Einlagerungsstrecken wegen Rückholbarkeit

Führt die Rückholbarkeit (Erhöhung von Behälteranzahl und Behälterabständen für Temperaturoptimierung bei einer Rückholung) dazu, dass die Einlagerungsstrecken verlängert werden, leistet dies einen zusätzlichen Beitrag zur Durchörterung.

Bewertung hinsichtlich der Durchörterung des Wirtsgesteins aufgrund der Rückholoption:

- nein = günstiger
- ja = weniger günstig

1a – Ergänzungsmöglichkeit: Verlängerte Gesamtstrecke der Einlagerungsstrecken wegen Rückholung (siehe Tab. 5-18)

Hinweis: Dieser Indikator ist nur sinnvoll beim Vergleich von Konzepten in Steinsalz.

Gesamtlänge der Einlagerungsstrecken; Je länger die Gesamtlänge ist, desto stärker ist die Durchörterung des Wirtsgesteins für die eingelagerten Behälter.

Bewertung hinsichtlich der Durchörterung des Wirtsgesteins:

- kürzer = günstiger
- länger = weniger günstig

1b – Alternative zu 1a: Angabe der Behälteranzahl (siehe Tab. 5-17)

Bei höheren Behälterzahlen sind längere Einlagerungsstrecken erwartbar.

Rückschluss auf die Gesamtlänge der Einlagerungsstrecken:

- Niedrigere Behälteranzahl => kürzere Streckenlängen erwartbar
- Höhere Behälteranzahl => längere Streckenlängen erwartbar

1c – Alternative zu 1a: Angabe der Behälterabstände (siehe Tab. 5-17)

Bei Endlagern in Steinsalz kann es zur Implementierung der Rückholoption notwendig sein, die Behälterabstände für Temperaturoptimierungen anzupassen. Größere Abstände führen dabei zu einer stärkeren Durchörterung des Wirtsgesteins. Größere Behälterabständen lassen längere Einlagerungsstrecken erwarten.

Rückschluss auf die Gesamtlänge der Einlagerungsstrecken:

- Kleinere Behälterabstände => kürzere Strecken erwartbar
- Größere Behälterabstände => längere Strecken erwartbar

Indikator Nr. 2: Anzahl der Schächte für Rückholbarkeit

Die Anzahl an Schächten kann als Indikator für die Durchörterung aufgrund der Rückholbarkeit dienen, wenn Schächte bereits während der Errichtung für eine optionale Rückholung aufgefahren werden.

Bewertung hinsichtlich der Durchörterung des Wirtsgesteins aufgrund der Rückholoption:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

Indikator Nr. 3: Anzahl der Rampen

Die Anzahl an Rampen kann als Indikator für die Durchörterung aufgrund der Rückholbarkeit dienen, wenn Rampen bereits während der Errichtung für eine optionale Rückholung aufgefahren werden.

Bewertung hinsichtlich der Durchörterung des Wirtsgesteins aufgrund der Rückholoption:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

Indikator Nr. 4: Menge an Monitoring-Instrumentierung des Wirtsgesteins wegen Rückholbarkeit

Die Menge an Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins aufgrund der Rückholbarkeit kann als Indikator für die Durchörterung dienen, wenn diese bereits während der Errichtung für eine optionale Rückholung implementiert werden. Je mehr Instrumentierung, desto mehr Durchörterung aufgrund dieser ist erwartbar.

Ausfüllhinweis: Wenn keine Anzahl verfügbar ist, sondern nur die Aussage, dass Instrumentierung vorliegt oder nicht, wird „0“ bei fehlender Instrumentierung und „> 0“ bei Instrumentierung als Wert eingesetzt.

Bewertung hinsichtlich der Durchörterung des Wirtsgesteins aufgrund der Rückholoption:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

B) Barrierenerhalt

Indikator Nr. 5: Behälteranzahl angepasst wegen Rückholbarkeit

Die Behälteranzahl wirkt sich auf die Materialmenge aus, die im Endlager verbleibt. Führt die Rückholbarkeit zu Erhöhungen der Behälteranzahl, ist erwartbar, dass sich die Behältermaterialmengen im Endlager erhöhen und gegebenenfalls über chemische und physikalische Prozesse einen negativen Beitrag auf den Erhalt von Barrieren (beispielsweise durch Behälterkorrosion) haben.

Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf Barrieren:

- nein = günstiger

- ja = weniger günstig

5a – Ergänzungsmöglichkeit: Behälteranzahl

Hinweis: Dieser Indikator ist nur sinnvoll beim Vergleich von Konzepten in Steinsalz

Es ist erwartbar, dass mit ansteigender Behälteranzahl (für Temperaturoptimierungen bei einer Rückholung) die ins Endlager eingebrachten Materialmengen zunehmen. Diese können zu chemisch-physikalischen Prozessen im Endlager und zu Barriereförderungen (beispielsweise Behälterkorrosion) beitragen.

Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf Barrieren:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

5b – Ergänzungsmöglichkeit: Menge an Behältermaterial (siehe Tab. 5-18)

Hinweis: Dieser Indikator ist nur sinnvoll beim Vergleich von Konzepten in Steinsalz.

Es ist erwartbar, dass mit ansteigender Behälteranzahl (für Temperaturoptimierungen bei einer Rückholung) die ins Endlager eingebrachten Materialmengen zunehmen. Größere Materialmengen lassen größeren Einfluss auf Barrieren über chemische und physikalische Prozesse erwarten.

Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf Barrieren:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

Indikator Nr. 6: Verrohrungen wegen Rückholbarkeit

Verrohrungen bedeuten, dass entsprechende Materialmengen ins Endlager eingebracht werden. Ins Endlager eingebrachte Materialmengen können zu chemisch-physikalischen Prozessen im Endlager und zu Barriereförderungen beitragen.

Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf Barrieren:

- nein = günstiger

- ja = weniger günstig

6a – Ergänzungsmöglichkeit: Menge an Verrohrungsmaterial (siehe Tab. 5-18)

Je mehr Material eingebracht wird, desto größer ist der zu erwartende Beitrag. Kleinere Materialmengen lassen weniger Einfluss auf Barrieren über chemische und physikalische Prozesse erwarten.

Bewertung in Bezug auf Auswirkungen auf Barrieren:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

Indikator Nr. 7: Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wegen Rückholbarkeit

Insendlager eingebrachte Materialmengen für Monitoring, können zu chemisch-physikalischen Prozessen im Endlager und zu Barriereschädigungen beitragen.

Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf Barrieren:

- nein = günstiger
- ja = weniger günstig

7a – Ergänzungsmöglichkeit: Monitoringmaterial (siehe Tab. 5-18)

Kleinere Materialmengen lassen weniger Einfluss auf Barrieren über chemische und physikalische Prozesse erwarten.

Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf Barrieren:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

Indikator Nr. 8: Rückholstrategie

Bei der Rückholstrategie „selektive Rückholung“ wird das Endlager nach einer Teilrückholung von Behältern weiter betrieben. Bei dieser Strategie kann es gegebenenfalls zur Beeinflussung von Barrieren kommen.

Bewertung hinsichtlich der Auswirkungen auf Barrieren:

- Re-Mining = günstiger
- Selektive Rückholung = weniger günstig

C) Schneller Einschluss

Indikator Nr. 9: Auslegungstemperatur der Behälteroberfläche angepasst wegen Rückholbarkeit

Führt die Rückholbarkeit zu Anpassungen der Auslegungstemperaturen der Behälteroberflächen (i. S. von Temperaturerniedrigungen), leistet dies einen weniger günstigen Beitrag hinsichtlich des schnellen Einschlusses der Behälter.

Bewertung hinsichtlich eines schnellen Einschlusses:

- nein = günstiger
- ja = weniger günstig

9a – Ergänzungsmöglichkeit: Auslegungstemperatur Behälteroberfläche (siehe Tab. 5-18)

Hinweis: Dieser Indikator ist nur sinnvoll beim Vergleich von Konzepten in Steinsalz.

Höhere Temperaturen lassen eine schnellere Kompaktion des Versatzes und damit einen schnelleren Einschluss der Behälter erwarten.

Bewertung hinsichtlich eines schnellen Einschlusses:

- höher = günstiger
- niedriger = weniger günstig

Indikator Nr. 10: Streckenausbauten - angepasste Materialien wegen Rückholbarkeit

Im Endlager verbleibende Ausbauten können unter Umständen dem schnellen und sicheren Einschluss der Endlagerbehälter entgegenstehen. Erfolgen keine Anpassungen von im Endlager verbleibenden Ausbauten, ist dies günstiger in dem Sinne, dass dann kein negativer Beitrag hinsichtlich des schnellen Einschlusses aufgrund der Rückholoption zu erwarten ist.

Bewertung hinsichtlich eines schnellen Einschlusses:

- nein = günstiger
- ja = weniger günstig

10a – Ergänzungsmöglichkeit: Menge an Streckenausbauten - angepasste Materialien wegen Rückholbarkeit (siehe Tab. 5-18)

Hinweis: Dieser Indikator ist nur sinnvoll beim Vergleich von Konzepten in Tongestein.

Je mehr Ausbaumaterial verwendet wird, desto größer ist der erwartbare Einfluss auf den schnellen Einschluss.

Bewertung hinsichtlich eines schnellen Einschlusses:

- kleiner = günstiger
- größer = weniger günstig

5.3 Beispielhafte Anwendung

In diesem Kapitel erfolgt eine beispielhafte Anwendung der entwickelten Methode.

Für die Testanwendungen des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“ (Beispiel 1: Kapitel 5.3.1 und Beispiel 2: Kapitel 5.3.2), des Leitkriteriums „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“ (Beispiel 2: Kapitel 5.3.2) und des Leitkriteriums „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“ (Beispiel 3: Kapitel 5.3.3) werden Endlagerbeispiele ausgewählt, anhand derer

- die grundsätzliche Anwendung der Methode getestet wird,

- getestet wird, welche Ergebnisse und Aussagen abgeleitet werden können, wenn sehr unterschiedliche Details (Informationstiefen) zu den zu vergleichenden Konzepten vorliegen (Testanwendung 2),
- einmal der Vergleich von Endlagern im gleichen Wirtsgestein (Testanwendung 1 für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“) und
- einmal ein Vergleich für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen mit unterschiedlichem Einlagerungskonzept (Testanwendung 2 für die Leitkriterien „Aufwand bei Rückholung“, „Technikverfügbarkeit bei Rückholung und „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“) erfolgt.

5.3.1 Beispiel 1 – Testanwendung für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“

In diesem Beispiel werden Informationen zu den HAW Endlagerprojekten der Schweiz und von Frankreich (Informationsquelle: Faß et al.) verwendet (Faß et al. 2017). Die Testanwendung erfolgt für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“.

Endlager A: Wirtsgestein Opalinuston (Schweiz), horizontale Streckenlagerung

Endlager B: Wirtsgestein Tongestein (Frankreich), horizontale Bohrlochlagerung

Tab. 5-21: Informationssammlung für Beispiel 1 (Endlager A, Endlager B)

	Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Ver- gleich A, B: Je- weils günsti- gere Ausprä- gung
AUFWAND BEI AUFFAHRUNGEN	1	Aufzufahrende Streckenlänge [m]	27 Lagerstollen, Länge 800m (ge- samt: 21.600 m)	Länge pro Einla- gerungsstrecke 80 – 100 m keine Angabe zur Anzahl der Einlagerungs- strecken	keine Info	kürzer = günsti- ger	siehe 1a und 1b ⇒ A
	1a	Wirtsgestein (Al- ternative): ➤ Steinsalz => <u>kürzere</u> Strecke ➤ Tongestein => längere Strecke ➤ Kristallinge- stein => mittlere Strecke	Tongestein	Tongestein	A = B (bzgl. zu er- wartender aufzufah- render Strecken- länge)	s. Nr. 1	A = B
	1b	Endlager Ausle- gungstemperatur (Alternative):	140 °C	90 °C	A < B (bzgl. zu er- wartender	s. Nr. 1	A

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Ver- gleich A, B: Je- weils günsti- gere Ausprä- gung
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ höher => <u>kürzere</u> Strecke ➤ niedriger => längere Strecke 			aufzufah- render Strecken- länge)		
1c	Behälteranzahl (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>kürzere</u> Strecke ➤ höher => längere Strecke 	keine Info	keine Info	keine Info	s. Nr. 1	keine Info
1d	Behälterab- stände (Alten- tive): <ul style="list-style-type: none"> ➤ kleiner => <u>kürzere</u> Strecke ➤ größer => längere Strecke 	keine Info	keine Info	keine Info	s. Nr. 1	keine Info
2	Verfestigungs- grad von Streckenverfüllungen [niedrig / hoch]	keine Info	keine Info	keine Info	niedri- ger = günsti- ger	siehe 2a ⇒ B
2a	Endlager Ausle- gungstemperatur [°C] (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>niedrigere</u> Verfestigung ➤ höher => hö- here Verfestigung 	max. 140 °C	max. 90 °C	A > B (bzgl. zu er- wartender Verfesti- gung von Strecken- verfüllung)	s. Nr. 2	B
2b	Temperatur zu Beginn der Rück- holung °C] [(Al- ternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>niedrigere</u> Verfestigung ➤ höher => hö- here Verfesti- gung 	Ca. 38 °C im Endlagerberg- werk aufgrund des geothermi- schen Gradien- ten	keine Info	keine Info	s. Nr. 2	keine Info
3	Neuauffahrungen von Strecken [m]	keine Info	keine Info	keine Info	kürzer = günsti- ger	keine Info
3a	Ergänzungsmög- lichkeit: <i>Härte des Gesteins</i>	entfällt aufgrund fehlender Infor- mationen zu Indikator 3	entfällt aufgrund fehlender Infor- mationen zu Indikator 3	entfällt	weicher = günsti- ger	entfällt
4	Verbliebene Streckenausbau- ten [ja / nein]	keine Info	keine Info	keine Info	nein = günsti- ger	keine Info

	Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Ver- gleich A, B: Je- weils günsti- gere Ausprä- gung
	4a	Ergänzungsmög- lichkeit: Überschneidbar- keit verbliebener Streckenausbau- ten	entfällt aufgrund fehlender Infor- mationen zu In- dikator 4	entfällt aufgrund fehlender Infor- mationen zu In- dikator 4	entfällt	ja = günsti- ger	entfällt
AUFWAND FÜR OFFENHALTUNG	5	Häufigkeit von Streckennach- schnitten [Anzahl]	keine Info	keine Info	keine Info	kleiner = günsti- ger	siehe 5a ⇒ A = B
	5a	Wirtsgestein (Al- ternative): ➤ Ton-, Kris- tallingestein => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ Steinsalz => größere An- zahl	Tongestein	Tongestein	A = B (bzgl. zu er- wartender Häufigkeit von Strecken- nach- schnitten)	s. Nr. 5	A = B
	5b	Ergänzungsmög- lichkeit: Nachzuschnei- dende Strecken- länge [m]	entfällt aufgrund fehlender Infor- mationen zu In- dikator 5	entfällt aufgrund fehlender Infor- mationen zu In- dikator 5	entfällt	kürzer = günsti- ger	entfällt
	6	Auszubauende Streckenlänge [m]	keine Info aber siehe Nr. 1 für Strecken- länge	keine Info aber siehe Nr. 1 für Strecken- länge	keine Info	kürzer = günsti- ger	siehe Nr. 1 ⇒ A
	6a	Wirtsgestein (Al- ternative): ➤ Steinsalz => <u>kürzere</u> Strecke ➤ Tongestein => längere Strecke	Tongestein	Tongestein	A = B (bzgl. zu er- wartender auszubau- ender Strecken- längen)	s. Nr. 6	A = B
	7	Streckenlänge für Implementie- rung von Bewet- terung [m]	keine Info, aber siehe Nr. 1 für Strecken- länge	keine Info, aber siehe Nr. 1 für Strecken- länge	keine Info	kürzer = günsti- ger	siehe Nr. 1 ⇒ A
AUFWAND FÜR BEWETTERUNG / KÜHLUNG	8	Implementierung von Kühlaggrega- ten [Anzahl]	Anzahl: 0	keine Info	keine Info	kleiner = günsti- ger	keine Info
	8a	Differenz zwi- schen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (Al- ternative): ➤ niedriger => <u>kleinere An-</u> zahl ➤ höher => größere An- zahl	keine Info	keine Info	keine Info	s. Nr. 8	keine Info

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Ver- gleich A, B: Je- weils günsti- gere Ausprä- gung
AUFWAND FÜR BEHÄLTERFREILEGUNG, -AUFNAHME, -TRANSPORT	9 Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur [Zeitangabe]	keine Info	keine Info	keine Info	kürzer = günstiger	keine Info
	9a Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (Alternative): ➤ niedriger => <u>kürzere Zeit</u> ➤ höher => längere Zeit	keine Info	keine Info	keine Info	s. Nr. 9	keine Info
	9b Temperatur zu Beginn einer Rückholung (Alternative): ➤ niedriger => <u>kürzere Zeit</u> ➤ höher => längere Zeit	keine Info	keine Info	keine Info	s. Nr. 9	keine Info
	10 Behälteranzahl [Anzahl]	keine Info	keine Info	keine Info	kleiner = günstiger	siehe Nr. 10b ⇒ A
	10a Endlager-Auslegungstemperatur (Alternative): ➤ höher => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ niedriger => größere Anzahl	(max. 140 °C) Alternative 10a entfällt wg. unterschiedlicher Abfallvolumina	(max. 90 °C) Alternative 10a entfällt wg. unterschiedlicher Abfallvolumina	entfällt	s. Nr. 10	entfällt
	10b Abfallvolumen (Alternative): ➤ kleiner => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ größer => größere Anzahl	ca. 400 m³ ver-glaste Abfälle ca. 9.000 m³ BE	10.000 m³ HAW 75.000 m³ MAW	A < B	s. Nr. 10	A
AUFWAND FÜR BEHÄLTERFREILEGUNG, -AUFNAHME, -TRANSPORT	11 Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen [Anzahl]	Anzahl: 0	Anzahl: 0	A = B	kleiner = günstiger	A = B
	11a Einlagerungskonzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlagerung => kleinere Anzahl ➤ Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl	horizontale Streckenlage-rung	horizontale Bohrlochlage-rung	entfällt	s. Nr. 11	entfällt

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Ver- gleich A, B: Je- weils günsti- gere Ausprä- gung
12	Einzurichtende Bohrlochschleusen [Anzahl]	keine Info	keine Info	keine Info	kleiner = günstiger	keine Info
12a	Einlagerungskonzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlagerung => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl	entfällt aufgrund abweichender Einlagerungskonzepte (keine vertikale Bohrlochlagerung)	entfällt aufgrund abweichender Einlagerungskonzepte (keine vertikale Bohrlochlagerung)	entfällt	s. Nr. 12	entfällt
13	Nutzung von Overpacks [Anzahl]	Anzahl: > 0	Anzahl: > 0	A < B	kleiner = günstiger	siehe Nr. 10b ⇒ A
13a	Einlagerungskonzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlagerung => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl	Entfällt, da Information bei Indikator 13 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 13 vorliegt	entfällt	s. Nr. 13	entfällt

Für die Ergebnisauswertung, werden in folgender Kurztabelle (Tab. 5-22) die Spalten mit der Informationssammlung zum Endlager A und zum Endlager B ausgegraut. Zu jedem Indikator wird im Anschluss an die Tabelle erläutert, welche Informationen zum Endlager A und welche zum Endlager B in die Bewertung eingeflossen sind. Dies ist sinnvoll für die Nachvollziehbarkeit, insbesondere wenn alternative Indikatoren verwendet werden.

Tab. 5-22: Kurztabelle – Testanwendung für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“

Nr.	Indikator	Bewer-tungs-größe	Informati-onen End-lager A	Informati-onen End-lager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je-weils günsti-gere Aus-prägung
1	Aufzufahrende Streckenlänge	m				A
2	Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen	niedrig / hoch				B
3	Neuauffahrungen von Strecken	m				entfällt
4	Verbliebene Streckenausbauten	ja / nein				entfällt
5	Häufigkeit von Streckennachschnitten	Anzahl				A = B
6	Auszubauende Streckenlänge	m				A = B
7	Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung	m				A
8	Implementierung von Kühl aggregaten	Anzahl				entfällt
9	Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur	Zeitangabe				entfällt
10	Behälteranzahl	Anzahl				A
11	Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen	Anzahl				A = B
12	Ein zurichtende Bohrlochschleusen	Anzahl				entfällt

Nr.	Indikator	Bewer-tungs-größe	Informati-onen End-lager A	Informati-onen End-lager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je-weils günsti-gere Aus-prägung
13	Nutzung von Over-packs	Anzahl				A

Erläuterungen:

1. Für die Bewertung wurde die Alternative 1b (Endlager-Auslegungstemperatur) herangezogen
2. Für die Bewertung wurde die Alternative 2a (Endlager-Auslegungstemperatur) herangezogen
3. Keine Informationen zu Neuauffahrungen, damit entfällt auch die Ergänzungsmöglichkeit um die Härte des Gesteins
4. Keine Informationen zum Verbleib von Streckenausbauten, damit entfällt auch die Ergänzungsmöglichkeit um die Überschneidbarkeit
5. Für die Bewertung wurde die Alternative 5a (Wirtsgestein) herangezogen
6. Für die Bewertung wurde die Alternative 6a (Wirtsgestein) herangezogen
7. Keine direkte Info. Hier wird für die Bewertung auf die Nr. 1 zurückgegriffen, bzw. 1b, die dort als Alternative herangezogen wurde
8. Keine Informationen zu Kühlaggregaten und auch keine zur Alternative 8a (Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn einer Rückholung)
9. Keine Informationen zu Abkühlzeiten und auch nicht zur Alternative 9a (Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn einer Rückholung)
10. Für die Bewertung wurde die Alternative 10b (Abfallvolumen) herangezogen
11. Beide Konzepte sehen keine Verrohrungsverfüllung vor
12. Keine Informationen zu Bohrlochschleusen: die Alternative 12a entfällt aufgrund abweichender aufgeführter Einlagerungskonzepte (horizontale Bohrlochlagerung)

13. Beide Konzepte sehen „Overpacks“ vor: für die Anzahl muss indirekt auf die Angabe zur Behälteranzahl zurückgegriffen werden, die hier von der Alternative 10b (Abfallvolumen) hergeleitet wurde

Auswertung:

In die vergleichende Bewertung des zu erwartenden Aufwands bei einer Rückholung sind vorwiegend die Informationen (direkte und indirekte) zur Streckenlänge und zur Behälteranzahl sowie die Endlager-Auslegungstemperatur eingeflossen. Weitere Informationen konnten den Datenquellen nicht entnommen werden. Ein Vergleich anhand dieser Informationen führt zu folgenden Ergebnissen:

Aufwand bei Auffahrung (Indikatoren Nr. 1 – 4):

- Endlager A ist günstiger hinsichtlich aufzufahrender Streckenlängen.
- Endlager B ist günstiger hinsichtlich des Verfestigungsgrades von Streckenverfüllungen.

Aufwand für Offenhaltung (Indikatoren Nr. 5 und 6):

- Beide Endlager sind gleich günstig bzw. ungünstig.

Aufwand für Bewetterung / Kühlung (Indikatoren Nr. 7 – 9):

- Endlager A ist günstiger bezüglich der Streckenlängen zur Implementierung von Bewetterung

Aufwand für Behälterfreilegungen, -aufnahme, -transport u. T. (Indikatoren Nr. 10 – 13):

- Endlager A ist günstiger aufgrund der erwartbaren Behälterzahl
- Endlager A ist günstiger bezüglich der Anzahl zu nutzender Overpacks

Insgesamt ließe sich aufgrund der Temperaturen, der Streckenlängen und der Behälteranzahl beim Endlager A (in diesem Beispiel die Schweiz) ein geringerer Aufwand bei einer Rückholung erwarten als beim Endlager B (in diesem Beispiel Frankreich).

Tab. 5-23 zeigt komprimiert die Indikatoren an, die in den Vergleich eingegangen sind und für die Endlagerbeispiele A und B unterschiedlich günstig ausfallen. Für diese Indikatoren kann eine Differenz des Aufwands bei einer Rückholung gezeigt werden.

Tab. 5-23: Komprimierte Ergebnisdarstellung der Testanwendung Beispiel 1 für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“

Indikatoren für Aufwand bei Rückholung	Konzept A ist günstiger	Konzept B ist günstiger
Aufzufahrende Streckenlänge	x	
Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen		x
Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung	x	
Behälteranzahl	x	
Nutzung von Overpacks	x	

5.3.2 Beispiel 2 – Testanwendung für die Leitkriterien „Aufwand bei Rückholung“ und „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“

Für die Testanwendung anhand der Endlagerbeispiele in „Beispiel 2“ werden Informationen für zwei fiktive Endlager zusammengestellt und anhand der Leitkriterien verglichen. Die ausgewählten Angaben zu den Endlagern orientieren sich an den allgemein erwartbaren Zusammenhängen (siehe auch Kap. 5.1) zwischen Wirtsgestein, Einlagerungskonzept und Auslegungen, für a) ein Endlager in Steinsalz und b) ein Endlager in Kristallingestein. Getestet wird anhand dieses Beispiels, ob die Methodik auf zwei Endlager in verschiedenen Wirtsgesteinen anwendbar ist und wie Ergebnisse und Aussagen aussehen, wenn mehr Informationen (geeignete Indikatoren der Leitkriterien) als in der Testanwendung 1 für den Vergleich herangezogen werden können.

Endlager A: Generisches Endlager in Steinsalz bei horizontaler Streckenlagerung der Behälter

Annahmen: Einlagerung ohne Verrohrung, Einsatz von Kühlaggregaten bei Rückholung, modifizierte Einlagerungstechnik (Unikat) für Behälteraufnahme, Behälteranzahl 1.000, Strecken u. T. 50 km (f. Rückholung und Bewetterung), Re-Mining, Temperatur bei Rückholungsbeginn 150 °C

Endlager B: Generisches Endlager in Kristallingestein bei vertikaler Bohrlochlagerung der Behälter

Annahmen: Behälterzahl 2.000, mit Verrohrung und Verrohrungsverfüllung, Menge an Verrohrung 100 Mt, keine Kühlaggregate bei Rückholung, Streckenlängen: 100 km (für Rückholung und Bewetterung), Temperatur bei Rückholungsbeginn: 100 °C

Testanwendung für das Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“

Tab. 5-24: Informationssammlung für Beispiel 2 (Endlager A und Endlager B)

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Je- weils günsti- gere Aus- prägung
AUFWAND BEI AUFFAHRUNGEN	1	Aufzufahrende Streckenlänge [m]	50 km	100 km	A < B	kürzer = günstiger
	1a	Wirtsgestein (Alternative): ➤ Steinsalz => <u>kürzere Strecke</u> ➤ Tongestein => längere Strecke ➤ Kristallingestein => mittlere Strecke	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt (Steinsalz)	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt (Kristallingestein)	entfällt	s. Nr. 1
	1b	Endlager Auslegungstemperatur (Alternative): ➤ höher => <u>kürzere Strecke</u> ➤ niedriger => längere Strecke	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	entfällt	s. Nr. 1
	1c	Behälteranzahl (Alternative): ➤ niedriger => <u>kürzere Strecke</u> ➤ höher => längere Strecke	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt (1.000)	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt (2.000)	entfällt	s. Nr. 1
	1d	Behälterabstände (Alternative): ➤ kleiner => <u>kürzere Strecke</u> ➤ größer => längere Strecke	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	entfällt	s. Nr. 1
	2	Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen [niedrig / hoch]	niedrig	niedrig	A = B	niedriger = günstiger
	2a	Endlager Auslegungstemperatur (Alternative): ➤ niedriger => <u>niedrigere Verfestigung</u>	Entfällt, da Information bei Indikator 2 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 2 vorliegt	entfällt	s. Nr. 2
						entfällt

Nr.	Indikator	Informations Endlager A	Informations Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Je- weils günsti- gere Aus- prägung
AUFWAND FÜR OFFENHALTUNG	➤ höher => höhere Verfestigung					
	2b Temperatur Beginn Rückholung [°C] (Alternative): ➤ niedriger => <u>niedrigere</u> Verfestigung ➤ höher => höhere Verfestigung	Entfällt, da Information bei Indikator 2 vorliegt (150 °C)	Entfällt, da Information bei Indikator 2 vorliegt (100 °C)	entfällt	s. Nr. 2	entfällt
	3 Neuauffahrungen von Strecken [m]	0	0	A = B	kürzer = günstiger	A = B
	3a Ergänzungsmöglichkeit: Härte des Gesteins	Entfällt, da Information bei Indikator 3 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 3 vorliegt	entfällt	weicher = günstiger	entfällt
	4 Verbliebene Streckenausbauten [ja / nein]	nein	nein	A = B	nein = günstiger	A = B
	4a Ergänzungsmöglichkeit: Überschneidbarkeit verbliebener Streckenausbauten	Entfällt, da keine Streckenausbauten im Endlager verbleiben	Entfällt, da keine Streckenausbauten im Endlager verbleiben	entfällt	ja = günstiger	entfällt
	5 Häufigkeit von Streckennachschnitten [Anzahl]	2	0	A > B	kleiner = günstiger	B
	5a Wirtsgestein (Alternative): ➤ Ton-, Kristallgestein => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ Steinsalz => <u>größere Anzahl</u>	Entfällt, da Information bei Indikator 5 vorliegt (Steinsalz)	Entfällt, da Information bei Indikator 5 vorliegt (Kristallinge-stein)	entfällt	s. Nr. 5	entfällt
	5b Ergänzungsmöglichkeit: Nachzuschneidende Streckenlänge [m]	Entfällt, nur sinnvolle Ergänzung, wenn bei beiden zu vergleichenden Endlagern Streckennachschnitte erfolgen (30.000)	Entfällt, nur sinnvolle Ergänzung, wenn bei beiden zu vergleichenden Endlagern Streckennachschnitte erfolgen (0)	entfällt	kürzer = günstiger	entfällt
	6 Auszubauende Streckenlänge [m]	0	0	A = B	kürzer = günstiger	A = B
	6a Wirtsgestein (Alternative):	Entfällt, da Information bei Indikator 6 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 6 vorliegt	entfällt	s. Nr. 6	entfällt

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Je- weils günsti- gere Aus- prägung
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Steinsalz => <u>kürzere</u> Strecke ➤ Tongestein => längere Strecke 	(Steinsalz)	(Kristallingestein)			
AUFWAND FÜR BEWETTERUNG / KÜHLUNG	7	Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung [m]	30.000	60.000	A < B	kürzer = günstiger
	8	Implementierung von Kühlaggrenzen [Anzahl]	2	0	A > B	kleiner = günstiger
	8a	Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ höher => <u>größere</u> Anzahl 	Entfällt, da Information bei Indikator 8 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 8 vorliegt	entfällt	s. Nr. 8
	9	Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur [Zeitangabe]	4 Wochen	0 Wochen	A > B	kürzer = günstiger
	9a	Differenz zwischen Ist- und Soll-Temperatur zu Beginn der Rückholung (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>kürzere</u> Zeit ➤ höher => längere Zeit 	Entfällt, da Information bei Indikator 9 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 9 vorliegt	entfällt	s. Nr. 9
	9b	Temperatur zu Beginn einer Rückholung (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ niedriger => <u>kürzere</u> Zeit ➤ höher => längere Zeit 	Entfällt, da Information bei Indikator 9 vorliegt (150 °C)	Entfällt, da Information bei Indikator 9 vorliegt (100 °C)	entfällt	s. Nr. 9
AUFWAND FÜR BEHÄLTERFREI- LICHTUNG	10	Behälteranzahl [Anzahl]	1.000	2.000	A < B	kleiner = günstiger
	10a	Endlager Auslegungstemperatur (Alternative): <ul style="list-style-type: none"> ➤ höher => <u>kleinere</u> Anzahl ➤ niedriger => <u>größere</u> Anzahl 	Entfällt, da Information bei Indikator 10 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 10 vorliegt	entfällt	s. Nr. 10

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer-tung	Vergleich A, B: Je- weils günsti- gere Aus- prägung
10b	Abfallvolumen (Alternative): ➤ kleiner => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ größer => größere Anzahl	Entfällt, da Information bei Indikator 10 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 10 vorliegt	entfällt	s. Nr. 10	entfällt
11	Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen [Anzahl]	0	2.000	A < B	kleiner = günstiger	A
11a	Einlagerungskonzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlagerung => kleinere Anzahl ➤ Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl	Entfällt, da Information bei Indikator 11 vorliegt (horizontale Streckenlagerung)	Entfällt, da Information bei Indikator 11 vorliegt (vertikale Bohrlochlagerung)	entfällt	s. Nr. 11	entfällt
12	Einzurichtende Bohrlochschleusen [Anzahl]	0	2.000	A < B	kleiner = günstiger	A
12a	Einlagerungskonzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlagerung => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl	Entfällt, da Information bei Indikator 12 vorliegt (horizontale Streckenlagerung)	Entfällt, da Information bei Indikator 12 vorliegt (vertikale Bohrlochlagerung)	entfällt	s. Nr. 12	entfällt
13	Nutzung von Overpacks [Anzahl]	0	2.000	A < B	kleiner = günstiger	A
13a	Einlagerungskonzept (Alternative): ➤ Horizontale Streckenlagerung => <u>kleinere Anzahl</u> ➤ Vertikale Bohrlochlagerung => größere Anzahl	Entfällt, da Information bei Indikator 13 vorliegt (horizontale Streckenlagerung)	Entfällt, da Information bei Indikator 13 vorliegt (vertikale Bohrlochlagerung)	entfällt	s. Nr. 13	entfällt

Anhand der folgenden Kurztabelle (Tab. 5-25) erfolgt die Auswertung für die Testanwendung 2. Erläuterungen zum Eingang der Informationen aus der Informationssammlung in Tab. 5-24 finden sich im Anschluss an die unten stehende Tabelle.

Tab. 5-25: Kurztabelle – Anwendung des Leitkriteriums „Aufwand bei Rückholung“

Nr.	Indikator	Bewer-tungs-größe	Informati-onen Endlager A	Informati-onen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je-weils günsti-gere Aus-prägung
1	Aufzufahrende Streckenlänge	m				A
2	Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen	niedrig / hoch				A = B
3	Neuauffahrungen von Strecken	m				A = B
4	Verbliebene Streckenausbauten	ja / nein				A = B
5	Häufigkeit von Streckennachschnitten	Anzahl				B
6	Auszubauende Streckenlänge	m				A = B
7	Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung	m				A
8	Implementierung von Kühlaggregaten	Anzahl				B
9	Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur	Zeitangabe				B
10	Behälteranzahl	Anzahl				A

Nr.	Indikator	Bewer-tungsgröße	Informati-onen Endlager A	Informati-onen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Je-weils günsti-gere Aus-prägung
11	Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen	Anzahl				A
12	Einzurichtende Bohrlochschleusen	Anzahl				A
13	Nutzung von Overpacks	Anzahl				A

Erläuterungen:

Nr. 1 bis 13: Es war nicht erforderlich, alternative Indikatoren zu verwenden. Die Verwendung weiterer ergänzender Faktoren waren für das Beispiel nicht sinnvoll.

Auswertung:

Aufwand bei Auffahrung (Indikatoren Nr. 1 – 4):

- A ist günstiger hinsichtlich des Aufwands bei Auffahrungen aufgrund der aufzufahrenden Streckenlängen. Aufwand aufgrund von Verfestigungsgrad von Streckenverfüllungen, Neuauffahrungen und verbliebenen Streckenausbauten wirken sich nicht günstiger oder ungünstiger im Paarvergleich von A und B aus.

Aufwand für Offenhaltung (Indikatoren Nr. 5 und 6):

- B ist günstiger hinsichtlich des Aufwands für Offenhaltung aufgrund der geringeren Häufigkeit von Streckennachschnitten.

Aufwand für Bewetterung / Kühlung (Indikatoren Nr. 7 – 9):

- A hat den geringeren Aufwand bei der Implementierung von Bewetterung hinsichtlich der zu bewetternden Streckenlängen.
- B ist günstiger hinsichtlich der Implementierung von Kühlaggregaten und Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperaturen.

Aufwand für Behälterfreilegungen, -aufnahme, -transport u. T. (Indikatoren Nr. 10 – 13):

- A ist günstiger in Bezug auf den Aufwand für Behälterfreilegungen, -aufnahme und -Transport aufgrund der Behälteranzahl bei B und der zu entfernenden Verrohrungsverfüllungen, einzurichtenden Bohrlochschleusen und der Nutzung von Overpacks.

Tab. 5-26: Ergebnisdarstellung von Beispiel 2 „Aufwand bei Rückholung“

Indikatoren für Aufwand bei Rückholung	Konzept A ist günstiger	Konzept B ist günstiger
Aufzufahrende Streckenlänge	x	
Häufigkeit von Streckennachschnitten		x
Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung	x	
Implementierung von Kühlaggregaten		x
Abkühlzeiten zur Erreichung der Soll-Temperatur		x
Behälteranzahl	x	
Zu entfernende Verrohrungsverfüllungen	x	
Einzurichtende Bohrlochschleusen	x	
Nutzung von Overpacks	x	

Testanwendung für das Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“

Für diese Testanwendung wird der Arbeitsschritt „Behälteraufnahme“ beispielhaft herangezogen.

Tab. 5-27: Testanwendung für das Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Vergleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Je- weils günsti- gere Aus- prägung
1	Für die Rückholung modifizierte technische Komponenten [Anzahl]	Anzahl: 1	Anzahl: 0	A > B	kleiner = günstiger	B
2	Nur für die Rückholung entwickelte technische Komponenten [Anzahl]	Anzahl: 1	Anzahl: 0	A > B	kleiner = günstiger	B
3	Redundanz der Komponenten [Anzahl]	Anzahl: 0	Anzahl: 0	A = B	größer = günstiger	A = B
4	Marktverfügbarkeit [ja / nein]	nein	nein	A = B	ja = günstiger	A = B

Auswertung:

Aufgrund der günstigeren Ausprägungen hinsichtlich der Anzahl für die Rückholung modifizierter technischer Komponenten und eigens für die Rückholung entwickelter technischer Komponenten ist in diesem Beispiel für das Endlager B eine höhere Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung zu erwarten als beim Endlager A. Somit wäre das Endlager B in Bezug auf dieses Leitkriterium das günstigere Endlager.

5.3.3 Beispiel 3 – Testanwendung für das Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“

In der Testanwendung 3 für das Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“ werden die Informationen der Testanwendung 2 (siehe Kapitel 5.3.2) entnommen. Dort sind für zwei fiktive Endlager (Endlager A und Endlager B) Informationen zu Endlagerauslegungen aufgeführt. Um mehr Informationen für das Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“ nutzen zu können, werden diese Beispiele um weitere Annahmen ergänzt.

Endlager A: Generisches Endlager in Steinsalz bei horizontaler Streckenlagerung der Behälter

Annahmen: Einlagerung ohne Verrohrung, Einsatz von Kühlaggregaten bei Rückholung, modifizierte Einlagerungstechnik (Unikat) für Behälteraufnahme, Behälteranzahl 1.000, Strecken u. T.: 50 km (f. Rückholung und Bewetterung), Re-Mining, Temperatur bei Rückholungsbeginn: 150 °C

Ergänzende Annahmen für Testanwendung 3:

Die Behälteranzahl und die Behälterabstände wurden hinsichtlich der Temperatur in einem optionalen Rückholzeitraum optimiert (Verlängerung von Einlagerungsstrecken um insgesamt 1.000 m wegen Rückholbarkeit), ebenso wurden die Behälteroberflächentemperaturen für den Zeitpunkt einer optionalen Rückholung optimiert.

Endlager B: Generisches Endlager in Kristallingestein bei vertikaler Bohrlochlagerung der Behälter

Annahmen: Behälterzahl: 2.000, mit Verrohrung und Verrohrungsverfüllung, Menge an Verrohrung: 100 Mt, keine Kühlaggregate bei Rückholung, Streckenlängen: 100 km (für Rückholung und Bewetterung), Temperatur bei Rückholungsbeginn: 100 °C

Ergänzende Annahmen für Testanwendung 3:

Verrohrungen werden nicht aufgrund der Rückholoption im Endlager implementiert. Die Streckenführung für die Einlagerungsstrecken wurde für eine optionale Rückholung angepasst und in Teilen verlängert (insgesamt um 100 m). Eine Instrumentierung für Monitoring (als Entscheidungshilfe für eine Rückholung) wurde implementiert. Planung einer selektiven Rückholung.

Tab. 5-28: Informationssammlung für Beispiel 3 (Endlager A, Endlager B)

	Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Bewer-tung	Vergleich A, B: Günsti-gere Aus-prägung
A) DURCHÖRTERUNG	1	Verlängerung von Einlagerungsstrecken wg. Rückholbarkeit [ja / nein]	ja	ja	A = B	nein = günstiger	A = B
	1a	Ergänzungsmöglichkeit: Verlängerung der Einlagerungsstrecken wg. Rückholung [m]	1.000	100	A > B	kürzer = günstiger	B

Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver- gleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Günsti- gere Aus- prägung
B) BARRIERENBEEINFLUSSUNG	1b Behälteranzahl (Alternative zu 1a): ➤ kleinere Anzahl => <u>kürzere Strecke</u> ➤ größere Anzahl => <u>längere Strecke</u>	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	entfällt	s. Nr. 1a	entfällt
	1c Behälterabstände (Alternative zu 1a): ➤ kleinere Abstände => <u>kürzere Strecke</u> ➤ größere Abstände => <u>längere Strecke</u>	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	Entfällt, da Information bei Indikator 1 vorliegt	entfällt	s. Nr. 1a	entfällt
	2 Schächte für Rückholbarkeit [Anzahl]	0	0	A = B	kleiner = günstiger	A = B
	3 Rampen für Rückholbarkeit [Anzahl]	0	0	A = B	kleiner = günstiger	A = B
	4 Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit [Anzahl]	0	> 0	A < B	kleiner = günstiger	A
	5 Behälteranzahl angepasst wg. Rückholoption [ja / nein]	ja	nein	./.	nein = günstiger	B
	5a Ergänzungsmöglichkeit: Behälteranzahl [Anzahl]	Entfällt, da nicht bei beiden Endlager Anpassungen der Behälteranzahl	Entfällt, da nicht bei beiden Endlager Anpassungen der Behälteranzahl	entfällt	kleiner = günstiger	entfällt
	5b Ergänzungsmöglichkeit: Behältermaterial* [Mengenangabe]	entfällt, da nicht bei beiden Endlager Anpassungen der Behälteranzahl	entfällt, da nicht bei beiden Endlager Anpassungen der Behälteranzahl	entfällt	kleiner = günstiger	entfällt
	6 Verrohrungen wg. Rückholbarkeit [ja / nein]	nein	nein	A = B	nein = günstiger	A = B
	6a Ergänzungsmöglichkeit: Verrohrungsmaterial [Mengenangabe]	entfällt, da keine Verrohrungen aufgrund der Rückholbarkeit	entfällt, da keine Verrohrungen aufgrund der Rückholbarkeit	entfällt	kleiner = günstiger	entfällt
	7 Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit [ja / nein]	nein	ja	./.	nein = günstiger	A
	7a Ergänzungsmöglichkeit: Material für Monitoringinstrumentierung [Mengenangabe]	entfällt, da nicht bei beiden Endlager Monitoringinstrumentierung	entfällt, da nicht bei beiden Endlager Monitoringinstrumentierung	entfällt	kleiner = günstiger	entfällt

	Nr.	Indikator	Informationen Endlager A	Informationen Endlager B	Ver- gleich A, B (<, >, =)	Bewer- tung	Vergleich A, B: Günsti- gere Aus- prägung
	8	Rückholstrategie [Re-Mining / selektive Rückholung]	Re-Mining	Selektive Rückholung	./.	Re-Mining = günstiger	A
C) SCHNELLER EINSCHLUSS	9	Auslegungstemperatur der Behälteroberfläche angepasst wg. Rückholbarkeit [ja / nein]	ja	nein	./.	nein = günstiger	B
	9a	Ergänzungsmöglichkeit: Auslegungstemperatur Behälteroberfläche [°C]	entfällt, da nicht bei beiden Endlagern Anpassungen der Behälteroberflächentemperatur wg. Rückholbarkeit	entfällt, da nicht bei beiden Endlagern Anpassungen der Behälteroberflächentemperatur wg. Rückholbarkeit	entfällt	höher = günstiger	entfällt
	10	Streckenausbauten - angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit [ja / nein]	nein	nein	A = B	nein = günstiger	A = B
	10a	Ergänzungsmöglichkeit: Streckenausbauten - Angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit [Mengenangabe]	entfällt, da bei beiden Endlagern keine Anpassungen der Streckenausbauten wg. Rückholbarkeit	entfällt, da bei beiden Endlagern keine Anpassungen der Streckenausbauten wg. Rückholbarkeit	entfällt	kleiner = günstiger	entfällt

Anhand der folgenden Kurztabelle (Tab. 5-29) erfolgt die Auswertung für die Testanwendung 3. Erläuterungen zum Eingang der Informationen aus der Informationssammlung in Tab. 5-28 finden sich im Anschluss an die unten stehende Tabelle.

Tab. 5-29: Kurztabelle – Anwendung des Leitkriteriums „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“

Nr.	Indikator	Bewer- tungs- größe	Informa- tionen Endlager A	Informa- tionen Endlager B	Ver- gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Jeweils günsti- gere Ausprä- gung (Kurzbegrün- dung)
1	Verlängerung von Einlagerungsstrecken wg. Rückholbarkeit	ja / nein				A = B (Verlängerung von Einlagerungsstrecken wg. Rückholbarkeit bei A u. B)

Nr.	Indikator	Bewer-tungsgröße	Informa-tionen Endlager A	Informa-tionen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Jeweils günsti-gere Ausprä-gung (Kurzbegrün-dung)
1b	Verlängerung der Einlagerungsstrecken wg. Rückholung	m				B (Verlängerung wg. Rückholbarkeit bei A länger)
2	Schächte für Rückholbarkeit	Anzahl				A = B (keine Schächte wg. Rückholbarkeit)
3	Rampen für Rückholbarkeit	Anzahl				A = B (keine Rampen wg. Rückholbarkeit)
4	Monitoring Instrumentierung des Wirtschaftsteins wg. Rückholbarkeit	Anzahl				A (Monitoring wg. Rückholbarkeit bei B)
5	Behälteranzahl angepasst wg. Rückholoption	ja / nein				B (Anpassungen wg. Rückholbarkeit bei A)
6	Verrohrungen wg. Rückholbarkeit	ja / nein				A = B (keine Verrohrungen bei A u. B)
7	Monitoring Instrumentierung des Wirtschaftsteins wg. Rückholbarkeit	ja / nein				A (Monitoring wg. Rückholbarkeit bei B)
8	Rückholstrategie	Re-Mining / selektive Rückholung				A (Re-Mining bei A günstiger)
9	Auslegungstemperatur der Behälteroberfläche angepasst wg. Rückholbarkeit	ja / nein				B (Anpassung bei A wg. Rückholbarkeit)
10	Streckenausbau-ten – angepasste	ja / nein				A = B

Nr.	Indikator	Bewer-tungsgröße	Informa-tionen Endlager A	Informa-tionen Endlager B	Ver-gleich A, B (<, >, =)	Vergleich A, B: Jeweils günsti-gere Ausprä-gung (Kurzbegrün-dung)
	Materialien wg. Rückholbarkeit					(keine Anpas-sungen bei A u. B)

Erläuterungen:

Der Indikator 1 konnte sinnvoll um den Indikator 1a ergänzt werden und damit die Aussage zur Durchörterung aufgrund der Rückholbarkeit festigen.

Weitere alternative und ergänzende Indikatoren konnten in diesem Beispiel nicht sinnvoll verwendet werden.

Auswertung:

In dieser Testanwendung gibt es einige Indikatoren, bei denen das Beispiel Endlager A eher ungünstige Beiträge zur Langzeitsicherheit hat und einige Indikatoren bei denen das Beispiel-Endlager B eher ungünstige Beiträge zur Langzeitsicherheit hat.

Kriterium „Durchörterung“ (Indikatoren Nr. 1 – 4):

- Endlager A und Endlager B haben beide verlängerte Einlagerungsstrecken aufgrund der Rückholbarkeit; aber Endlager B leistet einen geringen Beitrag zur Durchörterung des Wirtsgesteins aufgrund für die Rückholbarkeit verlängerter Einlagerungsstrecken (somit ist es günstiger bezüglich des Einflusses der Rückholbarkeit auf die Durchörterung).
- Hinsichtlich einer Instrumentierung für Monitoring ist das Beispiel Endlager A günstiger. Es leistet für diesen Aspekt keinen zusätzlichen Beitrag zur Durchörterung des Wirtsgesteins aufgrund von Monitoring-Instrumentierung wegen Rückholbarkeit.
- Zusätzliche Schächte oder Rampen aufgrund der Rückholbarkeit sind weder bei Endlager A noch bei Endlager B vorgesehen. Für diesen Aspekt erfolgt weder bei A noch bei B ein zusätzlicher Beitrag zur Durchörterung.

Kriterium „Barrierenerhalt“ (Indikatoren Nr. 5 – 8):

- Beim Endlagerbeispiel A werden aufgrund der Rückholbarkeit Anpassungen der Behälteranzahl vorgenommen. Dadurch werden die Materialmengen, die im Endlager verbleiben vergrößert. Die Rückholbarkeit führt somit im Endlager gegebenenfalls zu einem negativen Beitrag hinsichtlich des Einflusses auf die Barrieren. Endlagerbeispiel B ist hinsichtlich der Behälteranzahl günstiger in Bezug auf den Einfluss auf Barrieren.
- Weder im Beispiel A noch im Beispiel B sind Verrohrungen aufgrund der Rückholbarkeit vorgesehen. Hier erfolgt kein Einfluss auf die Barrieren.
- Hinsichtlich einer Instrumentierung für Monitoring ist das Beispiel-Endlager A günstiger. Es leistet für diesen Aspekt keinen zusätzlichen Beitrag zur Barriereneinflussung.
- Endlagerbeispiel A ist hinsichtlich der Rückholstrategie günstiger in Bezug auf die Barrieren, weil beim Re-Mining das Endlager nach Abschluss einer Rückholung verworfen wird.

Kriterium „Schneller Einschluss“ (Indikatoren Nr. 9 – 10):

- Hinsichtlich des schnellen Einschlusses, der als günstig für die Langzeitsicherheit gewertet wird, ist das Endlagerbeispiel B günstiger als das Endlagerbeispiel A, weil bei A Anpassungen der Temperaturen der Behälteroberflächen erfolgen. Die Temperaturen sind aufgrund der Rückholbarkeit niedriger, was sich bei einem Endlager im Steinsalz negativ auf den angestrebten schnellen Einschluss auswirkt.

Tab. 5-30: Ergebnisdarstellung der Testanwendung 3

Indikatoren für Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit	Konzept A ist günstiger	Konzept B ist günstiger
Verlängerung der Einlagerungsstrecken wg. Rückholung		X
Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit	X	
Behälteranzahl angepasst wg. Rückholoption		X
Monitoring Instrumentierung des Wirtsgesteins wg. Rückholbarkeit	X	

Indikatoren für Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit	Konzept A ist günstiger	Konzept B ist günstiger
Rückholstrategie	X	
Auslegungstemperatur der Behälteroberfläche angepasst wg. Rückholbarkeit		X

5.4 Möglichkeiten und Grenzen vergleichender Aussagen zu Rückholkonzepten anhand der im Vorhaben BeRK entwickelten Methode

Es wurde ein Bewertungsansatz mit Berücksichtigung der vielfältigen Zusammenhänge zwischen Endlagerkonzepten (beziehungsweise Endlagerauslegungen), und die Rückholbarkeit und die Durchführung einer Rückholung gewählt. Die Komplexität, die sich aus Rückholbarkeit und der Endlagerauslegung ergibt, wurde so weit wie möglich aufgelöst und auf Kriterien und Indikatoren heruntergebrochen. Anhand dieser konnte der jeweilige Beitrag zu den Leitkriterien für Aufwand, Technikverfügbarkeit und Langzeitsicherheit als günstiger oder weniger günstig bestimmt werden. Es wurde darauf verzichtet, Bewertungsgruppen (zum Beispiel günstig, mittel oder ungünstig) zu bilden, da dies eine Genauigkeit der Bewertungsaussagen suggerieren würden, die nicht gegeben ist.

Eine Wichtung der Leitkriterien sowie der Kriterien und Indikatoren der jeweiligen Leitkriterien wurde nicht vorgenommen. Für eine systematische Wichtung der Indikatoren bräuchte es differenzierte und vertiefte ingenieurtechnische Kenntnisse, um gegebenenfalls die jeweiligen Auswirkungen messbar zu machen und ins Verhältnis zueinander zu setzen. Das war im Vorhaben BeRK weder beabsichtigt, noch leistbar. Dementsprechend kann anhand der erarbeiteten Methodik beispielsweise nicht pauschal abgewogen werden ob eine größere Durchörterung im Kristallingestein aufgrund der Implementierung der Rückholbarkeit (Anpassungen der Einlagerungsstrecken bereits in der Errichtungs- und Einlagerungsphase für eine optionale Rückholung) günstiger oder weniger günstig als eine Temperaturbegrenzung im Steinsalz (mit Folgen für die Länge der Einlagerungsstrecken und die Durchörterung aber auch für den schnellen Einschluss) ist. Die Methodik soll jedoch eine geeignete Grundlage bilden, auf der aufgebaut werden kann, um solche Wichtungen begründet zu entwickeln.

Häufig liegen zu Endlager- und Rückholkonzepten für einen Vergleich nicht dieselben Informationen vor und die Kenntnisse der zu vergleichenden Maßnahmen und Konzepte weisen unterschiedliche Detailtiefen auf. Es wurde eine Möglichkeit ausgearbeitet, über die Kenntnisse der Zusammenhänge von Endlagerauslegung

und Rückholbarkeit fehlende Informationen zu ersetzen, indem alternative Indikatoren ausgewiesen werden. Die Aussagen, die anhand der alternativen Indikatoren getroffen werden können, sind etwas generischer als Aussagen, die auf wenn Informationen zu den primären Indikatoren basieren. Beim Vergleich von Rückholmaßnahmen und -konzepten ist auch nicht vollständig nachvollziehbar, welche Auslegungsanpassungen „ausschließlich“ aufgrund der Rückholbarkeit erfolgen. Dennoch lassen sich einige generische Aussagen treffen. Je nach Informationstiefe zu konkreten Rückholkonzepten können detailliertere Aussagen und Bewertungen erfolgen.

Die Anwendung der Leitkriterien ermöglicht verdichtete Aussagen zu günstigeren und weniger günstigen Maßnahmen bzw. Rückholkonzepten (je nach Auswahl der Beispiele für den Paarvergleich. Sie kann aber allein nicht zu einer Gesamtbewertung der Rückholkonzepte führen, da hierfür eine Wichtung vorgenommen werden müsste.

Kurzbewertung:

- Die Leitkriterien sind erweiterbar. Damit ist die Methodik auch bei neuen Erkenntnissen (über Zusammenhänge von Einzelmaßnahmen für Rückholbarkeit und bei einer Rückholung) anwendbar.
- Die Bewertungen der Ausprägungen der Indikatoren im Paarvergleich (günstiger / ungünstiger) können bei sich weiter entwickelndem Kenntnisstand angepasst und bei Bedarf geändert werden.
- Die Leitkriterien ermöglichen wirtsgesteinsübergreifende Vergleiche für die jeweiligen Indikatoren.
- Eine Wichtung der Leitkriterien und der Indikatoren könnte von einem Anwender, je nach Zielrichtung der Bewertung begründet vorgenommen werden.
- Es sind Vergleiche von Konzepten insbesondere auf generischer Ebene möglich.
- Die Testanwendungen liefern Anhaltspunkte, welche Informationen für die Vergleiche von Rückholkonzepten benötigt werden, um gezielte Aussagen, zum Beispiel zum Aufwand für die Offenhaltung der Strecken bei einer Rückholung, zu erhalten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Rückholung endgelagerter Abfälle ist nicht das Ziel der Endlagerung. Sie ist eine Möglichkeit, bei Bedarf getroffene Entscheidungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zu revidieren. Für eine optionale Rückholung sind Anpassungen in der Endlagerauslegung notwendig. Weitere Anpassungen können zur Optimierung einer Rückholung vorgenommen werden. Es ist zu gewährleisten, dass Maßnahmen für eine Rückholung keine nachteiligen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit des Endlagers haben. Dies deckt sich im Wesentlichen mit der Anforderung aus § 13 (3) EndlSiAnfV („Maßnahmen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit dienen, dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht gefährden.“). In Deutschland wird nach StandAG die Rückholbarkeit der eingelagerten HAW-Abfälle für die Betriebsphase des Endlagers gefordert. Die EndlSiAnfV grenzt dies auf die Phase des Einlagerungsbetriebs ein und die Anforderung endet mit Beginn der Stilllegungsphase des Endlagers.

Im Forschungsvorhaben BeRK wurde eine Methode erarbeitet, die Vergleiche von Rückholkonzepten und Maßnahmen einer Rückholung in Bezug auf die Leitkriterien (Aufwand, Technikverfügbarkeit und Langzeitsicherheit für Endlager in Steinsalz, Tongestein und Kristallin) erlaubt. Die Leitkriterien ermöglichen es, Aussagen darüber zu treffen, welche Endlagerauslegungen, Endlagerkonzepte und Wirtsgesteinsspezifika

- a) günstiger oder weniger günstig in Bezug auf den Aufwand bei einer Rückholung sind,
- b) sich günstiger oder weniger günstig hinsichtlich der Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung auswirken und
- c) wo Interessen der Langzeitsicherheit stärker (ungünstiger) oder weniger stark (günstiger) berührt werden.

Die im Forschungsvorhaben BeRK entwickelte Methodik ist prinzipiell wirtsgesteinsübergreifend, einlagerungsvariantenübergreifend und rückholkonzeptübergreifend anwendbar. Das heißt, sie ist offen genug, um unterschiedlichste Endlagersysteme mit Rückholbarkeit aus Sicht der Implementierung von Rückholbarkeit und der Durchführung einer Rückholung zu analysieren und Konzepte auch dann vergleichbar zu machen, wenn Informationen in unterschiedlicher Detailtiefe vorliegen. Aufgrund der Herausforderung, auch nicht vollständig ausgereifte Konzepte und Maßnahmen vergleichbar zu machen, bewegen sich die Aussagemöglichkeiten der im Forschungsvorhaben BeRK entwickelten Methode auf einem eher generischen Niveau. Je mehr Informationen bei den Leitkriterien verwendet werden können, desto robustere Aussagen können erzielt werden.

Es wurden Kriterien entwickelt, die es ermöglichen Maßnahmen, Arbeitsschritte und Konzepte zur Implementierung der Rückholoption und für die Durchführung einer Rückholung als günstiger oder weniger günstig zu bewerten. Hierzu wurde zunächst geprüft, ob und in welcher Weise sich an den Anforderungen an Rückholbarkeit im Regelwerk, speziell an § 13 EndlSiAnfV, orientiert werden kann. § 13 EndlSiAnfV enthält Anforderungen an den Aufwand (zeitlich und technisch), die Technikverfügbarkeit und die Nichtgefährdung der Langzeitsicherheit für ein HAW-Endlager mit Rückholbarkeit. Auf Basis dieser Anforderungen wurden drei Bewertungsziele formuliert: Aufwand (zeitlicher und technischer), Technikverfügbarkeit und Langzeitsicherheit. Für diese Bewertungsziele sind Leitkriterien ausgearbeitet worden. Die Grundlage für die Bewertungsgrößen / Indikatoren der Leitkriterien bilden die Ausarbeitungen von Teilzusammenhängen. Diese Teilzusammenhänge wurden aus den komplexen Zusammenhängen von Endlagerauslegung und Rückholbarkeit herausgearbeitet (siehe Kapitel 4 und Kapitel 5.1). Der Fokus lag dabei immer auf der Rückholbarkeit und der Durchführung einer Rückholung, so dass möglichst nur solche Zusammenhänge Eingang in die Leitkriterien gefunden haben und bewertet werden, die aufgrund der Rückholbarkeit bestehen. Es war eine große Herausforderung, die komplexen Gesamtzusammenhänge einer Endlagerauslegung in Abhängigkeit von Wirtsgestein und Endlagerkonzepten in Teilzusammenhänge zu untergliedern und auf dieser Basis geeignete konkrete quantitative und qualitative Indikatoren für die Leitkriterien abzuleiten.

Folgende Zielvorstellungen wurden für die Bewertungen anhand der Indikatoren der Leitkriterien angenommen:

- Der Aufwand für eine Rückholung soll möglichst gering gehalten werden.
- Es soll eine hohe Technikverfügbarkeit bei einer Rückholung sichergestellt sein.
- Die Integration (Implementierung) der Rückholbarkeit in die Endlagerauslegung soll einen möglichst geringen Einfluss auf die Langzeitsicherheit nehmen.

Als Grundlagen für die im Vorhaben BeRK entwickelte Methode wurden zunächst regulatorische Anforderungen (siehe Kapitel 2), Endlager- und Rückholkonzepte sowie die Aufschlüsselung der komplexen generischen Zusammenhänge zwischen Endlager- und Rückholkonzept und Maßnahmen zur Implementierung der Rückholbarkeit (Planung, Bau und Einlagerung) sowie der Durchführung einer Rückholung (siehe Kapitel 1) aufbereitet. Wesentliche Zusammenhänge zwischen Endlagerkonzeption und Rückholbarkeit wurden aus Sicht von Rückholbarkeit (Implementierung der Rückholoption) und der Durchführung einer Rückholung herausgearbeitet. Darauf aufbauend erfolgte in Kapitel 1 die Erarbeitung von Leitkriterien. Die komplexen Zusammenhänge (Kapitel 4) wurden in Teilzusammenhänge (Analyse der Funktionszusammenhänge) untergliedert (siehe Kapitel 5.1). Mit Hilfe dieses Arbeitsschrittes war es möglich, bewertungsrelevante Parameter

zur Ausgestaltung der Leitkriterien zu identifizieren. Die Leitkriterien wurden im Sinne von übergeordneten Kriterien in Anlehnung an das Regelwerk, insbesondere Anforderungen aus § 13 EndlSiAnfV, entwickelt (siehe Kapitel 5.2). Für jedes Leitkriterium wurde eine detaillierte Erläuterung zur Anwendung geschrieben. Zuletzt erfolgte eine beispielhafte Anwendung der Leitkriterien (siehe Kapitel 5.3). Die Aussagekraft der Methodik wurde getestet und umfangreiche Checklisten für eine Anwendung wurden ausgearbeitet (siehe Erläuterungen zur Anwendung der Leitkriterien in den Kapiteln 5.2.1.3, 5.2.2.1 und 5.2.3.2).

Für die Anwendung der hier entwickelten Leitkriterien ist es notwendig, die jeweiligen Bewertungsbezüge darzustellen (siehe Erläuterungen für die Anwendung der Leitkriterien im Kapitel 5.2). Im Ergebnis erhält man eine Aufschlüsselung darüber, welche einzeln betrachteten Konzeptausprägungen jeweils günstiger oder ungünstiger sind. Eine begründete Wichtung dieser Ergebnisse kann dann von Seiten eines Anwenders erfolgen, je nachdem welchen Fokus er bei der Anwendung der Kriterien legt (zum Beispiel auf den Aufwand einer Rückholung oder mögliche Einflüsse auf die Langzeitsicherheit). Hierzu müssten den Leitkriterien und auch den Indikatoren innerhalb der Leitkriterien Gewichtungsfaktoren zugewiesen werden. Der § 13 der EndlSiAnfV, an dem die in Kapitel 5.2 hergeleiteten Leitkriterien orientiert sind, enthält keine Wichtung der dort aufgeführten Anforderungen an die Rückholung.

Trotz der Herausforderungen, die sich aus den komplexen Zusammenhängen zwischen Rückholbarkeit und Endlagerauslegung und den daraus folgenden Randbedingungen für eine Rückholung ergeben, ermöglicht die im Vorhaben BeRK entwickelte Methode insbesondere auch bei Vorliegen von Informationen unterschiedlicher Detailtiefen vergleichende Aussagen hinsichtlich der in den Leitkriterien formulierten Bewertungsziele. Die entwickelte Methode ist offen für Ergänzungen oder auch Anpassungen der Bewertungen, wenn sich neue Erkenntnisse bei den Funktionszusammenhängen (Teilzusammenhängen) in Zukunft ergeben sollten. In diesem Falle wäre eine Anpassung der Bewertung einzelner Indikatoren der Leitkriterien möglich. Je mehr Informationen zu Rückholkonzepten vorliegen, die miteinander verglichen werden sollen, desto verdichteter werden die Aussagemöglichkeiten.

Ausblick

Die Ausarbeitung der Teilzusammenhänge in Kapitel 5.1 ermöglicht es, über Funktionszusammenhänge weitere qualitative Indikatoren zu entwickeln um zusätzliche Maßnahmen aus Rückholkonzepten mit in die Leitkriterien aufzunehmen, falls dies für nötig erachtet wird. Ebenfalls ist denkbar, weitere übergeordnete Leitkriterien zu entwickeln und nach der gleichen Methode weitere Bewertungsziele zu definieren. Denkbare Themen, die im Vorhaben BeRk nicht verfolgt wurden, sind beispielsweise Co-Disposal, Safeguard Maßnahmen oder auch Verlängerungen der Einlagerungsphase mit Auswirkungen auf die Temperaturen zu Beginn einer Rückholung.

Ausarbeitungen bezüglich des Aufwandes für Rückholbarkeit (Kapitel 5.1.6) können als Grundlage genommen werden, um ein weiteres Leitkriterium, nämlich „Aufwand zur Implementierung von Rückholbarkeit“, zu entwickeln. Dies ist im Vorhaben BeRK nicht erfolgt, da dies keine Anforderung in der EndlSiAnfV darstellt, die als Orientierung für die Auswahl der Leitkriterien diente. Mit einem solchen zusätzlichen Leitkriterium könnte die Grundlage für eine Deltabestimmung zwischen dem Aufwand zur Implementierung der Rückholbarkeit und der Optimierung einer Rückholung in der Einlagerungsphase und Aufwand in der Rückholungsphase vorgenommen werden. Eine solche Deltabestimmung könnte helfen, die Anforderungen in § 13 EndlSiAnfV bezüglich des Aufwands zu konkretisieren, wenn gefordert wird, dass der zeitliche und der technische Aufwand einer Rückholung den Aufwand für eine Einlagerung nicht übersteigen darf. Hierzu würden jedoch sehr konkrete ingenieurtechnische Kenntnisse des Endlagerkonzepts und eine genaue Ausweisung der Endlagerauslegungen benötigt werden, die nur aufgrund der Rückholbarkeit erfolgen. Zum jetzigen Zeitpunkt, zu dem mögliche HAW-Endlagerkonzepte nur im Entwurf vorliegen, scheint dies nicht zielführend.

Denkbar wäre, dass in einem fortgeschrittenen Stadium der Endlager- und Rückholkonzeptentwicklung, bei entsprechender Verfügbarkeit von Informationen, jeglicher notwendige Aufwand für die Rückholbarkeit und zur Durchführung einer Rückholung im Sinne einer Kostenschätzung (Personen, Zeit, Arbeitsschritte und benötigte Technik) umgerechnet werden könnte.

Kann mit den im Vorhaben BeRK entwickelten Leitkriterien auf Basis der Regelwerksanforderungen eine ausreichende Aussage zur sicherheitstechnischen Relevanz von Rückholkonzepten getroffen werden? Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass alle Anforderungen zur Rückholbarkeit, wie sie in der EndlSiAnfV aufgeführt sind, sicherheitsrelevant sind. Gegebenenfalls könnte dennoch überlegt werden, ob es sinnvoll ist, beispielsweise neben dem Leitkriterium zum Aufwand einer Rückholung zusätzlich ein Kriterium hinsichtlich der Betriebssicherheit bei einer Rückholung auszuarbeiten und die Betriebssicherheit deutlicher in den Fokus zu rücken. Hierzu könnte geprüft werden, ob die Teilzusammenhänge insbesondere bezüglich der Temperaturen, der Hohlraumstabilisierungen oder auch der Strahlenschutzmaßnahmen für unter Tage arbeitendes Personal als eigenes Kriterium zusammengestellt werden sollten.

7 Literaturverzeichnis

Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) (2016): Position Paper on Reversibility. Châtenay-Malabry.

Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa); Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES) (2020): ENSI-Richtlinie G03, Entwurf zur externen Anhörung. Stellungnahme. Unter Mitarbeit von Thomas Flüeler, Regula Rometsch, Oliver Genoni, Joachim Heierli, Erich Müller, Kurt Nyffenegger et al. Zürich, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

Avolahti, Jaana (2012): Policy Perspective on R&R in the Finnish Context. In: Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) (Hg.): Reversibility and Retrievability in Planning for Geological Disposal of Radioactive Waste. Proceedings of the "R&R" International Conference and Dialogue 14-17 December 2019, Reims, France. Paris, France (Radioactive Waste Management, NEA No. 6993), S. 27-28.

Bertrams, Niklas; Herold, Philipp; Herold, Maxi; Krone, Jürgen; Lommerzheim, André; Prignitz, Sabine; Kuate, Eric Simo (2017): Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (KONEKD). DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC). Peine (TEC-20-2017-AB). Online verfügbar unter https://www.dbe-technology.de/fileadmin/user_upload/unterlagen/f_e_berichte/KONEKD-Projekt_Entwicklung-eines-technischen-Konzeptes-fuer-ein-generisches-Endlager-in-Kristallingestein-in-Deutschland.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2017.

Bertrams, Niklas; Herold, Philipp; Leonhard, Juliane; Marggraf, Ulla; Seidel, David; Wunderlich, Ansgar (2021): TREND. Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern. FKZ: 02 E 11749. Peine (BGE TEC Technischer Bericht, 2021-01).

Bollingerfehr, Wilhelm; Bertrams, Niklas; Buhmann, Dieter; Eickemeier, Ralf; Fahland, Sandra; Filbert, Wolfgang et al. (2018): Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Project KOSINA. Synthesis Report. FKZ: 02E11395. BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC). Peine (BGE TEC 2018-13).

Bollingerfehr, Wilhelm; Herold, Philipp; Dörr, S.; Filbert, Wolfgang (2014): Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte. Abschlussbericht. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11112. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE-TEC). Peine (TEC-21-2013-AB). Online verfügbar unter http://www.dbetec.de/fileadmin/user_upload/unterlagen/f_e_berichte/ASTERIX-Projekt_Auswirkungen-der-Sicherheitsanforderung-Rueckholbarkeit-auf-existierende-Einlagerungskonzepte-und-Anforderungen-an-neue-Konzepte.pdf, zuletzt geprüft am 12.01.2017.

Bracke, Guido; Hartwig-Thurat, Eva; Larue, Jürgen; Meleshyn, Artur; Weyand, Torben (2019): Untersuchungen zu den "maximalen physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Vorhaben 4717E03241. Hg. v. Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS). Salzgitter (Ressortforschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BfE-RESFOR-003/19). Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/Shared-Docs/Downloads/BfE/DE/fachinfo/fa/forschungsprojekt_grenztemperatur.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 04.01.2020.

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2019): Asse - Optionenvergleich - Bewertungskriterien - Machbarkeitstudien. Online verfügbar unter <https://archiv.bge.de/archiv/www.asse.bund.de/Asse/DE/themen/was-wird/stilllegungskonzept/optionenvergleich/bewertungskriterien.html>, zuletzt aktualisiert am 15.01.2019, zuletzt geprüft am 18.06.2019.

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (2022): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Peine. Online verfügbar unter https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Konzept_zur_Durchfuehrung_der_rvSU_barrierefrei.pdf.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (09.06.1983): Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV). KlimaBergV. In: BGBl. I 1983, S. 685.

Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (2018): Kernenergiegesetz (KEG), vom 01.01.2018 (732.1). Online verfügbar unter <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20010233/>, zuletzt geprüft am 06.07.2018.

DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC) (2016): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. (FEHRA). Peine (Material für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58). Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/418822/16d9b92575be1e111dcf8bf1641a50d7/kmat_58-data.pdf, zuletzt geprüft am 27.03.2018.

Deutscher Bundestag (BT) (28.09.2023): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, StandAG. In: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz - StandAG (BGBl. I, 26).

Eckardt, Anne; Neumann, Wolfgang; Kreusch, Jürgen (2018): Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle. ENTRIA-Arbeitsbericht-12. Hg. v. Entra. Zürich, zuletzt geprüft am 28.05.2019.

Entsorgungskommission (ESK) (2022): Stellungnahme der Entsorgungskommission. Zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27 (4) des Standortauswahlgesetzes. Bonn (ESK-Stellungnahme).

Faß, Thorsten; Bracke, Guido; Hartwig-Thurat, Eva; Krischer, Angelika; Lambers, Ludger; Larue, Peter-Jürgen et al. (2017): Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtschaftssteinsformationen. Abschlussbericht, FKZ: 3616E03200. Köln (GRS-Bericht, GRS-471).

Frieling, Gerd; Fischer-Appelt, Klaus; Beuth, Thomas; Bracke, Guido (2019): MABeST - Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren. FKZ: 4718F13001. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS). Köln (GRS-A-Bericht, GRS-A-3974).

Herold, Philipp; Keller, Andreas; Leonhard, Juliane; Vargas, Paola León; Bertrams, Niklas (2021): KO-REKT. Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein. Abschlussbericht. Peine (BGE TEC 2020-28).

Herold, Philipp; Prignitz, Sabine; Simo, Eric Kuaté; Filbert, Wolfgang; Bertrams, Niklas (2018): ERNE-STA. Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen. Abschlussbericht, FKZ: 02 E 11294. BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC) (BGE TEC 2018-11). Online verfügbar unter https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/ME-DIATHEK/f_e_berichte/ERNESTA-Projekt_Entwicklung-technischer-Konzepte-zur-Rueckholung-von-Endlagerbehaeltern.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2020.

Herold, Philipp; Simo, Eric; Räuschel, Hannes; Engelhardt, Hans Joachim; te Kook, Jürgen; Pflüger, Bernd et al. (2020): Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT). BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC). Peine (BGE TEC 2020-26), zuletzt geprüft am 27.01.2022.

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2002): Abstracts. International conference on Issues and trends in radioactive waste management. Vienna, 9–13 December 2002.

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011): Disposal of Radioactive Waste. Vienna: IAEA (Specific Safety Requirements). Online verfügbar unter https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1449_web.pdf.

Jobmann, Michael; Becker, Dirk-Alexander; Hammer, Jörg; Jahn, Steffen; Lommerzheim, Andree; Müller-Hoeppe, Nina et al. (2016): Projekt CHRISTA. Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Abschlussbericht, FKZ: 02E11375A/B. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC). Peine (TEC-20-2016-AB). Online verfügbar unter https://www.dbe-technology.de/fileadmin/user_upload/unterlagen/f_e_berichte/CHRISTA-Projekt_Abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 27.03.2018.

Kindlein, Jonathan; Buhmann, Dieter; Mönig, Jörg; Spießl, Sabine; Wolf, Jens (2018): Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen. Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA (GRS-Bericht, GRS-496), zuletzt geprüft am 06.12.2018.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom) (2016): Abschlussbericht. Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Berlin (Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268). Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/blob/434430/bb37b21b8e1e7e049ace5db6b2f949b2/drs_268-data.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2019.

Lommerzheim, Andree; Förster, Bernd; Bertrams, Niklas; Buhmann, Dieter; Herold, Philipp; Leonhard, Juliane et al. (2020): Beschreibung der generischen Endlagersysteme für das Vorhaben BASEL. Ergebnisse aus dem Vorhaben BASEL. FKZ: 02E11486. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (GRS-Bericht, GRS-618), zuletzt geprüft am 08.08.2023.

Lommerzheim, Andree; Jobmann, Michael (2015): Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC). Peine (Technischer Bericht, TEC-14-2015-TB).

Meier, Markus (2002): Auswählen und bewerten. Vorlesungsskript ZPE, Version 2002, 1. Semester. ETH Zürich. Zürich, zuletzt geprüft am 14.08.2023.

Mönig, Jörg; Bertrams, Niklas; Bollingerfehr, Wilhelm; Fahland, Sandra; Frenzel, B.; Maßmann, Jobst et al. (2020): Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG. Synthese aus dem Vorhaben RESUS. ENTWURF. BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS). Online verfügbar unter https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/resus_synthesebericht_20200403.pdf, zuletzt aktualisiert am 03.04.2020, zuletzt geprüft am 04.05.2020.

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) (2021): Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Wettingen (Arbeitsbericht, NAB 21-12).

Noronha, J. (2016): Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment. Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Toronto (APM-REP-00440-0015 R001).

Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) (2012): Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste. Considerations for National Geological Disposal Programmes. Paris (NEA No. 7085). Online verfügbar unter <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2012/7085-reversibility.pdf>, zuletzt geprüft am 09.12.2016.

Pöhler, M.; Amelung, P.; Bollingerfehr, W.; Engelhardt, H. J.; Filbert, W.; Tholen, M. (2010): Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein. ERATO. Abschlussbericht; FKZ: 02 E 10286. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC). Peine (TEC-28-2008-AB). Online verfügbar unter https://www.dbe-technology.de/fileadmin/user_upload/unterlagen/f_e_berichte/ERATO-Projekt_Refenenzkonzept-fuer-ein-Endlager-fuer-radioaktive-Abfaelle-in-Tongestein.pdf, zuletzt geprüft am 08.02.2017.

Raiko, Heikki (2013): Canister Design 2012. Eurajoki (POSIVA 2012-13).

Rühaak, Wolfram (2023): Umsetzung der Vorgaben des Standortauswahlgesetz zur Grenztemperatur. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). Berlin, 2023.

The decision in principle by the Government on December 2000 concerning Posiva Oy's application for the construction of a final disposal facility for spent nuclear fuel produces in Finland. Unofficial Translation, Sept. 2001 (2001).

EndSiAnfV, vom 06.10.2020: Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle - Endlagersicherheitsanforderungsverordnung. In: BGBl. I 45, S. 2094–2103, zuletzt geprüft am 18.10.2022.

Wolf, Jens; Lommerzheim, Andree; Bertrams, Niklas; Buhmann, Dieter; Filbert, Wolfgang; Förster, Bernd et al. (2020): Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und der Langzeitsicherheit. Synthese der Ergebnisse aus dem Vorhaben BASEL. FKZ: 02E11486. Köln (GRS-Bericht, GRS-617).

Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD) (Hg.) (2014): Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels. Western European Nuclear Regulators Association (WENRA).

A Kriterienkatalog

Leitkriterium „Aufwand bei Rückholung“

Kriterium	Indikator (bewertungsrele- vante Ausprägung)	Bewertungs- größe	Bewertung	
			Günsti- ger	Weniger günstig
Aufwand bei Auffahrungen	Aufzufahrende Streckenlänge	m	kürzer	länger
	Verfestigungsgrad von Streckenverfül- lungen	niedrig / hoch	niedri- ger	höher
	Neuauffahrungen von Strecken	m	kürzer	länger
	Verbliebene Strecken- ausbauten	ja / nein	nein	ja
Aufwand für Offenhaltung	Häufigkeit von Streckennachschnitten	Anzahl	niedri- ger	höher
	Nachzuschneidende Streckenlänge	m	kürzer	länger
	Auszubauende Streckenlänge	m	kürzer	länger
Aufwand für Bewetterung / Kühlung	Streckenlänge für Implementierung von Bewetterung	m	kürzer	länger
	Implementierung von Kühlgregatten	Anzahl	kleiner	größer
	Abkühlzeit Maßnahmen zur Er- reichung der Soll- Temperatur	Zeitangabe	kürzer	länger

Kriterium	Indikator (bewertungsrele- vante Ausprägung)	Bewertungs- größe	Bewertung	
			Günsti- ger	Weniger günstig
Aufwand für Be- hälterfreilegung, - aufnahme und - transport	Behälteranzahl	Anzahl	kleiner	größer
	Zu entfernende Ver- rohrungsverfüllun- gen	Anzahl	kleiner	größer
	Einzurichtende Bohrlochschieleusen	Anzahl	kleiner	größer
	Nutzung von Overpacks	Anzahl	kleiner	größer

Leitkriterium „Technikverfügbarkeit bei Rückholung“

Indikator	Bewer- tungs- größe	Bewertung	
		günstiger	weniger günstig
Für die Rückholung modifi- zierte technische Komponen- ten	Anzahl	Kleiner	Größer
Nur für die Rückholung entwi- ckelte technische Komponen- ten	Anzahl	Kleiner	Größer
Redundanz der Komponenten	Anzahl	Größer	Kleiner
Marktverfügbarkeit	ja / nein	ja	nein

Leitkriterium „Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit“

Kriterium	Indikator (bewertungsrelevante Ausprägung)	Bewertungsgröße	Bewertung	
			Günstiger	Weniger günstig
Durchörterung	Verlängerung von Einlagerungsstrecken wg. Rückholoption	ja / nein	nein	ja
	Schächte für Rückholbarkeit	Anzahl	kleiner	größer
	Rampen für Rückholbarkeit	Anzahl	kleiner	größer
	Monitoring Instrumentierung des Wirtschaftsteins wg. Rückholbarkeit	Anzahl	kleiner	größer
Barrieren-erhalt	Behälteranzahl angepasst wg. Rückholoption	ja / nein	nein	ja
	Verrohrungen wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja
	Monitoring Instrumentierung des Wirtschaftsteins wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja
	Rückholstrategie	Re-Mining / Selektive Rückholung	Re-Mining	Selektive Rückholung
Schneller Ein-schluss	Auslegungstemperatur der Behälteroberfläche angepasst wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja
	Streckenausbauten – angepasste Materialien wg. Rückholbarkeit	ja / nein	nein	ja