



ENTRIA-Arbeitsbericht-15

Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung

Vertikalprojekt 6: Einlagerung in tiefe geologische Formationen
mit Vorkehrung zur Überwachung und Rückholbarkeit

Joachim Stahlmann
Volker Mintzlaff
R. Paola León-Vargas
Ida Epkenhans

Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig

Kontakt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann
TU Braunschweig - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-62000 - Fax: +49 531 391-62040
Mail: j.stahlmann@tu-braunschweig.de

Dipl.-Geol. Volker Mintzlaff
TU Braunschweig - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-62012 - Fax: +49 531 391-62040
Mail: v.mintzlaff@tu-braunschweig.de

Dipl.-Ing. Rocio Paola León-Vargas, M.Sc.
TU Braunschweig - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-62014 - Fax: +49 531 391-62040
Mail: r.leon-vargas@tu-braunschweig.de

Ida Epkenhans, M.Sc.
TU Braunschweig - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Beethovenstraße 51b, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-62021 - Fax: +49 531 391-62040
Mail: i.epkenhans@tu-braunschweig.de

ENTRIA ist ein in der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland neuartiges Verbundprojekt von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen, die bisher nur sporadisch kooperierten. Um seine neuen Arbeitsweisen und die Vielfalt integrierter disziplinärer Perspektiven transparent zu machen, stellen die Arbeitsberichte wichtige Zwischenergebnisse vor. Das dient einerseits der projektinternen Information, andererseits werden die Zwischenergebnisse auch der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Letzteres geschieht, um Einblicke in die ENTRIA Forschungspraxis zu gewähren und Ausgangsmaterial für spätere Veröffentlichungen offenzulegen. ENTRIA lebt vom pluralen Austausch, den diese Arbeitsberichte fördern. Die Beiträge geben die Meinung der Autorin oder des Autors wieder.

ENTRIA wird vom BMBF unter den Kennzeichen 15S9082 A bis E gefördert (Zeitraum 2013 bis 2018).

Zitierweise

Stahlmann, J.; Mintzlaff, V.; León-Vargas, R.P.; Epkenhans, I. (2018): Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung. Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe. ENTRIA-Arbeitsbericht-15. Braunschweig

ISSN (Print): 2367-3532, ISSN (Online): 2367-3540

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Vorwort

Der vorliegende Arbeitsbericht entstand im Rahmen der Zielsetzungen des Vertikalprojekts 6 „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“ der Forschungsplattform ENTRIA „Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“. In diesem Zusammenhang wurde vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) ein Monitoringkonzept auf Grundlage eines Normalszenarios entwickelt, mit welchem die Datenbasis für eine geotechnisch basierte Entscheidung für eine Rückholung der eingelagerten Abfälle oder eine Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager geschaffen werden soll.

Im ENTRIA-Arbeitsbericht-03 wurden generische Tiefenlagermodelle entwickelt und knapp auf die Problematik des Monitorings eingegangen. Der vorliegende ENTRIA-Arbeitsbericht widmet sich umfassend dem Zusammenhang zwischen der Rückholbarkeit und dem dafür erforderlichen Monitoring. Das Erfordernis eines Monitoringprogramms im Nahfeldbereich ist durch die Rückholbarkeit als Möglichkeit einer Fehlerkorrektur begründet. Messtechnik im Nahfeldbereich erfordert zusätzliche Hohlräume, die sich negativ auf die Barrieren eines Tiefenlagers, die Radionuklide zurückhalten sollen, auswirken. Dies widerspricht dem in der Endlagerung bisher geforderten Minimierungsgebot für Hohlräume. In diesem Bericht wird daher eine Minimallösung für das Monitoringprogramm für ein Normalszenario präsentiert, bei der so viel Messtechnik wie nötig, jedoch so wenig wie möglich, vorgesehen wird. Damit wird der erforderliche zusätzliche Hohlraumbedarf minimiert. Die in diesem Bericht angewendete Szenarien-Technik umfasst zu erwartenden Zustandsänderungen im zuvor definierten Tiefenlagersystem. Nach Fertigstellung eines FEP-Katalogs für die Betriebsphase könnte dann noch ein Abgleich erfolgen.

An dieser Stelle möchten wir uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das die ENTRIA Forschungsplattform finanziert hat, bedanken. Ein besonderer Dank gilt auch unseren Kolleginnen und Kollegen sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Forschungsplattform ENTRIA, die durch ihre engagierte und kompetente Mitwirkung in Diskussionen und Fachgesprächen, sowie durch Vorträge und Arbeitsberichte wertvolle Beiträge zu sicherheitstechnischen und gesellschaftspolitischen Aspekten bezüglich der Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe geliefert haben. Abschließend möchten wir uns bei Frau Dr. Anne Eckhardt für das interne Review dieses Arbeitsberichtes und ihre wertvollen Hinweise bedanken.

Braunschweig, Dezember 2018

Joachim Stahlmann
Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB-TUBS)

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	VII
SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VIII
1 EINLEITUNG	1
2 KRITERIEN FÜR EINE RÜCKHOLUNG	3
2.1 RÜCKHOLBARKEIT ALS MÖGLICHKEIT EINER FEHLERKORREKTUR.....	3
2.2 GESELLSCHAFTLICHE GRÜNDE FÜR EINE RÜCKHOLBARKEIT	3
2.2.1 <i>Zivilgesellschaft und Politik</i>	3
2.2.2 <i>Entwicklung der Technik</i>	4
2.2.3 <i>Wirtschaftliche Gründe</i>	4
2.3 GEBIRGSMCHANISCHE GRÜNDE FÜR DIE OPTION DER RÜCKHOLUNG	4
2.3.1 <i>Permeabilitätsentwicklung in der Auflockerungszone</i>	5
2.3.2 <i>Integritätsentwicklung der geologischen Barriere</i>	6
2.3.3 <i>Funktionsstüchtigkeit der Verschlussbauwerke und des Streckenversatzes</i>	6
2.3.4 <i>Entwicklung der offenstehenden Hohlräume</i>	7
2.3.5 <i>Ingenieurmodelle</i>	7
2.4 BEHÄLTERINTEGRITÄT	8
2.5 RADIOLOGISCHE GRÜNDE	8
2.6 KONSEQUENZEN EINER RÜCKHOLUNG.....	9
3 ENTWICKLUNG DER NORMALSZENARIEN	10
3.1 GRUNDLAGEN DER SZENARIENENTWICKLUNG.....	10
3.2 VORGEHEN BEI DER SZENARIO-TECHNIK	12
3.3 EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSFELDES	14
3.3.1 <i>Ausgangssituation</i>	14
3.3.2 <i>Räumlicher Betrachtungsrahmen</i>	15
3.3.3 <i>Zeitlicher Betrachtungsrahmen</i>	16
3.4 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE NORMALENTWICKLUNG DES OFFENGEHALTENEN TIEFENLAGERSYSTEMS....	16
3.4.1 <i>Geometrische Einflussfaktoren</i>	17
3.4.2 <i>Mechanische Einflussfaktoren</i>	19
3.4.3 <i>Thermische Einflussfaktoren</i>	22
3.4.4 <i>Hydraulische Einflussfaktoren</i>	23
3.4.5 <i>Chemische Einflussfaktoren</i>	24
3.4.6 <i>Radiologische Einflussfaktoren</i>	24
3.4.7 <i>Weitere Einflussfaktoren</i>	24
3.5 TRENDPROJEKTION DER EINZELNEN EINFLUSSFAKTOREN UND ERSTELLUNG VON KONSISTENZMATRIZEN	25
3.6 NORMALENTWICKLUNG DER TIEFENLAGERSYSTEME.....	25
3.6.1 <i>Normalszenario eines Tiefenlagers im Steinsalz</i>	26
3.6.2 <i>Normalszenario eines Tiefenlagers im Ton</i>	29
3.6.3 <i>Normalszenario eines Tiefenlagers im Tonstein</i>	32
3.6.4 <i>Normalszenario eines Tiefenlagers im kristallinen Hartgestein</i>	35
4 NAHFELDMONITORING ALS ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGE	37
4.1 ZIELE DES GEOTECHNISCHEN MONITORINGS	37
4.2 BEREICHE EXPONIERTER ZUSTANDSÄNDERUNGEN – BEREICHE DER MESSUNGEN.....	38

4.3	TECHNISCHE ANFORDERUNGEN UND TECHNOLOGISCHE HERAUSFORDERUNGEN – STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK	41
4.3.1	<i>Begrifflichkeit</i>	42
4.3.2	<i>Sensorauswahl</i>	42
4.3.3	<i>Erfassung von Messdaten</i>	44
4.3.4	<i>Übertragung von Messdaten</i>	47
4.4	MESSGRÖßEN UND BEURTEILUNGSPARAMETER.....	48
4.4.1	<i>Erfassbare geometrische Messgrößen</i>	48
4.4.2	<i>Erfassbare thermische Messgrößen</i>	49
4.4.3	<i>Erfassbare hydraulische Messgrößen</i>	50
4.4.4	<i>Erfassbare mechanische Messgrößen</i>	51
4.4.5	<i>Erfassbare chemische Messgrößen</i>	52
4.5	GRENZEN UND RISIKEN DES MONITORINGS	53
4.5.1	<i>Fragestellung des Monitorings</i>	53
4.5.2	<i>Quantität und Qualität der Messdaten</i>	54
4.5.3	<i>Interpretation der Messdaten</i>	54
4.5.4	<i>Konsequenzen aus dem Ausfall des Monitoringsystems und/oder Implausibilität der Daten</i>	55
4.6	TECHNISCHER ABLAUF DES MONITORINGS UND DAMIT VERBUNDENE ENTSCHEIDUNGEN	56
4.7	MINIMALLÖSUNG ALS ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGE ÜBER EINE RÜCKHOLUNG.....	58
4.7.1	<i>Minimallösung im Steinsalz</i>	59
4.7.2	<i>Minimallösung im Ton und im Tonstein</i>	60
4.7.3	<i>Minimallösung im kristallinen Hartgestein</i>	62
5	SCHLUSSWORT	64
6	LITERATURVERZEICHNIS	67
ANHANG 0	EINLEITUNG ZU DEN ANHÄNGEN	A
ANHANG 1	KONSISTENZMATRIX FÜR EIN TIEFENLAGERKONZEPT IN STEINSALZ	B
ANHANG 2	KONSISTENZMATRIX FÜR EIN TIEFENLAGERKONZEPT IN TON	C
ANHANG 3	KONSISTENZMATRIX FÜR EIN TIEFENLAGERKONZEPT IN TONSTEIN	D
ANHANG 4	KONSISTENZMATRIX FÜR EIN TIEFENLAGERKONZEPT IN KRISTALLINEM HARTGESTEIN	E
ANHANG 5	MÖGLICHKEITEN FÜR DAS NAHFELDMONITORING EINES GENERISCHEN TIEFENLAGERS	F

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1 LOKALE BRUCHERSCHEINUNGEN BEIM AUFFAHREN EINER STRECKE IM MODELLVERSUCH NACH JACOBI (1976)	5
ABBILDUNG 2-2 WIDERLAGERFUNKTIONALITÄT DES VERSCHLUSSBAUWERKS GEGENÜBER GEBIRGSDRUCK UND QUELLDRUCK AUS DEM VERSATZ	7
ABBILDUNG 3-1 SZENARIO-TRICHTER (GESCHKA UND HAMMER, R. 1990).....	11
ABBILDUNG 3-2 SINNBILDICHE DARSTELLUNG DER SZENARIENENTWICKLUNG FÜR EIN TIEFENLAGER MIT EINEM PRISMA.....	11
ABBILDUNG 3-3 DIE ACHT SCHRITTE DER SZENARIO-TECHNIK (NACH GESCHKA UND HAMMER, R. 1990, S. 319) ...	12
ABBILDUNG 3-4 DARSTELLUNG DER AUSGANGSITUATION IN DEN GENERISCHEN TIEFENLAGERN ZUR GEWÄHRLEISTUNG DER ZIELE ZUGÄNGLICHKEIT UND SCHUTZ DER HOCH RADIOAKTIVEN RESTSTOFFE AUS GEOTECHNISCHER PERSPEKTIVE	14
ABBILDUNG 3-5 GENERISCHES TIEFENLAGERMODELL MIT OPTION DER RÜCKHOLUNG (NACH STAHLMANN ET AL. 2015A, S. 27)	15
ABBILDUNG 3-6 ZEITLICHER BETRACHTUNGSRAHMEN DES MONITORINGKONZEPTS	16
ABBILDUNG 3-7 AUSWAHL EINIGER AUSGANGS- (MIT * GEKENNZEICHNET) UND EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ENTWICKLUNG DER GENERISCHEN TIEFENLAGERMODELLE	17
ABBILDUNG 4-1 BEREICHE EXPONIERTER ZUSTANDSÄNDERUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BAUPHASEN DES TIEFENLAGERPROJEKTS	39
ABBILDUNG 4-2 BEISPIEL EINER MESSKETTE (NORM DIN 1319-1)	48
ABBILDUNG 4-3 VOLLSTÄNDIGES MESSERGEBNIS (MÜHL 2017).....	55
ABBILDUNG 4-4 MONITORING IM KONTEXT ZUM ENTSCHEIDUNGSPROZESS ÜBER DIE RÜCKHOLUNG HOCH RADIOAKTIVER RESTSTOFFE	56
ABBILDUNG 4-5 FLUSSDIAGRAMM ZUM VERLAUF DES ENTSORGUNGSKONZEPTS MIT OPTION ZUR RÜCKHOLUNG UND OFFENHALTUNG	57
ABBILDUNG 4-6 BEREICHE DER MESSUNGEN IM NAHFELDBEREICH NACH DER EINLAGERUNG.....	58
ABBILDUNG 4-7 MINIMALLÖSUNG FÜR TIEFENLAGER IN STEINSALZ	59
ABBILDUNG 4-8 MINIMALLÖSUNG FÜR TIEFENLAGER IN TON UND TONSTEIN.....	60
ABBILDUNG 4-9 MINIMALLÖSUNG FÜR TIEFENLAGER IN KRISTALLINEM HARTGESTEIN	62

Tabellenverzeichnis

TABELLE 3-1 BEISPIEL EINER KONSISTENZMATRIX ZUR BESTIMMUNG VON TRENDPROJEKTIONEN.....	25
TABELLE 3-2 GEBIRGSMCHANISCHE UND -HYDRAULISCHE EIGENSCHAFTEN DER POTENTIELLEN WIRTSGESTEINE – EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE NORMALENTWICKLUNG	26
TABELLE 4-1 ORTE DER ZUSTANDSÄNDERUNGEN WÄHREND DER OFFENHALTUNGSPHASE	40
TABELLE 4-2 KRITERIEN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER SENSOREN (NACH WOLF ET AL. 2008, S. 74)	43
TABELLE 4-3 GEOMETRISCHE MESSGRÖßEN UND DEREN BEURTEILUNGSPARAMETER.....	49
TABELLE 4-4 THERMISCHE MESSGRÖßEN UND BEURTEILUNGSPARAMETER	49
TABELLE 4-5 HYDRAULISCHE MESSGRÖßEN UND BEURTEILUNGSPARAMETER.....	51
TABELLE 4-6 MECHANISCHE MESSGRÖßEN UND BEURTEILUNGSPARAMETER.....	52
TABELLE 4-7 CHEMISCHE MESSGRÖßEN UND BEURTEILUNGSPARAMETER	53
TABELLE 4-8 PARAMETER UND GRÖßENORDNUNG FÜR DIE MINIMALLÖSUNG IN STEINSALZ.....	60
TABELLE 4-9 PARAMETER UND GRÖßENORDNUNG FÜR DIE MINIMALLÖSUNG IN TON UND TONSTEIN	61
TABELLE 4-10 PARAMETER UND GRÖßENORDNUNG FÜR DIE MINIMALLÖSUNG IN KRISTALLINEM HARTGESTEIN	63

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

°C.....	Grad Celcius
AITEMIN.....	Asociacion para la Investigacion y el Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales
AkEnd.....	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
ALZ.....	Auflockerungszone
BMBF.....	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU.....	Bundesministeriums für Umwelt
d. h.....	das heisst
E.....	Siehe E-Modul
E-Modul.....	Elastizitätsmodul
ENCON.....	ENTRIA Container
ESK.....	Entsorgungskommission
Euratom.....	Europäische Kommission
ewG.....	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
f_y	Festigkeit
ggf.....	gegebenenfalls
HAW.....	hoch radioaktive Abfälle
IAEA.....	International Atomic Energy Agency
IGB.....	Institut für Grundbau und Bodenmechanik
K.....	Permeabilität
KlimaBergV.....	Klima-Bergverordnung
kPa.....	Kilopascal
LCE.....	Life-Cycle-Engineering
m.....	Meter
m/s.....	Meter pro Sekunde
m^3/h	Kubik Meter pro Stunde
mm.....	Millimeter
MPa.....	Mega Pascal
NEA.....	Nuclear Energy Agency
OECD.....	Organisation for Economic Co-operation and Development
P&T.....	Partitionierung und Transmutation
PEBS.....	Long-Term Performance of Barrier Systems
PWD.....	Porenwasserdruck
Q.....	Zufluss
s.....	siehe
T.....	Temperatur
T_{eff}	Effektive Temperatur
u.....	Porenwasserdruck
U.....	elektrische Spannung

v	<i>Wellengeschwindigkeit</i>
V	<i>Versatz</i>
VBW	<i>Verschlussbauwerk</i>
<i>vgl.</i>	<i>vergleich</i>
$v_{p/s}$	<i>seismische Geschwindigkeit</i>
w	<i>Rissbreite, Feuchtigkeit</i>
WG	<i>Wirtsgestein im Nahfeldbereich</i>
<i>z. B.</i>	<i>zum Beispiel</i>
$zw.$	<i>zwischen</i>
δ	<i>Strecke, Verschiebung</i>
ε	<i>Dehnung bzw. Stauchung</i>
σ	<i>Spannung</i>

1 Einleitung

Rückholbarkeit bedeutet in einem Tiefenlagerprojekt die Gewährleistung der Möglichkeit einer sicheren und planmäßig vorgedachten Rückholung der eingelagerten Behälter über eine begrenzte Zeit durch ein vorhandenes technisches System. In der Vergangenheit favorisierte Deutschland die Endlagerung ohne Berücksichtigung einer Rückholbarkeit (AkEnd 2002). Im Zusammenhang mit den Vorkommnissen auf der Schachtanlage Asse II haben sich die Prioritäten geändert. Die Sicherheitsanforderungen aus 2010 des damaligen Bundesministeriums für Umwelt (BMU) beinhalten die Rückholbarkeit der radioaktiven Reststoffe innerhalb eines Endlagerprojekts (BMU 2010, S. 7). Eine Endlagerung mit Reversibilität wird von der durch das StandAG initiierten Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe als bevorzugte Option empfohlen, da sie u.a. „das Lernen aus den bisherigen Prozessschritten und die Korrektur von Fehlern, etwa durch Monitoring“ ermögliche (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016, S. 33). Die International Atomic Energy Agency (IAEA) hebt hervor, dass bei der Entwicklung eines Überwachungskonzepts die Vorteile aus der Nutzung der Daten und der durch die Messung verursachten Nachteile sorgfältig abgewogen werden sollten (IAEA 2014). Dies gilt insbesondere für die Instrumentierung im Bereich geotechnischer Barrieren (Verschlussbauwerke und Streckenversatz), die ggf. zur Bildung von Fließwegen durch die Barrieren entlang von Messinstrumenten und Kabeln führen kann, wodurch das Risiko für die Migration von Radionukliden erhöht wird. Die Europäische Kommission (Euratom) fordert, dass jegliche Überwachungsmaßnahmen so zu gestalten sind, dass sie keinerlei Beeinträchtigungen der Langzeitsicherheit nach sich ziehen (Jobmann et al. 2011, S. 630). Dies wäre durch kabellose Technik zu erreichen, die jedoch noch nicht Stand der Wissenschaft und Technik ist.

In einem Tiefenlagerprojekt sollen Maßnahmen zur Sicherstellung einer Rückholbarkeit bereits von Beginn an berücksichtigt werden. Es soll die (freie) Entscheidung sowohl für eine Rückholung, als auch für die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager möglich sein. Als Grundlage für eine gebirgsmechanisch begründete Entscheidung über diese Optionen dienen Daten aus einem Monitoringprogramm. Das System Tiefenlager unterscheidet sich hinsichtlich der unterschiedlichen Wirtsgesteine stark. Aufgrund dessen ist es für jedes Tiefenlagersystem notwendig, eine eigene Entwicklung und die darauf einflussnehmenden Variablen und deren Relevanz zu bestimmen. Damit ist es möglich zu definieren, ob sich das System den Erwartungen entsprechend verhält.

Ziel des vorliegenden Arbeitsberichts ist es, den Zusammenhang zwischen dem Monitoring im Nahbereich der Reststoffe und der Entscheidung zur Rückholbarkeit aufzuzeigen. Dabei werden die Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen für die erwartete Entwicklung des Tiefenlagers auf Grundlage eines Normalszenarios für jedes generische Modell aus Stahlmann et al. (2015a) beschrieben. Darauf aufbauend wird ein Monitoringkonzept entwickelt und dafür die Messtechnik zum Monitoring des Tiefenlagers dargestellt. Ein Monitoring im Fernbereich der Reststoffe berücksichtigt die vorliegende Arbeit nicht.

Die Implementierung einer Rückholbarkeit in ein Tiefenlagerprojekt muss gut begründet sein. Kapitel 2 beschreibt daher zunächst Gründe, die zu einer Rückholung führen kön-

nen. Dabei wird sowohl auf gesellschaftliche als auch auf geomechanische und geotechnische Aspekte eingegangen. Kapitel 3 befasst sich mit der Entwicklung von Normalszenarien für alle in Stahlmann et al. (2015a) beschriebenen generischen Tiefenlagermodelle. Dazu werden nach einer kurzen Einführung in die Theorie der Szenarientwicklung und deren Ziele, der zeitliche und räumliche Rahmen, sowie die Einflussfaktoren bei der Entwicklung eines Tiefenlagers bestimmt. Es folgt die Beschreibung der Normalszenarien für die unterschiedlichen Wirtsgesteine. Darauf aufbauend wird im Kapitel 4 Monitoringkonzepte für die unterschiedlichen generischen Tiefenlagermodelle, d. h. eins je untersuchtem Wirtsgestein, dargestellt.

Die im vorliegenden Bericht vorgestellten Monitoringkonzepte können bei der konkreten Realisierung eines Tiefenlagerprojekts aufgegriffen und auf das verwendete Einlagerungskonzept angepasst und detailliert werden. Mittels der Methodik der Szenarientwicklung können auch Alternativszenarien aufgebaut und bei der Planung des Tiefenlagerprojekts berücksichtigt werden. Darüber hinaus lassen sich mit diesen Alternativszenarien qualitative Aussagen über das zusätzliche technische Risiko der Option Rückholbarkeit treffen.

2 Kriterien für eine Rückholung

2.1 Rückholbarkeit als Möglichkeit einer Fehlerkorrektur

Rückholbarkeit bedeutet, dass über einen definierten Zeitraum technische Möglichkeiten bestehen, die Behälter sicher und planmäßig aus dem Tiefenlager zurückzuholen. Dieser Zeitraum kann die Betriebsphase der Einlagerung umfassen, aber auch darüber hinausgehen. Die technischen Schwierigkeiten steigen, wenn die Handhabbarkeit der Einlagerungsbehälter nicht mehr gegeben ist. Rückholbarkeit ist die technische Folgerung aus dem Prinzip der Reversibilität, d. h. die Möglichkeit, die Einlagerung der Behälter umzukehren (Stahlmann et al. 2015a).

Die Tiefenlagerung hat hauptsächlich zwei Ziele. Zum einen soll sie eine langfristige Isolation der Radionuklide von der Biosphäre erreichen. Des Weiteren soll sie eine Überwachung und Zugänglichkeit zu den eingelagerten Reststoffen gewährleisten. Dadurch werden Entscheidungsmöglichkeiten offengehalten, die bei einer Endlagerung in diesem Umfang nicht gegeben wären.

Die generischen Modelle bei ENTRIA sehen eine Rückholbarkeit, die über die Betriebsphase hinaus gegeben sein soll, vor. Anhand dieser Modelle werden im Folgenden aus gesellschaftlicher, aus gebirgsmechanischer und aus radiologischer Sicht mögliche Gründe für eine Rückholbarkeit dargestellt.

2.2 Gesellschaftliche Gründe für eine Rückholbarkeit

Gesellschaftliche Gründe für die Implementierung einer Rückholbarkeit in ein Tiefenlagerprojekt umfassen die Bereiche Zivilgesellschaft, Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Sie werden in den folgenden Abschnitten näher betrachtet.

2.2.1 Zivilgesellschaft und Politik

Der endgültige Verschluss des Tiefenlagers wird eine soziale, politische, technische und ggf. auch wirtschaftliche Entscheidung sein. Ob die langfristigen Sicherheitsansprüche nach endgültigem Verschluss eines Tiefenlagers eingehalten werden, ist nicht abschließend geklärt. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass in Tiefenlagersystemen mit aktiver oder passiver Sicherheit immer ein Risiko verbleibt. Wegen der daraus resultierenden Unsicherheiten bedarf es Konzepte der Reversibilität und Rückholbarkeit im Tiefenlagerprojekt.

Der Standort für ein Tiefenlager ist in Deutschland noch festzulegen. Dabei kommen als Wirtsgesteine Ton/Tonstein, kristallines Hartgestein und Steinsalz in Frage. Die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ empfiehlt eine Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Reststoffe über den Einlagerungszeitraum hinaus (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016, S. 237).

Vor allem Regionalpolitik, Behörden und Zivilgesellschaft haben ein Interesse daran, Kontrolle über sicherheitsrelevante Aspekte zu haben. Die Forderung nach Transparenz bei der Entscheidungsfindung wird zudem immer bedeutender. Die Option der Rückho-

lung eröffnet die Möglichkeit, die Entscheidung zur Einlagerung hoch radioaktiver Reststoffe zurückzunehmen. Durch die, im Vergleich zu einem Endlager, zusätzliche Handlungsoption lässt sich auch die Akzeptabilität eines Tiefenlagers steigern, vorausgesetzt, die Beteiligten werden in ausreichendem Maß in diese Entscheidung eingebunden.

Entscheidet sich die Gesellschaft nach der Einlagerung gegen den Standort, erfordert dies eine Rückholung. Auch eine internationale Lösung zur Entsorgung der hoch radioaktiven Reststoffe kann eine Rückholung erforderlich machen.

2.2.2 Entwicklung der Technik

Der Begriff „Partitionierung und Transmutation“ (P&T), in Englisch Partitioning & Transmutation, ist derzeit präsent Diskussthema bei der Entsorgung von radioaktiven Reststoffen. Diese Technik ist laut der Nuclear Energy Agency (NEA) eine der Schlüsseltechnologien zur Reduzierung der Radiotoxizität und des Volumens der radioaktiven Reststoffe. Neueste Entwicklungen zeigten die Notwendigkeit der Einbettung von P&T-Strategien in fortgeschrittenen Brennstoffzyklen unter der Berücksichtigung der Entsorgung der Reststoffe und wirtschaftlicher Fragen (OECD-NEA 2017).

Die Entwicklung des Stands der Technik kann nicht vorhergesehen werden, insbesondere auch nicht jene zur Behandlung von hoch radioaktiven Reststoffen. Erreicht die P&T-Technik zukünftig den Stand der Technik, ist es denkbar, dass mit ihrer Hilfe die hoch radioaktiven Reststoffe behandelt und langlebige Radionuklide in weniger langlebige umgewandelt werden können.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass ein anderer Weg zur Verwahrung der radioaktiven Reststoffe oder ein besser geeigneter Standort gefunden werden. Verbunden mit einem Sicherheitsgewinn sind diese Möglichkeiten Gründe für die Rückholung.

2.2.3 Wirtschaftliche Gründe

Nach dem derzeitigen Stand der Technik könnten bei einem Wiedereinstieg in die Atomenergie die Brennelemente aus dem Tiefenlager wiederaufgearbeitet werden. Allerdings steht derzeit der Aufwand dafür in keinem Verhältnis zum Nutzen. Trotzdem könnte bei geänderter Rohstofflage diese Option eine Rolle spielen.

2.3 Gebirgsmechanische Gründe für die Option der Rückholung

Grundlage jedes Planungsprozesses sind die Modellvorstellungen über das mechanische, thermische, hydraulische und chemische Verhalten der einzelnen Komponenten des betrachteten Systems sowie deren Interaktionen und zeitliche Entwicklungen. Das hierauf aufbauende Ingenieurmodell des Tiefenlagers sollte die Entwicklung von der Auffahrung des Grubengebäudes, über die Einlagerung der radioaktiven Reststoffe bis hin zur Rückholung oder Überführung in ein Endlager und die Verwahrung der Grube abbilden. Die Ausführungen dieses Berichts enden mit dem Zeitpunkt der Entscheidung zur Rückholung oder Überführung in ein Endlager. Weiterhin wurden für das Ingenieurmodell ein Normalszenario entwickelt und schwerpunktmäßig die gebirgsmechanischen Aspekte untersucht.

Unter einem Normalszenario wird ein abgebildeter Zustand verstanden, der mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit auftreten kann (Hölscher und Elfgen, R. 2002, S. 25).

Das Normalszenario sollte demnach die wahrscheinlichsten Entwicklungen während des Verlaufs der Betriebsphase, der Offenhaltungsphase bis hin zur Entscheidung „Rückholung oder Endlagerung“ berücksichtigen. Zur Erfassung der Zustandsänderungen in dem Tiefenlager, d. h. der Beobachtung der Entwicklung, ist ein Monitoringprogramm erforderlich, welches die wesentlichen Zustandsänderungen erfasst. Werden hierbei Abweichungen vom Normalszenario festgestellt, kann eine unerwartete Entwicklung des Tiefenlagers vorliegen. In diesem Fall ist zu klären, ob diese Entwicklung negative Folgen hat, das Ingenieurmodell das reale Verhalten nicht ausreichend abbildet oder Fehler in der Messkette vorhanden sind. Hieraus leiten sich mögliche gebirgsmechanische Gründe ab, welche die Option der Rückholung rechtfertigen kann. Die folgenden Abschnitte thematisieren die wesentlichen Teilbereiche des Systems Tiefenlager in Hinblick auf mögliche gebirgsmechanische Gründe für eine Rückholung.

2.3.1 Permeabilitätsentwicklung in der Auflockerungszone

Unter Auflockerungszone (ALZ) wird hier der Bereich verstanden, indem infolge Dilatanz Mikrorisse entstehen. In der Felsmechanik wird hierfür auch der Begriff „plastische Zone“ verwendet. Je nach Wirtsgestein ist die ALZ unterschiedlich stark ausgeprägt. In der ALZ ist die Permeabilität aufgrund der ausgebildeten Risse höher als im ungestörten Gebirge. Sie stellt somit längs zur Einlagerungsstrecke eine bevorzugte Wegigkeit für Fluide dar. Das Durchlässigkeitsverhalten einer solchen ALZ ist von entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit von Bohrloch- bzw. Streckenverschlüssen (Wieczorek und Schwarzianeck, P. 2004, S. 1). Dieses Phänomen wird in der Abbildung 2-1 durch Bilder von Modellversuchen dargestellt.

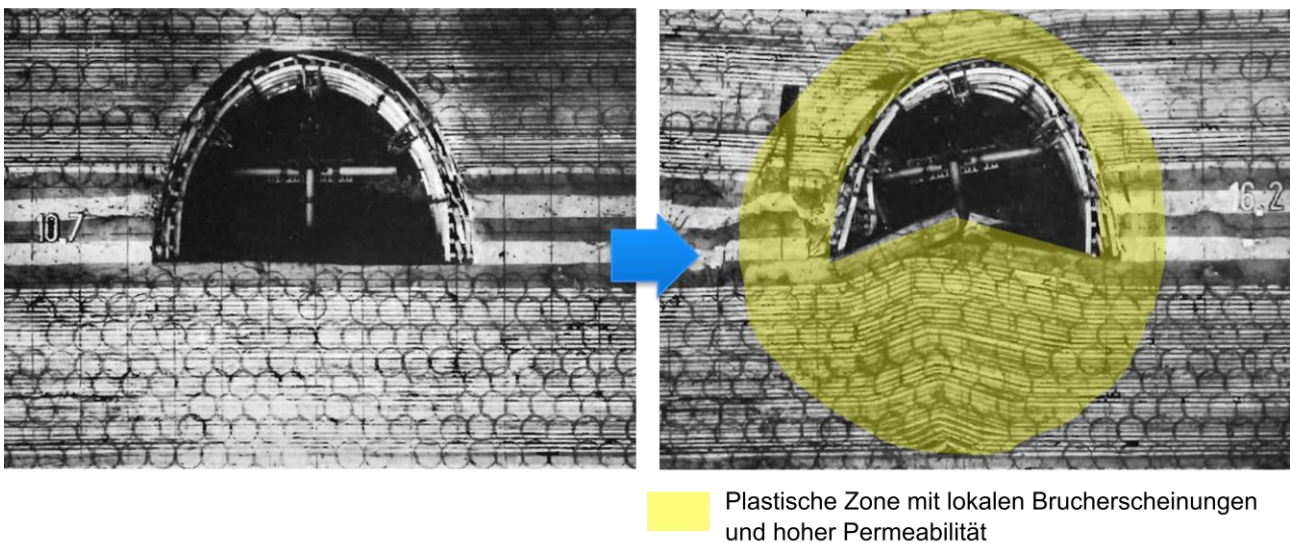


Abbildung 2-1 Lokale Brucherscheinungen beim Auffahren einer Strecke im Modellversuch nach Jacobi (1976)

Mit der Anordnung von Verschlussbauwerken, aber auch dem Versatz der Einlagerungsstrecken wird angestrebt, die Permeabilität der ALZ durch den Aufbau von Normalspannungen in der Kontaktzone zwischen dem Bauwerk und dem umgebenden Wirtsgestein infolge Aufkriechen des Gebirges oder Quellen des Versatzmaterials zu reduzieren. Diese Prozesse sollten sich schon in der Beobachtungsphase entwickeln. Sie sollten daher messtechnisch erfasst werden, um Aussagen zur Permeabilitätsentwicklung über

die Zeit für die Langzeitsicherheitsanalysen zur Verfügung zu stellen. Diese stellen gleichzeitig ein Entscheidungskriterium für eine Rückholung dar.

2.3.2 Integritätsentwicklung der geologischen Barriere

Die geologische Barriere bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist neben den geotechnischen Barrieren maßgebend für die Rückhaltung der Radionuklide. Mit der Offenhaltung von Grubenräumen und dem Versatz von Einlagerungsstrecken mit weniger steifen Materialien treten Konvergenzen der Grubenräume auf, die zu plastischen Zonen führen. Die plastischen Zonen, die ebenfalls eine höhere Permeabilität aufweisen als das intakte Gebirge, entwickeln sich über die Zeit hinein in das Gebirge weiter, solange kein Gleichgewicht erreicht ist. Damit degradiert die geologische Barriere hinsichtlich ihrer Integrität.

Die Beobachtung dieser Entwicklung führt daher ebenfalls zu Entscheidungskriterien für die Rückholung. Neben dem Integritätsverlust der geologischen Barriere durch plastische Zonen ist als weiteres mögliches Szenario das Vorhandensein von hydraulisch wirksamen Störungssystemen zu beachten. Gemeint sind hier Störungssysteme, die in der Planungs- und Auffahrungsphase nicht entdeckt wurden, sich danach aber aufgrund der Veränderung des Spannungszustands infolge der Auffahrung von Hohlräumen feststellen lassen. In diesem Szenario ist eine Rückholung der Reststoffe erforderlich. Die oben angeführten Aspekte gelten im Wesentlichen für Steinsalz in flacher und steiler Lagerung sowie Ton und Tonstein. Eine Ausnahme bildet kristallines Hartgestein, bei dem aufgrund der trennflächenbedingten hohen Permeabilität die Barrierefunktion nur in der mechanischen und chemischen Stabilität liegt. Die chemische Beständigkeit und mechanische Festigkeit dieses Wirtsgesteins ist relativ hoch, so dass davon auszugehen ist, dass es über lange Zeiträume integer bleibt. In einem derartigen Wirtsgestein ist die hydraulische Barrierefunktion den technischen und geotechnischen Barrieren zugewiesen.

2.3.3 Funktionstüchtigkeit der Verschlussbauwerke und des Streckenversatzes

Wie oben bereits ausgeführt, dienen die Verschlussbauwerke und der Streckenversatz als Barrieren. Darüber hinaus müssen sie aber auch gebirgsmechanische Funktionen erfüllen. Als Barrieren dienen sie in erster Linie als Strömungswiderstand gegenüber zusetzenden Fluiden, insbesondere Wasser und Lösungen. Diese Funktion muss über lange Zeiträume erhalten bleiben. Hierbei ist insbesondere die Permeabilitätsentwicklung von Bedeutung. Durch die Beanspruchung infolge Gebirgsdruck und die damit einhergehende Entwicklung von Rissen sowie Korrosion und Erosion der Materialien ergeben sich Veränderungen der Permeabilität, die infolge der sehr langsamen Entwicklung nur schwierig direkt messtechnisch erfasst werden können. Indirekt lassen sich aber Hinweise auf die Zustandsänderungen beispielsweise durch die messtechnische Erfassung von Spannungen, Dehnungen sowie dem Aufbau von Quelldrücken ableiten. Diese dienen dann ebenfalls als Entscheidungskriterium für die Rückholung.

Die gebirgsmechanischen Funktionen umfassen, wie oben bereits erwähnt, den Ausbaurwiderstand gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck und die damit einhergehenden Verheilung der ALZ, aber auch die Begrenzung der Entwicklung der plastischen Zonen. Das Verschlussbauwerk muss daher so ausgelegt werden, dass es möglichst kurzfristig

die Beanspruchungen aus dem Gebirge schadlos aufnehmen kann. Hierzu ist eine ausreichende Festigkeit erforderlich. Das Ablösen des Baustoffs vom Stoß infolge, beispielsweise Schwinden, ist möglichst zu verhindern oder es ist die Kontaktzone nachträglich zu verpressen. Darüber hinaus ist ggf. ein vom Verschlussbauwerk ausgehender Quelldruck des Versatzmaterials schadlos in das Gebirge abzutragen (vgl. Abbildung 2-2).

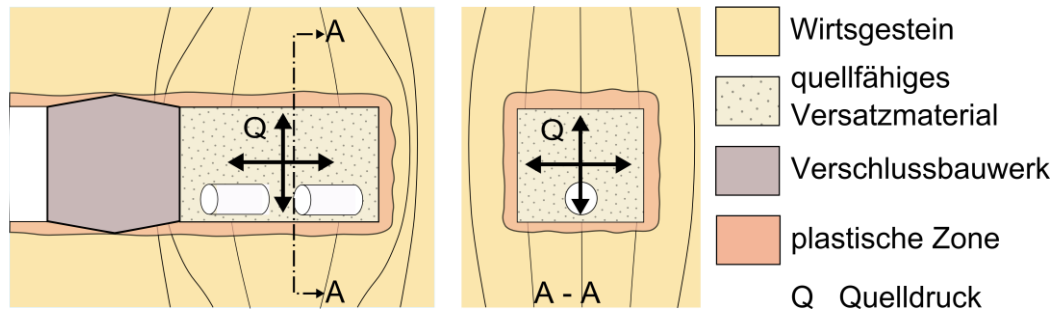


Abbildung 2-2 Widerlagerfunktionalität des Verschlussbauwerks gegenüber Gebirgsdruck und Quelldruck aus dem Versatz

Auch in den Einlagerungsstrecken sollte ein Versatz vorgesehen werden, der möglichst kurzfristig einen Ausbauwiderstand aufbaut. Dafür ist die Entwicklung der sich in der Kontaktzone aufbauenden Normalspannungen sowie der Normal- und Lateralverschiebungen in den Kontaktzonen des Verschlussbauwerks und der Einlagerungsstrecken maßgebend. Auch hieraus lassen sich Entscheidungskriterien hinsichtlich einer Rückholung entwickeln.

2.3.4 Entwicklung der offenstehenden Hohlräume

Die Option der Rückholung erfordert, wegen der geforderten kurzfristigen Zugänglichkeit zu den Reststoffen und der messtechnischen Erfassung der Zustandsänderungen durch das Monitoringprogramm, Grubenbaue, die befahrbar sind. In Abhängigkeit vom Wirtsgestein sind über die Zeit mehr oder weniger hohe Konvergenzen zu erwarten. Dies kann bei ausgebauten Hohlräumen zu Schäden am Ausbausystem und bei nicht ausgebauten Hohlräumen beispielsweise im Salzgestein zu Abschaltungen führen. Hier sind daher Wartungsarbeiten erforderlich, trotzdem entwickeln sich die plastischen Zonen infolge der Konvergenz weiter, so dass es zur fortschreitenden Degradation der Integrität der geologischen Barriere kommt. Aus den Konvergenzen und der Standsicherheit der offenstehenden Hohlräume lassen sich damit Entscheidungskriterien ableiten.

2.3.5 Ingenieurmodelle

Der Vollständigkeit halber wird hier auch die Fragestellung der ausreichenden Abbildung der auftretenden Zustandsänderungen durch das Ingenieurmodell aufgenommen. Das Normalszenario sowie die erwartete Entwicklung und das Monitoringprogramm basieren auf diesem Modell. Gemessene Zustandsänderungen, die von diesen Vorstellungen abweichen, lassen nicht unmittelbar den Schluss einer negativen Entwicklung des Tiefenlagers zu. Vor einer Entscheidung zur Rückholung sind daher auch die Gültigkeit des Ingenieurmodells sowie seiner Annahmen zu überprüfen.

2.4 Behälterintegrität

Ebenso wie die geologische und die geotechnische Barriere stellt auch der Behälter eine Barriere dar, die sogenannte technische Barriere. Die Funktionalitäten des Behälters sind während der Betriebsphase der Einschluss der radioaktiven Reststoffe, die Handhabbarkeit und die Abschirmung der ionisierenden Strahlung (ESK 2016).

Aus der Anforderung des vollständigen Einschlusses der radioaktiven Reststoffe ergibt sich, dass der Behälter während der Offenhaltungsphase gas- und flüssigkeitsdicht bleiben muss. Mögliche Prozesse, welche die Dichtheit beeinflussen, sind Korrosion oder Fehler bei der Behälteranfertigung.

Die Korrosionsrate kann durch elektrochemisches Monitoring, Monitoring der Wasserstoffbildung und über die Messung der Dicke der Oxidschicht am Behälter bestimmt werden. Nur die Messung der Wasserstoffbildung bedarf keinen direkten Zugriff auf den Behälter (Hassel et al. 2017b). Aufgrund der versetzten Einlagerungsstrecke kann nach dem Stand der Technik nur der Gasdruck im Versatz bestimmt werden. Von der Modellvorstellung abweichende Erkenntnisse über das Korrosionsverhalten können bedeuten, dass die Langzeitsicherheit nicht mehr gewährleistet ist. Dies kann besonders im kristallinen Hartgestein von Relevanz sein, da die Langzeitsicherheit hier maßgeblich von der technischen sowie geotechnischen und weniger von der geologischen Barriere abhängt.

Wird im Nachhinein ein Produktionsfehler bei einem eingelagerten Behälter festgestellt, steht die Rückholung zur Debatte. Der Zustand der Behälterdichtungen könnte sich im Behälter bestimmen lassen und wäre durch Funktechnologie auch nach Versatz der Einlagerungsstrecke zu messen. Eine solche Messmethode ist derzeit noch nicht Stand der Technik. Bei der Feststellung von Undichtigkeiten eines Behälters innerhalb des Beobachtungszeitraums, ist eine Rückholung unvermeidbar. Messungen an der Einlagerungsstrecke könnten einen unerwarteten Austritt von Radionukliden feststellen, was ebenfalls einen Rückholungsgrund darstellt (vgl. Hassel et al. 2017b).

2.5 Radiologische Gründe

Eine unzureichende Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren sowie eine nicht gegebene Behälterintegrität können zu einer Migration der Radionuklide in die Biosphäre führen. Werden hierbei die Schutzziele verletzt, liegen radiologische Gründe für eine Rückholung vor. Zu beachten ist hierbei, dass während der Betriebsphase und der Beobachtungsphase kaum von einer realen Migration, beispielsweise in das Grundwasser, auszugehen ist. Es handelt sich daher vielmehr um eine theoretische Untersuchung. Sobald die Langzeitsicherheit durch unerwartete negative Entwicklungen nicht mehr gewährleistet werden kann, d. h. der sichere Einschluss der Radionuklide nicht mehr dauerhaft gegeben ist, bietet eine Rückholung die Option einzugreifen. Jegliche Kontamination des Grundwassers mit Radionukliden wäre beispielsweise ein Grund für eine sofortige Rückholung der Reststoffe. Voraussetzung für eine sichere Rückholung ist die Gewährleistung einer weiteren Behandlung und Lagerung der Radionuklide (siehe Abschnitt 2.6).

2.6 Konsequenzen einer Rückholung

Eine Rückholung stellt immer ein zusätzliches technisches Risiko dar. Insbesondere die mit der Rückholung beauftragten Beschäftigten werden einer zusätzlichen Strahlungsbelastung ausgesetzt (z. B. Strahlenschutzfachleute und Bergleute). Die Belastung setzt sich aus den erforderlichen Arbeiten zur Freilegung der Behälter, den Transportvorgängen sowie der weiteren Lagerung der radioaktiven Reststoffe zusammen und muss mit dem Nutzen der Rückholung abgewogen werden. Nach der Rückholung der Reststoffe ist eine alternative Lagerungsform erforderlich. Dafür bietet sich beispielsweise ein vorzuhaltendes Oberflächenlager zur Aufnahme der rückgeholten Abfälle an. Das damit verbundene Risiko ist in den Entscheidungsprozess zur Rückholung zu integrieren.

Die weitere Bearbeitung dieser Aspekte bleibt zukünftigen Untersuchungen vorbehalten.

3 Entwicklung der Normalszenarien

Die Erarbeitung eines Monitoringkonzepts für ein Tiefenlager erfordert eine Vorstellung der Entwicklungsmöglichkeiten. Dafür lassen sich mittels der Methodik der Szenarientwicklung plausible Zukunftsprognosen erlangen. In den ersten beiden Abschnitten des Kapitels werden die Grundlagen und die Vorgehensweise bei dieser Methodik erläutert, in den darauf folgenden Abschnitten werden sie angewendet. Im Abschnitt 3.3 wird das Untersuchungsfeld eingegrenzt und im Abschnitt 3.4 die wesentlichen Einflussfaktoren auf die zukünftige Entwicklung des Tiefenlagers bestimmt. In Abschnitt 3.6 wird die aus diesen Einflussfaktoren gewonnene Normalentwicklung der Tiefenlagersysteme vorgestellt.

3.1 Grundlagen der Szenarientwicklung

Integraler Bestandteil der Erstellung eines Monitoringkonzepts für ein Tiefenlagerprojekt ist die Abbildung des Systemverhaltens während seiner Errichtung, seiner Betriebszeit und seiner gesamten Offenhaltungsdauer auf der Grundlage von Modellvorstellungen. Hierfür werden Szenarien für die vorgestellten Wirtsgesteine erstellt. Mithilfe des Monitorings lassen sich die Normalszenarien (auch Trendszenarien genannt) mit den angenommenen tatsächlichen Entwicklungen vergleichen. Weicht die tatsächliche Entwicklung von der erwarteten Normalentwicklung ab, so ist auf Grundlage von zuvor festgelegten Kriterien die Entscheidung zur Rückholung oder auch der Überführung in ein Endlager zu treffen.

Unter dem Begriff Szenario wird eine hypothetische Folge von Ereignissen verstanden. Im Rahmen der Erstellung solcher Szenarien sind besonders die Auswirkungen der Entwicklung auf die zu prognostizierende Zielgröße von Interesse, aber auch die durch diese Entwicklung verursachten Veränderungen des Prozesses selbst (Simon und von der Gathen, A. 2010, S. 80). Die Begrifflichkeiten Szenario-Technik und Szenarientwicklung fassen unterschiedliche Vorgehensweisen zur Erstellung plausibler Zukunftsmodelle zusammen.

Der Begriff Normalszenario bzw. Trendszenario beschreibt eine Entwicklung, die mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit auftritt. Es handelt sich um die wahrscheinlichste respektive am häufigsten auftretende Entwicklung der geplanten Größen (vgl. Hölscher und Elfgen, R. 2002, S. 25).

Durch die große Komplexität aus vernetzten Einflussfaktoren und Ungewissheiten über die Zukunft existieren parallel zum Normalszenario weitere Alternativszenarien. Je weiter ein Ereignis in der Zukunft liegt, desto ungenauer ist die Prognose, die als Zukunftsvoraussage mit gewissem Objektivierungsgrad definiert wird. In der Mitte des Szenario-Trichters liegt das Trendszenario, die Extremszenarien befinden sich am Rand. An gewissen Punkten kann der Verlauf der Szenarientwicklung durch Entscheidungen beeinflusst werden. Bezogen auf die Tiefenlagerung kann dies z. B. die Entscheidung zur Wartung des Ausbaus sein. Externe Einflüsse, wie z. B. ein Meteoriteneinschlag, schließt die Entwicklung des Referenzszenarios hingegen aus. Sinnbildlich veranschaulicht das der in Abbildung 3-1 dargestellte Szenario-Trichter.

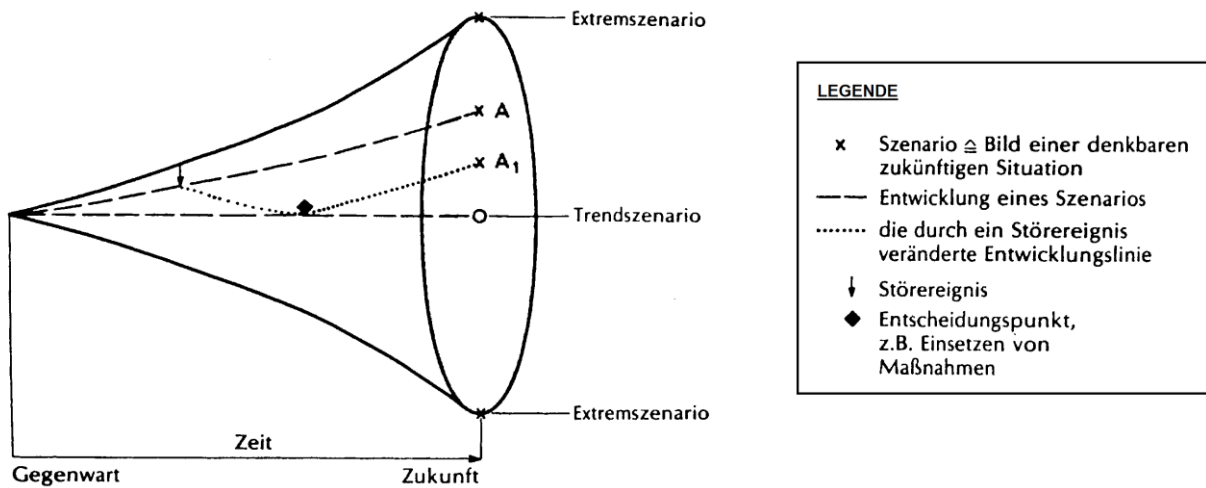


Abbildung 3-1 Szenario-Trichter (Geschka und Hammer, R. 1990)

Die Szenarientwicklung entstand in den fünfziger Jahren beim Militär und wurde in den siebziger Jahren von Wirtschaftswissenschaftlern zur Prognose von Marktentwicklungen weiterentwickelt (Acatech 2012, S. 25). Aus diesem Grund steht eine Vielzahl qualitativer und quantitativer Methoden für die Szenarientwicklung zur Verfügung. Da bisher keine Erfahrungen mit Tiefenlagern für hoch radioaktive Reststoffe existieren und somit keine ausreichende Datengrundlage vorliegt, können die quantitativen Methoden nicht auf ein Tiefenlagerprojekt angewandt werden. Die Grundlagen der Prognose beziehen sich daher auf Analogmodelle, die vergangene Entwicklungen in Bergbauprojekten, tiefen Tunneln, Untertagelaboren und Untertagedeponien sowie Erfahrungen aus der Zwischenlagerung berücksichtigen. Aus diesen Analogmodellen sowie aus wissenschaftstheoretischen Überlegungen lassen sich nachvollziehbare Prognosen für die Zukunft entwickeln, deren Zuverlässigkeit positiv mit der Anzahl an berücksichtigten Faktoren korreliert. Bei der Entwicklung der Normalszenarien für die generischen Tiefenlagermodelle ist zu beachten, dass die standortbezogene Planung und Auslegung des Tiefenlagers in der Zukunft liegt (siehe Abbildung 3-2).

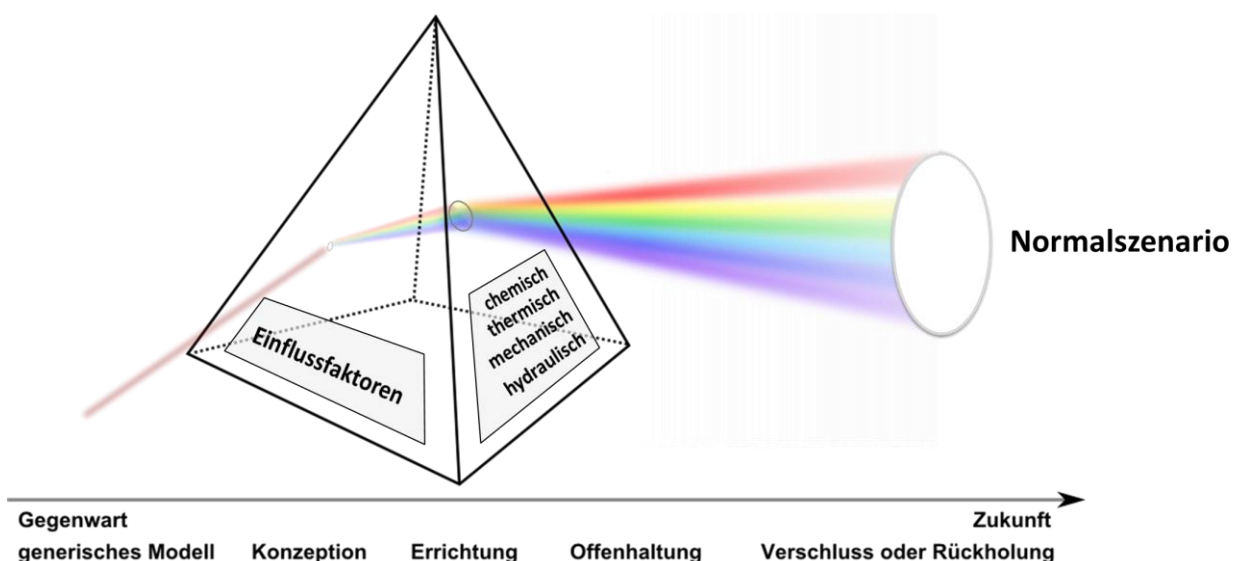


Abbildung 3-2 Sinnbildliche Darstellung der Szenarientwicklung für ein Tiefenlager mit einem Prisma

Für die Szenarienentwicklung eines allgemeinen Tiefenlagerkonzeptes ist ein weitaus größeres Szenarienfeld denkbar: Infolge der großen Variabilität bei seiner Auslegung und den Eigenschaften der Wirtsgesteine, weist es eine deutlich größere Bandbreite an daraus resultierenden Unsicherheiten als ein konkretes Tiefenlager an einem definierten Standort auf. In der Abbildung 3-2 verdeutlicht die Variabilität des Szenarios ein in ein Prisma fallender Lichtstrahl. Der gebündelte Lichtstrahl (definiertes Szenario der Gegenwart) trifft auf das Prisma, welches den Strahl bricht und zu seiner Streuung (mögliche Szenarien der Zukunft) führt. Das Prisma stellt die festgelegten und variablen Einflussfaktoren, die bei der Errichtung und dem Betrieb des Tiefenlagers bis zu dessen Schließung wirken, dar. Das nicht sichtbare Licht symbolisiert Extremszenarien, die bei der Entwicklung der Szenarien nicht berücksichtigt werden können. Die Betrachtung der generischen Tiefenlagermodelle schränkt dennoch die Vielzahl an Möglichkeiten ein und gibt einen Rahmen für die Auslegung eines Tiefenlagers mit Rückholoption, auf dessen Basis ein Tiefenlager auf einen konkreten Standort ausgelegt werden kann.

3.2 Vorgehen bei der Szenario-Technik

Das Vorgehen dieses Arbeitsberichts ist methodisch angelehnt an Brunner-Schwer (1986, S. 29–33) sowie an Geschka und Hammer, R. (1990, S. 320–323) und wurde an die Erfordernisse der Tiefenlagerung angepasst (siehe Abbildung 3-3).

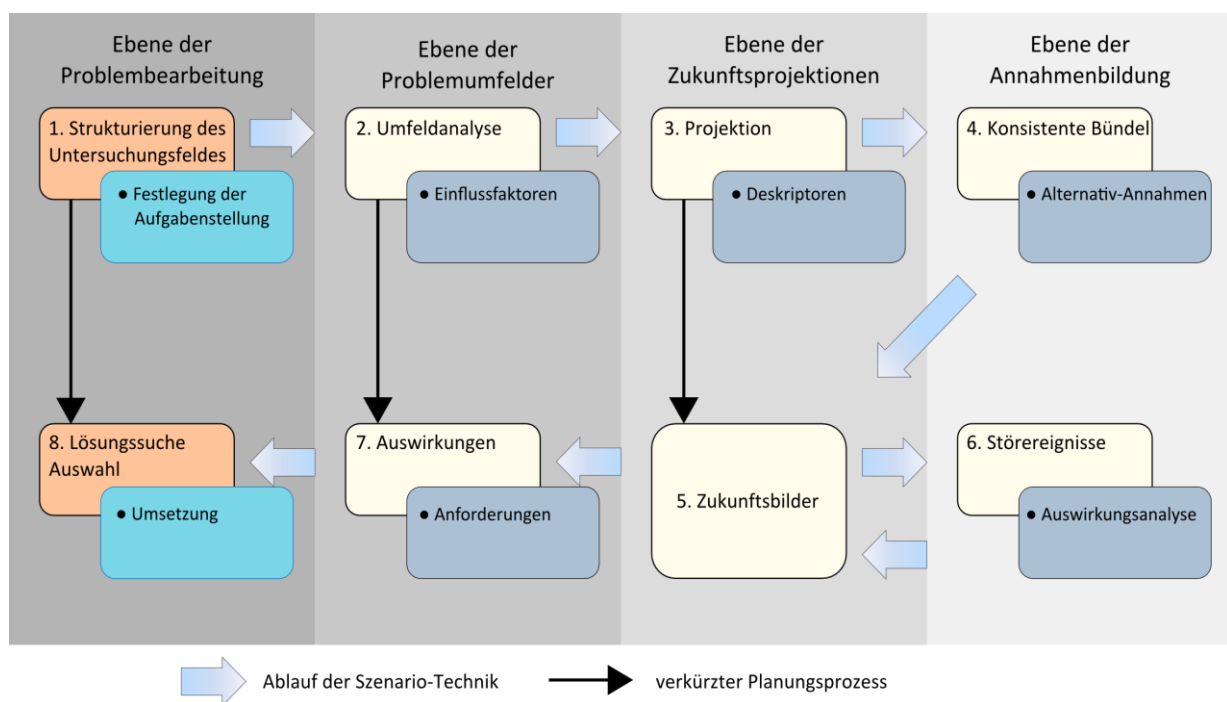


Abbildung 3-3 Die acht Schritte der Szenario-Technik
(nach Geschka und Hammer, R. 1990, S. 319)

Zunächst erfolgt die Definition und Strukturierung des Untersuchungsfelds. Hierfür sind eine exakte Aufgabenstellung mit Berücksichtigung der Ziele zu formulieren sowie wichtige Kenngrößen zu ermitteln und in ihrem gegenwärtigen Zustand zu erfassen (s. Abschnitt 3.3). Die Dauer des Untersuchungszeitraums ist hier einzugrenzen, in dieser Arbeit z. B. auf die Offenhaltungsphase.

Der nächste Schritt basiert auf einer Umfeldanalyse und sieht die Identifikation und die Strukturierung der Haupteinflussbereiche auf das Untersuchungsfeld vor. Die Haupteinflussbereiche werden daraufhin einzelnen Umfeldern des Untersuchungsbereichs zugeordnet. Relevant ist hierbei, die wichtigsten Umfeldern zu bestimmen, sie nach ihren Einflussfaktoren zu differenzieren und deren Kenngrößen zu ermitteln. So lassen sich die Wechselwirkungen zwischen den Umfeldern untereinander sowie mit dem Untersuchungsfeld analysieren.

Anschließend erfolgt eine Kategorisierung der bereits ermittelten Einflussfaktoren und Kenngrößen (s. Abschnitt 3.4). Entscheidend ist, welche Einflussfaktoren und Kenngrößen das Umfeld wesentlich charakterisieren, d. h. weniger relevante Einflussfaktoren werden aussortiert. Darauffolgend sind Entwicklungstendenzen und sogenannte kritische Deskriptoren bzw. kritische Kenngrößen für die Umfeldern zu ermitteln. Daraus lassen sich wiederum Trendprojektionen für den festgelegten Zeitraum ableiten. Eine Abwägung der zukünftigen Projektion sowie die Annahmen für Einflussfaktoren bzw. Kenngrößen sind in diesem Schritt auszuarbeiten und begründet darzulegen. Ebenso sind für die Prognosen der unkritischen Kenngrößen plausible Begründungen anzugeben.

Mithilfe einer Konsistenzmatrix mit den oben genannten Entwicklungstendenzen soll eine logische und konsistente Annahmenbündelung stattfinden (s. Abschnitt 3.5). Aus diesen Bündeln werden abschließend paarweise Kombinationen der kritischen Kenngrößen nach den Kriterien Konsistenz, Unterschiedlichkeit und evtl. Wahrscheinlichkeit ausgewählt, woraus die Basis der zu formulierenden Szenarien entsteht.

Die ausgewählten Umfelderszenarien werden interpretiert und mögliche Szenarien ausgebaut (s. Abschnitt 3.6). Die Annahmebündelung berücksichtigt bereits die kritischen Kenngrößen. Nun werden gleichermaßen unkritische Kenngrößen hinzugefügt. Der Zeitraum, in welchem die Szenarien stattfinden, ist festzulegen und Zwischenereignisse bis zum Endzustand des Szenarios sind zu definieren. Des Weiteren ist eine Analyse von möglichen und signifikanten Störereignissen durchzuführen. Sie werden identifiziert, interpretiert und in die Szenarien eingearbeitet.

Abschließend sind alle wahrscheinlichen Kombinationen aus Umfeld- und Untersuchungsfeldszenarien gegenüberzustellen, Probleme zu identifizieren und entsprechende Lösungsansätze zu entwickeln (s. Abschnitt 4.7). Dabei ist das Normalszenario zu bestimmen und bei den Planungsaktivitäten für das Monitoring zu berücksichtigen. Weiterhin muss die Planung ausgewählte abweichende Szenarien, wie z. B. einen Wassereintritt während der Betriebsphase in ein Tiefenlager in Steinsalz, beachten.

Die Annahme, dass sich unterschiedliche Projektionen nicht gegenseitig ausschließen, sei an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben. Für die Zukunft sind unterschiedliche Alternativen denkbar, auch wenn der vorliegende Arbeitsbericht nur jeweils eine Projektion darstellt, auf der das Monitoringkonzept für die jeweiligen Tiefenlager entwickelt wird.

3.3 Eingrenzung des Untersuchungsfeldes

Die folgenden Abschnitte stellen die ersten beiden Schritte in der Szenarioentwicklung dar. Die Ausgangssituation und Fragestellung, also die Ziele der Tiefenlagerung, werden festgelegt und der zeitliche und räumliche Betrachtungsrahmen wird eingegrenzt.

3.3.1 Ausgangssituation

Die zwei wichtigsten Ziele eines Tiefenlagers sind der Schutz von Mensch und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen der ionisierenden Strahlung sowie die Gewährleistung der planungstechnisch vorgesehenen Rückholbarkeit der radioaktiven Reststoffe, um rechtzeitig reagieren zu können, wenn Zweifel an der Erreichung des ersten Ziels auftreten. Aus dem ersten Ziel ergibt sich u. a. die Bedingung, dass ein Tiefenlager zu jeder Zeit in ein Endlager überführbar sein muss. Das Konzept des sicheren Einschlusses erfordert, dass keine Zweifel an der Funktionalität bzw. der Integrität der geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren zum Zeitpunkt der Überführung bestehen. Die Abbildung 3-4 fasst die Maßnahmen zusammen, mit denen beide Ziele erreicht werden.

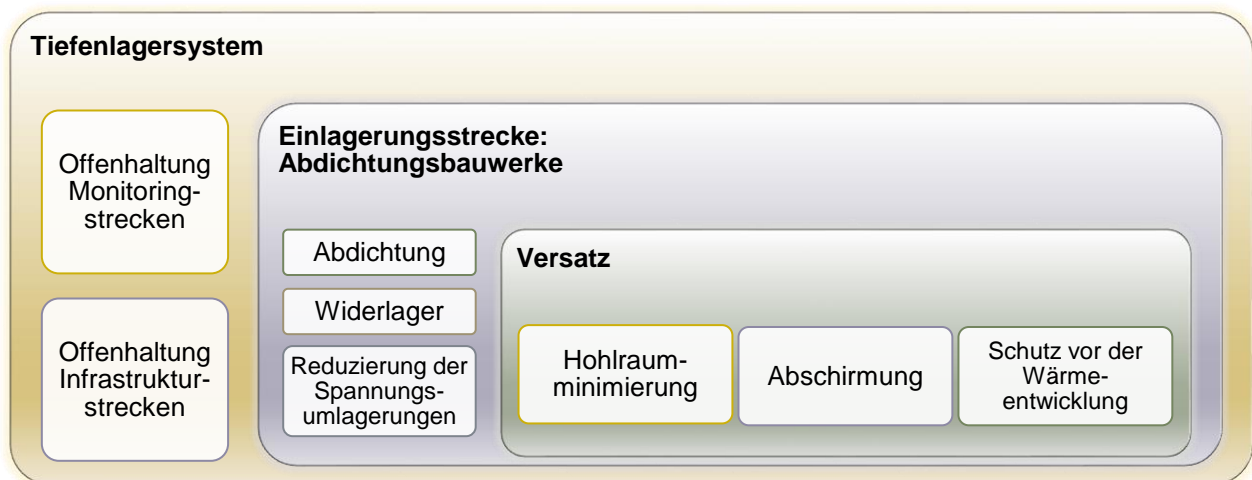


Abbildung 3-4 Darstellung der Ausgangssituation in den generischen Tiefenlagern zur Gewährleistung der Ziele Zugänglichkeit und Schutz der hoch radioaktiven Reststoffe aus geotechnischer Perspektive

Um die Zugänglichkeit des Einlagerungsbereichs und das Monitoring sicherzustellen, sind die Schächte, der Infrastrukturbereich und die Monitoringsohle offenzuhalten. Die Dauer der Offenhaltung geht als Variable in die Untersuchungen ein (vgl. Stahlmann et al. 2015a, S. 29). Um Spannungsumlagerungen im Umfeld der Einlagerungssohle zu minimieren, soll der Einlagerungsprozess zügig vorangehen. Außerdem sollen die Einlagerungsstrecken unmittelbar nach der Einlagerung verfüllt werden, um den Schutz der Belegschaft und der Bevölkerung vor den Auswirkungen der ionisierenden Strahlung sowie vor der Wärme der radioaktiven Reststoffe (Arbeitsschutz) zu gewährleisten. Das Verschlussbauwerk hat bei auslegungsüberschreitendem Grundwasserzutritt in das Grubengebäude die Funktion, die Reststoffe trocken zu halten und weiterhin die Aufgabe, den Quelldruck von quellfähigen Versatzmaterialien aufzunehmen.

Da sich die verschiedenen Wirtsgesteine in ihren physikalischen Eigenschaften stark voneinander unterscheiden, ist die Entwicklung eines Normal Szenarios für jedes Wirtsgestein erforderlich. Diese Szenarien basieren auf den generischen Tiefenlagermodellen von Stahlmann et al. (2015a).

3.3.2 Räumlicher Betrachtungsrahmen

Der räumliche Rahmen ergibt sich aus der Menge der zu entsorgenden Reststoffe, der Konzeption der Einlagerungsstrecken sowie der maximalen Einlagerungstemperatur der Behälter. Die durchgeführten Untersuchungen umfassen das Nahfeld der Grubenbaue, d. h. den Infrastrukturbereich, die Einlagerungsfelder und die Monitoringsohle, jeweils unter der Berücksichtigung des Wirtsgesteins und der Stützbauwerke (s. Abbildung 3-5). Durch die generische Betrachtungsweise wird ein weitgehend homogener Wirtsgesteinskörper angenommen, der bei Untersuchungen von konkreten Standorten entsprechend angepasst werden muss.

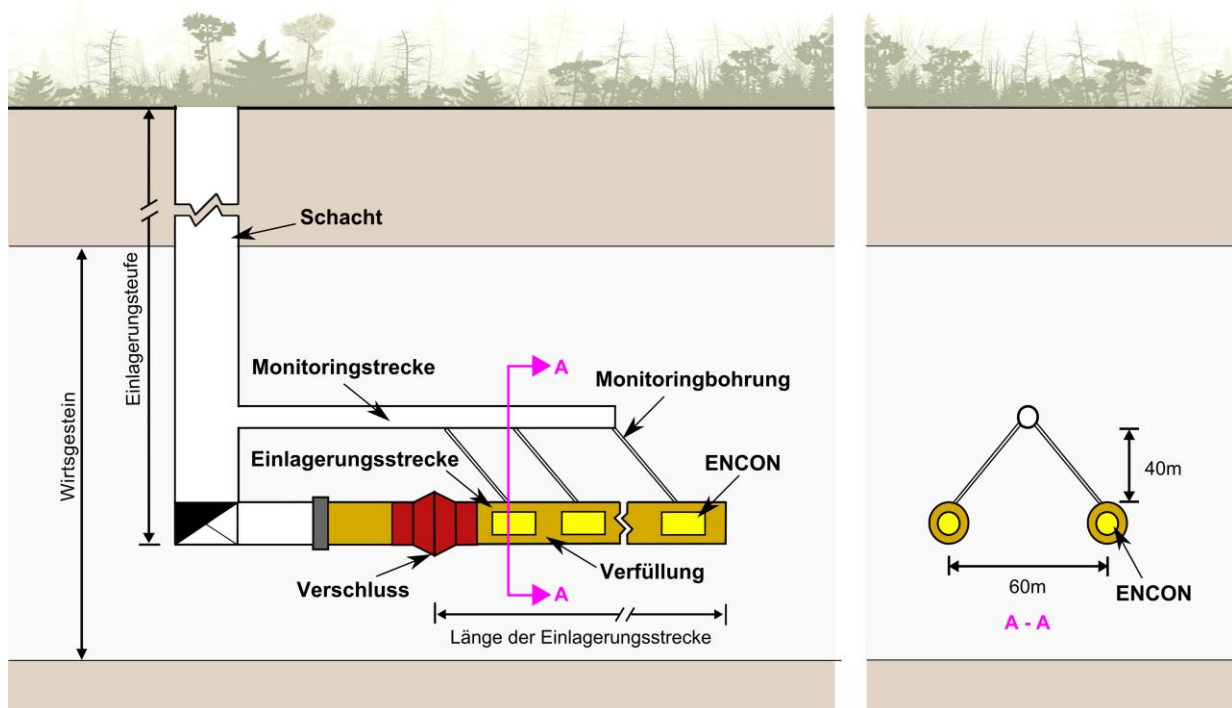


Abbildung 3-5 Generisches Tiefenlagermodell mit Option der Rückholung
(nach Stahlmann et al. 2015a, S. 27)¹

Der durch den Schacht direkt beeinflusste Bereich wird bei der Szenarientwicklung nicht näher betrachtet, da die Einflüsse aus der Bewitterung und der durchteuften Deckgebirgsschichten die Komplexität und damit die Unsicherheit in den Prognosen steigern. Außerdem unterscheiden sich die Anforderungen an den Schacht bei der Tiefenlagerung bis auf die längere Offenhaltungsdauer nicht wesentlich von den Anforderungen, die eine direkte Endlagerung mit sich bringt.

¹ Im Rahmen von ENTRIA wird als Behälterkonzept der ENCON (ENTRIA CONTAINER) Behälter verwendet. Siehe hierzu Hassel et al. (2017a.)

3.3.3 Zeitlicher Betrachtungsrahmen

Der zeitliche Horizont des entwickelten Szenarios reicht von der Auffahrung des Tiefenlagers (nahe Zukunft) bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Entscheidung, das Tiefenlager zu räumen oder in ein Endlager umzuwandeln (ferne Zukunft), getroffen wird. Der Rahmen lässt sich in vier Zeitschritte gliedern (s. Abbildung 3-6).

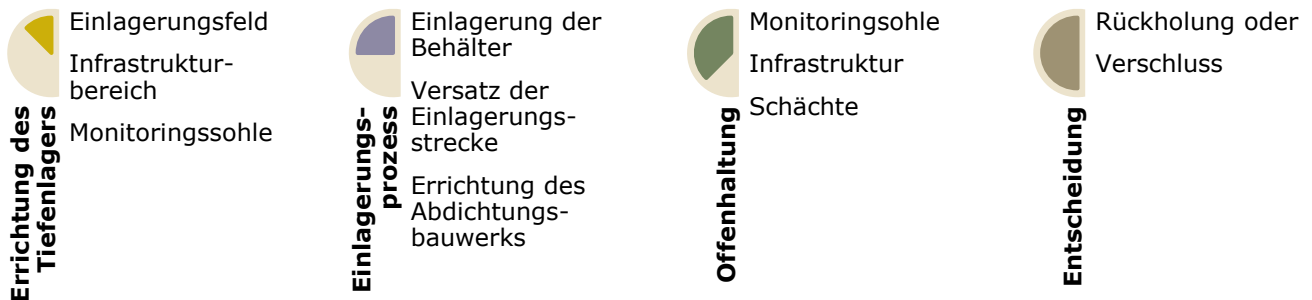


Abbildung 3-6 Zeitlicher Betrachtungsrahmen des Monitoringkonzepts

Zunächst wird ein Schacht abgeteuft und darauffolgend die Erkundungssohle, die später erweitert und als Monitoringsohle dienen kann, aufgeföhren. Aus diesen werden Bohrungen in Richtung des zukünftigen Einlagerungsbereichs gestoßen. Über die Bohraufschlüsse lässt sich das geologische Modell verifizieren und gegebenenfalls anpassen. Anschließend erfolgt die Aufföhren der Einlagerungssohle mit ihrem Infrastrukturbereich und den Zugängen zu den Einlagerungsfeldern. Die Einlagerungsstrecken werden unmittelbar nach der Einlagerung der jeweils sechs Behälter verfüllt, sie weisen somit eine vergleichsweise geringe Standzeit (ca. 1-2 Monate) auf. Die Dauer des gesamten Einlagerungsprozesses ergibt sich aus den Abfallmengen und wird in Deutschland auf 40 Jahre geschätzt (Fischer-Appelt et al. 2013, S. 118). Auf den Versatz der Einlagerungsstrecke folgt die Errichtung des Verschlussbauwerks. Schächte und Infrastrukturbereich werden über die Dauer, in der die gebirgsmechanische Stabilität gewährleistet ist, oder bis zur Entscheidung, das Tiefenlager in ein Endlager zu überföhren, offengehalten.

3.4 Einflussfaktoren auf die Normalentwicklung des offengehaltenen Tiefenlagersystems

Die Komplexität des Tiefenlagers lässt sich durch die zahlreichen Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren verdeutlichen. Die mechanischen Eigenschaften des Gebirges, des Versatzes und des Verschlussbauwerks hängen z. B. vom Wärmeeintrag ab. Des Weiteren beeinflusst der Eintrag des Sauerstoffs aus der Bewetterung chemische Prozesse im Wirtsgestein, indem er das dort vorherrschende reduzierende Milieu in ein oxidierendes umwandelt. Diese Prozesse sind ebenfalls temperaturabhängig. Das im Wirtsgestein eventuell vorhandene Grundwasser verändert durch die Wärme den Porendruck in selbigem, was zu einer veränderten mechanischen Festigkeit föhrt.

Die Szenarienentwicklung dieses Arbeitsberichts berücksichtigt im Wesentlichen die geologischen und gebirgsmechanischen Faktoren. Diese lassen sich in geometrische, thermische, hydraulische, mechanische, radiologische und chemische Faktoren unterteilen. Gesellschaftliche Faktoren werden bei der Erstellung des Normalszenarios nicht berücksichtigt. Vorausgesetzt werden gesellschaftliche Stabilität und das Interesse der Gesellschaft an der Verfolgung der Entwicklung des Tiefenlagers. Sie sind trotzdem sehr relevant und sollten an anderer Stelle näher untersucht werden.

Um der skizzierten Komplexität gerecht zu werden, sollen die Haupteinflussbereiche und die jeweiligen wesentlichen Einflussfaktoren ermittelt werden. Die Abbildung 3-7 fasst die in den folgenden Abschnitten näher beschriebenen Einflussfaktoren über die verschiedenen Haupteinflussbereiche zusammen. Einige Faktoren sind aufgrund der Festlegungen der generischen Modelle invariabel (wie z. B. die Teufe und die Behälterabmessungen) und deshalb bei der Szenarioentwicklung als Einflussfaktor zu vernachlässigen, aber als Ausgangsfaktor zu berücksichtigen. Andere Faktoren wie z. B. die Spannungsumlagerungen ändern sich im Verlauf der Entwicklung des Tiefenlagers. Deswegen werden sie in den Konsistenzmatrizen (s. Anhänge 1 bis 4) aufgelistet, ihr Einfluss bewertet und bei der Entwicklung des Normalszenarios berücksichtigt.

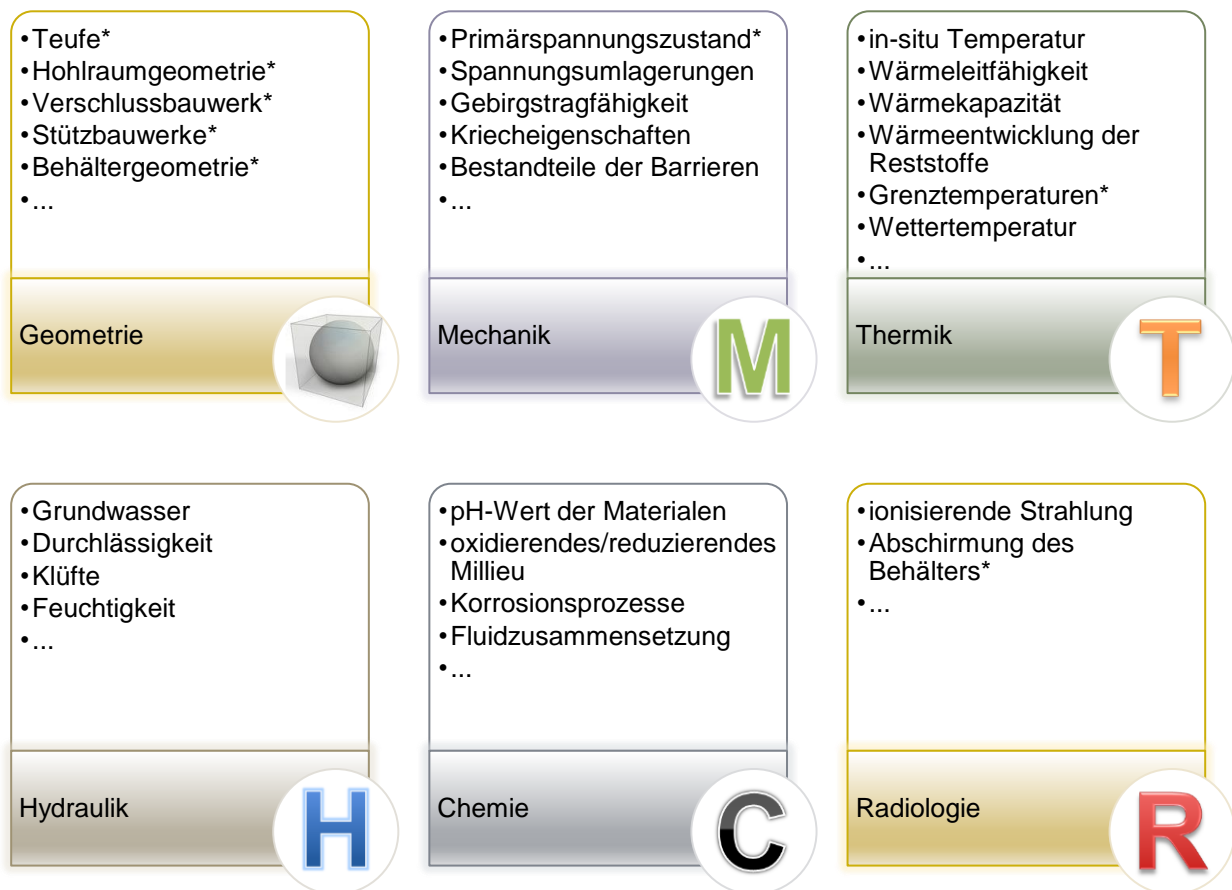


Abbildung 3-7 Auswahl einiger Ausgangs- (mit * gekennzeichnet) und Einflussfaktoren auf die Entwicklung der generischen Tiefenlagermodelle

3.4.1 Geometrische Einflussfaktoren

Die geometrischen Einflussfaktoren beschreiben die durch das Tiefenlagerbergwerk und die damit verbundenen technischen und geotechnischen Barrieren definierten räumli-

chen Größen. Sie sind durch die vorgestellten generischen Tiefenlagermodelle zur Vergleichbarkeit der einzelnen Wirtsgesteine vereinheitlicht und in den nächsten Abschnitten aufgelistet.

3.4.1.1 Teufe der Einlagerungsbereiche

Die generischen Modelle sehen für die Einlagerungssohle eine Teufe von 600 m vor (nach Stahlmann et al. 2015a, S. 27). Diese Teufe beeinflusst maßgeblich den Spannungszustand, in dem sich das Gebirge im unverritzten Zustand befindet (Primärspannungszustand). Da sich dieser Wert über den Entwicklungszeitraum des Tiefenlagers nicht verändert, erübrigt sich seine Betrachtung als aktiver Einflussfaktor.

3.4.1.2 Hohlraumgeometrie

Die Hohlraumgeometrie entspricht dem deutschen Stand der Technik für ein Tiefenlager, das die Einlagerung von POLLUX-Behälter vorsieht. Sie kann sich durch Konvergenzen und Verformungen ändern, was wiederum eine Sanierung erfordert. Für eine potentielle Rückholung dürfen die Mindestlichtraumprofile nicht unterschritten werden, da die Technik für die Rückholung ansonsten nicht einsatzfähig ist.

Das Tiefenlager ist von der Anlage der einzelnen Grubenfelder auf das Gebirge anzupassen, sodass bei anisotropen Wirtsgesteinen eine günstige gebirgsmechanische Anordnung der Grubenräume erzielt wird. Diese Auslegung muss an einem konkreten Standort erfolgen.

3.4.1.3 Verschlussbauwerk

Nach dem Versatz einer Einlagerungsstrecke wird im Bereich des Verschlussbauwerks die ALZ entfernt und das Verschlussbauwerk in einem ausgerundeten Querschnitt der Strecke errichtet. Es hat eine Widerlager- und eine Abdichtungsfunktion. Im Fall eines Bentonit-Versatzes, muss das Widerlager getrennt vom eigentlichen Abdichtungselement betrachtet werden. Das Widerlager muss, abgesehen von einem Tiefenlager im Steinsalz, den Quelldruck des Bentonits ohne axiale Verschiebung aufnehmen können.

Die Abmessungen des Verschlussbauwerks sollen keine maßgeblichen Veränderungen gegenüber dem Anfangszustand aufweisen, um die Dichtigkeit in der Kontaktzone mit dem Wirtsgestein zu gewährleisten. Das Schrumpfen und Schwinden ist jedoch aufgrund der chemischen Eigenschaften des Baumaterials Beton absehbar und zu berücksichtigen.

Die Integrität des Abdichtungselements spielt eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Erreichung der langfristigen Schutzziele. Es sind zwei vom Normalszenario abweichende Entwicklungen denkbar: Zum einen kann der Behälter korrodieren, sodass sich in der Einlagerungsstrecke ein Gasdruck aufbaut, der von innen auf das Abdichtungselement wirkt. Das andere Alternativszenario beinhaltet den Zutritt von Lösung, welche die Infrastrukturbereiche bis zum Zugang der Einlagerungsstrecken fluten kann. Eine geringe Durchlässigkeit ist daher zu gewährleisten.

Im Normalszenario soll das Verschlussbauwerk standsicher gegenüber der resultierenden Belastung aus den Spannungsumlagerungen im Gebirge sein. Weist es mechanisch eine größere Steifigkeit als das umgebende Gebirge auf, zieht es die Spannungen an und ist somit stärker belastet. Es wirkt wie ein zusätzlicher Pfeiler. Kritisch, und daher zu überprüfen, sind eventuelle Schädigungen durch Überschreitung der Festigkeit.

3.4.1.4 Stützbauwerke

Benötigt ein Grubenbau aufgrund einer nicht ausreichenden Eigentragsfähigkeit des Wirtsgesteins einen Ausbau, sind seine mechanischen und chemischen Eigenschaften unter Berücksichtigung des Wärmeeintrags und der evtl. Strahlung im Nahfeld zu beachten. Die erforderliche Stärke des Ausbaus hat Einfluss auf die Hohlraumstabilität des Grubenbaus. Je steifer der Ausbau, desto größer ist der benötigte Ausbruchquerschnitt und desto größer sind somit auch die Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein. Die Folge davon ist eine größere plastische Zone. Die auftretenden Konvergenzen sollen den erforderlichen Lichtraum der Hohlräume für die Rückholung nicht gefährden. Durch die Alterung des Ausbaus während der Offenhaltungsphase kann eine Sanierung erforderlich werden, um die ursprüngliche Steifigkeit und Festigkeit wiederherzustellen.

3.4.1.5 Behälter

Beim Behälter handelt es sich um den generischen Behälter des Typs „ENCON“, dessen Maße denen eines POLLUX-Behälters entsprechen. Seine Zusammensetzung ist für die Ziele des vorliegenden Arbeitsberichts nur untergeordnet relevant, da innerhalb der Phase, in der eine Rückholung möglich ist, eine vernachlässigbar geringe Korrosion erwartet wird. Durch die Auslegung als Abschirmbehälter ist des Weiteren von einer ausreichenden Steifigkeit auszugehen, sodass Verformungen des Behälters durch Gebirgs- und/oder Quelldrücke zu vernachlässigen sind.

3.4.2 Mechanische Einflussfaktoren

Die mechanischen Einflussfaktoren sind konzept- sowie wirtsgesteinsabhängig und müssen daher spezifisch für jedes generische Modell betrachtet werden. Um einen allgemeinen Überblick über die wesentlichen mechanischen Einflüsse auf die Entwicklung des Tiefenlagersystems zu liefern, führen die nächsten Abschnitte diese zunächst wirtsgesteinsunabhängig auf. Im Abschnitt 3.6 werden die Szenarien dann detailliert für die verschiedenen Wirtsgesteine dargestellt.

3.4.2.1 In-situ Spannungen und Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein

Der Primärspannungszustand ist der dreidimensionale Spannungszustand, in dem sich das Gebirge im unverritzten Zustand befindet. Die vertikal wirkenden Spannungen lassen sich vereinfacht über die Formel $\gamma \cdot h$ berechnen, wobei γ die Wichte und h die Teufe sind. In der Realität gibt es jedoch zusätzlich noch Spannungen aus der Tektonik, eventuell vorhandene Quelldrücke, Konsolidierung und das Trennflächensystem der Gebirge, die den Primärspannungszustand beeinflussen können.

Wird ein Hohlraum aufgefahren, erfolgt eine Umlagerung der Gebirgsspannungen auf den Bereich, der den Hohlraum umgibt. Es stellt sich ein Sekundärspannungszustand ein. Die Größe der Spannungsumlagerungen und ihre Auswirkungen auf die Gebirgstragfähigkeit werden durch die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins (Scherparameter, Verformungsverhalten und deren (An-)isotropie), die Teufenlage des Bergwerks und die Größe der Hohlräume bestimmt. Spannungen können über Bewegungen im Gebirge (Dehnungen im Gebirge und die daraus resultierenden Konvergenzen der Hohlräume) abgebaut werden. Über eine potentielle Stützung des Hohlraums durch einen Ausbau und seine anschließende Verfüllung lässt sich das Ausmaß der Spannungsumlagerungen reduzieren, da sich durch den Versatz bzw. den Ausbau ein Gegendruck zum Gebirgsdruck aufbaut. Ein wichtiger Begriff in diesem Kontext ist der

Spannungsdeviator. Er definiert die Differenz aus den Hauptspannungen und dem Anteil aus hydrostatischem Druck des Spannungstensors. Je größer die Abweichung zum hydrostatischen Druck, desto größer fallen die dadurch verursachten Verformungen und evtl. Schädigungen des Wirtsgesteins aus.

Der Porendruck entsteht in allen Wirtsgesteinen, die einen verbundenen Porenraum und ein ihn ausfüllendes Fluid, meist Grundwasser, aufweisen. Theoretisch berechnet er sich aus der Dichte des Fluids und der Druckhöhe der Fluidsäule. Bei einer Temperaturerhöhung können die Ausdehnung des Fluids und die eventuelle Entwicklung einer Gasphase den Porendruck beeinflussen. Mit zunehmendem Porendruck wird die mechanische Festigkeit reduziert. Durch geologische Vorbelastung kann in nur schwach durchlässigen Wirtsgesteinen der Porendruck höher sein, als er in der Teufenlage zu erwarten wäre.

Quelldrücke, die sich auf den in-situ Spannungszustand auswirken, entstehen, wenn ein quellfähiges Material wie Bentonit Wasser in die Kristallstruktur aufnimmt. Ist das Material nicht eingespannt, vergrößern sich die Schichtabstände, das Material quillt. Werden die Quelldehnungen durch eine Einspannung be- oder verhindert, so entsteht ein Quelldruck.

3.4.2.2 Gebirgseigentragfähigkeit

Wie groß die Eigentragfähigkeit des Gebirges ist, bestimmen neben den Spannungsumlagerungen hauptsächlich die mechanischen Spannungs-Verformungseigenschaften des Gebirges, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Ein Gebirge besteht im Allgemeinen aus der Gesteinsmatrix und den Trennflächen. Das Gestein weist eine Festigkeit auf, die durch ihren inneren Zusammenhalt (Kohäsion) und ihren inneren Reibungswinkel definiert wird. Wird die Festigkeit überschritten, plastifiziert das Gestein. Es tritt eine Schädigung in Form von Mikrorissen bis hin zum Kollaps des plastifizierten Bereichs ein. Abhängig von der Zusammensetzung der Gesteinsmatrix können diese Eigenschaften richtungsabhängig ausgeprägt sein.

Die Trennflächen besitzen eine eigene Festigkeit, die durch die unterschiedliche Orientierung der Trennflächen richtungsabhängig ist. Trennflächen beeinflussen die Gebirgstragfähigkeit und das örtliche Spannungsmilieu primär. In der Regel sind die Trennflächen maßgebend für die Gebirgseigentragfähigkeit und die plastischen Zonen, da ihre Festigkeit in den meisten Fällen geringer, als die des Gesteins ist. Trennflächen sind in der Regel nicht zufällig im Gebirge orientiert, sondern weisen meist ähnliche Richtungen auf (Trennflächenscharen), sodass sich die Anisotropie des Gebirges in einem Gefügemodell darstellen und in numerischen Modellen berücksichtigen lässt.

Ebenfalls stellen Trennflächen die primären Wasserwegigkeiten in sonst sehr gering durchlässigen Gebirgen dar. Einige Gebirge weisen zudem ein zeitabhängiges Verformungsverhalten bei gleichen Spannungsmilieus auf. Diese Verformungen werden Kriechen genannt. Innerhalb des Kriechprozesses lagern sich die Spannungen um, werden jedoch nicht abgebaut. Für Salzgestein kann davon ausgegangen werden, dass die Trennflächenscharen keine mechanische und hydraulische Relevanz infolge der Kriechfähigkeit haben.

Die mechanischen Eigenschaften hängen des Weiteren von der in-situ Temperatur ab. Hohe Temperaturen verschlechtern in einem geringen Maß die mechanischen Eigenschaften des Gesteins. In kriechfähigen Gebirgen wird die Kriechfähigkeit des Gebirges verstärkt.

In den gering durchlässigen Wirtsgesteinen kann aufgrund einer geologischen Vorbelastung der Porendruck höher sein, als er in der Einlagerungsteufe zu erwarten wäre. Das bedeutet eine Reduktion der Tragfähigkeit des Gebirges im Bereich von aufgefahrenen Hohlräumen, da sich der Porendruck in den Hohlraum hinein abbaut.

3.4.2.3 Konvergenzen

Von maßgebender Bedeutung für die Standsicherheit und damit die mögliche Offenhaltungsdauer eines Hohlräume ist die Ausbildung eines Gebirgstragrings. In standfestem, nicht kriechfähigem Gebirge kann sich unter bestimmten Voraussetzungen ein Gleichgewichtszustand im Gebirge aufbauen. Hierzu ist eine Konvergenz des Hohlräume erforderlich. In kompetentem Gebirge ist dann ggf. keine Ausbausicherung erforderlich. Bei geringerer Festigkeit des Gebirges ist der Hohlraum mit einem Ausbau zu sichern. Kriechfähiges Gebirge, insbesondere Salzgestein, strebt einen mehr oder weniger ausgeprägten isotropen Spannungszustand an. Nur bei einem hohen Ausbauwiderstand, der den Überlagerungsdruck aufnehmen kann, ist langfristig ein Gleichgewichtszustand im System Gebirge – Ausbau möglich. Wird kein oder nur ein geringer Ausbauwiderstand vorgesehen, so entwickeln sich die plastischen Zonen immer weiter in das Gebirge, wodurch die geologische Barriere degradiert.

3.4.2.4 Schädigungsrückbildung/Selbstverheilungseigenschaften

Wie bereits erwähnt, treten bei Hohlraumaufrichtungen im hohlraumnahen Gebirgsbereich plastische Zonen auf, die infolge der Mikrorissbildung bzw. der Auflockerungen eine höhere Durchlässigkeit besitzen. In kriech- und quellfähigen Wirtsgesteinen, Salzgestein und Ton/Tonstein, können diese Eigenschaften zu einer Schädigungsrückbildung führen. Inwieweit dies zu einer Verheilung führt, ist noch nicht abschließend geklärt. Im Salzgestein ist für die Schädigungsrückbildung der Abbau der Deviatorspannungen erforderlich. Im Ton und in geringerem Maße im Tonstein erfolgt diese Verheilung durch die quellbedingte Volumenvergrößerung der Minerale.

3.4.2.5 Steifigkeit der Verschlussbauwerke

Das Verschlussbauwerk besteht je nach geologischer Barriere aus einem abdichtenden Element und/oder einem Widerlager. Das Widerlager ist in allen Wirtsgesteinen, mit Ausnahme des kristallinen Hartgesteins, steifer als das umgebende Gebirge, wobei die Größenordnung unterschiedlich ist. Diese Eigenschaft beeinflusst die Spannungsverteilung im Gebirge, welche die weitere Entwicklung der ALZ bestimmt. Durch die höhere Steifigkeit des Widerlagers werden Spannungen aus dem Gebirge abgetragen. Dies hat insgesamt einen positiven Effekt auf die Spannungsverteilung in der Nähe des Verschlussbauwerks.

3.4.2.6 Tragfähigkeit der Stützbauwerke

Die mechanischen Eigenschaften der Stützbauwerke werden durch die Art des verwendeten Betons, ihre Dicke und die genutzte Bewehrung bestimmt. Weiterhin haben Anker einen positiven Effekt auf die Tragfähigkeit des Ausbaus, da sie die Bildung eines Gebirgstragrings unterstützen. Bei der Planung des Tiefenlagers wird ein an den jeweiligen

Standort angepasstes Ausbaukonzept verwendet. Im Verlauf der Offenhaltung kann aufgrund der Alterung von Beton die Tragfähigkeit der Stützbauwerke abnehmen. Sie kann durch Sanierungsmaßnahmen wiederhergestellt werden.

3.4.2.7 Auswirkungen des Versatzes auf die Spannungsverteilung im Tiefenlager

Auf die Verteilung der Spannungen im Bereich der Einlagerungstrecken hat die Wahl des Versatzes einen großen Einfluss. Im Wirtsgestein Steinsalz wird Salzgrus verwendet; in den Wirtsgesteinen Ton, Tonstein und kristallinem Hartgestein ein auf Bentonit basierender Versatz.

Salzgrus wird locker eingebaut, sodass zunächst kein Gegendruck zum Gebirgsdruck aufgebaut wird, d. h. weist eine geringe Steifigkeit auf. Der Gebirgsdruck baut sich erst auf, wenn durch die Konvergenz des Gebirges der Salzgrus kompaktiert wird. Dabei werden durch die Kriechfähigkeit des Salzgruses die Dichte erhöht und verbliebene Porenräume geschlossen.

Bentonit weist ebenfalls eine geringe Steifigkeit auf. Bei Zutritt von Wasser werden Wassermoleküle in die Zwischenschichten der Tonminerale eingelagert, der Bentonit quillt. Bei behinderter Quelldehnung bildet sich ein Quelldruck aus, der einen Gegendruck zu dem Gebirgsdruck erzeugt und somit vorhandene Risse im Versatz schließen kann.

3.4.3 Thermische Einflussfaktoren

Mit der Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle entstehen Temperaturfeldänderungen im Versatz, im Verschlussbauwerk und im Wirtsgestein. Diese Temperaturfeldänderungen sind abhängig von den thermischen Eigenschaften der Materialien, d. h. der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität.

Die Wärmekapazität beschreibt die Menge an Energie, die der jeweilige Stoff pro Kilogramm bei einer Temperaturänderung von 1 K aufnehmen bzw. abgeben muss. Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt den Strom an Wärme durch das Material aufgrund der Wärmeleitung. Durch den Eintrag von Wärme dehnen sich die Materialien aus, was der thermische Ausdehnungsfaktor beschreibt.

3.4.3.1 In-Situ Temperatur

Die in-situ Temperatur der Wirtsgesteine ist ein wichtiger Auslegungsfaktor für das Tiefenlager. Sie ist von der Jahresdurchschnittstemperatur an der Erdoberfläche, der Teufenlage und den geothermischen Gradienten abhängig. Durch die im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinen gute Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes sind die in-situ Temperaturen bei gleichbleibender Teufe im Normalfall höher als bei den anderen Wirtsgesteinen. Frei fließendes Grundwasser, wie es in kristallinen Hartgesteinen zu erwarten ist, kann aufgrund seiner hohen Wärmekapazität für eine bessere Abführung der thermischen Energie führen. Es ist jedoch auch das primäre Transportmittel für Radionuklide.

3.4.3.2 Wärmefreisetzung durch den Zerfall der radioaktiven Reststoffe

Die Wärmefreisetzung der radioaktiven Reststoffe beeinflusst das mechanische Verhalten des Versatzes, des Verschlussbauwerks und des Wirtsgesteins. Durch die Wärme werden die Materialien im Allgemeinen plastischer, d. h. ihr E-Modul nimmt ab und das Material verformt sich bei geringerem Spannungsniveau deutlich stärker. Auch nimmt

die Kriechfähigkeit zu. Die Wärmemenge der radioaktiven Reststoffe je Behälter ist daher so ausgelegt, dass die im Standortauswahlgesetz §27, Abs. 4, festgelegte Grenztemperatur von 100 °C an der Behälteraußenfläche nicht überschritten wird. Dadurch lassen sich bei jedem Wirtsgestein ausreichend niedrige Wettertemperaturen erreichen, sodass die Grenzwerte nach der derzeit geltenden Bergverordnung für Arbeiten untertage eingehalten werden (vgl. KlimaBergV 09.06.1983). Die Wärmeentwicklung ist ein Schlüsselfaktor für die Auslegung des Tiefenlagers.

3.4.3.3 Abbindewärme des Zements

Beim Herstellungsprozess von Spritz- und Massenbeton entsteht durch das Abbinden Wärme. Diese hat Einfluss auf den Temperaturverlauf innerhalb des Tiefenlagers. Bei dem Ausbau ist dieser Einfluss gering, sodass er vernachlässigt werden kann. In dem Massenbeton der Verschlussbauwerke ist dieser Einfluss nicht zu vernachlässigen, da aufgrund des großen Volumens größere Temperaturdifferenzen auftreten. Der Einflussfaktor ist in wesentlichen während der Hydratationsphase und danach abnehmend relevant.

3.4.3.4 Grubenklima

Die Bewetterung durch den Schacht führt zu einer Abkühlung des Grubengebäudes. Diese kann der durch die Reststoffe und der Abbindewärme eingebrachten Wärmeenergie entgegenwirken. Jahres- und tagzeitliche Schwankungen der Wettertemperatur sollten durch eine Schachtheizung (oder Schachtklimatisierung) vermieden werden, da die tageszeitliche zyklische Beanspruchung zu Rissbildungen v. a. im Ausbau des Schachtes führen kann.

3.4.4 Hydraulische Einflussfaktoren

3.4.4.1 Grundwasser im Tiefenlagersystem

Die Fragestellung, ob und in welcher Menge Grundwasser im Tiefenlagersystem vorhanden ist, stellt einen Schlüsselfaktor für die Langzeitsicherheit dar. Radionuklide können sich im Wesentlichen über den Wasserpfad ausbreiten.

Freies Grundwasser ist bei den im Arbeitsbericht betrachteten Wirtsgesteinen nur in Steinsalz nicht vorhanden, da das Wirtsgestein im unverritzten Zustand sehr undurchlässig ist. Grundwasser muss hier nur bei Alternativszenarien berücksichtigt werden.

In Ton ist es in Form von stagnierendem Grundwasser im Porenraum anzutreffen. Aufgrund der Trennflächen können in Tonstein Porenräume miteinander verbunden sein, sodass sich ein langsamer Grundwasserstrom einstellt. Das kristalline Hartgestein ist aufgrund der offenen Klüfte ein Kluffgrundwasserleiter.

3.4.4.2 Durchlässigkeit des Wirtsgesteins, der plastischen Zonen und der geotechnischen Barrieren

Die Durchlässigkeit des Wirtsgesteins ist abhängig vom Porenvolumen und dem verbundenen Porenraum. Diese sind durch die Mineralogie und Genese der Wirtsgesteine bestimmt. Durch die Auffahrung von Hohlräumen im Gebirge kann es zusätzlich zu dieser primär vorhandenen Durchlässigkeit zu einer größeren Durchlässigkeit durch Rissbildung kommen. Die plastischen Zonen (bzw. Auflockerungszone im Salz) besitzen daher direkt um den Hohlraum herum eine höhere Durchlässigkeit.

Die Durchlässigkeit der geotechnischen Barrieren wird wie im Wirtsgestein durch den verbundenen Porenraum bestimmt. Barrieren aus Bentonit quellen bei Kontakt mit Wasser auf, was durch den dabei entstehenden Quelldruck dazu führt, dass evtl. vorhandene Risse verschlossen werden und die Permeabilität sinkt. Im Wirtsgestein Steinsalz wird die Permeabilität durch die Kompaktion des Salzgruses reduziert, da dabei der Porenraum im Versatz reduziert wird.

3.4.4.3 Porenwasserdruck

Wie im Abschnitt 3.4.2.1 gezeigt, ist der Porendruck abhängig davon, wie hoch die Druckhöhe des Grundwassers ist. Er hat einen großen Einfluss auf die mechanische Festigkeit des Wirtsgesteins.

3.4.4.4 Hydrochemie

In der den Untersuchungen zugrunde gelegten Teufe des Tiefenlagers sind saline Wässer zu erwarten. Im kristallinen Hartgestein können die Wässer auch brackig sein. Die hydrochemischen Einflussfaktoren sind stark standortabhängig und werden daher bei der Entwicklung des Normalszenarios vernachlässigt.

3.4.5 Chemische Einflussfaktoren

Bei den Widerlagern sowie den zementgebundenen Stützbauwerken können aufgrund eines hohen pH-Werts des verwendeten Zements chemische Reaktionen zwischen den Bauwerken und dem Wirtsgestein stattfinden.

Die mögliche Korrosion von Behältern innerhalb des Offenhaltungszeitraums bildet Gase, welche die anderen Barrieren durchdringen können. Auch der Beton des Verschlussbauwerks und der Stützbauwerke kann korrodieren, wodurch sich die mechanischen Eigenschaften des jeweiligen Bauwerks negativ verändern können. Da die chemischen Prozesse nur sehr langsam ablaufen und auch nur ein geringer Einfluss auf die gebirgsmechanische Entwicklung des Tiefenlagers zu erwarten ist, werden die chemischen Einflussfaktoren im Normalszenario vernachlässigt.

3.4.6 Radiologische Einflussfaktoren

Die ionisierende Strahlung der eingelagerten Reststoffe wirkt nur im Nahbereich des Behälters, welcher als Abschirmbehälter ausgelegt ist. Sie hat keine Auswirkung auf die Standsicherheit und ist bei der Szenarientwicklung somit vernachlässigbar. Durch Radiolyse können am Behälter geringe Mengen an Wasserstoff entstehen, die jedoch im Betrachtungszeitraum von untergeordneter Relevanz sind.

3.4.7 Weitere Einflussfaktoren

Weitere Einflussfaktoren, die bei der Entwicklung des Normalszenarios als gegeben vorausgesetzt werden, sind die Verfügbarkeit einer funktionierenden Technik zur Wartung der Grubenhohlräume, zur eventuellen Rückholung der radioaktiven Reststoffe und zum Versatz der Grubenhohlräume. Des Weiteren werden die Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal sowie funktionierende Entscheidungsstrukturen, mithilfe derer eine Entscheidung zur Rückholung oder dem Versatz des Tiefenlagers getroffen werden kann, vorausgesetzt.

3.5 Trendprojektion der einzelnen Einflussfaktoren und Erstellung von Konsistenzmatrizen

Anhand der beschriebenen Einflussfaktoren sind von den Autoren des vorliegenden Berichts Trendprojektionen für die Entwicklung der einzelnen Einflussfaktoren erstellt worden. Die wesentlichen und sich über den Betrachtungszeitraum verändernden Einflussfaktoren sind darauf für jedes betrachtete Wirtsgestein in eine Konsistenzmatrix eingetragen worden (siehe beispielhaft in Tabelle 3-1). In dieser wird bewertet, wie stark sich der jeweilige Faktor auf die Entwicklung des Tiefenlagers auswirkt.

Tabelle 3-1 Beispiel einer Konsistenzmatrix zur Bestimmung von Trendprojektionen

Einflussfaktoren	Einflussfaktor 1	Einflussfaktor 2	...		Einflussfaktor n-1	Einflussfaktor n	Summe	Minimal Wert	Maximal Wert
	Einflussfaktor 1		3			0	0	10	
Einflussfaktor 2	0				0	0	11		
...									
Einflussfaktor n-1	0	0				2	3		
Einflussfaktor n	0	3			0		18		
Summe	5	8			2	7			
Minimal Wert									
Maximal Wert									

LEGENDE	
Bewertung	Bedeutung
0	kein oder wenig Einfluss
1	wenig oder zeitlich verzögerter Einfluss
2	mittlerer Einfluss
3	starker bis sehr starker Einfluss

In den Zeilen der Konsistenzmatrix wird jeweils die aktive Beeinflussung des Faktors auf einen anderen Faktor dargestellt, in den Spalten die passive Beeinflussung des jeweiligen Faktors (wie wird der Faktor durch einen anderen beeinflusst). Zur Bewertung wurde eine Skala von 0 bis 3 verwendet, wobei 0 für keine oder wenige Beeinflussung, 1 für einen wenig oder zeitlich verzögerten, 2 für einen mittleren und 3 für einen starken bis sehr starken Einfluss steht. In den jeweiligen Summen der Zeilen kann abgelesen werden, wie relevant der jeweilige betrachtete Faktor für die Tiefenlagerentwicklung ist und in den Spalten welcher Faktor bei der Entwicklung am stärksten beeinflusst wird. Faktoren, bei denen sich die Entwicklung des Tiefenlagers nicht oder nur sehr wenig ändert, wurden bei der Erstellung der Konsistenzmatrizen nicht berücksichtigt.

3.6 Normalentwicklung der Tiefenlagersysteme

Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über die zu erwartenden Zustandsänderungen im zuvor definierten Tiefenlagersystem, d. h. über die sogenannte Normalentwicklung. Nachdem die für die jeweiligen Wirtsgesteine wichtigen Einflussfaktoren beschrieben werden, gehen die folgenden Abschnitte näher auf die Zustandsänderungen ein und

erläutern die Relevanz der einzelnen Prozesse für die Normalentwicklung je nach Wirtsgestein. Die Tabelle 3-2 zeigt die Ausprägung einzelner Einflussfaktoren in den jeweiligen Wirtsgesteinen, die in ihren entsprechenden Abschnitten erläutert werden.

Tabelle 3-2 Gebirgsmechanische und -hydraulische Eigenschaften der potentiellen Wirtsgesteine – Einflussfaktoren auf die Normalentwicklung

Einflussfaktor	Steinsalz	Ton	Tonstein	Kristallines Hartgestein
<i>Primärspannungszustand</i>	isotrop	isotrop bis schwach anisotrop	stark anisotrop	anisotrop
<i>Steifigkeit und Kohäsion</i>	mittel	sehr gering	gering	sehr hoch
<i>Plastizität und Kriechenschaften</i>	kriechfähig	plastisch / kriecht	gering plastisch	spröde
<i>Trennflächensystem</i>	nicht relevant	latent vorhanden	stark ausgeprägt	untersch. stark ausgeprägt
<i>Gebirgseigentragfähigkeit (langzeitig)</i>	gering	gering	mittel	hoch
<i>Konvergenzen</i>	groß	groß	mittel	gering
<i>Aufflockerungszone</i>	groß	groß	groß	gering
<i>Grundwasser</i>	keins	stagnierend	stagnierend, evtl. Fließpfade an Trennflächen	Kluftgrundwasserleiter

Die Normalentwicklung des generischen Tiefenlagers wird als Normalszenario zusammengefasst. Sie lässt sich anhand von Berechnungen validieren und bei Bedarf anpassen. Eine weitere Validierung der Modelle ermöglichen gekoppelte thermo-mechanisch-hydraulische Modellierungen. Sie können an Analogmodellen kalibriert und dadurch vertrauenswürdiger werden.

Die im vorliegenden Arbeitsbericht definierten Normalszenarien für die Tiefenlagermodelle der unterschiedlichen Wirtsgesteine dienen als Grundlage für die Entwicklung der Monitoringkonzepte in Kapitel 4.

3.6.1 Normalszenario eines Tiefenlagers im Steinsalz

Die Beschreibung des Normalszenarios Steinsalz beginnt mit der Erläuterung der relevanten Einflussfaktoren (s. Abschnitt 3.6.1.1) und den wesentlichen Verknüpfungen untereinander. Anschließend stellen weitere Abschnitte die Normalentwicklungen für den Infrastrukturbereich, den Nahbereich des Verschlussbauwerks und den Nahbereich der Einlagerungsstrecke dar.

Steinsalz kommt natürlich in steiler und flacher Lagerung vor. Da der wesentliche gebirgsmechanische Unterschied in der Komplexität des jeweiligen Vorkommens liegt und sich dieses im Nahbereich im Idealfall nicht weiter unterscheidet, wird nur eine gemeinsame Projektion für beide Lagerungstypen durchgeführt.

3.6.1.1 Relevante Einflussfaktoren in einem Tiefenlager in Steinsalz

Steinsalz ist ein Gebirge, das sich aufgrund seiner hohen Kriechfähigkeit grundsätzlich anders verhält als die Gebirge Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein, wobei die genaue Ausprägung dieser Eigenschaft von der mineralischen Zusammensetzung, der Feuchtigkeit, der Kristallinität und der Teufenlage abhängig ist.

Dadurch, dass bei Steinsalz auf einen Ausbau aufgrund der zu erwartenden hohen Belastungen verzichtet wird, sind bei der Normalentwicklung die Entwicklung des Lichtraumprofils in der Infrastrukturstrecke und der Querschnitt der Einlagerungsstrecke zu berücksichtigen. Diese werden durch die volumetrische Dehnung, also das Kriechen des Wirtsgesteins beeinflusst. Sie sind direkt abhängig von den deviatorischen Spannungen und Spannungsänderungen im Wirtsgestein, die aus den untertägigen Aufahrungen resultieren. Infolge der Deviatorspannungen entstehen insbesondere im Nahbereich der Grubenhohlräume Auflockerungszonen (ALZ), die aufgrund ihres Mikrorissinventars eine höhere Permeabilität als das unverritzte Gebirge aufweisen. Mit zunehmender Standzeit des Hohlraums entwickeln sich die Auflockerungszonen weiter in das Gebirge hinein.

Für das Normalszenario wird angenommen, dass die Verschlussbauwerke der Einlagerungsstrecken aus Salzbeton hergestellt werden. Dieses Material kann die Funktionalität als Widerlager sowie als Abdichtung erfüllen und ist gegenüber NaCl-Lösungen resistent. Während der Hydratationsphase tritt das sogenannte autogene Schwinden des Betons auf. Durch diese Volumenverringerung bedingt, löst sich der Betonkörper lokal von den Hohlraumwandungen ab und es entstehen Risse im Beton. Diesem Sachverhalt kann einerseits durch Injektionen Rechnung getragen werden, andererseits tritt mit dem Aufkriechen des Salzgesteins eine Verheilung in der Kontaktzone zwischen Betonkörper und Wirtsgestein ein. Alternativ kann das Verschlussbauwerk auch aus MgO-Beton erstellt werden, wenn in der zufließenden Lösung ein ausreichend hoher $MgCl_2$ -Gehalt vorhanden ist. Der Einsatz befindet sich noch im Forschungsstadium, sodass er in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt wird.

Der Versatz Salzgrus bezeichnet locker gelagertes Salz in unterschiedlicher Körnung. Es weist unmittelbar nach dem Versatz zunächst eine sehr große Porosität verbunden mit einer geringen Einbaudichte auf. Durch die Kriechfähigkeit des Salzes und der daraus folgenden Konvergenz des Gebirges in der Einlagerungsstrecke kompaktiert es. Dabei werden die Porosität des Salzgruses und damit auch die Permeabilität verringert. Mit der Kompaktion bauen sich Spannungen und somit ein Ausbauwiderstand auf, der im günstigsten Fall auch zu einer Verheilung der Auflockerungszone führt.

Die Wärmemenge aus den eingelagerten Reststoffen hat direkten Einfluss auf die mechanischen Kriechparameter des Steinsalzes und des Salzgrusversatzes. Die Kriechfähigkeit steigt durch die höhere in-situ Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins ist im Vergleich zu den anderen Wirtsgesteinen sehr gut, sodass die Wärme weiter in das Gebirge eingeleitet wird und kaum Wärmestau entsteht. Poröser Salzgrus hat eine schlechte Wärmeleitfähigkeit, die aber mit der Kompaktion zunimmt und am Ende ähnliche Werte wie das Gestein erreicht. Die Wassertemperatur und die Feuchtigkeit der Bewitterung werden von der in-situ Temperatur beeinflusst.

Anhand der Konsistenzmatrix (siehe Anhang 1) hat sich die eingebrachte Wärmemenge als der Einflussfaktor herausgestellt, der am meisten Prozesse aktiv beeinflusst. Die Spannungsänderungen im Wirtsgestein werden wiederum von vielen Prozessen passiv beeinflusst. Da diese einen Einfluss auf die Entwicklung der Konvergenzen und der Permeabilität der Auflockerungszone haben, sind sie für die Entwicklung der Funktionalität des Tiefenlagers auch als aktiver Einflussfaktor relevant.

3.6.1.2 Normalentwicklung des Bergwerks im Infrastrukturbereich

Die Normalentwicklung im Infrastrukturbereich beginnt mit der Auffahrung der Monitoringstrecken und dem Anlegen des Infrastrukturbereichs untertage. Weil die Monitoringstrecken einen deutlich geringeren Ausbruchsquerschnitt haben, werden für die Normalentwicklung nur die Infrastrukturstrecken betrachtet (siehe hierzu Stahlmann et al. 2015a).

Das Salzgestein hat nur eine sehr geringe Porosität und keine offenen Klüfte, sodass kein zusammenhängendes Grundwasser existiert. Das Tiefenlager ist daher im Normalszenario trocken.

Im primären Zustand, d. h. vor der Auffahrung von Strecken und Grubenbauen, herrscht infolge der Genese ein isotroper Spannungszustand. Mit der Auffahrung von Hohlräumen entwickeln sich, wie oben bereits erwähnt, Deviatorspannungen, die zum Kriechen des Salzgesteins führen. Die Strecken werden bei Bedarf, zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit, mit Ankern gesichert. Ein Ausbau ist aufgrund der Kriechfähigkeit des Gebirges und der daraus resultierenden hohen Beanspruchung nicht vorgesehen. Die Kriechrate, die mit dem Parameter der volumetrischen Dehnung beschrieben wird, ist neben der Teufe von der Zusammensetzung des anstehenden Salzgesteins abhängig. Wie oben bereits erwähnt, wird die Kriechrate auch von der Temperatur beeinflusst, sodass ein im Temperaturfeld der radioaktiven Abfälle liegender Gebirgsbereich höhere Kriechraten und damit auch größere Hohlraumkonvergenzen aufweisen wird.

Infolge der Offenhaltung der nicht oder nur geringfügig gesicherten Infrastrukturstrecken und -räume können die Deviatorspannungen im Gebirge nicht abgebaut werden. Daraus resultiert ein sekundäres oder ggf. auch tertiäres Kriechen, das zu andauernden Konvergenzen des Hohlraums bis hin zu Abschaltungen an den Hohlraumwandungen führt. Aus Gründen der Arbeitssicherheit sind diese aufgelockerten Bereiche regelmäßig zu berauben. Durch den Kriechprozess entwickeln sich die Auflockerungszonen in das Gebirge hinein, die Integrität der geologischen Barriere degradiert mit zunehmender Zeit der Offenhaltung. Diese Entwicklung terminiert die Offenhaltungsphase aus gebirgsmechanischen Gründen. Die Verteilung der Deviatorspannungen um den Hohlraum ist u.a. auch von der Querschnittsform abhängig. Ein Kreisquerschnitt ist gebirgsmechanisch vorteilhafter als ein Rechteckquerschnitt. Mit der Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager werden die ggf. vorhandene Ausbausicherung (Systemankerung) geraubt und die Strecke qualifiziert versetzt.

3.6.1.3 Normalentwicklung des Bergwerks im Nahbereich des Verschlussbauwerks

Nach der Auffahrung der Einlagerungsstrecken, dem Verbringen der ENCONs und dem Versetzen der Strecke mit Salzgrus wird das Verschlussbauwerk errichtet. In einem ersten Schritt wird hierfür die Auflockerungszone am Standort des Bauwerks nachgerissen.

Durch die chemische Reaktion der Zementphasen entsteht beim Aushärteprozess des Massenbetons Wärme, die zur Expansion des Betonkörpers führt. Darüber hinaus erwärmen sich die angrenzenden Gebirgsbereiche. Im weiteren Hydratationsprozess tritt, wie oben bereits erwähnt, ein Schwinden, d. h. eine Kontraktion des Betonkörpers auf. Infolge der hieraus resultierenden Zugspannungen entstehen Risse im Beton und ein lokal mehr oder weniger ausgeprägter Spalt zwischen dem Betonkörper und der Hohlraumwandung. Der Spalt kann nachverpresst werden, dennoch bildet sich zunächst eine Zone höherer Permeabilität aus (vgl. Stahlmann et al. 2015b, S. 373).

Mit dem Aufkriechen des Gebirges auf den Betonkörper schließt sich der Spalt und das Verschlussbauwerk erreicht seine Funktionalität. Inwieweit sich die Risse im Beton schließen, ist noch Gegenstand der Forschung. Im vorliegenden Bericht wird davon ausgegangen, dass das Rissinventar keine hydraulische Wirksamkeit aufweist. Aufgrund der im Vergleich zum Salzgestein höheren Steifigkeit des Verschlussbauwerks sind Spannungskonzentrationen im Standortbereich zu erwarten, die sich positiv auf die Verheilung der Auflockerungszone auswirken. Mit den Spannungskonzentrationen können sich allerdings auch Zugspannungsbereiche an den nicht gestützten Endflächen des Verschlussbauwerks entwickeln, die in den Untersuchungen zu berücksichtigen sind.

3.6.1.4 Normalentwicklung des Bergwerks im Nahbereich der Einlagerungsstrecke

Beim Versetzen der Strecke mit Salzgrus lässt sich aufgrund seiner Anfangsporosität und der anschließenden Eigenkompaktion die Bildung eines Firstspalts nicht vermeiden. In der Einlagerungsstrecke nimmt die Konvergenz durch den weichen Versatz zunächst nur geringfügig ab. Durch die eingetragene Wärme der eingelagerten Reststoffe erhöht sich die Konvergenz zusätzlich. Mit dem Aufkriechen des Gebirges kompaktiert der Salzgrus, die Porosität sowie die Permeabilität nehmen ab und die Steifigkeit nimmt zu. Erreicht der Ausbauwiderstand die Größe des Gebirgsdrucks, d. h. die Deviatorspannung ist vollständig abgebaut, ist davon auszugehen, dass der Salzgrus dem Salzgestein entsprechende Eigenschaften aufweist.

3.6.2 Normalszenario eines Tiefenlagers im Ton

Auch die Beschreibung des Normalszenarios Ton beginnt mit der Erläuterung der relevanten Einflussfaktoren und schließt mit der Vorstellung der Normalentwicklungen Infrastrukturbereich, Nahbereich Verschlussbauwerk und Nahbereich Einlagerungsstrecke ab.

Ton ist im Gegensatz zum Tonstein ein Lockersediment, das sich deutlich im Verhalten von Tonstein unterscheidet. Der Übergang zwischen Ton und Tonstein verläuft in der Natur kontinuierlich. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf die jeweiligen Endglieder unverfestigter Ton und hochkonsolidierter Tonstein.

3.6.2.1 Relevante Einflussfaktoren in einem Tiefenlager in Ton

Ton zeichnet sich durch seine sehr geringe Eigentragsfähigkeit aus, hat eine geringe Kohäsion sowie einen geringen Reibungswinkel und weist ein stark plastisches Materialverhalten auf. Hohlräume in Ton sind nur für kurze Zeit eigentragsfähig und müssen daher mit einem steifen Ausbau gesichert werden. Der Ausbau muss so dimensioniert sein, dass er den vollständigen Gebirgsdruck ohne starke Verformung aufnehmen kann (starrer Ausbau).

Aufgrund des Ausbaus sind innerhalb des Betrachtungszeitraums keine Konvergenzen zu berücksichtigen. Geometrische Einflussfaktoren sind die aus dem Quellen des Bentonits bestimmten Abmessungen des Verschlussbauwerks. Das Widerlager ist ausreichend zu dimensionieren, sodass die horizontale Verschiebung des Verschlussbauwerks zu vernachlässigen ist, da sich ansonsten kein Quelldruck aufbauen kann.

Beim Auffahren der Hohlräume entsteht eine plastische Zone, die aufgrund des leicht anisotropen Spannungszustands sowie der Schichtung im Ton schwach anisotrop ausgeprägt ist. Die Spannungsänderungen im Wirtsgestein sind für die geometrische Ausprägung dieser Zone relevant. Der Spannungszustand wird von vielen Einflussfaktoren beeinflusst, hat aber aktiv nur schwachen Einfluss auf die Alterung des Widerlagers und des Ausbaus in der Infrastrukturstrecke. Die Alterung des Ausbaus und damit die Degradation der Steifigkeit und der Festigkeit ist in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Eine Sanierung ist erforderlich, wenn die Steifigkeit und die Festigkeit nicht mehr ausreichend groß sind.

Der Quelldruck des Bentonit-basierten Versatzes und des Abdichtungselements ist entscheidend für die Abdichtung der aufgefahrenen Hohlräume. Auch im Wirtsgestein selber kann es bei Aufsättigung einen Quelldruck geben, der dann zusätzlich auf den Ausbau wirken würde. Dieser Quelldruck ist von den vorhandenen Tonmineralien sowie von dem Wasserdargebot in Versatz, Abdichtungselement und Wirtsgestein abhängig. Durch den Quelldruck wird die Durchlässigkeit in dem jeweiligen betrachteten Element reduziert. Das Widerlager im Verschlussbauwerk ist entscheidend für den Aufbau eines Quelldrucks. Es kann mit der Zeit durch Alterung an Steifigkeit und Festigkeit verlieren.

Im Wirtsgestein selber ist Grundwasser vorhanden, welches aber aufgrund der hydraulisch nicht verbundenen Poren im Porenraum stagniert. Trennflächen sind latent vorhanden, d. h. im ungestörten Zustand hydraulisch nicht wirksam. Ton weist dadurch eine geringe Permeabilität auf. Die marine Entstehungsgeschichte von ausreichend mächtigen und homogenen Tonschichten erlaubt die Annahme eines salinaren Grundwasserchemismus, der sich im Betrachtungszeitraum nicht ändert.

Die Wärmemenge der eingelagerten Reststoffe ist die größte aktive Beeinflussungsgröße. Diese hat starken Einfluss auf z. B. die Wassergehalte des Versatzes und des angrenzenden Wirtsgesteins, da auch bei Temperaturen unter 100 °C eine Dampfphase entsteht. Weiterhin hat die Zerfallswärme Einfluss auf die in-situ Temperatur der Einlagerungsfelder, die maßgeblich von den thermischen Parametern des Bentonitversatzes und des Tons beeinflusst wird. Die zu erwartende Wettertemperatur im Nahfeldbereich wird im Wesentlichen über die Ausbreitung dieser Wärme beeinflusst. Auch die Feuchtigkeit im Wetterstrom ist direkt von der Wärme abhängig, da das Feuchtigkeitsaufnahmevermögen der Wetter mit der Wettertemperatur steigt.

Wie im Steinsalz hat sich bei der Erstellung der Konsistenzmatrix (siehe Anhang 2) die Wärmemenge als der wichtigste aktive Einflussfaktor herausgestellt. Auch die Entwicklung des Quelldrucks im Wirtsgestein hat einen Einfluss auf die Funktionalität des Tiefenlagers. Die Spannungsänderungen im Wirtsgestein werden von vielen Prozessen beeinflusst. Durch den steifen Ausbau haben diese aber nur einen kleinen aktiven Anteil an der Entwicklung des Tiefenlagers.

3.6.2.2 Normalentwicklung des Bergwerks im Infrastrukturbereich

Durch die Prämisse der Wartungsfreiheit in der Betriebsphase und aufgrund der Teufenlage ist ein Ausbau mit einer hohen Steifigkeit vorzusehen. Die Steifigkeit des Ausbaus übersteigt die des Gebirges, sodass der Ausbau Spannungen aus dem Gebirge auf sich zieht. Vor dem Ausbau der Strecke sorgt die geringe Festigkeit des Tons dafür, dass sich die Schädigung durch die Auffahrung kontinuierlich in das Gebirge fortsetzt. Nach Einbau des Ausbaus setzt sich diese Schädigung nicht weiter fort. Aufgrund des sehr plastischen Verformungsverhaltens von Ton läuft die Schädigung weitgehend ohne die Bildung diskreter Trennflächen ab, sodass die Auswirkung auf die Durchlässigkeit des Tons für das Ziel der Langzeitsicherheit nicht zu groß ist.

Eine regelmäßige Überprüfung des Ausbaus ist aufgrund der zu erwartenden Spannungskonzentrationen erforderlich. Die Alterung des verwendeten Betons ist zu berücksichtigen. Durch die Methodik des Life-Cycle-Engineerings können eine durch Alterung verringerte Steifigkeit und Festigkeit detektiert und die Wartung des Ausbaus vorgesehen werden.

An der Kontaktzone zwischen Ausbau und Wirtsgestein laufen chemische Prozesse ab. Es bildet sich eine Kontaktzone aus, in der im Wirtsgestein Minerale umgewandelt werden. Diese Kontaktzone ist vor der Überführung in ein Endlager kritisch zu bewerten und sollte keinen Zweifel an der Integrität des Tons lassen.

3.6.2.3 Normalentwicklung des Bergwerks im Nahbereich des Verschlussbauwerks

Bei der Errichtung des Verschlussbauwerks im Ton kann aufgrund der geringen Eigentragfähigkeit des Tongebirges nicht davon ausgegangen werden, dass ein vollständiger Rückbau des Ausbaus möglich ist. Schlitze durch den Ausbau in das Gebirge sorgen für einen direkten Kontakt zwischen dem Bentonit des Abdichtungselements und dem Gebirge.

Das Widerlager besteht aus einem Beton aus Niedrig-pH-Zement. Bei der Herstellung muss berücksichtigt werden, dass der Beton beim Aushärten schwindet und der so entstehende Spalt ggf. nachverpresst werden muss. Aufgrund des Quelldrucks des Bentonits und der hohen Steifigkeit des Widerlagers werden die Spannungen hauptsächlich durch das Widerlager abgetragen. Das Widerlager muss daher ausreichend dimensioniert sein. Das Gebirge wird durch die Plastizität relativ schnell einen kraftschlüssigen Verbund mit dem Widerlager aufbauen. So entsteht ein zusätzlicher Pfeiler im Tiefenlagerbergwerk. Die Interaktion des Widerlagers mit dem Wirtsgestein ist ein wichtiger Teil für die Beurteilung der gebirgsmechanischen Machbarkeit.

Durch die Auffahrung der Einlagerungsstrecken wird das hydraulische Gleichgewicht gestört. Zwischen dem Wirtsgestein und dem Hohlraum ergibt sich ein hydraulischer Gradient. Aufgrund der geringen Permeabilität erfolgt der Transport hauptsächlich über Diffusion. Nach dem Einbau des Abdichtungselements kann der Bentonit mit dem im Ton vorhandenen Grundwasser einen Quelldruck aufbauen und damit die verbleibenden Hohlräume verschließen. Durch die im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinen schlechte Wärmeleitfähigkeit des Gebirges unterliegt das Verschlussbauwerk geringeren Temperaturen als bei einem Tiefenlager in Steinsalz. Die Temperatur überschreitet die Grenze, bei der Bentonit seine Quellfähigkeit durch Illitisierung irreversibel verliert, nicht.

Die chemischen Interaktionen zwischen Ausbau, Bentonit und Wirtsgestein werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da diese nur sehr lokal wirken und geomechanisch von untergeordneter Relevanz sind.

3.6.2.4 Normalentwicklung des Bergwerks in den Einlagerungsstrecken

Beim Auffahren der Einlagerungsstrecke entsteht im Gebirge ein Porenwasserüberdruck. Die Spannungsumlagerungen überschreiten die Festigkeit des Gebirges, es bilden sich große plastische Zonen und eine ausgeprägte ALZ aus. Die Strecke wird mit einem ausreichend dimensionierten Ausbau gesichert.

Nach der Einlagerung eines Behälters wird Bentonit in Form von angefeuchteten kompaktierten Blöcken in die Einlagerungsstrecke eingebracht. Das Entfernen des Ausbaus ist risikobehaftet, er verbleibt daher in der Einlagerungsstrecke. Durch die Befeuchtung der Bentonitblöcke quillt der Bentonit. Nach der vollständigen Bestückung der Einlagerungsstrecke und sobald das Verschlussbauwerk errichtet ist, kann sich durch das begrenzte freie Volumen ein Quelldruck aufbauen, der dem auf den Ausbau wirkenden Gebirgsdruck entgegenwirkt. Im Gebirge erzeugt der Quelldruck einen Abbau des Spannungsdeviators, sodass die Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein reduziert werden und eine weitere Schädigung des Wirtsgesteins verhindert wird.

Die eingebrachte Wärme des Behälters führt an der Grenze vom Behälter zum Bentonit zu einer partiellen Austrocknung und einem Dampfüberdruck, der sich auf den direkten Nahbereich beschränkt. Im Gebirge tritt nach einiger Zeit eine Wiederaufsättigung auf. Durch die Plastizität und Quellfähigkeit schließen sich die Risse und die bei der Hohlraumerstellung entstandene ALZ wird hydraulisch unwirksam. Der Ausbau reduziert den Einfluss des salinaren Grundwassers auf das Quellvermögen des Bentonits.

3.6.3 Normalszenario eines Tiefenlagers im Tonstein

Das Vorgehen zur Beschreibung des Normalszenarios Tonstein orientiert sich an dem der bereits dargestellten Wirtsgesteine. Nach einer einleitenden Erläuterung der relevanten Einflussfaktoren folgt die Vorstellung der Normalentwicklungen Infrastrukturbereich, Nahbereich Verschlussbauwerk und Nahbereich Einlagerungsstrecke.

Tonstein ist im Gegensatz zum Ton ein Festgestein. Der Übergang zwischen Tonstein und Ton verläuft kontinuierlich. Je mehr Überlagerungsdruck auf den ursprünglichen Ton wirkt, desto stärker nimmt er die im Folgenden beschriebenen Gesteinseigenschaften an. Bei der Diagenese werden die Tonminerale eingeregelt, es bildet sich ein Trennflächensystem senkrecht zur Hauptspannung aus. Das Grundwasser in ungestörtem Tonstein ist kaum in Bewegung, im Trennflächensystem kann es mögliche Fließpfade geben. Dennoch ist die Durchlässigkeit sehr gering.

3.6.3.1 Relevante Einflussfaktoren in einem Tiefenlager in Tonstein

Tonstein hat eine mäßige Eigentragsfähigkeit. Durch die Teufenlage ergibt sich auch hier die Notwendigkeit eines Ausbaus, der darauf ausgelegt sein muss, die Eigentragsfähigkeit des Gebirges zu unterstützen. Dafür bietet sich die Verwendung eines sogenannten nachgiebigen Ausbaus an, der in gewissem Maße Verformungen im Gebirge zulässt, sodass sich ein Gebirgstragring ausbilden kann. Hierzu wird beispielsweise eine geschlitzte Spritzbetonschale mit einer Systemsicherung aus Ankern als Ausbausicherung eingesetzt.

Der Spannungszustand in Tonstein ist stark anisotrop. Die vertikale Spannung ist oft nicht die größte Hauptspannung, sondern eine aus der Tektonik bestimmte Horizontal-komponente. Das hat Auswirkungen auf die geometrische Ausprägung der ALZ im Gebirge, sodass sie bei Auslegung des Tiefenlagers zu berücksichtigen ist.

Bei der Normalentwicklung sind die folgenden geometrischen Faktoren zu betrachten: Die Abmessungen des Abdichtungsbauwerks, die mit dem dort entstehenden Quelldruck zusammenhängen, die Abmessungen des Betonwiderlagers und die horizontalen Verschiebungen des Widerlagers.

Der Spannungszustand im Wirtsgestein wird durch die Auffahrungen und Abdichtungen der Grubenhohlräume verändert. Er wird durch die Temperatur, den Quelldruck, sowie die Steifigkeit des Ausbaus und des Widerlagers beeinflusst.

Die Wärme der eingelagerten Reststoffe beeinflusst die meisten Prozesse im Tiefenlager. Durch sie kann im Versatz und im Wirtsgestein eine Gasphase entstehen, welche die Durchlässigkeit beeinflusst. Die thermischen Parameter des Wirtsgesteins und des Versatzes bestimmen die Verteilung der Wärme im Tiefenlagersystem. Die in-situ Wärme im Tiefenlager bestimmt wiederum die Wettertemperatur, von der auch die Feuchtigkeit des Wetters abhängt. Im Gegensatz dazu hat die Wärme aus dem Abbinden des Betons im Widerlager nur einen lokalen Einfluss.

Die Durchlässigkeit wird im Wesentlichen durch den Quelldruck im jeweilig betrachteten Bereich beeinflusst, da das Quellen vorhandene Wasserwegigkeiten im Porenraum abdichtet.

Der Quelldruck hängt u. a. vom Wassergehalt des betrachteten Bentonitelements ab. Die Menge des im offen gehaltenen Grubenbau gefassten Wassers hängt von der Durchlässigkeit (z. B. an Trennflächen) des Wirtsgesteins ab.

Durch die Offenhaltungsdauer sind die Alterungsprozesse der Widerlager und der Grubenausbauten zu berücksichtigen. Diese müssen im Zweifelsfall rechtzeitig saniert werden.

Auch bei Tonstein ist die eingebrachte Wärmemenge als der wichtigste aktive Einflussfaktor aus der Konsistenzmatrix (siehe Anhang 3) hervorgegangen. Die Spannungsänderungen im Wirtsgestein werden auch hier von vielen Prozessen beeinflusst. Diese haben nur einen geringen Einfluss auf die Entwicklung des Tiefenlagers und sind besonders bei der Dimensionierung des Ausbaus zu berücksichtigen.

3.6.3.2 Normalentwicklung des Bergwerks im Infrastrukturbereich

Die Prämisse der Wartungsfreiheit in der Betriebsphase erfordert aufgrund der Teufenlage einen steifen Ausbau. Ein Ausbaukonzept, das zunächst die Konvergenzen des Gebirges zulässt und nach Abklingen dieser durch einen steiferen Ausbau ersetzt wird, ist ebenfalls denkbar und gebirgsmechanisch sinnvoll. Dabei würden mit der Zeit die Konvergenzen abnehmen und das Gebirge eine gewisse Eigentragfähigkeit entwickeln. Die plastischen Zonen gehen weniger weit in das Gebirge hinein als im Ton, haben aber durch die geringere Plastizität und Quellfähigkeit des Wirtsgesteins eine höhere Durchlässigkeit. Die plastische Zone wächst nach der Erstellung des endgültigen Ausbaus innerhalb der Dauer der Offenhaltung nur geringfügig an. Die Geometrie der ALZ ist stark

abhängig von der Lage der Haupttrennflächenschar. In söhlig gelagerten Tonstein ist diese elliptisch um den Hohlraum mit der stärkeren Ausprägung in horizontaler Richtung ausgebildet.

Regelmäßige Überprüfungen des Ausbaus sind infolge der Spannungskonzentrationen notwendig. Regelmäßig zu überprüfen ist, ob durch Alterung die Steifigkeit und Festigkeit des Ausbaus reduziert wurden. Durch die Methodik des Life-Cycle-Engineerings können eine durch Alterung verringerte Steifigkeit und Festigkeit detektiert und die Wartung des Ausbaus vorgesehen werden.

3.6.3.3 Normalentwicklung des Bergwerks im Nahbereich des Verschlussbauwerks

Bei der Errichtung des Abschlussbauwerks im Tonstein können der Ausbau und die hydraulisch durchlässigeren Bereiche nahe der Hohlraumwandung entfernt werden. Das Widerlager besteht aus einem Beton aus Niedrig-pH-Zement. Bei seiner Herstellung muss berücksichtigt werden, dass Beton beim Aushärten schwindet, so dass der entstandene Spalt ggf. nachverpresst werden muss. Das Widerlager muss ausreichend dimensioniert sein, um die auflaufenden Spannungen aus dem Gebirge und dem Quelldruck des Bentonit abtragen zu können.

So entsteht ein zusätzlicher Pfeiler im Tiefenlagerbergwerk. Die Interaktion des Widerlagers mit dem Wirtsgestein und dem Abdichtungselement ist wichtiger Bestandteil für die Beurteilung der gebirgsmechanischen Machbarkeit. Die Abdichtung der Zone mit erhöhter Durchlässigkeit erfolgt, sobald das Abdichtungselement mit Wasser in Berührung kommt. Der Bentonit quillt dadurch auf, was zu einer Ausdehnung führt. Wird die Ausdehnung verhindert, sobald der Hohlraum komplett ausgefüllt ist, bildet sich ein Quelldruck aus. Dieser wirkt, neben der abdichtenden Wirkung, auch dem Gebirgsdruck entgegen.

Die chemischen Interaktionen zwischen Ausbau, Bentonit und Wirtsgestein werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da sie nur sehr lokal wirken und geomechanisch von untergeordneter Relevanz sind.

3.6.3.4 Normalentwicklung des Bergwerks in den Einlagerungsstrecken

Der Ausbau in Tonstein hat eine geringere Mächtigkeit als der in Ton. In besonders gut verfestigten Tonsteinen können für die relativ kurzzeitige Offenhaltung der Einlagerungsstrecken eine Ankerung und ein Gleitbogenausbau, der rückbaubar ist, ausreichen. Auf der sicheren Seite liegend wird dies im vorliegenden Bericht allerdings nicht weiterverfolgt. Nach der Einlagerung der Behälter werden die Strecken mit Bentonit versetzt. Dabei wird wie in Ton durch die Befeuchtung der Bentonitblöcke ein Quellen des Bentonits eingestellt. Sobald das Widerlager hergestellt ist und das frei verfügbare Volumen somit begrenzt ist, baut sich auch hier ein Quelldruck auf. Er bewirkt eine formschlüssige Füllung der Resthohlräume, und auch in geringem Maße eine Reduktion der ALZ um die Einlagerungsstrecke herum.

Durch die Wärme der eingelagerten Reststoffe kommt es in unmittelbarem Kontakt zum Behälter zur Austrocknung im Bentonitversatz. Das bewirkt an dieser Stelle eine zur Wasserphase zusätzliche Gasphase. Die Gasphase erhöht den Porenwasserdruck im Versatz. Damit die Abdichtung ausreichend ist, darf die Austrocknung des Versatzes nicht bis an das Wirtsgestein herangehen.

3.6.4 Normalszenario eines Tiefenlagers im kristallinen Hartgestein

Unter dem Begriff „kristallines Hartgestein“ werden alle für eine Tiefenlagerung geeigneten plutonischen (z. B. Granit) und mittel bis stark metamorphe Gesteine (z. B. Gneis) zusammengefasst. Das Vorgehen zur Beschreibung des Normalszenarios kristallines Hartgestein orientiert sich an dem der bereits dargestellten Wirtsgesteine. Nach einer einleitenden Erläuterung der relevanten Einflussfaktoren folgt die Vorstellung der Normalentwicklungen Infrastrukturbereich, Nahbereich Verschlussbauwerk und Nahbereich Einlagerungsstrecke.

3.6.4.1 Relevante Einflussfaktoren in einem Tiefenlager in kristallinem Hartgestein

Kristallines Hartgestein ist mechanisch fest, hat eine hohe Steifigkeit und Eigenträgfähigkeit. Durch das vorhandene Trennflächensystem müssen die Hohlräume ggf. geankert werden. Es sind nach der Sicherung keine maßgeblichen Änderungen in den Abmessungen der Grubenbauten zu erwarten. Die durch die Auffahrungen hervorgerufenen Spannungsänderungen im Wirtsgestein haben keine Relevanz für die Entwicklung des Tiefenlagers. Wichtig sind die Abmessungen des Abdichtungsbauwerks, damit an dieser Stelle der aufgefahrene Hohlraum vollständig abgedichtet ist. Für diese Abdichtung ist ein Quelldruck unabdingbar, für dessen Aufrechterhaltung ein Widerlager erforderlich ist. Die Funktion des Widerlagers kann nur erfüllt werden, wenn ein ausreichender Kontakt zwischen dem Wirtsgestein und dem Widerlager vorhanden ist, sodass das Betonschwinden berücksichtigt werden muss. Sind die Steifigkeit und die Festigkeit des Widerlagers infolge Korrosion für den in der Einlagerungsstrecke und im Abdichtungselement entstehenden Quelldruck nicht mehr ausreichend, zeigt sich dies durch horizontale Verschiebungen des Widerlagers in Richtung der offengehaltenen Grubenhohlräume. Der für die Normalentwicklung sehr relevante Quelldruck wird dadurch abgebaut und die Funktionalität der Abdichtung infrage gestellt.

Die Verteilung der Wärmemenge aus den eingelagerten Reststoffen wird durch die thermischen Parameter des Wirtsgesteins und des Versatzes bestimmt. Die Wärmemenge aus der Betonage des Widerlagers hat im Vergleich dazu nur einen geringen Einfluss auf die in-situ Temperatur des Wirtsgesteins. Die Wirtsgesteinstemperatur hat maßgeblichen Einfluss auf die Temperatur der Wetter und darauf, ob die zu berücksichtigenden Temperaturgrenzen im Tiefenlager eingehalten werden. Die Feuchtigkeit der Wetter wird durch die Temperatur der Wetter und die im Grubengebäude befindliche Wassermenge bestimmt.

Kristallines Hartgestein zeichnet sich durch Bereiche mit unterschiedlich stark ausgeprägten Trennflächensystemen aus. Das heißt, dass Grundwasser in der Normalentwicklung von sehr hoher Bedeutung ist und entsprechend berücksichtigt werden muss. Die Menge des fließenden Grundwassers wird durch die Permeabilität des Wirtsgesteins (Trennflächen), der Kontaktzone zwischen dem Abdichtungsbauwerk und dem Wirtsgestein sowie des Bentonits in Versatz und Abdichtungsbauwerk bestimmt.

Bei der Erstellung der Konsistenzmatrizen (Anhang 4) haben sich die Quelldrücke im Verschlussbauwerk und im Versatz als besonders relevant gezeigt. Auch die Entwicklung der zufließenden Grundwassermenge in den Einlagerungsstecken hat eine hohe Relevanz. Stark beeinflusst werden die Spannungsänderungen im Wirtsgestein, die aber kaum aktiven Einfluss auf die Entwicklung des Tiefenlagers haben.

3.6.4.2 Normalentwicklung des Bergwerks im Infrastrukturbereich

Beim Auffahren des Hohlraums entsteht auch im kristallinen Hartgestein eine nur gering ausgeprägte ALZ. Durch die hohe mechanische Stabilität des kristallinen Hartgesteins, die mit der Ausbildung eines Gebirgstragrings einhergeht, wird sich diese während der Offenhaltung nicht weiter vergrößern. Nach Auffahren der Infrastrukturbereiche muss auf eine ausreichende Wasserhaltung geachtet werden. In stark geklüfteten Bereichen ist ein Spritzbetonausbau vorzusehen, damit das in den Grubenbau eintretende Grundwasser besser kontrolliert werden kann. Bis zur endgültigen Verfüllung muss die Funktionstüchtigkeit der Anker regelmäßig überprüft werden. Eine weitergehende Schädigung des Wirtsgesteins muss während des Offenhaltungszeitraums kaum besorgt werden. Ausgenommen hiervon sind aufgeschlossene Störungszonen, von denen in diesem Bericht aber nicht weiter ausgegangen wird. Die Entwicklung der Temperatur der Wetter ist während des gesamten Zeitraums der Rückholbarkeit zu berücksichtigen.

3.6.4.3 Normalentwicklung des Bergwerks im Nahbereich des Verschlussbauwerks

Nach der Errichtung des Verschlussbauwerks wird zunächst der Beton des Widerlagers schwinden, sodass Maßnahmen zur kraft- und formschlüssigen Anbindung an das Wirtsgestein erforderlich werden. Der im Abdichtungselement entstehende Quelldruck wird durch das Widerlager in das Wirtsgestein eingeleitet und sorgt dafür, dass verbleibende Resthohlräume im Versatz geschlossen werden. Auf eine ausreichende Dimensionierung des Widerlagers ist zu achten, sodass sich das Widerlager nicht axial in Richtung der offengehaltenen Hohlräume verschieben kann.

Das Abdichtungselement hat beim Absaufen des Grubengebäudes die Funktion, den aufgefahrenen Hohlraum abzudichten. Der Bentonit quillt aufgrund des Wasserdargebots aus dem Wirtsgestein und bildet einen Quelldruck aus.

3.6.4.4 Normalentwicklung des Bergwerks in den Einlagerungsstrecken

In der Einlagerungsstrecke kann weitgehend auf einen Ausbau verzichtet werden. Eventuell ist eine kurzzeitige Ankerung erforderlich, die im Rahmen des Versatzes der Einlagerungsstrecke wieder entfernt wird. Die Einlagerungsstrecke wird nach dem Verbringen der Behälter mit Bentonit versetzt, der sich gleichermaßen wie in Ton und Tonstein verhält. Ein Quelldruck entwickelt sich nach Errichtung des Widerlagers. Der Bentonit verfüllt somit die restlichen Hohlräume. Im Vergleich zu den anderen Wirtsgesteinen, verheilen Trennflächen im Gebirge nicht selbst und stellen eine Wasserwegigkeit zur geotechnischen Barriere (dem Bentonitversatz) dar. Klüfte stellen diskrete Bereiche im Wirtsgestein dar, weswegen der Bentonit nach einer gewissen Zeit bevorzugt an den Klüften aufquellen wird. Auch eine Erosion des Bentonits ist möglich.

4 Nahfeldmonitoring als Entscheidungsgrundlage

Auf Grundlage des bereits dargestellten Normalszenarios in Abschnitt 3.6 wurde ein geotechnisches Messkonzept entwickelt, welches als Instrument für die Entscheidung Rückholung oder Überführung in ein Endlager dient.

Zur Entwicklung des Messkonzepts werden im Abschnitt 4.1 Ziele definiert, um die zu beobachtenden Parameter, Prozesse oder Ereignisse zu identifizieren. Um ein erfolgreiches Konzept zu entwickeln, werden innerhalb des Entwicklungsprozesses die folgenden Fragestellungen herangezogen:

- Warum wird gemessen? Ziel des Messkonzepts
- Wo wird gemessen? Bereiche der Messungen
- Wie wird gemessen? „Stand der Wissenschaft und Technik“ der Messverfahren
- Was wird gemessen? Beurteilungsgrößen
- Wann wird gemessen? Häufigkeit der Messungen

Nach Dunicliff et al. (2012, S. 1367–1368) muss jeder Messgeber der Beantwortung einer bestimmten Fragestellung dienen. Gibt es keine geotechnische Fragestellung, sollte keine Instrumentierung erfolgen.

Nach diesen Überlegungen werden in den folgenden Abschnitten die Lokationen und die Größen der zu messenden Parameter aufgeführt. Außerdem werden dabei der Stand der Technik und die Grenzen des Monitorings betrachtet. Als Ergebnis dieser Überlegungen wird im Abschnitt 4.7 eine Minimallösung des Monitorings als Entscheidungsgrundlage für die Rückholung oder Endlagerung abgeleitet.

4.1 Ziele des geotechnischen Monitorings

Durch das Monitoring lassen sich unterschiedliche Prozesse im Tiefenlagersystem beobachten. Die Aufnahme von Messwerten erlaubt die Erfassung von Zuständen, sodass Zustandsänderungen durch den Vergleich mit Messdaten aus vorherigen Messungen erkannt werden können. Die Zustandsänderungen, aus denen die Entwicklung des Tiefenlagers prognostiziert wird, müssen auf ihre Plausibilität und ihre Auswirkung auf das Tiefenlager bewertet werden. Der Vergleich der messtechnisch erfassten Größen mit den zuvor auf der Grundlage numerischer Untersuchungen prognostizierten Größen ermöglicht die Beurteilung, ob sich das Tiefenlager auf der Grundlage des zugrunde liegenden Ingenieurmodells planmäßig oder vom Normalszenario abweichend verhält. Diese Kenntnis dient während der Offenhaltungsphase als Grundlage für die Entscheidung, ob aus gebirgsmechanischer Sicht eine Rückholung der radioaktiven Reststoffe erforderlich ist (vgl. IAEA 2014, S. 9).

Ein geotechnisches Monitoringkonzept ist für die Option der Rückholbarkeit zwingend erforderlich und Bestandteil des Sicherheitsnachweiskonzepts. Das Konzept orientiert sich an den Schutzfunktionen der einzelnen Barrieren. Die Messtechnik muss beispielsweise erfassen, ob die geotechnischen Barrieren ihre Funktionen erfüllen. Das Messkonzept enthält die Informationen, welche Messtechnik zur Erfassung welcher Zu-

stände/Prozesse zum Einsatz kommt und an welchen Lokationen und zu welchen Zeitpunkten die Erfassung erfolgt (vgl. Stahlmann et al. 2016, S. 147). Damit lassen sich unplanmäßige negative Zustandsänderungen identifizieren, sodass zeitnah auf sie reagiert werden kann.

Monitoring spielt im Tiefenlagerkonzept mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit eine wichtigere Rolle als bei der wartungsfreien Endlagerung. Die Rückholoption erfordert eine Beobachtbarkeit nicht nur in der Betriebs- und Nachbetriebsphase, sondern auch während der Beobachtungsphase. Darüber hinaus ist bei der wartungsfreien Endlagerung keine Entscheidungsfreiheit mehr vorgesehen.

Bei der Auswertung der Messdaten ist zu berücksichtigen, dass eine Abweichung zu den prognostizierten Werten des Normalszenarios unterschiedliche Gründe haben kann. Beispielsweise ist eine defekte Messtechnik denkbar. Des Weiteren können aber auch die Modellvorstellungen, welche der Entwicklung des Normalszenarios zugrunde liegen, fehlerhaft sein. Das Monitoring stellt in jedem Fall eine Entscheidungsgrundlage für den konkreten Handlungsbedarf dar. Eine fehlerhafte Modellvorstellung geht mit der Entscheidung über das Erfordernis der Rückholung einher. Lässt sich die Abweichung auf eine fehlerhafte Messtechnik zurückführen, ist diese durch Reparatur oder Austausch wieder instand zu setzen. Ein irreparabler Ausfall in der Messkette erfordert die Rückholung der radioaktiven Reststoffe, da eine Verifikation des Normalszenarios ohne Messdaten nicht mehr möglich und folglich ein „Worst Case“-Szenario zu unterstellen ist.

Die Schlüsselanforderung an das Monitoringkonzept ist daher die Zuverlässigkeit der Messtechnik. Sie muss vertrauenswürdige Informationen während der gesamten Dauer der Offenhaltung des Tiefenlagerbergwerks liefern.

4.2 Bereiche exponierter Zustandsänderungen – Bereiche der Messungen

Ein wichtiger Aspekt eines Monitoringkonzepts ist die Festlegung der Bereiche, in denen Messungen erforderlich sind. Ein praktischer Ansatz zur Auswahl der zu instrumentierenden Orte umfasst die folgenden Aspekte: Zunächst werden Bereiche festgelegt, in denen die umfassendsten Zustandsänderungen erwartet werden. Diese sind intensiv zu überwachen. In einem weiteren Schritt werden die Bereiche identifiziert, in denen lokales Verhalten als repräsentativ für das globale Verhalten betrachtet wird. Diese Bereiche werden als primär instrumentierte Abschnitte betrachtet und die Instrumente sind so anzuordnen, dass sie umfassende Informationen über das Bauwerk liefern. Weiterhin sollte redundant instrumentiert werden, um bei voneinander abweichendem Verhalten der Messgeber Rückschlüsse auf eventuelle Messfehler oder auf eine Inhomogenität des Gebirges ziehen zu können (vgl. Dunncliff et al. 2012, S. 1368–1369). Bei der Tiefenlagerung entsteht möglicherweise ein Zielkonflikt aufgrund der hohen Anzahl der Messgeber und dem sich daraus ergebenden erforderlichen Hohlraumvolumen (siehe Abschnitt 4.7).

Bei einem Tiefenlagerprojekt ist es erforderlich, den Nahfeldbereich geotechnisch zu überwachen, um die Entwicklung des Tiefenlagers während der Betriebsphase bzw. der Offenhaltungsphase zu bestimmen. Laut IAEA (2003, S. 28) wird der Nahfeldbereich als

der Teil eines Tiefenlagers definiert, der nah oder direkt im Kontakt mit den Behältern steht und dessen Eigenschaften durch das Tiefenlager oder die eingelagerten Reststoffe verändert wurde oder werden könnte. In der vorliegenden Arbeit werden auf Grundlage dieser Definition der Infrastrukturbereich, die Monitoring- und die Einlagerungsstrecken sowie das daran angrenzende Wirtsgestein als Nahfeldbereich bezeichnet. Abbildung 4-1 zeigt unter Berücksichtigung der Bauphasen des generischen Tiefenlagers die Bereiche, in denen exponierte Zustandsänderungen auftreten.

Nach dem Abteufen des Schachts erfolgt das Auffahren der Erkundungssohle, die später als Monitoringsohle dient (s. Abbildung 4-1, a). Hierbei werden bereits geotechnische Messungen durchgeführt und interpretiert, welche als „Null-Messungen“ für die Interpretation der späteren Messungen von hoher Relevanz sind. In diesem frühen Stadium des Tiefenlagerprojekts können die Modellvorstellungen bereits durch die erfassten Daten überprüft werden, sodass über eine Projektanpassung oder -änderung entschieden werden kann (vgl. Reversibilität in Stahlmann et al. (2015a, S. 21)). Die Erkundungssohle dient dazu, die Homogenbereiche im eigentlichen Einlagerungsbereich zu identifizieren und zu charakterisieren. Diese Informationen bestimmen die Anzahl der für das Monitoring notwendigen Bohrungen (s. Abschnitt 4.7).

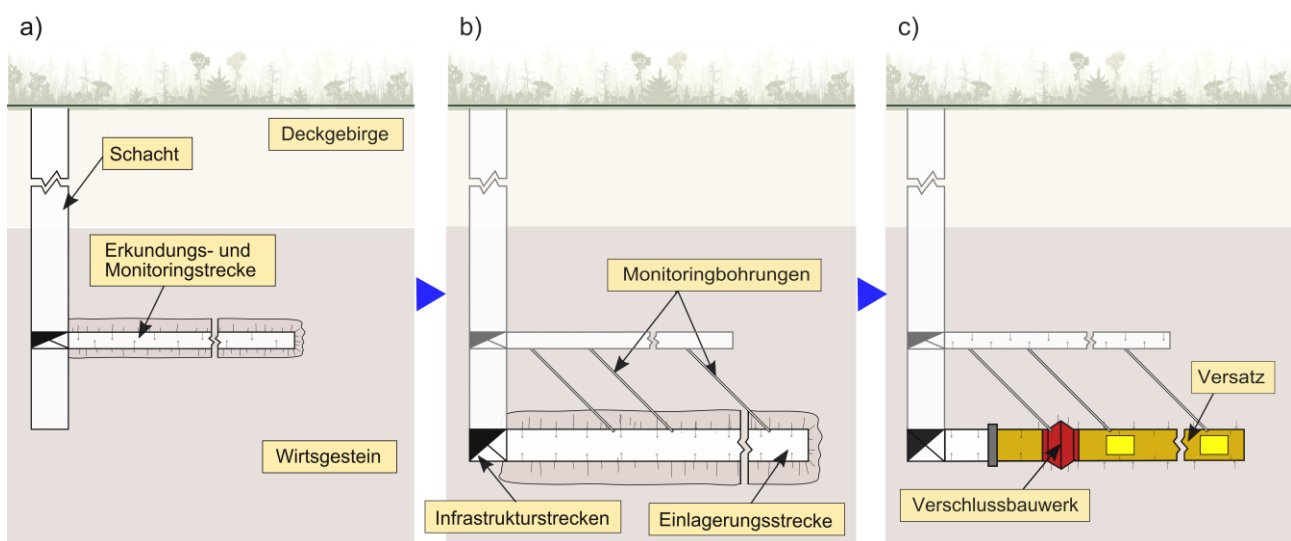


Abbildung 4-1 Bereiche exponierter Zustandsänderungen unter Berücksichtigung der Bauphasen des Tiefenlagerprojekts

Anschließend wird die Einlagerungssohle aufgefahren (s. Abbildung 4-1, b). Die Daten, die zu diesem Zeitpunkt erfasst werden, dienen als Referenzwerte. In diesem Schritt lassen sich noch Anpassungen in der Auslegung umsetzen. Nach der Einlagerung der Behälter, sind die Strecken unmittelbar zu verfüllen und die Verschlussbauwerke zu errichten (s. Abbildung 4-1, c). Daraufhin sind die zu erwartenden untereinander gekoppelten Prozesse im Nahfeldbereich des Tiefenlagersystems zu beobachten.

Die für die Datenerfassung wichtigen Bereiche im Nahfeldbereich sind die Kontaktfläche zwischen Versatz und Behälter sowie die Kontaktfläche zwischen Versatz und Wirtsgestein. Nach der Errichtung des Verschlussbauwerks sind die Kontaktfläche zwischen Verschlussbauwerk und Wirtsgestein sowie Versatz und die Luftseite des Verschlussbauwerks zu beobachten (vgl. Abbildung 4-6 im Abschnitt 4.7).

Tabelle 4-1 zeigt die durch die Einflussfaktoren verursachten Vorgänge und die Orte, an welchen diese gemessen werden sollen. Diese Betrachtung umfasst die Vorgänge während der Offenhaltungsphase bis zur Entscheidung über die Endlagerung/Rückholung.

Tabelle 4-1 Orte der Zustandsänderungen während der Offenhaltungsphase

Ort der Zustandsänderung	Einlagerungsstrecken			Monitoring-strecken	Infrastrukturstrecken
	Verschlussbauwerk (VBW)	Wirtsgestein im Nahfeldbereich (WG)	Versatz (V)		
Vorgang					
Abbindewärme	x	x	x		
Aufbau eines Quelldrucks*	x	x	x		
Ausdehnungsrisse	x				
Bildung einer ALZ		x			
Festigkeitsentwicklung	x		x		
In-situ Feuchtigkeit*	x	x	x		
Temperaturfelder	x	x	x	x	
Kompaktion des Salzgrus			x		
Konvergenz				x	x
Lageverschiebung	x				
Permeabilität	x	x	x		
pH-Wert der Zutrittswässer bzw. Lösungen				x	x
Porenwasserdruck (PWD)*	x	x	x		
Porosität des Salzgrus			x		
Redoxpotential der Zutrittswässer bzw. Lösungen				x	x
Schwinden	x				
Spaltbildung an der Kontaktfläche zw. WG und VBW	x	x			
Spaltbildung an der Kontaktfläche zw. WG und V		x	x		
Spannungsentwicklung zw. V und WG		x	x		
Spannungsentwicklung zw. VBW und WG	x	x			
Wettertemperatur				x	x
Zufluss	x		x	x	x

* nur bei Bentonit-basiertem Abdichtungselement

Unabhängig vom Wirtsgestein werden in jedem Grubengebäude über die Bewetterung die Temperatur, die Feuchtigkeit und der Sauerstoffgehalt beeinflusst. An den vorgesehenen Messstellen im Nahfeldbereich sollten die Messgrößen wichtiger Prozesse bzw.

Parameter möglichst unverfälscht auftreten, um die zu treffenden Aussagen sicher ableiten zu können.

4.3 Technische Anforderungen und technologische Herausforderungen – Stand von Wissenschaft und Technik

Aus technischer Sicht ist das Monitoring eines Tiefenlagers aufgrund der langen Zeiträume und der Anforderung, dass die Maßnahmen des Monitorings die passive Sicherheit des Tiefenlagersystems möglichst nicht beeinträchtigen, eine Herausforderung (MoDeRn 2014, S. 3). Die vorhandene Technologie ist für das Monitoring von entscheidender Bedeutung, denn sie bestimmt, was genau, mit welcher Präzision und mit welcher Zuverlässigkeit über lange Zeiträume gemessen werden kann (MoDeRn 2014, S. 21).

Das Monitoring eines Tiefenlagers stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik. Untertägige Messtechnik kommt bisher im Wesentlichen in Gewinnungsbergwerken zum Einsatz, mit entsprechend geringeren Anforderungen an Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Messketten. Es besteht daher ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Technologien, die den Anforderungen an das Monitoring eines Tiefenlagers gerecht werden. Die Zuverlässigkeit ist bei der Instrumentenauswahl das vorrangige wünschenswerte Merkmal. Dafür sollen die Sensoren auf allgemein bekannte Techniken zurückgreifen (Dunnicliff und Green, G. E. 1993, S. 41).

Forschungsvorhaben, in denen Monitoringtechniken für die Tiefenlagerung erforscht wurden bzw. werden, sind beispielweise das FEBEX-Experiment (Full-scale Engineered Barriers Experiment) und MoDeRn und Modern2020. In der Forschungsplattform MoDeRn wurden u. a. seismische Tomographie, mikroseismische Überwachung der plastischen Zonen, sowie Technologien zur Messung der in-situ Korrosion eines Behälters untersucht. Des Weiteren erfolgten Weiterentwicklungen im Bereich der drahtlosen und faseroptischen Sensoren, der hoch- und niederfrequenten Datenübertragung und der digitalen Bildkorrelation (siehe AITEMIN 2013). Im Rahmen des internationalen Forschungsvorhaben DECOVALEX wurde das FEBEX-Experiment im Untertagelabor „Grimsel“ in der Schweiz durchgeführt und beinhaltete den Einbau von zwei Erhitzern mit Bentonitummantelung in das dort anstehende kristalline Hartgestein (Granit). Im Rahmen von PEBS wurden das HE-E-Experiment und die Endphase des EB-Experiments im Untertagelabor „Mont Terri“ in der Schweiz durchgeführt. Es handelt sich um einen 10 m langen Abschnitt eines Mikrotunnels, getrennt durch ein Betonwiderlager, mit zwei elektrischen Heizern ausgestattet, die auf hochverdichteten Bentonitblöcken gebettet sind. Die Dauerhaftigkeit verschiedener Sensoren und Messtechnik wurde im Rahmen dieser Experimente getestet (siehe Fuentes-Cantillana und Garcia-Siñeriz, J. L. 1998; Villar 2004; Wiczorek et al. 2017). Dennoch sind einige Forschungsfragen offen und weiter zu verfolgen. Umfangreiche Erfahrungen mit dem interaktiven Verhalten eines Abdichtbauwerks aus Salzbeton und dem Wirtsgestein aus Steinsalz wurden im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) gesammelt (siehe Stahlmann et al. 2013).

Wichtige Aspekte für die Planung eines Monitoringprogramms sind die Auswahl geeigneter Sensoren sowie die Erfassung und Übertragung der Messdaten. Das wichtigste

Merkmal potentieller Messtechnik ist die Zuverlässigkeit. Die Auswahl der Messinstrumente und der Lesefrequenz hängt direkt von den Methoden ab, die für die Datenerhebung verwendet werden. Der Umfang des geotechnischen Monitoringprogramms sollte den ermittelten geotechnischen Risiken sowie dem Umfang und der Komplexität der geotechnischen Fragestellung entsprechen (Dunnicliff et al. 2012, S. 1368).

Im Folgenden wird das Augenmerk besonders auf diese technischen Anforderungen und die technologischen Herausforderungen der Messverfahren im Rahmen der Tiefenlagerung gelegt.

4.3.1 Begrifflichkeit

Die Norm DIN 1319-1 definiert den Begriff Messgröße als die physikalische Größe, welche durch eine Messung bestimmt werden soll. Sie kann dabei ein direktes Resultat der Messung sein (direkte Messmethode) oder indirekt über die Nutzung einer physikalischen oder mathematischen Gesetzmäßigkeit (indirekte Messmethode) ermittelt werden. Die Messgröße wird durch einen Zahlenwert und eine Einheit ausgedrückt.

Nach DIN 1319-1 steht der Begriff Beurteilungsparameter für die Differenz der gemessenen Werte der physikalischen Größe. Als Messung wird das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich einer Messgröße mit einer Einheit verstanden (Norm DIN 1319-1, S. 4). Dazu zählt auch die Auswertung von Messwerten.

Ob eine Messung der erforderlichen Messgröße überhaupt möglich ist, hängt von der Verfügbarkeit eines entsprechenden Sensors und der Messmethode ab. Beispielsweise stehen für die Messgröße „Temperatur“ verschiedene Messmethoden zur Verfügung, während eine kontinuierliche in-situ Messung der Porosität des Versatzes nicht möglich ist. Der Begriff „Messverfahren“ wird in dieser Arbeit als die praktische Anwendung eines Messprinzips und einer Messmethode verwendet (Norm DIN 1319-1, S. 7).

4.3.2 Sensorauswahl

Die Auswahl der Sensoren hängt von verschiedenen Randbedingungen ab. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Messungen sind, um Messfehler zu vermeiden, anhand des Einsatzgebietes zu definieren. Für jede Messaufgabe ist eine Vielzahl von Sensoren einsetzbar. Diese unterscheiden sich vor allem in ihren Einsatzgebieten, ihrer Genauigkeit und ihrer Dauerhaftigkeit. Die Auswahl der Sensoren ist abhängig von den in-situ Verhältnissen an der Messstelle und den dort auftretenden Beanspruchungen. Ebenso sind der Amplituden- und der Frequenzbereich sowie die Art und Weise der Messmethode für die Auswahl bedeutend (vgl. Klinzmann 2008, S. 19; Wolf et al. 2008, S. 74).

Ein Sensor dient zur quantitativen und qualitativen Messung eines i.d.R. nichtelektrischen physikalischen Signals (Messgröße) und der Umwandlung dieses Signals in ein brauchbares und übertragbares elektrisches, optisches oder elektromagnetisches Signal, aus dem dann wieder die gewünschte physikalische Größe abgeleitet werden kann. Sensoren werden nach ihrem physikalischen Wirkprinzip, ihrer Messgröße oder der Funktionsweise klassifiziert (s. Tabelle 4-2). Beim physikalischen Wirkprinzip wird zwischen dem mechanischen, dem chemischen, dem optischen und dem elektrischen Wirkprinzip unterschieden. Anhand der Definition wird deutlich, mit welcher Art von Impuls der Sensor arbeitet. Handelt es sich beispielsweise um einen *mechanischen Sensor*, bewirkt eine mechanisch messbare Größe wie z. B. eine Dehnung ein Messsignal.

Tabelle 4-2 Kriterien für die Klassifizierung der Sensoren
(nach Wolf et al. 2008, S. 74)

Physikalisches Wirkprinzip	Messgröße	Funktionsweise
<ul style="list-style-type: none"> • mechanisch • chemisch • optisch • elektrisch 	<ul style="list-style-type: none"> • elektrische Spannung • Temperatur • Dehnung • magnetische Feldstärke • Luftfeuchtigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • aktiv • passiv

Bei der Unterscheidung nach der Messgröße wird nicht nach der Eingangsgröße (Wirkprinzip), sondern nach der Ausgangsgröße, also dem zu messenden Parameter, differenziert. Bei dem Klassifikationskriterium „Funktionsweise“ liegt der Unterschied zwischen aktiven und passiven Sensoren in der Energieversorgung. Während aktive Sensoren ohne Hilfsenergie zur Erfassung der Messgröße auskommen, benötigen passive Sensoren zusätzliche Energie (Wolf et al. 2008).

Mithilfe von *chemischen Sensoren* können chemische Inhaltsstoffe identifiziert und in ihrer Konzentration bestimmt werden. Dafür werden chemische Messgrößen in ein elektrisches Signal umgewandelt. Chemische Sensoren bestehen aus einer sensitiven Schicht und einem physikalischen Wandler. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der sensitiven Schicht werden durch die Einwirkung der zu erfassenden Stoffe verändert. Chemische Sensoren haben bei Untersuchungen ein nachteiliges, fehleranfälliges Langzeitverhalten aufgewiesen. Daher werden sie für Messungen über lange Zeiträume als nicht geeignet angesehen (AITEMIN 2013; Wolf et al. 2008).

Optische Sensoren, insbesondere faseroptische Sensoren, beruhen auf dem Prinzip, dass die zu messende Größe eine bestimmte Eigenschaft des gesendeten Lichts (z. B. Wellenlänge, Intensität, Laufzeit) beeinflusst und diese Beeinflussung gemessen wird. Diese Sensoren sind eine vergleichsweise neue Entwicklung und ihr Gebrauch nimmt progressiv zu. Obwohl es sich um kabelgebundene Sensoren handelt, zeigen sie Vorteile gegenüber klassischen Sensoren (AITEMIN 2013, S. 17). Laut Wolf et al. (2008) weisen sie folgende Vorteile auf:

- mehrere Messstellen entlang eines Sensors
- keine Beeinflussung durch elektromagnetische Felder, hohe Temperaturen oder ionisierende Strahlung
- Messung verschiedener Parameter mit einer Glasfaser
- sicherer Einsatz in korrosiven Medien
- keine Erzeugung von elektromagnetischen Störungen

Löffler-Mang (2012, S. 186) unterscheidet zwischen intrinsischen und extrinsischen *faseroptischen Sensoren*. Bei intrinsischen Sensoren wirkt die Messgröße direkt auf die Glasfaser ein und verändert die Charakteristika der Lichtwelle. Diese Sensoren können eine Vielzahl von Messgrößen erfassen, beispielweise Druck, Temperatur, Strahlung, Flüssigkeitsstand u. v. m. Deformationen können mit speziellen Deformationssensoren

lokalisiert und in ihrer Stärke gemessen werden. Bei extrinsischen Sensoren dient die Glasfaser lediglich zur Übertragung des beeinflussten Lichts.

Das Messprinzip von *piezoelektrischen Sensoren* beruht auf dem piezoelektrischen Effekt. Werden bestimmte Materialien durch Einwirkung von äußeren Kräften oder Drücken (Messgröße) verformt, entsteht eine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte (elektrische Spannung). Die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen fallen nicht mehr zusammen, sodass eine elektrische Polarisation entsteht. An der Oberfläche der Materialien sammeln sich Ladungen, die als elektrische Spannung gemessen werden können. Die entstehende Ladung ist proportional zur einwirkenden Kraft. Solche Sensoren können z. B. für die Messung von Druck, Kraft oder Beschleunigung eingesetzt werden (Hering 2012, S. 3; Wolf et al. 2008, S. 76).

Es gibt verschiedene *elektrische Sensoren*, wie z. B. resistive, induktive oder kapazitive Sensoren. Resistive Sensoren messen eine Änderung des elektrischen Widerstands des Sensors, der durch die Einwirkung der Messgröße hervorgerufen wird. Dehnungsmessstreifen (DMS) funktionieren beispielsweise nach diesem Prinzip. Eine mechanische Dehnung des Messgitters verursacht eine Längen- und Querschnittsänderung des Leiters, was wiederum zu einer Änderung des elektrischen Widerstands führt. Mit DMS können Dehnungen direkt und z. B. Drücke oder Kräfte indirekt gemessen werden. Die indirekte Messung von Kräften wird beispielsweise bei Kraftmessdosen genutzt. Die Kraft ergibt sich aus der Gesetzmäßigkeit zwischen Spannung und Dehnung (Hookesches Gesetz, $\sigma = E \cdot \varepsilon$). Mit dem bekanntem E-Modul der Kraftmessdose lässt sich so die Spannung berechnen.

4.3.3 Erfassung von Messdaten

Nach Dunnicliff et al. (2012, S. 1373–1374) gibt es drei Hauptarten der Datenerhebung:

- *Manuelle Datenerhebung*: Wird durch Beschäftigte in-situ durchgeführt. Die Messwerte werden manuell aufgezeichnet. Dieser Ansatz ist sinnvoll, wenn Messwerte regelmäßig benötigt werden, die Entfernung zum Messgeber nicht zu weit ist und der Messgeber sicher erreicht werden kann.
- *Regelmäßiger manueller Datendownload aus einen Datenlogger*: Wird bei niedriger Messfrequenz oder bei schlecht erreichbaren Messgebern verwendet. Die Messwerte werden im Datenlogger gespeichert und periodisch manuell heruntergeladen. Dieser Ansatz erfordert den Einsatz elektronischer Instrumente, die vom Datenlogger gelesen werden.
- *Datenlogger mit Fernzugriff*: Werden bei hoher Auslesefrequenz verwendet und wenn ein unmittelbarer Bedarf an den Messwerten besteht. Bei diesem Ansatz wird der Datenlogger an ein entferntes Computersystem angeschlossen. Dadurch wird den Nutzern ermöglicht auf die Daten innerhalb von Sekunden nachdem sie aufgezeichnet werden zuzugreifen. Durch die Datenlogger mit Fernzugriff können Alarmsysteme eingerichtet werden, die anschlagen, wenn ein Instrument einen Wert anzeigt, der eine Messgrenze überschreitet.

Jeder dieser Ansätze hat seine Vorteile und Einschränkungen bzgl. Datenerfassung, Auslesefrequenz und Datenmenge. Daher ist es wichtig, den Ansatz der Datenerfassung

während der Planungsphase des Monitoringprogramms auszuwählen. Je nach Art der Datenübertragung lässt sich zwischen kabelgebundener und kabelloser Übertragung unterscheiden.

Geodätische Verfahren kommen zur Vermessung der Lage der Konturen in offenen Hohlräumen zum Einsatz. Hier kann auf kabelgebundene Übertragung gesetzt werden. An Orten ohne direkten Zugang werden geomesstechnische Verfahren eingesetzt, hier wäre eine kabellose Übertragung wünschenswert.

Im Rahmen der Tiefenlagerung soll das Monitoring die erforderlichen Daten liefern, die benötigt werden, um die Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren nachweisen zu können. Die Datenübertragung aus dem Nahfeldbereich ist im Voraus und unter Berücksichtigung der Gewährleistung der passiven Sicherheit der Barrieren bzw. der Langzeitsicherheit des Tiefenlagers zu planen (vgl. BMU 2010, S. 18). Auch das Monitoring und somit die Messtechnik sind Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeit der Rückholung dienen. Instrumentierungen im Bereich geotechnischer Barrieren führen ggf. zur Bildung von potentiellen Wegigkeiten entlang von Messinstrumenten und Kabeln. Wegigkeiten erhöhen das Risiko für die Migration von Radionukliden (BMU 2010, S. 18; Jobmann et al. 2011, S. 630). Infolgedessen wäre es ratsam, möglichst kabellose Instrumentierungen zu nutzen. In der Auswahl sind schließlich die Vorteile aus der kabelgebundenen Instrumentierung (höhere Qualität und Quantität an Messdaten) den durch die Kabelführung verursachten Nachteilen (potentielle Wegigkeit) gegenüberzustellen. Durch die Anforderung an die Zuverlässigkeit der Messkette und der daraus nach Stand der Technik resultierenden erforderlichen Wartbarkeit relativieren sich die Vorteile einer kabellosen Datenübertragung (s. Abschnitt 4.5).

Die zu überwachenden Parameter umfassen beispielweise den Porenwasserdruck, die Totalspannung, Verformungen und Dehnungen sowie die Temperatur. Die Fragestellung ist: Welche Messgrößen geben Aufschluss über die Entwicklung des Tiefenlagers und zeigen an, ob es sich wie im Normalszenario angenommen entwickelt (vgl. Dunnycliff und Green, G. E. 1993, S. 38).

4.3.3.1 Messtechnische Erfassung von thermischen Messgrößen

Temperaturen werden bei geomechanischen Fragestellungen aus drei Gründen gemessen: erstens, wenn die Temperatur selbst als Parameter von Interesse ist; zweitens, wenn die Temperaturänderung eine Verformung oder Spannungsänderung z.B. im Gebirge verursacht; und drittens, wenn Messgeber selbst empfindlich auf Temperaturänderungen reagieren (Dunnycliff und Green, G. E. 1993, S. 331).

Temperaturen können über eine Vielzahl von verschiedenen Sensoren gemessen werden. Alle Sensoren funktionieren dabei so, dass die Temperatur durch die Änderung einer physikalischen Eigenschaft abgebildet wird. AITEMIN (2013, S. 17) nennt folgende bislang für Tiefenlager getestete Techniken:

- Thermo-Elemente,
- Widerstandstemperaturfühler (RTD),
- Thermistoren.

Die ersten Erfahrungen bei der Messung von thermischen Messgrößen wurden im Rahmen des FEBEX-Experiments gewonnen. Aus den Erfahrungen beim Rückbau des Experiments ergibt sich die allgemeine Schlussfolgerung, dass die Temperatursensoren, in diesem Fall Thermoelemente Typ T, den Bedingungen im teilgesättigten Bentonit-basierten Versatz, einschließlich hohen Drucks, standhielten. Ihre Empfindlichkeit gegenüber chemischem Angriff kann hingegen zu einem schnellen Zusammenbruch führen. Daher sollte die zu erwartende Korrosion des chemischen Milieus bei der Auslegung berücksichtigt werden (AITEMIN 2013, S. 21).

4.3.3.2 Messtechnische Erfassung von hydraulischen Messgrößen

Der Wassergehalt eines Gesteins im Nahfeldbereich ist nur indirekt messbar. In Abhängigkeit von der Messgröße werden die Techniken in volumetrische oder tensiometrische Methoden unterschieden. Erstere gibt dabei den volumetrischen Wassergehalt an, während letztere den Wert des Saug- oder Wasserpotenzials ausweist (vgl. AITEMIN et al., 2013). Die Eignung der Methoden hängt dabei von den Kosten, der Genauigkeit, der Reaktionszeit, der Montage, dem Verwendungszweck, dem Tiefenlagermanagement sowie auch der Haltbarkeit ab.

Kapazitive Hygrometer sind robust und liefern konsistente Messwerte. Auf der einen Seite stellten sie sich in Projekten wie dem FEBEX-Experiment als eine gute Wahl heraus, da sie über die Dauer des Experiments trotz der rauen Bedingungen plausible Messwerte liefern konnten. Auf der anderen Seite versagen Hygrometer sobald eine vollständige Sättigung erreicht ist. Beim FEBEX-Experiment sind 60 % der Sensoren zur Messung der relativen Feuchte ausgefallen (Villar 2004). Es besteht Entwicklungsbedarf von robusten Feuchtigkeitssensoren, die trotz vollständiger Sättigung des Bodens zuverlässige Messdaten liefern.

4.3.3.3 Messtechnische Erfassung von mechanischen Messgrößen

Die zu erfassenden mechanischen Messgrößen sind Spannungen, Verformungen und Dehnungen. Es wurden unterschiedliche Sensoren entwickelt, um diese Messgrößen zu messen. Die am häufigsten verwendeten sind:

- Dehnungsmessstreifen (DMS),
- piezoelektrische Sensoren,
- kapazitive Sensoren,
- Resonanzdrahtsensoren und
- optische Sensoren.

Die zur Verfügung stehenden Sensoren sind nach AITEMIN (2013) ausreichend gut und ermöglichen eine genaue Messung des mechanischen Drucks. Piezoelektrische und kapazitive Sensoren besitzen eine Genauigkeit von rund 0,1 %, während optische Sensoren eine Genauigkeit von 0,5 % haben (AITEMIN 2013, S. 27). Die Wahl eines entsprechenden Sensors hängt von den Besonderheiten des jeweiligen Anwendungsgebiets ab.

Grundsätzlich ist es aber insbesondere wegen der Rückholoption wichtig, dass diese Sensoren robust sind und über einen langen Zeitraum zuverlässig funktionieren. Ein Ausschlusskriterium für die Anwendung dieser Sensoren im Monitoringprogramm ist

ihre Vereinbarkeit mit einer möglichen drahtlosen Datenübertragungstechnik. Die Sensoren benötigen eine Signalkoordinierung für den Fall, dass bei der drahtlosen Datenübertragung das Signal aufbereitet werden muss.

4.3.3.4 Messtechnische Erfassung von chemischen Messgrößen

Chemische Messgrößen wie der pH-Wert und das Redox-Potential sind ins Monitoringprogramm aufzunehmen. Diese Messgrößen dienen zur Beschreibung der geochemischen Bedingungen, welche das chemische Gleichgewicht und damit mehrere Prozesse bestimmen (AITEMIN 2013, S. 78).

Nach Hering (2012, S. 511) werden zur Bestimmung des Redoxpotentials am häufigsten edelmetallbasierte Elektroden eingesetzt. Diese wenden das Verfahren der Potenziometrie an. Da i.d.R. die dafür eingesetzten Referenzelektroden in der Bezugselektrolytlösung flüssige Systembestandteile beinhalten, zeigen sie Einschränkungen im Einsatz bei geringen und hohen Drücken und Temperaturen. Die Gefahr eines Ausfalls aufgrund von Verschmutzungen im Messmedium ist nicht auszuschließen und daher zu berücksichtigen.

Das am häufigsten verwendete Mittel für die pH-Erkennung ist die Glaselektrode. Allerdings hat ihre Anwendung einige Nachteile, die die Verwendung von diesen pH-Elektroden schwierig oder sogar unmöglich für bestimmte Anwendungen machen. Dies ist beispielweise der Fall, wenn elektromagnetische Felder vorhanden sind (AITEMIN 2013, S. 78–79).

4.3.4 Übertragung von Messdaten

Das Ausgangssignal (Messsignal) der Sensoren an den Messstellen muss bis zu der Ausgabestelle übertragen werden. Dunicliff et al. (2012, S. 1374) empfehlen, dass die Häufigkeit der Datenerfassung vom Projekt, von der Änderungsgeschwindigkeit der Messgrößen und von den Anforderungen der Dateninterpretation abhängig sein soll.

Besondere Anforderungen an die Datenübertragung ergeben sich in einem Tiefenlager insbesondere aus den großen Distanzen. Die Datenübertragung muss von den Messlokalationen bis in die offenstehenden Infrastrukturbereiche oder zu den übertägigen Anlagen erfolgen. Zudem werden Daten zwischen sensiblen Bereichen des Tiefenlagersystems bzw. zwischen unzugänglichen Bereichen und der Außenwelt übertragen.

Nach Wolf et al. (2008, S. 78) werden für die untertägige Datenübertragung im Wesentlichen drei Kanalarten eingesetzt:

- elektrische Leitungen (z. B. Zweidraht- oder Koaxialleitungen),
- optische Leiter (Lichtwellenleiter),
- kabellose Datenübertragung mittels elektromagnetischer Wellen (Funk).

Bei kabelgebundener Übertragung werden die Messsignale der Sensoren zunächst über Kabel zu Multiplexern, zeitabhängig gesteuerten Datenselektoren, übertragen. Von dort werden sie zu Messwerterfassungsanlagen weitergeleitet. Nach Wolf et al. (2008) werden die Messwerterfassungsanlagen an zentraler Stelle positioniert und haben die Aufgabe, Messwerte zu sammeln, Grenzwertmeldungen zu erzeugen und letztlich die Daten für eine Bearbeitung, wie z. B. für die Auswertung, auszugeben. Bei dieser Art der Datenübertragung kann durch eine Optimierung des Übertragungsweges eine geringere

Anzahl an Kabeln, Multiplexern und Messwerterfassungsanlagen erreicht werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die kabelgebundene Übertragung eine Beeinträchtigung der (geo-)technischen Barriere darstellen könnte. Abbildung 4-2 bildet die gesamte Messkette und somit die Übertragung der Messdaten vom Aufnehmer bis zur Ausgabe ab.

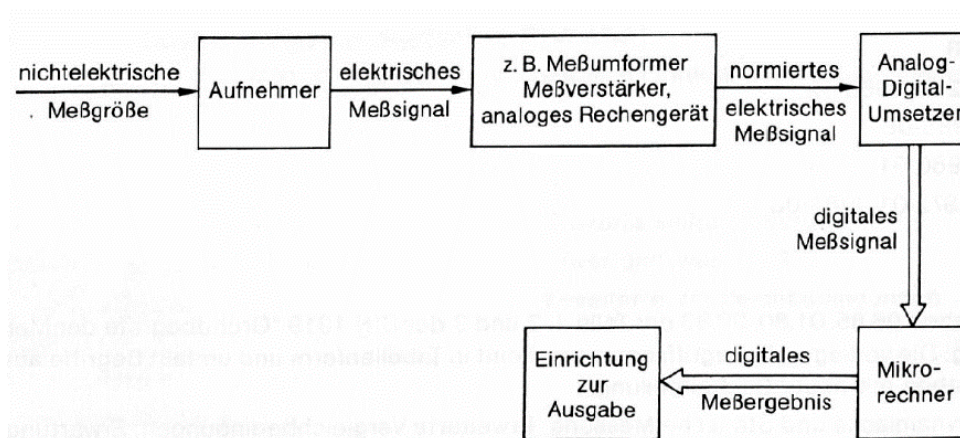


Abbildung 4-2 Beispiel einer Messkette (Norm DIN 1319-1)

Bei vielen Messstellen müssen dementsprechend viele Messsignale übertragen werden. Deshalb sollte das Messverfahren auch hinsichtlich der Datenströme und Energieversorgung optimiert werden. Dafür bietet sich im generischen Tiefenlagermodell eine Bündelung der gemessenen Daten jeder Einlagerungsstrecke in der jeweiligen Monitoringstrecke an.

4.4 Messgrößen und Beurteilungsparameter

Im Anschluss an die Eingrenzung der Messorte und -technik erfolgt die Festlegung der Messgrößen und Beurteilungsparameter. Sie basieren auf den in Abschnitt 3.4 dargestellten thermischen, chemischen, mechanischen und hydraulischen Einflussfaktoren. Wie bereits erwähnt, hängen die im Tiefenlager stattfindenden Prozesse von den Materialeigenschaften des Wirtsgesteins und der (geo-)technischen Barrieren ab. Diese Prozesse lassen sich über die Messung verschiedener Parameter beobachten und bewerten.

4.4.1 Erfassbare geometrische Messgrößen

Als geometrische Messgrößen sind Verschiebungen und Verdrehungen bzw. Hebungen und Senkungen des Gebirges zu erfassen. Von diesen Parametern werden das Lichtraumprofil der Hohlräume und die Lage der Verschlussbauwerke beeinflusst. Des Weiteren sind auch die Abmessungen der Verschlussbauwerke von Bedeutung. Die Messung der geometrischen Parameter soll möglichst früh beginnen und die Ergebnisse nach jedem besonderen Bauzustand mit den Modellen verglichen werden. Dehnungs- und Inklinometermessungen geben Aufschluss über die Bewegungen im Gebirge.

Die Art der Ermittlung der geometrischen Messgrößen und ein empfohlenes Messverfahren stellt Tabelle 4-3 dar. Das Verschiebungsmaß wird wiederholt zwischen zwei Punkten gemessen. Dabei wird die Relativposition bestimmt, anstatt einer absoluten Position. Einer der Messpunkte ist ein definierter Bezugspunkt im Gestein, der andere befindet sich in jenem Element, dessen Verschiebung zu überwachen ist. Es können so

Konvergenzen, Lageverschiebungen und die Spaltbildung an der Kontaktfläche zwischen Wirtsgestein und Verschlussbauwerk bzw. Wirtsgestein und Versatz gemessen werden. Neigungen werden mittels Neigungsmessern gemessen, die zuvor an den zu beobachtenden Elementen angebracht worden sind (MoDeRn 2013).

Tabelle 4-3 Geometrische Messgrößen und deren Beurteilungsparameter

Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Messgröße	Mögliche Messverfahren
Konvergenz	Infrastrukturstrecken	Strecke δ [m]	▪ Einmessung der Hohlraumkontur mittels Geodäsie
	Monitoringstrecken		▪ Geodätische Einmessung der absoluten Lage über Festpunkt über Tage
Lageverschiebung	VBW	Strecke δ [m]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einmessung der Luftseite des VBW mittels Geodäsie ▪ Geodätische Einmessung der absoluten Lage über Festpunkt über Tage
Spaltbildung an der Kontaktfläche zwischen WG und VBW bzw. WG und V	VBW	Dehnung/Stauchung ϵ [-]	▪ Messung der Dehnung/Stauchung mittels Extensometer, dessen Messkopf sich im VBW und Anker im WG befinden oder umgekehrt
	V		▪ Messung der Dehnung/Stauchung mittels Extensometer, dessen Messkopf sich im V und Anker im WG befinden

4.4.2 Erfassbare thermische Messgrößen

Die Temperaturfelder werden maßgeblich von dem Wärmeeintrag der eingelagerten hoch radioaktiven Reststoffe beeinflusst. Zu messen sind die in-situ Temperaturen im Wirtsgestein, im Versatz sowie an der Kontaktfläche zwischen Versatz und Behälter. Zudem ist die Wittertemperatur in den offen gehaltenen Strecken aufgrund der Arbeitssicherheit während der Offenhaltung und bei einer möglichen Rückholung relevant (siehe hierzu Leon Vargas et al. 2017). Diese Effektivtemperatur hängt von der Trockentemperatur, der Feuchttemperatur und der Wettergeschwindigkeit (nach KlimaBergV) ab. Des Weiteren ist die Abbindewärme des Verschlussbauwerks zu messen. Tabelle 4-4 gibt die thermischen Parameter, die im Tiefenlagersystem zu erfassen sind, wieder.

Tabelle 4-4 Thermische Messgrößen und Beurteilungsparameter

Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Messgröße	Mögliche Messverfahren
In-situ Temperatur	V	Temperatur T [°C]	▪ Messung der Temperatur über Temperatursensor im V

Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Messgröße	Mögliche Messverfahren
	WG		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Messung der Temperatur über Temperatursensor im WG
Wetter-temperatur	Infrastrukturbereich <hr/> Monitoringsohle	Temperatur T_{eff} [°C]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Messung der Effektivtemperatur in Abhängigkeit der rel. Luftfeuchte über ein Aspirationspsychrometer in Kombination mit einem Temperatursensor
Abbinde-wärme	VBW	Temperatur T [°C]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Messung der Temperatur über Temperatursensor an der Luftseite des VBW/an der Rückseite des VBW/im VBW

4.4.3 Erfassbare hydraulische Messgrößen

Anhand der Entwicklung der Permeabilität der Barrieren und der plastischen Zone bzw. der Auflockerungszone lassen sich Rückschlüsse auf die Funktionalität des Tiefenlagers ziehen. Sie sind nur über indirekte Messverfahren bestimmbar. Tabelle 4-5 fasst die zu erfassenden hydraulischen Parameter im Tiefenlagersystem zusammen. Mittels Geoelektrik kann der elektrische Widerstand eines betrachteten Bereichs ermittelt werden. Er gibt in einem Tiefenlager mit Bentonit-basiertem Versatz Aufschluss über den Wassergehalt des Bentonits. Daraus lässt sich Rückschluss auf den Status des Quellprozesses ziehen und evtl. auf eine hinreichende Abdichtung schließen. In einem Tiefenlager im Steinsalz kann stattdessen die seismische Geschwindigkeit im Salzgrus durch seismische Verfahren gemessen werden. Sie lässt Rückschlüsse auf die Entwicklung der Kompaktion und somit auf die Permeabilität des Salzgruses zu. Darüber hinaus können mithilfe von Mikroseismik und/oder Mikroakustik diskrete Bruchereignisse im Gebirge detektiert werden. Sie sind für die Bewertung der Entwicklung der plastischen Zonen und somit auch für die Degradation der geologischen Barriere relevant.

Tabelle 4-5 Hydraulische Messgrößen und Beurteilungsparameter

Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Messgröße	Mögliche Messverfahren
Porenwasserdruck (PWD)	V	Porenwasserdruck u [MPa]	▪ Messung des PWD über Porenwasserdrucksensor im V
	Wirtsgestein im Nahfeldbereich (WG)		▪ Messung des PWD über Porenwasserdrucksensor im WG
Zufluss	Infrastrukturbereich	Zufluss Q [m ³ /h]	▪ Erfassung der fassbaren Wassermenge pro Zeiteinheit in definiertem Bereich des Infrastrukturbereichs
	Monitoringstrecke		▪ Erfassung der fassbaren Wassermenge pro Zeiteinheit in definiertem Bereich der Monitoringstrecke
In-situ Feuchtigkeit	VBW	Feuchtigkeit w [%]	▪ Bestimmung der Feuchtigkeit über Feuchtigkeitsmessgeber in VBW
	V		▪ Bestimmung der Feuchtigkeit über Feuchtigkeitsmessgeber in V
	WG		▪ Bestimmung der Feuchtigkeit über Feuchtigkeitsmessgeber in WG
Permeabilität	VBW	Permeabilität K [m ²]	▪ Durchströmungsversuch an Proben im Labor
	V		▪ in-situ Packerversuche in Bohrloch im VBW
	WG		▪ Bestimmung der seismischen Geschwindigkeit des V über Seismik
Bildung einer ALZ	Wirtsgestein im Nahfeldbereich (WG)	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	▪ in-situ Durchströmungs- bzw. Packerversuch in Bohrloch im WG
			▪ Bestimmung der seismischen Geschwindigkeit im WG über Seismik
			▪ Detektion mikroseismischer Ereignisse

4.4.4 Erfassbare mechanische Messgrößen

Zu den zu messenden mechanischen Parametern zählen u.a. Spannungsänderungen, Dehnungen, Festigkeitsentwicklungen, Porosität und Schwinden. Änderungen des Spannungsniveaus lassen sich beispielweise mit ausgerichteten Druckkissen bestimmen. Konvergenzen lassen sich in offengehaltenen Bereichen mittels Verschiebungen des Lichtraumprofils ermitteln. Des Weiteren sind in den Wirtsgesteinen, in denen Bentonit-basierte Barrieren zum Einsatz kommen, die Spannungsunterschiede infolge der Quelldrücke zu messen. Das Schwinden lässt sich durch Stauchung rückschließen. Der Porenwasserdruck innerhalb des Wirtsgesteins ist ebenfalls als mechanischer Parameter von Interesse und lässt sich über Porendruckgeber bestimmen. Er wird nur bei Konzepten in Ton und Tonstein berücksichtigt. Beim Einbau der Porendruckgeber ist die Be-

rücksichtigung von möglichem Trockenfallen des Sensors aufgrund der hohen Temperaturen im Nahfeldbereich erforderlich. Die zu messenden mechanischen Parameter fasst Tabelle 4-6 zusammen.

Tabelle 4-6 Mechanische Messgrößen und Beurteilungsparameter

Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Messgröße	Mögliche Messverfahren
Spannungsentwicklung zwischen VBW und WG	VBW	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen in der Kontaktfläche zwischen VBW und WG über Totspannungsgeber
Festigkeitsentwicklung	VBW	Festigkeit f_y [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Ermittlung der Festigkeit über Nutzung der Hammerschlagmethode Druckversuche im Labor von Rückstellproben
Schwinden	VBW	Dehnung/Stauchung ϵ [-]	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Dehnungen / Stauchungen innerhalb des Verschlussbauwerks über eingebaute Extensometer
Ausdehnungsrisse	VBW	Rissbreite w [mm]	<ul style="list-style-type: none"> Beobachtung der Rissbreitenweite über Fissurometer an der Luftseite des VBW
		Wellengeschwindigkeit v [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> Durchschallung des VBW mit Ultraschall, um Risse parallel zur Luftseite zu detektieren
Spannungsentwicklung zwischen V und WG	V	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen in der Kontaktfläche zwischen V und WG über Totspannungsgeber
Kompaktion des Salzgrus	V	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen im V über (Total)Spannungsgeber
Porosität des Salzgrus	V	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der seismischen Geschwindigkeit des V über Seismik
Aufbau eines Quelldrucks	V	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen im V über Totspannungsgeber

4.4.5 Erfassbare chemische Messgrößen

Chemische Messgrößen stellen in grundwasserführenden Wirtsgesteinen das Redox-Potenzial und der pH-Wert des Grundwassers dar. Sie werden in Tabelle 4-7 zusammengefasst. Durch das Einbringen der geotechnischen Barriere können sich diese Parameter verändern. Potentielle Änderungen lassen wiederum Rückschlüsse auf die Bewegung des Grundwassers im Tiefenlagersystem zu.

Tabelle 4-7 Chemische Messgrößen und Beurteilungsparameter

Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Messgröße	Mögliche Messverfahren
Redoxpotential der Zutrittswasser bzw. Lösungen	Infrastrukturbereich	elektrische Spannung U [V]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Messung der elektrischen Spannung in den gefassten Zutrittswässern über edelmetallische Redoxelektroden
	Monitoringsohle		
pH-Wert der Zutrittswasser bzw. Lösungen	Infrastrukturbereich	pH-Wert [-]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH-Wert Messung an den gefassten Zutrittswässern

4.5 Grenzen und Risiken des Monitorings

Die Grenzen des geotechnischen Monitorings liegen zum einen im Stand von Wissenschaft und Technik, also in den Grenzen der Messtechnik selbst, zum anderen in der Organisation und Durchführung des Monitoringprogramms über den vorgesehenen Zeitraum. Weiterhin ist für die Überprüfung der Sicherheit eines Tiefenlagers auch kritisch zu hinterfragen, ob sich das Monitoring durch die Durchörterung der Barrieren negativ auf die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers auswirken kann, was ein Risiko darstellen würde. Auf die genannten Punkte gehen die folgenden Abschnitte näher ein.

4.5.1 Fragestellung des Monitorings

Bei der Erstellung eines Messprogramms gilt der Grundsatz, dass ohne Fragestellung keine Instrumentierung erfolgen sollte. Eine klarere Zielsetzung, als die eines einfachen „Informationsgewinns“, ist erforderlich. Die Fragestellung orientiert sich an der Entscheidung „Überführung in ein Endlager oder Rückholung der eingelagerten Reststoffe“. Anhand der Fragestellung lässt sich bestimmen, welche Daten die Entscheidung erfordert.

Die Erstellung von Szenarien für die Tiefenlagerentwicklung erfordert eine umfassende Modellvorstellung. Die Erfassung der Modellvorstellungen geht dabei an die Grenzen des Stands von Wissenschaft. Aufgrund der Grenzen des Wissens verbleibt die Unsicherheit, alle potentiellen geotechnischen Fragestellungen mit einem Monitoringprogramm abgedeckt zu haben. Die Anpassung des Monitoringprogramms ist nach der Installation der Messgeber zwar möglich, jedoch mit der Einschränkung, dass die zur Interpretation der Daten relevanten Referenzwerte aus der Anfangsphase des Tiefenlagerprojekts fehlen.

Primäres Ziel eines Tiefenlagers ist die Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Auf manche Messungen, auch wenn sie nach den entwickelten Modellvorstellungen sinnvoll wären, muss aufgrund ihrer Schädigung der technischen oder geologischen Barriere verzichtet werden. Ein Beispiel hierfür ist die direkte Instrumentierung eines Verschlussbauwerks mit einer Kabelführung durch das Bauwerk. In diesem Falle besitzt die Risikoreduktion einen höheren Stellenwert als die potentiell gewonnenen Daten über den Zustand des Abdichtungsbauwerks.

4.5.2 Quantität und Qualität der Messdaten

Abschnitt 4.3 stellte den Stand der Technik für das Monitoring eines Tiefenlagers dar. Nicht jeder Parameter ist derzeit messtechnisch erfassbar. So lässt sich beispielsweise die Durchlässigkeit der Auflockerungszone nicht direkt bestimmen.

Integre Daten über einen langen Zeitraum erfordern eine zuverlässige Messkette. Relevanter Ausgangspunkt ist der Stand von Technik zum Zeitpunkt der Erstellung des Tiefenlagers. Derzeit ist eine autarke und zuverlässige Datenübertragung sowie Stromversorgung über den angestrebten Zeitraum des Monitorings nicht Stand von Wissenschaft und Technik. Auch die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Messgebern kann über den Monitoringzeitraum nicht garantiert werden, sodass die Möglichkeit der Wartung oder des Austauschs der Messgeber erforderlich ist. Daher ist davon auszugehen, dass während der Offenhaltungsphase eine Instrumentierung in offenen Bohrungen mit Kabelführungen vorliegt. Die Kabelführung ermöglicht den Verzicht auf Funktechnologie und Batterien.

Die Gewinnung integrier Daten erfordern des Weiteren, dass sich die Sensorik mit ihren spezifischen systematischen Fehlern bei der Messwertgewinnung über den Messzeitraum möglichst nicht verändert. Eine langfristige Wartung der Systeme oder langfristig bewährte Messsysteme sind erforderlich, da die Interpretation von Daten, die durch unterschiedliche Messmethoden gewonnen wurden, nicht trivial ist.

Eine weitere zu treffende Entscheidung liegt in der Auslesefrequenz. In welchen Zeitabständen sollen die Messwerte der Messkette ausgelesen werden? Eine zu geringe zeitliche Auflösung kann bedeuten, dass einige Ereignisse nicht wahrgenommen werden, eine zu hohe, dass die Datenmenge ggf. nicht mehr beherrschbar ist. Hier gilt es, einen sinnvollen Kompromiss anhand der Fragestellung zu finden.

Über den Zeitraum des Monitoringprogramms muss das Datenmanagement funktionieren. Dafür müssen die gewonnenen Daten in einem Format gespeichert und archiviert werden, das eine Lesbarkeit der Daten über den gesamten Zeitraum der Aufzeichnung und darüber hinaus, gewährleistet. Die Realisierung dieser Bedingung erfordert ausreichend Speicherplatz und die Portierbarkeit der Daten zu potentiell aktuelleren Datenformaten.

4.5.3 Interpretation der Messdaten

Der Interpretation der Messdaten kommt eine besondere Bedeutung zu. Erst das Verarbeiten und Bewerten der Rohdaten gibt die Entscheidungsgrundlage, ob eine Rückholung der Reststoffe erforderlich ist. Falsche Interpretationen können somit zu der falschen Annahme führen, dass das Tiefenlager sicher ist und in ein Endlager überführt werden kann. Sie können aber auch die Fehleinschätzung einer notwendigen Rückholung bewirken.

Durch die systematischen und zufälligen Messabweichungen ist das Messergebnis letztlich nur ein Schätzwert des wahren Wertes der Messgröße. Es verbleibt eine Unsicherheit, in welchem Bereich um den Messwert der wahre Wert liegen kann (Mühl 2017; Norm DIN 1319-1). Das Intervall um den wahren Wert, in dem der Messwert trotz zufälliger Messabweichungen mit einer definierten Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist,

heißt Vertrauensbereich. Daraus leitet sich das vollständige Messergebnis ab. Es setzt sich aus dem Messergebnis und der Messunsicherheit zusammen (siehe Abbildung 4-3).

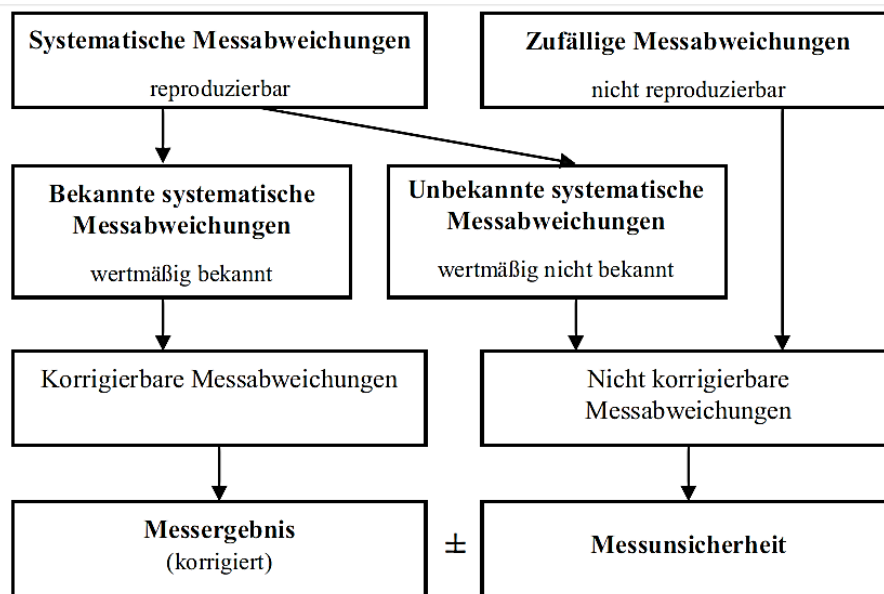


Abbildung 4-3 Vollständiges Messergebnis (Mühl 2017)

Die Interpretation von Messdaten erfordert viel Erfahrung und muss von ausgebildetem Fachpersonal durchgeführt werden. Es besteht daher die Notwendigkeit, eine Institution mit entsprechenden finanziellen Mitteln und Know-how auszustatten, um Personal zu schulen und es über den Beobachtungszeitraum zur Verfügung zu stellen. Die Informationsweitergabe muss über mehrere Generationen hinaus garantiert werden.

Die Auswertung der Daten birgt immer das Risiko einer Fehlinterpretation. Um dieses Risiko zu minimieren, muss eine gleichbleibende Qualität der Messdaten über den gesamten Messzeitraum gewährleistet werden. Das beinhaltet unter anderem, dass über die Dauer des Monitorings die gleiche oder kompatible Messsensorik verwendet wird.

Es besteht die Möglichkeit, dass das Modell für die Entwicklung eines Tiefenlagerbereichs, welches die Grundlage des Monitoringprogramms darstellt, die Realität nicht vollständig abbildet und aktualisiert werden muss. Eventuell durch die Daten hervorgerufene Diskrepanzen zur Modellvorstellung müssen diskutiert und die Modelle entsprechend angeglichen werden, wenn eine verlässliche Entscheidungsgrundlage für die Überführung in ein Endlager oder die Rückholung garantiert werden soll.

4.5.4 Konsequenzen aus dem Ausfall des Monitoringsystems und/oder Implausibilität der Daten

Die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse ist die Grundlage, um die Entscheidung über Endlagerung/Rückholung zu treffen. Die gewonnenen Daten geben Informationen über den momentanen Zustand des Tiefenlagers und dessen bisherige Entwicklung. Daran lässt sich ermitteln, ob sich das Tiefenlager so entwickelt wie es das Normalszenario unterstellt. Fällt das Messsystem durch defekte Messgeber oder fehlerhafte Datenübertragung aus, lässt sich der Zustand des Tiefenlagers nicht mehr vollständig erfassen. Eine Beurteilung des derzeitigen Zustands und damit über die Entwicklung des Tiefenlagers ist damit nicht mehr möglich. Es kann nicht ausgeschlossen

werden, dass sich der Zustand des Tiefenlagers verschlechtert hat. Aus Konservativitätsgründen ist in einem solchen Fall der „Worst-Case“-Fall zu unterstellen, was zwingend zu einer Rückholung mit allen Konsequenzen führt.

4.6 Technischer Ablauf des Monitorings und damit verbundene Entscheidungen

Ein Monitoringprogramm ist Bestandteil des Sicherheitsnachweiskonzepts und orientiert sich an den Schutzfunktionen der einzelnen Barrieren. Zentrales Anliegen eines Messkonzepts ist es, sämtliche Informationen über das Verhalten eines Systems zur Verfügung zu stellen, indem es Zustandsänderungen im Tiefenlagersystem erfasst. Das Monitoring soll das Tiefenlagerprojekt von der Errichtung des Tiefenlagers bis zur Entscheidung „Endlagerung/Rückholung“ begleiten (vgl. Stahlmann et al. 2015a, S. 26). Die aus dem Monitoring gewonnenen Daten und deren Interpretation sind die Grundlage für eine gebirgsmechanisch begründete Entscheidung zur Rückholung oder zur Überführung in ein Endlager. Abbildung 4-4 stellt diesen Entscheidungsprozess vereinfacht dar.

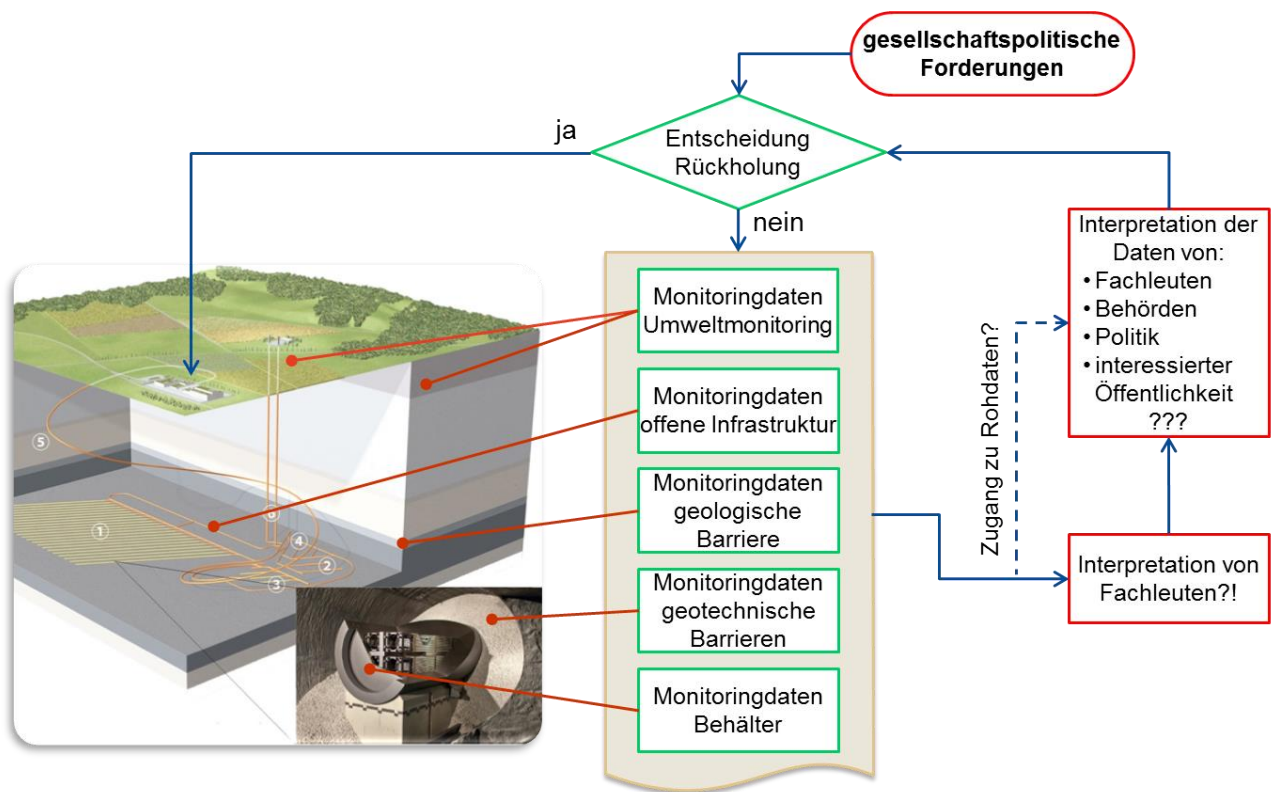


Abbildung 4-4 Monitoring im Kontext zum Entscheidungsprozess über die Rückholung hoch radioaktiver Reststoffe²

Da die Entscheidungsfreiheit im Tiefenlagerprojekt von hoher Bedeutung ist, müssen die durch das Monitoring erfassten Daten verlässlich und aussagekräftig sein. Ebenso ist die Interpretation dieser Daten relevant für die Entscheidung über die Zukunft des Tiefenlagerprojekts. Es bleibt zu klären, wer die Daten interpretiert. Des Weiteren muss

² Tiefenlagerabbildungen von der NAGRA (nagra.ch)

entschieden werden, ob und in welchem Umfang den verschiedenen Akteuren der Zugang zu den Rohdaten ermöglicht wird.

Unmittelbar nach dem Start der Errichtung des Tiefenlagerbergwerks beginnt das Monitoring. Vor der Einlagerung der hoch radioaktiven Reststoffe kann das Tiefenlagerkonzept bei einem ungünstigen Zustand vergleichsweise ohne großen Aufwand angepasst werden. Entsprechen alle Parameter denen der Modellvorstellung, werden die Behälter eingelagert, die Einlagerungstrecken verfüllt und abgedichtet. Während der Offenhaltung der untertägigen Infrastruktur soll das Monitoring ungünstige gebirgsmechanische Zustände im Tiefenlagersystem beobachtbar machen. Sollten ungünstige Zustände auftreten, muss über eine Rückholung entschieden werden.

Bei kriechfähigen Wirtsgesteinen ist nach einer bestimmten Offenhaltungsdauer zwangsläufig der Zeitpunkt erreicht, an dem sich die Gebirgstragfähigkeit so sehr verringert hat, dass die Entscheidung über eine Rückholung beziehungsweise über die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager ansteht und die Schleife innerhalb der Offenhaltungsphase endet. Unabhängig von den Ergebnissen des geotechnischen Monitoringprogramms kann auch aufgrund gesellschaftlicher Entscheidungen eine Rückholung oder Konzeptanpassung erfolgen. Abbildung 4-5 gibt den detaillierten Ablaufprozess des Entsorgungskonzepts wieder.

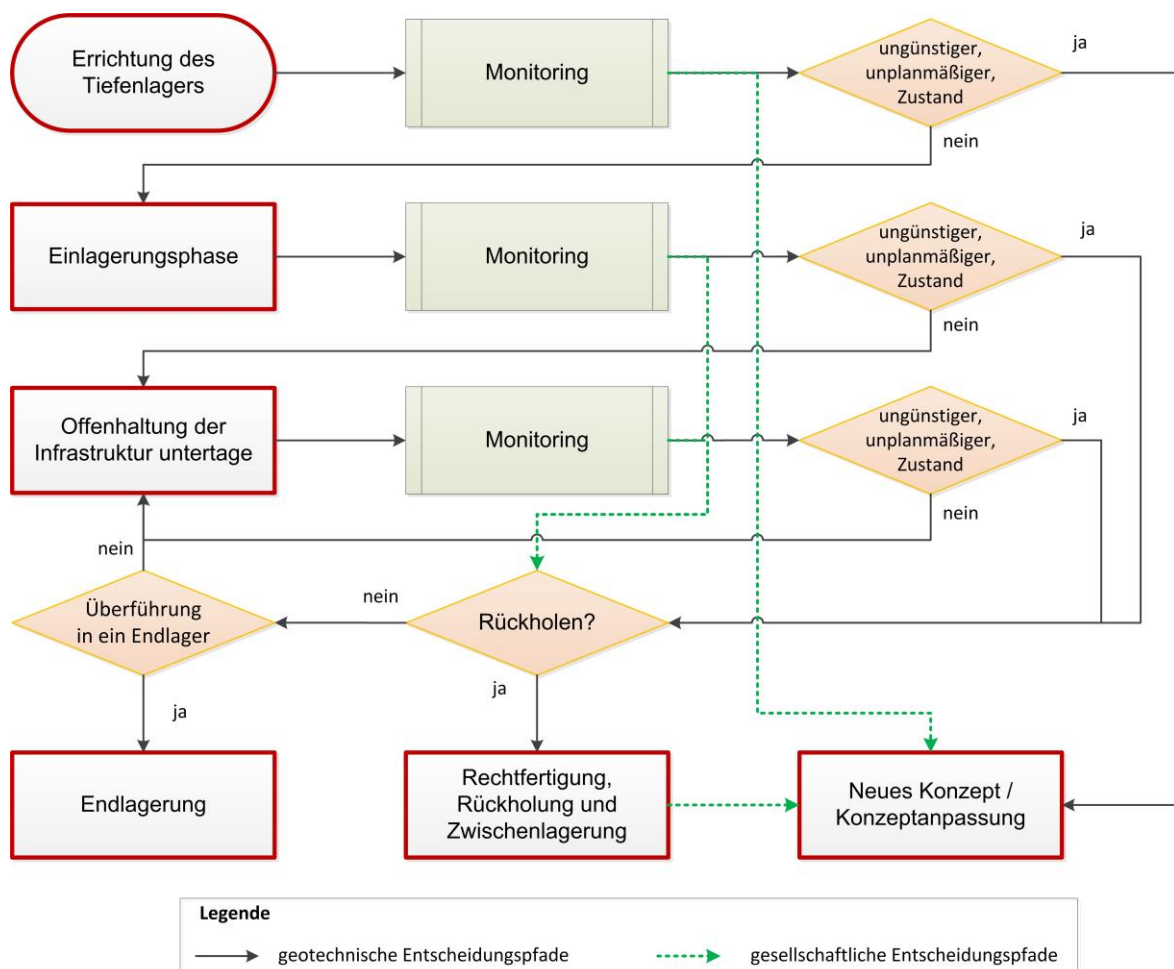


Abbildung 4-5 Flussdiagramm zum Verlauf des Entsorgungskonzepts mit Option zur Rückholung und Offenhaltung

4.7 Minimallösung als Entscheidungsgrundlage über eine Rückholung

Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zeigt, dass die Wartungsfreiheit von Sensoren bzw. die Funktionalität der Messkette nicht über die maßgebenden Zeiträume gewährleistet werden können. Stattdessen sind durch das Erfordernis der Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten Bohrungen notwendig (s. Abbildung 4-6).

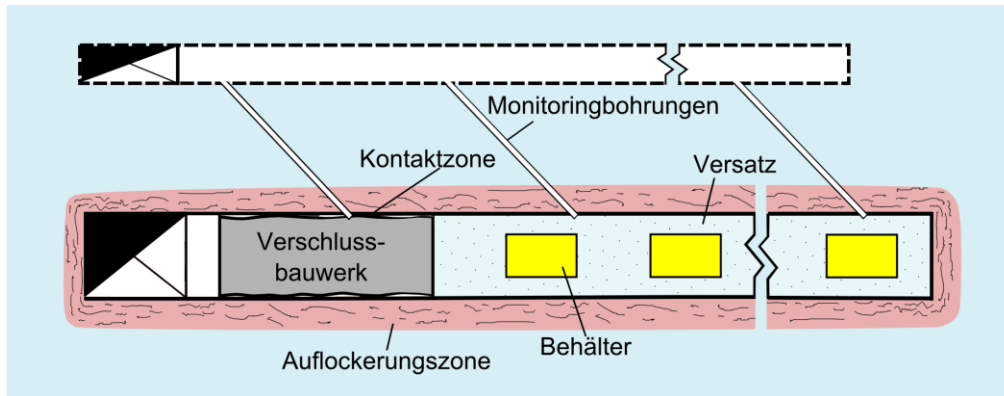


Abbildung 4-6 Bereiche der Messungen im Nahfeldbereich nach der Einlagerung

Da mit den Bohrungen gegen das Minimierungsgebot verstoßen wird, sollte das Monitoringprogramm die Barrieren nicht unnötig schädigen. Aus diesem Grund wurde eine Minimallösung erarbeitet, welche als Ziel hat, so viel Messtechnik wie nötig, jedoch so wenig wie möglich, einzusetzen. Das bedeutet, dass innerhalb des Monitoringprogramms nur die Messung der Parameter, deren Kenntnis mindestens notwendig ist, um die Entscheidung Rückholung oder Überführung in ein wartungsfreies Tiefenlager zu treffen, erfolgt. Nicht- und minimalinvasive Messtechniken, welche die Integrität der Barrieren bewahren, können neben den invasiven Techniken ohne Einschränkung genutzt werden. Sie geben zusätzlich Informationen, die beispielsweise für eine Verifikation der Modelle genutzt werden können. Neben der Begrenzung der zu messenden Parameter erfolgt, wenn möglich, eine Einteilung des Wirtsgesteins in Homogenbereiche. Innerhalb eines Homogenbereichs wird die Übertragbarkeit der gemessenen Daten unterstellt, sodass nicht jede Einlagerungsstrecke instrumentiert werden muss.

Aus technischer Sicht erfolgt eine Rückholung, wenn der sichere Einschluss der eingelagerten Reststoffe nicht gewährleistet werden kann. Um die Funktion des Mehrbarrierensystems zu garantieren, ist die Integrität aller Barrieren zu gewährleisten. Es kann eine Vielzahl an Parametern gemessen werden, anhand deren Entwicklung Aussagen über die Integrität der Barrieren getroffen werden können.

Die Minimallösung eines Messkonzepts muss demnach die Messung der maßgeblichen Parameter umfassen. Allgemeingültig für alle Wirtsgesteine zählen dazu die Temperaturverläufe, die Konvergenz sowie die in-situ Spannungen in den Kontaktflächen der geologischen und geotechnischen Barrieren. Darüber hinaus sollten das Wirtsgestein sowie das Neben- und Deckgebirge durch mikroseismische oder mikroakustische Messungen beobachtet werden. In den folgenden Abschnitten wird die Minimallösung jeweils für die verschiedenen Wirtsgesteine erläutert.

4.7.1 Minimallösung im Steinsalz

Der sichere Einschluss der Reststoffe hängt im Steinsalz insbesondere von der Kriechfähigkeit des Wirtsgesteins ab. Erst mit dem kraftschlüssigen Aufkriechen des Gebirges auf das Verschlussbauwerk und durch die Kompaktion des Salzgruses erhalten das Verschlussbauwerk und der Versatz ihre volle Funktionalität. Auch bildet sich anschließend die konturnahe ALZ der Einlagerungstrecke durch den Aufbau einer Druckspannung in den Kontaktflächen zurück. Das Aufkriechen des Gebirges lässt sich entweder über Verformungen oder über die Spannungsentwicklung nachweisen.

Die Minimallösung in Steinsalz muss entweder die Erfassung von Verformungen oder der Spannungsentwicklung enthalten. Da die Verformungen auch im Versatz zu messen sind, ist die Beobachtung der in-situ Spannung in den Kontaktflächen zwischen Wirtsgestein und Verschlussbauwerk beziehungsweise Wirtsgestein und Versatz weniger invasiv. Baut sich Druck auf, ist auch ein Aufkriechen des Gebirges vorhanden. Ein weiteres Ansteigen des Druckniveaus lässt auf die Kompaktion des Salzgruses und eine Rückbildung der ALZ schließen. In den Kontaktflächen sind entsprechend Druckkissen zur Aufnahme der Normalspannung vorzusehen. Siehe Abbildung 4-7.

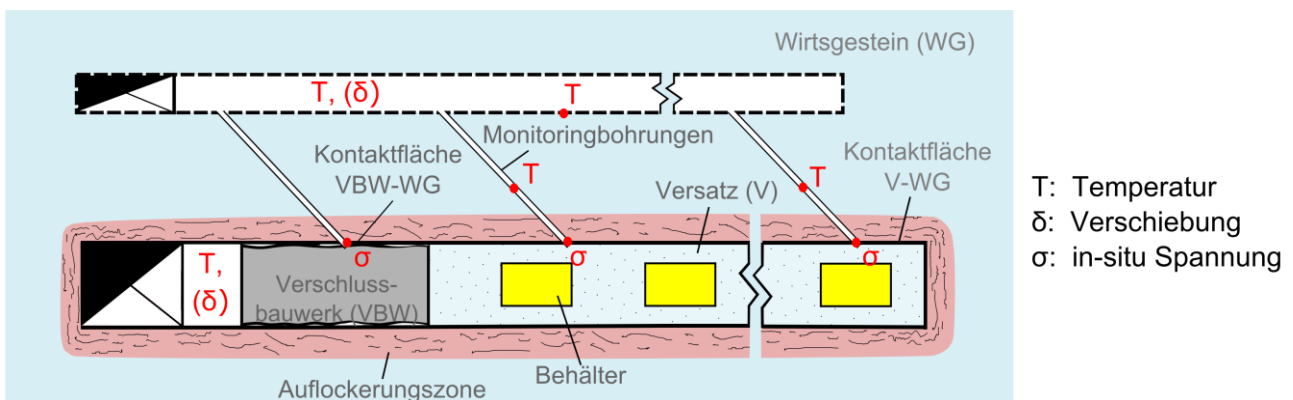


Abbildung 4-7 Minimallösung für Tiefenlager in Steinsalz

Des Weiteren sind Temperaturmessungen, z.B. der in-situ Temperatur und der Wittertemperatur, erforderlich. Die radioaktiven Reststoffe erzeugen durch ihren Zerfall zusätzliche Wärme, die von den Behältern an den Versatz und das umgebende Gebirge abgegeben wird. Sollte es nun zur Entscheidung „Rückholung“ kommen, werden die versetzten Einlagerungstrecken wieder aufgefahren. Um einschätzen zu können, auf welches Niveau die Wittertemperatur durch die Auffahrung dieser Bereiche ansteigt und ob die Arbeitsschutzbedingungen noch eingehalten sind, muss die in-situ Temperatur des Wirtsgesteins bekannt sein. Diese lässt sich über Temperatursensoren ermitteln. Die Messung der Wittertemperatur erfolgt regelmäßig, um die Einhaltung der Arbeitsschutzbestimmungen nachzuweisen. Stellen sich Temperaturdifferenzen zwischen der in-situ Temperatur und der Wittertemperatur ein, ist mit geringer Schädigung der geologischen oder der geotechnischen Barriere zu rechnen, dennoch ist die Integrität dieser Barrieren nicht gefährdet.

Da die Offenhaltungsdauer eines Tiefenlagers im Steinsalz maßgeblich von der Entwicklung der Auflockerungszone in den offengehaltenen Bereichen abhängt, muss beobachtet werden, wann hier eine maximal tolerierbare Schädigung erreicht ist. Die Minimal-

lösung sieht daher auch das Messen der Konvergenzen in den offengehaltenen Hohlräumen vor. Diese Messungen sind nichtinvasiv, gehen ohne eine Schädigung der Barrieren einher und sind daher als unkritisch einzustufen. Tabelle 4-8 fasst die für die Minimal- lösung in Steinsalz erforderlichen Messgrößen und deren Messbereiche zusammen.

Tabelle 4-8 Parameter und Größenordnung für die Minimal- lösung in Steinsalz

Vorgang	Ort	Messgröße	Messbereich
In-situ Temperatur	V, VBW und WG	Temperatur T [°C]	25 °C – 100°C
Wettertemperatur	Infrastrukturbereich	Temperatur T _{eff} [°C]	20 °C – 70°C
	Monitoringsohle		
Konvergenzen	Infrastrukturstrecken	Strecke δ [m]	0 m – 1 m
	Monitoringstrecken		0 m – 0,5 m
Spannungsentwicklung zw. VBW und WG	VBW	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 20 MPa
Spannungsentwicklung zwischen V und WG	V	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 20 MPa
ALZ	Streckenkontur	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	nicht relevant
Porosität des Salzgrus	V	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	nicht relevant

4.7.2 Minimal- lösung im Ton und im Tonstein

Die Minimal- lösung von Ton und Tonstein wird zusammengeführt, da in beiden Wirtsgesteinen ähnliche Prozesse ablaufen. Diese ist in der Abbildung 4-8 dargestellt.

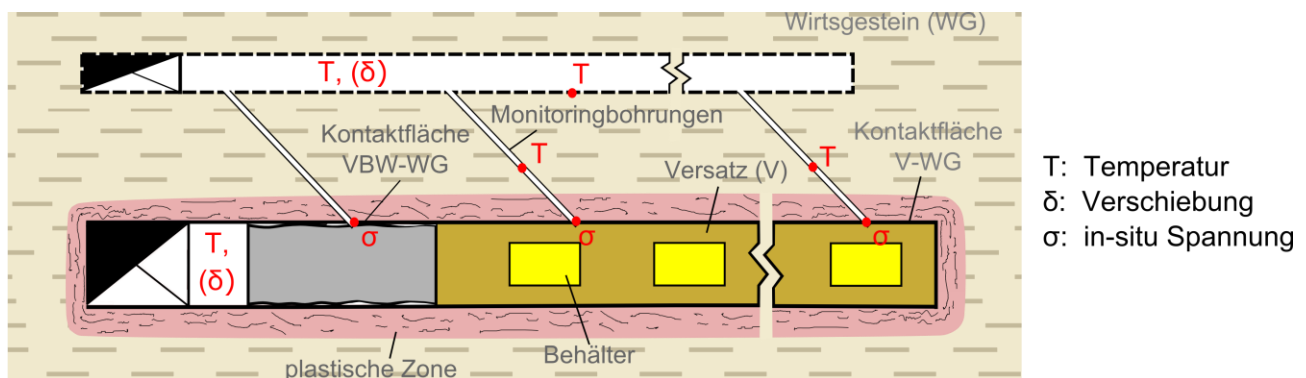


Abbildung 4-8 Minimal- lösung für Tiefenlager in Ton und Tonstein

Auch im Ton und im Tonstein sind der Form- und Kraftschluss zwischen Versatz und Wirtsgestein beziehungsweise Verschlussbauwerk und Wirtsgestein maßgebend für die

Integrität der Barrieren. Da beide Wirtsgesteine keine besonderen Kriech- und auch nur bedingte Quelleigenschaften aufweisen, erfolgt der Form- und Kraftschluss durch das Quellen des Versatzes bzw. des Verschlussbauwerks. Auch hier bilden sich durch den Aufbau einer Spannung in den Kontaktflächen die durch die Auffahrung hervorgerufenen plastischen Zonen zurück. Auch wenn der Mechanismus ein anderer ist, die einzusetzende Messtechnik gleicht der im Steinsalz. Über Totspannungsgeber in den Kontaktflächen Gebirge/Versatz und Gebirge/Verschlussbauwerk lassen sich das Schließen des Hohlraums sowie der Aufbau eines Quelldrucks nachweisen.

Da Ton und Tonstein sowie der Bentonitversatz eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Steinsalz aufweisen, ist mit höheren Temperaturen im Nahfeldbereich der eingelagerten Reststoffe zu rechnen. Der in-situ Temperaturmessung kommt in Hinsicht auf eine potentielle Rückholung daher eine besondere Rolle zu. In der Tabelle 4-9 werden die für die Minimallösung in Ton und Tonstein erforderlichen Messgrößen und -bereiche zusammengefasst.

Tabelle 4-9 Parameter und Größenordnung für die Minimallösung in Ton und Tonstein

Vorgang	Ort	Messgröße	Messbereich
In-situ Temperatur	V	Temperatur T [°C]	20 °C – 100°C
	VBW		
	WG		
Wettertemperatur	Infrastrukturbereich	Temperatur T_{eff} [°C]	20 °C – 70°C
	Monitoringsohle		
ALZ	Streckenkontur	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	nicht relevant
Konvergenzen	Infrastruktur- und Monitoringstrecken	Strecke δ [m]	0 cm – 10 cm
Lageverschiebung	VBW	Strecke δ [m]	0 cm – 10 cm
Spannungsentwicklung zwischen VBW und WG	VBW	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 20 MPa
Spannungsentwicklung zwischen V und WG	V	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 20 MPa
Aufbau eines Quelldrucks	V	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 10 MPa
Porenwasserdruck (PWD)	V	Porenwasserdruck u [MPa]	0 MPa – 10 MPa
	WG		0 MPa – 10 MPa

Im Ton und Tonstein sind nur geringe Konvergenzen in den offengehaltenen Bereichen zu erwarten, da sie durch einen Ausbau gesichert werden. Er ist aufgrund der Alterung und dem damit verbundenen Verlust der Tragfestigkeit der limitierende Faktor der Offenhaltungsphase. Mit visuellen sowie nicht zerstörenden geophysikalischen oder zerstörenden Kontrollmaßnahmen kann die Entwicklung des Ausbaus beobachtet werden. Ebenso lässt sich eine Lageänderung des Widerlagers des Verschlussbauwerks aus den offengehaltenen Strecken durch geodätische Abstandsmessungen kontrollieren.

4.7.3 Minimallösung im kristallinen Hartgestein

Dem kristallinen Hartgestein wird keine hydraulische Barrierenwirkung zugewiesen. Die Abbildung 4-9 verdeutlicht die Minimallösung für dieses Wirtsgestein. Trotz der fehlenden hydraulischen Barrierenwirkung ist die Beobachtung der dem Tiefenlager zutretenden Wassermengen erforderlich, um frühzeitig Maßnahmen gegen ein sich abzeichnendes unplanmäßiges Absaufen treffen zu können. Weiterhin sollten Konvergenzmessungen zur Kontrolle der mechanischen Barrierefunktion des Wirtsgesteins durchgeführt werden.

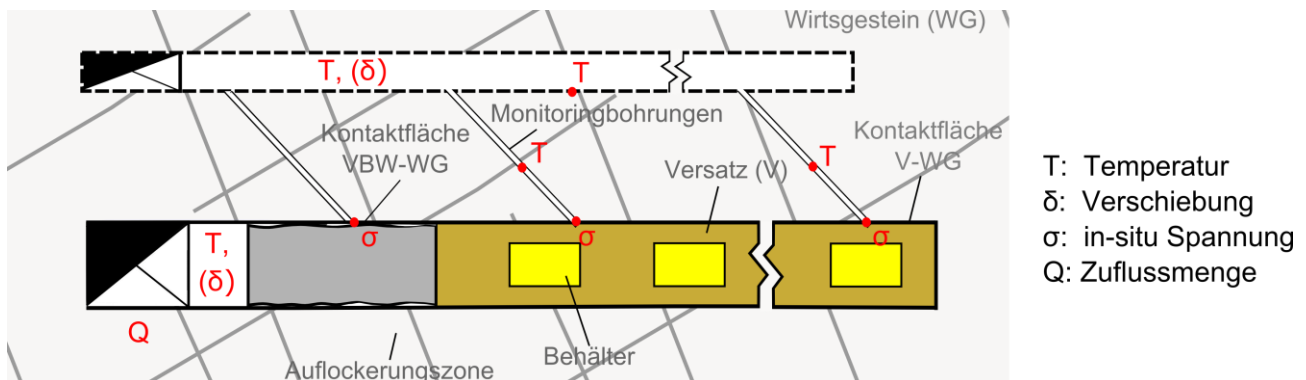


Abbildung 4-9 Minimallösung für Tiefenlager in kristallinem Hartgestein

Der sichere Einschluss der Abfälle erfolgt durch die technischen und geotechnischen Barrieren. Da Versatz und Verschlussbauwerk ebenso wie im Ton und Tonstein auf Bentonit basieren und der Quelldruck den Form- und Kraftschluss an das Gebirge herstellt, sind auch hier Spannungsmessungen in den Kontaktflächen in Form von Totalspannungsgebern durchzuführen.

Ebenso wie in den anderen Wirtsgesteinen ist die Temperatur im Nahfeldbereich für eine potentielle Rückholung zu messen. Mit nicht invasiven geodätischen Messmethoden kann die Lageveränderung des Widerlagers bzw. des Verschlussbauwerks kontrolliert werden. Tabelle 4-10 zeigt die für die Minimallösung in kristallinem Hartgestein erforderlichen Messgrößen und deren Messbereiche.

Tabelle 4-10 Parameter und Größenordnung für die Minimallösung
in kristallinem Hartgestein

Vorgang	Ort	Messgröße	Messbereich
In-situ Temperatur	V	Temperatur T [°C]	25 °C – 100°C
	VBW		
	WG		
Wettertemperatur	Infrastrukturbereich Monitoringsohle	Temperatur T _{eff} [°C]	20 °C – 70°C
ALZ	Streckenkontur	seismische Geschwindigkeit v _{p/s} [m/s]	nicht relevant
Konvergenzen	Infrastrukturstrecken	Strecke δ [m]	0 cm – 1 cm
	Monitoringstrecken		
Lageverschiebung	VBW	Strecke δ [m]	0 cm – 10 cm
Spannungsent- wicklung zwischen VBW und WG	VBW	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 10 MPa
Spannungsent- wicklung zwischen V und WG	V	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 10 MPa
Aufbau eines Quelldrucks	V	Spannung σ [MPa]	0 MPa – 10 MPa
Zufluss	Infrastrukturbereich	Zufluss Q [m ³ /h]	10.000 m ³ /h
	Monitoringstrecke		

5 Schlusswort

Reversibilität und die technisch daraus folgende Rückholbarkeit ist eine Anforderung an die Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe. Diese Möglichkeit soll über die Einlagerungsphase hinaus bestehen. Der vorliegende Bericht beschreibt auf der Grundlage eines gewählten Normalszenarios den Zusammenhang zwischen der Entscheidung zur Rückholung und einem Monitoring im Nahfeldbereich. Dabei zeigt sich, dass Rückholbarkeit eine Möglichkeit zur Fehlerkorrektur ist.

Im Kapitel 2 wurden zunächst die gesellschaftlichen Gründe für die Berücksichtigung von Rückholbarkeit und Monitoring in einem Tiefenlagerprojekt genannt. Wesentlicher Grund dafür ist die Möglichkeit einer Fehlerkorrektur, wie sie auch von der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) gefordert wird. Weitere Gründe, wie die Erhöhung der Akzeptabilität eines Tiefenlagers durch Einbindung gesellschaftlicher Akteure und Transparenz wurden skizziert. Aus technischer Sicht ist eine Rückholbarkeit aufgrund möglicher negativer Entwicklungen in den Barrieren sinnvoll. Zur Beurteilung wurden Grundlagen für geotechnische Entscheidungskriterien ausgeführt. Auch reale Entwicklungen, die von den Modellvorstellungen abweichen, können dazu führen, dass über eine Rückholung entschieden werden muss. Dafür ist die Gültigkeit des Ingenieurmodells sowie seiner Annahmen zu überprüfen.

Als Grundlage für die Erstellung des Monitoringkonzepts wurden in Kapitel 3 Normalszenarien für die in Stahlmann et al. (2015a) beschriebenen Tiefenlagermodelle für die Wirtsgesteine Steinsalz, Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein erstellt. Als Randbedingung des Normalszenarios wurde die Gewährleistung der Schutzziele der Entsorgung von hoch radioaktiven Reststoffen innerhalb des betrachteten Zeitraums angenommen. Die Schutzziele beinhalten den Schutz von Umwelt und Bevölkerung sowie des Personals vor ionisierender Strahlung und die Gewährleistung einer planungstechnisch vorgesehenen Rückholbarkeit der radioaktiven Reststoffe. Räumlich betrachten die Untersuchungen zur Normalentwicklung den Nahfeldbereich, d. h. den Infrastrukturbereich, die Einlagerungsstrecken sowie die Monitoringstrecken. Dabei sind insbesondere die Entwicklungen der geologischen und geotechnischen Barrieren von Bedeutung. Zeitlich umfassen die Untersuchungen die Errichtung des Tiefenlagers, den Einlagerungsprozess und die Offenhaltungsphase bis zur Entscheidung einer Rückholung bzw. der Endlagerung. Im Wesentlichen bestimmen geometrische, mechanische, thermische, hydraulische, radiologische und chemische Einflussfaktoren die Entwicklung des Tiefenlagers. Mit Hilfe von Konsistenzmatrizen wurden diese Einflussfaktoren hinsichtlich ihres Einflussgrads bewertet, die wesentlichen Einflussfaktoren eingegrenzt und Trendprojektionen abgeleitet. Diese Trendprojektionen dienen einerseits dazu, die erwartete Entwicklung zu bestätigen. Andererseits kann mit ihnen auch eine alternative Entwicklung erkannt werden. Die aus den maßgeblichen Einflussfaktoren abgeleiteten messbaren Parameter gelten daher innerhalb des Monitoringprogramms als die wichtigsten zu messenden Größen.

Kapitel 4 umfasste die Beschreibung eines Monitoringkonzepts. Aufgrund seiner Bedeutung als Entscheidungsgrundlage kommt dem Monitoring eine wichtige Rolle innerhalb des Tiefenlagerprojekts zu. Anhand der Einflussfaktoren der Normalszenarien wurden

die Bereiche exponierter Zustandsänderungen und somit die Messlokationen im Nahfeldbereich der Einlagerungsstrecken bestimmt. Unter Zugrundelegung des aktuellen Stands der Technik wurden die Techniken zur Messwerterfassung, Datenübertragung und Datenbereitstellung dargestellt. Es wurde aufgezeigt, dass eine Messtechnik, die über Jahrzehnte zuverlässig und wartungsfrei funktioniert, bisher nicht Stand der Technik ist. Die Messinstrumente und hier insbesondere die Messgeber müssen daher für Wartungen und Reparaturen zugänglich sein. Aufgrund dieser Randbedingung sieht das Messkonzept kabelgebundene Messtechnik vor, die in Monitoringbohrungen eingebaut wird. Die Monitoringstrecke sowie die Monitoringbohrungen stellen zusätzliche Hohlräume dar, die sich negativ auf die geologische Barriere auswirken können. Deshalb wurden die für die Beurteilung der Entwicklung des Tiefenlagers relevantesten Messgrößen identifiziert. Diese stellen zunächst nur eine – nach Stand der Technik mögliche – Minimallösung dar. Es ist nicht auszuschließen, dass standortspezifisch, beispielsweise in aufgeschlossenen Störungszonen, weitere Messgrößen hinzugenommen werden müssen.

Abschließend ist festzuhalten, dass ein Monitoringprogramm technisch durchführbar und robust zu konzipieren ist. Kann die Entwicklung des Tiefenlagers nicht mehr beobachtet und somit nicht mehr bewertet werden, ist aus heutiger Sicht vom „Worst Case“-Fall einer unplanmäßigen negativen Entwicklung auszugehen. Dies erfordert dann die Rückholung. Eine autonome Stromversorgung sowie der kabellose Datentransfer sind zwar wünschenswert, aber aufgrund der erforderlichen Zugänglichkeit zu den Sensoren aktuell nicht notwendig. Generell steht die Option der Rückholung mit den im Vergleich zur wartungsfreien Endlagerung zusätzlichen Hohlräumen und der Offenhaltung der Infrastrukturstrecken im Konflikt mit einer möglichst hohen passiven Sicherheit, die eine Minimierung von Hohlräumen erfordert. Die Möglichkeit der Fehlerkorrektur aufgrund der Option der Rückholung ist daher nur mit einem höheren technischen Risiko umzusetzen. Dieses Risiko ist aber nicht zuletzt durch das Monitoring überschaubar und lässt sich technisch beherrschen. Dies bedeutet aber auch, dass das Monitoringprogramm auf die minimal zu erhebenden Daten begrenzt wird. Durch die Ausweisung von Homogenbereichen sowie den Nachweis der Übertragbarkeit von Daten auf andere Feldesteile innerhalb des Tiefenlagers können die Anzahl von Monitoringstrecken und –bohrungen verringert werden. Neben der Entscheidungsgrundlage für eine Rückholung können Monitoringdaten auch eine Informationsgrundlage für das Life-Cycle-Engineering (LCE) darstellen. LCE zielt bei einem Tiefenlager darauf ab, die Funktionsfähigkeit der geotechnischen Bauwerke zu erhalten. Die Funktion sowie die zeitliche Entwicklung dieser Bauwerke lassen sich über Monitoring erfassen, sodass frühzeitig ein eventueller Bedarf an Instandhaltung und Wartung festgestellt werden kann.

Zum Abschluss dieses Berichts soll eine Brücke zwischen den technischen Herausforderungen bei der Entwicklung eines Monitoringkonzepts und den gesellschaftlichen Herausforderungen geschlagen werden. Die Entscheidung über eine Rückholung wird nie aus rein technischer Sicht erfolgen. Zudem benötigt eine solch weitreichende Entscheidung eine politische Legitimation durch den Bundestag. Um die soziotechnische Robustheit und Akzeptabilität dieser Entscheidung zu erhöhen, sollte die Öffentlichkeit einbezogen werden. Das erfordert wiederum, dass ihr Interesse an der Entwicklung des Tiefenlagers erhalten bleibt. Ausgehend von den hier vorgestellten Ergebnissen ist bei der

Entwicklung eines Entsorgungsprogramms für hoch radioaktive Reststoffe mit Rückholbarkeit vor dessen Umsetzung zu klären:

- Wer entscheidet über die Rückholung oder Umwandlung in ein Endlager?
- Wer ist an der Entscheidung beteiligt?
- Wer trägt die Verantwortung?

6 Literaturverzeichnis

- Acatech (2012): Technikzukünfte. Vorausdenken - Erstellen - Bewerten. Berlin, Heidelberg: Springer; Springer Vieweg (acatech Impuls). DOI: 10.1007/978-3-642-34607-1.
- (AITEMIN) (2013): State of Art Report on Monitoring Technology. DELIVERABLE (D-Nº: 2.2.2). Unter Mitarbeit von NDA, ANDRA, NRG, NAGRA, ENRESA, EURIDICE et al. Hg. v. European Commission. Online verfügbar unter http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/Mo-DeRn_D2.2.2_State_of_art_report.pdf, zuletzt geprüft am 01.03.2018.
- (AkEnd) (2002): Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von D. Appel, B. Baltes, V. Bräuer, W. Brewitz, K. Duphorn, R. Gömmel et al. Köln (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte).
- (BMU) (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Brunner-Schwer, A. (1986): Die Szenario-Technik als Prognoseunterlage zur Ermittlung der Absatzchancen und -risiken bei High-Tech-Produkten, dargestellt am Beispiel des Glasfaserkabels. Unterföhring: GBI-Verl. (Betriebswirtschaftliche Studientexte, Bd. 5).
- Dunnicliff, J.; Green, G. E. (1993): Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. 1 Band. New York: John Wiley & Sons (A Wiley-Interscience publication), zuletzt geprüft am 31.07.2018.
- Dunnicliff, J.; Marr, W. A.; Standing, J. (2012): Principles of geotechnical monitoring. In: J. B. Burland (Hg.): ICE manual of geotechnical engineering. Geotechnical design, construction and verification, Bd. 2. 2 Bände. London: ICE (ICE manual of geotechnical engineering, 2), S. 1363–1377. Online verfügbar unter <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/moge.57098.1363>, zuletzt geprüft am 30.07.2018.
- (ESK) (2016): ESK-Empfehlung: Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle, zuletzt geprüft am 17.04.2018.
- Fischer-Appelt, K.; Baltes, B.; Buhmann, D.; Larue, J.; Mönig, J. (2013): Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13 (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS - 290).
- Fuentes-Cantillana, J. L.; Garcia-Siñeriz, J. L. (1998): FEBEX Final design and installation of the "in situ" test at Grimsel. Hg. v. ENRESA. AITEMIN. Madrid (12-98). Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/022/30022753.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2018.

- Geschka, H.; Hammer, R. (1990): Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. In: D. Hahn und B. Taylor (Hg.): Strategische Unternehmensplanung / Strategische Unternehmensführung. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Physica-Verlag HD, S. 311–336.
- Norm DIN 1319-1, 01.1995: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe.
- Hassel, T.; Bauer, M.; Köhler, A. (2017a): Development of the generic ENCON container concept based on the aspects of the three ENTRIA options. In: ENTRIA (Hg.): Research on Radioactive Waste Management. Ethics – Society – Technology. Final ENTRIA Conference. Unter Mitarbeit von C. Walther. Final ENTRIA Conference - Research on Radioactive Waste Management. Braunschweig, 26.-29.09.2017. Hannover (ENTRIA Final Conference), S. 166.
- Hassel, T.; Hocke, P.; Köhler, A.; Bauer, M. (2017b): Monitoring in the deep geological disposal - Technical and social requirements for implementing monitoring of HLW containers. ENTRIA Final Conference. Braunschweig, 27.09.2017.
- Hering, E. (2012): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Hölscher, R.; Elfgen, R. (2002): Herausforderung Risikomanagement. Identifikation, Bewertung und Steuerung industrieller Risiken. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- IAEA (2003): Radioactive Waste Management Glossary. Vienna: International Atomic Energy Agency (The IAEA series).
- IAEA (2014): Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. Specific Safety Guide. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA safety standards series Specific safety guide, No. SSG-31). Online verfügbar unter http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1640_web.pdf, zuletzt geprüft am 08.09.2016.
- Jacobi, O. (1976): Praxis der Gebirgsbeherrschung. Essen: Verlag Glückauf.
- Jobmann, M.; Eilers, G.; Haverkamp, B. (2011): Überwachung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland. Möglichkeiten und Grenzen. In: *atw - International Journal for Nuclear Power* 56. (11), S. 629–635.
- KlimaBergV (09.06.1983): Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen, vom 09.06.1983 (BGBl. I S. 685). Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/klimabergv/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 11.08.2016.
- Klinzmann, Ch. (2008): Methodik zur computergestützten, probabilistischen Bauwerksbewertung unter Einbeziehung von Bauwerksmonitoring. Dissertation. TU Braunschweig, Braunschweig. IBMB. Online verfügbar unter <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00022956>, zuletzt geprüft am 17.07.2018.

- (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe) (2016): Abschlussbericht. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Berlin (K-Drs., 268). Online verfügbar unter http://www.bundes-tag.de/blob/434430/35fc29d72bc9a98ee71162337b94c909/drs_268-data.pdf, zuletzt geprüft am 05.07.2016.
- Leon Vargas, R. P.; Mintzlaff, V.; Stahlmann, J. (2017): Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability and monitoring. In: American Nuclear Society (ANS) (Hg.): 16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference. IHLRWM 2017. Charlotte, NC, 9.-13.04.2017. 1 Band, S. 664–670.
- Löffler-Mang, M. (2012): Optische Sensorik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. DOI: 10.1007/978-3-8348-8308-7.
- (MoDeRn) (2013): Case Studies. Final report. EC Deliverable: D-4.1. Unter Mitarbeit von M. Jobmann. Hg. v. European Atomic Energy Community (EURATOM). DBE TECHNOLOGY GmbH.
- (MoDeRn) (2014): Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis. Deliverable D-6.1. Unter Mitarbeit von M. J. White. Galson Sciences Limited (GSL). Online verfügbar unter http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/MoDeRn_D6.1_Project_Synthesis_Report.pdf, zuletzt geprüft am 30.09.2014.
- Mühl, Th. (2017): Elektrische Messtechnik. Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage 2017. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- (OECD-NEA) (2017): Partitioning and Transmutation of Minor Actinides and Fission Products. Hg. v. OECD Nuclear Energy Agency (OECD-NEA). Boulogne-Billancourt. Online verfügbar unter <https://www.oecd-nea.org/pt/>, zuletzt aktualisiert am 02.11.2017, zuletzt geprüft am 07.08.2018.
- Simon, H.; von der Gathen, A. (2010): Das große Handbuch der Strategieinstrumente. Alle Werkzeuge für eine erfolgreiche Unternehmensführung. 2. Auflage: Campus Verlag.
- Stahlmann, J.; Leon Vargas, R. P.; Mintzlaff, V. (2015a): Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. ENTRIA-Arbeitsbericht-03. Braunschweig. Online verfügbar unter http://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/Arbeitsberichte/ENTRIA-Arbeitsbericht-03_Stahlmann_GenerischeTiefenlagermodelle.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2018.
- Stahlmann, J.; Leon Vargas, R. P.; Mintzlaff, V. (2016): Geotechnische und geologische Aspekte für Tiefenlagerkonzepte mit der Option der Rückholung der radioaktiven Reststoffe. In: *Bautechnik* 93 (3), S. 141–150.
- Stahlmann, J.; Mauke, R.; Mohlfeld, M.; Missal, Ch. (2013): Monitoring of Sealing Dams. Experiences from a Test Set-up at the Repository ERAM, Germany. In:

MoDeRn Partners (Hg.): Proceedings of the MoDeRn Conference and Workshop. International conference on repository monitoring. Luxemburg, 19-21.03.2013. ANDRA, zuletzt geprüft am 21.09.2018.

- Stahlmann, J.; Missal, Ch.; Gährken, A. (2015b): Interaktionen zwischen Abdichtungsbauwerk und Wirtsgestein im Steinsalz. In: *Bautechnik* 92 (5), S. 370–376.
- Villar, M. V. (2004): Thermo-hydro-mechanical characterisation of the bentonite of a simulated HLW repository after five years operation. in situ test of the FEBEX Project. Hg. v. Ciemat (1049). Online verfügbar unter http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/026/36026403.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2018.
- Wieczorek, K.; Gaus, I.; Mayor, J. C.; Schuster, K.; Garcia-Siñeriz, J. L.; Sakaki, T. (2017): In-situ experiments on bentonite-based buffer and sealing materials at the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). In: *Swiss J Geosci* 110 (1), S. 253–268. DOI: 10.1007/s00015-016-0247-y.
- Wieczorek, K.; Schwarzieneck, P. (2004): Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2). Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand; Abschlussbericht. Köln, Garching b. München, Berlin: GRS (GRS, 198). Online verfügbar unter <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-198.pdf>, zuletzt geprüft am 15.07.2016.
- Wolf, J.; Herklotz, M.; Jobmann, M. (2008): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen. AP 8 - Geotechnische Überwachungsmethoden beim Endlagerbetrieb. EUGENIA. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine.

Anhang 0 Einleitung zu den Anhängen

Die ersten vier Anhänge zeigen die Konsistenzmatrizen für die einzelnen Wirtsgesteine, welche für die Szenarioentwicklung erstellt wurden. In den Zeilen ist jeweils die aktive Seite und in den Spalten die passive Seite der Einflussfaktoren dargestellt. Das bedeutet, dass in den Zellen der Tabelle der Einfluss des Zeileneinflussfaktors auf die Entwicklung des Spalteneinflussfaktors bewertet wird. Die Bewertung des Einflusses erfolgt mit Werten von 0 (kein Einfluss) bis 3 (starker Einfluss). In einem Tiefenlager in Steinsalz (Anhang 1) hat beispielsweise die eingebrachte Wärmemenge einen großen Einfluss auf die Temperatur im Versatz, jedoch keinen direkten Einfluss auf das Lichthohlraumprofil der Infrastrukturstrecke. Die Summe jeder Zeile gibt Aufschluss über die jeweilige Relevanz des aktiven Einflussfaktors, das heißt, ob dieser Faktor einen großen Einfluss (hoher Wert) oder einen geringen Einfluss (niedriger Wert) auf das Gesamtsystem hat. Die Summe jeder Spalte weist hingegen darauf hin, ob der betrachtete Einflussfaktor eine starke Abhängigkeit von anderen Faktoren zeigt oder sehr stabil gegen andere Einflüsse ist. Diese Bewertung wird schließlich bei der Entwicklung der Szenarien genutzt.

Anhang 5 gibt einen Überblick über mögliche Messtechniken zur messtechnischen Bestimmung einzelner Vorgänge in einem Tiefenlager (Einflussfaktoren für die Tiefenlagerentwicklung). Dafür werden die Vorgänge zunächst nach ihrer Ursache in die Bereiche „geometrisch“, „thermisch“, „mechanisch“, „hydraulisch“ und „chemisch“ eingeteilt. Anschließend werden die Orte, an denen diese Vorgänge zu erwarten sind, bestimmt. Für die Bestimmung dieser Vorgänge werden anschließend mögliche Messverfahren sowie dessen Messgrößen genannt.

Anhang 1 Konsistenzmatrix für ein Tiefenlagerkonzept in Steinsalz

Einflussfaktoren (Ort)	Lichtraumprofil (Infrastrukturstrecke)	Abmessungen (VBW)	Querschnitt (Einlagerungsstrecke)	Spannungsänderungen (WG)	volumetrische Dehnung, Kriechen (WG)	Spannungsänderung (V)	Porosität (V)	Festigkeit (VBW)	Spannungsänderung (VBW)	In-situ-Temperatur (WG)	Thermische Parameter (WG)	Thermische Parameter (V)	Wärmemenge (Reststoffe)	Wärmemenge (VBW)	Wettertemperatur	Temperatur (V)	Abbindewärme (VBW)	Permeabilität (VBW)	Permeabilität (ALZ)	Permeabilität (V)	Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	Schwinden (VBW)	Summe	Minimal Wert	Maximal Wert
	Lichtraumprofil (Infrastrukturstrecke)	3	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	10	0
Abmessungen (VBW)	0	1	1	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	11		
Querschnitt (Einlagerungsstrecke)	0	0	2	2	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	18		
Spannungsänderungen (WG)	1	0	3	3	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	17		
volumetrische Dehnung, Kriechen (WG)	3	0	3	3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	17		
Spannungsänderung (V)	0	0	0	0	3	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	7		
Porosität (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	6		
Festigkeit (VBW)	0	0	1	3	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8		
Spannungsänderung (VBW)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
In-situ-Temperatur (WG)	0	0	2	3	3	0	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0	16		
Thermische Parameter (WG)	1	0	2	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7		
Thermische Parameter (V)	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		
Wärmemenge (Reststoffe)	0	0	2	2	2	3	3	0	1	3	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	22		
Wärmemenge (VBW)	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	3	0	0	0	0	0	0	11		
Wettertemperatur	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	7		
Temperatur (V)	0	0	1	1	0	3	2	0	1	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	14		
Abbindewärme (VBW)	0	1	0	1	0	0	0	1	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	10		
Permeabilität (VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		
Permeabilität (ALZ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		
Permeabilität (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3		
Schwinden (VBW)	0	3	0	2	1	0	0	2	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	0	0	18		
Summe	5	8	17	24	18	13	12	5	21	13	2	4	0	1	4	5	8	6	13	11	2	7			
Minimal Wert	0																								
Maximal Wert	24																								

LEGENDE	
Bewertung	Bedeutung
0	kein oder wenig Einfluss
1	wenig oder zeitlich verzögerter Einfluss
2	mittlerer Einfluss
3	starker bis sehr starker Einfluss

Anhang 2 Konsistenzmatrix für ein Tiefenlagerkonzept in Ton

Einflussfaktoren (Ort)	Abmessungen (VBW)	Horizontale Verschiebungen (VBW)	Abmessungen (Widerlager)	Spannungsänderungen (WG)	Quelldruck (V)	Quelldruck (VBW)	Quelldruck (WG)	Festigkeit (Widerlager)	In-situ-Temperatur (WG)	Thermische Parameter (WG)	Thermische Parameter (VBW)	Thermische Parameter (V)	Wärmemenge (Reststoffe)	Abbindewärme (Widerlager)	Wärmemenge (Ausbau)	Wettertemperatur (Offene Bereiche)	Feuchtigkeit (V)	Feuchtigkeit (VBW)	Feuchtigkeit (WG)	Permeabilität (plastische Zone, VBW)	Permeabilität (Kontaktzone, WG-VBW)	Permeabilität (WG)	Permeabilität (VBW)	Ausdehnungsrisse (Widerlager)	Permeabilität (V)	Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	Schwinden (Widerlager)	Alterung (Widerlager)	Alterung (Ausbau)	Summe	Minimal Wert	Maximal Wert	
	Abmessungen (VBW)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	18
Horizontale Verschiebungen (VBW)	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4			
Abmessungen (Widerlager)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2			
Spannungsänderungen (WG)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2				
Quelldruck (V)	1	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	9			
Quelldruck (VBW)	3	3	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10			
Quelldruck (WG)	1	0	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	15			
Festigkeit (Widerlager)	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4			
In-situ-Temperatur (WG)	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8			
Thermische Parameter (WG)	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2			
Thermische Parameter (VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Thermische Parameter (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Wärmemenge (Reststoffe)	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	3	3	2	1	0	1	1	0	2	0	0	0	0	18			
Abbindewärme (Widerlager)	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	7				
Wärmemenge (Ausbau)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4				
Wettertemperatur (Offene Bereiche)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	8				
Feuchtigkeit (V)	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5			
Feuchtigkeit (VBW)	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6			
Feuchtigkeit (WG)	0	0	0	0	0	1	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7			
Permeabilität (plastische Zone, VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2				
Permeabilität (Kontaktzone, WG-VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Permeabilität (WG)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2				
Permeabilität (VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2				
Ausdehnungsrisse (Widerlager)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3				
Permeabilität (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2				
Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	6				
Schwinden (Widerlager)	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4				
Alterung (Widerlager)	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4				
Alterung (Ausbau)	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4					
Summe	5	8	3	22	6	7	5	5	7	3	2	3	0	0	0	5	5	7	9	6	6	5	1	2	5	2	4	7	6				
Minimal Wert	0																																
Maximal Wert	22																																

LEGENDE	
Bewertung	Bedeutung
0	kein oder wenig Einfluss
1	wenig oder zeitlich verzögerter Einfluss
2	mittlerer Einfluss
3	starker bis sehr starker Einfluss

Anhang 3 Konsistenzmatrix für ein Tiefenlagerkonzept in Tonstein

Einflussfaktoren (Ort)	Abmessungen (VBW)	Horizontale Verschiebungen (VBW)	Abmessungen (Widerlager)	Spannungsänderungen (WG)	Quelldruck (V)	Quelldruck (VBW)	Quelldruck (WG)	Festigkeit (Widerlager)	In-situ-Temperatur (WG)	Thermische Parameter (WG)	Thermische Parameter (VBW)	Thermische Parameter (V)	Wärmemenge (Reststoffe)	Abbindewärme (Widerlager)	Wettertemperatur (Offene Bereiche)	Durchfluss (Infrastruktur)	Durchfluss (Einlagerungsstrecke)	Feuchtigkeit (V)	Feuchtigkeit (VBW)	Feuchtigkeit (WG)	Permeabilität (plastische Zone)	Spaltbildung (Kontaktfläche WG-VBW)	Permeabilität (WG)	Permeabilität (VBW)	Ausdehnungsrisse (Widerlager)	Permeabilität (V)	Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	Schwinden (Widerlager)	Alterung (Widerlager)	Alterung (Ausbau) (Infrastrukturstrecke)	Summe	Minimal Wert	Maximal Wert	
	Abmessungen (VBW)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	23
Horizontale Verschiebungen (VBW)	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4			
Abmessungen (Widerlager)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2			
Spannungsänderungen (WG)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4				
Quelldruck (V)	1	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	10			
Quelldruck (VBW)	3	3	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	12				
Quelldruck (WG)	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10			
Festigkeit (Widerlager)	0	2	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4			
In-situ-Temperatur (WG)	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7			
Thermische Parameter (WG)	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2			
Thermische Parameter (VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Thermische Parameter (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Wärmemenge (Reststoffe)	0	0	0	2	1	1	0	0	2	1	1	1	0	1	0	0	3	3	2	1	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	23			
Abbindewärme (Widerlager)	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	7				
Wettertemperatur (Offene Bereiche)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	8			
Durchfluss (Infrastruktur)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	8			
Durchfluss (Einlagerungsstrecke)	0	0	0	0	2	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	11			
Feuchtigkeit (V)	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6			
Feuchtigkeit (VBW)	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6			
Feuchtigkeit (WG)	0	0	0	0	1	1	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9			
Permeabilität (plastische Zone)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
Spaltbildung (Kontaktfläche WG-VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
Permeabilität (WG)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6			
Permeabilität (VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2			
Ausdehnungsrisse (Widerlager)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3			
Permeabilität (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4			
Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	6			
Schwinden (Widerlager)	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4			
Alterung (Widerlager)	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4			
Alterung (Ausbau)	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3				
Summe	5	8	3	20	10	10	7	5	6	6	3	3	0	0	4	5	14	7	5	9	2	5	3	1	2	5	2	5	10	8				
Minimal Wert	0																																	
Maximal Wert	20																																	

LEGENDE	
Bewertung	Bedeutung
0	kein oder wenig Einfluss
1	wenig oder zeitlich verzögerter Einfluss
2	mittlerer Einfluss
3	starker bis sehr starker Einfluss

Anhang 4 Konsistenzmatrix für ein Tiefenlagerkonzept in kristallinem Hartgestein

Einflussfaktoren (Ort)	Abmessungen (VBW)	Horizontale Verschiebungen (VBW)	Abmessungen (Widerlager)	Spannungsänderungen (WG)	Quelldruck (V)	Quelldruck (VBW)	Festigkeit (Widerlager)	In-situ-Temperatur (WG)	Thermische Parameter (WG)	Thermische Parameter (V)	Wärmemenge (Reststoffe)	Abbindewärme (Widerlager)	Wettertemperatur (Offene Bereiche)	Durchfluss Grundwasser (Infrastruktur)	Durchfluss Grundwasser (Einlagerungsstrecke)	Permeabilität (Kontaktzone, WG-VBW)	Permeabilität (WG, Trennflächen)	Permeabilität (VBW)	Ausdehnungsrisse (Widerlager)	Permeabilität (V)	Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	Schwinden (Widerlager)	Summe	Minimal Wert	Maximal Wert
	Abmessungen (VBW)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	0	0	0	0	7	0
Horizontale Verschiebungen (VBW)	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3		
Abmessungen (Widerlager)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	5		
Spannungsänderungen (WG)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Quelldruck (V)	0	2	0	3	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	12		
Quelldruck (VBW)	3	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	3	0	0	0	0	15		
Festigkeit (Widerlager)	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3		
In-situ-Temperatur (WG)	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6		
Thermische Parameter (WG)	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3		
Thermische Parameter (V)	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		
Wärmemenge (Reststoffe)	0	0	0	1	2	2	1	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10		
Abbindewärme (Widerlager)	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	6		
Wettertemperatur (Offene Bereiche)	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4		
Durchfluss Grundwasser (Infrastruktur)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	1	5		
Durchfluss Grundwasser (Einlagerungsstrecke)	0	0	0	0	3	3	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	11		
Permeabilität (Kontaktzone, WG-VBW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2		
Permeabilität (WG, Trennflächen)	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	1	0	0	9		
Permeabilität (VBW)	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	5		
Ausdehnungsrisse (Widerlager)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2		
Permeabilität (V)	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5		
Luftfeuchtigkeit (Offene Bereiche)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	3		
Schwinden (Widerlager)	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	6		
Summe	3	7	3	16	12	10	2	9	1	5	0	2	5	5	12	7	0	4	6	3	6	6			
Minimal Wert	0																								
Maximal Wert	16																								

LEGENDE	
Bewertung	Bedeutung
0	kein oder wenig Einfluss
1	wenig oder zeitlich verzögerter Einfluss
2	mittlerer Einfluss
3	starker bis sehr starker Einfluss

Anhang 5 Möglichkeiten für das Nahfeldmonitoring eines generischen Tiefenlagers

	Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Mögliche Messverfahren	Messgröße	Anmerkungen
Geometrisch	Konvergenz	Infrastrukturstrecken und Monitoringstrecken	<ul style="list-style-type: none"> Einmessung der Hohlraumkontur mittels Geodäsie Geodätische Einmessung der absoluten Lage über Festpunkt über Tage 	Strecke δ [m]	<ul style="list-style-type: none"> Steinsalz: Erwartete Konvergenzen im Zentimeterbereich Alle anderen WG: Erwartete Konvergenzen im Millimeterbereich
	Lageverschiebung	VBW			<ul style="list-style-type: none"> Erwartete Verschiebungen im Zentimeterbereich
	Spaltbildung an der Kontaktfläche zw. WG und VBW bzw. WG und V	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Messung von ϵ mittels Extensometer, dessen Messkopf sich im VBW und Anker im WG befinden oder umgekehrt 	Dehnung/Stauchung ϵ [-]	<ul style="list-style-type: none"> Detektierte Längenänderung gibt Aufschluss über ϵ Rückschluss auf potentielle Spaltbildung bei Dehnung Rückschluss auf potentielle Spaltschließung bei Stauchung Erwartete Messgröße: mehrere Zentimeter
		V	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Dehnung/Stauchung mittels Extensometer, dessen Messkopf sich im V und Anker im WG befinden 		
		WG	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Temperatur über Temperatursensor im WG 		
Thermisch	Wettertemperatur	Infrastrukturbereich und Monitoringsohle	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Effektivtemperatur in Abhängigkeit der rel. Luftfeuchte über ein Aspirationspsychrometer in Kombination mit einem Temperatursensor 	Temperatur T_{eff} [°C]	<ul style="list-style-type: none"> Effektivtemperatur hängt von Trockentemperatur, Feuchttemperatur und Wettergeschwindigkeit (nach KlimaBergV) ab Erwartete Temperaturspanne: 30°C, Genauigkeit 0,1°C
	Abbindewärme	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Temperatur über Temperatursensor an der Luftseite des VBW/an der Rückseite des VBW/im VBW 	Temperatur T [°C]	<ul style="list-style-type: none"> Erwartete Temperaturspanne: 50°C, Genauigkeit 0,1°C
	In-situ Temperatur	V und WG	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Temperatur über Temperatursensor im V und im WG 	Temperatur T [°C]	<ul style="list-style-type: none"> Erwartete Temperaturspanne: 100°C, Genauigkeit 0,1°C
Hydraulisch	Zufluss	Infrastrukturbereich	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung der fassbaren Wassermenge pro Zeiteinheit in definiertem Bereich des Infrastrukturbereichs 	Zufluss Q [m³/h]	<ul style="list-style-type: none"> Nur bei Konzept im kristallinem Hartgestein zu berücksichtigen
		Monitoringstrecke	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung der fassbaren Wassermenge pro Zeiteinheit in definiertem Bereich der Monitoringstrecke 		
	In-situ Feuchtigkeit	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der Feuchtigkeit über Feuchtigkeitsmessgeber in VBW 	Feuchtigkeit w [%]	
		V	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der Feuchtigkeit über Feuchtigkeitsmessgeber in V 		
		WG	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der Feuchtigkeit über Feuchtigkeitsmessgeber in WG 		
	Permeabilität	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Durchströmungsversuch an Proben im Labor in-situ Packerversuche in Bohrloch im VBW 	Permeabilität K [m²]	<ul style="list-style-type: none"> Proben für das Labor (Rückstellproben oder Kernbohrung) Rückschluss auf Permeabilität über Durchlässigkeit
		V	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der seismischen Geschwindigkeit des V über Seismik 	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> Veränderung der seismischen Geschwindigkeit lässt Rückschlüsse zur Dichte und Porosität und somit zur Permeabilität zu
WG		<ul style="list-style-type: none"> in-situ Durchströmungs- bzw. Packerversuch in Bohrloch im WG 	Permeabilität K [m²]	<ul style="list-style-type: none"> Durchströmungsversuch nur beim Konzept im kristallinen Hartgestein möglich 	
Bildung einer ALZ	WG	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der seismischen Geschwindigkeit im WG über Seismik Detektion mikroseismischer Ereignisse 	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> Anwendung der Cross-Borehole Methode Veränderung der seismischen Geschwindigkeit lässt Rückschluss über Dichte und über einer ALZ zu Mikroseismische Ereignisse zeigen diskrete Bruchereignisse an und gegen somit Rückschluss über die Bildung einer ALZ 	

	Vorgang	Ort der Zustandsänderung	Mögliche Messverfahren	Messgröße	Anmerkungen
Mechanisch	Spannungsaufbau zw. VBW und WG	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen in der Kontaktfläche zw. VBW und WG über Totspannungsgeber 	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Erwartete Spannung 25 MPa, erwartete Spannungsänderung 1 MPa, Auflösung 1 kPa
	Festigkeitsentwicklung	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Ermittlung der Festigkeit über Nutzung der Hammerschlagmethode Druckversuche im Labor 	Festigkeit f_y [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Ermittlung an der Luftseite des VBW Proben für das Labor aus Rückstellproben oder Kernbohrungen
	Schwinden	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Dehnungen/Stauchungen innerhalb des Verschlussbauwerks über eingebaute Extensometer 	Dehnung/Stauchung ϵ [-]	<ul style="list-style-type: none"> Aufschluss über Dehnung/Stauchung durch detektierte Längenänderung Rückschluss über Schwinden durch Stauchung
	Ausdehnungsrisse	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Beobachtung der Rissbreitenweite über Fissurometer an der Luftseite des VBW Durchschallung des VBW mit Ultraschall, um Risse parallel zur Luftseite zu detektieren 	Rissbreite w [mm] Wellengeschwindigkeit v [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> Beobachtung von bereits sichtbaren Risse (nur an der Luftseite des VBW) Rückschluss auf potentielle Risse durch Änderung der Wellengeschwindigkeit
	Spannungsaufbau zw. VBW und WG	VBW	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen in der Kontaktfläche zw. VBW und WG über Totspannungsgeber 	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Erwartete Spannung 25 MPa, erwartete Spannungsänderung 1 MPa, Auflösung 1 kPa
	Spannungsaufbau zw. V und WG	V	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen in der Kontaktfläche zw. V und WG über Totspannungsgeber 	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Steinsalz/Salzgrus: Erwartete Spannung bis 20 MPa, erwartete Spannungsänderung 1 MPa, Auflösung 1 kPa Andere WG/Bentonit: Erwartete Spannung 10 MPa, erwartete Spannungsänderung 1 MPa, Auflösung 1 kPa
	Kompaktion des Salzgrus	V	<ul style="list-style-type: none"> Messung der Spannungen im V über (Total)Spannungsgeber 	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Nur beim Konzept im Steinsalz zu berücksichtigen
	Porosität des Salzgrus	V	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der seismischen Geschwindigkeit des V über Seismik 	seismische Geschwindigkeit $v_{p/s}$ [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> Nur beim Konzept im Steinsalz zu berücksichtigen Rückschluss auf die Porosität (Dichte) durch Veränderung der seismischen Geschwindigkeit
	Aufbau eines Quelldrucks	V	<ul style="list-style-type: none"> Messung der σ im V über Totspannungsgeber 	Spannung σ [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> Nur bei Konzepten mit Bentonit-basiertem Versatz zu berücksichtigen
	Porenwasserdruck (PWD)		V	<ul style="list-style-type: none"> Messung des PWD über Porenwasserdrucksensor im V 	Porenwasserdruck u [MPa]
WG			<ul style="list-style-type: none"> Messung des PWD über Porenwasserdrucksensor im WG 		
Chemisch	Redoxpotential der Zutrittswasser bzw. Lösungen	Infrastrukturbereich und Monitoringsohle	<ul style="list-style-type: none"> Messung der elektrischen Spannung in den gefassten Zutrittswässern über edelmetallische Redoxelektroden 	elektrische Spannung U [V]	
	pH-Wert der Zutrittswasser bzw. Lösungen	Infrastrukturbereich und Monitoringsohle	<ul style="list-style-type: none"> pH-Wert Messung an den gefassten Zutrittswässern 	pH-Wert [-]	