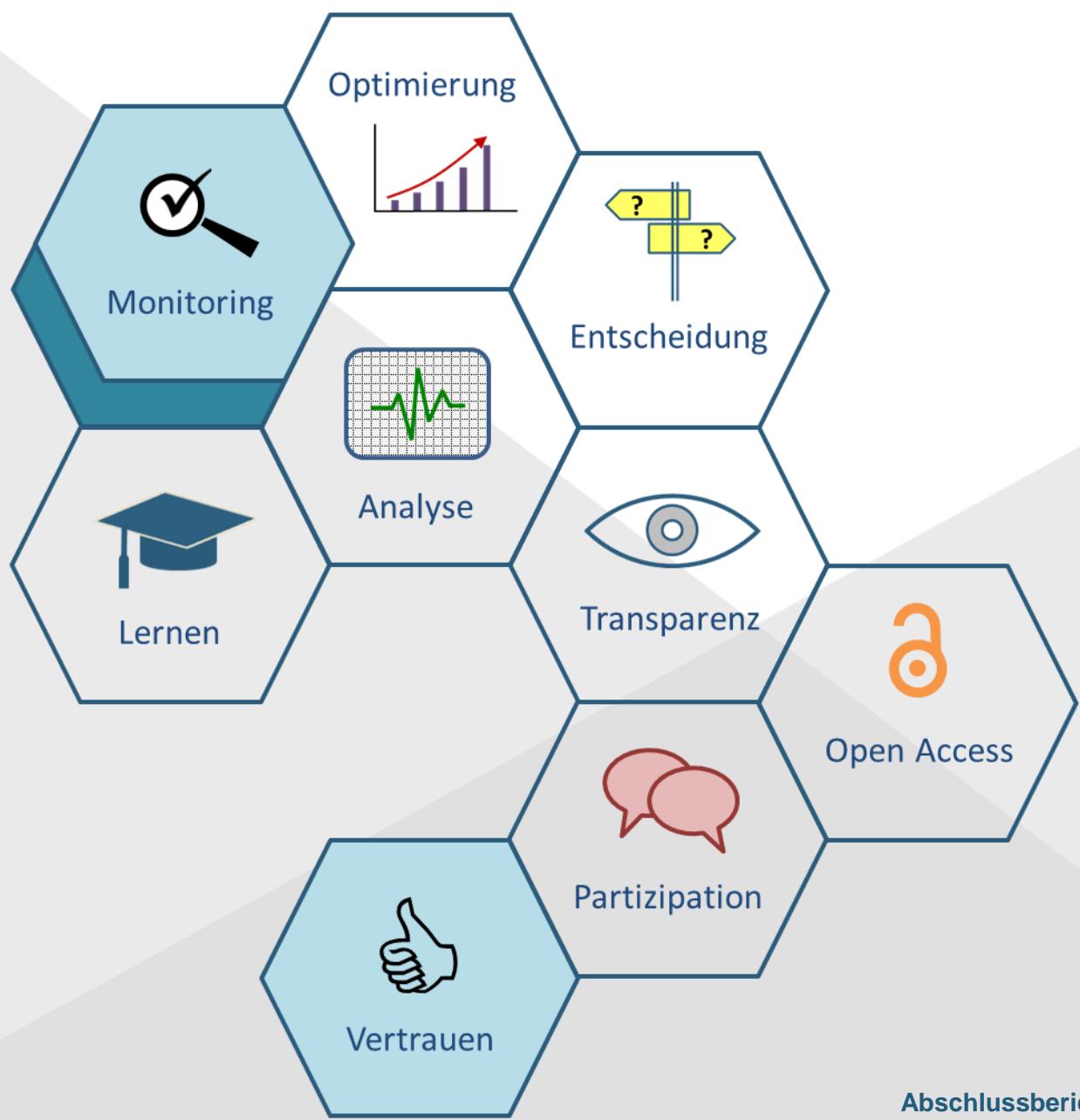


MONTANARA

Monitoring von Endlagern für hochradioaktive Abfälle mit Blick auf die Langzeitsicherheit und im Kontext der Partizipation

BGE TEC 2019-02





BGE TECHNOLOGY GmbH

MONTANARA

Monitoring von Endlagern für hochradioaktive Abfälle mit Blick auf die Langzeitsicherheit und im Kontext der Partizipation

BGE TEC 2019-02

Autor Michael Jobmann

Datum 30.10.2019

Förderkennzeichen 02E11385

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes
"Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen"
(MONTANARA)

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Monitoring im internationalen Kontext.....	5
2.1	Richtlinie der IAEA zum Thema Monitoring (Tecdoc-1208) 2001	6
2.2	Das 'European Thematic Network on Monitoring' (ETN) 2004	8
2.3	IAEA-Sicherheitsanforderungen (WS-R-4) 2006 und (SSR-5) 2011	9
2.4	Monitoring-Workshop in Genf 2007	10
2.5	Das europäische MODERN Projekt 2009-2013	11
2.6	Forschungsinitiative des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) 2011.....	13
2.7	Sicherheitsrichtlinie der IAEA für Endlager (SSG-14) 2011.....	14
2.8	Das europäische MODERN2020 Projekt 2015-2019	14
2.9	IAEA Arbeitsgruppe zum Thema Monitoring 2019	18
2.10	Fazit der bisherigen historischen Entwicklung zum Thema Monitoring...	19
3	Rahmenbedingungen für ein Monitoring in Deutschland.....	22
3.1	Vorgaben aus den deutschen Sicherheitsanforderungen.....	22
3.2	Empfehlungen der Endlagerkommission.....	23
3.2.1	Generelle Aussagen zum Thema Monitoring.....	23
3.2.2	Prozess- und Endlagermonitoring	24
3.3	Fazit und Zusammenfassung der Rahmenbedingungen.....	28
4	Der Weg zu einem Monitoring-Konzept	29
4.1	Strategische Grundlagen	29
4.2	Konzeptionelle Grundlagen.....	29
4.2.1	Grubengebäude	29
4.2.2	Verschlusskonzept	30
4.3	Methode des Parameter-Screenings	33
4.3.1	Generelle Beschreibung.....	33
4.3.2	Schritte im Parameter-Screening	35
4.4	Bestimmung von Monitoring-Parametern am Beispiel eines EB.....	41
4.4.1	Sicherheitsfunktion und Leistungsziele.....	41
4.4.2	Ermittlung einwirkender Prozesse	43
4.4.3	Screening zur Parameter-Identifizierung	45
5	Monitoring-Konzept für ein Endlager im Tonstein	52
5.1	Generelles Konzept	53
5.2	Spezifische Konzepte	57
5.2.1	Konzept für Monitoring-Bohrlöcher	57
5.2.2	Konzept für Opfer-Bohrlöcher.....	64
5.2.3	Konzept für Versatz.....	66
5.2.4	Konzept für Migrationssperren	67
5.2.5	Konzept für Schachtverschlüsse	68
6	Monitoring-Konzept für ein Endlager im Steinsalz.....	71
6.1	Generelles Konzept	71
6.2	Spezifische Konzepte	74
6.2.1	Konzept für Versatz.....	74
6.2.2	Konzept für Streckenverschlüsse im Zugangsbereich	74
6.2.3	Konzept für Schachtverschluss	76
7	Verwendung von Monitoring-Ergebnissen	78
7.1	Monitoring im Zusammenhang mit Entscheidungsprozessen	78
7.1.1	Entscheidungen im Zusammenhang mit der Dummy-Phase	79

7.1.2	Entscheidungen im Zusammenhang mit der Test-Phase	80
7.1.3	Entscheidungen im Zusammenhang mit der Einlagerungsphase	82
7.2	Monitoring im Zusammenhang mit Vertrauensbildung	87
7.3	Grenzen der Anwendbarkeit eines Monitoring	92
8	Zusammenfassung und Fazit.....	96
9	Literaturverzeichnis.....	98
	Abkürzungsverzeichnis.....	101

Anhang A: Ergebnisse von Modellberechnungen zur Parameterentwicklung

Anhang B: Fehlererkennung

Vorwort

"Wir können nicht beobachten, ohne das zu beobachtende Phänomen zu stören, ...".

Dieser Ausspruch stammt von **Werner Heisenberg** aus seinem Buch "Der Teil und das Ganze". auf Seite 126.

Der Physiker und Philosoph Werner Heisenberg wurde am 05.12.1901 in Würzburg geboren und verstarb am 01.02.1976 in München. Er gilt zusammen mit Erwin Schrödinger als Begründer der Quantenmechanik. Im Jahre 1927 formulierte er die Unschärferelation (auch Unbestimmtheitstheorie genannt), wonach Ort und Impuls eines subatomaren Teilchens nicht gleichzeitig bestimmt werden können. Für seine quantenphysikalischen Forschungsarbeiten erhielt er 1932 den Nobelpreis für Physik.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde Heisenberg Direktor des Max-Planck-Instituts. Seine „Einheitliche Theorie der Elementarteilchen“ aus dem Jahre 1958 wurde als „Weltformel“ bezeichnet und festigte Heisenbergs Stellung als einer der bedeutendsten Vertreter der Quantenphysik.



Foto: brainpickings.org

Quelle:

Heisenberg, W. (1969). Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper Verlag GmbH, 2013, ISBN 978-3-492-96360-2, München.

Im Zusammenhang mit einem **Monitoring** hat dieser Satz von Werner Heisenberg nichts von seiner Aktualität verloren. Wird ein Objekt einem Monitoring unterzogen, so wird dafür ein entsprechendes technisches Werkzeug benötigt, das eine geeignete Beobachtung erlaubt. Bei derendlagerung radioaktiver Abfälle ist die Einschlusswirksamkeit der Barrieren von entscheidender Bedeutung. Und damit ist nicht nur das einschließende Gestein gemeint. Was nutzt das am besten geeignete Gestein, wenn es nicht gelingt, die bergmännischen Zugänge in gleicher Weise sicher zu verschließen? Zu diesem Zweck werden Abdichtbauwerke, die sogenannten geotechnischen Barrieren errichtet. Und es ist keinesfalls ein abweigiger Wunsch, die korrekte Funktion dieser Barrieren, zumindest für eine gewisse Zeit, beobachten zu wollen, um "sicher" zu sein, dass diese ihre ihnen zugesetzte Funktion auch langfristig erfüllen werden. Der Einbau technischer Beobachtungssysteme kann auch mit einer Schwächung der Abdichteigenschaft von Barrieren verbunden sein. Es gilt also einen Kompromiss zu finden zwischen dem Wunsch zur Beobachtungskontrolle und der ungestörten Einschlusskraft der Barrieren.

Michael Jobmann

1 Einleitung

Die erfolgreiche Umsetzung eines Endlagerprogramms für radioaktive Abfälle stützt sich sowohl auf technische Aspekte einer fundierten Sicherheitsstrategie und wissenschaftliche und ingenieurtechnische Kompetenz als auch auf soziale Aspekte wie Akzeptanz und Vertrauen von Seiten der Interessengruppen. Monitoring gilt als Schlüssel, wenn es darum geht, beiden Aspekten gerecht zu werden. Nicht nur ist es wichtig, die technische Sicherheitsstrategie und Qualität der Technik zu untermauern, Monitoring kann auch ein wichtiges Instrument für die öffentliche Kommunikation sein und damit in der Öffentlichkeit zum allgemeinen Verstehen der Endlagerabläufe und zur Vertrauensbildung in die prognostizierte Endlagerentwicklung beitragen.

Das Monitoring eines Endlagers spielt eine wichtige Rolle von der Entwicklung bis zur Umsetzung von Endlagerprogrammen in tiefen geologischen Formationen, denn sie liefert nützliche Informationen für einen sicheren Betrieb in den verschiedenen Phasen einer Endlagerentwicklung sowie für die Verifizierung der im Vorfeld durchgeföhrten Langzeitsicherheitsanalyse. Ferner stellen Monitoring-Ergebnisse eine Unterstützung für die Entscheidungen dar, die in allen Phasen eines Endlagerprogramms zu fällen sind.

Aufgrund des langen Zeitraums, in dem die radioaktiven Abfällen sicher eingeschlossen bleiben müssen, darf die Langzeitsicherheit nicht auf gegenwärtig herrschende behördliche Kontrollen aufbauen. International wird das Prinzip der generationsübergreifenden Gleichheit verfolgt, wonach zukünftigen Generationen die Entsorgung der radioaktiven Abfälle bzw. die Nachsorge von Endlagern nicht zugemutet werden darf. Eine Prognose darüber, ob zukünftige Generation die Problemstellung der radioaktiven Abfälle bewältigen können bzw. diese Verantwortung überhaupt auf sich nehmen wollen, ist nicht möglich und ohnehin aufgrund des Gleichheitsprinzips nicht zulässig. Daher muss die Endlagerung heute derart gestaltet werden, dass eine intrinsische und passive Sicherheit gewährleistet ist und, zumindest prinzipiell, ein Endlager nach der Schließung keines Monitorings bedarf (NEA 1982). Jedoch scheint es ein gesellschaftliches Bedürfnis zu sein, das Endlager-Monitoring nach der Schließung fortzusetzen. Ein transparent gestaltetes Monitoring könnte das Vertrauen der Gesellschaft in die Endlagerung stärken.

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen dem Monitoring an der Erdoberfläche, der sogenannten Umgebungsüberwachung, und dem Monitoring des Endlagers selber, also dem Monitoring des untertägigen Grubengebäudes und seiner Gesteinsumgebung inklusive des geotechnischen Barrierensystems in Bohrlöchern, Strecken und Schächten. Der Fokus des MONTANARA Projektes lag auf dem Letzteren, also dem Monitoring des geotechnischen Barrierensystems, speziell vor dem Hintergrund der informellen Unterstützung des Sicherheitsnachweises. Das Projekt wurde in enger Kooperation mit dem europäischen Verbundvorhaben zum Thema Monitoring „MODERN2020“ durchgeföhr, dessen Arbeitsschwerpunkte im Bereich der Monitoring Strategien, der Monitoring Technologien und der potenziellen Einbindung von externen Interessengruppen (Stakeholder) lag. Abb. 1.1 zeigt die prinzipielle Projektstruktur mit den einzelnen Themenbereichen und die Verbindung mit dem MONTANARA Projekt. Eine kurze Erläuterung zu den inhaltlichen Arbeiten in dem MODERN2020 Projekt wird in Kapitel 2.8 des vorliegenden Berichtes gegeben.

In den folgenden Kapiteln erwartet sie ein Überblick über das Thema Monitoring im internationalen Kontext, den Rahmenbedingungen für ein Monitoring in Deutschland, Vorschläge, wie ein Monitoring-Konzept im Zusammenhang mit dem Sicherheitsnachweis erarbeitet werden kann, Beispiele für Monitoring-Konzepte sowie eine Diskussion über die Verwendung von Monitoring-Ergebnissen im Zusammenhang mit Entscheidungsprozessen und Vertrauensbildung mit Blick auf die Möglichkeiten aber auch den Grenzen, die einem Monitoring gesetzt sind.

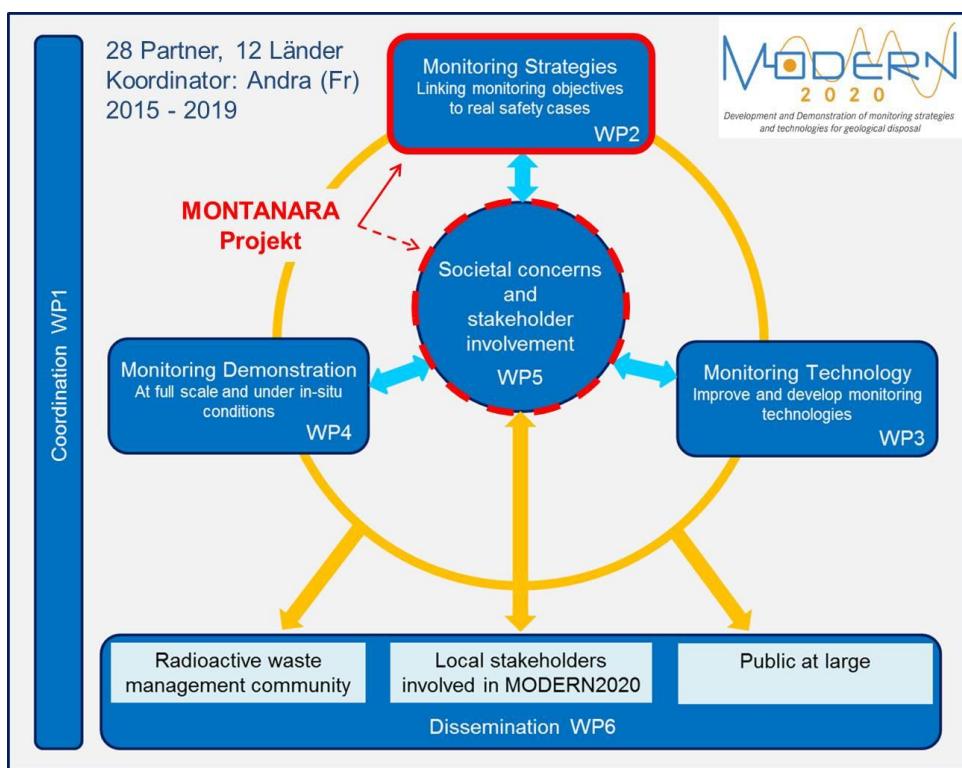


Abb. 1.1:
Prinzipielle Struktur
des MODERN2020
Projektes und die
Verbindung zum
MONTANARA
Projekt (rot markiert)

Im Zuge der Bearbeitung des MODERN2020 Projektes wurden eine Reihe von Ergebnisberichten erstellt, die im Folgenden aufgelistet sind. PDF-Versionen der Berichte stehen u.a. auf der Webpage der BGE TECHNOLOGY (www.bge-technology.de) zum Download bereit.

Nr.	Titel
D6.5	MODERN2020 Project Synthesis
D6.3	Proceedings of the international conference on repository monitoring
D2.1	Repository monitoring strategies and screening methodologies
D2.2	Monitoring parameter screening: Test cases
D2.3	Responding to monitoring results
D3.1	Synthesis report on relevant monitoring technologies for repositories
D3.2	Wireless data transmission systems for repository monitoring systems
D3.3	Long-term power supply sources for repository monitoring
D3.4	New sensors for repository monitoring
D3.5	Geophysical methods for repository monitoring
D3.6	Reliability and qualification of components
D4.1	Full-scale in-situ systems test (Finland)
D4.2	HA industrial pilot experiment (France)
D4.3	LTRBM (IRSN, France)
D4.4	FE and TEM results (Nagra, Switzerland)
D4.5	Good practices for implementing monitoring strategy
D5.1	Monitoring the Underground
D5.2	Stakeholder Guide
D5.3	Engaging local citizen stakeholders in R&D at the European level: the case of monitoring for geological disposal

2 Monitoring im internationalen Kontext

Dieses Kapitel enthält zusammenfassende Hintergrundinformationen über wesentliche internationale Entwicklungen im Bereich des Monitoring von Endlagern in tiefen geologischen Formationen. Meilensteine und internationale Projekte zu diesem Thema sind chronologisch in Abb. 2.1 grafisch aufgezeigt.



Abb. 2.1: Historische Entwicklung internationaler und nationaler Projekte zum Thema Monitoring

Erstmals wurde zu Beginn der Jahrtausendwende dem Thema Monitoring von Endlagern, speziell für hoch-radioaktive Abfälle, besondere Bedeutung beigemessen. Seitens der IAEA wurde mit der Tecdoc-1208 (IAEA 2001) ein von allen Mitgliedsstaaten akzeptierter Bericht zu diesem Thema verfasst, der unter anderem mögliche Zielsetzungen für das Monitoring von Endlagern für hoch-radioaktive Abfälle aufzeigt. Darauf aufbauend wurde auf europäischer Ebene das sogenannte 'European Thematic Network (ETN)' initiiert, im Rahmen dessen verschiedene Aspekte eines möglichen Endlager-Monitorings diskutiert wurden (ETN 2004). In dem IAEA Bericht von 2006 taucht das Thema Monitoring erstmals im Zusammenhang mit Sicherheitsanforderungen für Endlager auf (IAEA 2006). Dieses Dokument wurde 2011 ersetzt durch die "Specific Safety Requirements" (IAEA 2011a), in denen erstmals explizit auch eine Anforderung zur Entwicklung und Durchführung eines Monitoring-Programms für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle formuliert wurde.

Angestoßen, im Wesentlichen durch die Diskussionen im Rahmen des 'European Thematik Networks', wurde im Jahr 2007 ein spezieller internationaler Workshop zum Thema Monitoring von Endlagern für hoch-radioaktive Abfälle von RWMC, Japan und NIREX, UK, in Genf organisiert. Auf diesem Workshop wurden auch erstmals soziale Implikationen eines Endlager-Monitoring diskutiert (Harvey & White 2008). Dieser Workshop kann als Meilenstein oder auch als Initialzündung angesehen werden, woraufhin anschließend auf breiter Front Aktivitäten zum Thema Monitoring von Endlagern gestartet wurden.

Als bahnbrechend kann in diesem Zusammenhang das von der Europäischen Kommission geförderte Projekt MODERN genannt werden, das von deutscher Seite mit dem vom BMWi geförderten FuE-Projekt 'Mona' inhaltlich durch DBE TECHNOLOGY GmbH begleitet wurde (MODERN 2013a). Im Rahmen dieses Projektes wurde von 18 Organisationen aus 12 verschiedenen Ländern unter Beteiligung der USA und Japan eine erste Rahmenrichtlinie zur Entwicklung und Umsetzung verschiedener Monitoring-Aktivitäten für HAW Endlager auf europäischer Ebene entwickelt. Die Rahmenrichtlinie stützt sich auf Erfahrungen, die in den Endlagerprogrammen der einzelnen Länder gemacht wurden und entwickelte erste Ansätze zur Einbindung der Öffentlichkeit.

Parallel dazu wurde seitens der IAEA zum einen ein "Specific Safety Guide, SSG-14" für Endlager in tiefen geologischen Formationen (IAEA 2011b) herausgebracht, der ein Monitoring erstmals direkt mit dem sogenannten "Safety Case" verknüpft. Intensiviert wurde diese Verknüpfung in dem ein Jahr später erschienenen "Specific Safety Guide SSG-23", wo es speziell um die Sicherheitsanalyse und Bewertung geht (IAEA 2012). Gleichzeitig wurde an einem weiteren "Specific Safety Guide" gearbeitet, der das Thema Monitoring auch eigenständig in einem internationalen Sicherheitsstandard verankern sollte (IAEA 2014). Die zeitli-

che Parallelität der Arbeiten der MODERN-Gruppe und der IAEA ermöglichte es, dass dieser "Specific Safety Guide SSG-31" der IAEA durch Mitglieder des MODERN Konsortiums einem Review unterzogen werden konnte, der sicherstellte, dass die im MODERN Projekt entwickelten Strategien sich in angemessener Weise im "Specific Safety Guide" widerspiegeln.

Ebenfalls parallel zum MODERN Projekt wurde seitens des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) in Deutschland eine Forschungsinitiative gestartet mit dem Titel "Untersuchung geeigneter Methoden für das Monitoring eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen von der Oberfläche aus und in der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase". Wesentliche Aufgabe dieses Projektes war es, eine Beurteilungsbasis zu erstellen, in welcher Form sicherheitsrelevante Informationen über den Zustand eines verschlossenen Endlagerbergwerkes, vornehmlich in einer Salzformation, in der frühen Nachbetriebsphase technisch gewonnen werden können. Die Arbeiten wurden von DBE TECHNOLOGY und Geophysik und Geotechnik Leipzig (GGL) gemeinsam durchgeführt (Jobmann et al. 2011).

Angeregt durch den Erfolg des MODERN Projektes, das es weitgehend geschafft hat, eine gemeinsame internationale Sichtweise zu Aspekten des Monitorings von Endlagern zu entwickeln, wurde seitens der Europäischen Kommission ein darauf aufbauendes Projekt seit 2015 gefördert. Dieses Projekt mit dem Namen MODERN2020 wurde von 28 europäischen Partnern getragen und hatte zum Ziel, die Grundlagen zur Entwicklung und Umsetzung eines effizienten Monitoring-Programms für HAW Endlager bereitzustellen, das die spezifischen Anforderungen nationaler Endlagerprogramme berücksichtigt (White et al. 2019). Von deutscher Seite wird dieses Projekt mit dem vom BMWi geförderten FuE-Projekt 'MONTANARA' (dieser Bericht) inhaltlich durch DBE TECHNOLOGY begleitet.

Im Jahr 2017 hat die IAEA ein weiteres Projekt gestartet unter der Überschrift: "Establishment of a Working Group on the Use of Monitoring Programmes in the Safe Development of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste". Das Ziel dieses Projektes ist es, einen speziellen Aspekt des Monitorings in den Vordergrund zu rücken, und zwar den, dass Monitoring-Ergebnisse genutzt werden können und sollten, wenn es darum geht Entscheidungsfindungsprozesse im Zuge des Endlagerprogramms informativ zu unterstützen und somit auch transparent zu machen. Dieser Aspekt der informativen Unterstützung von Entscheidungen ist auch ein Teil der Arbeiten, die in dem MODERN2020 Projekt angesprochen werden. Aus diesem Grund war es naheliegend, eine Zusammenarbeit des MODERN2020 Konsortiums mit der IAEA für diesen Aspekt zu organisieren. Vier Partner des MODERN2020 Konsortiums (ANDRA, SKB, CTU und BGE TECHNOLOGY) haben als Kerngruppe des IAEA Projektes die Aufgabe übernommen, die Arbeiten zu steuern. Letztendlich soll ein neues IAEA 'Technical Document' erstellt werden, das den Aspekt der Unterstützung von Entscheidungen von verschiedenen Seiten detailliert beleuchtet. Dieses Dokument wird für Ende 2020 erwartet.

Im Folgenden werden wesentliche Aussagen der eben angesprochenen Richtlinien und Projekte im Einzelnen zusammenfassend dargestellt.

2.1 Richtlinie der IAEA zum Thema Monitoring (Tecdoc-1208) 2001

Die IAEA Monitoring-Richtlinie TECDOC-1208 (IAEA 2001) erörtert erstmals die möglichen Zielsetzungen für das Monitoring eines Endlagers für hoch-radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Sie tut dies in Verbindung mit den unterschiedlichen Phasen eines Endlagerprogramms von der Erkundung bis zur Nachverschlussphase. Sie erörtert auch, wie die so erhaltenen Informationen genutzt und welche Techniken dazu eingesetzt werden könnten. Dieses Dokument weist dem Thema Monitoring eines geologischen Endlagers erstmals besondere Bedeutung zu und sagt:

Monitoring liefert wesentliche Informationen [...] und stärkt dadurch das Vertrauen in die Langzeitsicherheit.

Insbesondere führt sie fünf wesentliche Ziele für ein Monitoring auf, welche erachtet werden sollen als wichtige Unterstützung bei der Entscheidungsfindung in allen Phasen des Endlagerprogramms.

Die fünf Hauptgründe für Monitoring (IAEA 2001)

- Bereitstellung von Informationen zur Entscheidungsfindung in allen Phasen eines schrittweisen Programms zur Errichtung, zum Betrieb und zur Schließung eines Endlagers.
- Verbesserung des Verständnisses einiger Aspekte des Systemverhaltens, die für einen Sicherheitsnachweis verwendet werden, und Ermöglichung weiterer Prüfung von Modellen zur Vorhersage dieser Aspekte.
- Lieferung von Informationen, um der Gesellschaft im Allgemeinen das Vertrauen zu geben, Entscheidungen über die wesentlichen Phasen des Endlagerentwicklungsprogramms zu treffen und um das Vertrauen zu stärken – für solange, wie die Gesellschaft es benötigt -, dass das Endlager keine unerwünschten Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt hat.
- Sammlung von Umweltdaten über den Endlagerstandort und seiner Umgebung in einer Datenbank, die für zukünftige Entscheidungsträger nützlich sein kann.
- Der Anforderung gerecht werden, Schutzmaßnahmen bereit zu halten, sollte das Endlager spaltbares Material wie z.B. ausgediente Brennelemente oder plutoniumreiche Abfälle enthalten.

Eine wesentliche Aussage der TECDOC-1208 ist, dass die Wahrscheinlichkeit eines Auftretens "unerwarteter Messergebnisse" in Betracht gezogen werden sollte. Es heißt:

Bei kritischen Parametern müssen die möglichen Ursachen für und Folgen von unerwarteten Messwerten diskutiert werden. Jegliche Maßnahmen, die dann erforderlich sein könnten, müssen im Vorfeld untersucht und vorbereitend geplant werden. Man muss nachweisen können, dass man sich über die Folgen aller möglichen Monitoring-Ergebnisse im Klaren ist und geeignete Reaktionen im Vorfeld bedacht hat.

Die Richtlinie erklärt außerdem, dass Monitoring-Systeme möglichst nicht in Barrieren implementiert werden sollten, die Radionuklide einschließen. Stattdessen könnte ein Teil des Endlagers als Nachweis- bzw. Demonstrationsbereich ausgewiesen werden, der zumindest bis zur endgültigen Verfüllung des Endlagers umfassend instrumentiert werden könnte. Das Dokument stellt abschließend fest:

Es herrscht weitgehend Übereinstimmung, dass die Langzeitsicherheit eines Endlagers sich nicht auf die kontinuierliche Überwachung des Endlagers nach dessen Verschluss stützen sollte. Auch wenn zukünftige Generationen ein Monitoring durchführen wollen, wäre es ammaßend, darüber zu spekulieren, wie und warum sie es vielleicht tun wollen. Unabhängig von den Informationen, die für die Langzeitsicherheit gewonnen werden können, bietet ein Monitoring auch unmittelbare nützliche Informationen. Entwickler und Betreiber können und sollten verbindlich dazu aufgefordert werden, diese zu nutzen.

2.2 Das 'European Thematic Network on Monitoring' (ETN) 2004

Das "European Thematic Network (ETN)" on Monitoring (ETN 2004) (Europäisches thematisches Netzwerk zum Monitoring) baute auf der IAEA Tecdoc-1208 auf (IAEA 2001), wobei es die Rolle von Monitoring in einem schrittweisen Konzept für die geologische Entsorgung von radioaktiven Abfällen in Betracht zog. Ziel des ETN war es, das Verständnis für die Funktion und die Möglichkeiten von Monitoring in einem Mehrstufenkonzept zur Entsorgung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen zu verbessern und zu ermitteln, ob und wenn ja, wie Monitoring einen Beitrag sowohl zu Entscheidungsfindungen als auch zur betrieblichen und nachbetrieblichen Sicherheit leisten und somit das Verständnis für und das Vertrauen in das Endlagerverhalten verbessern kann.

Für das Monitoring in einer mehrstufigen Umsetzung eines geologischen Endlagers wurden folgende Gründe ermittelt:

- Monitoring als Teil des wissenschaftlichen und technischen Erkundungsprogramms, inklusive Umwelt-Monitoring
- Bestätigung wesentlicher Annahmen der im Vorfeld durchgeföhrten Sicherheitsanalyse
- Gewinn des Vertrauens auch zukünftiger Generationen

Das ETN vermerkte:

Monitoring als Teil eines wissenschaftlichen und technischen Erkundungsprogramms beinhaltet das Sammeln aller notwendigen Informationen, die mit der Standortauswahl, der Standortcharakterisierung und der Auslegung und Errichtung der Anlage zusammenhängen und für eine Sicherheitsanalyse benötigt werden. Sie liefert die Basis zur Ermittlung der Modellparameter und zum Vergleich der gemessenen Daten mit den Modellvorhersagen. Dies beinhaltet auch das Monitoring von Ausgangsbedingungen an potenziellen Endlagerstandorten, um jedwede potenzielle negative Auswirkung auf die Umgebung durch Tätigkeiten vor Ort während der Standortcharakterisierung und der Errichtung und des Betriebs des untertägigen Endlagers zu ermitteln sowie aus haftungsrechtlichen Gründen.

Die Sicherheit eines Endlagersystems wird üblicherweise in Form eines Sicherheitsnachweises (Safety Case) belegt. Hierbei handelt es sich um eine Zusammenstellung von Argumenten und Analysen, die die Schlussfolgerung belegen sollen, dass ein bestimmtes Endlagersystem sicher ist. Er beinhaltet eine Beschreibung der Systemauslegung und der Sicherheitsfunktionen, legt die Effizienz technischer und natürlicher Barrierensysteme dar, liefert die Belege, die diese Argumente und Analysen stützen, und erörtert die Signifikanz aller Unsicherheiten oder offener Fragen. Der Sicherheitsnachweis liefert außerdem den Beweis, dass alle relevanten regulatorischen Sicherheitskriterien erfüllt werden können. Monitoring ist daher ein unterstützendes Mittel, um zu prüfen oder zu bestätigen, dass wesentliche Annahmen hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Funktionen eines Endlagersystems zutreffen.

Die Entwicklung eines Endlagers für radioaktive Abfälle bis zu seiner Schließung ist ein Langzeitprozess, in den möglicherweise mehrere Generationen eingebunden sind. Es ist wichtig sicherzustellen, dass zukünftige Generationen das Vertrauen in die Eignung des Endlagersystems nicht verlieren, indem man nachweist, dass das Endlager zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr für das Betriebspersonal oder die Öffentlichkeit darstellt und dass das Endlagersystem und die natürliche Umgebung sich wie erwartet entwickeln. Monitoring und der Vergleich der Monitoring-Ergebnisse mit der prognostizierten Entwicklung des Systems ist eine Möglichkeit, diese Anforderung zu erfüllen. Ein damit verbundener Aspekt ist, dass die verfügbaren Informationen über das Endlager in angemessener Weise aufbewahrt und von einer Generation zur nächsten weitergegeben werden.

Die wesentlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen des ETN können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Bedeutung von Sicherheit und der Implementierungsstrategie (Bem.: es gibt in verschiedenen Ländern ein Spektrum von Ansätzen) hat Auswirkungen auf die Rolle des Monitorings innerhalb eines Endlagerprogramms.
- Es ist wichtig, die Gründe für die jeweiligen Unterschiede und für die Rolle von Monitoring innerhalb jeder Sicherheits- und Endlager-Implementierungsstrategie zu verstehen. Die Unterschiede in den Ansätzen beziehen sich hauptsächlich darauf, wie sehr Monitoring als Bestätigungsstool hinsichtlich der (prognostizierten) Entwicklung eines Endlagers und seiner Langzeitsicherheit angesehen wird.
- Monitoring sollte sich auf den Umfang beschränken, der nützliche Ergebnisse für den Entscheidungsfindungsprozess oder die Bestätigung der Sicherheit liefern könnte. Dass Monitoring stattfindet, muss der Öffentlichkeit erklärt werden, wobei es wichtig ist, nicht den Eindruck zu erwecken, dass das Monitoring einen Mangel an Vertrauen in die Sicherheit des Endlagersystems darstellt.
- Die Technologie, die für einen Großteil des Endlager-Monitorings notwendig ist, ist bereits Standard. Es gibt jedoch Einschränkungen, besonders hinsichtlich der Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Monitoring-Systemen, speziell unter rauen Umgebungsbedingungen. Es sollten keine falschen Erwartungen geweckt werden, weder hinsichtlich der praktischen Machbarkeit über lange Zeiträume, noch hinsichtlich der Nützlichkeit der Messungen und der Möglichkeit (oder Notwendigkeit) auf die Monitoring-Ergebnisse zu reagieren. Die Tatsache, dass ein Parameter gemessen werden kann, ist noch kein guter Grund ihn zu messen. Die Messung ist nur gerechtfertigt, wenn sie zu einer Verbesserung des Verständnisses von oder des Vertrauens in die Sicherheit beiträgt, und wenn es möglich ist, die Messungen im Kontext der Sensorumgebung und vergleichenden Berechnungen auszuwerten.
- Mit Blick auf den Stand der Technik lässt sich sagen, dass Technologien verfügbar oder in der Entwicklung sind, die gute Perspektiven für ein geeignetes Monitoring bieten. Welcher Umfang für ein Monitoring geeignet oder nützlich ist, ist jedoch eine schwierige Frage und hängt von den Implementierungsstrategien ab.

2.3 IAEA-Sicherheitsanforderungen (WS-R-4) 2006 und (SSR-5) 2011

Die Definition und Umsetzung einer Monitoring-Strategie wurde von der IAEA bereits 2006 erstmals als Sicherheitsanforderung in dem Dokument WS-R-4 für die geologische Endlagerung von radioaktiven Abfällen formuliert (IAEA 2006). Mit diesen Sicherheitsanforderungen möchte die IAEA 'Schutzziele und Kriterien für die geologische Endlagerung' festlegen und 'die Anforderungen zur Sicherstellung der radiologischen Sicherheit... während der Betriebsphase und besonders in der Nachbetriebsphase' aufstellen. Im Jahr 2011 wurden diese Sicherheitsanforderungen überarbeitet und eine Neufassung in dem Dokument SSR-5 (Specific Safety Requirements) veröffentlicht, das die Fassung aus 2006 ersetzt (IAEA 2011a).

Mit der Veröffentlichung dieser Sicherheitsanforderungen weist die IAEA dem Monitoring eine Schlüsselrolle bei der Gewährleistung der Sicherheit eines geologischen Endlagers zu. Aussagen zum Thema Endlager-Monitoring werden in dreien dieser Anforderungen gemacht, die im Folgenden wiedergegeben sind.

Anforderung 19: Verschluss des Endlagers

... Die endgültige Verfüllung und Versiegelung des Endlagers könnte für eine bestimmt Zeit nach Abschluss der Einlagerungsarbeiten ausgesetzt werden, um durch Monitoring-Aktivitäten Informationen zu sammeln, die es erlauben spezielle Aspekte bezogen auf die Sicherheit in der Nachverschlussphase besser zu bewerten oder aus Gründen der öffentlichen Akzeptanz. ...

Anforderung 21: Monitoring-Konzept für ein Endlager

Grundsätzlich soll ein Monitoring-Programm durchgeführt werden, das bereits vor der Errichtung des Endlagers beginnt, während der Errichtung und des Betriebes weitergeführt wird und ggf. auch nach dem Verschluss, sofern dies im Sicherheitskonzept verankert ist. Das Monitoring-Programm soll so konfiguriert sein, dass damit zum einen Daten und Informationen gesammelt werden, die für eine Bewertung der Endlagersicherheit genutzt werden können. Es soll Informationen bereitstellen, die die Betriebssicherheit betreffen, aber auch die Sicherheit der Bevölkerung und den Schutz der Umgebung, speziell während der Betriebsphase des Endlagers. Zum anderen soll ein Monitoring-Programm aber auch in der Lage sein, anzugeben, wenn Bedingungen auftreten, die die Endlagersicherheit nach dessen Verschluss zweifelhaft erscheinen lassen.

Jede Phase der schrittweisen Implementierung eines Endlagers soll durch ein Monitoring-Programm begleitet werden unter Beachtung u. a. folgender Ziele:

- *Bereitstellung von Informationen für regelmäßige Sicherheitsanalysen*
- *Bereitstellung von Informationen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit*
- *Bereitstellung von Informationen zur Bewertung, inwieweit die Bedingungen im Endlager während des Betriebes den im Vorfeld durchgeführten Sicherheitsanalysen entsprechen*
- *Bereitstellung von Informationen als Grundlage zur Bewertung der im Vorfeld durchgeführten Sicherheitsanalysen für die Nachverschlussphase*

Monitoring-Programme müssen in jedem Fall so gestaltet und implementiert werden, dass sie keinesfalls den Sicherheitslevel des Endlagers nach dessen Verschluss herabsetzen.

... Die Konzeption eines Monitoring-Programms, die zum Ziel hat, die Sicherheit in der Nachverschlussphase zu verdeutlichen, muss vor der Errichtung des Endlagers erstellt werden, um bereits frühzeitig geeignete Monitoring-Strategien aufzuzeigen. Jedoch müssen diese Konzepte flexibel bleiben, um sie im Zuge der Errichtung und des Betriebes des Endlagers revidieren und updaten zu können.

Anforderung 22: Nachverschlussphase und institutionelle Kontrolle

... Eine institutionelle Kontrolle über das Endlager in der Nachverschlussphase soll einen zusätzlichen Beitrag zur Sicherheit des Endlagers leisten. Dieser Beitrag besteht beispielsweise darin, unbefugten Zugang zu dem Endlager zu unterbinden aber auch ein Monitoring durchzuführen, womit man in der Lage ist, frühzeitig die Migration von Radionukliden zu erkennen, bevor sie die Grenzen des Standortes erreichen.

2.4 Monitoring-Workshop in Genf 2007

Im Jahr 2007 organisierten RWMC und Nirex gemeinsam einen internationalen Workshop über Endlager-Monitoring in Genf, Schweiz - den "Geneva Workshop" - (Harvey & White 2008). Ziel des Workshops war "die allgemeinen Grundlagen für die Entwicklung eines effektiven Monitoring-Programms für Endlager zu identifizieren".

Alles in allem zeigte der Workshop, dass nationale Strategien zum Monitoring geologischer Endlager auf übergeordneter Ebene weitgehend ähnlich sind – Unterschiede bestehen aber in Detailfragen, die größtenteils auch noch nicht geklärt sind. Mit Blick auf diese offenen Fragen wurde auf den Wert weiterführender Monitoring-Studien hingewiesen. Die Kernaussagen des „Geneva Workshops“ waren:

- Eine frühzeitige Planung von Monitoring-Aktivitäten bereits bei der Endlagerplanung ist unerlässlich. In den Anfangsphasen der Endlagerentwicklung könnten die Monitoring-Programme intensiver sein, um ein gutes Verständnis der Systemcharakteristika zu er-

langen und um die Annahmen und Daten der im Vorfeld durchgeföhrten Analysen zu bestätigen.

- Der Umfang der Datensammlung sollte festgelegt werden, bevor mit den Monitoring-Aktivitäten begonnen wird. Es sollte darauf geachtet werden, dass das Datenmaterial zwar ausreichend ist, um das gewünschte Verständnis der grundlegenden Eigenschaften und Prozesse eines Systems zu verbessern, sollte aber, mit Blick auf den tatsächlichen Bedarf, nicht zu umfänglich sein. Es sollte eine geeignete Überlagerung (diversitäre Redundanz) der Monitoring-Verfahren vorhanden sein (z.B. Messung eines Prozesses mit mehr als einem Verfahren).
- Monitoring wird wahrscheinlich eine wichtige Rolle bei der Vertrauensbildung verschiedener Interessensgruppen spielen.
- Eine effektive Strategie zur Kommunikation der Monitoring-Aktivitäten an die Öffentlichkeit ist unerlässlich.
- Eine Vielzahl potenziell geeigneter Gerätschaften und Techniken wurde in Fachbereichen außerhalb der Kernindustrie entwickelt. Es wurde betont, wie wichtig es ist, die auf dem Markt verfügbare Technologie, die für Monitoring-Zwecke genutzt werden kann, zu identifizieren und auszuschöpfen.
- Lücken in der Entwicklung strategischer Planungen von internationalen und nationalen Monitoring-Programmen schienen größer zu sein als die aus technischer Sicht festgestellten Lücken.

Zwei Endlagermonitoring-Programme sind so weit entwickelt, dass sie zur Umsetzung geeignet sind: Der *Yucca Mountain Performance Confirmation Testing and Monitoring Plan* (Sandia, 2008) und der *WIPP Compliance Monitoring Implementation Plan* (DOE 1996 und 2009, Hansen 2011). Ersterer – unabhängig von seinem gegenwärtigen Projektstatus – liefert wertvolle Informationen über die Prozessschritte zur Entwicklung eines Monitoring-Programms und wie diese mit den Anforderungen des Endlagerungsprozesses verknüpft sind. Das WIPP Monitoring-Programm wurde vor mehr als 10 Jahren implementiert und liefert wertvolle Informationen einschließlich gewonnener Erkenntnisse hinsichtlich der Auswertung und des Nutzens von Monitoring-Ergebnissen zur informativen Unterstützung des Endlagerprozesses.

2.5 Das europäische MODERN Projekt 2009-2013

In Anlehnung an die Ergebnisse des Workshops in Genf wurde festgestellt, dass es sinnvoll ist, das Thema Monitoring auf internationaler Ebene weiter zu entwickeln, um vor allem eine gemeinsame, international anerkannte, Sichtweise für die Entwicklung eines Monitoring-Programms für ein Endlager zu erzeugen. Diesem Gedanken folgend gelang es, ein Projekt bei der Europäischen Kommission zu lancieren, das MODERN-Projekt, mit dem Ziel, eine solche Sichtweise zu erzeugen und erstmalig so etwas wie eine Rahmenrichtlinie für ein Monitoring auf internationaler Ebene zu erstellen. Ziel war es, dieses gemeinsame Verständnis zu dokumentieren, relevante Monitoring Technologien zu identifizieren, den Stand ihrer Technik zu eruieren und Sichtweisen von Stakeholdern zu dokumentieren als Basisinformationen zur Entwicklung von individuellen Monitoring-Programmen (MODERN 2013a).

Das Projekt MODERN (*Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure*) war ein Verbundprojekt mit einer Laufzeit von 4 Jahren (2009-2013) und Teil des 7. Rahmenprogramms der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM). Im Rahmen dieses Projektes wurde von 18 Organisationen aus 12 verschiedenen Ländern eine erste Rahmenrichtlinie zur Entwicklung und Umsetzung verschiedener Monitoring-Aktivitäten für HAW/SF Endlager auf europäischer Ebene entwickelt. Die Rahmenrichtlinie stützt sich auf Erfahrungen, die in den Endlagerprogrammen der Länder gemacht wurden und entwickelte erste Ansätze zur Einbindung der interessierten Öffentlichkeit.

Im Zuge des Projektes wurde ein struktureller Ansatz, der sogenannte 'MODERN Monitoring Workflow' zur Entwicklung und Implementierung eines Monitoring-Programms für ein Endlager erstellt (MODERN 2013b). Dieser Workflow beschreibt den schrittweisen Prozess beginnend mit der Identifizierung der Anforderungen an ein Monitoring, der Umsetzung dieser Anforderungen in ein spezifiziertes Monitoring-Programm sowie der Analyse und Bewertung der Ergebnisse mit Blick auf die Sicherheitsfunktionen der geologischen und geotechnischen Barrieren. Der Workflow identifiziert drei Schlüsselbereiche im Zuge der Entwicklung und Durchführung eines Monitoring-Programms:

- Zielsetzungen und Parameter: Festlegung von Zielen eines Monitoring-Programms und Identifizierung von Prozessen, deren Monitoring dazu dient, diese Zielsetzungen zu erreichen. Bestimmung von Parametern, deren Beobachtung es erlaubt, die relevanten Prozesse zu charakterisieren.
- Monitoring-Programm und Ausgestaltung: Analyse der Anforderungen an Monitoring-Systeme, der verfügbaren Technologien, um diesen Anforderungen gerecht zu werden und Identifizierung der Parameter, die messtechnisch in geeigneter Form erfasst werden können.
- Implementierung und Überwachung: Durchführung des Monitoring-Programms und Auswertung der Ergebnisse als Grundlage für Entscheidungsfindungen.

Um diesen Workflow zu testen, wurden für drei verschiedene Endlagerkonzepte, die auch für drei verschiedene Wirtsgesteine entwickelt wurden, Monitoring-Konzepte anhand dieses Workflows erarbeitet; das französische Konzept für ein Endlager in Ton, das finnische Konzept für ein Endlager im Granit und das seinerzeitige deutsche Konzept für ein Endlager im Salz.

Neben diesen konzeptionellen Arbeiten wurden auch technologische Entwicklungen durchgeführt. Dies betraf die Sensortechnologie, z. B. im Bereich der faseroptischen Sensorik und der seismischen Tomographie, als auch Techniken zur Datenübertragung. Ein Schwerpunkt der Entwicklung lag dabei im Bereich der kabellosen Datenübertragung innerhalb eines Endlagers und aus einem Endlager heraus. Hintergrund ist, dass Kabelführungen immer eine Schwächezone darstellen und es schwer nachweisbar ist, dass beispielsweise Kabelführungen durch eine Barriere nicht als bevorzugte Fließpfade für Flüssigkeiten dienen. Aus diesem Grund wurden beispielsweise für das deutsche Konzept drei wesentliche Prinzipien aufgestellt:

1. keine Kabelführungen durch Abdichtbauwerke
2. keine Kabelführungen durch versetzte Strecken
3. keine Kabelführungen aus dem Endlager zur Erdoberfläche

Diese Prinzipien machen die Entwicklung von Systemen mit kabellosem Datentransfer unabdingbar.

Im Rahmen des MODERN Projektes wurden zwei unterschiedliche Systeme für die kabellose Datenübertragung entwickelt. Ein System für kurze Übertragungsdistanzen unter Verwendung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen und ein System für lange Übertragungsdistanzen mit niederfrequenten Wellen (MODERN 2013c). Das System für kurze Reichweiten wurde federführend von der Firma Aitemin in Spanien entwickelt. Dieses System besteht aus einer Reihe von einzelnen Modulen, die, etwa handgroß, in der Lage sind, z. B. Feuchtigkeit, Porenwasserdruck und Totaldruck an einem Punkt zu messen und die Messergebnisse dann an eine Empfangseinheit zu übertragen. Die Stromversorgung läuft dabei über eine langlebige Batterie. Die Übertragungsdistanz beträgt einige Meter. Mit einem solchen System besteht die Möglichkeit, Messdaten durch ein Abdichtbauwerk hindurch oder aus einem Abdichtbauwerk heraus nach außen zu übertragen.

Das System für lange Übertragungsdistanzen wurde von dem niederländischen Projekt-partner NRG entwickelt. Dieses System wurde in-situ im belgischen Untertagelabor HADES getestet. Dort ist es gelungen, Messdaten aus dem Untertagelabor durch die darüber liegenden Gesteinsformationen zur Erdoberfläche zu übertragen. Die Distanz beträgt 225 m. Grundsätzlich eröffnet sich damit die Möglichkeit, Messdaten auch aus einem bereits verschlossenen Endlager zur Erdoberfläche zu übertragen. Die Ergebnisse des Projektes sind in einer Reihe von Berichten dokumentiert, die u. a. in der Mediathek auf der Internetseite der BGE TECHNOLOGY zum Download zur Verfügung stehen.

2.6 Forschungsinitiative des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) 2011

Basierend auf den Sicherheitsanforderungen, die das BMU (Bundesministerium für Umwelt) im September 2010 herausgegeben hat, ist der Betreiber eines Endlager gehalten, ein Monitoring-Programm zu installieren, das während der Betriebsphase und für einen definierten Zeitraum nach Schließung des Endlagers relevante messtechnische Informationen liefert (BMU 2010).

Davon ausgehend hat das BfS noch im gleichen Jahr ein Forschungsprojekt gestartet, um eine Beurteilungsbasis zu erstellen, in welcher Form sicherheitsrelevante Informationen über den Zustand eines verschlossenen Endlagerbergwerkes im Steinsalz in der frühen Nachbetriebsphase technisch gewonnen werden könnten (Jobmann et al. 2011). Ausgangspunkt für die Identifizierung überwachungsrelevanter Prozesse im Endlager war das aktuelle Sicherheitsnachweiskonzept, das im Rahmen des Projektes ISIBEL (Krone et al. 2008) entwickelt wurde.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die als relevant identifizierten Prozesse und Messgrößen den Komponenten des Sicherheitsnachweiskonzeptes zugeordnet, in denen sie eine signifikante Rolle spielen. Sensoren und Messtechniken wurden ausgewählt, die aus jetziger Sicht geeignet erscheinen, die gewünschten Überwachungsinformationen zu liefern. Entsprechende Empfehlungen für einen möglichen Einsatz wurden gegeben. Da die geotechnischen Barrieren zusammen mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich das Kernstück des Sicherheitsnachweises darstellen und in keiner Weise durch technische Installationen in ihrer Wirkung beeinträchtigt werden dürfen, liegen den Einsatzempfehlungen die drei im MODERN Projekt dargelegten Prämissen zu Grunde (vgl. Kap. 2.5).

Neben der Aufgabe, die eigentlichen Messinformation zu gewinnen, ist es entscheidend, inwieweit die aufgezeichneten Informationen aus dem Endlager zur Tagesoberfläche zu übertragen werden können. Es konnte aufgezeigt werden, dass bereits einige erfolgreich getestete Systeme zur Datenübertragung durch festes Gestein existieren. Auch für den Einsatz solcher Systeme im Endlagerbereich laufen bereits erste Versuche in europäischen Untertagelabotorien in Belgien, Schweden und der Schweiz (vgl. Kap. 2.5). Aufbauend auf diesen Arbeiten und deren Ergebnissen könnten beispielsweise auch Versuche im deutschen Erkundungsbergwerk in Gorleben konzipiert werden, um zu untersuchen, inwieweit Überwachungsinformationen erfolgreich kabellos übermittelt werden können. Es wurde ein erster Test vorgeschlagen, der mit vergleichsweise geringem Aufwand durchführbar wäre und im Ergebnis eine Aussage erlauben würde, ob und in welcher Form der Abstand zu einer nahegelegenen Erkundungsbohrung (z.B. der GO 1003) drahtlos überbrückbar wäre von der aus dann die Daten zur Erdoberfläche geführt werden könnten. Im Zusammenhang mit der langfristig zu sichernden autarken Stromversorgung wurde empfohlen, die Weiterentwicklung der Betavoltaik¹ Technologie zu beobachten und zu gegebener Zeit die Entwicklung eines für den Einsatz im Endlager geeigneten Prototypen zu initiieren.

¹ Betavoltaik ist ein mit der Photovoltaik vergleichbares Verfahren zur direkten Umwandlung von Beta-Strahlung in elektrische Energie mit Hilfe von Halbleitern speziell zur Herstellung kompakter Batterien mit langer Lebenszeit.

2.7 Sicherheitsrichtlinie der IAEA für Endlager (SSG-14) 2011

Parallel zu dem europäischen MODERN Projekt wurde seitens der IAEA ein "Specific Safety Guide, SSG-14" für Endlager in tiefen geologischen Formationen (IAEA 2011b) herausgebracht, der ein Monitoring erstmals direkt mit dem sogenannten "Safety Case" verknüpft. Dieses Dokument weist darauf hin, dass ein Monitoring genutzt werden sollte, um zu bestätigen, dass die im Vorfeld im Rahmen des Sicherheitskonzeptes getroffenen Annahmen gültig sind. Es wird darauf hingewiesen, dass ein Monitoring bereits während der Standortcharakterisierung beginnen und bis in die Nachverschlussphase kontinuierlich durchgeführt werden sollte. Das Dokument geht sogar so weit zu sagen, dass das Design des Endlagers ggf. den Anforderungen eines Monitoring angepasst werden sollte.

Für den Fall, dass es in Endlagerprogrammen vorgesehen ist, das Endlager nicht sofort nach Abschluss der Einlagerungen zu versiegeln, sondern noch eine Beobachtungsphase anzuschließen, könnte diese genutzt werden, um durch ein Monitoring Daten zu erheben, die auf die Entwicklung des Endlagers nach dem Verschluss hindeuten. Letzteres kann u. U. eine Re-Evaluierung der Langzeitsicherheit nach sich ziehen.

Das SSG-14 zitiert explizit die im gleichen Jahr herausgegebenen Sicherheitsanforderungen in ihren Aussagen zum Thema Monitoring und fügt hervorhebend hinzu, dass das Monitoring-Programm regelmäßig einem Update unterzogen werden sollte, um neue Erkenntnisse ggf. zu integrieren. Auch sollte das Monitoring bereits ein inhärenter Teil des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (Safety Case) sein und zusammen mit diesem regelmäßig einer Revision unterzogen werden.

Insbesondere zwei Dinge werden abschließend hervorgehoben. Zum einen sollten Monitoring-Aktivitäten keinesfalls das Prinzip der passiven Sicherheit konterkarieren und zum anderen sollte das Monitoring-Programm regelmäßig von einer unabhängigen Organisation auditiert werden.

2.8 Das europäische MODERN2020 Projekt 2015-2019

Aufbauend auf den Ergebnissen des MODERN-Projektes, hatte das Projekt MODERN2020 (Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal), gefördert von der Europäischen Kommission, das Ziel, die Grundlagen zur Entwicklung und Umsetzung eines effizienten Programms für ein Endlagermonitoring bereit zu stellen, das die spezifischen Anforderungen nationaler Endlagerprogramme berücksichtigt (MODERN2020 2019a). Das Projekt wurde von 28 Partnern aus 12 Ländern, koordiniert von der französischen ANDRA, durchgeführt. Die Ergebnisse des Projektes können fortgeschrittene Entsorgungsprogramme darin unterstützen, Monitoring-Systeme zu entwerfen, die einsetzbar sind, wenn die Endlager in Betrieb gehen, und können weniger entwickelte Entsorgungsprogramme unterstützen, wenn es darum geht, von Grund auf Monitoring-Systeme neu zu konzipieren.

Ziel war es, zu verstehen, was ein Monitoring im Zusammenhang mit einem Langzeit-Sicherheitsnachweis für ein Endlager leisten kann, und eine Methodik zur Verfügung zu stellen, wie Ergebnisse eines Monitoring verwendet werden können, um Prozesse zur Entscheidungsfindung zu unterstützen. Weiterhin sollte erarbeitet werden, welche Handlungsoptionen als Reaktion auf Monitoring-Ergebnisse möglich und sinnvoll sind. Einer der Schwerpunkte von MODERN2020 lag auf der Entwicklung von Konzepten zu einem Monitoring geotechnischer Barrierensysteme, ohne deren Dichtwirkung zu beeinträchtigen. Dies ist u. a. ein Punkt, der speziell von dem deutschen Projektpartner bearbeitet wurde.

Grundlage für die Entwicklung von Monitoring-Konzepten ist die Kenntnis darüber, welche Messgrößen bzw. Parameter kontinuierlich gemessen werden sollten. Im Zuge des Projektes

wurde ein sogenannter 'Parameter Screening' Prozess entwickelt, der eine Hilfestellung oder Leitlinie sein soll, relevante Messgrößen zu ermitteln. Im Vorgängerprojekt MODERN war ein generischer, iterativer Prozess zur Entwicklung und Durchführung eines Endlagermonitoring-Programms entwickelt worden. Dieser wurde als MODERN-Monitoring-Workflow bezeichnet. Es stellte sich jedoch heraus, dass ein Monitoring während der Betriebsphase zur Erlangung von mehr Vertrauen in den Langzeitsicherheitsnachweis es erforderlich macht, das Endlagermonitoring-Programm stärker im Langzeitsicherheitsnachweis zu berücksichtigen und zu integrieren. Insbesondere stellte sich heraus, dass eine Analyse des Langzeitsicherheitsnachweises zwar eine Reihe von möglichen Prozessen für ein Monitoring liefern könnte, die z. B. auf der Bewertung von Sicherheitsfunktionen, auf Merkmalen, Ereignissen und Abläufen (FEP), Sicherheitsindikatoren und/oder thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen (THMC) Prozessen beruhen können. Diese Liste von Prozessen muss aber auch auf die technische Machbarkeit für ein Monitoring hin bewertet werden, um sicherzustellen, dass das Monitoring des Prozesses einen Mehrwert liefert, und um sicherzustellen, dass das Monitoring-Programm insgesamt angesichts der betrieblichen Einschränkungen ausreichend und angemessen ist.

Deshalb wurde ein Verfahren zur Auswahl von Monitoring-Parametern entwickelt, das auf der Berücksichtigung eines Langzeitsicherheitsnachweises und auf Informationen aus sieben Testfällen aus sieben verschiedenen Ländern basiert. Diese Methodik, die MODERN2020-Screening-Methode, ist ein generischer Prozess zur Entwicklung eines geeigneten und begründeten Satzes von Parametern, der Bestandteil eines implementierbaren und logischen Monitoring-Programms werden soll. Das Screening Verfahren gibt einen Überblick über die Schritte, die eine Endlagerorganisation unternehmen kann, um eine Liste von Parametern zu identifizieren, mit denen relevante Prozesse charakterisiert werden können. Diese Liste von Parametern ist mit der übergeordneten Monitoring-Strategie verknüpft und hinsichtlich der technischen Machbarkeit geprüft. Die Anwendung der Methodik in den sieben Testfällen führte u. a. zu der Erkenntnis, dass es keinen einheitlichen Satz von Parametern gibt, der für alle Endlagersysteme gleichermaßen für ein Monitoring-Programm geeignet ist.

Innovative Monitoring-Techniken wurden im Zuge des MODERN2020 Projektes weiter entwickelt, insbesondere auf dem Gebiet der kabellosen Datenübertragung und alternativer Stromversorgung. Bedeutende Fortschritte wurden beim Verständnis, der Konzeption und dem Funktionsnachweis von Techniken erzielt, die die kabellose Datenübertragung durch Komponenten der technischen Barrieren und durch die geologische Barriere ermöglichen. Verschiedene technische Lösungen für Übertragungsdistanzen zwischen 0,5 m und 270 m wurden entwickelt und unter realistischen Bedingungen getestet. Für die kabellose Datenübertragung über kurze Distanzen wurden vielseitige Lösungen auf der Grundlage von Hochfrequenz- und Niederfrequenzsystemen entwickelt. Für die Datenübertragung über große Entfernung zeigten sehr niederfrequente Systeme die beste kabellose Übertragung von Daten durch 270 m Gestein, und es wurde auch ein energieeffizienteres Verfahren mit mehrstufigen Relaisstationen entwickelt. Eine integrierte Lösung, die Kurz- und Langstreckentechnologien kombiniert, wurde ebenfalls entwickelt und hat sich für eine Reihe von Umgebungen als praktikabel erwiesen. Allerdings sind noch technische Weiterentwicklungen und standortspezifische Prüfungen für die praktische Anwendung erforderlich.

Gegenwärtig reicht die Batterielebensdauer nicht aus, um das Monitoring eines Endlagers ohne Austausch der Batterien über sehr lange Zeiträume durchzuführen. Daher wurden alternative Lösungen für die Energiebereitstellung untersucht, einschließlich der In-situ-Energieerzeugung, z. B. der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren basierend auf Temperaturgradienten oder Radioisotopenquellen, der kabellosen Übertragung von Energie über das technische Barrierensystem oder der Verringerung des Stromverbrauchs. Die erforschten Energieversorgungstechnologien wurden als relevante und praktikable Mittel zur Stromversorgung von Monitoring-Systemen bewertet. Eine Überprüfung der Energiespeicheroptionen des aktuellen Standes der Technik kam zu dem Ergebnis, dass elektrochemi-

sche Pseudokondensatoren und Hybridkondensatoren das größte Potenzial haben, Energiespeicherlösungen anzubieten, die für Monitoring-Systeme ausreichend sind. Es bedarf noch weiterer Forschung zur Weiterentwicklung und Überprüfung der Energiebereitstellungstechnologien und deren Integration in ein realistisches Monitoring-System.

Auf Basis der Glasfasertechnologie wurden mehrere neue Sensoren und Messsysteme entwickelt. Es wurden Sensoren auf Basis von Bragg-Gittern (FBGs) weiterentwickelt, mit denen Wassergehalt, pH-Wert und Strahlung überwacht werden können. Es wurden optoelektrische Sensorketten entwickelt, die mit Hilfe der Brillouin-, Rayleigh- und Raman-Streuung verteilte Messungen von Spannung/Dehnung/Verformung und Temperatur ermöglichen. Eine dezentrale faseroptische Sensorlösung zur Messung von Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wassergehalt im technischen Barrierensystem wurde mit Hilfe von beheizbaren Lichtwellenleitern entwickelt. Auch bei der Entwicklung von faseroptischen Druckzellen für Bohrlöcher wurden Fortschritte erzielt. Weitere Arbeiten sind vor allem erforderlich, um sicherzustellen, dass diese Technologien den Bedingungen im Endlager standhalten.

Neue Sensoren wurden u. a. für das Monitoring von Verschiebungen (berührungslos über kurze Strecken) entwickelt und ein integrierter Sensor für die gleichzeitige Messung von Temperatur, Druck und relativer Luftfeuchtigkeit. Zur Validierung müssen diese Sensoren unter ähnlichen Bedingungen implementiert und getestet werden, wie sie in einem Endlager erwartet werden.

Darüber hinaus wurde ein mehrstufiges Qualifizierungsverfahren entwickelt, das auf alle Komponenten eines Monitoringsystems anwendbar ist. Dieses Verfahren umfasst vier Schritte: Auswahl der Komponenten, Laborversuche, Mock-up-Tests (dieser Schritt ist optional) und In-situ-Versuche. Das Verfahren muss systematisch angewendet werden, um seine Gültigkeit sicherzustellen und um bei Bedarf Verbesserungen vornehmen zu können (MODERN2020 2018).

Neben der reinen Entwicklungsarbeit wurden auch eine Reihe von In-situ-Demonstrationstests zur Durchführung eines Monitoring durchgeführt. Diese boten die Möglichkeit, mehrere Komponenten von Monitoring-Systemen oder -Strategien in einem realistischen Umfeld zu testen, Informationen darüber zu sammeln, wie Sensoren und zugehörige Gerätschaften (von denen einige im Rahmen des Projekts MODERN2020 entwickelt wurden) einer rauen, endlagerähnlichen Umgebung standhalten, und praktische und strategische Aspekte der Implementierung von Monitoring-Maßnahmen zu bewerten. Die folgenden In-situ-Tests wurden im Rahmen des MODERN2020-Projektes durchgeführt:

- Für das Endlager ONKALO in Finnland wurde ein Monitoring-Konzept für das technische Barrierensystem entwickelt. Die Arbeiten zielten darauf ab, die Anwendbarkeit eines Monitoring-Konzeptes nachzuweisen, das sich auf den Nachweis der Einhaltung der Langzeitsicherheit konzentriert und in erster Linie Aspekte des Langzeitmonitoring umfasste.
- Die Entwicklung und Qualifizierung eines Monitoring-Programms erfolgte durch praktische Versuche im Maßstab 1:1 im Untertagelabor (URL) in Bure. Es wurden geeignete Parameter für das Monitoring ausgewählt, und das Monitoring-System einer HAW-Einlagerungszelle wurde durch Versuche an zwei Demonstratoren bewertet. Diese Versuche lieferten nützliche Informationen zur Installation eines Monitoring-Systems.
- Die Erprobung des Monitorings im Long-Term Rock Buffer Monitoring (LTRBM)-Demonstrator im URL Tournemire, Frankreich, konzentrierte sich auf In-situ-Tests neuer Monitoring-Technologien, einschließlich derjenigen, die im Rahmen des MODERN2020-Projekts entwickelt wurden. Zusätzlich wurde die kabellose Datenübertragung vom LTRBM-Bohrloch zur Erdoberfläche (275 m durch das Gestein) erfolgt.

reich demonstriert. Der LTRBM ist voll funktionsfähig und die Arbeiten werden fortgeführt.

- Im URL Mont Terri in der Schweiz wurde der FE-Versuch durchgeführt, der u. a. die Umsetzung eines Monitoring-Konzeptes demonstriert. Die Auffahrung einer Strecke für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle, der Einlagerungs- und Verfüllvorgang sowie die THM-Entwicklung in der Nachbetriebsphase wurden realistisch simuliert, und die induzierten THM-Effekte im Wirtsgestein und im geotechnischen Barrierensystem wurden in einem Großversuch mit mehreren Erhitzern getestet. Der Test ermöglicht nachweislich das Monitoring der THM-Entwicklung im geotechnischen Barrierensystem und im Wirtsgestein und es konnten auch Informationen über die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Sensoren gesammelt werden.

Diese Demonstrationsversuche zeigen, dass es möglich ist, ein Monitoring der Parameter durchzuführen, die im Rahmen eines Screening-Prozesses identifiziert wurden. Die Implementierung einer kompletten Monitoring-Strategie in einem realen Endlager ist jedoch nicht völlig analog zur Implementierung einer solchen in einem URL, so dass der Erfolg dieser Demonstrationen nicht unbedingt die unwiderlegbare Fähigkeit zur Durchführung eines umfassenden Monitorings widerspiegelt.

Ein spezielles Ziel im Rahmen von MODERN2020 war es, lokale Interessengruppen (Stakeholder) effektiv in die FuE-Monitoring-Aktivitäten einzubinden. In diesem Zusammenhang sollte, im Dialog mit Stakeholdern, zum einen die generelle Frage geklärt werden, wie eine erfolgreiche Zusammenarbeit aussehen könnte, und zum anderen, ab welchem Zeitpunkt eine Einbindung lokaler Interessensgruppen sinnvoll und effektiv ist. Dieser Punkt nahm auch eine zentrale Position innerhalb des Projektes ein. Das Ziel der Einbindung von lokalen, möglicherweise von dem Bau eines Endlagers in der Umgebung, betroffenen Bürgern, war es, zu testen, inwiefern diese in die Forschungsarbeit eines komplexen, technischen Projektes einbezogen werden könnten. Aus dieser Sichtweise ist die geologische Entsorgung und das entsprechende Monitoring nicht nur eine Frage des technischen Know-hows.

Die Forschungsfrage in Bezug auf die Analyse von Monitoring als sozio-technisches Problem im Vorläuferprojekt MODERN, bestand darin, herauszufinden, was Monitoring leisten kann und wie verschiedene Stakeholder - technische Experten aus dem Bereich der Entsorgungsdienstleister und lokale, potentiell betroffene Bürger - Monitoring einschätzen. Diese Untersuchungen zeigten, dass Experten und Bürger generell eine unterschiedliche Sicht in Bezug auf Monitoring haben. Für die Experten besteht der Zweck des Monitorings in erster Linie in „Performance Confirmation“, also der Bestätigung, dass die Prozesse innerhalb des Endlagers wie erwartet verlaufen. Laien hingegen sehen Monitoring viel mehr als eine Vorsichtsmaßnahme: für sie geht es darum zu überprüfen, wie es um die Sicherheit des Endlagers steht.

Aufbauend auf diesem Ergebnis hatte die Beteiligung von Bürgern in MODERN2020 das Ziel, lokale Bürger aus mehreren EU-Ländern (Belgien, Schweden und Finnland) in die Entwicklung eines Endlager-Monitoring-Programms einzubinden. Hierbei wurden auf Projektebene Repräsentanten der lokalen Gemeinden in projektinterne Workshops und Meetings eingebunden, gleichzeitig fanden auf lokaler Ebene Workshops sogenannte "Home Engagement Sessions" in den Heimatgemeinden der öffentlichen Interessengruppen statt und gaben ihnen die Möglichkeit, ihre Meinungen über das Endlagermonitoring mit technischen Experten auszutauschen und zu diskutieren. Diese Workshops wurden von Sozialwissenschaftlern, die Teil des MODERN2020-Projekts waren, arrangiert und dokumentiert. Denselben lokalen Interessengruppen wurde auch die Möglichkeit geboten, ihre Erfahrungen im Rahmen einer Online-Umfrage mitzuteilen, zu der auch alle Kollegen von MODERN2020 eingeladen waren.

Die Einbindung der Bürger in MODERN2020 stand anfangs unter den Leitfragen ‚Was verstehen Bürger unter erfolgreicher Partizipation‘ und ‚Was wissen Bürger bereits über das Thema Monitoring, was wollen sie noch erfahren?‘ Auf Basis dieser Fragen kam zum Vorschein, dass Bürger großes Interesse am Thema Monitoring haben und gerne das Thema weiter verfolgen möchten.

Ein "Stakeholder-Leitfaden" wurde gemeinsam mit lokalen Bürgerbeteiligten sowie technischen Experten und Sozialwissenschaftlern aus dem MODERN2020-Projekt erarbeitet (Meyermans et al. 2019). Er war als Möglichkeit vorgesehen, den neuesten Stand der geologischenendlagerung und des Monitorings einem nichtwissenschaftlichen Publikum zu vermitteln und dadurch die Diskussion zwischen Wissenschaftlern und einer Vielzahl öffentlicher Gruppen (z. B. Bürgern, Entscheidungsträgern und Journalisten) über technologische und soziale Belange zu erleichtern. Durch den gemeinsamen Schreibprozess verschob sich der Schwerpunkt des Leitfadens von einer zunächst Konzentration auf die technischen Details eines Monitorings zu einer breiteren Sichtweise auf das Monitoring im Kontext der Endlagerkontrolle und die Rolle der Öffentlichkeitsbeteiligung. Die Erarbeitung des Leitfadens war eine wertvolle Übung zur Einbeziehung von Interessengruppen, die dazu beitrug, die unterschiedlichen sozialen Perspektiven, Interessen und Belange von Bürgern und technischen Experten rund um das Endlagermonitoring zu klären.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus diesen Interaktionen mit den lokalen Interessengruppen sind:

- Die Interessenvertreter waren der Meinung, dass ihre Rolle im Projekt nicht darin besteht, den Verlauf der technischen Forschung zu beeinflussen, sondern zu verstehen, wofür sie bestimmt ist und wie sie sich auf die nationalen Entsorgungsprogramme auswirken könnte.
- Die Bürgervertreter waren nicht bereit, Forschungsergebnisse zu legitimieren, sondern wollten kritische Fragen stellen, um das Verständnis zu erhöhen und Feedback zu geben.
- Die Interessengruppen der Bürger wollten sich am Forschungsprozess beteiligen, aber nicht an der Forschung selbst, um ihr eigenes Verständnis der Forschung und des Prozesses, mit dem sie arbeitet, zu verbessern und sicherzustellen, dass die Forscher die Anliegen der lokalen Interessengruppen berücksichtigen.
- Die frühzeitige Einbeziehung der Interessengruppen in das Projekt MODERN2020 und der enge Kontakt zu den Forschern förderten das Vertrauen, was für die Interessengruppen wertvoll war.
- Die Konzentration auf die Erzielung eines Konsenses über eine Monitoringstrategie birgt die Gefahr, nationale Unterschiede und politische Interessen zu verbergen, die sich als technische Fragen tarnen können.

Obwohl im Rahmen des MODERN2020-Projekts erhebliche Fortschritte bei den strategischen, technologischen und gesellschaftspolitischen Aspekten des Endlagermonitoring erzielt wurden, sollten die internationalen Kooperationsbemühungen fortgesetzt werden, damit ausreichende Ressourcen für die technologische Entwicklung zur Verfügung stehen und die Erkenntnisse aus der praktischen Anwendung der im Projekt entwickelten Leitlinie, Instrumente und Ansätze auf internationaler Ebene ausgetauscht werden können und jedes Programm von den Erfahrungen anderer Länder profitieren kann.

2.9 IAEA Arbeitsgruppe zum Thema Monitoring 2019

Im Rahmen eines weiteren Projektes der IAEA soll mit Hilfe einer Arbeitsgruppe ein spezieller Aspekt des Monitoring näher betrachtet werden. Es geht darum, ob und wenn ja, wie Monitoring-Ergebnisse genutzt werden können und sollten, wenn es darum geht, Entscheidungsfindungsprozesse im Zuge des Endlagerprogramms informativ zu unterstützen und

somit auch transparent zu machen. Die Arbeitsgruppe hat sich in 2018 konstituiert. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind die Arbeiten in vollem Gange. Als Ergebnis wird ein Bericht erstellt, der nach Diskussion und Abstimmung mit allen Mitgliedsstaaten als 'Technical Document' von der IAEA herausgegeben wird.

Ziel dieses 'Technical Document' ist es, Hinweise zu geben für die Entwicklung und Implementierung eines Monitoring-Programms vor dem Hintergrund der Anwendung des sogenannten ‚Graded Approach‘ also unter Wahrung der Verhältnismäßigkeit des Einsatzes von Monitoring-Systemen in allen Phasen der Endlagerentwicklung (Erkundung, initiale Errichtung, Betrieb mit weitergehender Auffahrung und Versiegelungen, endgültiger Verschluss und Nachverschluss).

In diesem Bericht werden unter anderem folgende Aspekte näher beleuchtet.

Zunächst wird ein Überblick gegeben, in welcher Form ein Monitoring mit verschiedenen Aspekten des Endlagerprogramms, speziell des Sicherheitsnachweises zusammenhängt. Dies betrifft insbesondere den Safety Case also den vollständigen Sicherheitsnachweis sowie die jeweiligen Sicherheitsfunktionen und Leistungsziele einzelner Endlager- und Barrierekomponenten. Ein Schwerpunkt wird darin liegen, zu beschreiben, wie das Prinzip der Verhältnismäßigkeit angewendet werden könnte und wie dies in Zusammenhang mit den Zielen des Monitoring, der Interpretation und Bewertung der gewonnenen Daten und den potentiellen Entscheidungen steht, die auf Basis von Monitoring-Ergebnissen gefällt werden könnten.

Ein weiterer Aspekt wird sein, zu erläutern, welche generellen Möglichkeiten ein Monitoring bietet, aber auch welche Grenzen in der Anwendbarkeit bestehen. Dies wird anhand von Beispielen mit verschiedenen Endlagerkonzepten und Wirtsgesteinen erläutert. Die Erläuterung der Möglichkeiten und Grenzen ist wichtig, um zu vermeiden, dass der falsche Eindruck entsteht, mit einem Monitoring könnte die vollständige Kontrolle über die Sicherheit eines Endlagers erreicht werden.

2.10 Fazit der bisherigen historischen Entwicklung zum Thema Monitoring

Die bisherigen internationalen Entwicklungen hinsichtlich des Monitorings von Endlagern für hoch radioaktive Abfälle haben bereits eine solide Grundlage für das Verständnis der Kernziele bei der Entwicklung eines Monitoring-Programms geschaffen. Sie zeigen auf, dass Monitoring wichtige Informationen liefern kann, um sowohl Managemententscheidungen während der schrittweisen Entwicklung eines Endlagerprozesses zu unterstützen, als auch um Ergebnisse des im Vorfeld durchzuführenden Sicherheitsnachweises zu überprüfen. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass Monitoring zur Stärkung des Vertrauens beiträgt, speziell in die Langzeitsicherheit und allgemein in den gesamten Endlagerprozess.

Seitens der IAEA wurden bereits in einer Reihe von Dokumenten strategische Richtlinien veröffentlicht, die sich speziell auf das Monitoring von Endlagern beziehen. Diese Richtlinien wurden im Laufe der Zeit weiter entwickelt und sind mittlerweile eng mit dem Sicherheitskonzept bzw. dem "Safety Case" verknüpft. Parallel zur Entwicklungen der IAEA Richtlinien wurden seitens der Europäischen Kommission Gemeinschaftsprojekte gefördert, ausgehend von dem 'European Thematic Network' (ETN) bis hin zu dem MODERN Konsortium, die neben den strategischen Zielsetzungen für ein Monitoring speziell auch Möglichkeiten zur praktischen Implementierung von Monitoring-Programmen im Zuge des schrittweisen Vorgehens bei der Entwicklung eines Endlagers untersuchen und bewerten sollten.

Aus all diesen, in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten, Dokumenten lassen sich Kernaussagen synthetisieren sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufzeigen.

Abb. 2.2 gibt dazu einen Überblick. In dem gelb hinterlegten Text sind Leitlinien aufgelistet, die in den Ergebnisberichten der drei unterschiedlichen Gruppierungen in vergleichbarer Form zu entnehmen sind. Diese spiegeln anerkanntermaßen die gemeinsame Sichtweise wieder. Die orangefarbenen Textblöcke spiegeln jeweils gemeinsame Aspekte der MODERN-Gruppen mit dem ETN sowie mit der IAEA wieder. Bei den blau hinterlegten Textblöcken handelt es sich um spezifische Aspekte, die jeweils nur in einzelnen Gruppen auftreten. In diesem Zusammenhang wird auch deutlich, welche zusätzlichen Aspekte innerhalb der MODERN-Projekte gegenüber den ansonsten auf die Entwicklung von Leitlinien beschränkten Arbeiten der anderen Gruppen eine Rolle spielen. Im Rahmen der MODERN-Projekte wird erläutert, wie eine konkrete Umsetzung von Monitoring-Strategien erfolgen kann unter Berücksichtigung nationaler Besonderheiten in Bezug auf die unterschiedlichen Einlagerungskonzepte und Wirtsgesteine. Darüber hinaus werden die aktuellen Möglichkeiten und Grenzen eines Monitoring im Hinblick auf die technische Realisierbarkeit erläutert sowie Ansätze diskutiert, wie Stakeholder sowohl in die Entwicklung von Monitoring-Programmen als auch in Entscheidungsprozesse eingebunden werden könnten.

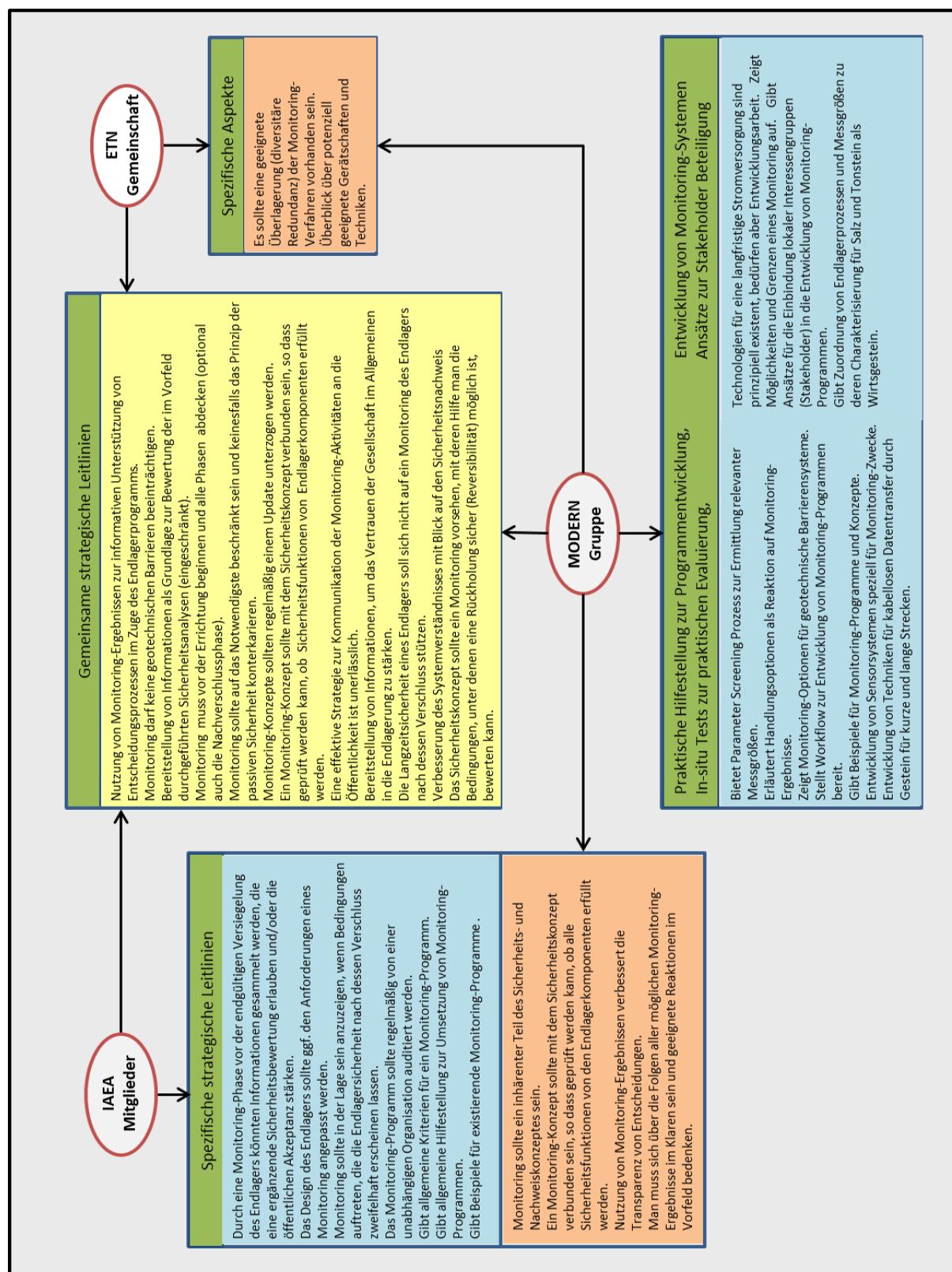


Abb. 2.2: Kernaussagen der IAEA und der europäischen Forschungsgruppen in Bezug auf das Monitoring von Endlagern; Gemeinsamkeiten und Unterschiede

3 Rahmenbedingungen für ein Monitoring in Deutschland

Während für die betriebssicherheitlichen Überwachung dezidierte Regularien existieren, gibt es für das Monitoring eines Endlagers im Hinblick auf die Langzeitsicherheit derzeit in Deutschland nur limitierte regulatorische Anforderungen. Diese sind in den Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (BMU 2010) beschrieben. Darüber hinaus gibt es Empfehlungen für eine Endlager-Monitoring, die im Abschlussbericht der Endlagerkommission niedergelegt sind. Diese beschränken sich nicht nur auf das technische Endlagersystem sondern beziehen auch den gesamten Prozess der Entstehung des Endlagers und seine sozio-ökonomische Begleitung mit ein. Ergänzend können und sollten die Kernaussagen der internationalen Projekte als Richtlinien bei der Entwicklung von Monitoring-Konzepten Berücksichtigung finden.

3.1 Vorgaben aus den deutschen Sicherheitsanforderungen

Die Sicherheitsanforderungen, die 2010 vom Bundesministerium für Umwelt herausgegeben wurden, fordern speziell mit Blick auf das Barrierensystem (geologische Barriere und EBS) und im Hinblick auf die Langzeitsicherheit ein Monitoring-Programm, das während des Betriebes, der Stilllegung und auch im Anschluss daran durchzuführen ist (BMU 2010). Im Paragraf 7.4 heißt es dazu:

Anhand eines Kontroll- und Beweissicherungsprogramms während des Einlagerungsbetriebs, der Stilllegung und in einem begrenzten Zeitraum nach Stilllegung ist nachzuweisen, dass die Eingangsdaten, Annahmen und Aussagen der für diese Phase durchgeföhrten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsnachweise eingehalten werden. Dieses Messprogramm hat insbesondere die Auswirkungen der thermomechanischen Reaktionen des Gebirges auf die wärmeentwickelnden Abfälle, die technischen Maßnahmen sowie die gebirgsmechanischen Vorgänge zu erfassen. ... Wesentliche Abweichungen von diesbezüglichen Daten, Aussagen und Annahmen der genannten Sicherheitsnachweise sind hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz zu bewerten. Notwendigenfalls sind vom Betreiber bei der Einlagerung oder Stilllegung Gegenmaßnahmen durchzuführen, um eine Beeinträchtigung wesentlicher Sicherheitsfunktionen zu vermeiden. Soweit für diese Gegenmaßnahmen eine Genehmigung erforderlich ist, ist diese bei der zuständigen Behörde zu beantragen. Diese Behörde entscheidet auch, wer das Messprogramm nach der Stilllegung durchführt und wann dieses Messprogramm beendet wird.

Aus dem letzten Satz dieses Paragrafen wird deutlich, dass nicht zwingend der Vorhabenträger die Verantwortung für das Monitoring nach dem Verschluss des Endlagers hat. Er besagt, dass die verantwortliche Behörde ggf. eine andere Institution mit dem Monitoring nach Verschluss des Endlagers beauftragen kann.

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung befinden sich die eben zitierten Sicherheitsanforderungen in der Überarbeitung seitens des BMU. Es existiert ein Referentenentwurf mit Stand vom 11.07.2019 über die „Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle“ (EndSiAnFV 2019). Darin finden sich im §20 folgende Aussagen zum Thema Monitoring.

- (1) Das Endlager und seine Umgebung sind im Rahmen eines Monitorings kontinuierlich zu überwachen. Das Monitoring hat insbesondere solche beobachtbaren Parameter zu überwachen, die frühzeitig auf Abweichungen von den zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems hindeuten können. Bei der Festlegung der zu überwachenden Parameter sind die Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach den §§ 14 Absatz 1, 16 Absatz 1 und 18 Absatz 1 des Standortauswahlgesetzes sowie die absehbaren zukünftigen Informationsbedürfnisse zu berücksichtigen.

- (2) Das Monitoring ist vom Betreiber möglichst frühzeitig einzurichten. Es beginnt spätestens mit der Erkundung des Endlagerstandortes nach § 9. Die Ergebnisse des Monitorings sind zu dokumentieren.
- (3) Das Monitoring ist ab seinem Beginn in zehnjährigen Abständen systematisch fortzuschreiben. Nach der Erteilung der Genehmigung nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes erfolgt die Fortschreibung im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen nach § 9h des Atomgesetzes in Verbindung mit § 19a Absätze 3 und 4 des Atomgesetzes. In jeder Fortschreibung sind die jeweils bestehenden Zugangsmöglichkeiten zu den radioaktiven Abfällen sowie mögliche Fortentwicklungen der Erkenntnismethoden und Erkenntnismöglichkeiten zu berücksichtigen. In jeder Fortschreibung ist auch aufzuzeigen, welcher Entwicklungsbedarf für die verwendeten und möglichen neuen Monitoring-Methoden besteht und wie dieser berücksichtigt werden soll.
- (4) Die Maßnahmen des Monitorings dürfen die Sicherheit des Endlagers zu keinem Zeitpunkt erheblich beeinträchtigen.

Zu Satz (1) und der darin angesprochenen Auswahl relevanten Parametern lässt sich sagen, dass der neu entwickelte und in diesem Bericht vorgestellte Parameter-Screening-Prozess (vgl. Kap. 4.3) dieser Forderung entspricht. Dies gilt auch für Satz (4), da die Bewertung einer möglichen Beeinträchtigung von Barrieren Bestandteil des Screening-Prozesses ist.

3.2 Empfehlungen der Endlagerkommission

Im Jahr 2013 wurde seitens der Bundesregierung ein neues Gesetz erlassen zur Suche und Festlegung eines geeigneten Standortes für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle. Dieses Gesetz wurde in den Folgejahren ergänzt und im Jahr 2017 in seiner bislang finalen Fassung erlassen (StandAG 2017). Gleichzeitig wurde im Jahr 2013 die "Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" für einen Zeitraum von 2,5 Jahren gegründet. Die Aufgabe der Kommission war es, ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandorts zu erarbeiten inklusive der Beschreibung des Abfallzyklus und der einzelnen Phasen einer Endlagerung. Die Ergebnisse der Kommissionsarbeit wurden in einem Abschlussbericht dokumentiert, der Ende 2016 veröffentlicht wurde (Endlagerkommission 2016). Darin kommt zum Ausdruck, dass dem Monitoring eines Endlagers eine unverzichtbare Rolle zukommt, wenn es darum geht, Transparenz zu zeigen, die Endlagerentwicklung zu beobachten und vor allem Entscheidungsfindungen zu unterstützen hinsichtlich einer Unterbrechung oder Fortführung des Einlagerungsbetriebes. Im Folgenden werden die wesentlichen Aussagen der Endlagerkommission zum Thema Endlagermonitoring zusammengefasst.

3.2.1 Generelle Aussagen zum Thema Monitoring

Mit Blick auf die Errichtungsphase eines Endlagers wird gesagt, dass neben einem Verfüll- und Verschlusskonzept auch ein Monitoring-Konzept Teil der Beantragung zur Errichtung eines Endlagers sein sollte. In diesem Monitoring-Konzept sollten alle Monitoring-Aktivitäten beschrieben sein, sowohl, die, die noch vor der Errichtungsphase zu implementieren sind, um den ursprünglichen Zustand zu dokumentieren, als auch die, die erst zu einem späteren Zeitpunkt, z. B. während der Verschlussaktivitäten, benötigt werden. Erstere sollten bereits detailliert im Antrag beschrieben sein, während bei letzteren eine Beschreibung auf konzeptioneller Ebene zunächst ausreichend ist. In jedem Fall aber ist anzugeben, ob Anforderungen an die Implementierung von Monitoring-Einrichtungen bestehen, die beispielsweise während der Auffahrung oder bei sonstigen technischen Maßnahmen berücksichtigt werden müssen. Diese Angaben sind notwendig, um negative Auswirkungen auf spätere Monitoring-Resultate zu vermeiden.

Zu Beginn der Betriebsphase sollte die Option bedacht werden, zunächst mit einer "heißen" Test-Phase den Einlagerungsbetrieb zu beginnen, in dem lediglich einige Einlagerungsbohr-

löcher oder eine einzelne Einlagerungsstrecke mit Abfallbehältern befüllt und die entsprechenden Strecken versetzt werden. Während einer solchen Test-Phase könnte die Entwicklung im Nahfeld der eingelagerten Abfälle mit geeigneten Monitoring-Systemen beobachtet werden. Auf Basis der Monitoring-Ergebnisse kann dann diskutiert und entschieden werden, ob mit dem Einlagerungsbetrieb in gleicher Form fortgefahren werden soll oder ob Anpassungen sinnvoll bzw. notwendig erscheinen. Dies kann auch eine Entscheidung zur Rückholung aus den Testbohrlöchern oder Teststrecken beinhalten.

Generell sollte vorgesehen werden, ein Monitoring-Konzept während der Betriebsphase regelmäßig zu überprüfen, ob damit immer noch dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprochen wird, oder ob Verbesserungen sinnvoll sind. Eine naheliegende Option ist, diese Überprüfung spätestens alle 10 Jahre durchzuführen, und zwar immer dann, wenn auch eine Überprüfung des Sicherheitskonzeptes (Safety Case) ansteht, wie es in den Sicherheitsanforderungen festgeschrieben ist. Diese Überprüfung sollte sowohl für die sich bereits in Betrieb befindlichen Monitoring-Systeme erfolgen, als auch für solche, die im Zuge weiterer Planungen in Zukunft implementiert werden sollen.

Aus jetziger Sicht wird davon ausgegangen, dass nachdem alle Einlagerungsfelder befüllt wurden, die Zugänge sowohl zu den einzelnen Einlagerungsfeldern, sprich die Richtstrecken, als auch die Tageszugänge, sprich die Schächte, nicht sofort versetzt und versiegelt werden. Statt dessen wird eine Beobachtungsphase vorgeschlagen, um die weitere Endlagerentwicklung mit Hilfe von Monitoring-Systemen zu verfolgen. Die Monitoring-Ergebnisse können dann als Informationshilfe dienen, um zu entscheiden,

- ob das Endlager final verschlossen und versiegelt werden soll,
- wie lange eine Beobachtungsphase dauern soll, während die die Monitoring-Ergebnisse kontinuierlich ausgewertet werden,
- ob eine Rückholung oder Teirlückholung oder sonstige Fehlerkorrekturen, z. B. am geotechnischen Barrierensystem, zu planen und umzusetzen sind.

Mit Blick auf die Nachverschlussphase sollte eine abschließende Prüfung des Monitoring-Konzeptes vor dem Hintergrund des Standes von Wissenschaft und Technik erfolgen. Finale Anpassungen an dem Monitoring-System könnten zu dem Zeitpunkt noch erfolgen. Dies sollte im Zusammenhang mit einer finalen Bewertung der Zielsetzungen für ein Monitoring in der Nachverschlussphase erfolgen. Nach dem finalen Verschluss des Endlagers sind die Durchführung des Monitoring und die Ergebnisinterpretation die letzten verbleibenden Aktivitäten zusammen mit der Dokumentation und dem Informationstransfer an zukünftige Generationen.

Zurzeit ist es müßig darüber nachzudenken, wie letzteres in Zukunft organisiert werden könnte. Was aber getan werden sollte, ist, zukünftigen Generationen zu vermitteln, dass aus jetziger Sicht es sinnvoll erscheint, Monitoring-Aktivitäten auch nach dem Verschluss des Endlagers noch einen Zeit lang weiter laufen zu lassen und dass für diese Aktivitäten eine verantwortliche Institution zu benennen ist, die weitere Bewertungen, Dokumentationen und Informationstransfer organisieren sollte.

3.2.2 Prozess- und Endlagermonitoring

Im Kapitel 6.3.6 des Abschlussberichtes der Endlagerkommission heißt es:

Der Begriff ‚Monitoring‘ umfasst eine laufende oder in regelmäßigen Abständen durchzuführende Beobachtung vorab festzulegender Parameter und die Bewertung dieser Ergebnisse vor dem Hintergrund der jeweiligen Anforderungen oder sich ändernder Rahmenbedingungen und Einschätzungen. Mit einem begleitenden Monitoring wird es möglich, ständig Transparenz über den aktuellen Zustand des Verfahrens der Endlagerung mit seinen Etappen, aber auch über den geologischen Zustand in dem späteren Standort zu schaffen. Diese

Transparenz erlaubt zum einen die Früherkennung von unerwarteten Entwicklungen und möglichen Fehlern, damit also auch frühzeitiges Lernen zwecks Fehlerkorrektur. Zum anderen kann diese Transparenz auch in der Gesellschaft und insbesondere in der betreffenden Region das Vertrauen in das Verfahren und die beteiligten Akteure erhöhen. In der Endlagerung sind demzufolge zwei Formen grundsätzlich zu unterscheiden:

- a) Prozessmonitoring: das begleitende Monitoring des gesamten Prozessweges hin zu einem Endlager und aller dabei stattfinden Entscheidungsprozesse und der relevanten Veränderungen im Umfeld (politische Veränderungen, Wertewandel, neue wissenschaftliche Erkenntnisse etc.) sowie die Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf die jeweils nächsten Schritte. Die Kommission versteht hierunter auch eine von den zentralen Akteuren (Abfallerzeuger, Regulierungsbehörde, Betreiber) unabhängige und zu ihnen komplementäre Prozessbegleitung in Abgrenzung zu der von den Akteuren selbst zu fordernden Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System.
- b) Endlagermonitoring: die begleitende Beobachtung eines potentiellen oder dann realen Endlagerstandortes in Bezug auf die dortigen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse und ihrer Veränderungen sowie in Bezug auf den Zustand der eingelagerten Abfälle. Durchgeführt wird das Endlagermonitoring i. W. durch den Betreiber und die Regulierungsbehörde, mithin durch zentrale Akteure der Endlagerung, die wiederum unmittelbar der Verpflichtung zur kritischen Beobachtung ihres Tuns im Sinne eines selbsthinterfragenden Systems unterliegen.

Beide Ausrichtungen des Monitoring sind zentrale Elemente der Endlagerung als einem lernenden Verfahren. Dabei kommt es zu Schnittstellen mit dem Beteiligungsverfahren, mit der Behördenstruktur und mit der Verpflichtung auf ein selbsthinterfragendes System, aber auch mit der Notwendigkeit und Ausrichtung zukünftiger Forschung und Technologieentwicklung.

3.2.2.1 Prozessmonitoring

Weiterhin heißt es im Abschlussbericht der Endlagerkommission:

Der Deutsche Bundestag soll nach gegenwärtigem Verständnis 2017 das Verfahren der Suche nach einem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit starten. Bis zum Beginn der Einlagerung werden viele Jahrzehnte vergehen, bis zu einem Verschluss möglicherweise sogar mehr als ein Jahrhundert. Die extrem lange Zeitdauer des Gesamtorganges macht es erforderlich, den Prozess selbst auch von Anfang an einem begleitenden Monitoring und einer periodischen und kritischen Evaluierung zu unterziehen, um den Verfahrensablauf qualitativ und zeitlich und inhaltlich zu optimieren. Das Prozessmonitoring - also die begleitende Beobachtung und Reflexion des gesamten Prozessweges - muss bereits mit Beginn des Auswahlverfahrens einsetzen, da hier bereits Weichen für die kommenden Jahrzehnte gestellt werden. Entsprechend frühzeitig müssen die hierfür erforderlichen Strukturen geschaffen werden.

Das Prozessmonitoring sollte zumindest folgende Aspekte umfassen:

- regelmäßige Reflexion und Bewertung des Standes des Verfahrens gemessen an den selbst gesetzten Zielen; möglicherweise Modifikation der Ziele und der vorgesehenen Zeitspannen
- regelmäßige Evaluierung der institutionellen Situation: Betreiber, Behördenstruktur, Aufsicht, Transparenz etc.
- Einbeziehung der im Beteiligungsverfahren vorgesehenen Schritte und Formate zu einer möglichst frühzeitigen Erkennung von Vertrauensproblemen und von Schwachstellen der Beteiligung
- während der Suche nach einem Endlagerstandort zu allen infrage kommenden Standorten die Frage bedenken, welche Parameter für ein Monitoring beobachtbar sind oder beobachtet werden sollen

- regelmäßige Prüfung, ob die Vorgehensweise bei der Erkundung sowie die vorgesehene Technik dem nationalen und internationalen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen
- regelmäßige Erhebung des Wissensstandes zum Thema Monitoring (zum Beispiel neue Monitoring-Technologien).

Ein wirksames Prozessmonitoring setzt den Zugriff auf die jeweils relevanten Daten im Rahmen der Dokumentation voraus.

Die Kommission ist der Auffassung, dass es zu den Aufgaben des gesellschaftlichen Begeitremiums gehört, das Prozessmonitoring in methodisch adäquater und transparenter Form einzufordern, die Auswahl der Methoden zu begleiten, die Umsetzung zu überwachen und auf die Auswertung der Ergebnisse zu achten. Das Prozessmonitoring ist vor dem Hintergrund des viele Jahre dauernden Standortauswahlverfahrens eine wesentliche Grundlage für die optimierte Durchführung des Verfahrens.

Die Erfahrungen der vergangenen Jahrzehnte haben gezeigt, dass die technischen Verfahren im Bergbau und in der Exploration von Lagerstätten (insbesondere Öl- und Gasindustrie) ständig weiterentwickelt werden. Bereits heute stehen beispielsweise seismische Untersuchungsmethoden (3D-Seismik) und Bohrverfahren (abgelenkte Bohrungen bis zu Horizontalen) zur Verfügung, die es ermöglichen, Daten von hoher Qualität zu gewinnen, ohne die Barrierefunktion des Wirtsgesteins in einem potentiellen einschlusswirksamen Gebirgsbereich wesentlich zu beeinträchtigen. Das sich aus der erwarteten technischen Entwicklung ableitende Optimierungspotential kann für das Standortauswahlverfahren auch Potentiale zur zeitlichen Optimierung des Auswahlverfahrens eröffnen. Daher muss bei der Festlegung der Erkundungsprogramme für die Phasen 2 und 3 durch den Vorhabenträger der jeweils aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik Berücksichtigung finden, um die Erkundungsmaßnahmen ohne unnötige Beeinträchtigung der Barrierefunktion des Wirtsgesteins sowie auch ohne unnötigen Flächenverbrauch und Umweltbeeinträchtigungen umzusetzen.

Da die zukünftig einzusetzenden Erkundungs- und Beobachtungsmethoden zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht festgelegt werden können, muss das Prozessmonitoring die Umsetzung des dann geltenden internationalen Standes von Wissenschaft und Technik für die Erkundung von Endlagerstandorten auf der Grundlage der dann für die Bewertung der im Verfahren befindlichen Standorte erforderlichen Daten sicherstellen. Die für die jeweilige Phase zu erhebenden geologischen und technischen Daten ergeben sich dabei unter anderem auch aus dem zu Grunde gelegten Endlagerkonzept.

3.2.2.2 Endlagermonitoring

Endlagermonitoring dient dem Zweck, den Zustand der geologischen Formation, der hydrogeologischen Verhältnisse und der Abfälle, beziehungsweise die Auswirkungen des Endlagers auf seine Umgebung in den verschiedenen Etappen der Endlagerung systematisch zu beobachten. Hierbei wird in den verschiedenen Etappen der Endlagerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine Vielzahl an Methoden zur Anwendung kommen. Die ständige Beobachtung des Endlagersystems, seiner Komponenten und seiner Umgebung dient während des gesamten Prozesses der frühzeitigen Entdeckung möglicher Fehlentwicklungen oder unvorhergesehener Verläufe, um gegebenenfalls daraus Konsequenzen ziehen und Fehlerkorrekturen einleiten zu können (im Extremfall bis hin zur Rückholung oder Bergung von radioaktiven Abfällen). Sie dient auch zur Optimierung der jeweils anstehenden geotechnischen Schritte, zum Beispiel der Auslegung der verschiedenen Verschlussbauwerke, und nicht zuletzt der regelmäßigen Überprüfung der Annahmen und Informationen, auf denen die Sicherheitsnachweise für Errichtung, Betrieb und Nachbetriebsphase des Endlagers beruhen.

Für das Monitoring muss festgelegt werden, welche Parameter an welchem Ort zu beobachten sind, da dies Auswirkungen auf die Auslegung der Techniken für das Monitoring (Senso-

ren und Datenübertragung an die Oberfläche) hat. Zumindest sollten dies die Parameter sein, die für die Sicherheitsüberlegungen relevant sind, zum Beispiel in Bezug auf die Wirksamkeit der geologischen und technischen Barrieren. Die Monitoring-Parameter können erst festgelegt werden, wenn mögliche Endlagerstandorte in Verbindung mit den jeweiligen Endlagerkonzepten ausgewählt sind (Phase 3), im Detail kann die Festlegung erst anhand der letztlich getroffenen Standortentscheidung erfolgen.

Bei einem Monitoring muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen dem Bestreben, die sicherheitsrelevanten Parameter für ein Endlager möglichst vollständig zu überwachen und der Tatsache, dass mit eingebauten Sensoren/Messgeräten und damit verbundenen Kabeln auch potentielle Schwachstellen für Wasserzutritte geschaffen werden, zum Beispiel für die Informationsübertragung aus dem Inneren einer verschlossenen Strecke. Dieser Konflikt wird verschärft, wenn das Monitoring nach Verschluss des gesamten Bergwerks weitergeführt werden soll. An dieser Stelle besteht ein Zielkonflikt: Einerseits kann ein unvollständiger Verschluss eine Schwachstelle für die Sicherheit bedeuten. Andererseits kann durch ein Monitoring ein Sicherheitsgewinn im Fall unerwarteter Entwicklungen eintreten. Dieser Zielkonflikt wird voraussichtlich in Zukunft aufgelöst oder zumindest abgeschwächt werden, wenn technische Entwicklungen zur kabellosen Datenübertragung, die heute noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium sind, neue Monitoring-Möglichkeiten mit sich bringen werden.

Um die Beobachtungen in einem möglichst umfassenden zeitlichen Rahmen interpretieren zu können, muss das Monitoring der geologischen Formation bereits mit der Festlegung der Standorte für die untertägige Erkundung beginnen. Hierdurch werden Informationen zum Ausgangszustand des Systems erhoben, mit denen die bei der weiteren Entwicklung des Endlagersystems gewonnenen Daten verglichen werden können. Um spätere Hebungs- oder Absenkungsvorgänge bestimmen zu können, ist beispielsweise eine frühzeitige Einrichtung von dauerhaft gesicherten geodätischen Festpunkten zur Vermessung der Geländeoberfläche eine der ersten nach Ausweisung eines Standorts für die untertägige Erkundung notwendige Maßnahme des Endlagermonitoring.

Mit der Einrichtung untertägiger Anlagen (zunächst zur Erkundung, nach erfolgter Standortentscheidung dann zu Einrichtung des Endlagers) werden weitere Monitoring-Einrichtungen installiert und betrieben werden, mit denen beispielsweise Spannungszustände und ihre Entwicklung oder die Bildung potenzieller Wasserwegsamkeiten überwacht werden. Die Einlagerung der Abfälle wird zusätzliche und andere Monitoring-Aktivitäten in Bezug auf die Endlagergebinde und ihre Einlagerungsumgebung nach sich ziehen. Mit dem Verschluss von Einlagerungsbereichen und später dem Verschluss des Endlagers werden Entscheidungen über den Einbau von Messgeräten zur Gewinnung spezifischer Daten (beispielsweise über die Temperaturentwicklung, einen Wasserzutritt, über Gasbildung oder eine Radionuklidfreisetzung in den Nahbereich), aber auch zur Übertragung der Daten nach außerhalb zu treffen sein. Für das Monitoring verschlossener Bereiche besteht dabei eine zeitliche Begrenzung entsprechend der Lebensdauer der eingesetzten Geräte. Daher werden für eine längerfristige Überwachung des Endlagerstandorts indirekte Beobachtungen (zum Beispiel der Geländeoberfläche, des Grundwassers im Deckgebirge oder der planmäßigen Außengrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) an Bedeutung gewinnen.

Das Endlagermonitoring macht also während des gesamten Prozesses eine Entwicklung mit, die parallel zu den Etappen der Endlagerung verläuft. Dabei werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Informationen anfallen, die ausgewertet und hinsichtlich ihrer Bedeutung für Sicherheit des Endlagers interpretiert werden müssen. Anhand der Informationen aus dem Monitoring kann die fortdauernde Funktionstüchtigkeit eines Endlagersystems während der verschiedenen Etappen seines Entstehens und seiner Existenz demonstriert und damit das Vertrauen in die Richtigkeit der getroffenen Entscheidungen gestärkt werden. Das Endlagermonitoring wird damit auch zur technisch/wissenschaftlichen Entscheidungsgrundlage zur Fehlererkennung. In diesem Zusammenhang sind Maßstäbe zu entwickeln um

zu unterscheiden, wann Abweichungen vom jeweiligen Erwartungswert als Fehler einzustufen sind, die das Ergreifen von Fehlerkorrekturmaßnahmen erforderlich machen.

Ein aktives Endlagermonitoring ist dabei bis mindestens zu dem Zeitpunkt erforderlich, zu dem die Bergbarkeit der Behälter auslegungstechnisch endet. Es ist nicht möglich, für diese langfristige Überwachung Methoden vorzugeben, es ist aber bereits heute der Anspruch zu formulieren, dass die Überwachung des Endlagers sich in allen Etappen an dem für ein Endlagermonitoring jeweils verfügbaren Stand von Wissenschaft und Technik orientieren muss, und dass diesbezüglich auch eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Methoden zur Überwachung der Sicherheit des Endlagers gefördert werden muss. Da es darüber hinaus keinen definierten Endpunkt der Überwachung des Endlagers geben kann, ist zu erwarten, dass eine über die Existenz des Endlagers informierte Gesellschaft auch langfristig den Endlagerstandort beziehungsweise die ihn umgebenden Schutzgüter (zum Beispiel Oberfläche, Grundwasser) beobachten wollen wird. Mit welchen Methoden dies geschehen wird, bleibt der Zukunft überlassen, über eine vorsorgende Dokumentation können hierfür die Grundlagen künftigen Generationen übergeben werden.

3.3 Fazit und Zusammenfassung der Rahmenbedingungen

Der regulatorische Rahmen für das Monitoring eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle wird in erster Linie durch die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (BMU 2010) sowie deren in Vorbereitung befindlichen Neufassung (EndSiAnfV 2019) vorgegeben. Darüber hinaus gibt es Empfehlungen für ein Endlager-Monitoring, die im Abschlussbericht der Endlagerkommission niedergelegt sind und neben dem technischen Endlagersystem speziell auch den gesamten Prozess der Entstehung des Endlagers und seine sozio-ökonomische Begleitung mit einbeziehen. Ergänzend sollen die Kernaussagen der internationalen Projekte (vgl. Kap. 2.12) als Richtlinien bei der Entwicklung von Monitoring-Konzepten Berücksichtigung finden.

Die wesentliche regulatorische Anforderung besteht darin, das Monitoring während der Betriebsphase, der Verschlussphase und für einen begrenzten Zeitraum nach dem Verschluss durchzuführen. Als entscheidende Zielsetzung wird genannt, dass mit dem Monitoring die Aussagen der im Vorfeld erstellten Sicherheitsanalyse zur Entwicklung des Endlagersystems überprüft werden sollen. Diese Zielsetzung deckt sich vollkommen mit Kernaussagen der internationalen Projekte (Abb. 2.2). Letztere sind einhellig der Meinung, dass ein Monitoring auch deswegen durchgeführt werden sollte, um signifikante Informationen über die Entwicklung einzelner Endlagerkomponenten bereitzustellen, die dann genutzt werden sollten, um Entscheidungsprozesse innerhalb des Endlagerprogramms mit Blick auf die Langzeitsicherheit zu unterstützen. Dieser Punkt wird auch im Bericht der Endlagerkommission aufgegriffen, speziell im Hinblick auf die dadurch verbesserte Transparenz von Entscheidungen, insbesondere wenn es darum geht, zu entscheiden, ob der Endlagerprozess fortgesetzt, geändert, unterbrochen oder umgekehrt werden soll.

Die Aussagen im Bericht der Endlagerkommission ergänzen signifikant die Vorgaben in den deutschen Sicherheitsanforderungen bezüglich der Zielsetzungen eines Endlager-Monitorings. Die getroffenen Aussagen gliedern sich adäquat in die Aussagen der internationalen Community ein, so dass sich insgesamt ein konsistentes Bild für die Rahmenbedingungen ergibt, innerhalb derer die Entwicklung eines Monitoring-Programms erfolgen sollte.

4 Der Weg zu einem Monitoring-Konzept

Die Aufgabe in diesem Projekt besteht darin, ein Monitoring-Konzept für ein beispielhaftes Endlagersystem zu entwickeln, das sowohl die für Deutschland gültigen regulatorischen Vorgaben (vgl. Kap. 3.1), die Empfehlungen der Endlagerkommission (vgl. Kap. 3.2), als auch die Kernaussagen der internationalen Projekte (vgl. Kap. 2.10) als Richtlinien bei der Entwicklung berücksichtigt. In den folgenden Kapitel werden zunächst die strategischen und konzeptionellen Grundlagen erläutert und anschließend wird anhand eines Beispiels eine Methode aufgezeigt, wie in transparenter Form Parameter für ein Monitoring ermittelt werden können. Darauf aufbauend wird anschließend das zugehörige Monitoring-Konzept erläutert.

4.1 Strategische Grundlagen

Die Monitoring-Strategie, die von BGE TECHNOLOGY vertreten wird, umfasst zunächst die Definition davon, was unter einem Monitoring zu verstehen ist. Als umfassende und anwendbare Definition von **Endlager-Monitoring** wird die Definition erachtet, die vom MODERN-Konsortium entwickelt wurde (MODERN 2013a). Mit Blick auf diese Definition wird auch klar, dass es bei der Monitoring-Strategie nicht um ein Monitoring zur Überwachung der Betriebssicherheit geht, sondern dass es um ein Monitoring-Konzept geht, das in seiner Ausgestaltung geeignet ist, die regelmäßige Überprüfung der Langzeitsicherheitsaussage durch messtechnische Informationen informativ zu unterstützen. Die Langzeitsicherheitsaussage ist gemäß den Sicherheitsanforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) gebunden bzw. an den Nachweis, dass der ewG die ihm zugesetzte Funktion erfüllt.

Endlager-Monitoring

Kontinuierliche oder periodische Beobachtung und Messung von technischen, umwelttechnischen, radiologischen oder anderen Parametern und Indikatoren/Charakteristika, die helfen, das Verhalten von Komponenten des Endlagersystems oder die Auswirkungen des Endlagers und seines Betriebs auf die Umgebung zu bewerten – und somit unterstützend wirken bei der Entscheidungsfindung während des Endlagerprozesses und dadurch die Vertrauensbildung in den Endlagerprozess verbessern.

(MODERN 2013a)

4.2 Konzeptionelle Grundlagen

Der "Weg" zu einem Monitoring-Konzept wird am Beispiel eines Endlagerkonzeptes bzw. eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes für ein Endlager in einer Tongesteinsformation erläutert. Im Rahmen des Projektes ANSICHT wurden exemplarisch für zwei unterschiedliche Tongesteine in Nord- und Süddeutschland Endlagerkonzepte inklusive Verfüll- und Verschlusskonzepte als Grundlagenmodule für ein Sicherheits- und Nachweiskonzept entwickelt (Jobmann et al. 2017). Für die beispielhafte Entwicklung eines Monitoring-Konzeptes wurde das im Folgenden zusammengefasste Endlagerkonzept für das Endlagerstandortmodell NORD als Grundlage verwendet.

4.2.1 Grubengebäude

Für das Endlagerstandortmodell NORD ist es vorgesehen, die Einlagerungssohle des Endlagerbergwerks in einer Tiefe ca. 600 – 800 m unter GOK anzurufen. Das Endlagerkonzept sieht als Zugang zum Grubengebäude zwei ca. 800 m tiefe Schächte vor. Der Einlagerungsbereich für ausgediente Brennelemente umfasst 32 Einlagerungsfelder, der Einlagerungsbereich für Wiederaufarbeitungsabfälle 12 Einlagerungsfelder (Abb. 4.1). Mit dieser Einteilung

wird der Forderung aus den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) Rechnung getragen, dass das Endlager in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern ist.

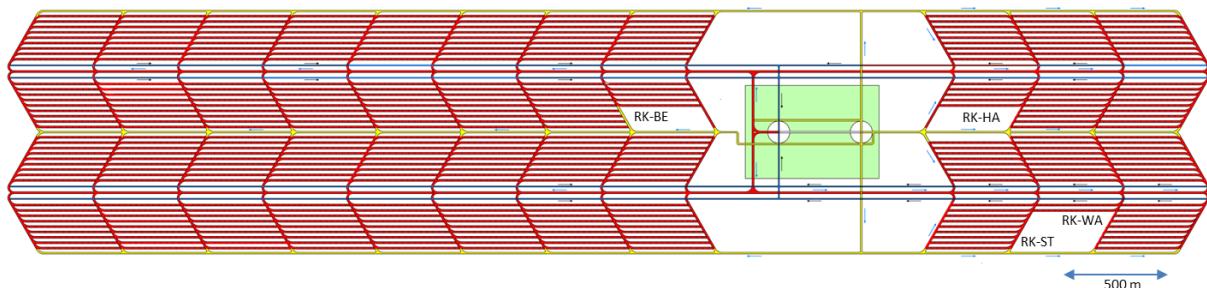


Abb. 4.1: Grubengebäudelayout für das Bohrlochlagerungskonzept. Linker Bereich: Felder für ausgediente Brennelemente (RK-BE). Rechter Bereich: Felder für Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und Strukturteile (RK-HA, RK-WA, RK-ST). Gelb: konventioneller Betrieb, rot: Gebindetransport und –einlagerung, blau: Abwetterstrecken, grün: Infrastrukturbereich (Lommerzheim & Jobmann 2015).

Die Einlagerungsfelder bestehen aus jeweils 9 Bohrlochüberfahrungsstrecken, in deren Sohle die Einlagerungsbohrlöcher benachbarter Strecken entsprechend einer hexagonalen Anordnung versetzt positioniert werden sollen. Die Bohrlochlagerung in kurzen Vertikalbohrungen wird als Referenzkonzept für das Endlagerstandortmodell NORD betrachtet. Die Einlagerungsbohrlöcher zur Aufnahme der Abfallbehälter sollen eine Tiefe von 27 m haben. Durch die hexagonale Anordnung innerhalb eines Einlagerungsfeldes ist der Abstand der Bohrlöcher in jeder Richtung gleich. In jedes Einlagerungsbohrloch werden drei rückholbare Behälter eingelagert (Abb. 4.2).

4.2.2 Verschlusskonzept

Das geotechnische Barrierensystem für dieses Einlagerungskonzept besteht aus mehreren sich ergänzenden Komponenten, die insgesamt ein diversitär redundantes System darstellen sollen. Abb. 4.2 zeigt eine schematisierte Skizze des Verschlussystems mittels geotechnischer Barrieren basierend auf dem oben beschriebenen Grubengebäude. Das Verschlussystem (Abb. 4.2 links) besteht aus den Bohrlochverschlüssen, dem Streckenversatz, den Migrationssperren, den Streckenverschlüssen und den Schachtverschlüssen. Auf der rechten Seite der Abb. 4.2 ist die räumliche Lage der Migrationssperren und der Streckenverschlüsse dargestellt. Die Migrationssperren dichten die einzelnen Einlagerungsfelder ab und die Streckenverschlüsse dichten den Infraukturbereich mit dem Zugang zu den Schächten ab.

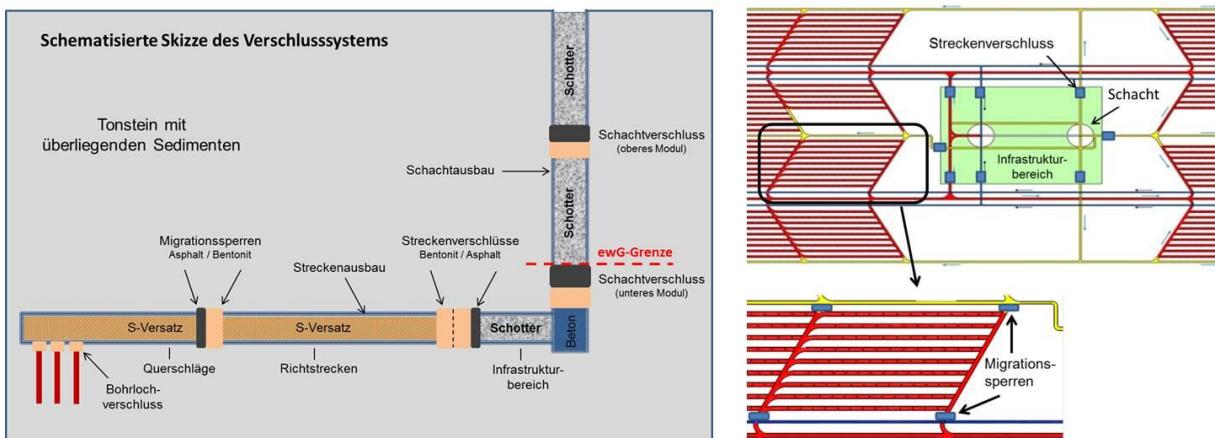
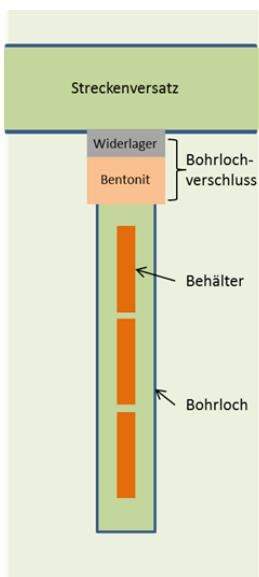


Abb. 4.2: Schematisierte Prinzipskizze des Verschlussystems (Jobmann et al. 2017).

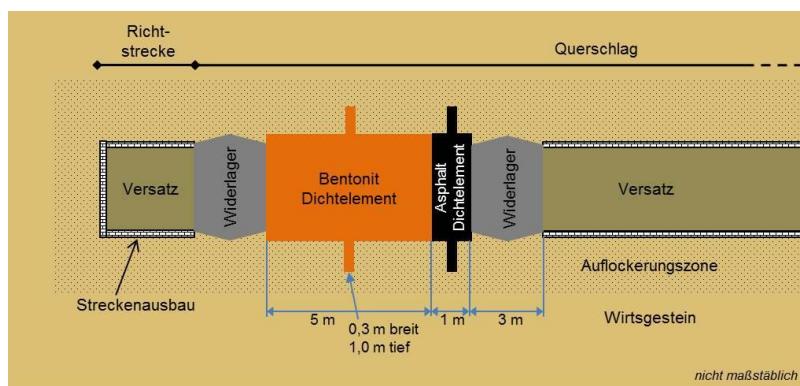


Die erste Barriere nach Ausfall des Behälters stellt der Bohrlochverschluss dar, der aus einem Bentonit-Dichtelement und einem Betonwiderlager besteht (Abb. 4.3). Das Bentonitdichtelement soll den advektiven Lösungstransport sowohl in als auch aus dem Bohrloch behindern und die Auflockerungszone um das Bohrloch sowie im Sohlenbereich der Einlagerungsstrecke bestmöglich abdichten. Es soll darüber hinaus eine Rückhaltefunktion gegenüber Radionukliden besitzen. Das Widerlager dient der Lagestabilität des Bentonitdichtelementes und ist entsprechend den zu erwartenden thermo-hydro-mechanischen Belastungen auszulegen (vgl. Herold et al. 2017).

Abb. 4.3:
Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrloches

Die verbleibenden Hohlräume in den Einlagerungsstrecken werden mit Versatzmaterial verfüllt, das die Lösungsbewegung zu und von den Behältern verzögert und eine Rückhaltefunktion gegenüber Radionukliden besitzt. Der Zugang zu den Einlagerungsstrecken erfolgt über die Querschläge, die ebenfalls mit Versatzmaterial verfüllt werden. Aufgrund des nicht entfernten Ausbaus übernimmt der Versatz erst später eine Dichtfunktion, da der Bereich des Ausbaus, solange dieser nicht korrodiert ist, ggf. einen bevorzugten Fließweg darstellt.

An den beiden Enden der Querschläge, also an den Übergängen zu den Richtstrecken, werden jeweils Migrationssperren (Abb. 4.4) errichtet. Diese enthalten einlagerungsseitig ein Asphalt-Dichtelement, das eine sofortwirksame Abdichtwirkung hat. Das sich anschließende Bentonit-Dichtelement benötigt einige Zeit zur Aufsättigung und Quelldruckentwicklung und damit zur Entwicklung seiner vollen Abdichtfunktion. Durch die Sofortwirksamkeit der Asphalt-Komponente werden für den Fall instantan defekter Abfallbehälter eventuell kontaminierte Fluide zurückgehalten und das Bentonit-Dichtelement hat Zeit, seine Dichtwirkung zu entfalten.



Prinzipieller Aufbau einer
Migrationssperre an der
Einmündung zur Richtstrecke

Abb. 4.4:
Prinzipieller Aufbau einer
Migrationssperre an der
Einmündung zur Richtstrecke

Vor der Errichtung der Dichtelemente wird der konturnahe Bereich der Auflockerungszone nachgeschnitten. Um den Fluidfluss über die verbleibende Auflockerungszone zu reduzieren, sind im Bereich der jeweiligen Dichtelemente ca. 30 cm breite und ca. 1,0 m tiefe Schlitze in der Hohlraumkontur vorgesehen, die mit dem entsprechenden Dichtmaterial verfüllt werden.

Innerhalb der Streckenverschlüsse, die an der Grenze zum Infrastrukturbereich in allen Richtstrecken errichtet werden, ist ebenfalls ein Asphalt-Dichtelement vorgesehen, diesmal aber schachtseitig angeordnet. Hiermit soll erreicht werden, dass durch die frühe Abdichtwirkung des Asphaltes Lösungen, die über einen eventuell undichten Schachtverschluss eindringen, nicht zu einem frühen Zeitpunkt in die Einlagerungsfelder migrieren können und dort das hydrochemische Milieu verändern. Analog zu den Migrationssperren verschafft auch hier

das Asphalt-Dichtelement den beiden Bentonit-Dichtelementen genügend Zeit zur Entwicklung ihrer vollen Abdichtwirkung. Durch mehrere Schlitze entlang der Hohlraumkontur wird die Auflockerungszone in redundanter Form entlang der Längsachse abgedichtet.

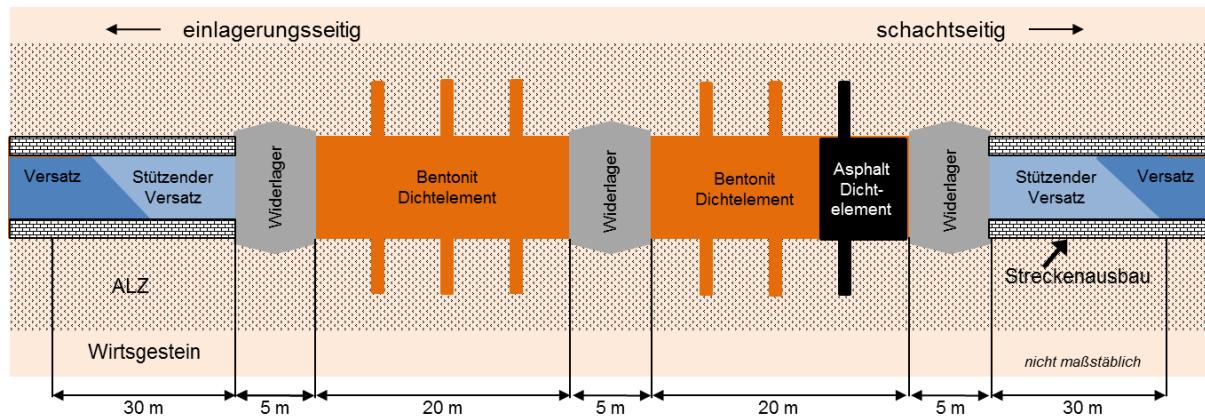


Abb. 4.5: Konzeption für einen Streckenverschluss an den Schnittstellen zum Infrastrukturbereich (Baufortschritt von links nach rechts)

Die letzte Komponente in der Serien der geotechnischen Barrieren bis zur Grenze des ewG stellt der untere Teil des Schachtverschlusses dar. Die Lage des ewG wurde so festgelegt, dass er größtenteils innerhalb des Haueriviums liegt, aber auch den unteren Teil des Barremiums umfasst und zwar den Teil, der unterhalb der darin ausgewiesenen Blätterton-schicht liegt (Jobmann et al. 2017). Das Konzept für den Schachtverschluss und die Lage der ewG-Grenze ist in Abb. 4.6 dargestellt. Direkt unterhalb der ewG-Grenze ist ein etwa 50 m mächtiges Dichtelement konzipiert. Die Sicherheitsfunktion dieses Dichtelementes ist es, eine Fluidmigration sowohl von außen in den ewG hinein, als auch von innen über die ewG-Grenze hinaus soweit zu minimieren, dass die geforderten Kriterien eingehalten werden (BMU 2010, Jobmann et al. 2015).

Bei diesem Dichtelement handelt es sich um ein sogenanntes „Sandwich“-Element. Dieses Element ist dadurch charakterisiert, dass es aus einer Wechselfolge von Bentonitelementen und Sandelementen besteht. Die Sandelemente werden auch als Äquipotenzialflächen bezeichnet. Sollte es im Zuge der Aufsättigung der Bentonitelemente zu Inhomogenitäten oder gar Fingerungseffekten kommen, so werden diese durch die Sandelemente in ihrer weiteren Ausbreitung unterbrochen.

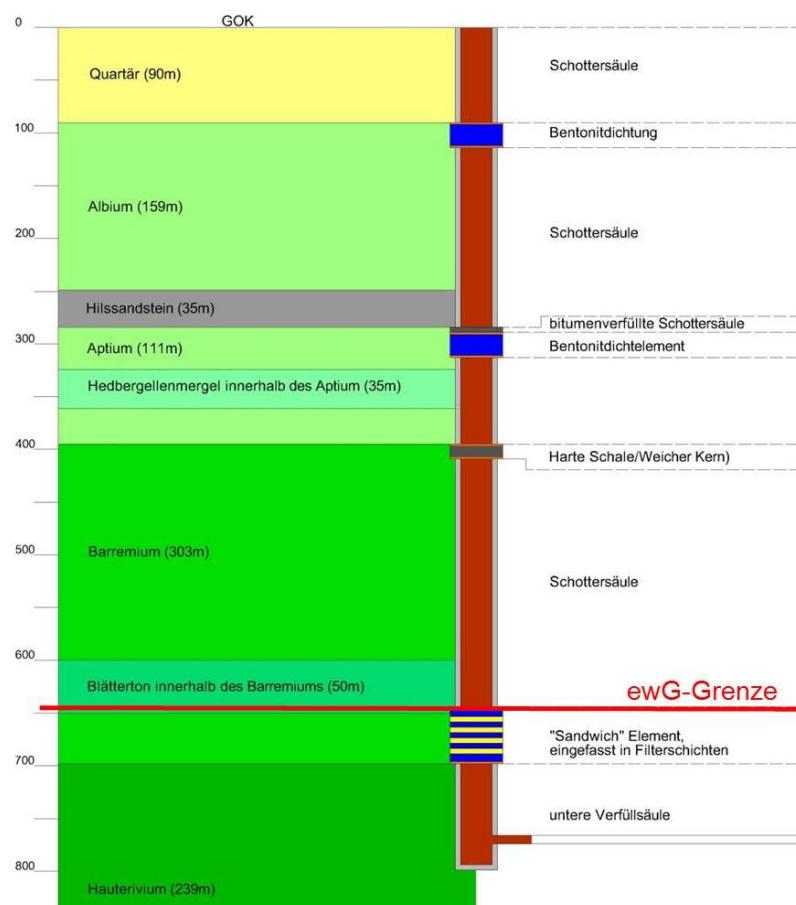


Abb. 4.6:
Entwurf Schachtverschlusskonzept
Endlagerstandortmodell NORD
(Herold et al. 2019)

Selbst bei nur lokalem Zufluss in ein Sandelement wird das Wasser gleichmäßig über die Querschnittsfläche des Schachtes und damit der Oberfläche der Bentonitdichtelemente verteilt. Auch bei eventuellen Umläufigkeiten einzelner Bentonitelemente wird durch die Äquipotenzialsegmente wieder eine Vergleichsmäßigung des Aufsättigungsprozesses erreicht. Bezuglich der Funktion und Konzeption der übrigen Elemente innerhalb des Schachtverschlusses sei an dieser Stelle auf den entsprechenden Bericht aus dem FuE-Projekt ELSA-II verwiesen (Herold et al. 2019).

4.3 Methode des Parameter-Screenings

Die Entwicklung einer Parameter-Screening-Methode war motiviert durch den Wunsch ein Werkzeug zu haben, mit dem ein Monitoring-Programm erstellt werden kann, das bedarfsorientiert mit Blick auf das Nachweiskonzept in der Lage ist, die Bewertung der Langzeitsicherheit mit Messwerten zu unterstützen. Die Screening-Methode dient zum einen der objektivierten Rechtfertigung warum einzelne Parameter Teil eines Monitoring-Programms sind und zum anderen dient es der Transparenz nach außen, d. h., Außenstehende können nachvollziehen, warum es im Zusammenhang mit dem Sicherheitsnachweis wichtig ist, einzelne Parameter einem Monitoring zu unterziehen. Die Screening-Methode bietet dem Implementer eine Hilfe an, Parameter zu identifizieren, die ihrerseits Prozesse charakterisieren, deren zeitlicher Verlauf für den Sicherheitsnachweis relevant sind. Die damit erstellte Liste von Parametern ist maßgeblich für das Design und die Entwicklung eines bedarfsorientierten Monitoring-Programms. Die Screening-Methode kann als Teil des „MODERN Monitoring Workflow“ angesehen werden, der beschreibt, welche Schritte vor und nach einem Parameter-Screening erfolgen sollten (White et al. 2017). Die Screening-Methode war auch ein Diskussionsthema auf der MODERN2020 Konferenz (White et al. 2019) und wurde als hilfreiches Tool zur Entwicklung von Monitoring-Programmen angesehen (Hansen 2019).

4.3.1 Generelle Beschreibung

Das prinzipielle Schema der Screening-Methode ist in Abb. 4.7 dargestellt. Das Schema besteht aus drei Spalten, die die Prozess-, Parameter- und Technologie-Ebenen wiederspiegeln, gekennzeichnet durch die Farben Orange, Blau und Grün. Die Ebenen sind fundamental miteinander verbunden und werden im Zusammenspiel benötigt, um den Zweck des Screenings zu erfüllen. Die Screening-Methode gibt Hilfestellung für jeden Schritt, der in dem Schema auszuführen ist, wobei jeder Schritt innerhalb einer der folgenden Ebenen abläuft

- Prozess-Ebene (**PRO**)
- Parameter-Ebene (**PAR**)
- Technologie-Ebene (**TEC**)

Im ersten Schritt ist zu bewerten, ob der zu betrachtende Prozess im Zuge des anzuwendenden Nachweiskonzeptes relevant ist und ob ein Monitoring-Bedarf besteht, um damit die Bewertung der Langzeitsicherheit zu unterstützen (orangener Bereich). Ist dies entschieden, gilt es, Parameter zu identifizieren, die diesen Prozess in seinem Ablauf charakterisieren. Für jeden dieser Parameter sind Monitoring-Strategien und Technologieoptionen zu identifizieren, die ein Monitoring ermöglichen (Blauer Bereich). Um überhaupt eine Vergleichsmöglichkeit und damit eine Bewertungsmöglichkeit zu erhalten, muss die erwartete Entwicklung jedes identifizierten Parameters ermittelt werden. Letzteres gibt auch einen Eindruck davon, welche technischen Anforderungen bestehen, diese Parameter in ihrer Entwicklung zu verfolgen. Damit begibt man sich in den Technologie-Level (grüner Bereich). In diesem Bereich ist zu bewerten, ob ein Monitoring der einzelnen Parameter, mit Blick auf den aktuellen Stand der Technik, technisch machbar ist. Kann diese Frage bejaht werden, so ist zu prüfen und zu bewerten, ob und wenn ja, inwieweit das Monitoring eines Parameters mit den zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten eventuell einen störenden Einfluss auf die Barrierewirkung der Endlagerkomponente hat.

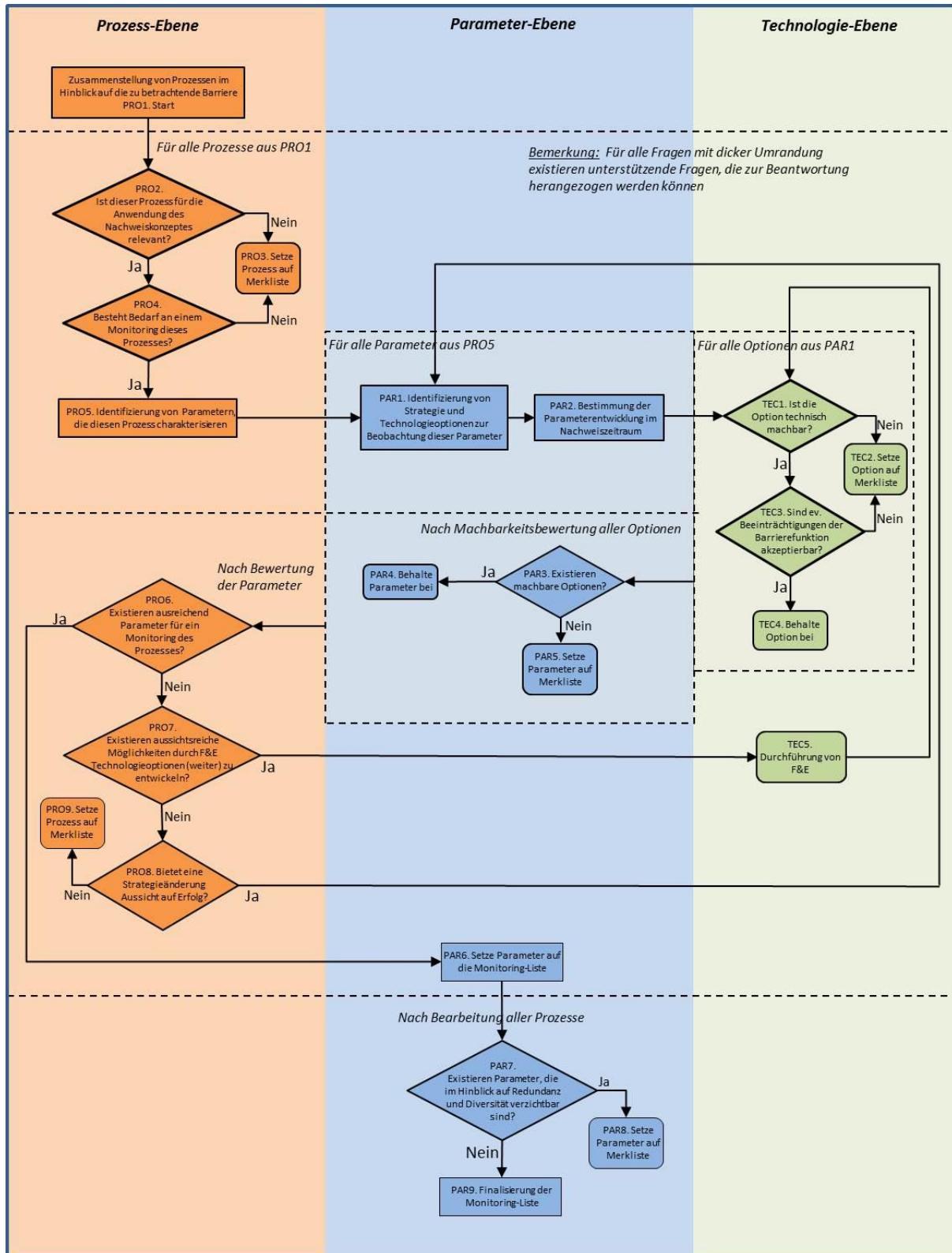


Abb. 4.7: Schema der Parameter-Screening-Methode (verändert nach White et al. 2019).

Ist dies nicht der Fall oder kann eine eventuelle Beeinträchtigung in Kauf genommen werden, so kann festgestellt werden, dass machbare Optionen für den oder die Parameter gegeben sind. Auf Prozess-Ebene bleibt dann zu klären, ob damit ausreichend Parameter in ein Monitoring-Programm aufgenommen werden können, die den als relevant identifizierten Prozess

in seinem Verlauf charakterisieren. Kann dies bejaht werden, so stehen diese Parameter schließlich auf der Monitoring-Liste. Existiert keine Möglichkeit, den Prozess in seinem Verlauf messtechnisch zu beobachten, ist zu klären, ob es als aussichtsreich gelten kann, dass durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten eine solche Möglichkeit herbeigeführt werden kann. Ist das schwer vorstellbar, so bleibt zu prüfen, ob eine Änderung der Monitoring-Strategie Aussicht auf Erfolg hat. Sind letztendlich keine adäquaten Möglichkeiten für ein Monitoring verfügbar, so soll der Prozess, der ja weiter oben als relevant identifiziert wurde, auf eine Merkliste zur späteren Re-evaluierung gesetzt werden. Schließlich kann nach Quervergleich aller Parameter auch im Hinblick auf Redundanz und Diversität die finale Parameter-Liste festgelegt werden, für die dann ein Monitoring Programm zu erstellen ist.

Die Screening-Methode ist nicht als eine Vorschrift sondern als unterstützendes Werkzeug gedacht, das bedarfsgerecht angepasst werden kann. Die einzelnen Schritte des methodischen Ablaufs werden im folgenden Kapitel näher erläutert. Für vier der im Schema gezeigten Entscheidungspunkte (PRO2, PRO4, TEC1, TEC3) wurden eine Reihe weiterer unterstützender Fragen erarbeitet, die helfen können, die jeweilige Frage transparent und nachvollziehbar zu beantworten. Die Verwendung der unterstützenden Fragen kann auch hilfreich sein, wenn es darum geht, die jeweiligen Antworten und damit Entscheidungen zu dokumentieren, um im Nachgang eine transparent Rechtfertigung für getroffene Entscheidungen verfügbar zu haben. Auch für eine Neu-Evaluierung oder Anwendung auf weitere Barrierekomponenten kann eine entsprechende Dokumentation eine brauchbare Basis sein. Auch diese unterstützenden Fragen sind nur als Vorschläge zu verstehen und können bzw. sollten individuell, z. B. je nach zu betrachtender Barrierekomponente, angepasst werden. Gegebenenfalls kann auch ein individuelles Ranking der Fragen nützlich sein, insbesondere wenn alternative Optionen zu vergleichen sind.

4.3.2 Schritte im Parameter-Screening

Die einzelnen Schritte in der Abfolge des Screening erfolgen gemäß folgender Strukturierung:

- „**PRO**“ kennzeichnet jeden Schritt, der im Zusammenhang mit einem Prozess zu durchlaufen ist.
- „**PAR**“ kennzeichnet jeden Schritt, der im Zusammenhang mit einem Parameter zu durchlaufen ist.
- „**TEC**“ kennzeichnet jeden Schritt, der im Zusammenhang mit einer Technologie-Option zu durchlaufen ist.

PRO1. Start

Der Eingang in den Screening-Ablauf kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann mit einem einzelnen Prozess begonnen werden, der für die Aufnahme in ein Monitoring-Programm angedacht ist. Ein solcher Prozess muss nicht zwingend einer FEP-Liste entspringen, sondern kann auch aus einer Forderung des Regulators oder anderer Stakeholder resultieren. Zum anderen kann auch mit einem Bündel an Prozessen gleichzeitig begonnen werden und jeder Schritt des Screenings erfolgt mit alle Prozessen parallel. Dies ist oft dann der Fall, wenn ein Monitoring-Programm für eine geotechnische Barriere erstellt werden soll und alle Prozesse betrachtet werden, die in Zusammenhang mit dieser Barriere stehen.

PRO2.

Ist dieser Prozess für die Anwendung des Nachweiskonzeptes relevant?

Gemäß jüngster NEA-Richtlinie ist es wichtig, eine begrenzte Anzahl von Parametern (und damit Prozessen) auszuwählen, durch die – mittels Monitoring – die *passive Sicherheit*² des Endlagers ausreichend nachgewiesen wird (NEA 2014). Entsprechend dieser Richtlinie gewährleistet diese Vorgehensweise, dass es einen berechtigten Grund zum Monitoring des

² Passive Sicherheit bedeutet nachsorgefreie Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Umwelt

betrachteten Prozesses gibt, indem seine Relevanz hinsichtlich Langzeitsicherheit und/oder Rückholbarkeit bewertet wird. Für diesen Schritt wurde eine Reihe von zusätzlichen Fragen entwickelt, die als Liste von Punkten angesehen werden kann, die bei der Ermittlung einer Antwort auf PRO2 berücksichtigt werden können. Die Aufzeichnung detaillierter Antworten auf diese Teilfragen kann auch (teilweise) die Begründung für das Monitoring eines Parameters liefern, um Informationen über einen Prozess und die ihn darstellenden Parameter zu erhalten. Je nachdem wie die Prozessliste am Anfang des Screening-Prozesses erstellt wurde, ist diese Frage möglicherweise schon berücksichtigt worden. Z. B., wenn ein Prozess über Sicherheitsfunktionen ausgewählt wurde, dann ist die Relevanz für das Nachweiskonzept wahrscheinlich schon gegeben. Nichts desto trotz ist dieser Screening-Punkt eine nützliche Überprüfung und stellt auch einen Rahmen dar, in dem die Rechtfertigung für ein Monitoring nachvollziehbar dokumentiert wird.

Ein Satz von unterstützenden Detailfragen wurde für diesen Schritt erarbeitet, deren Beantwortung genutzt werden kann, um die übergeordnete Frage PRO2 geeignet zu beantworten und die Entscheidung nachvollziehbar zu dokumentieren.

- PRO2.1.** Steht der Prozess unmittelbar in Zusammenhang mit einer oder mehreren Sicherheitsfunktion(en) der betrachteten Endlagerkomponente? (vgl. Kap. 4.4.2)
- PRO2.2.** Steht der Prozess in Zusammenhang mit irgendeinem Leistungsziel der betrachteten Endlagerkomponente? (vgl. Kap. 4.4.2)
- PRO2.3.** Ist der Prozess verbunden mit einem in der Sicherheitsanalyse modellierten Parameter, der einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten (Dosis/Risiko) hat?
- PRO2.4.** Steht der Prozess eventuell in Zusammenhang mit anderen mit dem Systemverhalten verbundenen Prozessen, die zu der Entscheidung führen könnten, die Abfälle (teilweise) rückzuholen oder den Endlagerprozess umzukehren?

PRO3.

Setze Prozess auf Merkliste

Wenn in Schritt PRO2 festgestellt wird, dass einer der betrachteten Prozesse nicht relevant für die Langzeitsicherheit oder die Rückholbarkeit ist, soll dieser zur Seite gestellt bzw. "auf die Merkliste" gesetzt werden. Dies bedeutet, dass dieser im aktuellen Monitoring-Plan nicht in die Liste der messtechnisch zu beobachtenden Prozesse aufgenommen werden soll. Wichtig dabei ist, dass dies keine endgültige Entscheidung ist; sie kann jederzeit rückgängig gemacht werden. Allerdings wird dadurch sichergestellt, dass die verbleibende Screening-Methodik nur auf relevante Prozesse angewendet wird, die zum gegebenen Zeitpunkt innerhalb eines Monitoring-Programms verbleiben sollen. Diese „geparkten“ Prozesse verbleiben im System, zusammen mit einem Protokoll über die Begründung ihres Status, um Transparenz zu gewährleisten und eine zukünftige Überprüfung zu ermöglichen.

PRO4.

Besteht Bedarf an einem Monitoring dieses Prozesses?

... um damit die Bewertung der Langzeitsicherheit zu unterstützen? Diese Frage beschäftigt sich mit dem Mehrwert, der durch das Monitoring eines sicherheitsrelevanten Prozesses gewonnen werden kann. Sie ist wichtig, weil es Prozesse geben kann, die zwar für die Sicherheit relevant sind, deren Monitoring aber zusätzlich zu den Informationen/Kenntnissen, die bereits durch andere Elemente des Langzeitsicherheitsnachweises zur Verfügung stehen, keine wertvollen Informationen/Kenntnisse liefern würde. Der Nutzen des Monitoring dieser Prozesse ist ggf. begrenzt was als Begründung dafür genommen werden kann, diese Prozesse nicht in den laufenden Monitoring-Plan aufzunehmen. Umgekehrt kann man der Auffassung sein, dass ein Monitoring solcher Prozesse auf jeden Fall nützlich ist, z. B. weil dies zusätzliches Vertrauen in die Langzeitsicherheit liefern würde. Die Entscheidung, ob das Monitoring eines Prozesses einen Mehrwert bringt, hängt von Expertenentscheidungen ab.

Analog zu PRO2 wurde eine Liste von zusätzlichen Fragen entwickelt, die bei der Beantwortung dieser Frage als Unterstützung herangezogen werden können.

- PRO4.1.** Könnte ein Monitoring des Prozesses Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung der zu betrachtenden Endlagerkomponente reduzieren, d. h. über das Wissen hin aus, das man aus großmaßstäblichen In-situ-Versuchen und/oder Forschung und Entwicklung bzgl. des Barrierefesthaltens erlangen kann?
- PRO4.2.** Könnte ein Monitoring für die Validierung von Langzeitmodellierungen oder für die Weiterentwicklung von Systemmodellen hilfreich sein?
- PRO4.3.** Könnte Monitoring des Prozesses zu einer Verbesserung des Designs einer Endlagerkomponente (z. B. geotechnischen Barriere) führen?
- PRO4.4.** Könnte Monitoring Vertrauen schaffen, dass das Endlagersystem wie geplant funktioniert, d. h. zusätzlich zu dem Vertrauen, dass durch andere Möglichkeiten geschaffen werden kann (z. B. durch Qualitätskontrollen)?
- PRO4.5.** Könnte Monitoring Vertrauen schaffen, dass die Abfälle rückholbar sind; zusätzlich zu anderen Informationen beispielsweise aus langzeitlichen In-situ-Versuchen?
- PRO4.6.** Könnte ein Monitoring des Prozesses zu einem besseren Systemverständnis führen, das in regelmäßige Aktualisierungen des Nachweises der Langzeitsicherheit einfließen würde?
- PRO4.7.** Wäre es besser, Unsicherheiten durch Monitoring des Prozesses anzugehen als durch Änderungen in der Komponenten- bzw. Endlagerauslegung?

Unterfrage zu PRO4.1 bis PRO4.7

- PRO4.8.** Können die durch den Prozess im Endlagersystem hervorgerufenen Änderungen während des geplanten Monitoring-Zeitraums messbar quantifiziert werden?

PRO5.

Identifizieren von Parametern, die diesen Prozess charakterisieren

Mit jedem Prozess sind grundsätzlich ein oder mehrere Parameter verbunden, die messtechnisch erfasst werden können, um Informationen über den Ablauf des Prozesses zu liefern. Für bestimmte Prozesse mag es ausreichend sein, ihn durch die Beobachtung eines einzigen Parameters zu verfolgen. Wohingegen es für manche Prozesse hilfreich sein kann, sie durch die Entwicklung mehrerer Parameter vollständig in ihrem Verlauf zu charakterisieren. Letzteres ist auch im Hinblick auf eine Diversität zu bewerten, sowohl auf Parameterebene als auch mit Blick auf einzusetzende Messverfahren. Wenn ein Prozess durch mehrere Parameter charakterisiert wird, dann sollten die Boxen PAR1 bis PAR5 für jeden Parameter gesondert durchlaufen werden. Geeignete Parameter können durch Expertenwissen (d.h. durch Verständnis des Prozessablaufs innerhalb des Endlagersystems) und Erfahrung (z. B aus der Forschung über diesen Prozess) identifiziert werden.

PAR1.

Identifizierung von Strategie und Technologieoptionen

Dieser Schritt wird für jeden Parameter durchgeführt, der unter PRO5 identifiziert wurde. Wurden Parameter im Zusammenhang mit einem Prozess identifiziert, gilt es nun, mögliche Optionen für das Monitoring dieser Parameter zu ermitteln. Jede Option besteht aus einer übergeordneten Monitoring-Strategie (z. B. ob der Parameter direkt in-situ oder in einer Pilotanlage beobachtet wird und welche Endlagerelemente überwacht werden sollen) und einer Technik (einer physikalischen Methode zur messtechnischen Erfassung des Parameters). Die Wahl der Monitoring-Strategie spiegelt die Sicherheitsstrategie wider, unter der das Monitoring-Programm entwickelt wird. Die Monitoring-Strategie kann ggf. je nach Parameter unterschiedlich sein oder es könnten auch verschiedenen Strategien für das Monitoring eines einzelnen Parameters identifiziert werden. Die Wahl einer zugehörigen Technologie sowie der Ort ihrer Implementierung hängt von der Endlagerkomponente und der gewählten Strategie ab. Ggf. sind mehrere Optionen möglich, die dann im Technologie-Level zu bewerten

sind. Es wird davon ausgegangen, dass in dieser Phase nicht alle vorhandenen Strategieoptionen sondern eine Auswahl von bevorzugten Optionen identifiziert und bewertet wird.

PAR2.

Bestimmung der Parameterentwicklung im Nachweiszeitraum

Analog zu PAR1 ist dieser Schritt für jeden Parameter durchzuführen, der unter PRO5 identifiziert wurde. Wenn die mit dem Prozess verbundenen Parameter identifiziert sind, muss die Entwicklung jedes Parameters über den geplanten Monitoring-Zeitraum simuliert werden, um Prognosen über den Verlauf der Parameter-Werte über den Monitoring-Zeitraum zu erhalten und um die Anforderungen an die vorgesehenen Systeme zum Monitoring der Parameter zu erhalten. Dies ist notwendig, um abzuschätzen, ob die möglichen Optionen zur Überwachung des Parameters geeignet sind, z. B. zum Verständnis, ob die verfügbare Technik die Bandbreite der möglichen Änderungen über den Monitoring-Zeitraum mit ausreichender Präzision und Zuverlässigkeit messtechnisch erfassen kann.

Für den Fall, dass zwei unterschiedliche Strategie- oder Technologieoptionen für denselben Parameter identifiziert wurden und es zu erwarten ist dass sich ggf. für jede Option unterschiedliche Voraussagen über die Parameterentwicklung bzw. den Verlauf des Prozesses ergeben, so sollte für jede Option die erwartete Entwicklung berechnet werden. Dies kann beispielsweise der Fall sein, falls neben einem Parameter, der den Prozessverlauf direkt abbildet, auch andere Parameter erfasst werden, die indirekt Informationen über einen Prozessverlauf geben. Der Detailliertheitsgrad der Prognosen soll konsistent sein mit der Frage, wie die Optionen bewertet werden, bzw. welche Informationen dazu benötigt werden. Das ist sicher auch davon abhängig, in welchem Stadium sich die Endlagerentwicklung befindet und welche Informationen überhaupt verfügbar sind. Zu beachten ist, dass Prognosen in den meisten Fällen mit Unsicherheiten verbunden sind, die quantifiziert werden müssen, um sicherzustellen, dass die Reaktionen auf die Messdaten angemessen sind.

TEC1.

Ist die Option technisch machbar?

Dieser Schritt ist für jede Strategie- und Technologieoption zu durchlaufen, die unter PAR1 identifiziert wurde. Dabei wird abgeschätzt, ob jede in PAR1 identifizierte Strategie- und Technologieoption technisch realisierbar ist verglichen mit der in PAR2 definierten, erwarteten Parameterentwicklung. Es wird davon ausgegangen, dass die Bewertung der technischen Machbarkeit auf Basis des Standes von Wissenschaft und Technik durchgeführt wird. Für aktuell laufende Weiterentwicklungen wird abgeschätzt, ob diese zum Zeitpunkt des geplanten Einsatzes verfügbar sein werden. Letzteres soll helfen, Technologien nicht zu früh zur Seite zu stellen, sondern aussichtsreiche Entwicklungen bis zum Zeitpunkt der geplanten Nutzung optimal zu integrieren. Entsprechende Abschätzungen sollten sowohl aus Gründen der Nachvollziehbarkeit dokumentiert werden, als auch um sie in zukünftigen Neu-Evaluierungen entsprechend berücksichtigen zu können. Um diesen Ablaufpunkt zu unterstützen und einen Rahmen für die Aufzeichnung der Ergebnisse zu schaffen, wurden Zusatzfragen für diesen Schritt entwickelt.

- TEC1.1.** Kann die vorgesehene Technologie die Anforderungen an die Sensibilität, Genauigkeit und Häufigkeit der messtechnischen Erfassung des Parameters über den Monitoring-Zeitraum erfüllen?
- TEC1.2.** Kann die vorgesehene Technologie die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Robustheit der messtechnischen Erfassung des Parameters über den Monitoring-Zeitraum erfüllen?
- TEC1.3.** Kann die vorgesehene Technologie auch unter Endlagerbedingungen effektiv über den Monitoring-Zeitraum arbeiten?

TEC2.

Setze Option auf Merkliste

Wird eine Option als technisch nicht realisierbar eingeschätzt (basierend auf den Antworten zu TEC1.1 bis TEC1.3 oder aus anderen Gründen), dann sollte diese Option auf die Merkliste gesetzt und nicht für die aktuelle weitere Entwicklung eines Monitoring-Programms verwendet werden. Die Option bleibt somit aus Gründen der Transparenz und Nachvollziehbarkeit im System und kann für eine spätere Neu-Evaluierung wieder berücksichtigt werden. An dieser Stelle sei auf die später folgende Box PRO7 hingewiesen, die eine Einschätzung zu aussichtsreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Inhalt hat. Im Falle mehrerer machbarer technischer Optionen kann auch ein zu entwickelndes Ranking der Fragen TEC1.1 bis TEC1.3 hilfreich sein, die aktuell sinnvollste Option zu selektieren und die anderen auf die Merkliste zu setzen.

TEC3.

Sind eventuelle Beeinträchtigungen der Barrierefunktion akzeptierbar?

Analog zu TEC1 ist dieser Punkt für jede Strategie- und Technologieoption zu durchlaufen, die unter PAR1 identifiziert wurde. Dieser Punkt bewertet, ob eine als technisch machbar identifizierte Option eventuell eine beeinträchtigen Einwirkung auf die zu betrachtende Barrierekomponente ausübt. Falls Einwirkungen als nicht akzeptabel angesehen werden, so ist die Option unter detaillierter Begründung auf die Merkliste zu setzen. Auch für diesen Punkt wurden Zusatzfragen zur Unterstützung der Beantwortung entwickelt.

- TEC3.1.** Kann die vorgesehene Technologie eingesetzt werden ohne die passive Sicherheit des Endlagersystems signifikant zu beeinträchtigen?
- TEC3.2.** Kann die vorgesehene Technologie eingesetzt werden, ohne dass das Erreichen erforderlicher Leistungsziele einer geotechnischen Barriere in Frage gestellt wird?
- TEC3.3.** Sind die aus Installation, Datenerfassung oder Pflege der Technik resultierenden radiologischen und nicht-radiologischen Risiken für die Belegschaft akzeptabel?
- TEC3.4.** Sind die wahrscheinlichen Auswirkungen auf den Endlagerbetrieb (d. h. hinsichtlich einer Unterbrechung oder Verzögerung der Einlagerung), die sich aus der Installation und/oder dem normalen Betrieb und/oder der Pflege der Technik ergeben, akzeptabel?
- TEC3.5.** Sind die wahrscheinlichen Auswirkungen auf die Umwelt, die sich aus der Entwicklung, Herstellung oder dem Einsatz der Technik ergeben, akzeptabel?

TEC4.

Beibehaltung positiv bewerteter Optionen

Alle Technologieoptionen, die als technisch machbar und in ihrer Einwirkung auf das Barrierensystem als akzeptabel angesehen werden, werden in den nächsten Schritt des Screenings übertragen.

PAR3.

Existieren machbare und akzeptable Optionen?

Wenn alle in PAR2 identifizierten Strategie- und Technologieoptionen sowohl hinsichtlich ihrer technischen Realisierbarkeit als auch hinsichtlich einer akzeptablen Einwirkung auf das Barrierensystem geprüft wurden, geht der ‚Workflow‘ wieder zurück auf die Parameterebene. Hier wird deutlich, ob irgendeine der für einen bestimmten Parameter identifizierten Optionen für ein Monitoring-Programm brauchbar ist. In diesem Fall ist die Frage mit „Ja“ zu beantworten. Kann keine der Optionen mit positiver Bewertung übertragen werden, so ist erneut die Merkliste (**PAR5.**) zu bemühen. Diese Frage ist für alle unter PRO5 identifizierten Parameter nach Durchlaufen der Technologie-Ebene zu beantworten.

PAR4.**Beibehaltung positiv bewerteter Parameter**

Falls wenigstens eine realisierbare und akzeptable Technologieoption für einen Parameter identifiziert wurde, so wird dieser Parameter zusammen mit der Technologieoption in der Prozess-Ebene weiter bearbeitet.

PRO6.**Existieren ausreichend Parameter für ein Monitoring des Prozesses?**

Nachdem alle Parameter, die unter PRO5 identifiziert wurden durch die PAR-TEC-Schleife gelaufen sind, prüft diese Frage schließlich, ob der jeweilige Prozess in seinem Verlauf messtechnisch erfassbar ist. In vielen Fällen ist ein einziger Parameter ausreichend, um den gewünschten Informationsgrad über einen Prozess zu erhalten. In solch einem Fall ist dieser Schritt redundant und wird die gleiche Antwort bekommen wie PAR3. In anderen Fällen aber kann es sein, dass mehrere Parameter notwendig sind einen Prozess vollständig zu charakterisieren. Alle entsprechenden Parameter müssen die PAR-TEC-Schleife durchlaufen haben bevor an dieser Stelle eine Bewertung für den Prozess erfolgen kann. Erfolgt eine positive Bewertung werden die Parameter final der Parameter-Ebene übergeben (**PAR6**). Falls keine positive Bewertung erfolgt, wird weiter auf der Prozess-Ebene vorangegangen (**PRO7**).

PAR6.**Setze Parameter auf die Monitoring-Liste**

Erscheint ein geeignetes Monitoring des jeweiligen Prozesses möglich, werden die zugehörigen Parameter auf die vorläufige Monitoring-Liste gesetzt, die dann auf der Parameter-Ebene final geprüft wird (**PAR7**).

PRO7.**Existieren aussichtsreiche Möglichkeiten durch F&E Technologieoptionen (weiter) zu entwickeln?**

In diesem Schritt ist zu prüfen, ob aussichtsreiche Optionen existieren, durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorhandene Technologien weiter zu entwickeln oder neu zu entwickeln, so dass eine messtechnische Erfassung und damit ein Monitoring des Prozesses in absehbarer Zeit sowohl technisch möglich als auch ohne negative Auswirkungen auf das Barrieverhalten der Endlagerkomponente sein wird. Bei einer positiven Aussage erfolgt eine Rückgabe auf die Technologie-Ebene (**TEC5**). Falls keine positive Bewertung erfolgt, wird weiter auf der Prozess-Ebene vorangegangen (**PRO8**).

TEC5.**Durchführung von F&E**

Dieser Schritt wird durchlaufen für den Fall, dass es als aussichtsreich eingestuft wurde, durch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ein geeignetes Monitoring des zu betrachtenden Prozesses in absehbarer Zeit bzw. zum geplanten Einsatzzeitpunkt zu erreichen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nach jeder (Weiter-)Entwicklung die Technologie-Schleife der Screening-Prozess ab der Stufe **TEC1** erneut durchlaufen werden sollte.

PRO8.**Bietet eine Strategieänderung Aussicht auf Erfolg?**

Dieser Punkt wird erreicht, falls keine Möglichkeit gefunden wurde, den zu betrachtenden Prozess anhand von ihm charakterisierenden Parametern einem Monitoring zu unterziehen. Es verbleibt an dieser Stelle zu prüfen, ob Änderungen der Monitoring-Strategie Aussicht auf Erfolg versprechen. Eine Strategieänderung kann beispielsweise darin bestehen, den als relevant eingestuften Prozess nicht im operativen Endlagerbereich messtechnisch zu beobachten, sondern in einem gesonderten Teil des Endlagers, der als repräsentativ gilt, aber in dem statt reale Abfallbehälter Dummy-Behälter eingelagert sind. In so einem Testbereich oder Pilotanlage können Einschränkungen von Monitoring-Systemen ganz anders bewertet

und behandelt werden. Bei der Entscheidung zu einer Strategieänderung wäre das Screening-Schema ab dem Punkt **PAR1** erneut zu durchlaufen.

PAR7.

Existieren Parameter, die im Hinblick auf Redundanz und Diversität verzichtbar sind?

Dies ist der finale Schritt im Screening-Ablauf. Hier ist angedacht, nochmal einen Quervergleich aller Parameter durchzuführen, vor allem im Hinblick auf Überlappungen und Robustheit der zu erwartenden Aussagen. Wird bei der Prüfung keiner der Parameter auf die Merkliste gesetzt (**PAR8**), dann existiert eine finale Liste von Parametern (**PAR9**) auf deren Basis dann ein Monitoring-Konzept erstellt werden kann.

4.4 Bestimmung von Monitoring-Parametern am Beispiel eines EB

Um den Screening-Prozess exemplarisch anzuwenden, wurde aus dem ANSICHT-Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD ein bestimmtes Verschlussbauwerk ausgewählt, nämlich der im vorigen Kapitel 4.2 beschriebene Bohrlochverschluss.

4.4.1 Sicherheitsfunktion und Leistungsziele

Jedes Abdichtbauwerk hat im Rahmen des Verfüll- und Verschlusskonzeptes eine eigene Sicherheitsfunktion. Für den Bohrlochverschluss lautet diese:

Sicherheitsfunktion des Bohrlochverschlusses

Der Bohrlochverschluss soll den advektiven Flüssigkeitsstrom in das Bohrloch hinein und aus ihm heraus minimieren.

Mit dieser Sicherheitsfunktion, leistet der Bohrlochverschluss einen wesentlichen Beitrag zur Einhaltung des 'Advektions-Kriteriums', das, basierend auf den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) von Jobmann et al. (2015) quantifiziert wurde, um rechnerische Nachweise zur Barrierenintegrität führen zu können. Im Hinblick auf diese Sicherheitsfunktion, wurden Leistungsziele für das Verschlussbauwerk festgelegt, die notwendig sind, um diese Sicherheitsfunktion zu erfüllen.

Da sich die Rolle des Verschlussbauwerks auf den advektiven Flüssigkeitsstrom bezieht, werden die Leistungsziele in hydraulische und mechanische Ziele unterteilt. Der Verschluss soll eine geringe Permeabilität gegenüber Wasser, aber eine ausreichende Permeabilität gegenüber Gas haben, um eine Rissbildung aufgrund von hohem Gasdruck, der wiederum durch thermische Expansion und Metallkorrosion erzeugt wird, zu verhindern. Aus ersten Berechnungen im Rahmen des ANSICHT-Projektes ist bekannt, dass, wenn alle Verschlüsse, die sich auf kürzester Entfernung vom Einlagerungsbohrloch zur Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) befinden, eine Permeabilität k nach Aufsättigung von weniger als $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ haben, das sogenannte 'Advektionskriterium' eingehalten werden kann. Das bedeutet, dass der advektive Fluss im Streckensystem gering genug ist, um eine Radionuklidfreisetzung über die ewG-Grenze zu verhindern (Jobmann et al. 2017). Das Leistungsziel wird somit wie folgt definiert:

Leistungsziel 1: $k \leq 1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (nach Aufsättigung)

Aus mechanischer Sicht sind die Ziele hauptsächlich auf die Quelldruckentwicklung und die Spannungsentwicklung ausgelegt. Der Quelldruck soll die minimale Hauptspannung im Wirtsgestein nicht übersteigen, um eine Schädigung des Gesteins und damit die Entstehung

neuer Fließpfade in der Nähe des Verschlusses zu vermeiden. Versuchsergebnisse aus dem In-situ-Test zum Schachtverschluss in Salzdetfurth zeigen, dass bei einem eingestellten Quelldruck p_q von ca. 1 MPa für ein Bentonit-Dichtelement eine Permeabilität von $1,0 \cdot 10^{-17} - 7,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ erreicht werden konnte (Engelhardt et al. 2011). Spezifische Prozessanalysen aus dem ANSICHT-Projekt zeigen, dass ein Quelldruck über 1 MPa wahrscheinlich zu Zugspannungen im angrenzenden Gebirge führen würde, mit der Folge, dass das Fließdruck-Kriterium im Wirtsgestein ggf. nicht eingehalten wird. Deshalb wurde folgendes Leistungsziel für den Quelldruck p_q definiert:

$$\text{Leistungsziel 2: } p_q \approx 1 \text{ MPa}$$

Eine Quelldruckbegrenzung ist auch deshalb notwendig, um eine signifikante Verschiebung des Widerlagers zu vermeiden. Eine Überschreitung der Grenze würde zu einer Auflockerung des Bentonit-Elements führen und seine Eigenschaften verändern. Wenn die Auflockerung des Bentonit-Elements weniger als 3% (Volumen) beträgt, verändern sich die Dichte und damit der erreichbare Quelldruck und die damit verbundene Permeabilität nicht wesentlich (Wagner 2005). Werden die 3% überschritten, ist mit einer signifikanten Verringerung des Quelldrucks und einer damit verbundenen Erhöhung der Permeabilität zu rechnen. Die Begrenzung des Quelldrucks kann somit als zusätzliches, ergänzendes Leistungsziel angesehen werden.

$$\text{Leistungsziel 3: } \text{Auflockerung} \leq 3\% \text{ der Dichtelementlänge}$$

Im Rahmen des ANSICHT-Projektes wurde die hydraulische Auswirkung auf das Bentonit-Dichtelement unter Anwendung des Fließdruck-Kriteriums aus Jobmann et al. (2015) abgeschätzt. Dieses Kriterium ist verbunden mit der minimalen Hauptspannung. Zur Analyse der Barrierenintegrität mittels numerischer Berechnungen wurde ein Ansatz verwendet, der gekoppelte thermische, hydraulische und mechanische Prozesse (THM) berücksichtigt. Eine hydraulisch-mechanische Kopplung basiert auf der Anwendung effektiver Spannungen, einem Ansatz, der Terzaghi & Fröhlich (1936) zugeschrieben werden kann. Demzufolge sind die (äußereren) Gesamtspannungen σ^{tot} gleich den effektiven Spannungen σ^{eff} , die auf das Korngefüge einwirken, und sind mit dem Porendruck p über den Biot-Koeffizienten α verbunden:

$$\sigma^{eff} = \sigma^{tot} - \alpha \cdot p \quad (4.1)$$

Positive Spannungswerte werden als Zugspannungen, negative Werte als Druckspannungen angegeben. Allgemein wird das mechanische Verhalten (Spannungs-Dehnungs-Verhalten) über die effektive Spannung ausgedrückt. Sekundäre Wasserpfade, die zu einem Eindringen oder Austreten von potentiell kontaminierten wässrigen Lösungen führen können, sind Makrorisse. Risse können sich bilden, wenn die effektiven Spannungen die Zugspannungen des Wirtsgesteins übersteigen. Wird das Konzept der effektiven Spannungen verwendet, kann die Zugfestigkeit durch mechanische und hydraulische Prozesse oder eine Kombination der beiden erreicht werden. Da die Zugspannung des kompaktierten Bentonit-Materials gleich 0 sein kann, sollte das entsprechende Kriterium die effektive Zugspannung selbst sein. In diesem Fall muss die Hauptspannung des effektiven Spannungstensors mit der höchsten Zugspannung analysiert werden. Die Definition der drei Hauptspannungen:

$$\sigma_I^{eff} \leq \sigma_{II}^{eff} \leq \sigma_{III}^{eff} \quad (4.2)$$

ermöglicht die Beschreibung der Bereiche, in denen effektive Zugspannungen auftreten, mit Hilfe der folgenden Ungleichung:

$$\sigma_{III}^{eff} \geq 0 \quad (4.3)$$

Mit Hilfe des Fluideindruck-Kriteriums kann damit als weiteres Leistungsziel die Abwesenheit von Zugspannungen formuliert werden:

Leistungsziel 4: $\sigma_{III}^{eff} = \sigma_{III} - p \geq 0$ (frei von Zugspannungen)

Der Quelldruck des Bentonits liefert einen wesentlichen Beitrag zu σ_{III} . Zusätzliche Druckbeiträge entstehen durch Eigengewicht, Deckgebirgsdruck und den strömungsinduzierten Druck. Das bedeutet, dass die Wärmefbelastung eines Einlagerungsbohrlochs und seines Verschlusses so ausgelegt sein muss, dass das Bentonit-Dichtelement frei von Zugspannungen ist.

4.4.2 Ermittlung einwirkender Prozesse

Im nächsten Schritt müssen für die zu betrachtende geotechnische Barriere (Bohrlochverschluss) zunächst die für diese Komponente relevanten Prozesse identifiziert werden. Dies ist der Punkt, an dem eine Verbindung zwischen dem zu entwickelnden Monitoring-Konzept, den definierten Leistungszielen und dem standortspezifischen FEP-Katalog hergestellt wird. Im Rahmen des ANSICHT-Projektes wurden zwei standortspezifische FEP-Kataloge für unterschiedliche Regionen in Deutschland und unterschiedlichen Endlagerkonzepten entwickelt (Stark et al. 2014, 2016). Diese FEP-Kataloge stellen eine umfassende Systembeschreibung dar, in der alle Endlagerkomponenten sowie alle Prozesse, die im Endlager und darum herum ablaufen, aufgelistet und beschrieben sind, inklusive einer Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Prozesses.

Basierend auf diesen FEP-Katalogen können Analysen der erwarteten und alternativen Endlagerentwicklungen durchgeführt werden. Diese Kataloge beschreiben u. a. Prozesse, die im Zusammenhang mit den einzelnen geotechnischen Barrieren stehen. Für das hier beschriebene Beispiel ist der FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD (Stark et al. 2014) relevant. Tab. 4.1 gibt einen Überblick über die FEP, die im Zusammenhang mit dem Bohrlochverschluss stehen.

Tab. 4.1: Liste der FEP, die im Zusammenhang mit dem Bohrlochverschluss stehen (aus Stark et al. 2014)

FEP-Nr.	FEP-Name	Anmerkungen
29	Verschlussmaterial	Beschreibt die Materialeigenschaften der Verschlussbauwerke.
35	Alteration von Verschlussbauwerken	Die Alteration von Verschlussbauwerken beschreibt die Beeinflussung der Funktion der Verschlussbauwerke durch veränderte (bio- und hydro-) chemische sowie thermische Umgebungsbedingungen über die Zeit.
40	Konvergenz	Verändert die Einspannung des Bohrlochverschlusses.
41	Fluideindruck	Wirkt als mechanische Last und verursacht Fluidströmung.
44	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Quellen und Schrumpfen von Betonen kann zu geringen Volumenveränderungen an Widerlagern führen.
47	Kanalisation in Dichtelementen	Bei diesem Prozess können sich bevorzugte Fließwege im Dichtkörper ausbilden.
49	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralien	Durch Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen können sich die Eigenschaften des Verschlussmaterials verändern. Der Quelldruck wirkt als mechanische Last auf das Widerlager.
51	Auflösung und Ausfällung	Durch Auflöse- und Ausfällungsprozesse kann Phasenbestand und Eigenschaften des Abdichtmaterials verändert werden.

55	Korrosion von Materialien mit Zementphasen	Durch Korrosion der Zementphasen im Beton kann die Eigenschaft eines Widerlagers geändert werden.
57	Alteration von Tonmineralen	Durch Alteration von Tonmineralen können Quell- und Sorptionseigenschaft verändert werden.
58	Alteration von sonstigen Materialien	Alteration von sonstigen Materialien können petrophysikalische Eigenschaften des Baumaterial verändert werden.
60	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	Durch mikrobielle Prozesse können die Eigenschaft des Baumaterial verändert werden.
61	Thermische Expansion oder Kontraktion	Verändern die von innen und außen einwirkenden Druckverhältnisse.
62	Phasenübergänge	Trocknungsprozesse können die Material- und Quelleigenschaften verändern.
68	Strahlungsinduzierte Aktivierung	Baumaterialien können aktiviert werden.
70	Radiolyse	Die behälternahen Feststoffe können von Radiolyse betroffen sein.
76	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (impliziert Erdbeben)	Charakterisieren mechanische Lasten auf die Bauwerkskomponenten.
93	Kolloidbildung, -transport und -filtration	Verschlussbauwerke können aufgrund von Kolloidbildung einem Masseverlust unterliegen.

Als nächster Schritt muss diese spezifische FEP-Liste mit den oben genannten Leistungszielen für den Bohrlochverschluss verknüpft werden (Abb. 4.8), um die Prozessabläufe zu identifizieren, die das Erreichen der Leistungsziele in Frage stellen könnten und somit für ein Monitoring in Frage kämen. Insgesamt wurden zehn relevante Prozessabläufe identifiziert, die hinsichtlich der Erreichbarkeit der Leistungsziele zu bewerten sind. Diese sind in der grauen Tabelle in Abb. 4.8 zusammengestellt, wobei in der letzten Spalte die FEP aufgelistet sind, die mit den Prozessabläufen verknüpft sind. Diese zehn Prozesse werden dann als Input für den Parameter-Screening-Prozess verwendet.

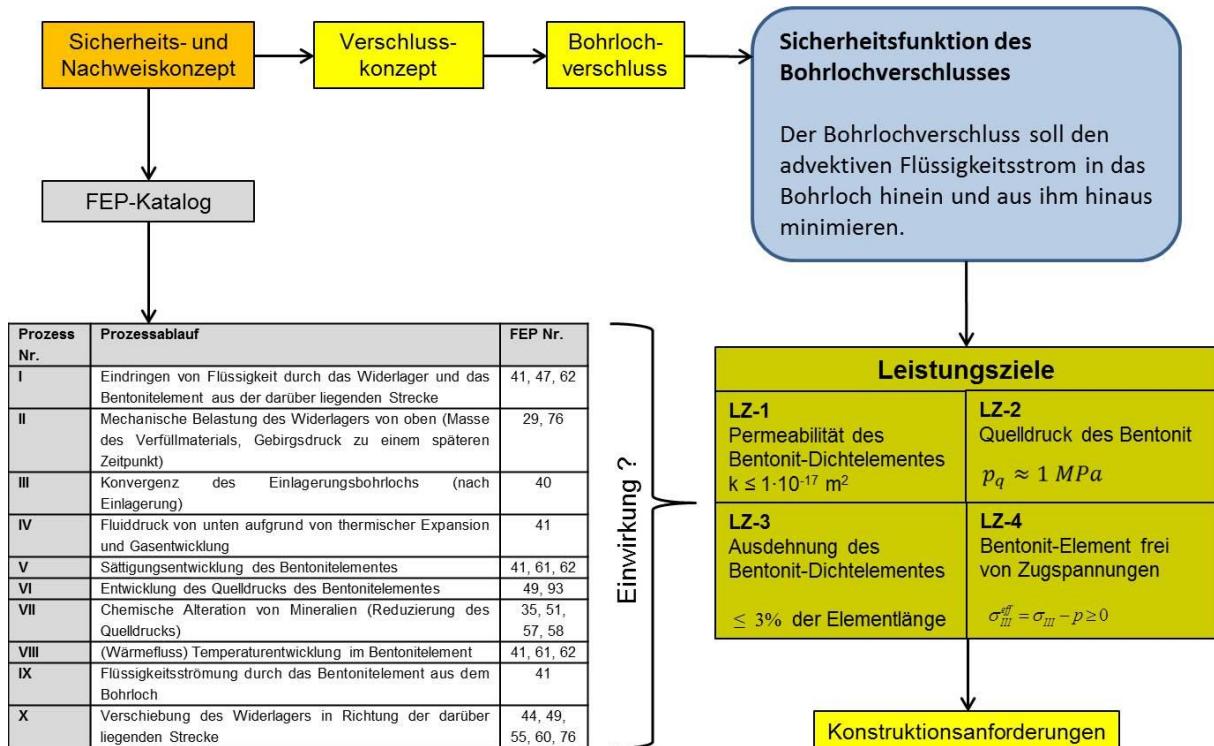


Abb. 4.8: Zusammenhang zwischen im FEP-Katalog identifizierten Prozessen und den Leistungszielen einer geotechnischen Barriere

4.4.3 Screening zur Parameter-Identifizierung

Im Folgenden werden die im vorigen Kapitel identifizierten Prozesse als Eingangsgrößen für das in Abb. 4.7 gezeigte Screening-Schema verwendet. Das heißt, die Box **PRO1** (Start) besteht aus der in Abb. 4.8 gezeigten Tabelle mit den darin aufgeführten 10 Prozessen. Die einzelnen Schritte des Screenings werden mit allen 10 Prozessen gleichzeitig durchlaufen.

Die Frage in Box **PRO2** wurde nicht direkt beantwortet, sondern es wurden die vier unterstützenden Fragen PRO2.1 bis PRO2.4 zur Beantwortung der Hauptfrage genutzt. Die Antworten zu den unterstützenden Fragen sind in Tab. 4.2 in Form einer Prozess-Frage-Matrix dargestellt. Für die Beantwortung der Hauptfrage wurde als Kriterium verwendet, dass wenn mindestens eine der Hilfsfragen mit „ja“ zu beantworten ist, dann wird auch die Hauptfrage mit „ja“ beantwortet, andernfalls mit „nein“.

Unter Anwendung dieses „ein-ja“ Kriteriums wurden neun der zehn Prozesse mit einem „ja“ im Hinblick auf die Hauptfrage PRO2 versehen. Nur für den Prozess III wurden alle Hilfsfragen mit „nein“ beantwortet. Der Prozess ist nicht direkt mit der Sicherheitsfunktion verbunden (PRO2.1), da er in erster Linie zu einer Druckänderung führt und diese bereits direkt mit anderen Prozessen (II, IV, VI) verbunden sind. Die Antwort zu PRO2.2 kann analog gegeben werden, da die Leistungsziele mit der Druckentwicklung verbunden sind.

Tab. 4.2: Prozess-Frage-Matrix mit Antworten zu jedem der 10 Prozesse

Prozess Frage \	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
PRO2.	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Hilfsfragen										
PRO2.1	ja	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein	ja	nein
PRO2.2	ja LZ-2	ja LZ-3	nein	ja LZ-4	ja LZ-1 LZ-2	ja LZ-2	ja LZ-2	ja LZ-4	ja LZ-1	ja LZ-3
PRO2.3	nein	nein	nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja	nein
PRO2.4	nein	nein	nein	ja +VI	nein	nein	nein	ja +IV	ja +IV+X	nein

Die Bohrlochkonvergenz ist keine Primärvariable im Rahmen von Sicherheitsanalysen (PRO2.3). Diese Analysen simulieren die Spannungs- und Porendruckentwicklung sowie Fluidmigration und Radionuklidtransport als primäre Prozesse, die zu einer Risikobewertung führen. Die Hilfsfrage PRO2.4 bekommt auch ein „nein“, da der Teil des Bohrloches direkt nach der Auffahrung mit einem metallischen Liner versehen wird. Dieser Liner wird so ausgelegt, dass er der zu erwartenden Belastung durch Gebirgsdruck für mindestens 500 Jahre standhält. Nur der Teil des Bohrloches, in dem das Bentonit-Dichtelement platziert wird, enthält keinen Liner, um einen direkten Gebirgskontakt zu Abdichtzwecken zu gewährleisten. Der Quelldruck des Bentonit wirkt ähnlich stützend auf das Bohrloch wie der Liner. D. h., die Möglichkeit und damit eine Entscheidung zu einer Rückholung hängt nicht von der Konvergenz des Bohrloches ab.

Für das gewählte Anwendungsbeispiel bedeutet das, dass der Prozess III mit entsprechender Begründung auf die Merkliste (**PRO3**) gesetzt wird.

Im folgenden Schritt **PRO4** wurden zur Beantwortung der Frage erneut die zugehörigen Hilfsfragen (PRO4.1 bis PRO4.8) für jeden der neun verbliebenen Prozesse herangezogen. Auch bei diesen Hilfsfragen wurde wieder das „ein-ja“ Kriterium angewendet, allerdings mit Ausnahme der Unterfrage PRO4.8. Würde nur diese Frage als einzige ein „ja“ bekommen hieße das, dass ein Monitoring dieses Prozess nur durchgeführt würde, weil es messbare Veränderungen gibt. Eine Relevanz für das Nachweiskonzept ist aber nicht gegeben.

Nur weil man etwas messen kann, muss es nicht gemessen werden. Die Antworten zu den Hilfsfragen wurden wieder in Form einer Prozess-Frage-Matrix gegeben.

Tab. 4.3: Prozess-Frage-Matrix mit Antworten zu jedem der 9 verbliebenen Prozesse

Prozess Frage \ Hilfsfragen	I	II	III Merkliste	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
PRO4.	ja	ja		ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Hilfsfragen										
PRO4.1	ja	nein		ja	ja	nein	nein	nein	ja	nein
PRO4.2	ja	ja		ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
PRO4.3	nein	nein		ja	ja	ja	nein	nein	ja	ja
PRO4.4	nein	nein		ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
PRO4.5	nein	nein		nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein
PRO4.6	ja	ja		ja	ja	ja	nein	ja	ja	nein
PRO4.7	ja	nein		nein						
Unterfrage PRO4.8	ja	ja		ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja

Der wesentliche Grund warum der Prozess VII in allen Fragen ein „nein“ bekommen hat ist die geringe Reaktionskinetik für Mineralumwandlungen. Unter den anzunehmenden Verhältnissen werden selbst bei einer Monitoring-Periode von 100 Jahren kaum Veränderungen erkennbar sein. Der Prozess wird daher auf die Merkliste (**PRO3**) gesetzt.

Nach dem Durchlaufen der bisher beantworteten Punkte **PRO2 – PRO4** wurden zwei der anfänglich vorhandenen zehn Prozesse auf die Merkliste gesetzt und können zu einem späteren Zeitpunkt erneut überprüft werden. Die verbliebenen 8 Prozesse werden in den Punkt **PRO5** übertragen. In diesem Schritt werden Parameter benannt, anhand derer die Prozesse in ihrem Verlauf charakterisiert werden können.

Die Prozesse I und IX behandeln den Strömungsprozess innerhalb des Abdichtbauwerkes in beiden Richtungen, zum Behälter hin und vom Behälter weg. Der entscheidende Parameter, anhand dessen der Prozess in beiden Fällen charakterisiert werden kann, ist die *Strömungsgeschwindigkeit*. Der Prozess II beschreibt die sich verändernde mechanische Belastung des Widerlagers von oben. Dieser Prozess lässt sich durch die vertikale Komponente des *Totaldruckes* charakterisieren. Der Druck, der durch thermische Expansion der Materialien und durch Gasbildung im Bereich der Behälter und des Liners entsteht, kann durch den *Porendruck* beschrieben werden.

Die nächsten beiden Prozesse sind direkt an das Bentonit-Dichtelement gekoppelt und beschreiben den Verlauf der Aufsättigung (Prozess V) und den Prozess des Quellens des Bentonit (Prozess VI). Die entsprechenden Parameter sind der *Sättigungsgrad* und der *Quendruck*. Der durch die radioaktiven Abfälle induzierte Wärmestrom (Prozess VIII) lässt sich durch die Temperatur beschreiben. Der letzte als relevant identifizierte Prozess beschreibt die mögliche Bewegung des Widerlagers als Folge des Druckes aus Richtung des Dichtelementes erzeugt durch thermische Expansion, Gasbildung und Quellen des Bentonits. Der Parameter mit dem dieser Prozess beobachtet werden kann, ist die *vertikale Verschiebung*.

Tab. 4.4 zeigt die identifizierten Parameter im Überblick. Die Parameter *Permeabilität*, *Porendruck* und *Totaldruck(vertikal)* tauchen mehrfach auf, sodass insgesamt 7 verschiedene Parameter den Prozessen zugeordnet werden können.

Tab. 4.4: Prozess-Parameter-Matrix für das Monitoring eines Bohrlochverschlusses

Prozess Parameter	I	II	IV	V	VI	VIII	IX	X
1	Strömungsgeschwindigkeit						Strömungsgeschwindigkeit	
2		Vertikaler Druck						Vertikaler Druck
3			Porendruck					
4				Sättigung				
5					Quelldruck			
6						Temperatur		
7								Vertikale Verschiebung

Im folgenden Schritt **PAR1** werden die Optionen zur messtechnischen Erfassung der jeweiligen Parameter identifiziert. Jede Option besteht aus einer übergeordneten Monitoring-Strategie (z. B. ob das Monitoring des Parameters in-situ im realen Endlager oder in einer Versuchsanlage erfolgen soll und welche Endlagerkomponenten beteiligt sein sollen) und einer Technologie, also einer physikalischen Methode zur messtechnischen Beobachtung des Parameters. Die Wahl der Monitoring-Strategie spiegelt die Sicherheitsstrategie wider, unter der das Monitoring-Programm entwickelt wird. Es wird angenommen, dass in dieser Phase nicht alle vorhandenen Strategieoptionen sondern eine Auswahl von bevorzugten Optionen identifiziert und bewertet wird.

Die übergeordnete Monitoring-Strategie umfasst das Monitoring von Dummy-Einlagerungsbohrlöchern und entsprechenden Dummy-Abdichtbauwerken, von Monitoring-Bohrlöchern, ein Opfer-Bohrloch und das Monitoring von Abdichtbauwerken in den Strecken und Schächten des Endlagerbergwerkes (vgl. Kap. 5). Ein Verlegen des Monitoring in eine separaten, vom eigentlichen Endlager getrennten, Versuchsanlage ist nicht vorgesehen. Für das Monitoring eines Verschlussbauwerkes wurden zudem folgende Prämissen vorgegeben:

Prämissen	Folgen
1 Entlang der Achse von Lösungsflüssen dürfen keine Kabel durch ein Dichtelement verlaufen.	Drahtlose Übertragungssysteme im Bereich der Verschlussbauwerke sind unerlässlich.
2 Die Anzahl von Verdrahtungen zwischen Sensoren innerhalb eines Dichtelements ist so gering wie möglich zu halten.	Bevorzugung von autonomen Sensoren, besonders bei der Stromversorgung und Datenübertragung.
3 Sensoren sollen innerhalb eines Dichtelements nicht gleichmäßig verteilt sein.	Einsatz getrennt voneinander angeordneter Messhorizonte ist vorzusehen.
4 Die Anzahl an Sensoren innerhalb eines Dichtelements soll so gering wie möglich gehalten werden.	Soweit möglich ist der Einsatz von Multi-Parametersensoren zu bevorzugen.

Hinsichtlich der ersten Prämisse ist es notwendig, Systeme für drahtlose Datenübertragung zu verwenden. Basierend auf den Erfahrungen aus dem MODERN-Projekt, sollten drahtlose Systeme in einem Dichtelement elektromagnetische Hochfrequenztechnologie verwenden (Bárcena et al. 2013, NDA et al. 2013b). Beim Einsatz dieser Hochfrequenzsysteme muss allerdings ihre begrenzte Übertragungsreichweite berücksichtigt werden. Deshalb wird empfohlen, ein System zu verwenden, das Relaisstationen für die Überbrückung langer Strecken einsetzt. Bezüglich der Sensorik kann mit Blick auf Tab. 4.4 sowie auf den Statusbericht zur Monitoring-Technologie (AITEMIN et al. 2013) festgestellt werden, dass zur Messung der dort angegebenen Parameter eine Reihe von Sensoren basierend auf ggf. unter-

schiedlichen Messprinzipien existieren. Eine Ausnahme bildet der erste Parameter *Strömungsgeschwindigkeit*, der die Prozesse I und IX charakterisiert (Tab. 4.4). Eine Reihe von Technologieoptionen steht für In-situ-Strömungsmessungen zur Verfügung, die allerdings in erster Linie Bohrlochmessungen betreffen. Eine Messung der Darcy-Geschwindigkeit oder Strömungsrate durch ein großes Bentonit-Element ohne Zugang zum Abfluss scheint nicht möglich zu sein. Aus diesem Grund wurde eine neue Option herangezogen, um indirekte Informationen über die Strömungsgeschwindigkeit zu erhalten. Unter Anwendung des Darcy-Gesetzes kann der spezifische Durchfluss wie folgt berechnet werden (Lege et al. 1996):

$$q = k_f \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (4.4)$$

mit k_f = hydraulische Leitfähigkeit, Δp = Druckgradient und l = Länge des Dichtelementes.

Für den Widerlagerteil des Verschlusses kann angenommen werden, dass die Permeabilität und damit die hydraulische Leitfähigkeit des Elements durch Anwendung einer geeigneten Rezeptur mit ausreichender Genauigkeit ausgelegt werden kann. Ein derartiges Rezepturdesign ist ein Standardverfahren bei der Herstellung von z. B. Fahrbahnbeton, der mit einer bestimmten hydraulischen Leitfähigkeit ausgelegt wird, damit ein ausreichender Regenwasserablauf gewährleistet ist. Für die Betonauslegung ist ausreichend Wissen vorhanden (z. B. Schneider et al. 2012, McCain & Dewoolkar 2010, Kalinski & Yerra 2005, Batezini & Balbo 2015, Pease 2010). Wenn die hydraulische Leitfähigkeit Priorität hat, muss die Porendruckdifferenz ermittelt werden, damit ein spezifischer Ablauf berechnet werden kann. Dies bedeutet, dass der Porendruck der Parameter ist, der am oberen und unteren Ende des Widerlagers überwacht werden muss, damit die Strömungsgeschwindigkeit für die Prozesse I und IX berechnet werden kann.

Für die Anwendung dieser Methode müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

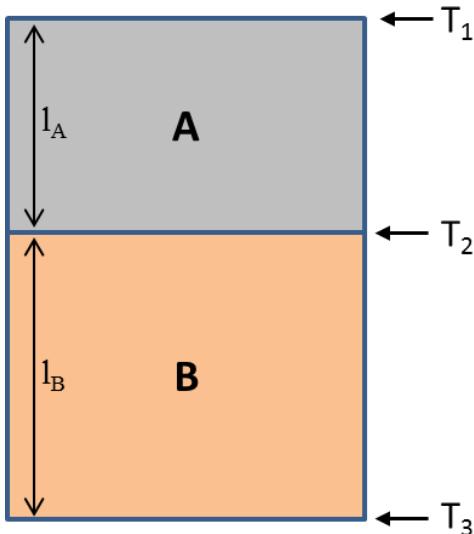
- Anwendbarkeit des Darcy-Gesetzes
- isotherme Bedingungen
- das Medium ist mit Wasser aufgesättigt
- die Strömung erfolgt in Richtung des Porendruckgradienten ohne seitliche Verluste
- stationäre Druckbedingungen

Da das System eine gewisse Zeit benötigt, um stationäre Druckbedingungen zu erreichen, wird es einen bestimmten Zeitraum nach Einbau des Verschlusses geben, in dem diese Methode keine korrekten Ergebnisse liefern wird. Dies stellt keine wirkliche Einschränkung dar, da eines der Leistungsziele des Bentonit-Elements unterhalb des Widerlagers langfristig ein niedriger Permeabilitätswert und damit eine geringe Fließgeschwindigkeit nach Aufsättigung ist. Das Monitoring der Langzeit-Fließgeschwindigkeit würde einen wesentlichen Input für den Sicherheitsnachweis liefern.

Für das Bentonit-Element lässt sich diese Methode jedoch nur schwer anwenden, da die Permeabilität des Bentonits nach Aufsättigung und Aufquellen nicht so präzise geplant werden kann wie für das Betonwiderlager. Dies bedeutet, dass man zunächst die hydraulische Leitfähigkeit des Elementes nach Aufsättigung ermitteln muss. Hierzu kann das Analogon zwischen Flüssigkeitsstrom und Wärmestrom herangezogen werden. Die Wärmeflussdichte q durch ein Element kann mittels Gleichung 4.5 berechnet werden, die Gleichung 4.4 ähnlich ist.

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{l} \quad (4.5)$$

mit λ = thermische Leitfähigkeit, ΔT = Temperaturgradient, und l = Länge des Elements.



Ein gängiges Verfahren zur Messung der thermischen Leitfähigkeit einer Probe ist die sogenannte "Divided-bar"-Methode (Militzer & Weber 1985). Der Wärmefluss durch eine Probe mit bekannter thermischer Leitfähigkeit, der Standardprobe A, wird mit dem Wärmefluss durch eine Probe mit unbekannter thermischen Leitfähigkeit (Material B) verglichen. Dies ist in Abb. 4.9 dargestellt.

Abb. 4.9:

Grundlegender Aufbau eines "Divided-bar"-Systems zur Messung der thermischen Leitfähigkeit einer Probe ($T_3 > T_2 > T_1 = \text{Temperaturen}$)

Unter stationären Bedingungen ist die Wärmeflussdichte in beiden Materialien gleich. Das bedeutet, Gleichung (4.5) kann auf beide Materialien angewandt und als gleichwertig erachtet werden.

$$q_A = \lambda_A \cdot \frac{\Delta T_A}{l_A} = q_B = \lambda_B \cdot \frac{\Delta T_B}{l_B} \quad (4.7)$$

Die Auflösung der Gleichung nach λ_B ergibt

$$\lambda_B = \lambda_A \cdot \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} \cdot \frac{l_B}{l_A} \quad (4.8)$$

mit $\Delta T_A = T_2 - T_1$ und $\Delta T_B = T_3 - T_2$

Analog dazu kann die hydraulische Leitfähigkeit ebenso mit der "Divided-bar"-Methode unter Verwendung von Gleichung 4.4 und den Porendruckdifferenzen geschätzt werden.

$$k_{fB} = k_{fA} \cdot \frac{\Delta p_A}{\Delta p_B} \cdot \frac{l_B}{l_A} \quad (4.9)$$

mit $\Delta p_A = p_2 - p_1$ und $\Delta p_B = p_3 - p_2$

Es muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass dies keine präzise Methode zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit eines Elements ist. Sie erlaubt jedoch eine gute Einschätzung, ob die per Design geforderte hydraulische Leitfähigkeit und damit auch das Leistungsziel 1 langfristig erreicht werden kann, wenn nur die *Porendruckgradienten* messtechnisch erfasst wird. Es muss auch darauf hingewiesen werden, dass es einen Temperaturgradienten entlang des Bentonit-Elementes geben wird, der laut Berechnungen im Bereich von ungefähr 20°C nach Aufsättigung liegen wird. Wird ein Mittelwert der Temperatur in diesem Bereich verwendet, ist die Unsicherheit hinsichtlich einer korrekten Berechnung der Dichte und dynamischen Viskosität der Flüssigkeit gering und akzeptabel.

Nach den strategischen Überlegungen und der Auswahl von Technologieoptionen steht im Schritt **PAR2** nun die Aufgabe an, die Entwicklung jedes Parameters über den geplanten Monitoring-Zeitraum zu simulieren. Das ist notwendig, um Prognosen über den Verlauf der Parameter-Werte über den Monitoring-Zeitraum zu erhalten und um die Anforderungen an die vorgesehenen Systeme zum Monitoring der Parameter zu erhalten. Dies ist notwendig, um abzuschätzen, ob die möglichen Optionen für ein Monitoring des Parameters geeignet sind, z. B. zum Verständnis, ob die verfügbare Technologie die Bandbreite der möglichen Änderungen über den Monitoring-Zeitraum mit ausreichender Präzision und Zuverlässigkeit

messtechnisch erfassen kann. Zu beachten ist, dass Prognosen in den meisten Fällen mit Unsicherheiten verbunden sind, die quantifiziert werden müssen, um sicherzustellen, dass die Reaktionen auf die Messdaten angemessen sind.

Beispielhaft wurde die Entwicklung des Bohrlochverschlusses simuliert und die zeitlich Entwicklung der in Tab. 4.4 als relevant aufgelisteten Parameter ermittelt. Das dazu verwendete Modell und die Ergebnisse sind im Anhang A1 beschrieben. Somit stehen die Erwartungswerte für die Parameter fest und können später mit den Monitoring-Ergebnissen verglichen und bewertet werden. Eine Beispielhafte Erläuterung wie dies geschehen kann wird in Kapitel 6.2 gegeben, das beschreibt, wie Monitoring-Ergebnisse verwendet und bewertet werden können.

Nachdem nun sowohl Strategieoptionen als auch Technologieoptionen für ein Monitoring identifiziert sowie Erwartungswerte für die relevanten Parameter ermittelt wurden, erfolgt eine Prüfung, ob die gewählten Optionen technisch realisierbar sind (**TEC1**).

Hinsichtlich der Technologie wurde der Bericht aus dem MODERN-Projekt (AITEMIN et al. 2013) verwendet, um zu prüfen, ob geeignete Sensor- und Datenübertragungssysteme zur Verfügung stehen, mit deren Hilfe ein Monitoring des Bohrlochverschlusses möglich ist. Spezifische Sensoren wurden allerdings noch nicht ausgewählt. In den Sicherheitsanforderungen ist festgelegt, dass alle verwendeten technischen Systeme dem neuesten Stand der Technik entsprechen müssen. Da bis zur Installation von Sensoren noch einige Jahre vergehen werden, wurde die Auswahl verschoben. Anstatt also derzeitig verfügbare Sensoren zu beschreiben, werden die Anforderungen hinsichtlich Messbereich, Genauigkeit, Auflösung und Temperaturbereich (Tab. 4.5) sowie die empfohlenen minimalen Messfrequenzen (Tab. 4.6) für alle potenziellen Sensoren angegeben. Die Beschreibung basiert auf der Simulation des Systemverhaltens des Bohrlochverschlusses während der ersten 150 Jahre (vgl. Anhang A1).

Tab. 4.5: Spezifikationen von Sensorsystemen für Bohrlochverschlüsse

Parameter	Bereich	Genauigkeit	Auflösung	Temperaturbereich
Temperatur	20 – 100°C	0,1 K	0,01 K	20 bis 90°C
Vertikaldruck	0,1 – 10 MPa	0,1 MPa	0,01 MPa	20 bis 90°C
Radialdruck	0,1 – 10 MPa	0,1 MPa	0,01 MPa	20 bis 90°C
Porendruck	0,1 – 10 MPa	0,1 MPa	0,01 MPa	20 bis 90°C
Verschiebung	-10 bis +30 cm	0,1 cm	0,01 cm	20 bis 90°C
Wassergehalt	0 – 100% (volle Sättigung)	± 5%	± 1%	20 bis 90°C

Tab. 4.6: Empfohlene minimale Messfrequenzen (h=Stunden, d=Tag, m=Monate)

Parameter	Tag 1 bis 30 (Messung / Zeit-einheit)	Tag 31 bis 365 (Messung / Zeit-einheit)	Jahr 2 bis 10 (Messung / Zeit-einheit)	Jahr 11 bis 100 (Messung / Zeit-einheit)
Temperatur	1 / h	1 / d	4 / m	1 / m
Vertikaldruck	1 / h	1 / d	4 / m	1 / m
Radialdruck	1 / h	1 / d	4 / m	1 / m
Porendruck	1 / h	1 / d	4 / m	1 / m
Verschiebung	1 / h	1 / d	4 / m	1 / m
Wassergehalt	1 / h	1 / d	4 / m	1 / m

Werden diese Anforderungen mit den Zusammenstellungen des Statusberichtes zu Monitoring-Technologien (AITEMIN et al. 2013) verglichen, so kann festgestellt werden, dass Sys-

teme verfügbar sind, die diesen Anforderungen entsprechen. Die technische Machbarkeit ist also gegeben.

Die Frage, die im Bereich der Technologie noch geklärt werden muss, ist, inwieweit die Implementierung der erforderlichen Messtechnik eine beeinträchtigende Wirkung auf das Abdichtverhalten der Barriere hat (**TEC3**). In diesem Zusammenhang kann grundsätzlich zwischen tomographischen und damit nicht invasiven räumlich integral arbeitenden Systemen und punktbasierten invasiven Sensoren unterschieden werden.

Tomographisch arbeitende Systeme erscheinen zwar auf den ersten Blick besser geeignet zu sein als punktbasierte Sensoren, aber ihre Implementierung ist problematisch. Nach derzeitiger Kenntnis sind tomographische Systeme darauf angewiesen, das zu betrachtende Objekt von mehreren Seiten mit elektromagnetischen Wellen zu durchdringen. Im Falle von Dichtelementen wären somit Bohrungen parallel zum Dichtbauwerk notwendig. Solche Bohrungen bieten aber die Gefahr, dass Dichtelemente umlaufen werden. Sie wären also kontraproduktiv. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf den Einsatz tomographischer Systeme zugunsten punktbasierter Sensoren verzichtet. Diese Technologie wird für eine spätere Neu-Evaluierung auf die Merkliste gesetzt (**TEC2**).

Punktbasierte Sensoren, die innerhalb einer Barriere implementiert sind, stellen auch Schwachpunkte dar. Die oben genannten Prämissen wurden aufgestellt, um diese Schwächungen so gering wie möglich zu halten. Es wird davon ausgegangen, dass das konsequente Umsetzen dieser Prämissen und der damit verbundenen Konsequenzen eine Implementierung der Messtechnik akzeptabel macht.

Auf der Parameter-Ebene kann die anschließende Frage (**PAR3**) für alle Parameter gemäß Tab. 4.4 bejaht werden, so dass dann auf der Prozess-Ebene die Frage **PRO6** zu beantworten ist. Anhand dieser Frage kann dann geklärt werden, ob ausreichend Parameter, deren Monitoring als machbar eingestuft wurde, gefunden wurden, um die als relevant identifizierten Prozesse in ihrem zeitlichen Verlauf adäquat zu charakterisieren. Auch diese Frage kann bejaht und die Parameter auf die Monitoring-Liste gesetzt werden. Die abschließende Frage **PAR7** wird für das betrachtete Beispiel des Bohrlochverschlusses verneint, so dass die Monitoring-Liste für dieses Abdichtbauwerk in ein Monitoring-Konzept umgesetzt werden kann.

5 Monitoring-Konzept für ein Endlager im Tonstein

Die Motivation für das Endlagermonitoring und speziell für das Monitoring des geotechnischen Barrierensystems ist es, kontinuierlich Information über die Entwicklung wichtiger Endlagerkomponenten zu erhalten. Im Falle von Ton oder Salz als Wirtsgestein stellen diese Gesteine die Hauptbarriere für die Radionuklidmigration dar. Aber selbst das beste Wirtsgestein kann die Einschlussanforderungen nicht erfüllen, wenn die künstlichen Zugangswege zu den untertägigen Einrichtungen nicht geeignet verschlossen sind. In den Schächten und untertägigen Strecken müssen geotechnische Barrieren eingebracht werden, die in der Lage sind, die Einschlussanforderungen auf ähnliche Weise wie das Wirtsgestein selbst zu erfüllen. Endlagermonitoring wird als Werkzeug angesehen, das – soweit wie möglich – Informationen darüber liefern soll, ob die Einschlussanforderungen erfüllt werden können.

Angestoßen von der Sicherheitsrichtlinie SSG-14 (vgl. Kap. 2.7) der IAEA (IAEA 2011b) und dem Abschlussbericht der Endlagerkommission (Endlagerkommission 2016) wird seit einiger Zeit ein Monitoring auch als integraler Bestandteil von Sicherheits- und Nachweiskonzepten angesehen (Jobmann et al. 2019). So wird ein Monitoring als ein Hilfsmittel angesehen, mögliche Fehlentwicklungen des Endlagers oder speziell auch einzelner Endlagerkomponenten frühzeitig zu erkennen, um so Fehlerkorrekturen zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang werden die übergeordneten Ziele, die durch ein geeignetes Monitoring erreicht werden sollen, wie folgt definiert:

- Das Monitoring-Konzept muss in Einklang mit den geltenden deutschen rechtlichen Rahmenbedingungen stehen.
- Das Konzept soll auf dem 'Monitoring-Workflow' basieren, der während des Europäischen MoDeRn-Projektes entwickelt wurde (MODERN 2013b).
- Das Konzept soll – so weit es geht – die Verifizierung ermöglichen, ob die definierten Leistungsziele (Performance Targets, PT) für die geotechnischen Barrieren erreicht werden.
- Das Konzept soll – so weit es geht – die Verifizierung ermöglichen, dass die Integrität des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) nicht gefährdet ist.
- Das Monitoring-Konzept soll als "Prozess-Konzept" entwickelt werden, das ausdrücklich Lerneffekte und entsprechende Adaptionen während der gesamten Betriebsphase beinhaltet. Das "Prozess-Konzept" soll durch Meilensteine strukturiert sein.
- Die Monitoring-Ergebnisse sollen als grundlegende Informationen in Entscheidungsabläufe einbezogen werden, z. B.
 - für den sukzessiven Einbau von neuen Dichtelementen und die entsprechend zu installierenden Monitoring-Systeme
 - im Zusammenhang mit eventuell einzuschiebenden Beobachtungs- oder Wartephassen und der Entscheidung zur Fortsetzung der Einlagerung
- Das Monitoring-Konzept soll so ausgelegt sein, dass es – unter Berücksichtigung des Einlagerungskonzeptes oder der Einlagerungsreihenfolge – bereits während der Betriebsphase möglich ist, Möglichkeiten und Einschränkungen von Monitoring in der Nachbetriebsphase einzuschätzen.
- Das Monitoring-Konzept soll als inhärenter Bestandteil eines 'Safety Case' entwickelt werden und nicht losgelöst davon.
- Das Monitoring-Konzept soll mindestens alle 10 Jahre parallel zur Überarbeitung des 'Safety Case' re-evaluiert und ggf. aktualisiert werden.

Ein spezifischer Aspekt, der berücksichtigt werden muss, um die Dauer des Monitoring zu ermitteln, ist die Entwicklung des Endlagers. Das Monitoring-Programm ist als kontinuierlicher Lernprozess zu verstehen, der für die Sammlung von Informationen genutzt werden soll, die dem Endlagerbetreiber, der Regulierungsbehörde und zukünftigen Generationen dabei helfen soll, Entscheidungen im Verlauf der Endlagerentwicklung zu treffen. Um ein

Monitoring-Programm erfolgreich in ein Endlager implementieren zu können, muss ein Lern- oder Prozess-Konzept als Teil des Monitoring-Programms definiert und entwickelt werden. Dieses muss alle notwendigen Maßnahmen zur Sammlung, zur Bewertung, zum Transfer und zur Implementierung der gewonnenen Erkenntnisse beinhalten, die mit den Monitoring-Aktivitäten in Zusammenhang stehen.

5.1 Generelles Konzept

Für die Entwicklung eines Monitoring-Konzepts ist grundsätzlich die Auswahl repräsentativer Komponenten des Endlagers für Monitoring-Zwecke notwendig. Der empfohlene Ansatz für die Implementierung eines Monitoring-Programms in einem Endlager ist, zunächst spezifische Einlagerungsfelder, spezifische Einlagerungsbohrlöcher und spezifische Verschlussbauwerke (hier: Streckenverschluss) mit Monitoring-Systemen auszurüsten und Monitoringtätigkeiten durchzuführen. Diese spezifischen Komponenten werden als 'Monitoring-Felder' (MF), 'Monitoring-Bohrlöcher' (MB) und 'Monitoring-Streckenverschlüsse' (MS) bezeichnet. Die Erfahrungen, die aus den anfänglichen Monitoringtätigkeiten in den ersten MF, MB und MS gewonnen werden, ermöglichen eine Verfeinerung des Wissens des Betreibers hinsichtlich der Implementierung und Bewertung des Monitoring-Systems (z.B. hinsichtlich Beständigkeit, geeigneter Messpunkte, Zuverlässigkeit usw.), hinsichtlich der Analyse und Auswertung der gewonnenen Daten und hinsichtlich des Verständnisses des Verhaltens des Endlagers und seiner Barrieren. Die Ergebnisse sollen regelmäßig von den zuständigen Mitarbeitern und Institutionen analysiert werden. Die Auswertungsergebnisse sollen dazu verwendet werden, die Qualität des Monitoring-Systems und seiner Implementierung in den nächsten für das Monitoring ausgewählten Endlagerkomponenten zu erhöhen, um die Effizienz des Monitoring und somit des Monitoring-Konzeptes an sich zu verbessern. Als erster Ansatz und unter Berücksichtigung des Endlagerkonzeptes und der Auslegung der Anlage (vgl. Kapitel 4.2), wurden sechs Einlagerungsfelder als repräsentativ ausgewählt (Abb. 5.1).

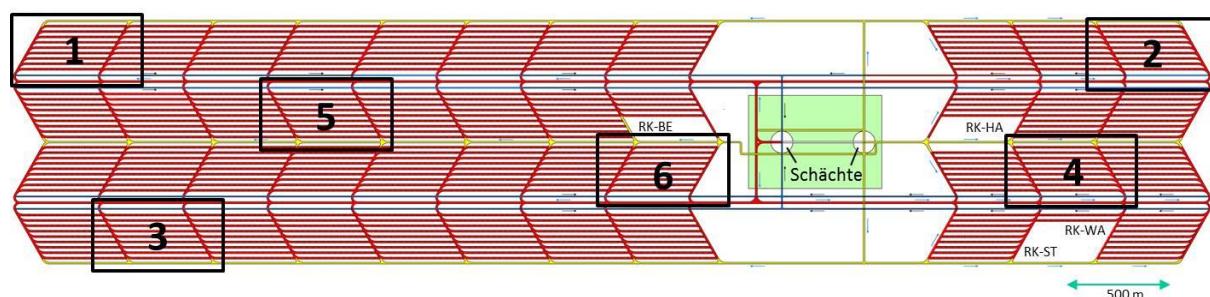


Abb. 5.1: Mögliche Anordnung von Monitoring-Feldern in einem Endlager (die Ziffern geben die Reihenfolge an, in der die Monitoringtätigkeiten implementiert werden)

Um von den Erfahrungen aus vorangegangenen Monitoringtätigkeiten profitieren zu können, beginnt der Prozess mit der Installation von Monitoring-Ausrüstung im ersten Monitoring-Feld (MF1). Dieses Monitoring-Feld befindet sich im für die Einlagerung von Brennelementbehältern vorgesehenen Einlagerungsbereich an der am weitesten entfernten Stelle. Dieses Feld wird als erstes gefüllt und bietet damit die Möglichkeit, die während des Endlagerbetriebs für das Monitoring zur Verfügung stehende Zeit zu maximieren. Dasselbe gilt für Monitoring-Feld (MF2). Dieses Feld ist das am weitesten entfernt gelegene Feld in dem Bereich, der für die Endlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen vorgesehen ist. Gemäß den derzeitigen Sicherheitsanforderungen muss jedes Einlagerungsfeld gegenüber dem Rest der untertägigen Hohlräume so schnell wie möglich abgedichtet werden. Dies ermöglicht die Gewinnung von Monitoring-Daten aus einem schon verfüllten und verschlossenen Einlagerungsfeld bereits während des mehrere Jahrzehnte dauernden Endlagerbetriebs. Im Prinzip entspricht dies, in kleinem Rahmen, einem Monitoring in der Nachbetriebsphase nach Verschluss des Endlagers. Die Ergebnisse des Monitoring werden sorgsam aufgezeichnet, und

bevor weitere Monitoringaktivitäten am nächsten Feld (MF3) aufgenommen werden, wird eine standardisierte Beurteilung des an den Feldern (MF1) und (MF2) durchgeführten Monitoring erstellt und analysiert. Diese Analyse wird als Meilenstein betrachtet. Die Ergebnisse dieser Analyse können als Unterstützung der Entscheidung, ob das Monitoringkonzept aktualisiert und/oder verbessert werden muss, dienen. Darauf basierend kann die Monitoringstrategie für das nächste Einlagerungsfeld festgelegt werden. Diese sukzessive Vorgehensweise ermöglicht es, Fehler zu minimieren und das Verständnis des Betreibers und der Regulierungsbehörde zu verbessern. Gegenwärtig wird diskutiert, ob die Einbeziehung der Öffentlichkeit bzw. von Laien-Interessengruppen in den Analyseprozess an diesem Meilenstein zur Akzeptanz und zur Verbesserung des Vertrauens von Interessengruppen beitragen könnte.

Nach Beginn des Monitoring im Feld (MF3), wird das Monitoring in den Feldern (MF1) und (MF2) natürlich fortgeführt. Es ist wichtig, kontinuierliches Langzeit-Monitoring umzusetzen und entsprechende Daten zu sammeln, die hilfreich für ein besseres Verständnis des Langzeitverhaltens der Endlagerbarrieren sein können und damit auch für die Ermittlung einer möglichen Monitoring-Strategie für die Nachbetriebsphase des Endlagers. Wenn die Erkenntnisse, die in mehreren Jahrzehnten des Monitoring während der Betriebsphase gewonnen werden, zeigen, dass weiteres Monitoring keinen erheblichen Mehrwert liefern würde, können die Monitoringtätigkeiten eingestellt werden.

Die Monitoring-Felder (MF4) und (MF5) befinden sich in den zentralen Bereichen der beiden Einlagerungsbereiche für ausgediente Brennelemente und hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle. In diesem Bereich werden die höchsten Temperaturen im Einlagerungsbereich erreicht und damit sind dort im Vergleich zu den anderen Feldern die größten Einflüsse aus thermo-hydro-mechanischer Sicht zu erwarten. Monitoring-Feld (MF6) wird voraussichtlich als letztes gefüllt und ist am wenigsten weit entfernt von einem der Schächte. Damit stellt es ein wichtiges Element dar hinsichtlich der Bewertung der Dichtheit der verfüllten und verschlossenen untertägigen Auffahrungen.

Nach erfolgter Auswahl repräsentativer Einlagerungsfelder soll auch innerhalb dieser Monitoring-Felder erneut eine repräsentative Auswahl, diesmal von Monitoring-Bohrlöchern erfolgen. Abb. 5.2 gibt einen Überblick über die Anordnung der vorgesehenen Monitoring-Bohrlöcher in Monitoring-Feld (MF1) zusammen mit den ersten Migrationsbarrieren, die auch mit einem Monitoring-System ausgestattet werden sollen. Es ist vorgesehen, dass 5 von 9 Einlagerungsstrecken mit Monitoring-Bohrlöchern ausgestattet werden sollen und dass in jeder Einlagerungsstrecke 1-2 Monitoring-Bohrlöcher vorhanden sind. Eine Ausnahme bildet die allererste Einlagerungsstrecke. In dieser ist der Einsatz sogenannter "Dummy-Bohrlöcher (DB)" vorgesehen. Die Idee ist, drei Dummy-Bohrlöcher in das allererste Monitoring-Feld (MF1) zu integrieren, die in Abb. 5.2 als blaue Punkte in der äußersten Strecke (Dummy-Bereich) dargestellt sind. Durch den Einsatz von elektrischen Erhitzern in diesen drei ersten Bohrlöchern kann neben der Bohrlocherstellung besonders der Einbau des Verschlusselementes, getestet werden, ohne das Personal einer eventuellen Strahlenbelastung ausgesetzt wird.

Darüber hinaus werden die drei Verschlusselemente konzeptgemäß mit Monitoring-Equipment instrumentiert, um das Langzeitverhalten des jeweiligen Verschlusses unter Wärmebelastung, den Flüssigkeitszutritt und die Konvergenz des Gebirges zu erfassen. Diese Dummy-Variante ermöglicht jederzeit einen vergleichsweise einfachen Zugang zum Monitoring-Equipment, um die für die Datengewinnung verwendeten Sensor- und/oder Übertragungseinheiten zu prüfen oder zu aktualisieren. Diese Dummy-Systeme können dazu verwendet werden, sowohl die Monitoring-Systeme selbst, als auch die zeitliche Entwicklung der Bohrlochverschlüsse zu bewerten und Verbesserungen für zukünftige Installationen von Messsystemen in Bohrlochverschlüssen zu entwickeln.

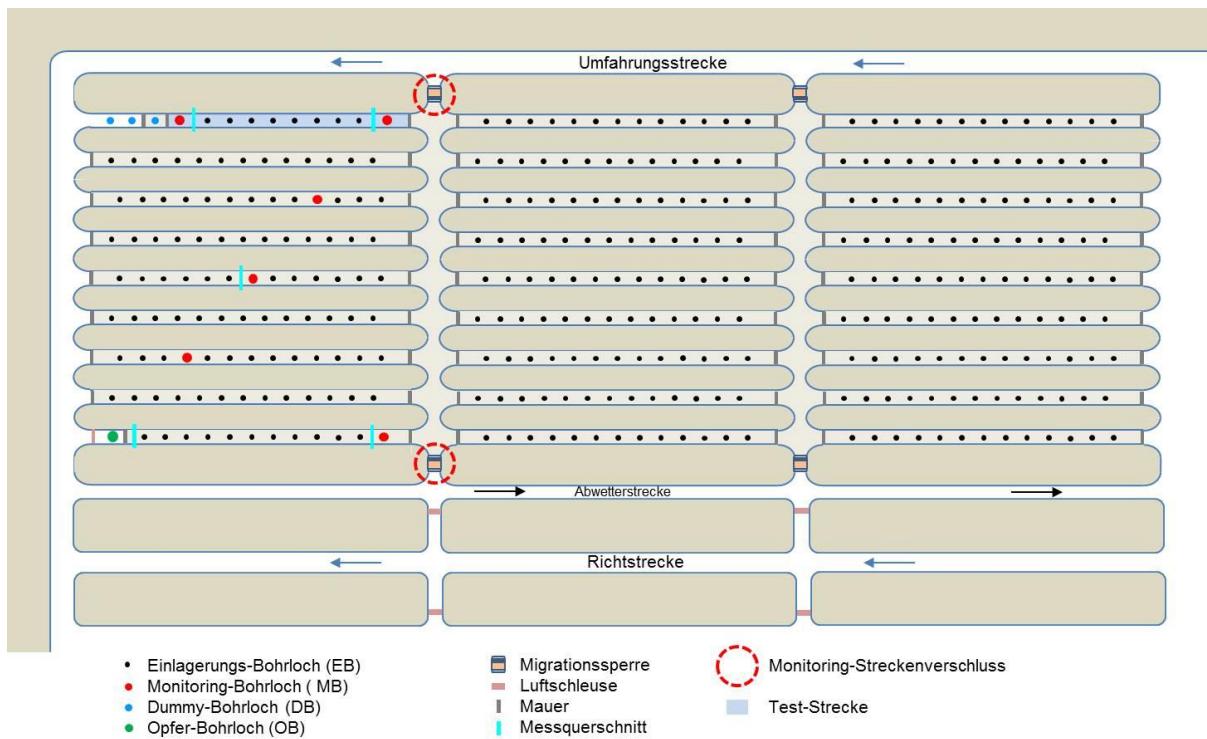


Abb. 5.2: Mögliche Anordnung der Monitoring-Bohrlöcher in Monitoring-Feld (MF1) und erste Monitoring-Streckenverschlüsse

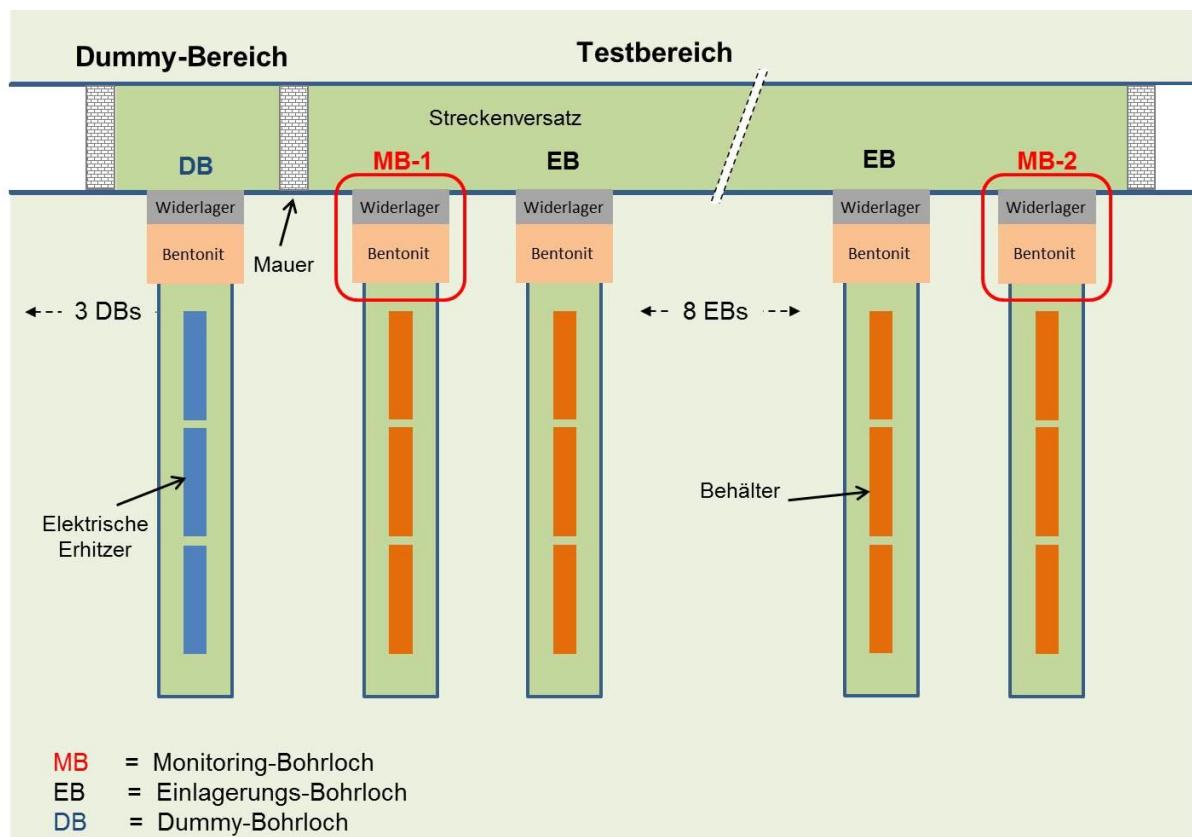


Abb. 5.3: Konfiguration des Dummy- und Testbereiches innerhalb der ersten Einlagerungsstrecke

Nachdem die Einlagerungsbohrlöcher in diesem Teil der Strecke mit echtem Abfall befüllt und verschlossen worden sind, sollen während der Versatzmaßnahme sukzessive auch Monitoring-Systeme in der Strecke installiert werden, um die Entwicklung des Versatzmaterials, den Zustand an der Kontaktzone zwischen Versatzmaterial und Gebirge und die Entwicklung des Wirtsgesteins im Nahfeld der Teststrecke zu beobachten. Nachdem diese Teststrecke endgültig verschlossen ist, ist eine "Warteperiode" vorgesehen, in der eine kontinuierliche Bewertung der Monitoring-Ergebnisse stattfindet. Als erster Ansatz erscheint ein Zeitraum von mindestens einem Jahr als angemessen. Die Monitoring-Ergebnisse, die einschließlich dieser "Warteperiode" erhalten werden, gelten als wesentlicher Input für die Entscheidung, einer weiteren kontinuierlichen Abfalleinlagerung grünes Licht zu geben.

Im ersten Monitoring-Feld wurden insgesamt fünf Bohrlöcher in fünf verschiedenen Einlagerungsstrecken (dargestellt als rote Punkte) als Monitoring-Bohrlöcher zum Zwecke des Bohrlochverschluss-Monitoring ausgewählt (Abb. 5.2). Sie befinden sich auf einer Linie durch das Monitoring-Feld. Mit dieser Anordnung ist es möglich, einerseits die Stelle mit dem höchsten Wärmeeintrag in der Mitte des Monitoring-Feldes abzudecken. Andererseits beginnt diese Anordnung am äußeren Rand des Einlagerungsfeldes, wo die ersten Bohrlöcher bereits befüllt sind, und erstreckt sich bis zum anderen äußeren Rand, wo die letzten Bohrlöcher befüllt werden. Damit deckt es die gesamte THM-Entwicklung im ersten Einlagerungsfeld ab.

In der letzten Einlagerungsstrecke ist ein sogenanntes „Opfer-Bohrloch“ vorgesehen. Dieses Bohrloch könnte das letzte zu füllende Bohrloch in der letzten Einlagerungsstrecke des ersten Einlagerungsfeldes sein (gekennzeichnet durch den grünen Punkt in Abb. 5.2). Die Idee dahinter ist, dass die Abfallbehälter in diesem Bohrloch vor dem endgültigen Verschluss des Endlagers wieder rückgeholt und in einem anderen, bereits vorbereiteten Bohrloch eingelagert werden sollen (leere Feldbereiche in Abb. 5.1). Das Opfer-Bohrloch wird intensiv instrumentiert wobei das Monitoring nicht nur auf den Bohrlochverschluss beschränkt bleibt, sondern auch die Behälterumgebung innerhalb des Wirtsgesteins einschließt. Bei dem dafür verwendeten Monitoring-Equipment dürfen auch kabelgebundene System verwendet werden, da diese Systeme nach Rückholung der Behälter komplett wieder ausgebaut werden. Eine Beeinträchtigung jeglicher Barrierenfunktion muss nicht berücksichtigt werden.

Mit diesem Opfer-Bohrloch wird die Möglichkeit geschaffen, auch das zeitliche Verhalten des Wirtsgesteins in der Umgebung der Behälter über mehrere Jahrzehnte zu beobachten bzw. anhand ausgewählter Parameter zu charakterisieren. Dies erlaubt auch eine Überprüfung der Einhaltung der Integritätskriterien bzw. eine Verifizierung des im Vorfeld geführten Nachweises zum Erhalt der Integrität des Wirtsgesteins. Im Zuge der Rückholung der Behälter aus diesem Opfer-Bohrloch würde die komplette Bergung der Monitoring-Ausrüstung, die zu diesem Zeitpunkt (hoffentlich) mehrere Jahrzehnte in Betrieb war, es ermöglichen, auch eine eventuelle Alterung der Systemkomponenten zu untersuchen und somit Informationen über die Alterungsbeständigkeit des Monitoring-Equipment zu erhalten. Diese Informationen wären hilfreich für die Einschätzung der zu erwartenden Lebensdauer der Sensorsysteme, die noch an den anderen Monitoring-Punkten in Betrieb sind.

Wenn die Zugangsstrecke zwischen den ersten beiden Einlagerungsfeldern nicht mehr benötigt wird, werden – wie in den gegenwärtigen Sicherheitsanforderungen gefordert – an beiden Enden der Strecke Migrationsbarrieren installiert (s. Abb. 4.2), um den Zugang zum Einlagerungsfeld gegen den Rest der untertägigen Einrichtungen abzudichten (Abb. 5.2). Diese allerersten Verschlussbauwerke sind als „Monitoring-Streckenverschlüsse“ vorgesehen. Das bedeutet, dass Monitoring-Systeme zur Beobachtung der Entwicklung dieser allerersten Abdichtbauwerke installiert werden sollen. Die Monitoring-Ergebnisse können hilfreich sein für die Bewertung, ob die für diese Dichtbauwerke definierten Leistungsziele erreicht werden können oder ob Änderungen am Barrierendesign oder Monitoring-System notwendig wären. Jedes Einlagerungsfeld wird mit vier Migrationsbarrieren in den Zugangsstrecken

abgedichtet. In jedem der sechs ausgewiesenen Monitoring-Felder sind zwei Barrieren als Monitoring-Dichtbauwerke vorgesehen.

Nachdem alle Einlagerungsfelder mit Abfallbehältern befüllt und gegen den Rest der untertägigen Grubenräume abgedichtet sind, ist eine Beobachtungsphase oder Vorverschlussphase vorgesehen. Während der Vorverschlussphase sollen die Schächte und die Hauptstrecken, die den Zugang zu den einzelnen Einlagerungsfeldern und Migrationsbarrieren ermöglichen, für eine noch festzulegende Zeitspanne offen gehalten werden. Die Ergebnisse des Monitoring, die während der Betriebsphase einschließlich der Vorverschlussphase gewonnen werden, gelten als wesentliche Informationen für die Entscheidung, das Endlager endgültig zu verschließen.

Wenn am Ende der Vorverschlussphase die Entscheidung für den endgültigen Verschluss gefallen ist, werden die Hauptstrecken verfüllt und die acht Hauptstreckenverschlüsse (vgl. Abb. 4.2) am Übergang zwischen dem Infrastrukturbereich und den Einlagerungsfeldern für ausgediente Brennelemente und hochaktive Wiederaufarbeitungsabfälle errichtet. Die beiden Verschlussbauwerke, die dem Einlagerungsbereich am nächsten sind, also die Verschlüsse ganz außen links und ganz außen rechts in Abb. 4.2, sollen als "Monitoring-Verschlüsse" dienen. Beide Verschlussbauwerke liegen im Streckenbereich mit der kürzesten Verbindung zu den Schächten und werden daher aus hydraulischer Sicht als abdeckende und damit repräsentative Elemente erachtet. Alle Erfahrungen, die über mehrere Jahrzehnte des Monitoring der Migrations-Barrieren am Ende der Zugangsstrecken zu den Einlagerungsfeldern gesammelt werden, stehen zur Verfügung und bilden eine solide Grundlage für die Installation des Monitoring-Systems an diesen beiden Verschlussbauwerken.

Nachdem der Infrastrukturbereich mit Schotter verfüllt ist, der eine hohe Porosität besitzt und als temporärer Gas- und Wasserspeicher dienen kann, werden die beiden Schächte mit je zwei separaten Dichtmodulen verschlossen. Das vorläufige Verschlusskonzept ist in Abb. 4.2 dargestellt. Da die beiden Schächte die Hauptzugänge zur Erdoberfläche darstellen, werden alle vier darin vorgesehenen Dichtmodule mit Monitoring-Equipment instrumentiert.

5.2 Spezifische Konzepte

Im Folgenden werden spezifische Monitoring-Konzepte für die Verschlüsse der Monitoring-Bohrlöcher, für das Opferbohrloch, für die Migrationssperren in den Strecken, für den Versatz in den Einlagerungsstrecken und für die Schachtverschlüsse illustriert. Mit Ausnahme der Bohrlochverschlüsse entspricht das Verschlusskonzept prinzipiell auch dem Endlagerkonzept mit einer Streckenlagerung, so dass die Monitoring-Konzepte auf diese Variante übertragen werden können.

5.2.1 Konzept für Monitoring-Bohrlöcher

Dieses Kapitel beschreibt das Monitoring-System, das hinsichtlich der in Kapitel 4 identifizierten Monitoring-Parameter für die Verschlussbauwerke der Einlagerungsbohrlöcher möglich erscheint. Dieses Monitoring-System ist zunächst für die Dummy-Phase vorgesehen, in der die Verschlussbauwerke oberhalb der elektrischen Erhitzer in den Dummy-Bohrlöchern eingebaut werden. Die Erfahrungen, die in dieser Dummy-Phase gemacht werden, könnten zu einer Aktualisierung dieses Konzeptes führen. Solange dies nicht der Fall ist, wird davon ausgegangen, dass dieses vorläufige Monitoring-Konzept für alle ausgewiesenen Monitoring-Bohrlöcher verwendet wird.

Jedes Verschlussbauwerk eines vertikalen Einlagerungsbohrlochs besteht aus einem Bentonit-Dichtelement und einem darüber liegenden Widerlager aus Beton, um das Bentonit-Element in seiner Position zu fixieren. In beiden Komponenten werden Monitoring-Systeme auf verschiedenen horizontalen Ebenen installiert. Das heißt, es ist nicht vorgesehen, homo-

gen verteilte Sensoren im Verschlussbauwerk zu installieren. Solch eine Verteilung könnte die Entstehung bevorzugter Migrationspfade durch das Bentonit-Element von einem Sensor zum nächsten begünstigen. Aus diesem Grund sollen die Sensor- und Übertragungssysteme auf mehreren horizontalen Ebenen, den sogenannten "Monitoring-" oder "Messhorizonten" installiert werden. Solch ein horizontbasiertes System wurde bereits in einer Fallstudie des MoDeRn-Projektes betrachtet (Jobmann 2013).

5.2.1.1 Monitoring des Widerlagers

Die folgende Abbildung skizziert die vier Messhorizonte im Widerlager. Abb. 5.4 (links) gibt einen Überblick. Je ein Messhorizont befindet sich am oberen und am unteren Ende des Widerlagers. In jeweils 30 cm Entfernung in Richtung Widerlager-Mitte befindet sich ein weiterer Messhorizont. Die zweiten Messhorizonte befinden sich 30 cm innerhalb des Widerlagers, um eine homogene Porendrucksituation innerhalb des Elements ohne irgendwelche Oberflächeneinflüsse zu gewährleisten. Die obere Ebene ist Messhorizont 1 (MH-01) und besteht aus Druck- und Verschiebungssensoren (Abb. 5.4 rechts). Die vertikalen Verschiebungssensoren sind durch die schwarzen Rechtecke in den horizontalen Querschnitten und die winkelige schwarze Linie in dem vertikalen Querschnitt dargestellt.

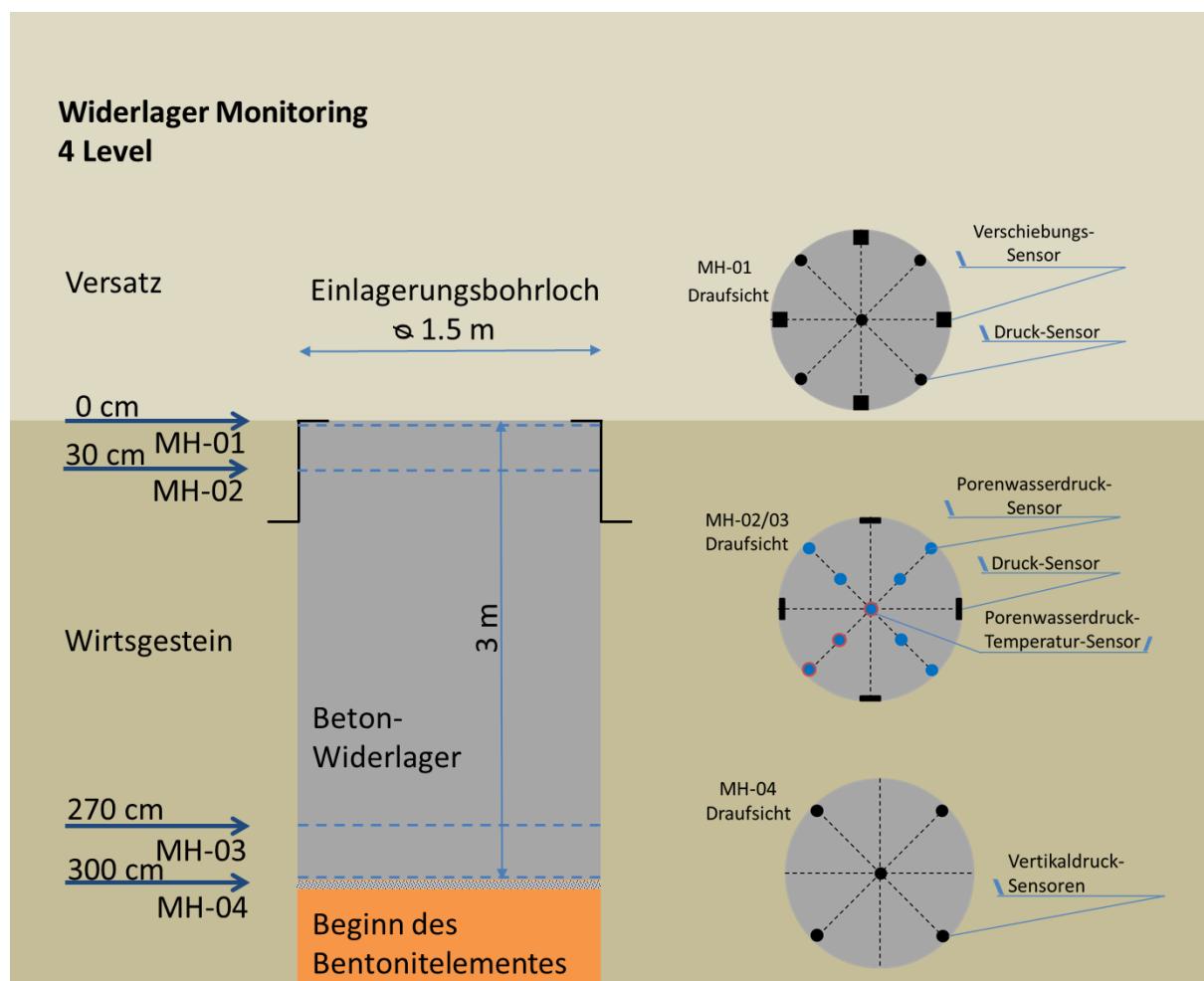


Abb. 5.4: Lage der Messhorizonte MH-01 bis MH-04 innerhalb des Widerlagers (links) und Bestückung der Messhorizonte mit verschiedenen Sensoren

Diese Sensoren sollen eine mögliche Hebung des Widerlagers messen, um zu bewerten, ob das Widerlager während des Sättigungsprozesses im Bentonit-Element in der Lage ist, das Bentonit-Element ordnungsgemäß, d. h. wie in den Leistungszielen definiert, zu fixieren. Die Drucksensoren sind im horizontalen Querschnitt als schwarze Punkte dargestellt. Diese Sensoren sollen den vertikalen Druck am oberen Ende des Widerlagers messen. Durch sein Eigengewicht, das während des Aufsättigungsvorgangs kontinuierlich steigt, unterstützt das Versatzmaterial oberhalb des Widerlagers dieses in seiner Funktion. Nach einer gewissen Zeit wird das Widerlager auch durch die Streckenkonvergenz unterstützt, die das Versatzmaterial kompaktiert. Sowohl das Eigengewicht des Versatzmaterials als auch die spätere Konvergenz des Gebirges und die damit verbundene Versatzkompaktion erhöhen den vertikalen Druck, was aufgezeichnet werden soll.

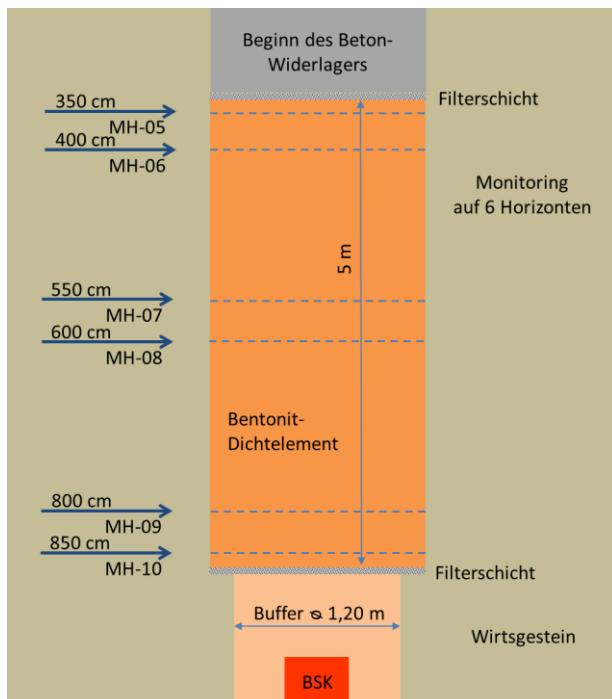
An den Messhorizonten MH-02 und MH-03 sollen die Parameter Porendruck, radiale Druckkomponente und Temperatur gemessen werden. Wie in Abb. 5.4 dargestellt, soll der Porendruck auf zwei Linien gemessen werden, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Dies ermöglicht die Messung der Porendruckentwicklung sowohl in der Mitte des Widerlagers als auch an vier Punkten am Übergang zum Wirtsgestein. Da der Porendruck an beiden Messhorizonten gemessen wird, kann dadurch ein Hinweis auf die Flussrichtung von Lösungen erhalten werden. Auf beiden Messhorizonten soll die Temperatur auf einem der linearen Querschnitte durch das Widerlager gemessen werden, und zwar an mindestens drei Messpunkten von der Bohrlochwand hin zur Mitte des Widerlagers. Die Temperaturinformationen ermöglichen eine genaue Berechnung der Lösungsviskosität und seiner Dichte. Der Radialdruck soll an vier Messpunkten an der Grenze zwischen Widerlager und Bohrlochwand gemessen werden. In dieser Konfiguration sollen die zwei Sensorpaare jeweils kreuzweise angeordnet sein, so dass der komplette Umfang des Bohrlochs abgedeckt wird. Der Hauptgrund für die Messung des Radialdrucks ist, ihn mit dem im darunter liegenden Bentonit-Element gemessenen Radialdruck vergleichen zu können, wodurch die aus der Aufsättigung und dem Quellen des Bentonits resultierende Druckkomponente abgeschätzt werden kann.

Am Messhorizont 4 (MH-04) sollen vertikale Drucksensoren – ähnlich wie auf Messhorizont 1 (MH-1) – installiert werden. Damit soll der vom darunter liegenden Bentonit-Element kommende Druck gemessen werden. Die Druckentwicklung wird hauptsächlich aus der Aufsättigung des Bentonits, der Wärmeausdehnung des Materials und dem Flüssigkeitsdruck resultieren. Die Druckdifferenz zwischen MH-01 und MH-04 und die gemessenen vertikalen Verschiebungen ermöglichen eine konsistente Auswertung der möglichen Hebung des Widerlagers und geben somit Anhaltspunkte, ob das zugehörige Kriterium eingehalten werden kann.

5.2.1.2 Monitoring des Bentonit-Dichthelements

Abb. 5.5 zeigt einen Überblick über die Messhorizonte, die im unter dem Widerlager liegenden Bentonit-Dichthelement vorgesehen sind. Es sind sechs Messhorizonte vorgesehen – zwei in der Mitte des Dichthelements (MH-7 und MH-8), zwei am oberen Ende (MH-5 und MH-6) und zwei am unteren Ende des Elements (MH-9 und MH-10). Die äußersten Messhorizonte (MH-5 und MH-10) befinden sich an beiden Seiten ein paar Zentimeter innerhalb des Dichthelements, um auch wirkliche Effekte innerhalb des Dichthelementes zu erfassen.

Der Abstand zwischen den Messhorizontpaaren beträgt ungefähr 0,5 m. Die Messhorizonte sind vertikal in Bohrlachachse ungleichmäßig verteilt, um zwei große Bentonit-Bereiche ohne jedwede Instrumentierung zu erhalten. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilung von zwei relativ nah beieinanderliegenden Messhorizonten in drei verschiedenen Bereichen des Elements es ermöglicht, den Unterschied zwischen Flüssigkeitsbewegung vom oberen Ende des Elements aufgrund von Streckenzufluss und Flüssigkeitsbewegung vom unteren Ende aufgrund von wärmebedingtem Fluss zu bewerten. Abb. 5.6 zeigt einen horizontalen Querschnitt von Messhorizont MH-5.



Ähnlich wie auf dem Messhorizont im darüber liegenden Widerlager, soll der Porendruck auf zwei Linien gemessen werden, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Dies ermöglicht die Messung der Porendruckentwicklung sowohl in der Mitte des Bentonit-Elements als auch an vier Punkten am Übergang zum Wirtsgestein. Auf einem der linearen Querschnitte durch das Dichtelement soll die Temperatur an mindestens drei Messpunkten von der Bohrlochwand hin zur Mitte des Dichtelements gemessen werden.

Abb. 5.5:
Lage der Messhorizonte MH-5 bis MH-10 im Bentonit-Dichtelement

Die Temperaturinformationen ermöglichen eine genaue Berechnung der Lösungsviskosität und seiner Dichte auf diesem Horizont. Zusätzlich sind vier Sensoren zur Messung der Feuchtigkeit oder des Wassergehalts vorgesehen. Der Radialdruck soll an vier Messpunkten an der Grenze zwischen Bentonit-Element und Bohrlochwand gemessen werden. In dieser Konfiguration sollen die zwei Sensorpaare jeweils kreuzweise angeordnet sein, so dass der komplette Umfang des Bohrlochs abgedeckt wird. Der Hauptgrund für die Messung des Radialdrucks ist, die Druckkomponente zu bestimmen, die aus der Aufsättigung des Bentonits resultiert. Zu diesem Zweck ist es hilfreich, die Drücke mit dem im darüber liegenden Widerlager an ähnlichen Stellen gemessenen Radialdruck zu vergleichen, da dort – anders als im Bentonit – kein Aufquellen zu erwarten ist.

Das Design der nachfolgenden Messhorizonte MH-6 bis MH-10 ähnelt dem Design von MH-5 (Abb. 5.7- Abb. 5.11). Für die Messhorizonte MH-8 und MH-10 sind leichte Änderungen vorgesehen. Auf diesen Horizonten sind mehr Temperatursensoren vorgesehen, um die homogene horizontale Temperaturverteilung im Bentonit-Element zu prüfen. Durch einen Vergleich der Porendruckentwicklung aller Sensoren in dieser Anordnung lässt sich der Fortschritt der Aufsättigung analysieren und es lassen sich Hinweise auf die Richtung des Flüssigkeitszutritts erhalten. Die Porendruckunterschiede entlang der vertikalen Achse des Bentonit-Elements nach vollständiger Aufsättigung liefern nicht nur Informationen über die Flussrichtung von Flüssigkeiten, sondern geben auch Hinweise auf die Permeabilität (Leistungsziel), die langfristig in dem Bentonit-Element erreicht werden kann (vgl. Kapitel 4.4.1).

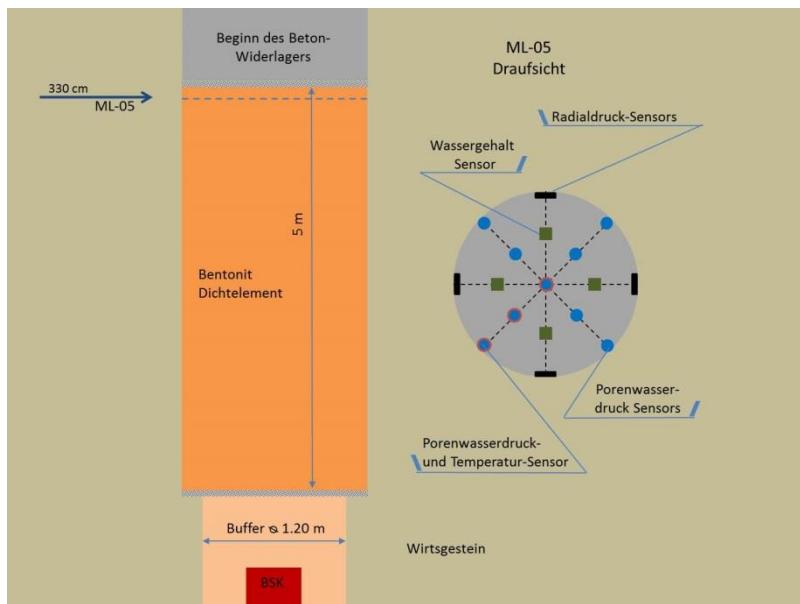


Abb. 5.6:
Lage von Messhorizont MH-5 und
horizontaler Querschnitt mit Lage
der verschiedenen Sensoren

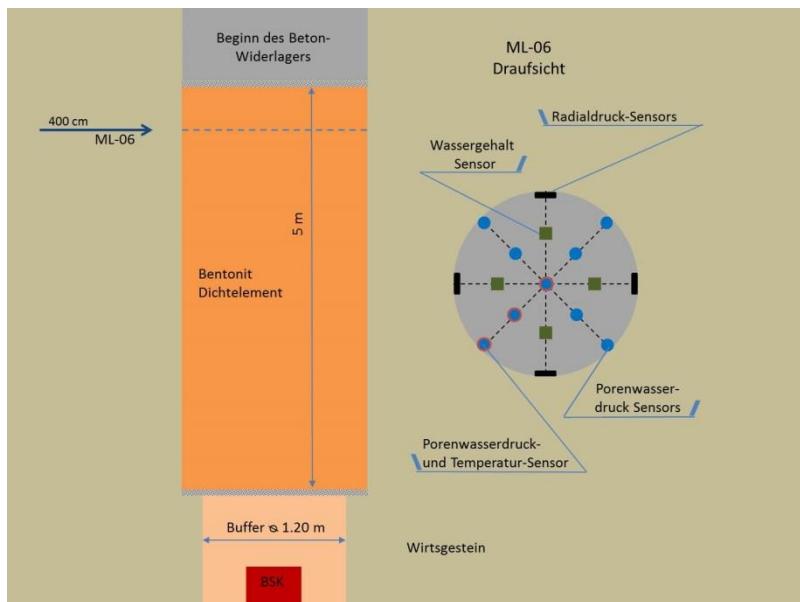


Abb. 5.7:
Lage von Messhorizont MH-6 und
horizontaler Querschnitt mit Lage
der verschiedenen Sensoren

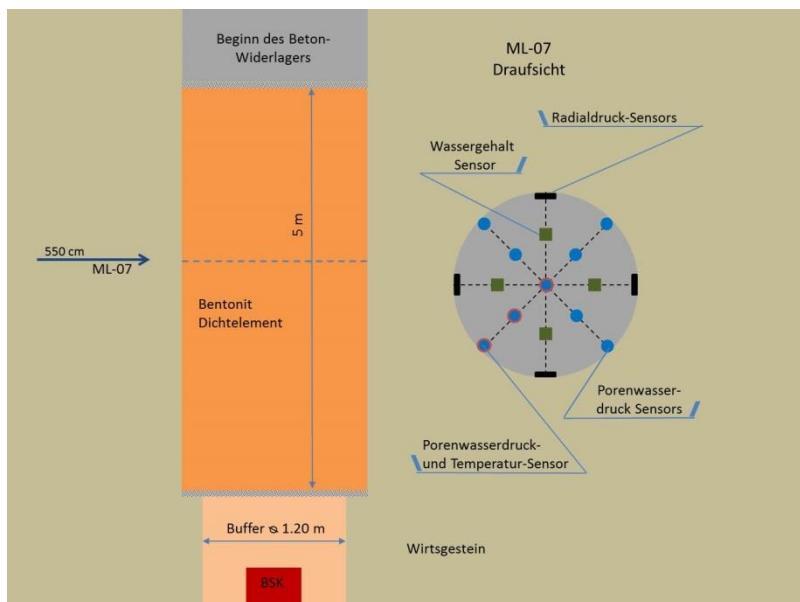


Abb. 5.8:
Lage von Messhorizont MH-7 und
horizontaler Querschnitt mit Lage
der verschiedenen Sensoren

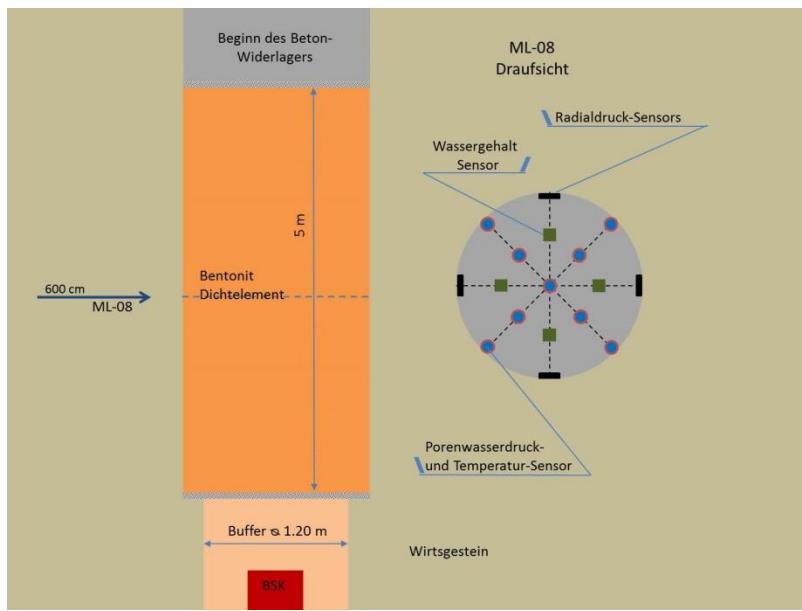


Abb. 5.9:
Lage von Messhorizont MH-8 und horizontaler Querschnitt mit Lage der verschiedenen Sensoren

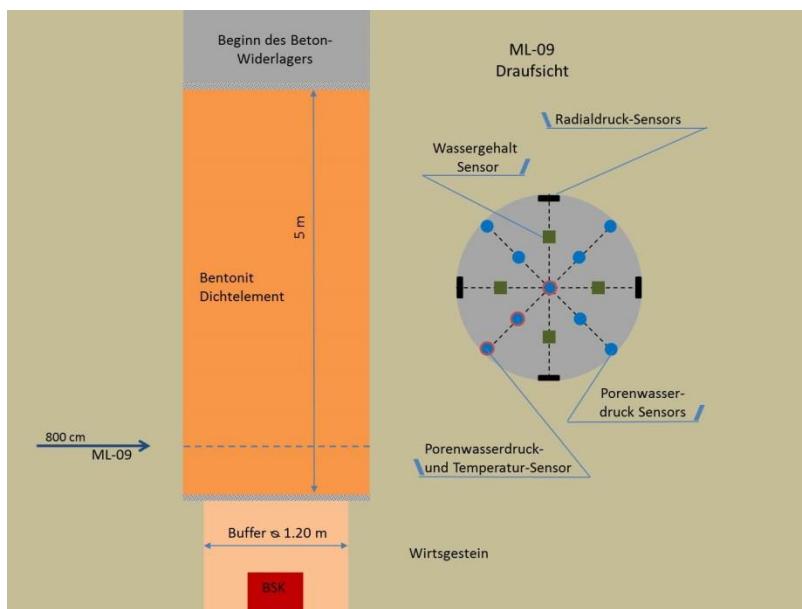


Abb. 5.10:
Lage von Messhorizont MH-9 und horizontaler Querschnitt mit Lage der verschiedenen Sensoren

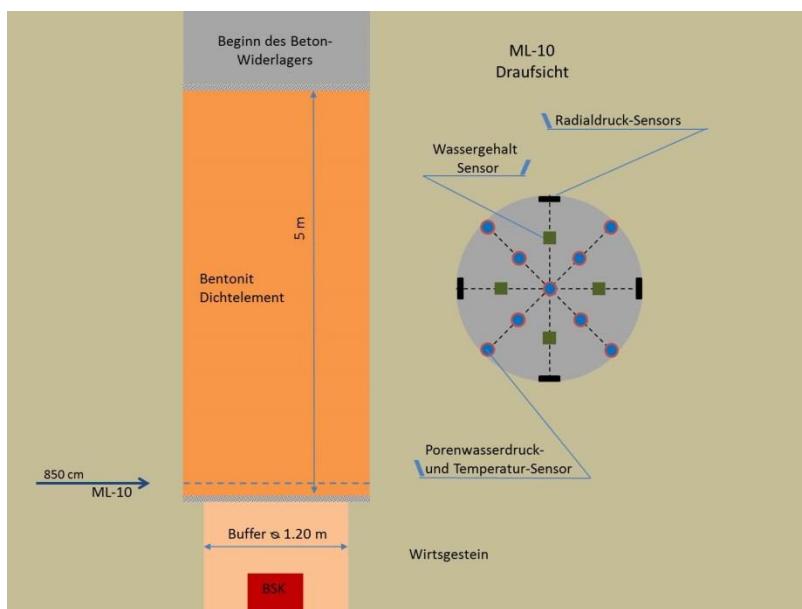


Abb. 5.11:
Lage von Messhorizont MH-10 und horizontaler Querschnitt mit Lage der verschiedenen Sensoren

Abb. 5.12 zeigt solch ein empfohlenes System. Während des MODERN-Projektes wurden Multi-Parametersensoren einschließlich einer Datenübertragungseinheit entwickelt. Diese sind in der Lage, die Messungen an einen nahe gelegenen Empfänger zu senden (MODERN 2013c). Wenn man solche autonomen Sensoren verwendet, könnten im Verschlussystem Relaisstationen als Teil eines sogenannten "Daten-Hopping-Systems" implementiert werden. Messungen einzelner Sensoren könnten so über (ggf. mehrere) Relaisstationen an eine zentrale Empfängereinheit zur weiteren Auswertung übertragen werden. Die Technologie zur kabellosen Datenübertragung wurde im MODERN2020 Projekt weiterentwickelt. Ergebnisse sind in MODERN2020 (2019b) beschrieben.

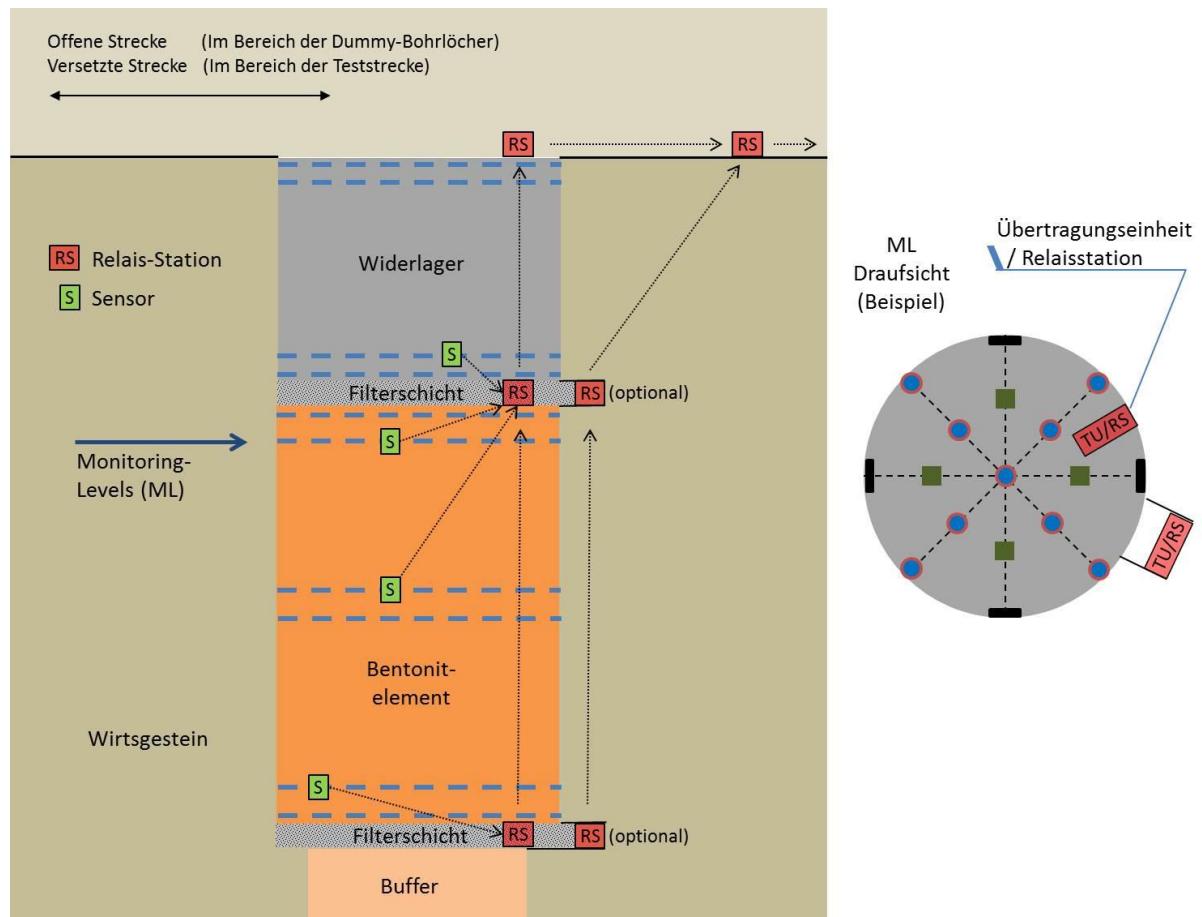


Abb. 5.12: Empfohlene Platzierung von drahtlosen Übertragungseinheiten

Geeignete Positionen innerhalb des Bohrlochverschlusses wären am oberen Ende des Dichtelements und im Filterbereich am unteren Ende. An diesen Stellen würden sie das Dichtelement nicht beeinträchtigen. Basierend auf den Erfahrungen aus dem MODERN-Projekt, muss man davon ausgehen, dass die Signalabschwächung dieser hochfrequenten Systeme innerhalb des Dichtelements aufgrund der Feuchtigkeit stark sein kann. Eine Signalübertragung durch das intakte Wirtsgestein wird als weniger problematisch angesehen. Das intakte Wirtsgestein hat eine viel geringere Porosität und ein stabiles Korngerüst, was beides zu einer besseren Signalübertragung führt. Deshalb wird vorgeschlagen, die Relaisstationen in einer speziellen Nische im Wirtsgestein auf Höhe der Filterschichten zu positionieren (Abb. 5.12). Diese Option könnte sich zur bevorzugten Option entwickeln, da die Bedingungen im angrenzenden Wirtsgestein während der Monitoring-Periode mehr oder weniger gleich bleiben, während sich die Bedingungen im Dichtelement während der mehrere Jahre andauernden Aufsättigungsphase ständig ändern. Die Signalabschwächung würde sich daher aufgrund des sich wechselnden Wassergehalts im Dichtelement ständig ändern. Zur Identifizie-

rung der bestgeeigneten Abstände innerhalb des Wirtsgesteins (und/oder innerhalb des Dichtbauwerks) müssen In-situ-Tests durchgeführt werden. In dem aktuellen MODERN2020 Projekt konnte ein Test zur kabellosen Datenübertragung im Untertagelabor in Tournemire erfolgreich durchgeführt werden. Bei diesem Test wurden zwei verschiedene Übertragungssysteme für kurze Reichweiten (innerhalb des Streckensystems) und für lange Reichweiten (durch das Gestein zur Erdoberfläche) miteinander verbunden. Bei diesem Test wurden Messdaten aus einer mit Bentonit versiegelten Bohrung zur Erdoberfläche übertragen.

5.2.2 Konzept für Opfer-Bohrlöcher

Derzeit ist vorgesehen, dass jedes Monitoring-Feld (vgl. Abb. 5.1 und Abb. 5.2) ein einzelnes sogenanntes Opfer-Bohrloch (s. Kap. 5.1) beinhaltet. Das Monitoring-Konzept für ein Opfer-Bohrloch unterscheidet sich signifikant von dem der Monitoring-Bohrlöcher. Während bei letzteren der Fokus auf dem Monitoring des Bohrlochverschlusses steht, liegt bei den Opfer-Bohrlöchern der Fokus auf dem Monitoring des Liners und des umgebenden Wirtsgesteins. Da die Abfälle aus diesen Bohrlöchern ohnehin noch während der Betriebsphase wieder herausgeholt und an anderer Stelle eingelagert werden, ist es unbedenklich, Beobachtungsbohrungen in das umgebende Wirtsgestein zur Installation von Sensoren zu bohren. Die Intension mit der ein Monitoring bei diesen Opfer-Bohrlöchern betrieben wird, besteht in der Beobachtung des thermisch induzierten Wirtsgesteinsverhaltens und der sich einstellenden hydro-mechanischen Belastung des Liners.

Bezüglich des Wirtsgesteins steht die temperaturinduzierte Erhöhung des Porenwasserdruckes im Vordergrund. Im Sicherheitsnachweis, der im Vorfeld der Endlagerkonstruktion erbracht werden muss, wird u. a. die Einhaltung des „Fluiddruck-Kriteriums“ gezeigt. Ein Überschreiten dieses Schädigungskriteriums kann zu Rissbildungen und damit zu künstlich

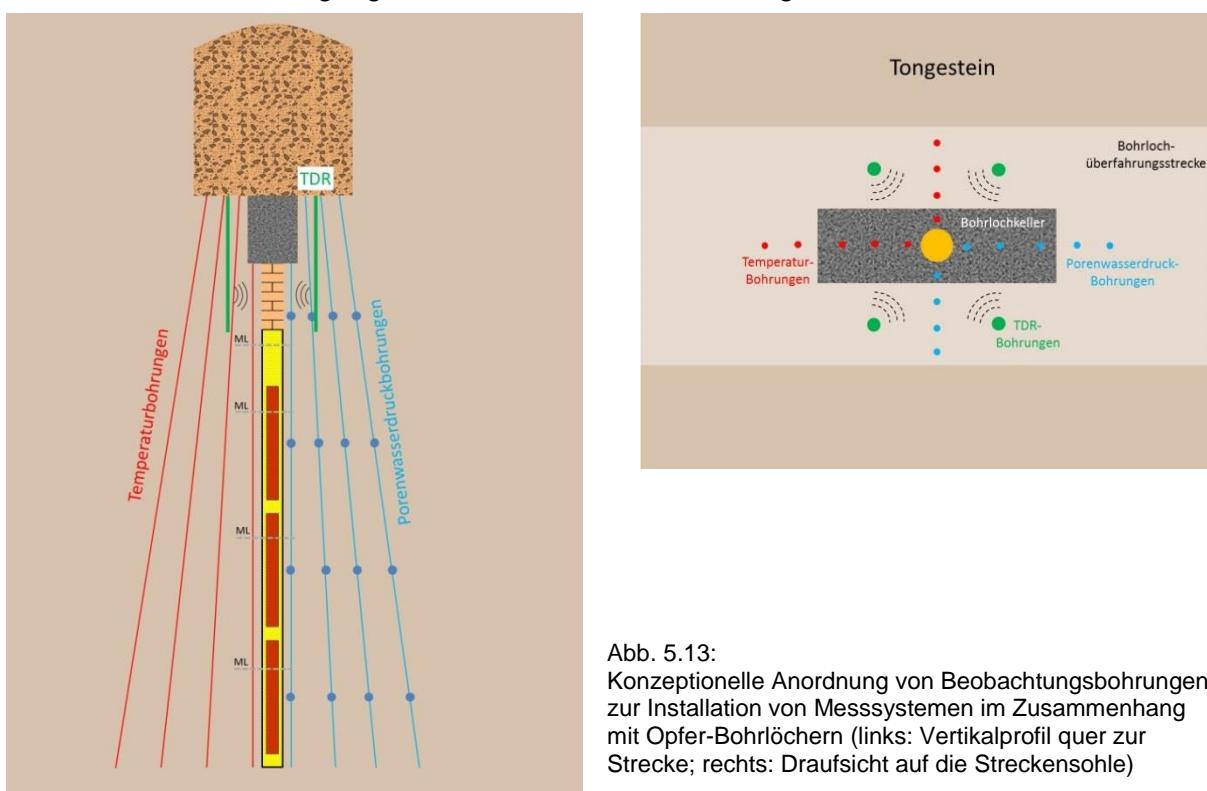
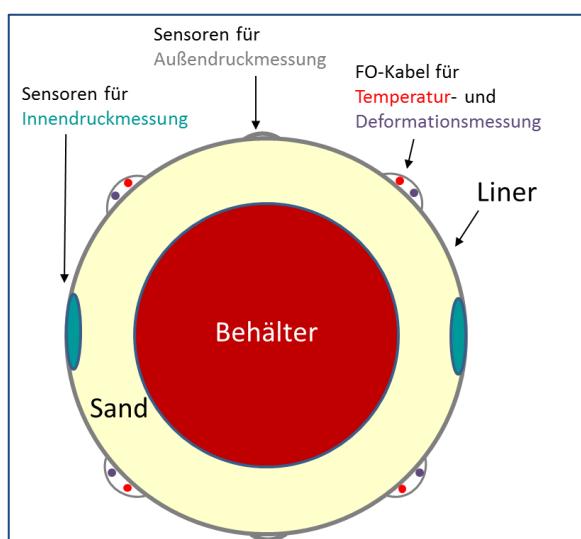


Abb. 5.13:
Konzeptionelle Anordnung von Beobachtungsbohrungen
zur Installation von Messsystemen im Zusammenhang
mit Opfer-Bohrlöchern (links: Vertikalprofil quer zur
Strecke; rechts: Draufsicht auf die Streckensohle)

erzeugten Wasserwegsamkeiten führen. Daher kann die Messung des Porenwasserdruckes in verschiedener Entfernung zum Einlagerungsbohrloch (vgl. Abb. 5.13) diesen Nachweis überprüfen und feststellen, ob der Nachweis mit ausreichender Bandbreite geführt wurde. In analoger Weise kann durch Temperaturnmessungen die Einhaltung des „Temperatur-

Kriteriums“ im Wirtsgestein überprüft werden. Die konzeptionelle Anordnung der Beobachtungsbohrungen ist in Abb. 5.13 (links und rechts) zu sehen. Zur Temperatur- (rot) und Porenwasserdruckmessung (blau) im Wirtsgestein sind jeweils zwei Bohrfächer in Längs- und Querrichtung zur Bohrlochüberfahrungsstrecke vorgesehen. Die jeweils erste Bohrung ist senkrecht also parallel zur Einlagerungsbohrung ausgerichtet. Die anderen drei bzw. vier Bohrungen werden jeweils in einem größer werdenden Winkel in Richtung Wirtsgestein ausgerichtet, so dass die von den Messsystemen erfasste Distanz zu der Einlagerungsbohrung deutlich erhöht wird. Bezüglich des Liners liegt das Hauptaugenmerk auf der messtechnischen Erfassung seiner Belastung. Zu diesem Zweck wird der Liner in seinem Außenbereich an vier Stellen in seiner Längsrichtung mit faseroptischen Sensoren zur Deformations- und Temperaturmessung versehen (Abb. 5.14)

Die Fasern werden unter einem metallischen Schutz verlegt, der auf den Liner geschweißt wird. Dieses System wird auch von den französischen Kollegen der ANDRA erfolgreich zum Monitoring ihrer Liner verwendet. Mit den Dehnungsfasern können auch kleine Deformationen der Liner-Oberfläche erfasst werden. Die Temperaturfasern sind zum einen eine Ergänzung zu den Temperaturbohrungen im Wirtsgestein und erfassen im Prinzip die Temperatur am Übergang zum Gebirge. Zum anderen dienen sie zur Temperaturkompensation für die Dehnungsfasern, um den Temperatureinfluss auf die Signale der Dehnungsfaser zu eliminieren. Weitere Details zum faseroptischen Messsystem sind in MODERN2020 (2019c) gegeben.



Die Temperaturfasern sind zum einen eine Ergänzung zu den Temperaturbohrungen im Wirtsgestein und erfassen im Prinzip die Temperatur am Übergang zum Gebirge. Zum anderen dienen sie zur Temperaturkompensation für die Dehnungsfasern, um den Temperatureinfluss auf die Signale der Dehnungsfaser zu eliminieren. Weitere Details zum faseroptischen Messsystem sind in MODERN2020 (2019c) gegeben.

Abb. 5.14:
Schemazeichnung an dem Querschnitt eines
Messhorizontes

Darüber hinaus werden auf der Außenseite des Liners noch lokale Drucksensoren in das Material eingelassen (in der Industrie als „eingebettete Sensoren“ bekannt). Mit diesen Drucksensoren wird die Belastung durch das aufkriechende Gebirge erfasst. Aus der Geschwindigkeit der Belastungssteigerung kann auf die Konvergenz bzw. auf die Kriechrate des Wirtsgesteins geschlossen werden. Während die faseroptischen Sensoren die gesamte Längsrichtung des Liners überstreichen, werden die eingebetteten Drucksensoren in vier verschiedenen Höhen (als MH = Messhorizonte gekennzeichnet) an den Liner angebracht. Drei Messhorizonte sind im Bereich der Behälter angebracht, während der vierte kurz unterhalb des Dichtelementes angebracht ist. Letzterer soll Informationen liefern, welche Druck von außen auf das Dichtelement einwirkt, ohne dass dort direkt Sensoren implementiert sind. Im Gegensatz zu den Monitoring-Bohrlöchern wird in diesem Monitoring-Konzept auf die Implementierung von Sensoren innerhalb des Dichtelementes verzichtet. Der Grund dafür ist, dass bei einem Opfer-Bohrloch noch vier weitere senkrechte Bohrungen abgeteuft werden, die zur Implementierung von TDR (Time Domain Reflectometry) oder elektrischen Tomographie-Systemen (grün in Abb. 5.13) dienen, mit denen der Wassergehalt bzw. die sich ändernde Wassersättigung innerhalb des Dichtelementes verfolgt werden kann. Da dieses nicht invasive Verfahren auf Veränderung der elektrischen Eigenschaften des Materials reagiert, ist jede Materialveränderung in Form von eingebauten Sensoren ein potenzieller Störfaktor. Die Ergebnisse dieses räumlichen Verfahrens können dann mit den Ergebnissen aus den lokalen Messungen in den Monitoring-Bohrlöchern verglichen und ggf. aneinander justiert werden.

An der Innenseite des Liners sind, ebenfalls auf Höhe der Messhorizonte, Drucksensoren zur Erfassung des Gasinnendruckes vorgesehen. Durch thermische Expansion sowohl der Sandminerale als auch in erster Linie des Fluides in dem Porenraum ist die Entwicklung eines Innendruckes zu erwarten, der sich prinzipiell auch gut im Vorfeld berechnen lässt. Es ist zu erwarten, dass der Wasserdruck außerhalb des Liners deutlich unterschiedliche Werte annehmen wird als der durch das komprimierbare Gas erzeugte Innendruck. Sollte durch eine unerwartete Lochfraßkorrosion eine undichte Stelle am Liner entstehen, so wird in dem Moment ein Druckausgleich erfolgen, der sich an den Messsignalen erkennen lässt.

5.2.3 Konzept für Versatz

Im Verfüll- und Verschlusskonzept und nicht zuletzt im Nachweiskonzept spielt der Versatz eine nicht unbedeutende Rolle. Auf der einen Seite hat er eine unterstützende Funktion für die Widerlager in den Bohrlochverschlüssen zum einen durch sein Eigengewicht und zum anderen durch die Bildung eines Kraftschlusses mit dem Gebirge in vertikaler Richtung durch den sich entwickelnden Quelldruck und später auch durch das Aufkriechen des Gebirges. Auf der anderen Seite stellt der Versatz auch einen Teil des Barrierensystems innerhalb der Strecken dar, dem speziell langfristig auch eine Dichtfunktion zugewiesen wird (Jobmann et al. 2017).

Zur Bestimmung der Parameter, die bei der Verschlusskomponente „Versatz“ für ein Monitoring in Frage kommen, ist ein analoges Parameter-Screening-Verfahren anzuwenden wie in Kapitel 4.4 für den Bohrlochverschluss erläutert. Auf eine erneute detailliertere Beschreibung des Durchlaufs wird an dieser Stelle verzichtet. Die Parameter, die sich aus diesem Verfahren ergeben, sind

1. der Quelldruck
2. der Wassergehalt (Sättigung)
3. die Ausbaubelastung
4. der vertikale Sohleninnendruck
5. die Temperatur

Analog zum Bohrlochverschluss werden auch im Versatz keine Sensoren heterogen verteilt sondern an sogenannten Messquerschnitten gebündelt, um keine potenziellen Fließwege in Migrationsrichtung längs der Streckenachse zu erzeugen. Abb. 5.15 zeigt das Schema eines solchen Messquerschnittes. Dieser besteht aus mehreren Extensometern, die in verschiedenen Raumrichtungen orientiert sein sollen und die Bewegungen des Wirtsgesteins erfassen sollen. Die eingezeichneten Raumrichtungen sind nur illustrativ zu verstehen, da die genaue Orientierung den vorgefundenen Spannungsrichtungen geschuldet sein muss.

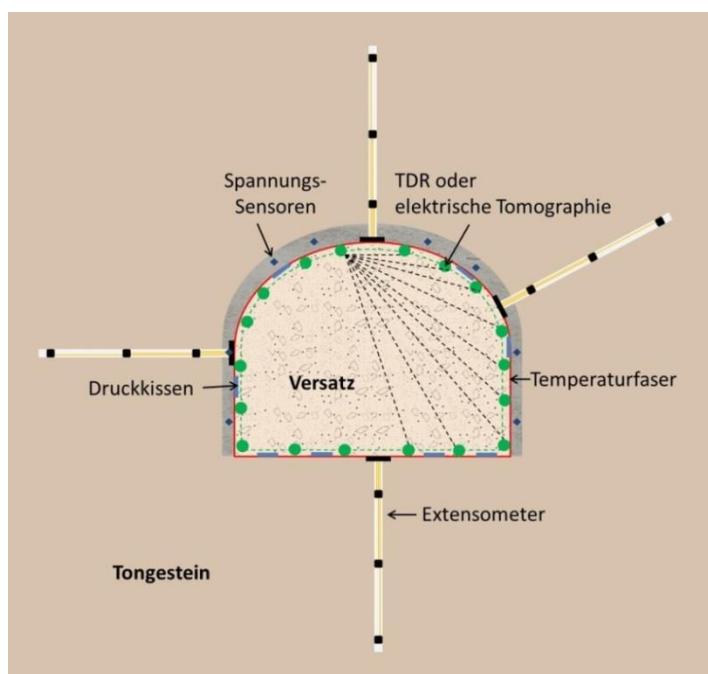


Abb. 5.15:
Schemazeichnung eines Messquerschnittes
für das Monitoring relevanter Parameter in
Bezug zum Streckenversatz

Durch die Bewegung des Gebirges wird der Ausbau zunehmend belastet. Diese Belastung könnte beispielsweise durch Sensoren erfasst werden, die in den angenommenen Spritzbeton eingebettet werden (blaue Raute in Abb. 5.15). An der Innenseite des Ausbaus wird sich im Laufe der Zeit ebenfalls ein Druck einstellen, der durch das Quellen des Tonmaterials hervorgerufen wird. Dieser Druck kann mit flächig ausgebildeten Druckkissen (blaue Rechtecke) entlang der Kontur erfasst werden. Die Druckkissen auf der Sohle erfassen dabei zunächst das Eigengewicht des Versatzes. Dieses unterstützt unmittelbar die Funktion der Widerlager der Bohrlochverschlüsse. Der Beginn einer Aufsättigung und damit die Entwicklung eines Quelldruckes wird erst nach einiger Zeit erfolgen. Die Aufsättigung zu verfolgen ist die Aufgabe der TDR Messung oder der elektrischen Tomographie (grüne Punkte). Da diese Art der Messung auf den elektrischen Eigenschaften, speziell der Leitfähigkeit, beruht, ist es ggf. notwendig, diese Messungen nicht direkt neben den anderen implementierten Sensoren durchzuführen, sondern in einer kleinen Entfernung. Die Entwicklung der Temperatur kann mit Temperaturfasern (rote Linie), die entlang der Kontur gespannt sind, erfasst werden.

Die Lage der Messquerschnitte ist in Abb. 5.2 zu dargestellt. Vorgesehen sind fünf Messquerschnitte pro Monitoring-Feld. Im ersten Monitoring-Feld befinden sich zwei der Messquerschnitte innerhalb der Test-Strecke, einer in der Mitte des Feldes und die anderen beiden in der äußeren Strecke am anderen Ende des Feldes. Alle Messquerschnitte sind in der Nachbarschaft von Monitoring-Bohrlöchern angeordnet. Ggf. kann dadurch die Geräteanzahl bezüglich Stromversorgung und kabelloser Datenübertragung minimiert werden. Vier der fünf Messquerschnitte sind an den äußeren Rändern des Feldes bzw. der Strecken angeordnet. Das hat den Vorteil, dass bei eventuell notwendigen Korrekturmaßnahmen der Aufwand, diese Messquerschnitte wieder zugänglich zu machen, minimal ist. Gleichzeitig werden durch diese Anordnung repräsentative Feldesteile abgedeckt.

5.2.4 Konzept für Migrationssperren

Gemäß der Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) besteht die Anforderung, jedes einzelne Einlagerungsfeld unmittelbar nach Ende der Befüllung gegenüber dem restlichen Grubengebäude zu versiegeln. Dieser Anforderung wird durch die Errichtung von Migrationssperren Rechnung getragen (vgl. Kap. 4.2.2). Die Migrationssperren sind ein Teil des geotechnischen (Multi-) Barrierensystems.

Zur Bestimmung der Parameter, die bei der Verschlusskomponente „Migrationssperre“ für ein Monitoring in Frage kommen, ist auch hier wieder ein analoges Parameter-Screening-Verfahren anzuwenden wie in Kapitel 4.4 für den Bohrlochverschluss erläutert. Auf eine erneute detailliere Beschreibung des Durchlaufs wird an dieser Stelle verzichtet. Die Parameter, die sich aus diesem Verfahren ergeben, sind

1. der Quelldruck
2. der Radialdruck
3. der Wassergehalt (Sättigung)
4. der Porenwasserdruck
5. die Temperatur

Abb. 5.16 zeigt schematisch die Konzeption für ein Monitoring-System im Bereich einer Migrationssperre. Analog zum Bohrlochverschluss und zum Versatz werden auch hier keine Sensoren heterogen verteilt sondern an sogenannten Messquerschnitten (blaue Linien) gebündelt, um keine potenziellen Fließwege in Migrationsrichtung längs der Streckenachse zu erzeugen. Für die Berechnungen zum Dichtheitsnachweis wird die summarische Breite der Messquerschnitte von der Länge des Dichtelementes abgezogen. Die Konzeption besteht aus Drucksensoren (Druckkissen) an beiden Widerlagern (unten links in Abb. 5.16), die dazu dienen, den sich aufbauenden Quelldruck im Dichtelement in axialer Streckenrichtung zu erfassen. Analoge Drucksensoren sind in den Messprofilen an Firste, Stoß und Sohle positioniert. Die Erfassung des Druckes in radialer Richtung erlaubt, nach Abzug des Eigenge-

wichtes des Bentonits in vertikaler Richtung und Vergleich mit dem Druck in axialer Richtung, eine Abschätzung des Druckaufbaus durch die Konvergenz des Wirtsgesteins.

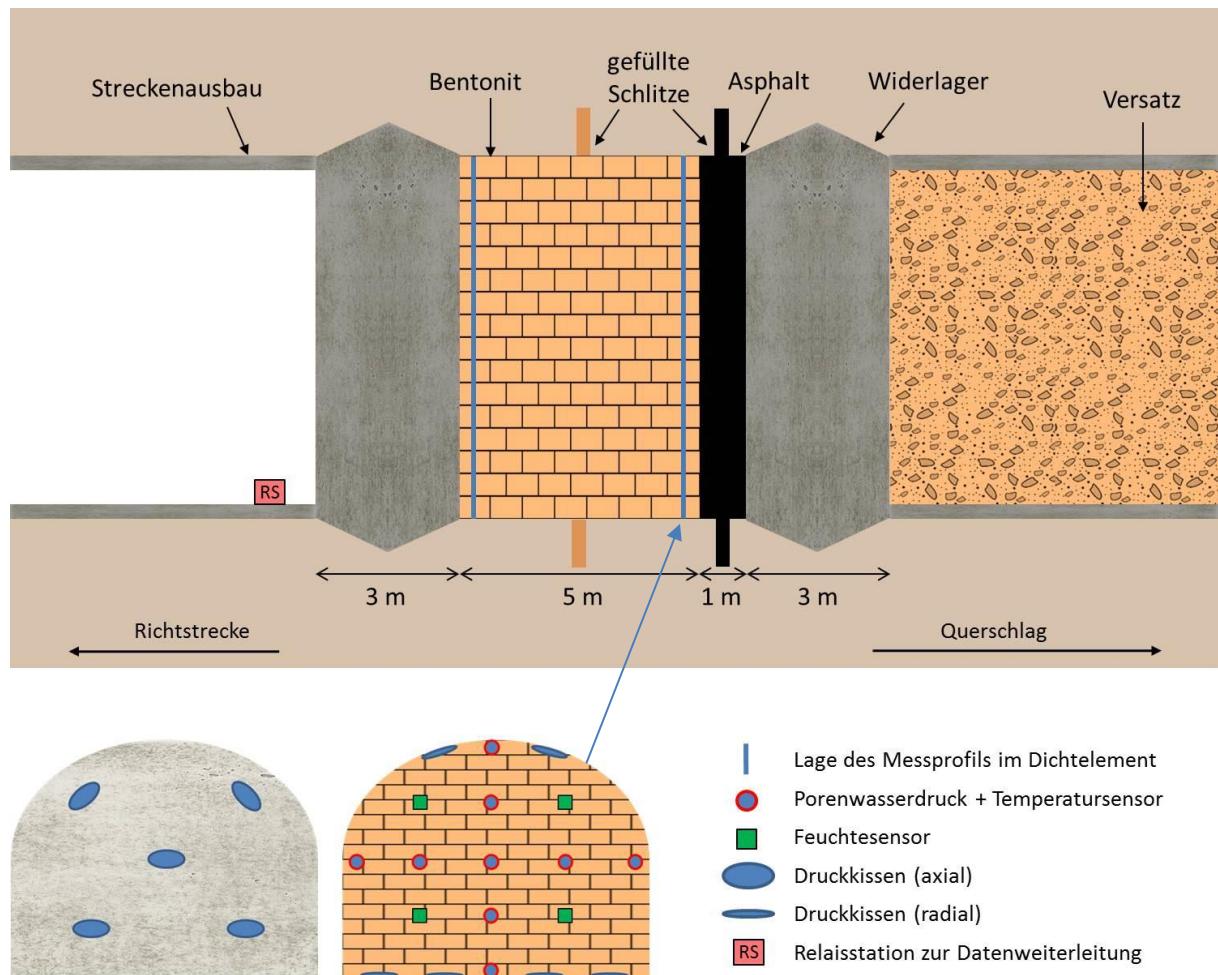


Abb. 5.16: Schemazeichnung zum Konzept für das Monitoring relevanter Parameter im Bereich einer Migrationssperre

Innerhalb des Messquerschnittes sind in symmetrischer Anordnung Feuchte-, Porenwasserdruck- und Temperatursensoren angeordnet. Modellhafte Prozessanalysen zur thermischen Entwicklung haben gezeigt, dass im Bereich der Migrationssperren nur mit einer geringfügigen Temperaturerhöhung von wenigen Kelvin zu rechnen ist (vgl. Anhang A2.2). Nichtsdestotrotz erlaubt die langfristige Erfassung der Temperatur in Zusammenhang mit einer Modellierung eine Bestimmung der großräumigen mittleren Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteinskörpers. Dadurch wird es möglich, die im Vorfeld durchgeföhrten Auslegungsberechnungen zum Design des Endlagers zu verifizieren und indirekt auch die Einhaltung des Temperatur-Kriteriums zu überprüfen. Die Erfassung der hydraulischen Parameter erlaubt die Verifizierung des geotechnischen Dichtheitsnachweises zum Bentonit-basierten Dichtelement.

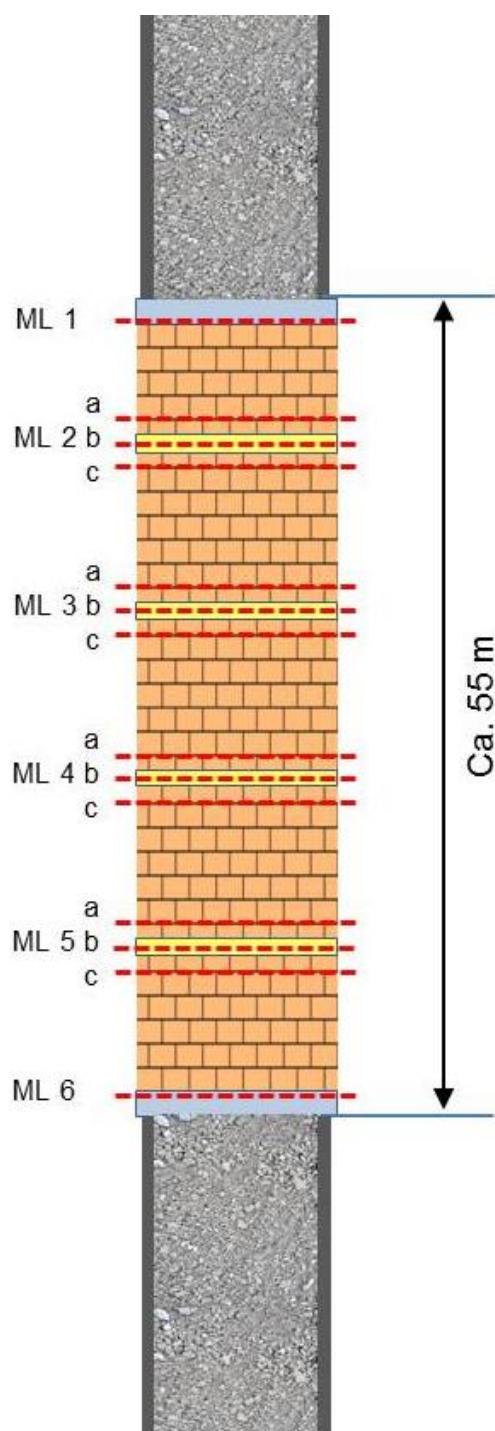
Sämtliche Sensoren arbeiten auf Basis einer kabellosen Datenübertragung und senden ihre Daten zu einer Empfangs- und Relaisstation, die im Bereich des freien Zugangs zur Migrationssperre in Richtung der Richtstrecken angeordnet ist.

5.2.5 Konzept für Schachtverschlüsse

Da es sich bei den Schächten um die Tageszugänge handelt, stellen die Schachtverschlüsse eine wesentliche Barriere dar. Gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept durchörtern die Schächte nicht nur das überliegende Gebirge, sondern auch einen Teil des einschluss-

wirksamen Gebirgsbereiches (ewG). Das Schachtverschlusskonzept ist so konzipiert, dass ein mächtiges Verschlussbauwerk noch innerhalb des ewG liegt (vgl. Kapitel 4, Abb. 4.6). Das Monitoring-Konzept für den Schachtverschluss wird auf dieses „Sandwich“-Element beschränkt, da dies für den auf dem ewG-Konzept beruhenden Sicherheitsnachweis entscheidend ist.

Für die Konzeptentwicklung zu einem Monitoring dieses Verschlussbauwerkes sind die zwischengeschalteten Sandelemente ein guter Ansatzpunkt. Sie haben keine Dichtfunktion, so dass der Einbau von Sensoren keine potenzielle Störung ihrer Funktion bedeutet. Analog zu dem Monitoring-Konzept für die übrigen Verschlussbauwerke wird auch hier wieder von einem Horizont-basierten Konzept Gebrauch gemacht. Das Konzept ist in Abb. 5.17 schematisch dargestellt. Das Verschlussbauwerk inklusive der Filterschichten oben und unten hat eine Länge von etwa 55 m. Die einzelnen Bentonit-Segmente haben jeweils eine Mächtigkeit von etwa 10 m. Die Äquipotenzialsegmente haben eine Mächtigkeit von etwa 0,5 m.



Es wird von insgesamt 6 Messhorizonten (MH) ausgegangen. Zwei davon befinden sich in den Filterschichten oberhalb und unterhalb des Verschlussbauwerkes. Die übrigen vier sind an die Lage der Äquipotenzialsegmente gekoppelt, wobei jede dieser vier Messebenen sich nochmals in drei Ebenen (rote gestrichelte Linien) aufteilt. Ein Messhorizont liegt zentral innerhalb eines jeden Äquipotenzialsegments. Dieser Messhorizont ist mit dem Buchstaben b bezeichnet. Die beiden anderen Messhorizonte, mit den Buchstaben a und c bezeichnet, liegen etwa 50 cm innerhalb der beiden oben und unten anliegenden Bentonit-Segmenten.

Die Parameter, die sich für dieses Verschlussbauwerk gemäß dem Screening-Verfahren ergeben, sind

1. Quelldruck (nur Bentonit-Segmente)
2. Radialdruck (nur Bentonit-Segmente)
3. Wassergehalt/Sättigung (nur Bentonit-Segmente)
4. der Porenwasserdruck (alle Segmente)

Mit den ermittelten Parametern gestalten sich die einzelnen Messhorizonte wie in Abb. 5.18 gezeigt.

Abb. 5.17:
Schemazeichnung zum Konzept für das Monitoring relevanter Parameter im Bereich des „Sandwich“-Verschlussbauwerkes

In Abb. 5.18 links ist die Konfiguration für die Äquipotenzialsegmente dargestellt. Bezuglich der Sensorik enthält dieser Messhorizont lediglich Porenwasserdruck-Sensoren, da es hier nur um die Potenzialverteilung geht bzw. um das Vorhandensein von Flüssigkeit oder nicht. Rechts ist die Konfiguration für die Monitoring-Level in den Bentonit-Segmenten gezeigt. Der Aufbau ist analog dem Messhorizont innerhalb des Bentonitelementes des Bohrlochverschlusses aufgebaut.

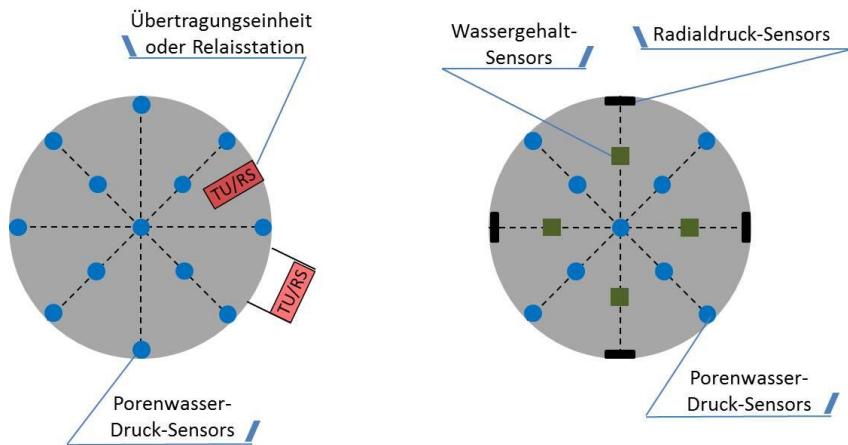


Abb. 5.18:
Prinzipieller Aufbau der
Monitoring-Level

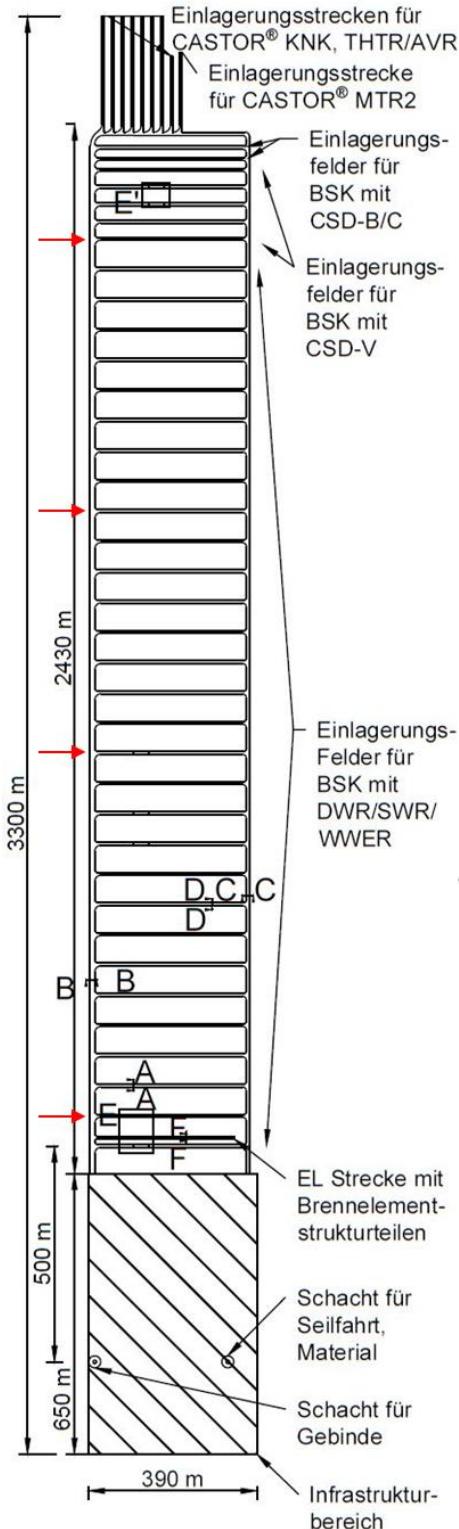
Hier ist die Entwicklung der Aufsättigung mit Flüssigkeit und der damit verbundenen Druckentwicklung von Bedeutung. Ein Vergleich der Porendruckentwicklung aller Sensoren in diesem Sandwich-Bauwerk erlaubt es, den Fortschritt der Aufsättigung zu analysieren und Hinweise auf die Richtung der Flüssigkeitsbewegung zu erhalten. Die Porendruckunterschiede entlang der vertikalen Achse nach vollständiger Aufsättigung liefern nicht nur Informationen über die Flussrichtung, sondern geben auch Hinweise auf die Permeabilität (Leistungsziel), die langfristig in dem Verschlussbauwerk erreicht werden kann (vgl. Kapitel 4.4.1).

6 Monitoring-Konzept für ein Endlager im Steinsalz

Die übergeordneten Zielsetzungen, die im Kapitel 5 abgesprochen wurden, gelten uneingeschränkt auch für ein Endlager in einer Salzformation.

6.1 Generelles Konzept

Analog zu dem generellen Monitoring-Konzept für ein Endlager in einer Tonformation (vgl. Kap. 5) steht auch bei dem Konzept für ein Endlager im Salz die Repräsentativität an erster Stelle. Abb. 6.1 zeigt die Konfiguration des Grubengebäudes für ein Endlager in einer steilen Salzformation.



Dieses Grubengebäude wurde im Rahmen des von der BGE finanzierten Projektes RESUS unter Berücksichtigung einer Grenztemperatur von 100°C ausgelegt (BGETEC 2019). Die Einlagerung ist dabei in 300 m tiefen vertikalen Einlagerungsbohrlöchern vorgesehen. Mit Blick auf die große Tiefe der Einlagerungsbohrlöcher wurden für dieses Grubengebäude im Gegensatz zu dem Tonkonzept keine Einlagerungsfelder, sondern lediglich Einlagerungsstrecken bzw. Bohrlochüberführungsstrecken vorgesehen. Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, d.h., die Strecken, die am weitesten von den Tageszugängen entfernt sind, werden zuerst befüllt und versetzt, so dass sich das offen zu haltende Grubengebäude Strecke um Strecke verkleinert.

Vier der Strecken wurden als repräsentative Monitoring-Strecken selektiert. Sie befinden sich nahe der Ränder des Grubengebäudes sowie in dessen Mitte und sind in Abb. 6.1 durch rote Pfeile markiert.

Die erste Monitoring-Strecke im Bereich der CSD-V Behälter wird bereits in der Anfangsphase befüllt und bietet damit die Möglichkeit, die während des Endlagerbetriebs für das Monitoring zur Verfügung stehende Zeit zu maximieren. Gemäß den derzeitigen Sicherheitsanforderungen muss jedes Einlagerungsfeld (in diesem Fall sinngemäß „Einlagerungsstrecke“) gegenüber dem Rest der untertägigen Hohlräume so schnell wie möglich versetzt bzw. verschlossen werden. Dies ermöglicht prinzipiell die Gewinnung von Monitoring-Daten aus einer bereits verfüllten und verschlossenen Einlagerungsstrecke während des mehrere Jahrzehnte dauernden Endlagerbetriebs. Im Prinzip entspricht dies, in kleinem Rahmen, einem Monitoring in der Nachbetriebsphase nach Verschluss des Endlagers. Die Ergebnisse des Monitoring werden sorgsam aufgezeichnet, und bevor weitere Monitoringaktivitäten an der nächsten Monitoring-Strecke aufgenommen werden, wird eine standardisierte Beurteilung des an der ersten Strecke durchgeföhrten Monitoring erstellt und analysiert. Diese Analyse wird als Meilenstein betrachtet.

Abb. 6.1:
Konfiguration des Grubengebäudes (Draufsicht) für ein Endlager in einer steilen Salzformation

Die Ergebnisse dieser Analyse können als Unterstützung der Entscheidung, ob das Monitoringkonzept aktualisiert und/oder verbessert werden muss, dienen. Darauf basierend kann die Monitoringstrategie für die nächste Einlagerungsstrecke festgelegt werden. Diese sukzessive Vorgehensweise ermöglicht es, Fehler zu minimieren und das Systemverständnis zu verbessern.

Analog zum Tonkonzept wird auch hier eine „heiße“ Test-Phase der routinemäßigen Einlagerung vorangestellt. Dazu werden die ersten drei Einlagerungsbohrlöcher der ersten Monitoring-Strecke zum Testbereich erklärt. In Abb. 6.2 ist eine Großaufnahme der ersten Monitoring-Strecke dargestellt. Der „heiße“ Testbereich ist grün markiert.

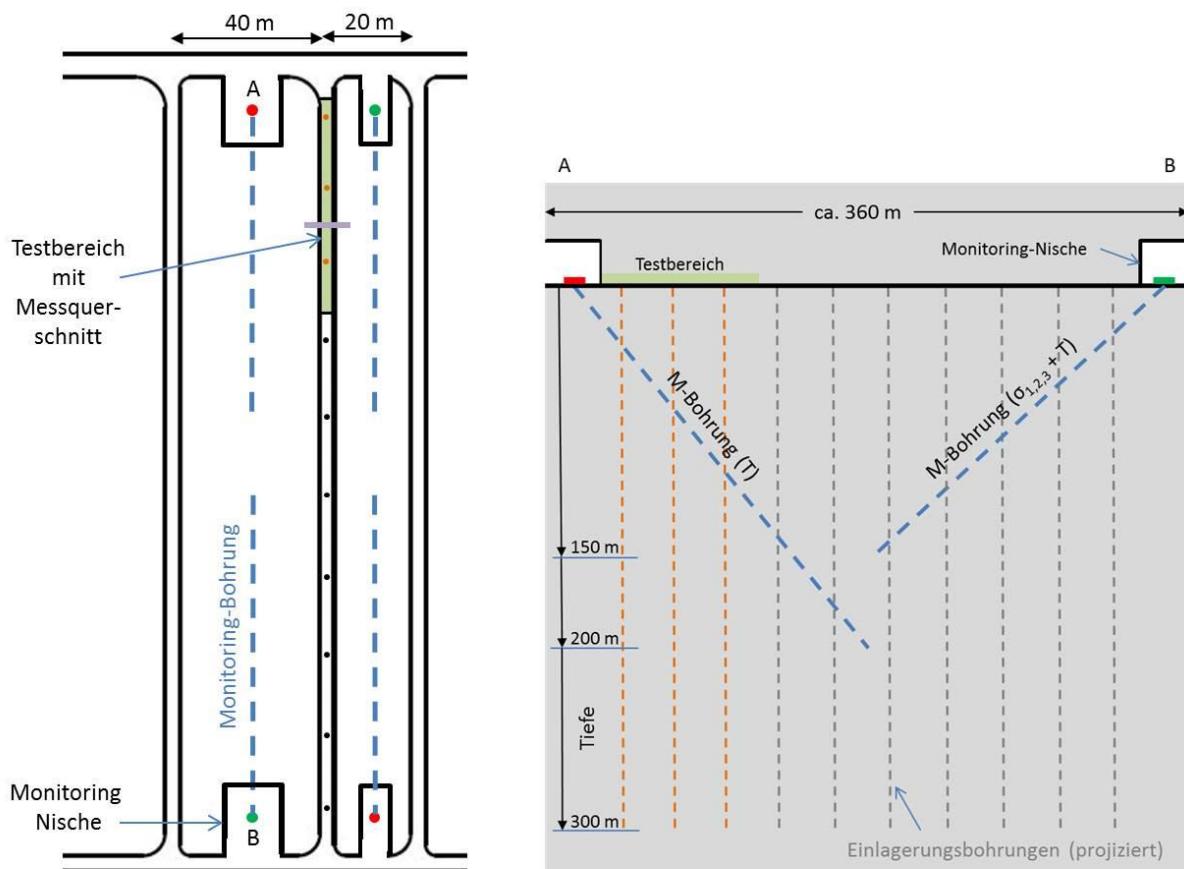


Abb. 6.2: Draufsicht und vertikales Profil im Bereich der ersten Monitoring-Strecke mit Testbereich

Bevor der erste Abfallbehälter im Testbereich eingelagert wird, werden an beiden Zugängen zu der Monitoring-Strecke jeweils links und rechts Monitoring-Nischen aufgefahren. Aus diesen Nischen werden in Winkeln von etwa 40° - 45° Monitoring Bohrungen bis in eine Tiefe von 150 m bzw. 200 m gestoßen (s. Abb. 6.2). Gemäß dem Sicherheitsnachweis spielen zum einen die Integrität des Wirtsgesteins und zum anderen die Integrität und Dichtheit des geotechnischen Barrierensystems die entscheidende Rolle. Dies gilt besonders für die Kompaktion des Salzgrusversatzes, die langfristig den sicheren Einschluss nachweislich erbringen soll. Parameter, deren Beobachtung charakteristische Informationen liefern sind die Temperaturen im Umfeld der eingelagerten Abfälle und die dadurch induzierten Spannungen und Deformationen im Gebirge, letztere insbesondere im Bereich der versetzten Strecken. In den genannten Monitoring-Bohrungen links und rechts der Monitoring-Strecke sind demzufolge Temperatur (T) - und Spannungsmessungen ($\sigma_{1,2,3}$), letztere in mehreren Raumrichtungen, vorgesehen. Die Bohranksatzpunkte für die Temperaturbohrungen sind mit einem roten

Punkt, die Bohrungsansatzpunkte für die Spannungs- und Temperaturmessungen mit einem grünen Punkt gekennzeichnet. Durch die unterschiedliche Lage der Bohrungen lässt sich ein dreidimensionales Bild, vor allem der Temperaturoberflächenausbreitung und der dadurch induzierten Spannungen im Wirtsgestein, konstruieren mit dessen Hilfe sich die Ergebnisse der im Vorfeld durchgeführten Sicherheitsanalysen verifizieren lassen. Darüber hinaus ist innerhalb des Testbereiches die Implementierung eines Messquerschnittes innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecke zur Beobachtung der Versatzkompaktion vorgesehen. Nachdem diese erste Monitoring-Strecke mit Salzgrus versetzt worden ist, ist eine "Warteperiode" vorgesehen, in der eine kontinuierliche Bewertung der Monitoring-Ergebnisse aus dem Testbereich stattfindet. Als erster Ansatz erscheint ein Zeitraum von mindestens einem Jahr als angemessen. Die Monitoring-Ergebnisse, die einschließlich dieser "Warteperiode" erhalten werden, gelten als wesentlicher Input für die Entscheidung, einer weiteren kontinuierlichen Abfalleinlagerung grünes Licht zu geben.

Bezüglich des geotechnischen Barrierensystems sei an dieser Stelle gesagt, dass laut aktuellem Verschlusskonzept kein expliziter Bohrlochverschluss vorgesehen ist. In der Bohrlochüberfahrungsstrecke wird die Kompaktion des Salzgrusversatzes als entscheidend angesehen (Müller-Hoeppe et al. 2012). Aufgrund des Nichtvorhandensein eines Bohrlochverschlusselementes und der großen Tiefe der Einlagerungsbohrlöcher ist ein Dummy-System unter Verwendung elektrischer Erhitzer, wie es in dem Tonkonzept für den dortigen Bohrlochverschluss geplant ist (vgl. Abb. 5.2 und Abb. 5.3), für das Salzkonzept nicht vorgesehen.

Die Ausgestaltung der weiteren Monitoring-Strecken gestaltet sich ähnlich der ersten Strecke mit dem Unterschied, dass es keinen Testbereich gibt, das die Messquerschnitte deswegen zu beiden Seiten symmetrisch jeweils nach dem dritten Einlagerungsbohrloch angeordnet sind und dass die Abstände der Strecken andere sind (Abb. 6.3).

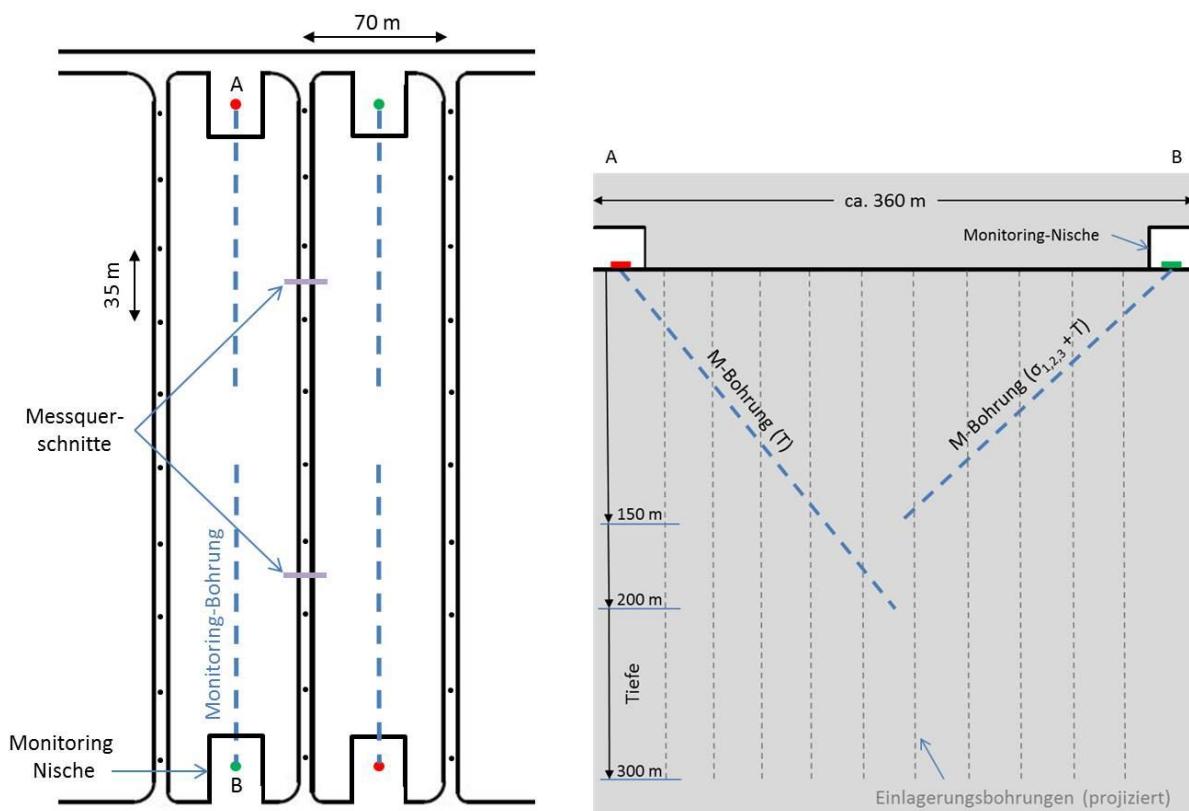


Abb. 6.3: Draufsicht und vertikales Profil im Bereich der Monitoring-Strecken

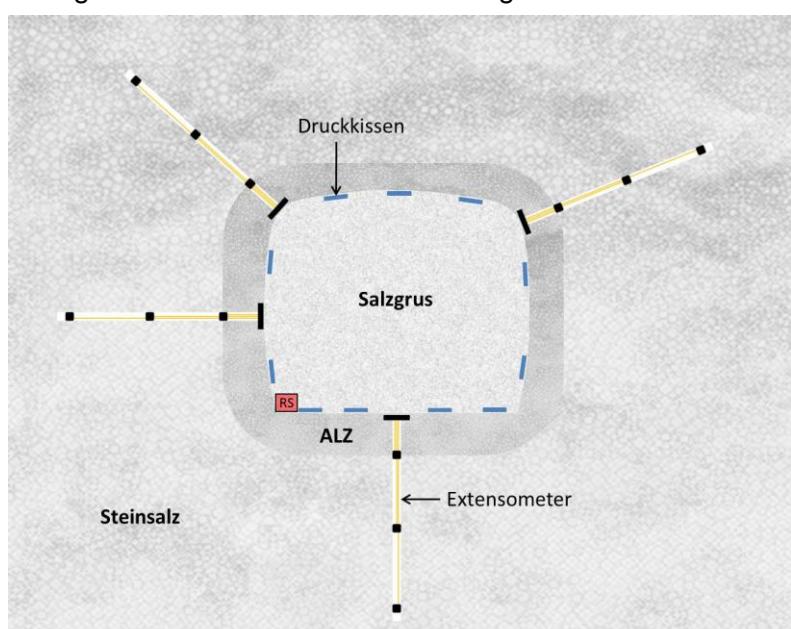
6.2 Spezifische Konzepte

Im Folgenden werden spezifische Monitoring-Konzepte für die Messquerschnitte in den Strecken und für die Strecken- und Schachtverschlüsse beschrieben.

6.2.1 Konzept für Versatz

Gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept übernimmt der Versatz auf lange Sicht die Abdichtfunktion in den Strecken. Damit der Versatz diese Sicherheitsfunktion erfüllen kann, bedarf es einer ausreichenden Kompaktion. Dies geschieht durch den Prozess der Konvergenz bzw. der Gebirgsdeformation. Der Parameter, mit dem dieser Prozess in seinem Verlauf charakterisiert werden kann, ist der Druck im Versatz bzw. der Druck an der Streckenkontur sowie die Deformation des Gebirges in der Umgebung der Strecke.

Analog zum Tonkonzept werden im Versatz längs der Bohrlochüberfahrungsstrecke keine Sensoren heterogen verteilt sondern an sogenannten Messquerschnitten gebündelt, um keine potenziellen Fließwege in Migrationsrichtung längs der Streckenachse zu erzeugen. Abb. 6.4 zeigt das Schema eines solchen Messquerschnittes. Dieser besteht aus mehreren Extensometern, die in verschiedenen Raumrichtungen orientiert sind und die Bewegungen des Wirtgestein erfassen sollen. Die eingezeichneten Raumrichtungen sind nur illustrativ zu verstehen, da die genaue Orientierung den vorgefundenen Spannungsrichtungen geschuldet sein muss. Die Druckkissen an der Streckenkontur sind zudem noch mit Sensoren zur Temperaturmessung ausgestattet, da sowohl der Kompaktionsprozess des Salzgruses als auch die Gebirgsdeformationen temperaturabhängig sind.



verstehen, da die genaue Orientierung den vorgefundenen Spannungsrichtungen geschuldet sein muss. Die Druckkissen an der Streckenkontur sind zudem noch mit Sensoren zur Temperaturmessung ausgestattet, da sowohl der Kompaktionsprozess des Salzgruses als auch die Gebirgsdeformationen temperaturabhängig sind.

Abb. 6.4:
Schemazeichnung eines
Messquerschnittes für das Monitoring
relevanter Parameter in Bezug zum
Versatz in den Bohrlochüberfahrungs-
strecken

6.2.2 Konzept für Streckenverschlüsse im Zugangsbereich

Im Gegensatz zu dem Versatz übernehmen die Schacht- und Streckenverschlüsse eine sofortige Abdichtfunktion. Das prinzipielle Verschlussystem im Schacht und Zugangsbereich ist in Abb. 6.5 (oben) dargestellt. Im Schachtverschluss übernehmen 4 verschiedene Dichtelemente in diversitär redundant Weise die Abdichtfunktion und sind größtenteils durch Filterschichten getrennt. In Ergänzung dazu ist der Infrastrukturbereich gegenüber dem Eingangsgebiet durch ein zweigeteiltes Dichtelement bestehend aus Sorelbeton abgedichtet (Abb. 6.5, unten). Der Bereich zwischen dem Schachtverschluss und dem Streckenverschluss innerhalb des Infrastrukturbereiches wird mit einem angefeuchteten Salzgrus-Bentonit-Gemisch versetzt. Durch die Anfeuchtung werden zwei Effekte erzielt. Zum einen erhöht sich die Kompaktionsgeschwindigkeit des Salzgruses aufgrund der verringerten Reibung und zum anderen verstopft das Bentonitmehl den Porenraum im Salzgrus. Somit ist zu einem deutlich früheren Zeitpunkt mit einer signifikanten Kompaktion und damit Abdichtfunktion zu rechnen. Zum Zwecke des Monitoring werden mindestens drei Messquerschnitte gemäß Abb. 6.4 installiert (rote Linien in Abb. 6.5, oben).

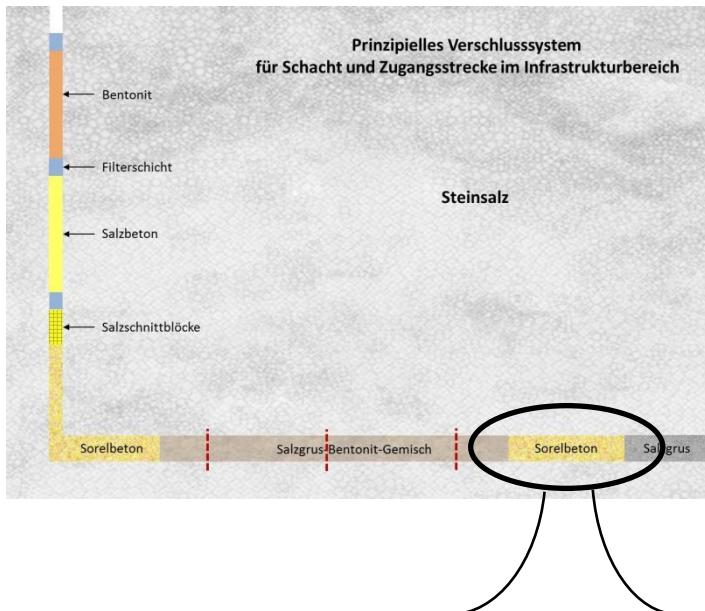
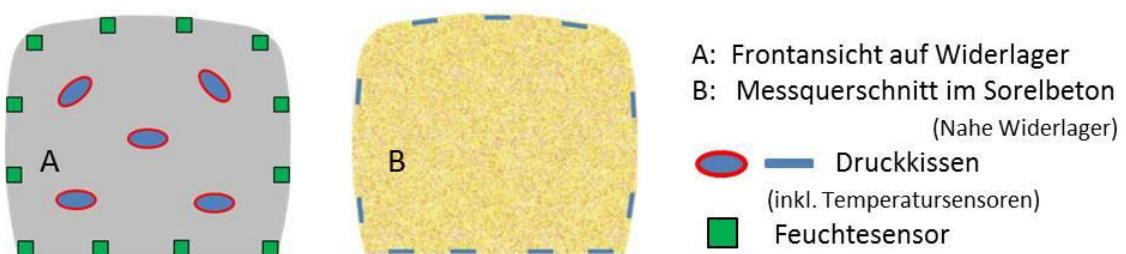
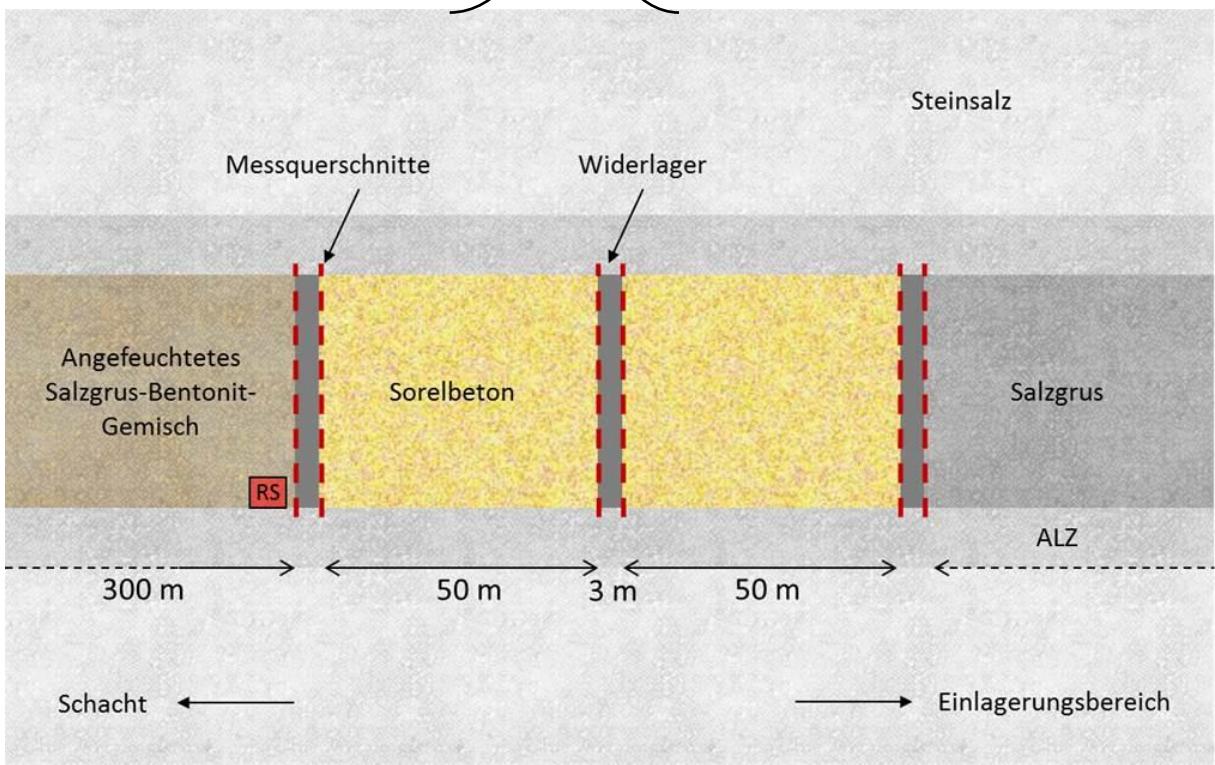


Abb. 6.5:
 Links: Schematisiertes Verschlussystem im Schacht und Zugangsbereich
 Unten: Verschlusselement am Übergang von Infrastrukturbereich zum Einlagerungsbereich mit Lage und Ausstattung von Messquerschnitten



A: Frontansicht auf Widerlager
 B: Messquerschnitt im Sorelbeton
 (Nahe Widerlager)
 ● Druckkissen
 (inkl. Temperatursensoren)
 ■ Feuchtesensor

Die Dichtelemente aus Sorelbeton werden schon aus Gründen der bautechnischen Machbarkeit bei der großen Länge zweigeteilt errichtet, wobei beide Teile durch Widerlager getrennt sind bzw. eingefasst werden. Diese bautechnisch bedingten Trennebenen werden

genutzt, um Monitoring-Systeme zu installieren. Als relevante Parameter wurden der Druck an der Kontaktzone zwischen Dichtelement und Gebirge und auf der Stirnfläche der Widerlager sowie die Feuchteentwicklung im Bereich der Kontaktzone identifiziert (Abb. 6.5, unten). Speziell die Drucksensoren sind zusätzlich mit Temperatursensoren ausgestattet. Neben ihrer Aufgabe zur Temperaturkompensation der Drucksignale dienen sie in erster Linie der Beobachtung des Abbindeprozesses innerhalb des Sorelbetons. Eine signifikante Temperaturzunahme aufgrund der eingelagerten Abfälle ist wegen der großen Entfernung zu den Abfällen nicht zu erwarten. Die erfassten Daten an den einzelnen Sensoren werden, wie auch in allen anderen Fällen, kabellos übertragen, ggf. unter Nutzung von Relaisstationen [RS].

6.2.3 Konzept für Schachtverschluss

Abb. 6.6 (links) zeigt einen Überblick über das Verschlusskonzept zusammen mit den horizontalen Messhorizonten. Mit Ausnahme des Bentonit-Dichtelementes sind die Messhorizonten an den Übergangsstellen der einzelnen Verschlusselemente positioniert. Analog zum Bohrlochverschluss im Ton-Konzept sind im Bentonit-Dichtelement sechs Messhorizonte vorgesehen, zwei in der Mitte des Dichtelements, zwei am oberen Ende und zwei am unteren Ende des Elements. Die äußersten Messhorizonte befinden sich an beiden Seiten ein paar Zentimeter innerhalb des Dichtelements, um Oberflächeneffekte zu vermeiden.

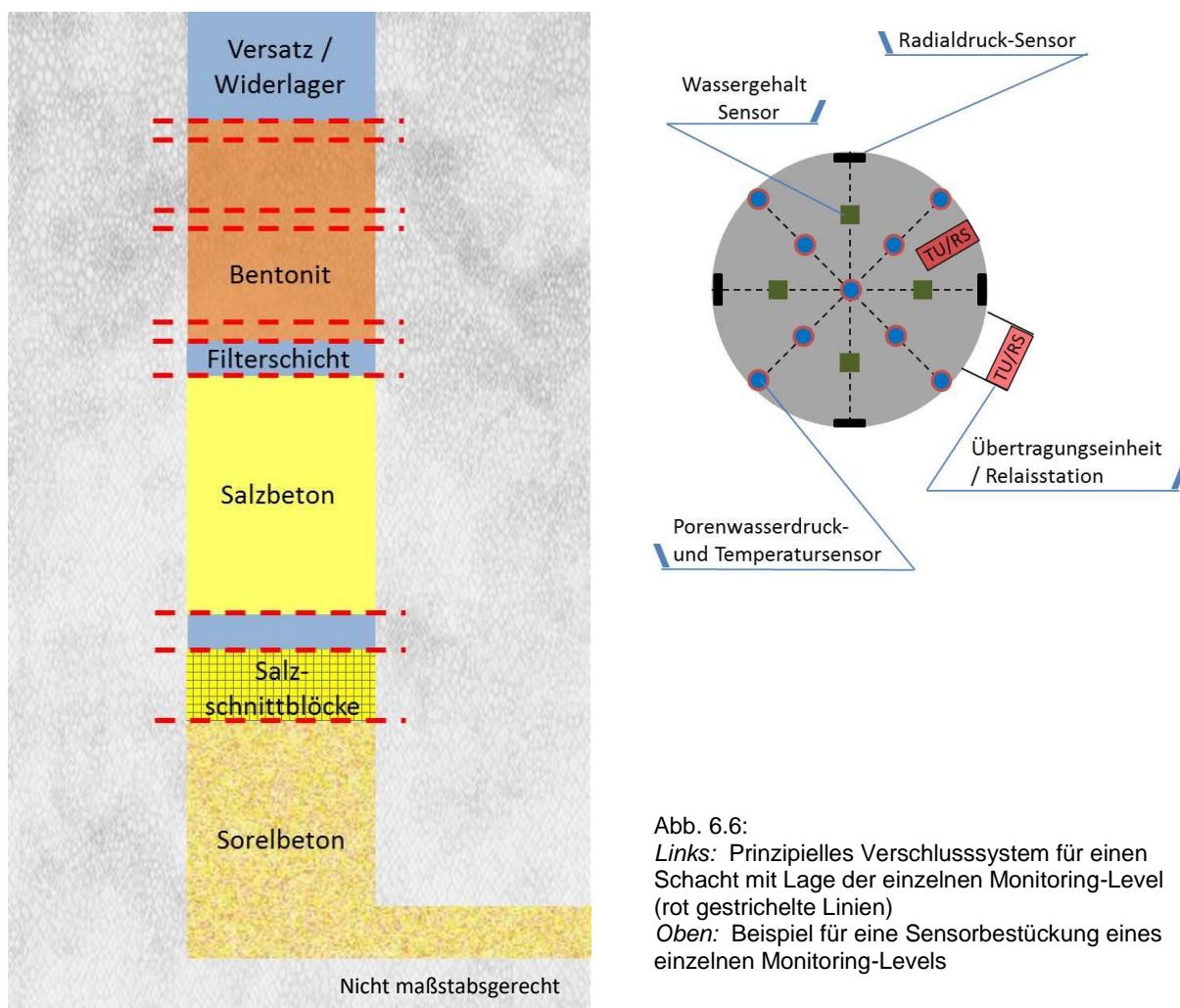


Abb. 6.6:
Links: Prinzipielles Verschlusskonzept für einen Schacht mit Lage der einzelnen Monitoring-Level (rot gestrichelte Linien)
Oben: Beispiel für eine Sensorbestückung eines einzelnen Monitoring-Levels

Der Abstand zwischen den Messhorizontpaaren beträgt ungefähr 0,5 m. Die Messhorizonte sind so positioniert, dass zwei große Bentonit-Bereiche ohne jedwede Instrumentierung erhalten bleiben. Es wird angenommen, dass die Verteilung von zwei relativ nah beieinander-

liegenden Messhorizonten in drei verschiedenen Bereichen des Elements es ermöglicht, den Unterschied zwischen Flüssigkeitsbewegung vom oberen Ende des Elements und Flüssigkeitsbewegung vom unteren Ende bewertet werden können. Abb. 6.6 (rechts) zeigt beispielhaft die Konfiguration eines der horizontalen Messquerschnitte.

Der Porendruck soll auf zwei Linien gemessen werden, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Dies ermöglicht die Messung der Porendruckentwicklung sowohl in der Mitte des Bentonit-Dichtelements als auch an vier Punkten am Übergang zum Wirtsgestein. Mindestens auf einem der linearen Querschnitte durch das Dichtelement soll die Temperatur an den Drucksensoren mit gemessen werden. Die Temperaturinformationen ermöglichen eine genaue Berechnung der Lösungsviskosität und seiner Dichte auf dem jeweiligen Messhorizont. Zusätzlich sind vier Sensoren zur Messung der Feuchtigkeit oder des Wassergehalts vorgesehen. Der Radialdruck soll an vier Messpunkten an der Grenze zwischen Bentonit-Dichtelement und Bohrlochwand gemessen werden. In dieser Konfiguration sollen die zwei Sensorpaare jeweils kreuzweise angeordnet sein, so dass der komplette Umfang des Bohrlochs abgedeckt wird. Der Hauptgrund für die Messung des Radialdrucks ist, die Druckkomponente zu bestimmen, die aus der Aufsättigung des Bentonits resultiert. Zu diesem Zweck ist es hilfreich, die Drücke mit dem im darunter liegenden Salzbeton-Element an ähnlichen Stellen gemessenen Radialdruck zu vergleichen, da dort – anders als im Bentonit – kein sättigungsabhängiges Aufquellen zu erwarten ist.

Durch einen Vergleich der Porendruckentwicklung aller Sensoren in dieser Anordnung lässt sich der Fortschritt der Aufsättigung analysieren und es lassen sich Hinweise auf die Richtung des Flüssigkeitszutritts erhalten.

7 Verwendung von Monitoring-Ergebnissen

Wesentliche Verwendung finden Monitoring-Ergebnisse sowohl als eine Grundlage von verschiedenen Entscheidungsprozessen als auch zur allgemeinen Vertrauensbildung. Beide Aspekte werden im Folgenden näher diskutiert.

7.1 Monitoring im Zusammenhang mit Entscheidungsprozessen

Die Hauptphasen in der Entwicklung eines Endlagers und damit auch die Entscheidungen, die zum Übergang von einer Phase zur nächsten benötigt werden, scheinen in allen Programmen ähnlich zu sein. Diese Phasen wurden im "Umkehrbarkeits- und Rückholungs-Projekt" (Reversibility and Retrievability Project) der NEA identifiziert und definiert (NEA 2011). Sie sind in Abb. 7.1 dargestellt.

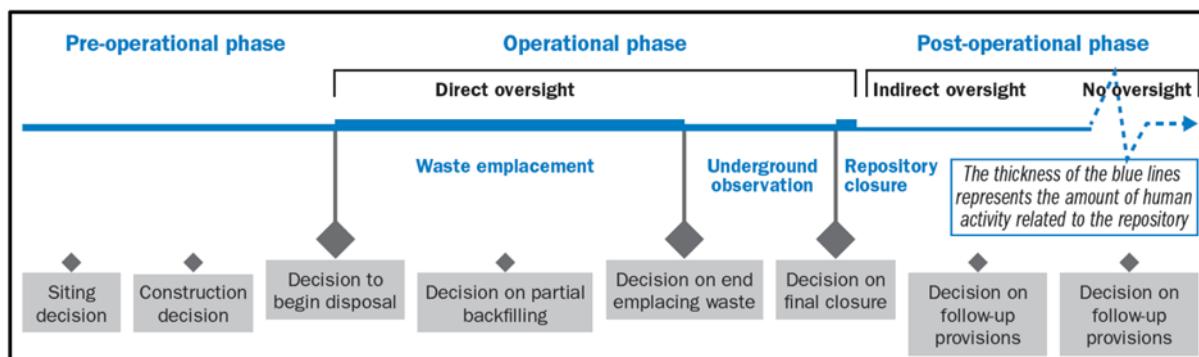


Abb. 7.1: Generische Phasen einer Endlagerentwicklung und wesentliche Entscheidungspunkte (NEA 2011)

Mit Bezug zu dem Einlagerungsprogramm im ANSICHT Projekt lassen sich kleine Unterschiede identifizieren, die zu Beginn der Betriebsphase anfangen. Der erste Unterschied ist, dass vor Beginn der tatsächlichen Einlagerung zwei zusätzliche Phasen (Dummy- und Testphase) mit und ohne reale Abfälle vorgesehen sind (Abb. 7.2). Während und am Ende jeder dieser Phasen müssen bestimmte Entscheidungen getroffen werden, die u. a. von den in diesen Phasen gewonnenen Testergebnissen und Messdaten abhängen. Der zweite Unterschied liegt darin, dass aufgrund des Einlagerungskonzeptes, das Verfüllen mit Versatz eine Routinemaßnahme ist, die kontinuierlich mit dem Fortschreiten der Einlagerung stattfindet. Das bedeutet, dass hinsichtlich dieser Versatzeinbringung (partial backfilling) – anders als in Abb. 7.1 dargestellt – keine explizite Entscheidung getroffen werden muss. Dem gegenüber müssen aber explizite Entscheidungen hinsichtlich eines endgültigen Verschlusses der einzelnen Einlagerungsfelder gegenüber den restlichen untertägigen Einrichtungen mittels sogenannter Migrationsbarrieren gefällt werden (vgl. Abb. 4.2).



Abb. 7.2: Generische Phasen in der Entwicklung eines Endlagers und wesentliche Entscheidungspunkte angelehnt an die Ergebnisse des ANSICHT-Projektes

Ein weiterer Unterschied ist, dass eine Entscheidung hinsichtlich einer Beendigung der Einlagerung nicht wirklich getroffen werden muss. Sie endet automatisch, nachdem das letzte Abfallgebinde eingelagert worden ist. Die Entscheidung, die an diesem Punkt getroffen werden muss, ist, ob und wenn ja wie lange eine Beobachtungsphase – auch „Vorverschlussphase“ genannt – andauern soll. Die wesentlichen Entscheidungspunkte die sich aus diesen Unterschieden ergeben, sind in Abb. 7.2 zusammenfassend dargestellt.

Die Phasen der Endlagerentwicklung sind prinzipiell mit denen der NEA (Abb. 7.1) identisch. Wie oben erwähnt, sind die Unterschiede gegenüber der NEA-Version mit der Betriebsphase verbunden. Die großen Rauten stehen hier für Entscheidungen, die stark mit dem Endlager-Monitoring verbunden sind. Wie aus der Abbildung ersichtlich, befinden sich die größeren Rauten in der Betriebsphase, was darauf hindeutet, dass wesentliche Entscheidungen, die die Interessen aller beteiligten Personen (Betreiber, Regulierungsbehörde, Interessengruppen) hinsichtlich Langzeitsicherheit berücksichtigen, während der Betriebsphase getroffen werden müssen.

An vielen Stellen wird betont, dass die Sicherheit eines Endlagers nicht auf einem Monitoring beruhen darf und dass Monitoring nicht als ein universelles Werkzeug zur Prüfung der Endlagersicherheit angesehen werden kann. Das ist zweifellos richtig. Nutzt man aber die in diesem Bericht beschriebene Monitoring-Strategie, die ein schrittweises Vorgehen im Sinne eines 'Lernkonzeptes' vorsieht, kann das Monitoring ein geeignetes Werkzeug sein, um Kenntnisse über das langfristige Verhalten des geotechnischen Barrierensystems zu vertiefen. Monitoring kann somit dazu beitragen, zumindest die geotechnischen Komponenten des Endlagersystems zu verbessern oder zu optimieren, indem es Nutzen aus der verfügbaren Zeit während der Betriebsphase zieht. Und da das Lernkonzept auch für das Monitoring-System selbst gilt, wird jede Entscheidung hinsichtlich der Langzeitsicherheit das Wissen darüber beinhalten, wozu Monitoring fähig ist und wozu nicht. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Einschränkungen von Monitoring werden besonders solche Entscheidungen bestimmen, die zum Ende der Betriebsphase getroffen werden müssen (in Abb. 7.2 rechts der gestrichelten Linie dargestellt). Dies beinhaltet insbesondere die Entscheidung, ob ein Monitoring auch in der Nachverschlussphase stattfinden soll oder nicht. In den folgenden Abschnitten werden spezifische Teile der Endlagerentwicklung und damit verbundene Entscheidungen etwas genauer betrachtet.

7.1.1 Entscheidungen im Zusammenhang mit der Dummy-Phase

Nach dem ersten Teil des Endlagerbaus, wenn die ersten Einlagerungsstrecken in den ersten Einlagerungsfeldern fertiggestellt sind, beginnt die Betriebsphase mit einer sogenannten 'Dummy-Phase'. Wie bereits weiter oben beschrieben, sollen die ersten drei Einlagerungsbohrlöcher mit elektrischen Erhitzern anstelle von echten Abfallbehältern gefüllt werden. Hauptziel der Dummy-Phase ist die Überprüfung des ordnungsgemäßen Einbaus und vor allem der Funktionsfähigkeit des Bohrlochverschlusses. Das Monitoring-Konzept für Bohrlochverschlüsse wurde in Kapitel 5 beschrieben. Das Monitoring des Verschlusselementes spielt eine wichtige Rolle, da in dieser Phase mehrere Zwischenentscheidungen getroffen werden müssen. Die Dummy-Phase ist der erste Schritt innerhalb des oben beschriebenen Lernkonzeptes und stellt den ersten Schritt zur Vorbereitung von Entscheidungen dar, die auf der Auswertung von Daten basieren, die im Zuge des Verschluss-Monitoring gewonnen wurden. In Abb. 7.3 ist die prinzipielle Entscheidungsabfolge in der Dummy-Phase bezogen auf das Monitoring des Bohrlochverschlusses dargestellt.

Die dunkelblauen und orangefarbenen Rauten stellen Entscheidungspunkte dar, für die der Betreiber (BEP) bzw. die Regulierungsbehörde (REP) die Verantwortlichkeit trägt. Beginnend mit Dummy-Bohrloch 1 muss ein Monitoring-Konzept für dessen Verschluss entwickelt und von der Regulierungsbehörde abgenommen werden (REP-1). Nach Einbau des Verschlusses und des zugehörigen Monitoring-Systems folgt eine kontinuierliche messtechnische Erfassung des zeitlichen Verlaufs von als relevant identifizierter Parametern. An diesem Punkt

nähert man sich dem ersten Entscheidungspunkt für den Betreiber (BEP-1). Es muss analysiert werden, ob die Messdaten darauf schließen lassen, dass der Verschluss sich wie erwartet und vorhergesagt verhält oder ob Abweichungen beobachtet werden. Solange die

Messdaten die erwartete Entwicklung widerspiegeln, wird das Verfahren fortgesetzt. Gibt es Hinweise darauf, dass signifikante Abweichungen von der normalen Entwicklung erwartet werden könnten, muss der Betreiber die Regulierungsbehörde informieren und mit ihr die Folgen diskutieren.

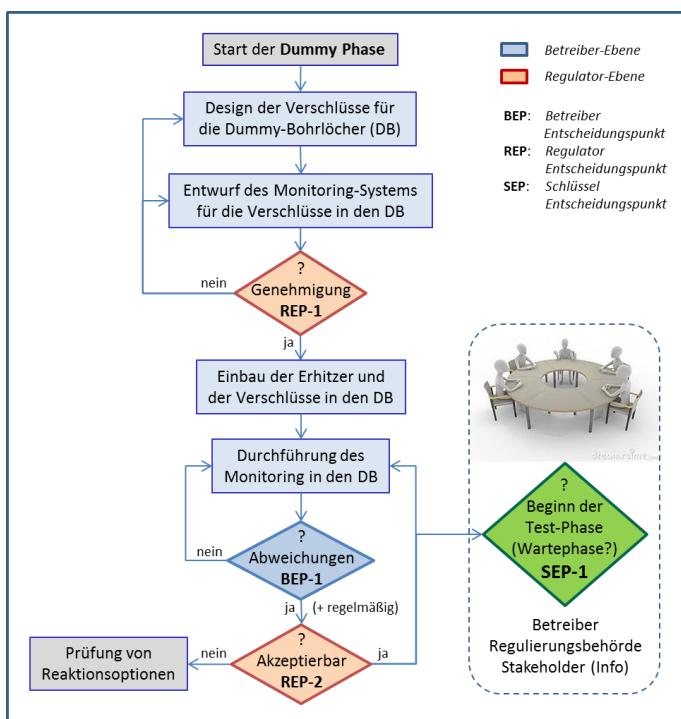


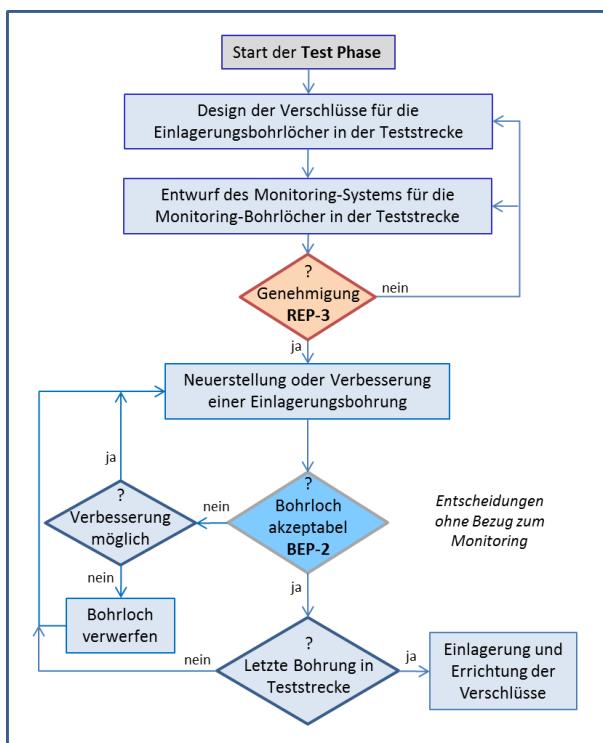
Abb. 7.3:
Entscheidungsabfolge in der Dummy-Phase bezogen auf das Monitoring des Bohrlochverschlusses

Dies gilt insbesondere in Hinblick auf mögliche Konzeptverbesserungen des Bohrlochverschlusses. Die Entscheidung, ob der Bohrlochverschluss neu gebaut und/oder verbessert werden soll oder ob man die gewonnenen Erkenntnisse in das Design eines neuen Bohrlochverschlusses und das Monitoring-Konzept für die Verschlüsse eingehen, liegt letztendlich in der Verantwortung der Regulierungsbehörde (REP-2).

Am Ende der Dummy-Phase, die beispielsweise eine Dauer von drei Jahren haben könnte, erreicht man den ersten 'Schlüssel-Entscheidungspunkt' (SEP-1), in Abb. 7.3 als grüne Rauten dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt sollte eine Diskussion am 'runden Tisch' mit allen beteiligten verantwortlichen Personen, wie Betreiber, Regulierungsbehörde und Interessengruppen, stattfinden. Basierend auf einer endgültigen Analyse der Dummy-Phase und der bis dahin gewonnenen Messergebnisse, soll diese Gruppe diskutieren und letztendlich entscheiden, ob die nachfolgende Test-Phase mit echtem Abfall gestartet werden soll oder ob weitere Untersuchungen oder Tests als erforderlich angesehen werden, was gegebenenfalls zu einer Verlängerung der Dummy-Phase führen könnte. Die letztendliche Entscheidungsverantwortung liegt an dieser Stelle beim Regulator.

7.1.2 Entscheidungen im Zusammenhang mit der Test-Phase

Nach erfolgreicher Beendigung der Dummy-Phase, startet die sogenannte 'Testphase'. Zu diesem Zeitpunkt werden zum ersten Mal echte Abfallbehälter in die ersten vorbereiteten Bohrlöcher innerhalb der Teststrecke eingelagert. Das erste Einlagerungsbohrloch ist als Monitoring-Bohrloch (MB) vorgesehen (s. Abb. 5.2). Die über den Verschlusseinbau und die Installation eines Monitoring-Systems in der Dummy-Phase gewonnenen Erkenntnisse werden eine solide Grundlage für dieselben Arbeiten an echten Einlagerungsbohrlöchern sein. Die für ein schrittweises Vorgehen erforderlichen Entscheidungen sind in Abb. 7.4 und Abb. 7.5 dargestellt.



Der erste Entscheidungspunkt liegt auf Regulierungsbehördenebene (REP-3) und betrifft die Genehmigung des Verschlussdesigns und des zugehörigen Monitoring-Systems. Nach Genehmigung nähert sich der nächste Entscheidungspunkt auf Betreiberebene (BEP-2). Dies ist ein Entscheidungspunkt, der nicht mit Monitoring-Aktivitäten zusammenhängt, der aber notwendig ist, um voranzuschreiten.

Abb. 7.4:
Genehmigungs- und Akzeptanzprozedur für die Einlagerungsbohrlöcher in der Teststrecke

Es geht um die Frage, ob ein vorbereitetes Einlagerungsbohrloch für die Abfalleinlagerung geeignet ist oder nicht (Abb. 7.4). Diese Schleife muss zunächst für alle Bohrlöcher in der Einlagerungsstrecke durchlaufen werden, unabhängig davon, ob es sich um ein Monitoring-Bohrloch handelt oder nicht. Erst danach kann mit der Einlagerung und dem Verschluss der Bohrungen begonnen werden. Es beginnt mit der Einlagerung in dem Monitoring-Bohrloch 1 und dessen Verschluss. Der Betreiber ist für das Monitoring des Verschlusses verantwortlich und muss – falls Abweichungen von der normalen Entwicklung beobachtet werden – die Regulierungsbehörde informieren und mit ihr über mögliche Konsequenzen diskutieren. Werden die Abweichungen als akzeptabel angesehen, kann der Einlagerungsvorgang im nächsten Bohrloch wie geplant fortgesetzt werden. Sind die Abweichungen nicht akzeptabel, müssen geeignete Gegenmaßnahmen (vgl. Tab. 7.1) in Betracht gezogen werden.

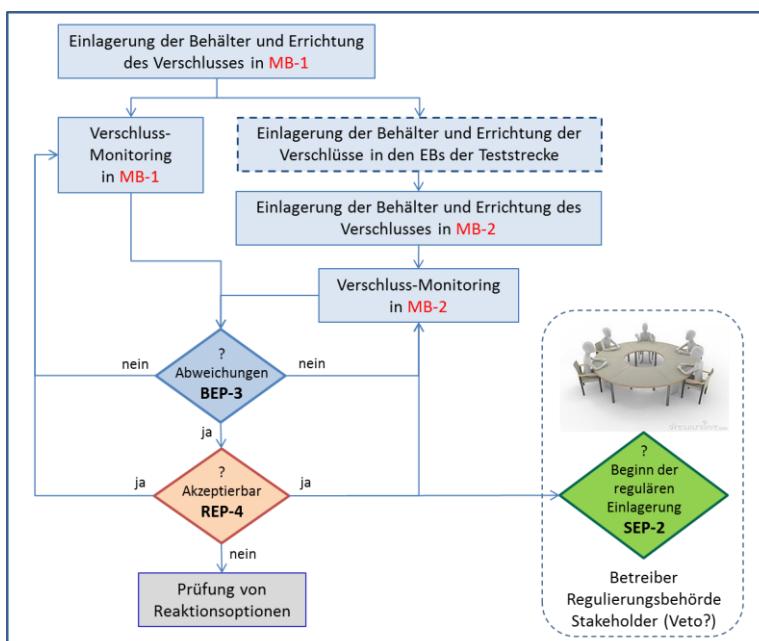


Abb. 7.5:
Entscheidungsabfolge in der Testphase hinsichtlich des Verschluss-Monitoring

Die Testphase endet, wenn das letzte Einlagerungsbohrloch in der ersten Strecke befüllt ist. Das letzte Bohrloch ist als zweites Monitoring-Bohrloch vorgesehen (vgl. Abb. 5.2). Die Verantwortlichkeiten und entsprechenden Entscheidungspunkte gleichen denen des ersten Monitoring-Bohrlochs, mit der Ausnahme, dass an dieser Stelle die Ergebnisauswertung die Messdaten beider Monitoring-Bohrlöcher MB-1 und MB-2 in dieser Strecke einschließt.

Wenn die Analyse der in MB-1 und MB-2 gewonnenen Messergebnisse die Vermutung zulässt, dass die Entwicklung des Verschlusses im erwarteten Bereich liegt, kann die Regulierungsbehörde entscheiden, die Testphase zu beenden und zum nächsten Schlüssel-Entscheidungspunkt (SEP-2) überzugehen. An diesem Entscheidungspunkt ist die Runde bestehend aus Betreiber, Regulierungsbehörde und Interessengruppen gefordert zu entscheiden, ob die normale Abfalleinlagerung begonnen werden soll oder ob eine zusätzliche Warteperiode bis zur Abfalleinlagerung in Erwägung gezogen werden soll. Die Idee einer Warteperiode wurde im Abschlussbericht der Endlagerkommission ausgeführt (vgl. Kapitel 3.2.1), jedoch ohne Vorschlag für ihre Dauer.

An dieser Stelle wäre zu diskutieren, ob den Interessengruppen (Stakeholder) ein Veto-Recht zugesprochen werden soll. Immerhin geht es an diesem Punkt um den Beginn der regulären Einlagerung der radioaktiven Abfälle. Sollte der Betreiber in ausreichendem Maße auf Basis bisher gewonnener Informationen dem Regulator dargelegt haben, dass einer regulären Einlagerung der Abfallbehälter nichts im Wege steht und der Regulator dem zustimmen, so bestünde aber dennoch für die Interessengruppen die Möglichkeit, mit entsprechender Begründung den Start der regulären Einlagerung auszusetzen. Bestehen begründete Zweifel seitens der Stakeholder bezogen auf die Langzeitsicherheit, so könnten sie von ihrem Veto-Recht Gebrauch machen. Ein solches Veto könnte bedeuten, dass die dem Regulator übergeordnete Instanz, in diesem Fall das Ministerium für Umwelt, sich mit dem Thema nochmal befassen muss, und letztendlich die Entscheidung fällen muss, ob mit der regulären Einlagerung begonnen wird, oder ob eine Verlängerung der Warte-Phase oder weitere Test notwendig sind.

7.1.3 Entscheidungen im Zusammenhang mit der Einlagerungsphase

Nach Beendigung der Test-Phase mit oder ohne zusätzlicher Wartezeit, kann die reguläre Einlagerung beginnen. Der mit den laufenden Einlagerungsaktivitäten zusammenhängende Entscheidungsablauf ist in Abb. 7.6 dargestellt. Auf Betreiber-Ebene gibt es zwei wesentliche Entscheidungspunkte (BEP-4 und BEP-5), die in Zusammenhang mit dem Monitoring der verschiedenen Bohrlochverschlüsse (BEP-4) und der verschiedenen Verschlüsse der Einlagerungsfelder (BEP-5) stehen. In beiden Fällen liegt es in der Verantwortung des Betreibers, die Messdaten kontinuierlich auszuwerten und zu entscheiden, ob die Regulierungsbehörde unverzüglich über beobachtete Abweichungen informiert werden muss. Unabhängig von diesen Entscheidungen sollte die Regulierungsbehörde regelmäßig über den Stand der Messdaten informiert werden. Regelmäßig könnte z. B. alle drei Monate bedeuten.

Die Regulierungsbehörde ist zunächst dafür verantwortlich, das vom Betreiber vorgelegte Barrierendesign vor Einbau der Barriere zu genehmigen (REP-6). Ob ein vollständig gefülltes Einlagerungsfeld letztendlich verschlossen wird, ist eine wiederkehrende Schlüsselentscheidung. An diesem Entscheidungspunkt sollten jeweils Vertreter aller beteiligten Gruppen, d. h. Betreiber, Regulierungsbehörde und Interessengruppen, zusammenkommen, den aktuellen Stand der Endlagerentwicklung diskutieren und entscheiden, ob das aktuelle Einlagerungsfeld verschlossen und der Betrieb im nachfolgenden Einlagerungsfeld fortgesetzt werden soll oder ob ergänzende Maßnahmen ergriffen werden müssen. Alle Informationen, die während des Einlagerungsbetriebs und durch die Monitoringaktivitäten an den Bohrloch- und Streckenverschlüssen gewonnen werden (in Abb. 7.6 gelb markiert), fließen in den Schlüsselentscheidungspunkt SEP-3 ein (grüne Raute in Abb. 7.6). Auch an dieser Stelle wäre erneut zu diskutieren, ob den Interessengruppen (Stakeholder) ein Veto-Recht, analog zu der Entscheidung am Ende der Test-Phase, bei diesen Entscheidungen zugesprochen werden soll.

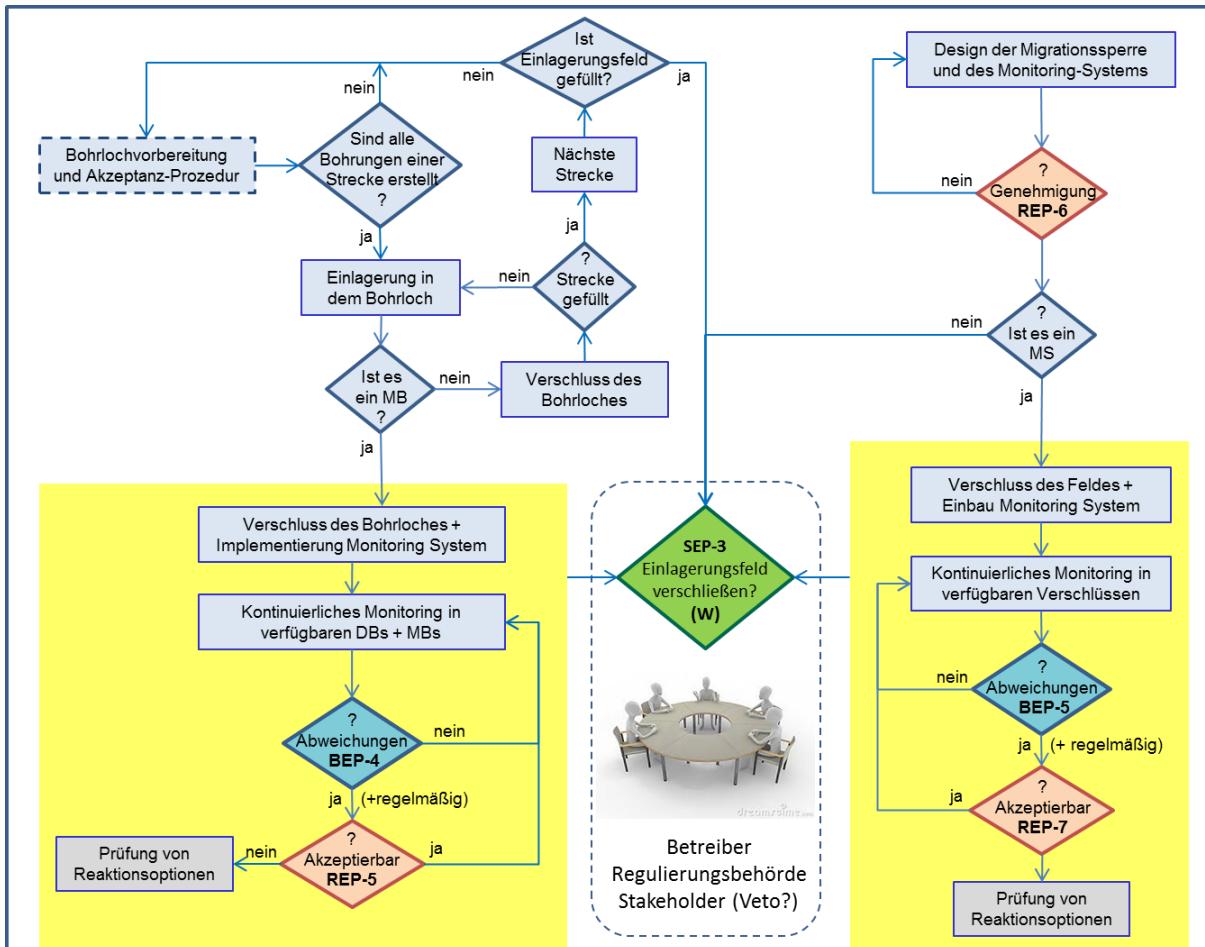


Abb. 7.6: Entscheidungsabfolge in der regulären Einlagerungsphase im Zusammenhang mit dem Monitoring von Bohrlochverschlüssen und Migrationssperren (gelb markierte Bereiche)

SEP-3 ist ein sich wiederholender Entscheidungspunkt (gekennzeichnet durch das (W) in der grünen Raute), der jedes Mal, wenn ein Einlagerungsfeld gefüllt ist, durchlaufen werden muss. Geht man von einer Betriebsdauer von ca. 50 Jahren aus und nimmt die Anzahl der in Abb. 5.1 dargestellten Einlagerungsfelder in Betracht, bedeutet dies, dass pro Jahr ungefähr ein SEP-3 Treffen stattfindet. Diese Frequenz scheint angemessen, um die Endlagerentwicklung zu verfolgen, besonders für diejenigen, die nicht in die täglichen Arbeiten eingebunden sind.

Bezüglich der Analyse der Messdaten obliegt es dem Betreiber die Messdaten auszuwerten (BEP-4 und BEP-5). Sollten Abweichungen auftreten, die als signifikant angesehen werden, muss die Regulierungsbehörde entscheiden, ob diese akzeptabel sind oder ob auf verfügbare Reaktionsoptionen zurückgegriffen werden muss. Mögliche Reaktionsoptionen sollten im Vorfeld als Teil des Verschlusskonzeptes und im Zusammenhang mit Überlegungen bezüglich Rückholungsmaßnahmen entwickelt werden (vgl. Tab. 7.1).

An diesem Punkt stellt sich die Frage, wie eine Bewertung der Verschlusserwicklung aussehen könnte. Als Beispiel sei dazu die Prüfung der Erreichbarkeit des Leistungszieles 3 angeführt (vgl. Kap. 4.4.1), das besagt, dass die Auflockerung des Bentonit-Dichtelementes bedingt durch die Verschiebung des Widerlagers nicht größer sein darf als 3% der Länge des Dichtelementes. Dies entspricht gemäß vorliegendem Konzept einer Verschiebung um maximal 15 cm. Das entsprechende Monitoring-Konzept zur Erfassung einer Widerlagerverschiebung ist in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben.

Die Bewertung der Monitoring-Ergebnisse könnte beispielsweise nach einem Ampelprinzip durchgeführt werden. Gemäß der in Abb. 4.7 dargestellten Screening-Methode ist bei der Box **PAR2** die zu erwartende Parameterentwicklung zu simulieren. In Abb. 7.7 ist die berechnete Entwicklung für die Widerlagerverschiebung dargestellt.

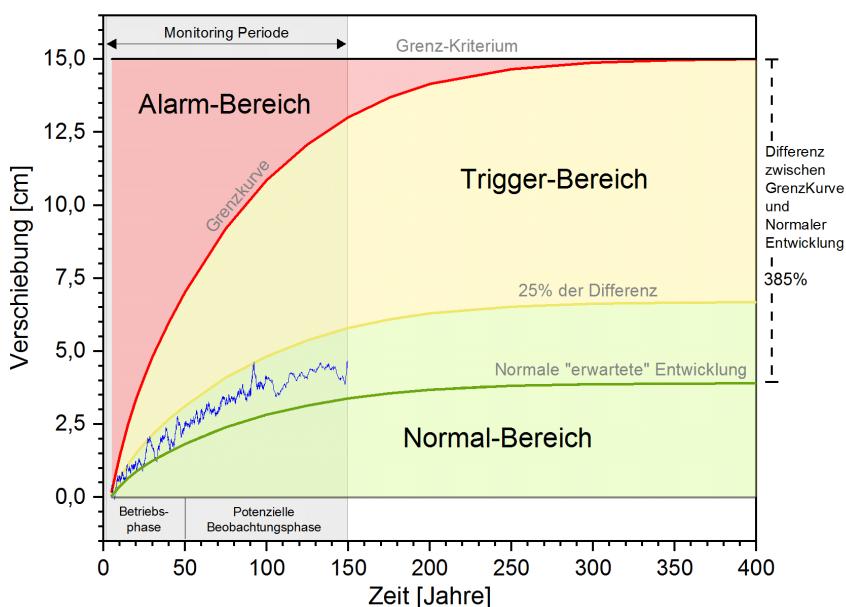


Abb. 7.7:
Mögliches Bewertungsschema
zur Parameterentwicklung am
Beispiel der Verschiebung
eines Widerlagers

Die grüne Kurve stellt die normale und damit erwartete Entwicklung des Parameters dar. Den oberen Rand bildet das Grenz-Kriterium, in diesem Fall entspricht dies einer Verschiebung von 15 cm. Die Differenz zwischen dem asymptotischen Wert der normalen Entwicklung und dem Grenzwert beträgt 385% der Normalentwicklung. Ausgehend von dieser Differenz wurde retrograd mit gleichbleibender prozentualer Differenz die rote Grenzkurve berechnet. Mit Blick auf die Unsicherheiten sowohl hinsichtlich der Berechnungen zur Normalentwicklung als auch auf potenzielle Messungenauigkeiten verschiedener Sensoren wurde die gelbe Kurve mit einem Wert von 25% der Differenz berechnet. Solange die Messwerte – simulierte blaue Kurve – unterhalb der gelben Kurve bleiben, befinden sie sich im „grünen“ Bereich, das heißt im Bereich der normalen Entwicklung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. Lässt sich dagegen ein Trend erkennen, der die Messwerte dauerhaft in den gelben Bereich, hier als „Trigger-Bereich“ bezeichnet, führt, sollten Betreiber und Regulator ein besonderes Auge auf die Messwerte haben, um abzuschätzen, ob der Trend im Trigger-Bereich bleibt, oder ob erkennbar wird, dass die Werte in den roten Bereich, hier als „Alarm-Bereich“ bezeichnet, abdriften.

Wie weiter oben bereits erwähnt, sollten unabhängig von Monitoring-Aktivitäten mögliche Reaktionsoptionen auf Ergebnisse des Monitoring erarbeitet und dokumentiert werden. Dies ist ein Punkt, der in Gesprächen mit Interessengruppen im Rahmen des MODERN2020 Projektes häufiger diskutiert wurde, u. a. auch auf dem Stakeholder-Workshop in Antwerpen im September 2018 (Meyermans et al. 2018). Es wurde seitens der Stakeholder als eine wichtige Vertrauensvoraussetzung angesehen, wenn seitens des Betreibers deutlich gemacht werden kann, dass man prinzipiell weiß was zu tun ist, falls Monitoring-Ergebnisse von einer erwarteten Entwicklung signifikant abweichen. Aus diesem Grund werden im folgenden grundsätzliche Reaktionsoptionen vorgestellt, auf die zurückgegriffen bzw. aufgebaut werden kann, je nach dem, in welchem der drei Bereiche sich die Monitoring-Ergebnisse bewegen. Eine exemplarische Auflistung ist in Tab. 7.1 gegeben.

Die vorgestellten Reaktionsoptionen sind farblich unterschiedlich hinterlegt. Die Farben entsprechen den Ampelfarben, die auch in Abb. 7.7 verwendet wurden, um einen direkten optischen Bezug herzustellen. Die in der Auflistung gegebenen Reaktionsoptionen können und sollen keinesfalls vollständig sein, sondern sind als Anregungen gedacht, in welcher Form Reaktionsoptionen für abweichende Entwicklungen von Parametern entwickelt und letztend-

lich auch in transparenter Form kommuniziert werden könnten. In jedem Fall wird es als hilfreich und vertrauensbildend angesehen, wenn sich sowohl Betreiber als auch der Regulator im Vorfeld eines Monitoring detailliert Gedanken machen, zu welchem Zeitpunkt welche Handlungsoptionen bestehen, um auf unterschiedliche Monitoring-Ergebnisse zu reagieren. Diese Aussagen wurden auch nochmals auf der Abschlusskonferenz des MODERN2020 Projektes hervorgehoben und als ein wichtiges Element im Zuge der Vertrauensbildung angesehen (Simons 2019).

Die Reaktionsoptionen für die unterschiedlichen Bereiche sind mit Ausnahme des Normal-Bereiches prinzipiell in mehrere Themenkomplexe unterteilt. Der erste Teil ist grundsätzlich ein allgemeiner Teil, in dem eher formale Aspekte angesprochen werden. Ein weiterer Teil bezieht sich auf das technische Monitoring-System und behandelt dezidiert Fragen zu der Fehlerhaftigkeit des technischen Systems. Dies ist ein grundlegender Punkt, der einer ständigen Aufmerksamkeit bedarf. Im ANHANG B ist aufgeführt, was für Fehlerarten prinzipiell auftreten können und welche Optionen bestehen, auf erkannte Fehler zu reagieren oder die Fehleranfälligkeit eines Messsystems zu reduzieren. Ein anderer Teil bezieht sich auf die zeitliche Entwicklung des Verschlussbauwerkes an sich bzw. der entsprechenden charakteristischen Parameter. Der abschließende Teil bezieht sich auf Lerneffekte, die sich im Zusammenhang mit den Monitoring-Ergebnissen ergeben. Monitoring-Ergebnisse können genutzt werden, um Komponenten des Endlagersystems speziell des geotechnischen Verschlusssystems sukzessive zu verbessern. Im Zuge der Einlagerung müssen beispielsweise mehrere tausend Einlagerungsbohrlöcher mit einem Verschluss versehen werden. Der ganze Prozess dauert mehrere Jahrzehnte und diese Zeit kann genutzt werden, um Systemkomponenten zu verbessern. Dieser Teil greift explizit die Forderung nach einem „Lernenden Verfahren“ auf und macht deutlich, dass ein Monitoring signifikant dazu beitragen kann.

Tab. 7.1: Reaktionsoptionen auf Monitoring-Ergebnisse

Normal-Bereich	
Allgemein	1 Fortführung des Monitoring solange bis anderweitig über eine Fortführung oder Beendigung entschieden wird.
	Regelmäßige Prüfung und Bewertung der Monitoring-Ergebnisse aus allen Monitoring-Bohrlöchern und Verschlüssen (DBs, MBs, MSs). Regelmäßig könnte hier bedeuten, dass einmal pro Monat alle aktuellen Monitoring-Ergebnisse gesichtet werden. Die Sichtungsfrequenz ist anzupassen, falls schnelle zeitlich Änderungen der Daten Anlass dazu geben.
	Dokumentation aller Ergebnisse in einer spezifischen Monitoring-Datenbank. Die Dokumentation ist mit Bezug zu einer Qualitätssicherung dergestalt vorzunehmen, dass in jedem Fall die Rohdaten aufgezeichnet und dokumentiert werden. Es ist davon auszugehen, dass eine Bearbeitung der Daten zur Ergebnisbewertung notwendig ist. Sowohl die bearbeiteten Daten als auch die Art der Bearbeitung sind ebenfalls in der Datenbank zu dokumentieren.
	Regelmäßiger Bericht über die Monitoring-Ergebnisse an den Regulator. Regelmäßig könnte hier bedeuten, dass halbjährlich aktualisierte Monitoring-Ergebnisse inklusive einer vorläufigen Bewertung übermittelt werden. Die Übermittlungsfrequenz ist anzupassen, falls schnelle zeitlich Änderungen der Daten Anlass dazu geben.
Trigger-Bereich	
Allgemein	2 Fortführung des Monitoring
	Überlegen, ob und wenn ja, inwieweit eine Veränderung der Messfrequenz zeitnah eine bessere Datenlage für eine Bewertung erzeugen könnte.
	Unmittelbares Anzeigen beim Regulator, dass Messergebnisse einzelner Parameter den Trigger-Bereich erreicht haben und spezielle Aufmerksamkeit gefordert ist.
	In Diskussion mit dem Regulator erörtern, ob ggf. ein Aussetzen der Einlagerung erfolgen soll, um zunächst die weitere Entwicklung abzuwarten.
3a Monitoring System	Überprüfung des Sensor- und Messsystems, um auszuschließen, dass es sich um messtechnisch bedingte Ungenauigkeiten handelt. Je nach verwendetem Sensor- und Messsystem könnten z. B. folgende Optionen hilfreich sein: <ul style="list-style-type: none"> • Re-Kalibrierung von Sensoren (sofern möglich) • Korrekturen der Messsignale (sofern begründet ableitbar)

	Im Falle fehlerhafter Sensoren ist zu prüfen, ob ein Austausch der Sensoren möglich und sinnvoll ist. Das hängt u. a. davon ab, wo der fehlerhafte Sensor eingebaut ist und zu welchem Zeitpunkt die Fehlerhaftigkeit erkannt wird. Zu einem frühen Zeitpunkt, wenn bei einem Bentonit-Dicthelement noch kaum eine Aufsättigung zu erwarten ist, ist ein Sensoraustausch wenig problematisch. Hat bereits eine deutliche Quelldruckentwicklung stattgefunden, so wäre bei einem Austausch ggf. das ganze Dicthelement neu zu bauen. Die Vor- und Nachteile sind abzuwägen und mit dem Regulator zu diskutieren.
3b Lernendes Verfahren	Im Falle fehlerhafter Sensoren ist zu prüfen, inwieweit eine Ertüchtigung der Sensoren dieses Typs möglich ist, so dass für kommende Einsatzfälle, z. B. in neuen Monitoring-Bohrlöchern, verbesserte Sensoren verwendet werden können.
	Sollten Ertüchtigungen von Sensoren für kommende Einsatzfälle nicht möglich oder wenig erfolgshöffig sein, so ist zu prüfen, welche alternativen Sensorsysteme für ein Monitoring in Frage kämen.
	Im Falle von Verbesserungen an Sensoren oder der Nutzung von alternativen Sensoren, ist zu prüfen, ob diese beispielsweise in den Verschlüssen im Dummy-Bereich auf ihre Eignung zunächst getestet werden könnten.
4a Verschlussbauwerk	Sollten die abweichenden Monitoring-Ergebnisse nicht auf Ungenauigkeiten des Sensor- und Messsystems zurückzuführen sein, so ist das Verhalten des Verschlussbauswerkes detailliert zu untersuchen. Der erste Schritt sollte in diesem Fall die Ursachenermittlung sein. Eine grundsätzliche Möglichkeit dazu besteht darin, anhand von Prozess-Simulationen abzuleiten, welche Veränderung der Barriereeigenschaften zu den erfassten Messwerten führen könnte. Kann die abweichende Entwicklung des Verschlussbauswerkes rechnerisch abgebildet werden, so sollte, basierend auf diesen veränderten Eigenschaften, die weitere Entwicklung der Parameter und damit des Barriereverhaltens simuliert werden. Anhand dieser prognostizierenden Berechnungen besteht dann die Möglichkeit zu entscheiden, ob diese Entwicklung akzeptabel ist, obwohl der Normal-Bereich verlassen wurde, oder ob Maßnahmen zur Korrektur angebracht sind. Die entscheidende Frage ist, ob die angestrebten Leistungsziele dieses Verschlussbauswerkes noch erreicht werden können, so dass die Sicherheitsfunktion dieses Bauwerkes erfüllt wird.
4b Lernendes Verfahren	Eine Frage, die im Zusammenhang mit der Analyse des abweichenden Verhaltens des Verschlussbauswerkes in jedem Fall gestellt werden muss, ist, ob und wenn ja, inwieweit der Einbau der Messinstrumente zu einer Veränderung der Eigenschaften des Verschlussbauswerkes geführt hat. Ist ein signifikanter Anteil des abweichenden Verhaltens auf die Implementierung des Messsystems zurückzuführen, so ist das Monitoring-Konzept für kommende Einsätze zu überarbeiten.
	Lässt sich die abweichende Entwicklung auf ein nicht optimales Design des Verschlussbauswerkes oder eine nicht optimale Materialauswahl zurückführen, so ist eine Neukonzeption des Verschlussdesigns für kommende Einsätze vorzunehmen und vom Regulator genehmigen zu lassen. Bis zur Erteilung der Genehmigung ist die weitere Einlagerung auszusetzen.
	Lässt sich die abweichende Entwicklung auf unzureichende Sorgfalt bei der Errichtung des Bauwerkes zurückführen, so ist beispielsweise die Prozedur der Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle bei der Herstellung zu prüfen und ggf. zu optimieren.
	Es sollte geprüft werden, ob der Dummy-Bereich genutzt werden kann, um Veränderungen an dem Bauwerksdesign hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu prüfen.
Alarm-Bereich	
5 Allgemein	Fortführung des Monitoring bis anderweitig ein Entscheidung gefällt wird, das Monitoring abzubrechen und Baumaßnahmen einzuleiten.
	Unmittelbares Anzeigen beim Regulator, dass Messergebnisse einzelner Parameter den Alarm-Bereich erreicht haben und dass ggf. kurzfristige Gegenmaßnahmen, zumindest an diesem Bauwerk, notwendig sind.
	Es wird davon ausgegangen, dass bis zur Klärung des abweichenden Verhaltens die weitere Einlagerung ausgesetzt wird.
6a Verschlussbauwerk	Das Erreichen des Alarm-Bereiches bedeutet, dass Zweifel an der Erreichbarkeit eines Leistungsziels des Bauwerkes bestehen. Es ist zu prüfen, ob das Verschlussbauwerk teilweise oder komplett rückgebaut und in verbesserter Form neu errichtet werden sollte. Bei dieser Prüfung ist folgendes zu bedenken: Bei dem Verschluss handelt es sich um einen der selektierten Monitoring-Verschlüsse (Bohrloch oder Strecke). Bei dem möglichen Rückbau und der Analyse des Verschlussbauswerkes muss geprüft werden, ob sich das abweichende Verhalten des Verschlusses ausschließlich auf das Bauwerk selber bezieht, so dass explizit dieser Verschluss ggf. neu gebaut werden müsste. Gibt die Analyse des Verschlusses aber Anlass zu der Annahme, dass es sich hierbei um eine systematische, dem Bauwerkskonzept geschuldet Abweichung, handelt, muss

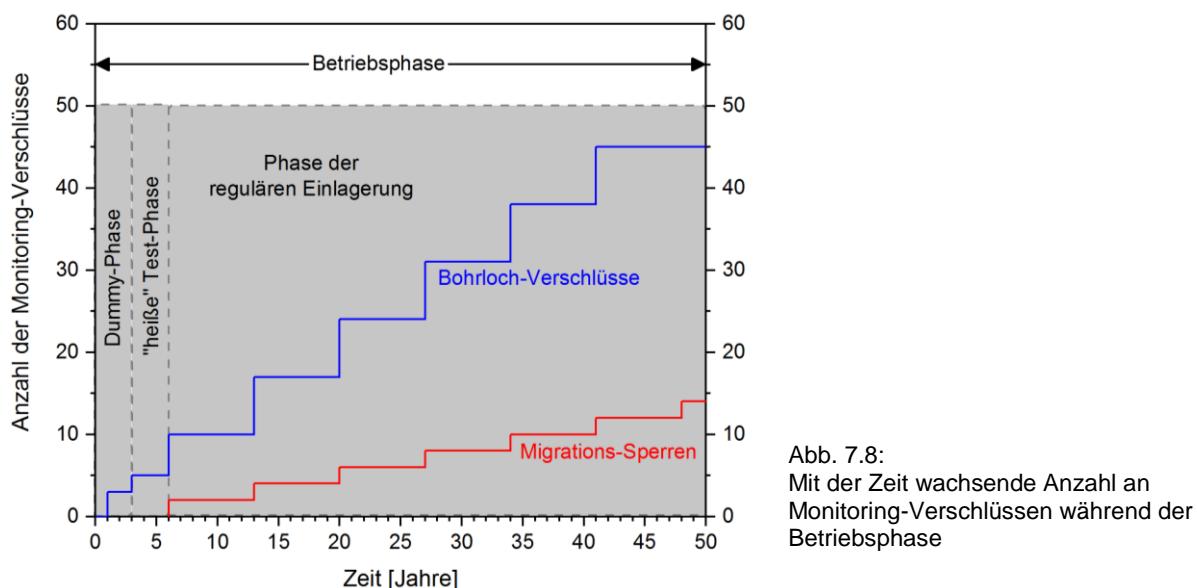
	<p>geprüft werden, ob alle gleichartigen Verschlüsse, die kein Monitoring-System enthalten, ebenfalls rückgebaut und in verbesserter Form neu errichtet werden sollten. Das kann unter Umständen bedeuten, dass der Versatz in bereits verfüllten Strecken aufgewältigt werden muss.</p> <p>Bezüglich des Rückbaus des Versatzes und Verschlussbauwerken in Bohrungen oder Strecken wird auf die entsprechenden Rückholungskonzepte verwiesen, die im Rahmen des FuE-Projektes ERNESTA (Herold et al. 2018) erarbeitet werden.</p>
	<p>Je nach dem in welcher Form die Grenze zum Alarm-Bereich überschritten wird, kann überlegt werden, ob sofortige bautechnische Untersuchungen notwendig sind, oder ob zunächst eine weitere modelltechnische Analyse hilfreich ist. Ein nur kurzzeitiges Überschreiten könnte bedeuten, dass die definierten Leistungsziele trotzdem noch erreicht werden können. Dies sollte durch Prozessanalysen belegt werden. Ist aber ein Trend erkennbar, der darauf hindeutet, dass eine Rückkehr in den gelben Bereich unwahrscheinlich ist, sind entsprechende Maßnahmen zur Fehlerkorrektur einzuleiten.</p>
6b Lernendes Verfahren	<p>Lässt sich die abweichende Entwicklung auf ein nicht geeignetes Design des Verschlussbauwerkes oder eine nicht geeignete Materialauswahl zurückführen, so ist eine Neukonzeption des Verschlussdesign für kommende Einsätze vorzunehmen und vom Regulator genehmigen zu lassen. Bis zur Erteilung der Genehmigung ist die weitere Einlagerung auszusetzen.</p>
	<p>Lässt sich die abweichende Entwicklung auf eine unzureichende Sorgfalt bei der Errichtung des Verschlussbauwerkes zurückführen, so ist beispielsweise die Prozedur der Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle bei der Herstellung zu prüfen und ggf. zu optimieren.</p>
	<p>Es sollte geprüft werden, ob der Dummy-Bereich genutzt werden kann, um Veränderungen an dem Bauwerksdesign hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu prüfen.</p>

7.2 Monitoring im Zusammenhang mit Vertrauensbildung

Speziell im Hinblick auf das geotechnischen Barrierensystem ist ein Monitoring mit zusätzlicher Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle die einzige Möglichkeit zu überprüfen, ob die geotechnischen Barrieren sich derart entwickeln, dass vorhergesagt werden kann, dass sie ihre vorgegebenen Leistungsziele und damit ihre Sicherheitsfunktionen erfüllen werden. Ohne ein Monitoring des geotechnischen Barrierensystems – zumindest in repräsentativer Weise – gibt es nur wenige Möglichkeiten, einen "Lerneffekt" zu erzielen, der als Grundlage für die Weiterentwicklung des Monitoring-Konzeptes selbst oder des Verschlusskonzeptes und dessen Umsetzung angesehen wird. Was außer ein Monitoring des geotechnischen Barrierensystems könnte Informationen über die Barrierenentwicklung liefern?! Ohne jedwede Information sind die Möglichkeiten für Verbesserungen begrenzt und damit auch die Möglichkeiten zur Vertrauensbildung. Gegenwärtig wird davon ausgegangen, dass z. B. eine "künstliche" geotechnische Barriere in einem separaten Grubenbereich außerhalb der Einlagerungsbereiche nicht dazu geeignet ist, das Vertrauen Aller in die grundsätzliche Barrierenentwicklung aufzubauen. Sie kann nie das entscheidende Argument verhindern, dass die Informationen nicht auf die realen Endlagerbedingungen übertragbar sind.

Wie bereits mehrfach erwähnt, wird das Monitoring-Konzept als „Lernkonzept“ erachtet. Die Unterteilung der Betriebsphase in drei Phasen, d. h. in die Dummy-Phase, die "heiße" Testphase mit der potenziellen Wartephase und die reguläre Einlagerungsphase mit dem Feld- zu-Feld-Entscheidungsablauf, bietet die Möglichkeit einer schrittweisen Optimierung des Designs einzelner geotechnischer Barrieren, des Monitoring-Konzeptes und der Messinstrumente sowie der Einbauverfahren.

Im Laufe der Zeit wird sich die Anzahl der Bohrlochverschlüsse und Migrationsbarrieren, die mit Monitoring-Systemen bestückt werden, sukzessive erhöhen. Abb. 7.8 zeigt die wachsende Anzahl von Monitoring-Verschlüssen, die während der Betriebsphase implementiert werden. Am Ende werden 45 Bohrlochverschlüsse und 14 Migrationsperren (kleine Streckenverschlüsse) mit Messinstrumenten ausgestattet sein. Der schrittweise Ansatz trägt nicht nur zur Verbesserung des Verständnisses der Entwicklung der Barrieren sondern auch zur Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkung zwischen Barriere und Wirtsgestein bei.

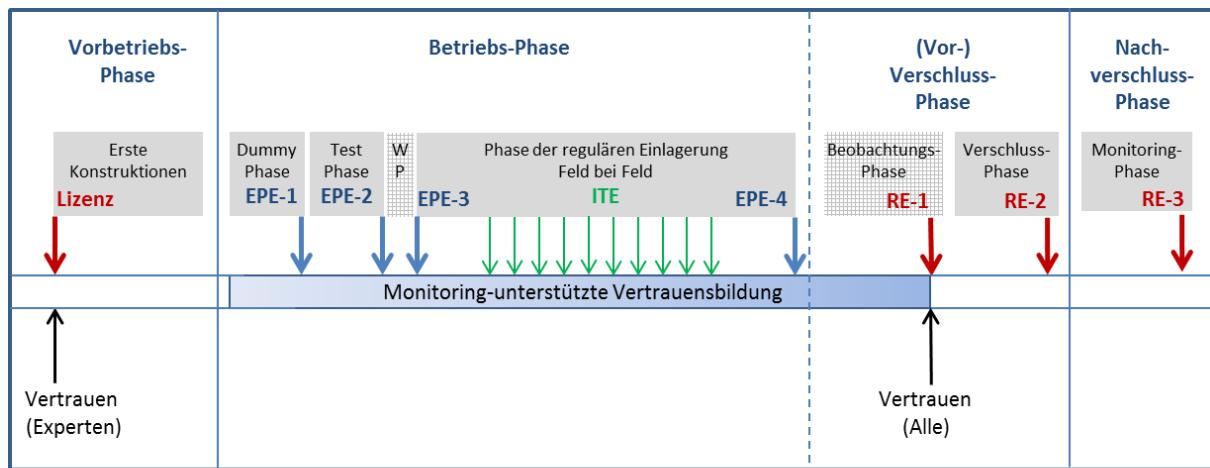


Hinsichtlich einer Vertrauensbildung kann Folgendes festgehalten werden:

Allein die Tatsache, dass ein Monitoring durchgeführt wird oder das Messdaten zur Verfügung gestellt werden, ist nicht dazu angetan, jedermanns Vertrauen zu fördern; es ist allerdings eine grundlegende Voraussetzung dafür, dass Vertrauen aufgebaut werden kann, bis das Endlager final verschlossen werden soll.

Der Entscheidung zur Lizenzvergabe zur Konstruktion des Endlagers liegt der erfolgreich geführte Sicherheitsnachweis (Safety Case) zugrunde. Damit ist seitens des Betreibers und des Regulators ein entsprechendes Vertrauen in die Sicherheit aufgebaut (erster schwarzer Pfeil in Abb. 7.9 links). Die Öffentlichkeit und externe Interessengruppen (Stakeholder), die mit den inhaltlichen Details eines Safety Case nicht vertraut sind, müssen dieses Vertrauen aber nicht unbedingt teilen. Das heißt, an dieser Stelle muss noch etwas Alternatives bzw. etwas Ergänzendes geschehen, damit auch diese Gruppen eine Chance bekommen, Vertrauen aufzubauen. Der späteste Zeitpunkt, zu dem jeder Vertrauen in das Endlager haben muss, ist, wenn entschieden werden muss, ob das Endlager final verschlossen werden soll (gekennzeichnet durch den zweiten schwarzen Pfeil in Abb. 7.9 rechts). Zwischen beiden schwarzen Pfeilen liegt aber mindestens die gesamte Betriebsphase des Endlagers, die sich über mehrere Jahrzehnte erstrecken wird. Dieser Zeitraum könnte und sollte genutzt werden, um Maßnahmen durchzuführen, die einem Vertrauensaufbau zuträglich sind.

Monitoring kann ein Werkzeug sein, solch einen Vertrauensaufbau zu unterstützen; gekennzeichnet durch den blauen Balken zwischen den schwarzen Pfeilen in Abb. 7.9. In dieser Abbildung sind eine ganze Reihe wesentlicher Entscheidungspunkte durch verschiedenfarbige Pfeile dargestellt. Die blauen Pfeile kennzeichnen Entscheidungen, die den weiteren Verlauf des Endlagerprogramms betreffen (EPE) bzw. Punkte, an denen entschieden werden muss, von einer Unter-Phase des Betriebszeitraumes in die nächste überzugehen. Bei den grünen Pfeilen handelt es sich um ingenieur-technische Entscheidungen (ITE), die in erster Linie mit dem geotechnischen Barrieren in Zusammenhang stehen, z. B. der Entscheidung zum Verschluss eines kompletten Einlagerungsfeldes. Die roten Pfeile schließlich sind Entscheidungspunkten zugeordnet, die von höchster Stelle zu fällen sind, wie beispielsweise wie lange eine Beobachtungsphase vor dem endgültigen Verschluss dauern soll bzw. wann das Endlager final verschlossen werden soll.

**Lizenz-Entscheid**

EPE-1 = Endlager-Programm Entscheidung
EPE-2 = Endlager-Programm Entscheidung
EPE-3 = Endlager-Programm Entscheidung
ITD = Ingenieur-Technische Entscheidungen
EPE-4 = Endlager-Programm Entscheidung
RE-1 = Regierungs-Entscheidung
RE-2 = Regierungs-Entscheidung
RE-3 = Regierungs-Entscheidung

- Beginn der Endlagerkonstruktion
- Ende der Dummy Phase / Start der Test-Phase ?
- Einführung einer Wartephase (WP) ?
- Start der regulären Einlagerung ?
- Errichtung von Verschlüssen ? Reaktionsoptionen ?
- Einführung einer Beobachtungs-Phase ?
- Ende der Beobachtung / Beginn des finalen Verschlusses ?
- Beginn einer Monitoring-Phase ?
- Beendigung des Monitoring ?

Abb. 7.9: Wesentliche Entscheidungspunkte während der Endlagerentwicklung

Wenn es um Vertrauensbildung geht, stellt sich natürlich die Frage, was genau zum Vertrauen beiträgt und bei wem. In Tab. 7.2 sind mehrere Punkte aufgelistet, die als Teil des Vertrauensbildungsprozesses erachtet werden. Zusätzlich sind verschiedene Personengruppen aufgeführt, die durchaus unterschiedliche der gelisteten Punkte als hilfreich für ihre eigene Vertrauensbildung erachten könnten. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass diese Liste nicht abdeckend ist, dass sie aber trotzdem eine gewisse Tendenz wiederspiegelt.

Die Punkte sind unterteilt in Punkte, die "wissensbasiert" sind (grün), und Punkte, die eher kontrollbasiert (orange) sind. Jeder dieser Punkte ist den betroffenen Personengruppen durch ein Kreuz zugeordnet. Betrachtet man diese Matrix, stellt man eine Trend fest, nämlich dass vom Betreiber hin zur Öffentlichkeit sich die Punkte, die zum Vertrauen beitragen könnten, von den eher „wissensbasierten“ zu den eher „kontrollbasierten“ Punkten verschieben. Das ergibt Sinn, da das spezifische Wissen über den Sicherheitsnachweis in der Öffentlichkeit und der Regierung eher begrenzt ist, und wenn gleichzeitig das Vertrauen in die Fachkompetenz des Betreibers und der Regulierungsbehörde begrenzt ist, ist ein gewisses Maß an „Kontrolle“ die einzige Möglichkeit, Vertrauen aufzubauen. Monitoring wird als Werkzeug angesehen, dass dieses Bedürfnis erfüllen kann.

Eine alternative Option könnte sein, dass Entscheidungen auf Betreiberebene (BEP) durch eine unabhängige Institution unterstützt werden. Dies könnte zur Vertrauensbildung in der Öffentlichkeit beitragen. Der "runde Tisch" (vgl. z. B. Abb. 7.6) würde um Vertreter der externen Institution erweitert werden. Betreiber und externe Institution analysieren die Messdaten und informieren ggf. die Regulierungsbehörde. Die Verantwortlichkeit des Betreibers sollte allerdings nicht berührt bzw. beeinträchtigt werden. Es muss angemerkt werden, dass die Verantwortung für den Verschlussbau und den Einbau des Monitoring-Systems beim Betreiber verbleibt. Die Analyse und Auswertung der Messergebnisse kann dann aber in Zusammenarbeit mit der externen Institution erfolgen.

Tab. 7.2: Kategorisierte Beiträge zur Vertrauensbildung bei verschiedenen Personengruppen

	Beitrag zur Vertrauensbildung	Betreiber	Regulator	Regierung	Stakeholder	Öffentlichkeit
Wissensbasiert	Nachweis der Geringfügigkeit der Freisetzung	X	X			
	Kenntnisse über Material- und Wirtsgesteinsverhalten	X	X			
	Kenntnisse aus Langzeit-in-situ-Versuchen	X	X			
	Integritätsnachweis für Wirtsgestein + EBS (Kriterien-basiert)	X	X			
	Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle	X	X	X		
	Expertise des Betreibers	X	X	X	X	X
	Expertise des Regulators	X		X	X	X
Kontrollbasiert	Schrittweise Vorgehensweise bei der Endlagerung	X	X	X	X	
	Repräsentatives Monitoring von Endlagerkomponenten	X	X	X	X	
	Monitoring Konzept als "Lernkonzept"	X	X	X	X	
	Beteiligung an Entscheidungsfindungen	X	X		X	X
	Beobachtung der Endlagerentwicklung	X	X	X	X	X
	Durchführung eines Monitoring durch externe Organisation			X	X	X
	Umgebungs-Monitoring (an der Oberfläche)		X	X	X	X
	Kontrolle durch die Regierung			X	X	X

Im Zusammenhang mit der „externen Institution“ wäre es naheliegend, auf das Modell des „Nationalen Begleitgremiums“ (NBG) zurückzukommen. Das NBG wurde in Deutschland gegründet mit der Aufgabe das Standortauswahlverfahren mit kritischen Augen zu begleiten. Diese Aufgabe ist prinzipiell mit dem gleichzusetzen, was die Endlagerkommission in ihrem Bericht unter dem Begriff „Prozessmonitoring“ versteht (vgl. Kap. 3.2.2.1). Analog dazu könnte auch das „Endlagermonitoring“ (vgl. Kap. 3.2.2.2), das ebenfalls von der Endlagerkommission allgemein beschrieben wurde, von einem nationalen Gremium begleitet werden. Man könnte überlegen, Vertreter eines solchen Gremiums an den (Schlüssel-) Entscheidungsprozesse, wie sie beispielsweise in Abb. 7.5 oder Abb. 7.6 angedeutet sind, zu beteiligen und sie mit einem Veto-Recht auszustatten.

Ein mögliche Beteiligung externer Interessensgruppen (Stakeholder) war auch ein Thema in dem europäischen Verbundprojekt MODERN2020 (vgl. Kap. 2.8). Gesteuert von Sozialwissenschaftlern aus Belgien und Schweden wurden Repräsentanten aus vier Interessensgruppen aus vier verschiedenen Ländern in dieses Monitoring-Projekt eingebunden. Unter anderem wurden Fragen bearbeitet bzgl. warum eine Einbindung externer (lokaler) Stakeholder sinnvoll sein kann, wer eingebunden werden sollte und was die Rolle externer Interessengruppen sein sollte. Beispielhaft seien hier einzelne aber durchaus repräsentative Antworten angegeben.

Auf die Frage, warum eine Einbindung externer Interessensgruppen sinnvoll sein kann, antwortete ein Repräsentant aus Belgien (frei übersetzt aus Meyermans 2019):

„Ich denke, eine Einbindung ist deswegen sinnvoll, um die Wissenschaftler und Ingenieure mit dem zu konfrontieren, was wir als effektiv und effizient empfinden. Darüber hinaus sollten wir sie ermutigen, sich klar zu überlegen, wie sie ihre Arbeit gegenüber der Öffentlichkeit kommunizieren und wie sie ihre Pläne verwirklichen wollen, so dass Bürger dem zustimmen können“

Dieses Statement eines Repräsentanten aus Belgien ist ein Beispiel für das was Stakeholder von einer Beteiligung ihrerseits erwarten. Der Repräsentant aus Belgien war überzeugt davon, dass es wichtig ist, den Ingenieuren deutlich zu machen, wie die Meinung von Bürgern zu den Konzepten und Umsetzungsplänen der Betreiberorganisation ist, so dass diese auch berücksichtigt werden können.

Alle Repräsentanten stimmten darin überein, dass eine Einbeziehung von externen Interessengruppen ein Weg sein kann, um das Vertrauen und die Akzeptanz von Bürgern zumindest zu erhöhen. Wichtig sei es, auch technisch komplizierte Dinge einfach und verständlich in transparenter Form zu kommunizieren, um diffuse Furcht und Zweifel zu zerstreuen. Einig war man sich aber auch darin, dass eine Kommunikation bzw. ein Dialog so früh wie möglich gesucht werden sollte und dass eine konsequente Transparenz und Ehrlichkeit absolute Voraussetzung sei. Es sollte ausreichend Raum für Diskussionen sein, insbesondere dann, wenn ein Nicht-Einverständnis vorliegt. Bürger sollten die Möglichkeit haben, Argumente und ggf. alternative Lösungsvorschläge vorzubringen.

Auf die Frage, wer als externer Stakeholder einbezogen werden sollte, antwortete ebenfalls ein Repräsentant aus Belgien (frei übersetzt aus Meyermans 2019):

„Ich denke, Personen, deren Wissenshintergrund bezüglich der Thematik derendlagerung radioaktiver Abfälle gering ist, sollten keine Entscheidungsverantwortung tragen. Sie können Hinweise geben oder ihrem Zweifel Ausdruck geben. Sie können einverstanden oder nicht einverstanden sein aber nicht sagen, dies ist schlecht und das ist gut, wenn ihnen die Thematik völlig fremd ist.“

Dieses Statement spricht für sich und besagt grundsätzlich, dass nach Meinung des Repräsentanten, Entscheidungsbefugnis bei diesem sensiblen Thema auf fundierten Kenntnissen der Thematik beruhen sollte.

Auf die Frage, welche Rolle eingebundene Interessensgruppen einnehmen sollten, gab ein Repräsentant aus Schweden die Antwort (frei übersetzt aus Meyermans 2019):

„Ich denke, dass es grundsätzlich jedem erlaubt sein sollte, das Wort zu erheben und an dem Prozess zu partizipieren, aber ich denke nicht, dass jeder an Entscheidungsprozessen beteiligt werden sollte. Ich glaube nicht, dass es eine gute Idee ist, wenn einzelne Personen oder kleine NGOs ein Teil des Entscheidungsprozesses werden. Ich glaube, dass es in einer Demokratie den gewählten Personen vorbehalten sein sollte, Entscheidungen ggf. mit Hilfe von Experten zu fällen. Und es sollten nicht die Lautesten sein, die entscheiden.“

Die meisten der befragten Repräsentanten waren sich darin einig, dass einzelne lokale Stakeholder das Recht haben sollten, beteiligt zu werden aber ohne Entscheidungsbefugnis, es sei denn, es ist aus speziellen Gründen, z. B. aus einem demokratischen Prozess, gewünscht. Die eigentliche Rolle eingebundener externer Interessengruppen sollte sein, den

Ingenieuren und Management-Verantwortlichen vor Augen zu führen, dass sie auch nicht-technische Aspekte berücksichtigen sollten, z. B. die Bedürfnisse lokaler betroffener Gemeinden. Von der schwedischen Betreibergesellschaft SKB beispielsweise wurde in dem Zusammenhang der Kontakt mit der örtlichen Gemeinde gesucht und es wurde grundsätzlich ein Abkommen geschlossen, dass der lokalen Gemeinde auch ein Veto-Recht zugesteht.

7.3 Grenzen der Anwendbarkeit eines Monitoring

Es wird verschiedentlich angeführt, dass ein Monitoring speziell des geotechnischen Barrirensystems auch Nachteile haben kann, aufgrund dessen auf ein Monitoring verzichtet werden sollte. Aspekte, die in diesem Zusammenhang u. a. vorgebracht werden, sind vorzugsweise

- die Lebensdauer von technischen Messsystemen ist begrenzt, speziell im Hinblick auf die Beobachtung von Langzeitentwicklungen
- Der Einbau messtechnischer Elemente innerhalb von Barrieren könnte u. U. die Leistung der geotechnischen Barriere schwächen
- Das Entstehen fehlerhafter Messsignale kann nicht generell ausgeschlossen werden und könnte bei Nichterkennen zu Fehlinterpretationen führen

Natürlich ist die Lebensdauer von Sensoren – wie im ersten Punkt erwähnt – begrenzt. Das macht sich u. a. bei einem Monitoring von Verschlussbauwerken bemerkbar. Das im Rahmen des ANSICHT-Projektes entwickelte Verschlusskonzept schließt zum Beispiel Abdichtbauwerke zum Verschluss von Einlagerungsbohrlöchern, Einlagerungsfeldern sowie Zugangsstrecken und -schächten ein (Jobmann et al. 2017). Das Sicherheitskonzept umfasst den Nachweis der Integrität jedes Verschlussbauwerks sowie den Nachweis, dass die Leistungsziele, die den verschiedenen Verschlüssen zugewiesen sind, erreicht werden können. Um die Leistungsziele zu erreichen, müssen spezifische bauliche Anforderungen erfüllt werden. Die Erfüllung dieser Bauanforderungen ist durch ein Qualitätskontrollprogramm in Verbindung mit Qualitätssicherungsmaßnahmen zu überprüfen. Die Erreichbarkeit der Leistungsziele eines Verschlussbauwerks ist abhängig vom verwendeten Material und von der Zeit, die der Verschluss benötigt, um seine volle Funktionsfähigkeit zu erreichen. Da Ton als Wirtsgestein angenommen wird, ist es naheliegend, dass tonbasierte Materialien eine wichtige Rolle beim Abdichten haben werden. In der Regel wird Bentonit aufgrund seiner Quellfähigkeit in Verschlusskonzepten verwendet. Ein spezifischer Quelldruck ist notwendig, um eine ausreichende Dichtheit der Kontaktzone zwischen Abdichtbauwerk und Wirtsgestein zu erreichen. Dieser Quelldruck erfordert eine möglichst hohe Wassersättigung der Bentonitdichtung. Aufgrund der geringen Permeabilität des Bentonits, die während des Sättigungs vorgangs noch weiter abnimmt, kann der Zeitraum bis zur vollständigen Aufsättigung mehrere Jahrzehnte betragen. Dies gilt insbesondere für große Streckenverschlüsse und bei geringem Wasserzufluss aus dem niedrigpermeablen umgebenden Wirtsgestein. Einen solchen Zeitraum abzudecken stellt für Monitoring-Systeme eine große Herausforderung dar.

Aber selbst wenn davon auszugehen ist, dass der relevante Zeitraum nicht vollständig abgedeckt werden kann, ohne ein Monitoring gehen auch Anfangsinformationen verloren. Warum sollte man aus Sorge, Langzeitinformationen zu verlieren, auf Kurzzeitinformationen verzichten. Es wird davon ausgegangen, dass Kurzzeitinformationen helfen, Vertrauen in das korrekte Langzeitverhalten einer Barriere zu schaffen.

Aber nicht nur zeitliche Aspekte beeinträchtigen die Möglichkeiten des Monitoring, sondern auch räumliche. Und dies spielt besonders für den zweiten oben aufgeführten Punkt eine Rolle. Für die Messung von z.B. Wassergehalt, Porendruck, Totaldruck und richtungsabhängige Spannungen gibt es verschiedene geeignete punktbasierte Sensoren (MoDeRn 2013c). Da sie aber alle punktbasiert sind, liefern sie nur lokale Informationen. Um ein Gesamtbild über den Status und die Entwicklung des Dichtelements zu erhalten, wäre eine dichte Verteilung

lung dieser Art von Sensoren erforderlich. Je mehr Sensoren im Element angebracht sind, desto größer ist das Risiko, dass die Dichtheitsanforderungen nicht erfüllt werden. Generell gilt, dass ein Gleichgewicht zwischen Informationsbedarf und Vermeidung von Beeinträchtigungen gefunden werden muss. Nicht-invasive Methoden zur messtechnischen Erfassung aller relevanten Eigenschaften dieser Art von Verschlussbauwerken gibt es derzeit nicht. Natürlich sind tomographische Tools verfügbar, aber diese müssten von unterschiedlichen Außenseiten Zugang zum Element haben, z.B. von parallel zur Dichtung gebohrter Bohrlöchern. Dies würde allerdings die hohen Dichtheitsanforderungen ad absurdum führen.

Neben der vermutlich langen Zeit, die zur Erreichung der Leistungsziele der Dichtelemente benötigt wird, müssen Aspekte der technischen Machbarkeit eines Monitoring beachtet werden. Ansätze für Monitoring-Konzepte betrachten zunehmend drahtlose Sensoreinheiten als den Weg in die Zukunft, da der Einsatz von kabelbasierten Sensoren das Risiko einer Fluidmigration entlang der Kabel deutlich erhöht und damit die Dichtheit gefährden würde. Aus jetziger Sicht wären in diesem Zusammenhang noch weitere FuE-Arbeiten z. B. bezüglich drahtloser Datenübertragung durchzuführen. Diese könnten auf die in den europäischen Verbundprojekten MoDeRn und MODERN2020 durchgeführten FuE-Arbeiten, die diesbezüglich bereits einen sehr guten Stand erreicht haben, aufbauen.

Drahtlose Sensoreinheiten benötigen Energie, um speziell langfristig einwandfrei zu funktionieren, entweder durch z.B. Li-Batterien mit einer geschätzten maximalen Lebensdauer von etwa 10 Jahren oder durch "Energy Harvesting" (Energiegewinnung aus der Umgebung), was die Lebensdauer erheblich verlängern würde (MoDeRn 2013c). Letzteres wird untersucht, aber derzeit ist noch kein Werkzeug verfügbar. Thermoelektrische Generatoren oder Radionuklidbatterien (MODERN2020 2019c) könnten dieses Problem lösen.

Aber nicht nur das Energieproblem muss gelöst werden. Ein weiteres Problem ist das Altern bestimmter Bauteile, z. B. durch Korrosion oder andere Materialveränderungen. Eine Lebensdauer der Monitoring-Module von mehreren Jahrzehnten kann nicht garantiert werden, und die Möglichkeiten der Wartung oder des Austauschs sind, je nach Einsatzort, ggf. begrenzt. Sensoren oder Übertragungseinheiten können nur aktualisiert oder ersetzt werden, wenn Zugang zu ihnen besteht oder dieser mit vertretbarem Aufwand hergestellt werden kann. Monitoring-Module, die in verfüllten und verschlossenen Bereichen, z. B. in der Mitte eines Dichtelements installiert wurden, können nur unter hohem Aufwand ausgetauscht werden, ohne das Element zumindest teilweise neu aufzubauen. Deshalb müssen Fehler- und Ausfallwahrscheinlichkeiten für alle Module berücksichtigt werden. Ein gängiger Weg, dieses Problem zu begrenzen, ist der Einsatz von diversität-redundanten Mess- und Übertragungssystemen. Nachteilig ist jedoch die zusätzlich erforderliche Anzahl von Monitoring-Modulen, was wiederum zu dem Problem führt, dass zu viele Module in einem Dichtelement vorhanden sind und damit seine Funktion ggf. beeinträchtigen würden.

Neben diversität-redundanter Systeme wäre eine weitere Möglichkeit, die Ausfallwahrscheinlichkeit von Systemen zu begrenzen, der Einsatz von eigensicheren Sensoren (siehe Anhang B). Diese Sensoren haben die Fähigkeit zur Selbstanalyse und Selbstkorrektur. Diese Fähigkeit bietet die Möglichkeit, verschiedene Arten von Signalfehlern wie Trends, abnormales Rauschen, Peaks, systematische Messabweichungen usw. zu erkennen. Eine Korrektur dieser Fehler könnte die Lebensdauer eines Sensors sowie die Genauigkeit der Messdaten erheblich erhöhen. Aufgrund der deutlich höheren Kosten und der begrenzten Dauer von Experimenten werden eigensichere Sensoren in Untertagelaboren nicht eingesetzt. Für den Einsatz im Rahmen eines Monitoring-Konzeptes für ein Endlager kann dies aber in Zukunft eine Option sein. Es ist jedoch festzuhalten, dass für eine erwartete Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten derzeit keine vollständige Validierung von Messsystemen vorliegt.

Eine mögliche Fehlinterpretation im Zusammenhang mit nichterkannten Fehlern des Messsystems sollte aber nie ein Argument dafür sein, Monitoring überhaupt nicht durchzuführen,

denn ohne Monitoring gehen auch die "guten" Informationen, die nicht fehlerhaft sind, verloren. An dieser Stelle sei folgendes Beispiel gegeben. Ein Flugzeughersteller würde auch nicht auf den Einbau von Sensoren in sicherheitsrelevanten Komponenten verzichten mit dem Argument, dass Fehlmessungen auftreten könnten und damit ggf. Fehlinterpretationen, die zu unnötigen Notlandungen führen könnten. Ein Einbauverzicht und der damit verbundene „Message“, dass das Flugzeug sowieso sicher ist, würde zumindest den Autor dieses Berichtes dazu verleiten, in so ein Flugzeug nicht einzusteigen. Das Sinnbild der drei Affen, die „*nichts sehen, nichts hören und nichts sagen*“, erscheint nicht dafür geeignet, Vertrauen aufzubauen, besonders nicht bei Menschen, die Laien auf dem Gebiet der technischen Endlagerung sind.

Es ist sicher auch unbestritten, dass ein Monitoring kein perfektes Werkzeug ist. Ohne ein Monitoring aber wäre der Erkenntnisgewinn während der Betriebsphase eines Endlagers deutlich limitiert. Das ehrliche Einräumen von Unzulänglichkeiten dagegen scheint wesentlich geeigneter zu sein, Vertrauen zu schaffen als zu postulieren, dass in mehreren Jahrzehnten Endlagerbetrieb keine Fehler auftreten werden. In der langen Zeitspanne eines Endlagerbetriebes könnten neue Materialien entwickelt werden, und das Personal, das die Verschlüsse baut und installiert, wird sich naturgemäß verändern. Formale Qualitätssicherung ist ein notwendiges Werkzeug, aber was ist mit Redundanz zur Qualitätssicherung? Qualitätssicherungsmaßnahmen können so gut sein, wie es geht; in jedem Fall werden sie aber von Menschen durchgeführt, und niemand ist perfekt. Durch ein Monitoring steht ein redundantes Werkzeug zur Qualitätssicherung zur Verfügung.

In vielen nationalen Entsorgungsprogrammen wurden Wirtsgesteine identifiziert, die die Anforderung an einen sicheren Einschluss wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle erfüllen. Allgemein besteht Einvernehmen darin, dass diese Wirtsgesteine und ihr funktionellen Anforderungen nicht durch endlagerinduzierte Prozesse gefährdet werden dürfen. In Frankreich besteht eine der Sicherheitsanforderungen darin, die günstigen Eigenschaften des Wirtsgesteins Tongestein unverändert zu erhalten ohne endlagerinduzierte Beeinträchtigungen. Eine der Haupteigenschaften in diesem Sinne ist die geringe Permeabilität des Gesteins, die einen sehr geringen advektiven Fluidstrom und damit einen ausreichend kleinen Radionuklidtransport gewährleistet. Es ist natürlich möglich, Strömungen zu messen, jedoch nicht über große Entfernen von mehreren hundert Metern in einem nur sehr schwach durchlässigen porösen Medium. Die Fließgeschwindigkeit wäre viel zu langsam für eine messtechnische Erfassung. Eine Flüssigkeit würde Tausende von Jahren für solche Entfernen benötigen, was auch der Grund dafür ist, dass genau dieses Gestein als Wirtsgestein ausgewählt wurde. Eine messtechnische Erfassung von Strömungs- und Transportprozessen kann nur in kleinen Bereichen durchgeführt werden, z. B. zwischen zwei benachbarten Bohrlöchern. Deshalb können nur lokale Informationen gewonnen werden. Zu erwähnen ist auch, dass jede Bohrung, die zu Messzwecken errichtet wird, die Funktion des Gesteins schwächen kann, indem es unerwünschte Migrationspfade erzeugt. Es ist daher festzuhalten, dass eine messtechnische Erfassung einer Fluidströmung im großräumigen Endlagerbereich nicht möglich ist.

Dann aber stellt sich die Frage, ob nicht die Parameter, die den Fluidstrom charakterisieren, erfasst werden können, man also eine indirekte Information bekommen kann. Der wichtigste Parameter in diesem Zusammenhang ist die Permeabilität des Gesteins. Dies ist bekanntermaßen ein oft gemessener Parameter, da er ein wichtiger Eingangsparameter für Sicherheitsanalysen ist. Die Messungen werden entweder an Bohrkernproben aus Erkundungsbohrungen oder in-situ in einem oder mehreren Bohrungen durchgeführt. Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik erfordern Permeabilitätsmessungen aktive Flüssigkeitsinjektionen und Aufzeichnungen von Druckänderungen, was für eine kontinuierliche Langzeitüberwachung äußerst schwierig ist. Und auch hier handelt es sich um sehr lokale Informationen, die als repräsentativ für den gesamten zu untersuchenden Wirtsgesteinsbereich angenommen werden müssen.

Im Rahmen des französischen Endlagerkonzeptes wird beispielsweise als Sicherheitsfunktion definiert, dass "die günstigen Wirtsgesteinsbedingungen zu erhalten sind" (MoDeRn 2013b). Durch die thermische Ausdehnung der Gesteinsmatrix und noch mehr durch die Porenwasserausdehnung können sich die Permeabilität und damit die Fluidbewegung erhöhen, wenn die Druckunterschiede im Wirtsgestein zunehmen und sich das hydraulisch aktive Porenvolumen erweitert. Hinsichtlich der zeitabhängigen Temperaturverteilung ist bekannt, dass die maximale Temperatur im Wirtsgestein zwischen den Einlagerungsbohrungen innerhalb der ersten 1000 Jahre erreicht wird, was als kein realistischer Zeitraum für ein Monitoring erachtet wird.

Da das Monitoring der Permeabilität aus den oben genannten Gründen nicht im gesamten Endlager durchgeführt werden kann, ist eine Lösungsmöglichkeit, groß angelegte Versuche, sogenannte Demonstrationsversuche, insbesondere Erhitzerversuche, in untertägigen Forschungslaboren oder Versuchs- oder Pilotanlagen durchzuführen. Natürlich liefern diese Versuche auch "nur" lokale Informationen; es ist allerdings nicht zu erwarten, dass die Gesteinsfunktion geschwächt wird, da diese Versuche in separaten Gebirgsbereichen durchgeführt werden sollen. Im französischen Untertagelabor in Bure wurden beispielsweise In-situ-Tests durchgeführt, um die temperaturbedingte Änderung der Permeabilität im Hinblick auf die aktuell angewandte maximal zulässige Temperatur im Wirtsgestein zu überprüfen. Die temperaturbedingten Veränderungen erwiesen sich als vernachlässigbar. Man muss natürlich davon ausgehen, dass diese Ergebnisse repräsentativ für das Wirtsgestein in der Region Bure sind.

Die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) sehen vor, dass die advektive Fluidströmung mit der diffusen Strömung im Wirtsgestein vergleichbar sein muss, was bedeutet, dass die Geschwindigkeit der advektiv bedingten Fluidmigration genauso langsam sein muss wie die Diffusionsprozesse. Dies wird auch als das sogenannte „Advektions-Kriterium“ bezeichnet (Jobmann et al. 2015). Wie bereits erwähnt, kann die Fluidmigration aufgrund der extrem niedrigen Strömungsgeschwindigkeit nicht messtechnisch erfasst werden. Darüber hinaus sehen die Sicherheitsanforderungen vor, dass die Integrität des Wirtsgesteins unter Berücksichtigung der endlagerinduzierten Belastungen nachgewiesen werden muss. Eine erhebliche Belastung entsteht durch die von den Abfallbehältern abgegebene Wärme. Das Wirtsgestein neben den Kanistern wird der höchsten Temperatur und damit der höchsten thermisch induzierten Druckbeanspruchung ausgesetzt, die etwa innerhalb der ersten 50 Jahre erreicht wird. Dies ermöglicht zumindest eine eingeschränkte Überprüfung durch ein Monitoring während der Betriebsphase des Endlagers. Das Maximum der Temperatur wandert in das Wirtsgestein und erreicht seinen Höchstwert zwischen den Einlagerungsbohrlöchern in einem Zeitraum von 500 bis 1000 Jahren begleitet von entsprechenden Änderungen des Porendruckes. Auch hier ist der Zeitraum zu lang für eine direkte Verifizierung durch ein Monitoring.

Trotz ihrer potenziell schädlichen Auswirkungen auf das Wirtsgestein, sieht das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Monitoringkonzept stark instrumentierte, sogenannte Opfer-Einlagerungsbohrlöcher zur messtechnischen Erfassung des Wirtsgesteinsverhaltens im Nahbereich dieser Einlagerungsbohrlöcher vor. Dies schließt kleine Bohrungen in der Nähe der Abfallbehälter ein. Diese Opfer-Einlagerungsbohrlöcher sollen als vordefinierte Rückholungsbohrlöcher dienen. Vor der endgültigen Schließung des Endlagers werden die Behälter aus diesen Bohrlöchern rückgeholt und in bereits vorbereitete "normale" Einlagerungsbohrlöcher an einem anderen Ort eingelagert. Ähnlich wie bei groß angelegten Demonstrationsversuchen ober beim Monitoring von Versuchsanlagen sind die so erhaltenen Informationen lokal begrenzt und müssen als repräsentativ für den gesamten Endlagerbereich angesehen werden. Andernfalls kann eine Beeinträchtigung des Wirtsgesteins und seiner Eigenschaften nicht ausgeschlossen werden. Eine sorgfältige Abwägung der Lage dieser Bohrlöcher ist unerlässlich, um die Repräsentativität zu gewährleisten.

8 Zusammenfassung und Fazit

Dieser Bericht schildert zunächst, wie sich das Thema Monitoring im internationalen Kontext entwickelt hat und gibt einen Überblick über die historische Entwicklung internationaler und nationaler Projekte zum Thema Monitoring in den letzten 20 Jahren. Seitens der IAEA wurden bereits in einer Reihe von Dokumenten strategische Richtlinien veröffentlicht, die sich speziell auf das Monitoring von Endlagern beziehen. Diese Richtlinien wurden im Laufe der Zeit weiter entwickelt und sind mittlerweile eng mit dem "Safety Case" bzw. dem Sicherheits- und Nachweiskonzept verknüpft. Parallel zur Entwicklung der IAEA Richtlinien wurden seitens der Europäischen Kommission Gemeinschaftsprojekte gefördert, ausgehend von dem 'European Thematic Network' (ETN) bis hin zu dem MODERN Konsortium, die neben den strategischen Zielsetzungen für ein Monitoring speziell auch Möglichkeiten zur praktischen Implementierung von Monitoring-Programmen im Zuge des schrittweisen Vorgehens bei der Entwicklung eines Endlagers untersuchten und bewerteten.

Mit Blick auf die aktuelle Situation in Deutschland wurden die Rahmenbedingungen für ein Monitoring in Deutschland und die damit verbundenen regulatorischen Anforderungen und Richtlinien erläutert. Der regulatorische Rahmen für das Monitoring eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle wird durch die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (BMU 2010) sowie deren in Vorbereitung befindlichen Neufassung (EndSiAnFV 2019) vorgegeben. Darüber hinaus gibt es Empfehlungen für ein Endlager-Monitoring, die im Abschlussbericht der Endlagerkommission niedergelegt sind und neben dem technischen Endlagersystem speziell auch den gesamten Prozess der Entstehung des Endlagers und seine sozio-ökonomische Begleitung mit einbeziehen. Als entscheidende Zielsetzung wird genannt, dass mit dem Monitoring die Aussagen der im Vorfeld erstellten Sicherheitsanalyse zur Entwicklung des Endlagersystems überprüft werden sollen. Dieser Punkt wird seitens der Endlagerkommission als wichtig angesehen, speziell im Hinblick auf eine verbesserte Transparenz von Entscheidungen, insbesondere wenn es darum geht, zu entscheiden, ob der Endlagerprozess fortgesetzt, geändert, unterbrochen oder umgekehrt werden soll.

Bezogen auf die nationalen und internationalen Rahmenrichtlinien wird ein Weg aufgezeigt, wie ein sinnvolles Monitoring Programm entwickelt werden kann, insbesondere im Zusammenhang mit aktuellen Sicherheits- und Nachweiskonzepten. Ein Kernelement dieses Weges stellt die Parameter-Screening-Methode dar, die im Rahmen der internationalen Kooperation innerhalb des MODERN2020 Projektes entwickelt wurde. Die Entwicklung war motiviert durch den Wunsch, ein Werkzeug zu haben, mit dem ein Monitoring-Programm erstellt werden kann, das bedarfsoorientiert mit Blick auf das Nachweiskonzept in der Lage ist, die Bewertung der Langzeitsicherheit mit Messwerten zu unterstützen. Die Screening-Methode dient zum einen der objektivierten Rechtfertigung, warum einzelne Parameter Teil eines Monitoring-Programms sind und zum anderen dient es der Transparenz nach außen, d. h., Außenstehende können nachvollziehen, warum es im Zusammenhang mit dem Sicherheitsnachweis wichtig ist, einzelne Parameter einem Monitoring zu unterziehen. Die Screening-Methode bietet dem Implementer eine Hilfe an, Parameter zu identifizieren, die ihrerseits Prozesse charakterisieren, deren zeitlicher Verlauf für den Sicherheitsnachweis relevant sind. Die damit erstellte Liste von Parametern ist maßgeblich für das Design und die Entwicklung eines bedarfsoorientierten Monitoring-Programms.

Darüber hinaus ist das Screening auch entscheidend, wenn es darum geht, die Möglichkeiten und Grenzen eines standortbezogenen Monitoring-Programms zu charakterisieren. Während des Screening-Prozesses werden geeignete Monitoring-Strategien und Technologieoptionen für alle als relevant erachteten Parameter identifiziert. Mit Blick auf die erwartete Entwicklung dieser Parameter wird nicht nur die technische Machbarkeit bewertet, sondern auch denkbare potenzielle Beeinträchtigungen von Endlagerkomponenten, speziell Verschlusbauwerken, durch eingebaute Monitoring-Systeme im Hinblick auf die Erreichbarkeit der definierten Leistungsziele (vgl. Abb. 4.7 in Kapitel 4). Dies bedeutet, dass die Identifizierung

von Möglichkeiten und Grenzen eines standortspezifischen Monitoring-Programms ein inhärenter Bestandteil der Parameter-Screening-Methode ist. Mit anderen Worten, die explizite und detaillierte Anwendung der vorgeschlagenen Screening-Methode liefert bereits im Vorfeld eine Charakterisierung der aktuellen Möglichkeiten eines Monitoring und erlaubt somit sowohl eine transparente als auch eine fachlich fundierte Bewertung dessen, was von einem Monitoring erwartet werden kann und was nicht.

Anhand des Beispiels einer ingenieurtechnischen Barriere aus dem Verschlusskonzept des Projektes ANSICHT wurde die Screening-Methode exemplarisch angewendet. Ausgehend von den im Sicherheits- und Nachweiskonzept definierten Sicherheitsfunktionen und zugehörigen Leistungszielen wurden unter Zuhilfenahme des lokationsspezifischen FEP-Kataloges die Prozesse identifiziert, die eine Beeinflussung der betrachteten Barriere bewirken. Mit diesen so identifizierten Prozessen wurde der Screening-Prozess inklusive der geforderten Prognosemodellierungen durchlaufen und die Parameter identifiziert, die für ein Monitoring in Frage kommen. Basierend auf dieser Parameterliste konnte dann explizit ein Monitoring-Konzept für die Barriere erstellt werden. In analoger Weise wurden auch für die übrigen geotechnischen Barrieren Monitoring-Konzepte erstellt und dies sowohl für ein Endlagerkonzept im Tonstein als auch im Steinsalz. Wesentliche Prämissen der Konzepte sind die Repräsentativität der Messlokationen, die Berücksichtigung von Lerneffekten und, bezogen auf die Technologie, die Minimalinvasivität unter Verwendung von kabellosen autarken Systemen.

Mit Blick auf die Möglichkeiten und Grenzen eines Monitoring wird abschließend diskutiert, in welcher Form die Ergebnisse eines Monitoring genutzt werden können, um sowohl wesentliche Entscheidungen im Endlagerungsverlauf informativ zu unterstützen, als auch zur Vertrauensbildung beizutragen. Klar ist, dass Monitoring nicht als ein universelles Werkzeug zur Prüfung der Endlagersicherheit angesehen werden kann. Nutzt man aber die in diesem Bericht beschriebene Monitoring-Strategie, die ein schrittweises Vorgehen im Sinne eines 'Lernkonzeptes' vorsieht, kann das Monitoring ein geeignetes Werkzeug sein, um Kenntnisse über das langfristige Verhalten des geotechnischen Barrierensystems zu vertiefen. Monitoring kann somit dazu beitragen, zumindest die geotechnischen Komponenten des Endlager-systems zu verbessern oder zu optimieren, indem es Nutzen aus der verfügbaren Zeit während der Betriebsphase zieht. Und da das Lernkonzept auch für das Monitoring-System selbst gilt, wird jede Entscheidung hinsichtlich der Langzeitsicherheit das Wissen darüber enthalten, wozu Monitoring fähig ist und wozu nicht. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Einschränkungen von Monitoring werden besonders solche Entscheidungen bestimmen, die zum Ende der Betriebsphase getroffen werden müssen. Dies beinhaltet insbesondere die Entscheidung, ob ein Monitoring auch in der Nachverschlussphase stattfinden soll oder nicht.

Die klare und transparente Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen eines Monitoring ist essenziell, wenn es darum geht, den Erwartungen externer Interessengruppen gerecht zu werden. In dem Zusammenhang wird die Option diskutiert, dass Entscheidungen auf Betreiberebene durch eine unabhängige Institution unterstützt werden. Dies könnte zur Vertrauensbildung in der Öffentlichkeit beitragen. Der "runde Tisch" (vgl. z. B. Abb. 7.6) würde um Vertreter der externen Institution erweitert werden. Betreiber und externe Institution analysieren die Messdaten und informieren ggf. die Regulierungsbehörde. Die Verantwortlichkeit des Betreibers sollte allerdings nicht berührt werden. Im Zusammenhang mit der „externen Institution“ wäre es naheliegend, auf das Modell des „Nationalen Begleitgremiums“ (NBG) zurückzukommen. Das NBG wurde in Deutschland gegründet mit der Aufgabe das Standortauswahlverfahren mit kritischen Augen zu begleiten. Diese Aufgabe ist prinzipiell mit dem gleichzusetzen, was die Endlagerkommission in ihrem Bericht unter dem Begriff „Prozessmonitoring“ versteht. Analog dazu könnte auch das „Endlagermonitoring“, von einem nationalen Gremium begleitet werden. Man könnte überlegen, Vertreter eines solchen Gremiums an den (Schlüssel-) Entscheidungsprozesse, wie sie beispielsweise in Abb. 7.5 oder Abb. 7.6 angedeutet sind, zu beteiligen und sie mit einem Veto-Recht auszustatten.

9 Literaturverzeichnis

- AITEMIN & MoDeRn-Partners. (2013). MoDeRn: State of Art Report on Monitoring Technology. Tech. rep., European Commission.
- Bárcena, I., Espada, F., García-Sineriz, J.-L., Hart, J., Manukyan, E., Marelli, S., et al. (2013). Development Report of Monitoring Technology. Deliverable D-2.3.1, Workpackage 2, AITEMIN \& MoDeRn Partners.
- Batezini, R., & Balbo, J. (June 2015). Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 8(3), 248-259.
- BGE-TEC. (2019). Internes Memo zum technischen Endlagerkonzept S2. Technischer Bericht, BGE Technology GmbH, Peine.
- BMU. (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- DOE. (1996). WIPP Compliance Certification Application. WIPP Compliance Certification Application. Carlsbad, New Mexico.
- DOE. (2009). Title 40 CFR Part 191 Subparts B and C Compliance Recertification Application for the Waste Isolation Pilot Plant, Appendix MON-2009 WIPP Monitoring Programs. Title 40 CFR Part 191 Subparts B and C Compliance Recertification Application for the Waste Isolation Pilot Plant, Appendix MON-2009 WIPP Monitoring Programs. Carlsbad, NM, USA.
- Endlagerkommission. (2016). Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin.
- EndlSiAnfV 2019. Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, Referentenentwurf Stand 11.07.2019, Berlin.
- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-Hoeppke, N. (2011). Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). Technischer Bericht, DBETEC, Peine.
- ETN. (2004). Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste. Tech. rep., EC.
- Hansen, F. D. (2019). Monitoring Programme, Design Basis, Monitoring Strategies and Decision Making. In J. Bertrand, M. Garcia, & J. Oltra (Hrsg.), Modern2020 Final Conference Proceedings.
- Hansen, F. D. (2011). Repository Performance Confirmation. Sandia Report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550.
- Harvey, E. J., & White, M. J. (2008). Summary Report of RWMC/Nirex Monitoring Workshop. Workshop Report, Galson Sciences LTD, Genf.
- Herold, P., Gruner, M., Jobmann, M., & Kudla, W. (2019). Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein, Teilbericht zum AP1 ELSA Phase 2. Technischer Bericht, BGE Technology GmbH, Peine (in Vorbereitung).
- Herold, P., Jobmann, M., & Kuate Simo, E. (2017). Integritätsnachweis geotechnische Barrieren. In: Jobmann, M. (ed.): Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle – Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Germany.
- Herold, P., Prignitz, S., Kuate-Simo, E., Filbert, W., & Bertrams, N. (2018). Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen. Abschlussbericht, BGE Technology GmbH, Peine.
- IAEA. (2001). Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. Technical Document, IAEA.
- IAEA. (2006). Geological Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements. Geological Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements (WS-R-4). Vienna.
- IAEA. (2011a). Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements. Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements (No. SSR-5). Vienna.
- IAEA. (2011b). Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: Specific Safety Guide. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: Specific Safety Guide (No. SSG-14). Vienna.
- IAEA. (2012). The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Guide. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Guide (No. SSG-23). Vienna.

- IAEA. (2014). Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities: IAEA Safety Standards. Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities: IAEA Safety Standards (No. SSG-31).
- IAEA. (2019). Use of Monitoring Programmes in the Safe Development of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Technical Document, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Jobmann, M., & MoDeRn-Partners. (2013). MoDeRn Case Studies. EC Deliverable D-4.1, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., et al. (2017). Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland - Synthesebericht - Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Jobmann, M., Beushausen, M., Burlaka, V., Flügge, J., Frenzel, B., Lommerheim, A., et al. (2019). Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager im Kristallin in Deutschland. Technischer Bericht, BGE Technology, GRS, BGR, Peine (in Vorbereitung).
- Jobmann, M., Haverkamp, B., & Seidel, K. (2011). Untersuchung geeigneter Methoden für das Monitoring eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen von der Oberfläche aus und in der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY und GGL, Peine.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., & Polster, M. (2015). Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tongestein. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technical Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Kalinski, M., & Yerra, P. (2005). Hydraulic conductivity of compacted cement-stabilized fly ash. World Coal Ash (WOCA). Lexington, Kentucky, USA.
- Krone, J., Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., et al. (2008). Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Abschlussbericht FKZ 02E10065 und 10055, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Lege, T., Kolditz, O., & Zielke, W. (1996). Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten - Strömungs- und Transportmodellierung (Bd. 2). (BGR, Hrsg.) Hannover, Germany: Springer.
- Lommerzheim, A., & Jobmann, M. (2015). Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD, Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- McCain, G., & Dewoolkar, M. (2010). Porous Concrete Pavements: Mechanical and Hydraulic Properties. TRB 2010 Annual Meeting.
- Meyermans, A., Cools, P., & Bergmans, A. (2019). Monitoring in Geological Disposal \& Public Participation: A Stakeholder Guide. Technical Report, University of Antwerp, Luxembourg.
- Meyermans, A., Parotte, C., Cools, P., Sundqvist, G., & Bergmans, A. (2018). Modern2020 – Engaging Local stakeholders in RD\&D of Monitoring Systems. Workshop Report WP5, University of Antwerp and University of Gothenburg, Antwerp.
- Militzer, H., & Weber, F. (1985). Angewandte Geophysik - Geoelektrik, Geothermik, Radiometrie, Aerogeophysik (Bd. 2). Berlin: Springer-Verlag.
- MODERN. (2013a). Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis. Tech. rep., European Commission.
- MODERN. (2013b). MoDeRn Monitoring Reference Framework report. Tech. rep., European Commission.
- MODERN. (2013c). MoDeRn: Technology Summary Report. Tech. rep., European Commission.
- MODERN2020. (2019a). Project Synthesis Repository Monitoring: Strategies, Technologies and Implementation; Project: Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal. Synthesis Report, Europäische Union, Luxembourg.
- MODERN2020. (2019b). Wireless data transmission systems for repository monitoring systems; Project: Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal. Deliverable D3.2, Europäische Union, Luxembourg.
- MODERN2020. (2019c). Synthesis report on relevant monitoring technologies for repositories; Project: Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal. Deliverable D3.1, Europäische Union, Luxembourg.

- MODERN2020 (2018). Reliability and qualification of components; Project: Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal. Deliverable D3.6, Europäische Union, Luxembourg.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, J., Herbert, H.-J., Lerch, C., et al. (2012). Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1 Vorbemessung. Technischer Bericht, GRS-287, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, Peine, Braunschweig.
- NDA. (2014). A review of the development of bentonite barriers in the KBS-3V disposal concept. NDA Technical Note, NDA.
- NEA. (1982). Disposal of Radioactive Waste: An Overview of the Principles Involved. OCDE.
- NEA. (2011). Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel. Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011), NEA / RWM.
- NEA. (2014). Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M): Monitoring of Geological Disposal Facilities – Technical and Societal Aspects. Tech. rep., Nuclear Energy Agency.
- Pease, R. (2010). Hydraulic properties of asphalt concrete. Dissertation, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.
- Sandia. (2008). Performance Confirmation Plan - TDR-PCS-SE-000001 REV 05 AD 01. Technical Report, Sandia National Laboratories, Las Vegas, Nevada.
- Schneider, S., Mallants, D., & Jacques, D. (2012). Determining hydraulic properties of concrete and mortar by inverse modelling. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1475. 2400 Mol, Belgium: Materials Research Society.
- Simons, P. (2019). Effectively engaging local citizen stakeholders in RD&D on monitoring for geological disposal. In J. Bertrand, M. Garcia, & J. Oltra (Hrsg.), Modern2020 Final Conference Proceedings.
- StandAG. (2017). Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG). Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG). Bonn.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., et al. (2014). FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau - Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., et al. (2016). FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD - Konzept und Aufbau - Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Terzaghi, K., & Fröhlich, O. (1936). Theorie der Setzung von Tonschichten. Eine Einführung in die analytische Tonmechanik. Franz Deuticke, Wien.
- Wagner, K. (2005). Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.
- White, M., Farrow, J., & Crawford, M. (2017). Repository Monitoring Strategies and Screening Methodologies. Technical Report, GSL, Oakham, UK.
- White, M., Farrow, J., & Morosini, M. (2019). Monitoring During the Operational Period to Provide further Confidence in the Post-Closure Safety Case: Strategies and Parameters. In J. Bertrand, M. Garcia, & J. Oltra (Hrsg.), Modern2020 Final Conference Proceedings.

Abkürzungsverzeichnis

ALZ	Auflockerungszone
Andra	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (Deutsch: Nationale Agentur für das Management radioaktiver Abfälle)
ANSICHT	F&E-Projekt: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein
BEP	Betreiber-Entscheidungspunkt
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
BSK	Brennstabkokille
CASTOR	Cask for storage and transport of radioactive material (Deutsch: Behälter zur Aufbewahrung und zum Transport radioaktiven Materials)
CSD-B	Kokille mit verglasten Spülwässern
CSD-C	Kokille mit verpressten Hüllrohrstücken und Strukturteilen
CSD-V	Kokille mit verglasten wärmeentwickelnden Abfällen aus der Wiederaufarbeitung
CTU	Czech Technical University in Prague
DB	Dummy-Bohrloch
DOE	Department of Energy (USA)
DWR	Druckwasserreaktor
EB	Einlagerungsbohrloch
EBS	Engineered Barriere System
EOS (Modul)	Equation of State (Module)
EPE	Endlagerprogramm-Entscheidungen
ETN	European Thematic Network on Monitoring
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	Features, Events, and Processes
FO	Faseroptik
GGL	Geophysik und Geotechnik Leipzig
GO	Gorleben
GOK	Geländeoberkante
HAW	High active waste (hoch aktiver Abfall)
IAEA	International Atomic Energy Agency
ISIBEL	F&E-Projekt: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW
ITE	Ingenieurtechnische Entscheidungen
LZ	Leistungsziel
MB	Monitoring-Bohrloch
MF	Monitoring-Feld
MH	Mess-Horizont
MIL	Monitoring Level
Mona	F&E-Projekt: Untersuchung zu Rahmenbedingungen und Aufbau eines Endlager-Monitoring für hochradioaktive Abfälle in verschiedenen Wirtsformationen und Phasen einer Endlagerentwicklung unter Berücksichtigung von Machbarkeit und Unsicherheiten
MoDeRn/MODERN	Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure
MODERN2020	Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal
MS	Monitoring-Streckenverschluss
NBG	Nationales Begleitgremium
NDA	Nuclear Decommissioning Authority
NEA	Nuclear Energy Agency
NIREX	Nuclear Industry Radioactive Waste Executive (United Kingdom Nirex Limited in 1985)

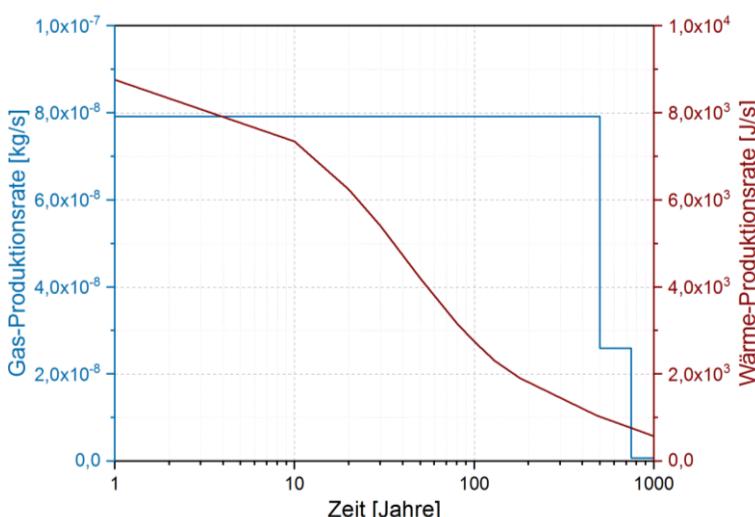
NRG	Nuclear Research and Consultancy Group (Niederlande)
OB	Opfer-Bohrloch
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PAR	Parameter-Ebene
REP	Regulator-Entscheidungspunkt
PRO	Prozess-Ebene
RE	Regierungs-Entscheidung
RESUS	F&E-Projekt: Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle
RK-BE	RK mit Leistungsreaktor-Brennelementen
RK-HA	RK mit hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung
RK-ST	RK mit Strukturteilen aus der Brennelementkonditionierung
RK-WA	RK mit nicht Wärme entwickelnden Wiederaufarbeitungsabfällen
RS	Relais-Station
RWMC	Radioactive Waste Management Funding and Research Centre (Japan)
SEP	Schlüssel-Entscheidungspunkt
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
SP	Spent Fuel (Deutsch: Brennelemente)
SSG	Specific Safety Guide
SSR	Specific Safety Requirements
StandAG	Standortauswahlgesetz
SWR	Siedewasserreaktor
TDR	Time Domain Reflectometry
TEC	Technologie-Ebene
THM	Thermo-Hydro-Mechanisch
UK	United Kingdom
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor

Anhang A: Ergebnisse von Modellberechnungen zur Parameterentwicklung

A1 Modellierungen zum Bohrlochverschluss

Beispielhaft wurde die Entwicklung des Verschlusses der vertikalen Einlagerungsbohrlöcher simuliert, um den Punkt PAR2 des Screening-Schemas im Zusammenhang mit geotechnische Barrieren zu illustrieren (Burlaka et al. 2017). Um das Verhalten des Verschlussbauwerkes zu simulieren, wurden numerische Modelle entwickelt, die in der Lage sind, die THM-Reaktion auf die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen in den ersten 150 Jahren zu berechnen.

Um den Flüssigkeitsdruckaufbau, die Dauer der Wasseraufsättigung und die Temperaturentwicklung im Bohrlochverschluss zu untersuchen, wurde das Modell einer Strecke in einem Einlagerungsfeld mit einem Bohrloch, das mit einem Bentonit-Dictelement und einem Widerlager verschlossen ist, entwickelt. Eine Auflockerungszone (ALZ) um das Einlagerungsbohrloch wurde explizit in das Modell integriert. In dem Bohrloch befinden sich drei Abfallbehälter sowie metallische Innen- und ein Außenliner, die zur Gasentwicklung beitragen (Abb. 5.1). Die Gasentwicklung aufgrund der Metallkorrosion führt zu einem Druckaufbau unterhalb der Barriere und könnte damit zu einem Integritätsverlust der Barriere führen. Wasserstoff, resultierend aus der Korrosion der Metallbehälter, ist die Hauptkomponente des Gases. Die erzeugte Wärme führt zu einer thermischen Expansion sowohl des Materials des Bauwerkes als auch der Porenflüssigkeiten und trägt damit ebenfalls zum Druckaufbau bei. Die Gaserzeugung und Wärmeproduktionsrate für ein Bohrloch wurden grob abgeschätzt



und sind in Abb. A1 dargestellt (Burlaka 2016, Rübel 2016). In dem vereinfachten Streckenmodell wurden dreidimensionale 2-Phasen-Flusssimulationen hinsichtlich Strömung von Wasser und Wasserstoffgas durchgeführt.

Abb. A1:
Geschätzte Gaserzeugung und
Wärmeproduktionsraten für ein
Einlagerungsbohrloch (Rübel 2016)

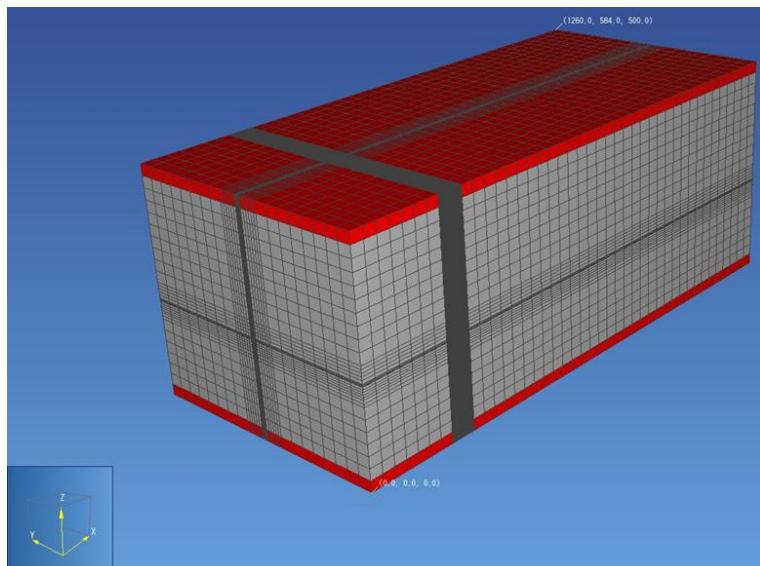
A1.1 Modellbeschreibung

Für die Berechnungen wurden der Computercode TOUGH2 (Pruess et al. 1999) und seine graphische Schnittstelle PETRASIM (Thunderhead Engineering 2010) verwendet. Der 2-Phasen-Fluss von Wasserstoff und Wasser wurde durch das Modul zur Simulation der Zustandsgleichung EOS5 (Equation-of-State module) abgebildet. Im Modell wurden Einlagerungs-, Zugangs-, und Hauptstrecken zu einer Strecke zusammengefasst, die eine Länge von 1.140 m und einen Querschnitt von 40m² hat. Das Bohrloch hat eine Länge von 27 m, wobei der Verschluss eine Länge von 5 m in Anspruch nimmt. Die Mächtigkeit der ALZ wird mit 0,5 m angenommen. Das Modell umfasst 130.548 Gitterblöcke, eine Breite von 584 m, eine Länge von 1.260 m und eine Höhe von 500 m (Abb. A2).

Abb. A3 zeigt die Diskretisierung im Bohrlochbereich (Burlaka et al. 2017). In den Simulationen wurden das untere Ende, die Mitte und das obere Ende des Verschlussbauwerks als Beobachtungspunkte definiert. Als eine Randbedingung wurde ein fester hydrostatischer Druck an den oberen und unteren Grenzen des Simulationsmodells angenommen (Abb. A2). Es wird angenommen, dass das Gebirge anfänglich komplett mit Wasser gesättigt ist und

unter hydrostatischem Druck steht, während die Strecke, das Bohrloch und der Verschluss zu 45% mit Wasser gesättigt sind und unter Atmosphärendruck stehen. Da das im EOS5-Modul angenommene Gas Wasserstoffgas ist, entspricht die Gassättigung im Endlager einer Sättigung mit Wasserstoff. Das Modellkonzept sieht eine Zwischenlagerzeit von 20 Jahren und eine Ausgangstemperatur von 35°C im Endlager und Wirtsgestein vor. Die relativen Permeabilitäten der beiden Phasen und der Kapillardruck werden durch die van Genuchten-Funktion abgebildet (Mualem 1976, van Genuchten 1980). Der Gaseindringdruck für den Tonstein und die ALZ wurden nach Jahn & Sönnke (2013) berechnet.

$$P_0 = 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot k^{-0,346}$$



Die Modellparameter für die in den Simulationen verwendeten Materialien, sind in Tab. A1 aufgelistet.

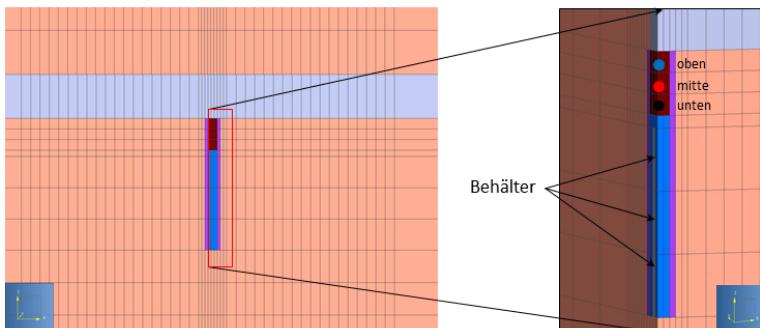


Abb. A1:
Diskretisierung des Modells. Die rot markierten Element stellen Zonen mit festen Randbedingungen dar (Burlaka et al. 2017)

Abb. A2:
Diskretisierung im Bohrlochbereich mit vergrößerter Darstellung des Einlagerungsbohrloches mit den Behältern. Der schwarze, rote und der blaue Punkt sind Beobachtungspunkte im Bohrlochverschluss (Burlaka et al. 2017)

Tab. A1: Modellparameter der Materialien, die in den Simulationen gemäß Nowak & Massmann (2013) und Yildizdag et al. (2008) verwendet wurden.

Material	Farbe	Permeabilität [m²]	Porosität [-]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Gas-eindringdruck [MPa]	Parameter λ [-]	Maximaler Kapillardruck [MPa]
Ton	orange	Horiz.: 10^{-19} vertikal: 10^{-20}	0,05	2	2,1	0,55	10
ALZ	lila	10^{-18}	0,05	2	1	0,55	10
Versatz	hellblau	10^{-15}	0,20	2	0,1	0,55	7,41
Bentonit	schwarz	10^{-19}	0,36	1,6	0,3	0,363	2
Buffer	blau	10^{-17}	0,36	1,6	0,3	0,363	9
Stahl	grau	10^{-15}	0,001	10	-	-	-

A1.2 Ergebnisse bezüglich des hydraulischen Verhaltens

Zur Untersuchung des Einflusses von Gas- und Wärmeleitung auf den Druckaufbau und die Wassersättigung im Verschlussbauwerk wurden vier Fälle simuliert (Burlaka et al. 2017):

- mit Gas- und Wärmeerzeugung
- ohne Gas-, aber mit Wärmeerzeugung
- mit Gas-, aber ohne Wärmeerzeugung
- ohne Gas- und ohne Wärmeerzeugung

Abb. A4 zeigt die Ergebnisse für die ersten beiden Fälle über einen Zeitraum bis zu 200 Jahren (Burlaka et al. 2017). Im Verschlussbauwerk wird ein Druckanstieg vom unteren bis zum oberen Ende beobachtet, unabhängig davon, ob Gas erzeugt wird oder nicht. Durch das von den Behältern kommende Gas und die Hitze, wird der höchste Druck am unteren Ende des Verschlussbauwerks beobachtet, wenn eine Gasproduktion berücksichtigt wird. Dieser Druck übersteigt den hydrostatischen Druck. Die Gasproduktion führt zu einem erhöhten Druck und dem Entstehen einer freien Gasphase im Verschlussbauwerk (Abb. A4, links). Aufgrund des signifikanten Abfalls der Wärmeleitungsrate nach 10 Jahren (Abb. A1) und damit der thermischen Kontraktion des Gebirges und der Porenflüssigkeiten, wird ein Druckabfall bis zu einem Zeitpunkt von 50 Jahren beobachtet. Ohne Wärmeerzeugung bleibt der Druck im Zeitbereich zwischen 10 und 50 Jahren konstant und steigt anschließend an. Der Druckanstieg im Verschluss nach 50 Jahren korrespondiert mit einer kompletten Wassersättigung der Strecke zu diesem Zeitpunkt und resultiert daher von einem zusätzlichen Druck aufgrund von Wasserzutritt längs die Strecke.

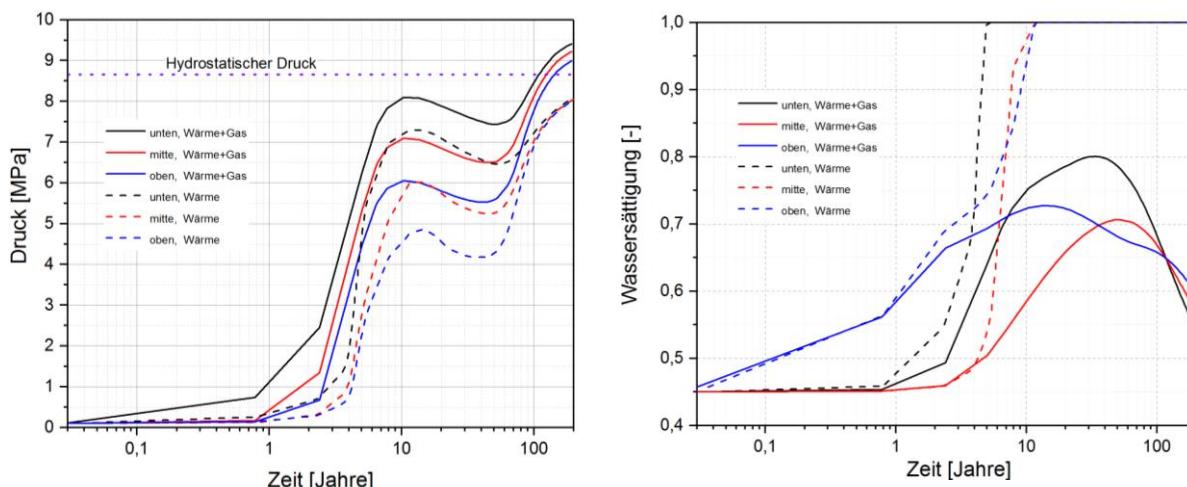


Abb. A4: Porendruckaufbau (links) und Wasseraufsättigung (rechts) im Verschlussbauwerk mit Gas- und Wärmeleitung (durchgezogene Linie) und nur mit Wärmeleitung (gestrichelte Linie).

Wenn Gasproduktion betrachtet wird, tritt eine teilweise Entwässerung des Verschlussbaus auf (Abb. A4, rechts). Um dieses Phänomen zu erklären, wurden Simulationen mit Permeabilitäten des Verschlussbaus von 10^{-16} und 10^{-17} m^2 mit Gas- und Wärmeleitung durchgeführt und die Ergebnisse mit denen verglichen, die eine Anfangspermeabilität von 10^{-19} m^2 verwendeten (Abb. A6). Das Verschlussbauwerk ist nach fünf Jahren komplett aufgesättigt, wenn die Permeabilität 10^{-16} m^2 erreicht; eine leichte Entwässerung tritt erst nach 80 Jahren auf, wenn die Permeabilität 10^{-17} m^2 erreicht. Eine höhere Permeabilität des Verschlusses führt dazu, dass Gas durch den Bohrlochverschluss entweichen kann und damit zu einer Wasseraufsättigung des Verschlussbaus. Der Druck im Verschluss übersteigt den hydrostatischen Druck nur, wenn die Permeabilität 10^{-19} m^2 erreicht. Die Ergebnisse der Simulationen nur mit Wärmeleitung zeigen, dass Gas, das sich anfänglich im Endlager befindet, gelöst wird, und dass das Verschlussbauwerk nach 10 Jahren komplett mit Wasser gesättigt ist (Abb. A4) (Burlaka et al. 2017).

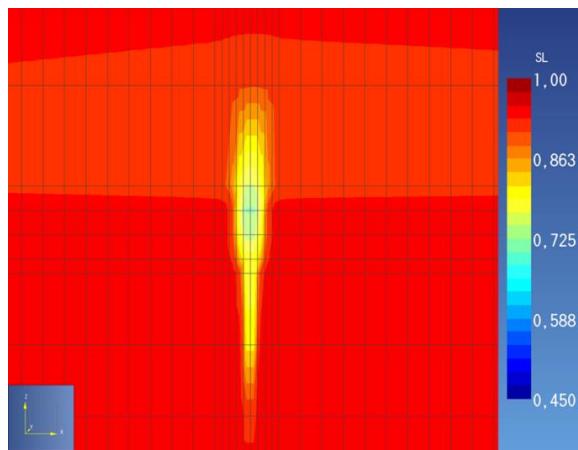


Abb. A5: Verteilung der Wassersättigung im Bohrlochbereich und in der Strecke nach 50 Jahren, wenn sowohl Gas- als auch Wärmeleitung berücksichtigt werden.

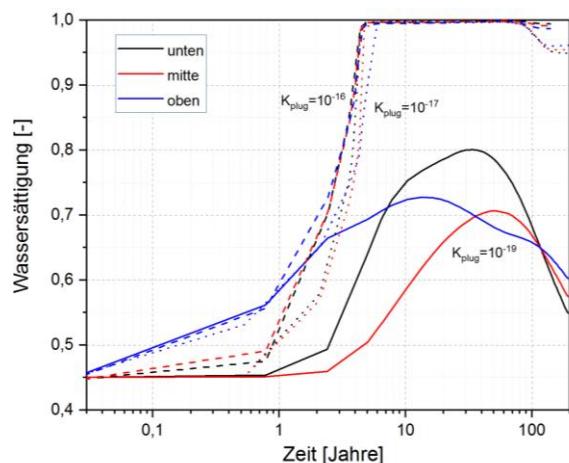


Abb. A6: Wasseraufsättigung am unteren Ende, in der Mitte und am oberen Ende des Verschlussturms bei Gas- und Wärmeleitung und einer Permeabilität des Verschlussturms von 10^{-19} m^2 (durchgezogene Linie) und einer Permeabilität von 10^{-17} m^2 (gepunktete Linie)

Der Temperaturanstieg in den ersten 10 Jahren (Abb. A7) entspricht dem hohen Wärmeeintrag während dieses Zeitraums (Abb. A1). Die höchste Temperatur mit 67°C wird am unteren Ende des Verschlussturms erreicht. Abb. A8 zeigt beispielhaft die Temperaturverteilung im Bohrlochbereich nach 10 Jahren (Burlaka et al. 2017).

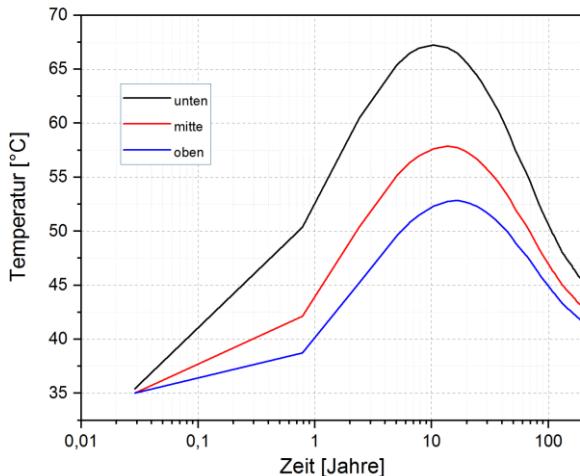


Abb. A3:
Temperaturentwicklung am unteren Ende, in der Mitte und am oberen Ende des Dichtelements

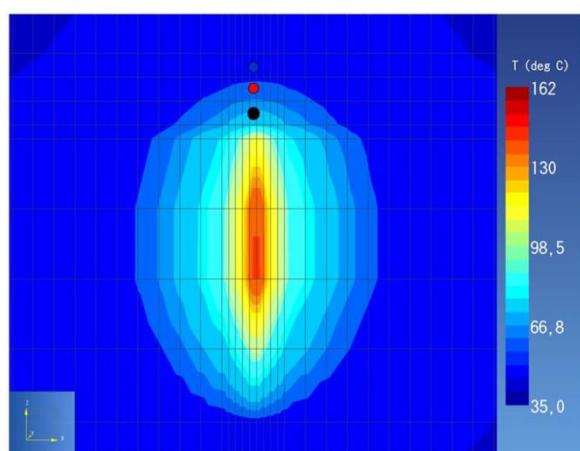


Abb. A4:
Temperaturverteilung im Bohrlochbereich nach 10 Jahren. Unteres Ende, Mitte und oberes Ende des Dichtelements sind jeweils als schwarzer, roter und blauer Punkt dargestellt.

Um den Einfluss der Wärmeleitung zu illustrieren, wurden die Ergebnisse der Simulationen ohne Wärme- und Gasproduktion mit den Ergebnissen der Simulationen nur mit Wärmeerzeugung verglichen. Dabei wurde beobachtet, dass der Wärmeeintrag zu einem schnelleren und höheren Druckaufbau am Bohrlochverschluss führt (Abb. A 5, links). Dieser Druckaufbau wird durch die thermische Expansion der Materialien und Porenflüssigkeiten aufgrund der erzeugten Wärme hervorgerufen. Ohne Gas- und Wärmeerzeugung dauert die Aufsättigung des Dichtbaus längere als mit Wärmeerzeugung, da die Wärme die Viskosität des Wassers reduziert und somit das Eindringen des Fluids beschleunigt. In den Simulationen ohne Gas- und Wärmeerzeugung bleibt der Druck für mehrere Jahrzehnte konstant. Solch

ein Verhalten entspricht einer kompletten Wasseraufsättigung des Verschlusselementes zu diesem Zeitpunkt (Abb. A 5, rechts). Anschließend steigt der Druck wieder aufgrund des durch den Wasserzutritt zur Strecke induzierten Drucks. Dieselbe Beobachtung kann man auch machen, wenn nur der Fall mit Gasbildung betrachtet wird, wobei der Druck in diesem Fall höher ist und den hydrostatischen Druck nach 110 Jahren übersteigt.

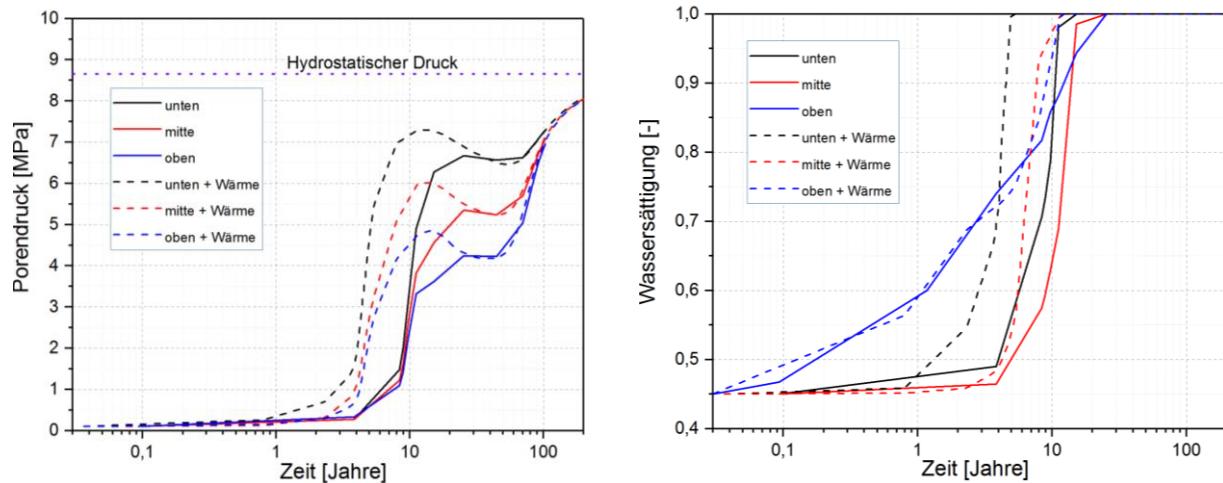


Abb. A 5: Porendruckaufbau (oben) und Wasseraufsatigung (unten) am unteren Ende, in der Mitte und am oberen Ende des Verschlussbauwerks ohne Gas- und ohne Wärmeerzeugung (durchgezogene Linie) und nur mit Wärmeerzeugung (gestrichelte Linie) (aus Burlaka et al. 2017)

Um den Einfluss der ALZ auf die Wasseraufsatigung im Dichtelement unter Berücksichtigung einer Gasbildung zu untersuchen, wurde die Permeabilität der ALZ auf 10^{-17} gesetzt und die Porosität von 0,05 auf 0,1 erhöht. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen allerdings, dass der Einfluss der ALZ begrenzt ist.

A1.3 Ergebnisse bezüglich des mechanischen Verhaltens

Die mechanische Entwicklung des Verschlusses wurde mit FLAC3D und einer ähnlichen Modellgeometrie simuliert. Die sich ergebenden mechanischen Drücke in vertikaler und radialer Richtung sind in Abb. A 6 und Abb. A 7 dargestellt. Die Drücke sind für Beobachtungspunkte am unteren Ende, in der Mitte und am oberen Ende des Bentonit-Dichtelements aufgezeichnet, wie aus dem eingefügten Diagramm ersichtlich ist (Burlaka et al. 2017).

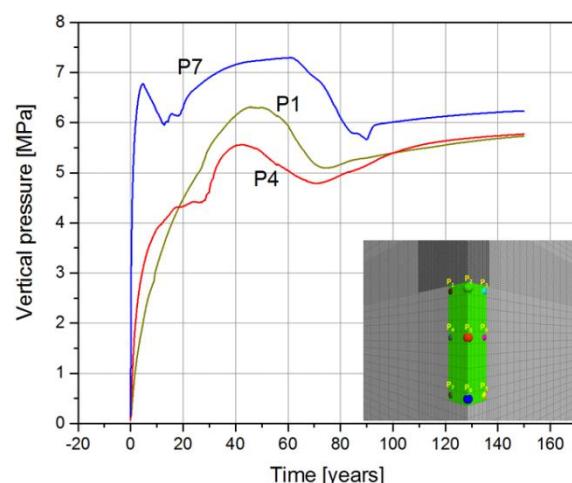


Abb. A 6: Entwicklung der vertikalen Drücke im Dichtelement

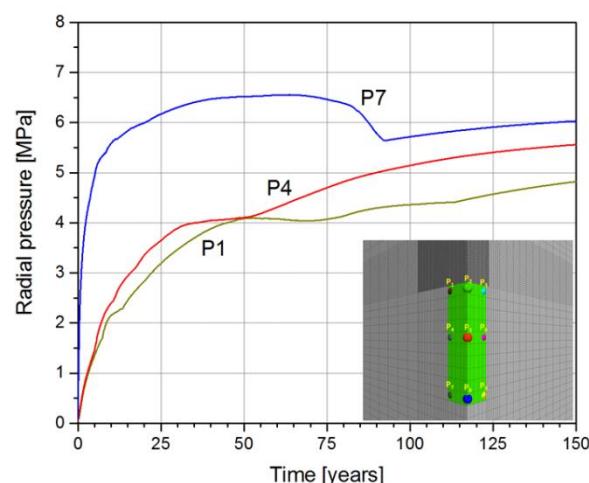


Abb. A 7: Entwicklung der radialen Drücke im Dichtelement

Die Ergebnisse hinsichtlich der vertikalen Verschiebung des Widerlagers sind in Abb. A 8 dargestellt. Ziel ist, dass die Verschiebung des Widerlagers nicht mehr als 3% der Länge des Dichtelements überschreitet. Die Simulation ergibt eine Verschiebung von weniger als 4 cm am Ende des zugrunde gelegten Monitoring-Zeitraums von 150 Jahren. Der Verlauf der Kurve lässt darauf schließen, dass die vertikale Verschiebung selbst nach Extrapolation auf lange Sicht einen Wert von 5 cm nicht überschreiten wird. Da 3% einem Wert von 15 cm entspricht, scheint die Sicherheitsspanne groß genug zu sein, um Unsicherheiten abzudecken.

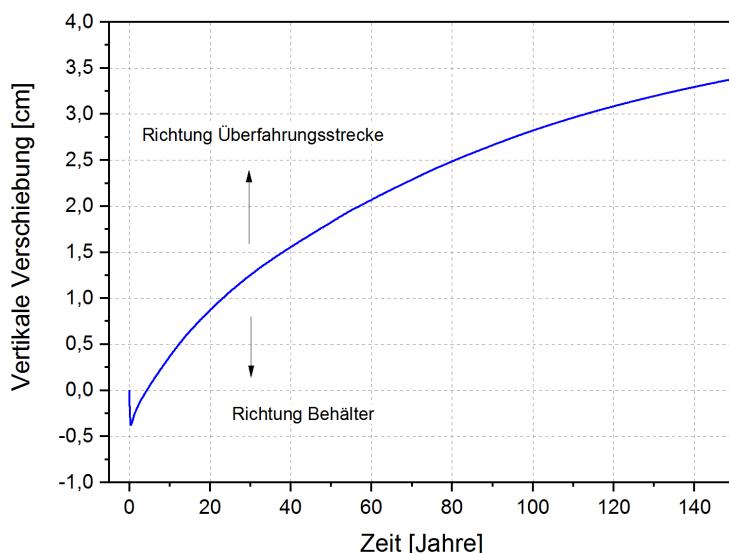


Abb. A 8: Vertikale Verschiebung des Widerlagers aufgrund von Drücken aus dem Dichtelement

A.1.4 Schlussfolgerungen

Die Gaserzeugung führt zu höheren Drücken, die den hydrostatischen Druck übersteigen (nach 110 Jahren), und zu einer freien Gasphase, wenn die Permeabilität des Verschlusselementes 10^{-19} m^2 beträgt. Mit zunehmender Permeabilität des Verschlusselementes bis auf 10^{-16} m^2 , wird das Gas vollständig im Wasser gelöst und nach 5 Jahren ist der Bohrlochverschluss komplett mit Wasser gesättigt, wobei die Porendrücke den hydrostatischen Druck nicht übersteigen. Wärmeerzeugung führt zu einer früheren und schnelleren Wasseraufsaättigung des Dichtelements und verursacht einen Druckabfall aufgrund einer signifikanten Reduzierung der Wärmerate nach etwa 10 Jahren. Nach 50 Jahren steigt der Druck wieder an. In den Simulationen ohne Wärmeerzeugung hingegen bleibt der Druck konstant anstatt zu sinken. Inhärente Eigenschaften der ALZ wie Porosität und Permeabilität haben nur einen sehr geringen Einfluss auf Druckaufbau und Aufsaättigung des Dichtelements.

Die mechanischen Drücke führen weder zu einer unzulässigen vertikalen Verschiebung des Widerlagers oberhalb des Dichtelements noch zu einem Radialdruck, der die minimale Hauptspannung im Wirtsgestein übersteigt, wodurch Rissbildung vermieden wird. Die Ergebnisse der Simulationen dienen unter anderem dazu, die notwendigen Messbereiche von Sensoren zu bestimmen, die in das Dichtelement und das Widerlager eingebracht werden sollen.

A2: Modellierungen zur Migrationssperre

Vorangegangene Modellstudien deuteten aufgrund der geringen Gasproduktionsrate auf einen nur begrenzten Einfluss der Gasbildung im Endlagerstandortmodell SÜD hin (Burlaka 2016). Deshalb wurde nur die Gasproduktionsrate aus dem Model NORD berücksichtigt. Zwei vereinfachte Modellkonfigurationen des Endlagers wurden dazu verwendet, dreidimensionale 2-Phasen-Fluss-Simulationen durchzuführen, um den Einfluss von Gas- und Wärmeleitung auf die Dauer der Wasseraufsaättigung und den Fluiddruckaufbau in der Zugangsstrecke und im Streckenverschluss während der ersten 200 Jahre zu untersuchen.

A2.1: Modellbeschreibungen

Das eine Modell umfasst lediglich eine Einlagerungsstrecke, das andere ein komplettes Einlagerungsfeld mit 9 Einlagerungsstrecken. In beiden Modellen wurden 17 Behälter als Gas-

und Wärmequellen in jeder Einlagerungsstrecke berücksichtigt. Die Zugangsstrecke ist direkt mit der Einlagerungsstrecke verbunden und gegenüber der Hauptstrecke mit einem Stopfen verschlossen. In allem Strecken wurde ein Streckenausbau und eine Auflockerungszone (ALZ) berücksichtigt. Die ALZ ist in drei Schichten unterteilt, um einen Permeabilitätsgradien-ten in der ALZ zwischen Strecke und Wirtsgestein zu simulieren. Der Verschluss besteht aus zwei Widerlagern, zwischen denen sich ein Asphalt- und ein Bentonit-Dichtelement befinden. Abb. A 9 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Modells. Zur Repräsentierung eines kompletten Einlagerungsfeldes wurden Volumenfaktoren verwendet, um ein Gesamtvolume von 9 Einlagerungsstrecken zu berücksichtigen. Die Gasproduktionsrate jedes Behälters wurde mit 9 multipliziert, um die gesamte Gasbildung im Einlagerungsfeld zu repräsentieren. Die ge-schätzten Gaserzeugungs- und Wärmeproduktionsraten für ein Bohrloch im Endlagerkonzept NORD (Burlaka 2016, Rübel 2016) sind in Abb. A 1 dargestellt.

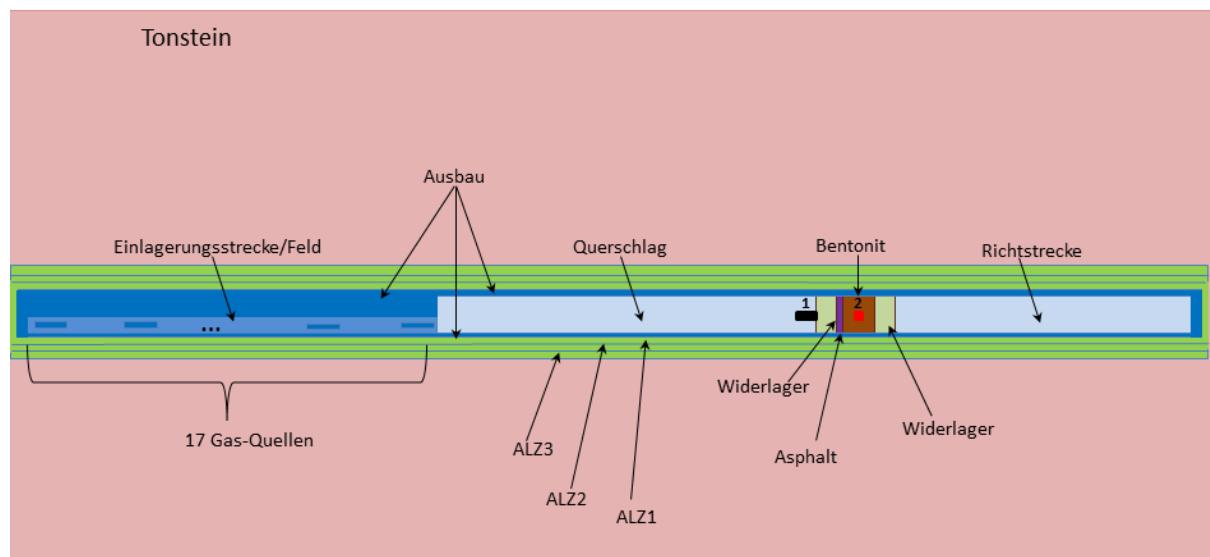


Abb. A 9: Prinzipieller Aufbau des Endlagermodells

Zur Simulation des 2-Phasen-Flusses von Wasserstoff und Wasser wurde das TOUGH2-Modul EOS5 verwendet (Pruess et al. 1999). Der Modellbereich ist 1650 m lang, 584 m breit und 500 m hoch. Die Diskretisierung besteht aus 188160 rechteckigen Elementen. Ein vergrößerter Ausschnitt im Bereich der Migrationssperre ist in Abb. A 14 dargestellt. In den Simulationen wurden die schwarzen und roten Zellen (s. Abb. A 9 und Abb. A 10) als Beobach-tungspunkte gesetzt; sie entsprechen einem Element in der Zugangsstrecke und einem Ele-ment im Bentonit-Dichtelement. Speziell an diesen Punkten werden die Ergebnisse im Fol-genden diskutiert (Kap. A 2.2). Die Einlagerungsstrecke ist 420 m lang und hat einen Querschnitt von 20 m², während die Zugangs- und Hauptstrecken 390 m lang sind und einen Querschnitt von 40 m² ha-ben.

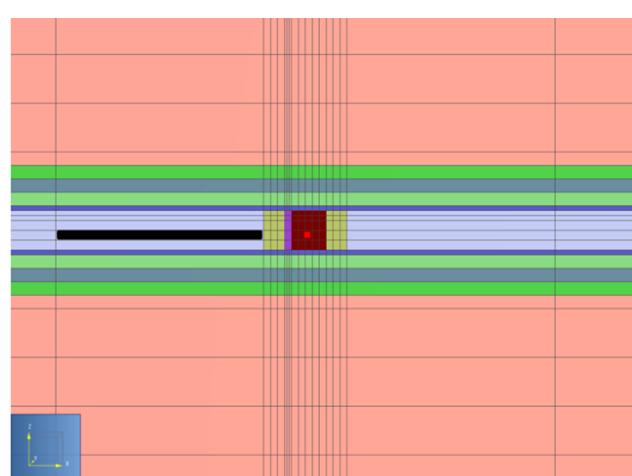


Abb. A 10:
Vergroßertes Gitternetz im Bereich der
Migrationssperre in xz-Ebene. Die schwarze Zelle
entspricht dem Beobachtungspunkt in der
Zugangsstrecke, und die rote Zelle entspricht dem
Beobachtungspunkt im Bentonit-Element

Die anfängliche Wasseraufsättigung beträgt: 100% im Ton und im Asphalt, 95% in der Auflockerungszone, 80% im Tunnelausbau, 20% im Widerlager, 45% in den Strecken, den Behältern (Gas- und Wärmequellen) und im Bentonit-Element. Der anfängliche Druck im Gebirge verteilt sich gemäß dem hydrostatischen Druckgradienten, während die restlichen Modellelemente unter atmosphärischem Druck stehen. Die anfängliche Temperatur im Endlager und im Wirtsgestein beträgt 35°C. Der Kapillardruck und die relativen Permeabilitäten der beiden Phasen werden durch die van Genuchten-Funktion repräsentiert (Mualem 1976, van Genuchten 1980). Die Gaseindringdrücke für den Ton und die ALZ wurden nach Jahn & Sönnke (2013) gemäß folgender Beziehung berechnet.

$$P_0 = 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot k^{-0,346}$$

Die charakteristischen Materialparameter für die Simulationen sind in Tab. A 2 aufgeführt. Die ALZ wurde in drei Bereiche mit unterschiedlichen Materialparametern unterteilt, wobei jeder ALZ-Bereich eine Mächtigkeit von 2 m besitzt. Als Randbedingung wurde ein fester hydrostatischer Druck an den oberen und unteren Grenzen des Simulationsmodells angenommen (Abb. A 11).

Tab. A 2: Materialeigenschaften und Parameter zur Simulationen des Kapillardrucks

Material	Permeabilität [m²]	Porosität [-]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Gaseindringdruck P_0 [MPa]	Funktionsparameter λ [-]	Maximaler Kapillardruck [MPa]
Tongestein	Horiz.: 10^{-19} vertikal: 10^{-20}	0,05	2	2,1	0,55	10
Tunnelausbau	10^{-15}	0,15	2	0,087	0,55	10
ALZ1	10^{-16}	0,15	2	0,19	0,55	10
ALZ2	10^{-17}	0,1	2	0,43	0,55	10
ALZ3	10^{-18}	0,077	2	1,0	0,55	10
Versatz	10^{-15}	0,2	2	0,1	0,55	7,41
Bentonitelement	10^{-19}	0,36	1,6	0,3	0,363	2
Asphalt	10^{-23}	0,01	2	-	-	-
Widerlager	10^{-17}	0,15	2	0,15	0,55	10
Gasquelle	10^{-15}	0,001	10	-	-	-

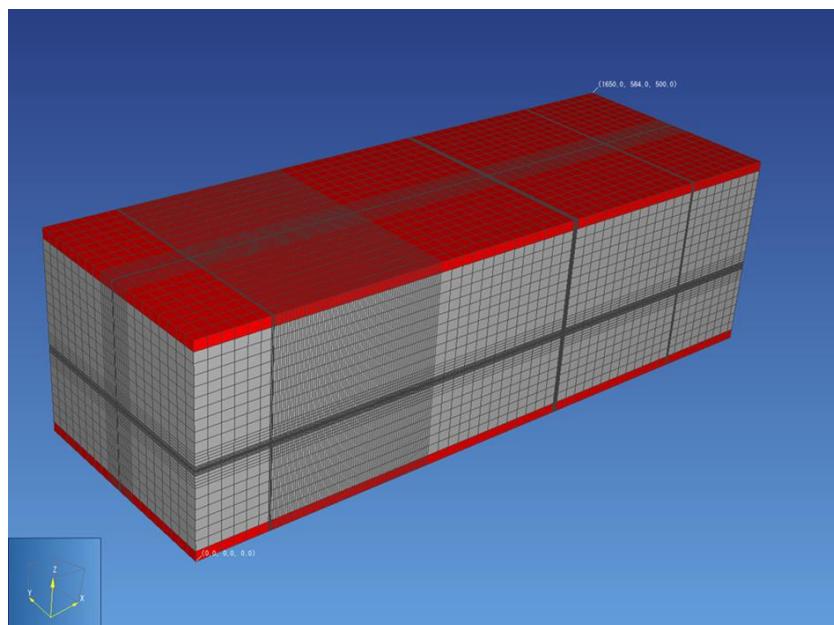


Abb. A 11:
Randbedingungen des Modells.
Die roten Bereiche bedeuten konstanter hydrostatischer Druck, die grauen Bereiche entsprechen der Reflexionsbedingung (hydraulischer Fluss = 0) no flow boundary conditions.

A2.2 Ergebnisse

Simulation für den Bereich einer einzelnen Einlagerungsstrecke

Zur Untersuchung des Einflusses der Wärmeerzeugung auf den Fluiddruckaufbau und die Dauer der Wasseraufsaättigung in der Zugangsstrecke und im Bentonit-Element wurden Simulationen durchgeführt, die einerseits nur die Gasproduktion und andererseits die Kombination von Gasproduktion und Wärmefreisetzung der Behälter berücksichtigen.

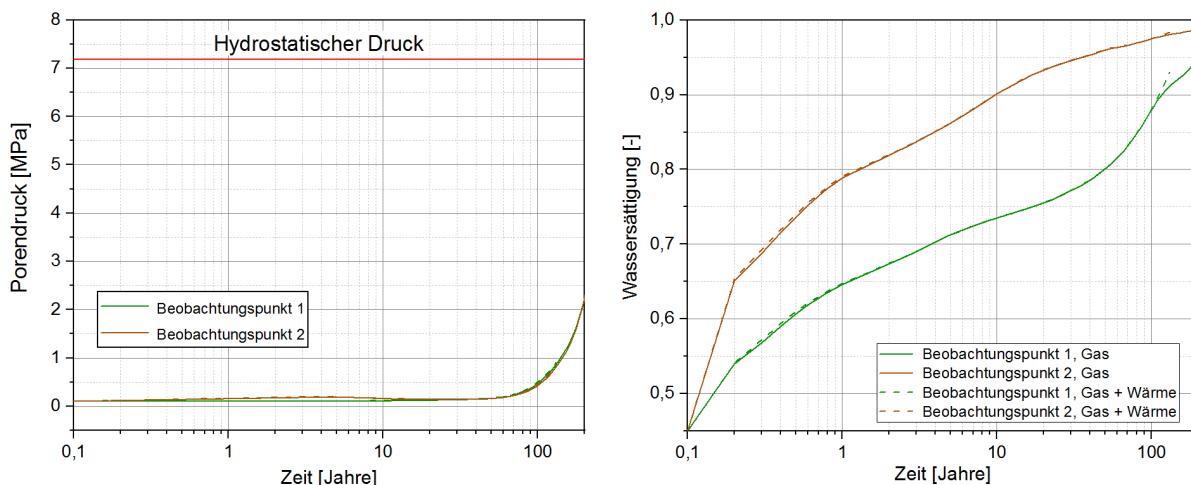


Abb. A 12: Porendruckaufbau (links) und Wassersättigung (rechts) in der Zugangsstrecke (1) und im Bentonit-Element (2) mit Gas- und Wärmeproduktion (gestrichelte Linie) und nur mit Gasproduktion (durchgezogene Linie) für den Bereich einer einzelnen Einlagerungsstrecke (Burlaka et al. 2017)

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass der Einfluss der Wärmefreisetzung der Behälter auf den Druckaufbau sowie auf die Wasseraufsaättigung sehr begrenzt und somit vernachlässigbar ist (Abb. A 12). Verglichen mit dem Berechnungsfall ohne Wärmefreisetzung (durchgehende Linien in Abb. A 12 rechts) nimmt die Wassersättigung in der Zugangsstrecke (gestrichelte Linien in Abb. A 12, rechts) bei Berücksichtigung einer Wärmefreisetzung nach 115 Jahren geringfügig schneller zu, was hauptsächlich an der reduzierten Viskosität des Fluides und dem damit verbesserten Fluidfluss liegt. Die Wassersättigung in der Zugangsstrecke (grüne Kurven in Abb. A 12 rechts) dauert länger als im Bentonit-Element (braune Kurven in Abb. A 12 rechts), was zum einen an der zunehmenden Gasmenge liegt, die von den Behältern in diesen Bereich der Strecke migriert und zum anderen an dem undurchlässigen Asphalt liegt, der vor das Bentonit-Element implementiert ist und das Eindringen von Gas in den Bentonit behindert (Burlaka et al. 2017).

Die Drücke in der Zugangsstrecke und im Bentonit-Element erhöhen sich gleichermaßen und erreichen 2,2 MPa nach ca. 200 Jahren (Abb. A 12 links).

Simulation für den Bereich eines einzelnen Einlagerungsfeldes

In dem Modell, das ein komplettes Einlagerungsfeld abbildet, wurde die Wärmefreisetzung der Behälter vernachlässigt, da diese sich als sehr begrenzt herausgestellt hat. In der Simulationen wird also nur die Gasproduktion berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abb. A 13 dargestellt. Unter Berücksichtigung einer Gasproduktion erhöht sich der Druck naturgemäß wesentlich schneller (durchgezogene Linien in Abb. A 17 links) als ohne Gasproduktion und erreicht 5,2 MPa nach 200 Jahren. Die Druckentwicklung in der Zugangsstrecke und im Bentonit-Element sind sehr ähnlich.

Durch die Gasproduktion bildet sich in der Zugangsstrecke aufgrund der Zuwanderung des Gases aus dem Einlagerungsfeld ab etwa 60 Jahren eine freie Gasphase mit etwa 15% Gassättigung aus (durchgezogene grüne Linie in Abb. A 13 rechts), während in dem Bentonit-Element (durchgezogenen braune Linie in Abb. A 13 rechts) die Wassersättigung nach

etwa 90 Jahren konstant bleibt bei einer Gassättigung von 3%. Ein derartiger Unterschied zwischen der Wassersättigung in der Zugangsstrecke und im Dichtelement beruht auf dem Einfluss des impermeablen Asphalt-Elementes, das sich vor dem Bentonit-Element befindet. Das Asphalt-Element hindert das Eindringen von Gas aus dem Einlagerungsfeld in den Bentonit signifikant. Gas kann daher nur durch die ALZ in das Bentonitelement eindringen, wie in Abb. A 14 anhand der Strömungspfeile erkennbar ist. Dies zeigt die wichtige Funktion des Asphalt-Elements, welches dem Bentonit-Element ermöglicht, sich ausreichend mit Wasser aufzusättigen ohne durch eine freie Gasphase behindert zu werden. Somit kann sich der volle Quelldruck entwickeln und damit die volle Dichtleistung erreicht werden.

Um den Einfluss der Permeabilität des Bentonit-Elements auf die Dauer seiner Wasseraufsättigung und den Druckaufbau zu untersuchen, wurden Simulationen mit Permeabilitäten des Bentonit-Elements von 10^{-17} , 10^{-18} und 10^{-19} m^2 bei gleichzeitiger Gasproduktion durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abb. A 15 dargestellt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Permeabilität des Bentonits keinen Einfluss auf die Entwicklung der Wasseraufsättigung in der Zugangsstrecke und den Druckaufbau in der Zugangsstrecke und im Bentonitelement hat (Druckaufbau nicht abgebildet). Mit abnehmender Permeabilität von 10^{-17} m^2 auf 10^{-19} m^2 , ist die Wasseraufsättigung im Bentonit-Element länger in den ersten 35 Jahren etwas verzögert. Nach Erreichen einer 95%-Wassersättigung steigt die Sättigung kontinuierlich, unabhängig von der Permeabilität des Bentonit-Elements.

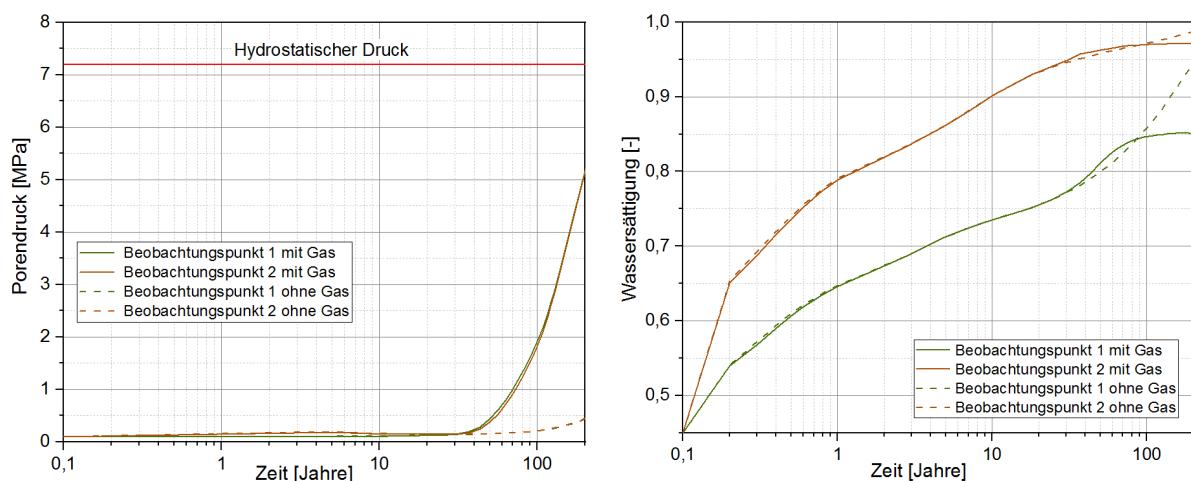


Abb. A 13: Porendruckaufbau (links) und Wasseraufsatigung (rechts) in der Zugangsstrecke (1) und im Bentonitelement (2) mit Gasproduktion (durchgezogene Linie) und ohne Gasproduktion (gestrichelte Linie)

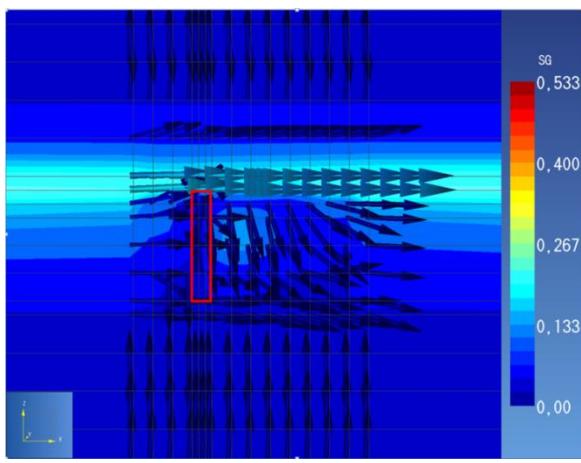


Abb. A 14: Verteilung der Gassättigung nach 90 Jahren im Bereich des Streckenverschlusses; Pfeile zeigen die Fließrichtung an. Asphalt-Bereich ist rot markiert.

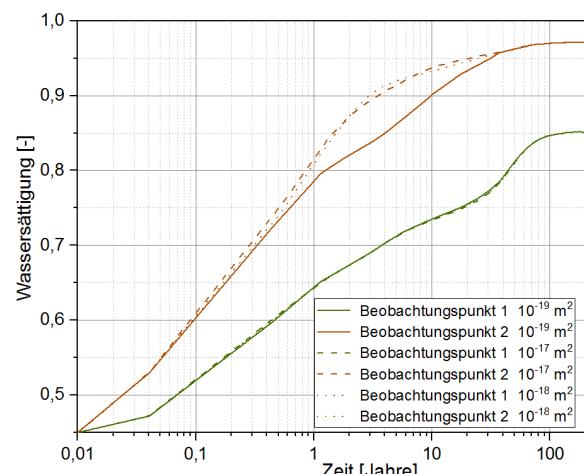


Abb. A 15: Wasseraufsatigung in der Zugangsstrecke (1) und im Bentonitelement (2) bei unterschiedlichen Permeabilitäten des Dichtelements

A2.3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass der Einfluss der Wärmeentwicklung auf den Druckaufbau und die Dauer der Aufsättigung mit Lösung in der Zugangsstrecke und im Bentonit-Element sehr begrenzt ist. Vergleicht man den Einfluss der Gasbildung aus einem kompletten Einlagerungsfeld gegenüber der Gasbildung in nur einer Strecke führt dies zu einem deutlich erhöhten Druck (von 2,2 MPa auf 5,5 MPa nach 200 Jahren) und der Bildung einer freien Gasphase in der Zugangsstrecke und im Bentonit-Element. In allen Simulationen ist der Druckaufbau in der Zugangsstrecke und im Bentonit-Element ähnlich. Gaseintritt in das Bentonit-Element kann nur durch die ALZ erfolgen, da das undurchlässige Asphalt-Element das Eindringen von Gas aus dem Einlagerungsfeld verhindert. Bei einer geringen Permeabilität des Bentonit-Elements von 10^{-19} m^2 , dauert seine Aufsättigung mit Lösung naturgemäß länger als bei den höheren Permeabilitäten von 10^{-17} und 10^{-18} m^2 , allerdings nur während der ersten 35 Jahre. Danach ist die Entwicklung der Aufsättigung (im hohen Sättigungsbereich) ähnlich. Die Permeabilität des Bentonits hat keinen signifikanten Einfluss auf den Druckaufbau in der Zugangsstrecke und im Bentonit selbst und auf die Entwicklung der Aufsättigung in der Zugangsstrecke.

Literaturverzeichnis

- Burlaka, V., Kuate Simo, E., Jobmann, M. (2017). Screening of test cases, Test Case Report DBETEC - The ANSICHT Case -, Project: Development and Demonstration of Monitoring Strategies and Technologies for Geological Disposal, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Burlaka, V. (2016). 3D-Modellierungen zum gekoppelten Lösungs- und Gastransport im Endlager. In: Jobmann, M. (ed.): Spezifische Prozessanalysen, Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Germany.
- Jahn, S., & Sönneke, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord – Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis eines HAW-Endlagers am Modellstandort NORD. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, BGR, Hannover.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12, 513-522.
- Nowak, T., & Maßmann, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, BGR, Hannover.
- Pruess, K., C., O., & G., M. (1999). TOUGH2 USER'S GUIDE, VERSION 2.0. University of California, Berkeley, California, USA.
- Rübel, A. (2016). Modellierungen zum Gastransport im Grubengebäude. In: Jobmann, M. (ed.): Spezifische Prozessanalysen, Projekt ANSICHT – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine.
- Thunderhead-Engineering. (2010). PetraSim User Manual – Version 5.0. Manhattan, USA.
- Van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society, 44, 892-898.
- Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M., & Uhlig, L. (2008). Investigation on the THM Behavior of a Heated Bentonite Barrier by Measurements and Numerical Calculations. Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

ANHANG B: Fehlererkennung

B1 Messsysteme und ihre Fehler

Wenn Monitoring-Ergebnisse das prognostizierte Verhalten von Endlagerkomponenten bestätigen, unterstützen sie damit die Modelle und Annahmen, die zum Nachweis der Sicherheit verwendet werden. Klar ist, dass Messergebnisse – aus welchen Gründen auch immer – von den prognostizierten Ergebnissen abweichen können. Eine Abweichung kann z. B. das Ergebnis eines technischen Versagens eines der vielen eingebauten Sensoren sein und bedeutet nicht unbedingt, dass die Langzeitsicherheit eines Endlagers gefährdet ist. Wenn die Messergebnisse allerdings zur Entscheidungsfindung dienen oder Teil der Bedingungen für Genehmigungsanträge sind, ist es wichtig zu überlegen, wie mit abweichenden Ergebnissen umzugehen ist; und um einen robusten Implementierungsprozess für die geologische Endlagerung zu entwickeln, muss dies im Vorfeld (a priori) geschehen.

Grundsätzlich ist es wichtig ist, zu ermitteln, warum ein Messergebnis von der prognostizierten Entwicklung abweicht. Ein Grund kann sein, dass sich die entsprechende Endlagerkomponente tatsächlich anders entwickelt als prognostiziert; eine alternative Erklärung könnte aber auch ein Versagen des messtechnischen Aufbaus oder der verwendeten Instrumente sein. Wenn eine aufgezeichnete Abweichung jedoch andeutet, dass die Langzeitsicherheit in irgendeiner Weise gefährdet sein könnte, ist es von äußerster Wichtigkeit, dass man in der Lage ist, ein Versagen des Messsystems auszuschließen, um falsche Schlussfolgerungen zu vermeiden. Signaldiagnostik und Fehlererkennung spielen deshalb eine wesentliche Rolle, wenn es darum geht, das Vertrauen in die Messergebnisse allgemein und die Entscheidungsfindung im Falle von abweichenden Messergebnissen im Speziellen zu unterstützen.

Die Fähigkeit, Fehler zu identifizieren, ist eine wichtige Eigenschaft, die vielleicht sogar als zusätzliche Anforderung zu den zu den sonstigen technischen Anforderungen (vgl. Aitemin et al. 2013) angesehen werden kann. Die Einbindung derartiger Überlegungen in die Wahl der Monitoring-Technologie wird zur Robustheit des Implementierungsprozesses beitragen. Bei der Entwicklung von Monitoring-Programmen erscheint es sinnvoll, die Installation spezieller zusätzlicher Monitoring-Systeme zu erwägen, die es ermöglichen, potenzielles Versagen der eigentlichen Monitoring-Systeme zu identifizieren.

Im folgenden Abschnitt werden einige Schlüsselbegriffe eingeführt, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Nach einigen grundlegenden Überlegungen, werden Fehlererkennungsmethoden vorgestellt und mit Fehlermöglichkeiten und Messprinzipien verknüpft, die für Monitoring-Zwecke relevant sind. Diese Verknüpfungen sollen die Möglichkeiten und Grenzen einer Fehlerdetektion bei einem Monitoring verdeutlichen.

B1.1 Grundlegende Überlegungen und Definitionen

Auf der einen Seite sind die Messdaten das Ergebnis einer Reihe von Sensoren, Kabeln, Konnektoren, Analog-Digital-Wandlern, Datenerfassungseinheiten, Datenverarbeitungseinheiten, Korrektur- und Kalibrierungsmethoden und Datenübertragungseinheiten. Das bedeutet, dass die "Qualität" der Messdaten nicht nur auf dem Sensor an sich beruht, sondern auch auf das richtige Funktionieren jeder einzelnen Komponente (als *Methode* bezeichnet). Die Komponenten dieser Kette und die Methode sind allerdings generell bewährt und robust, weshalb das Risiko eines Versagens ziemlich gering ist. Auf der anderen Seite ist es so, dass die Monitoring-Ergebnisse in ihrer Gesamtheit und nicht die einzelnen Sensormesswerte zur Entscheidungsfindung verwendet werden und deshalb Aussagen hinsichtlich der "Qualität" über die Sensorebene hinaus benötigt werden. Hinzu kommt, dass Aspekte wie Redundanz oder die Korrektur von Querempfindlichkeiten Teil eines übergeordneten Ansatzes sind, der hier als *Verfahren* bezeichnet werden.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst eine Reihe von verwendeten Schlüsselbegriffen und Konzepten erläutert.

B1.1.1 Verwendete Begriffe und Definitionen

Genauigkeit: gibt an, wie nah die Messergebnisse an den wahren Werten liegen. Anmerkung: Für das Endlager-Monitoring kann dies ein eher theoretisches Thema sein.

Analytische Qualitätskontrolle (AQK): umfasst alle Prozesse und Verfahren, die sicherstellen sollen, dass die Ergebnisse von Labor- und in-situ-Analysen einheitlich, vergleichbar und genau sind und innerhalb bestimmter Genauigkeitsgrenzen liegen.

Systematische Messabweichung (Bias): nicht-zufällige oder gerichtete Effekte, die durch einen oder mehrere Faktor(en) hervorgerufen werden, die nicht mit dem gemessenen Parameter zusammenhängen. Bias-Fehler sind gleichbleibend und wiederholbar und entsprechen einer konstanten Abweichung.

Störvariable: eine Fremdvariable in einem statistischen Modell, die (positiv oder negativ) sowohl mit der abhängigen als auch mit der unabhängigen Variablen korreliert.

Korrektur: numerischer Wert, der zu dem Ergebnis einer Messung rechnerisch hinzugefügt wird, um einen systematischen Fehler auszugleichen. Die Korrektur ist gleich dem Negativwert des geschätzten systematischen Fehlers. Da der systematische Fehler aber nicht genau bekannt ist, kann der Ausgleich nicht vollständig sein.

Korrekturfaktor: numerischer Faktor, mit dem das Ergebnis einer Messung multipliziert wird, um einen systematischen Fehler auszugleichen.

Trend: langsame Veränderungen in einem Ausgangssignal unabhängig von der gemessenen Eigenschaft.

(Mess)-Fehler: Ergebnis einer Messung abzüglich des tatsächlichen Wertes.

Versagen: Zustand, bei/in dem eine vorgesehene Leistung nicht erreicht wird.

Messauflösung: die kleinste Änderung in der zugrundeliegenden physikalischen Größe, die eine Messwertänderung hervorruft.

Methode: Anwendung einer Technik für eine spezifische Messung in einer spezifischen Umgebung, inklusive aller Hardware-Komponenten, die notwendig sind, Sensorsignale in (digitale) Daten umzuwandeln (Verdrahtung, Konnektoren, Wandler).

Präzision: die Präzision einer Messung ist verbunden mit der **Wiederholbarkeit** und **Reproduzierbarkeit** einer Messung. Letztere sind jedoch genauer und sollten als Vorzugsbenennungen verwendet werden.

Verfahren: eine Reihe schriftlicher Anweisungen, die definieren, wie eine Methode auf eine bestimmte Umgebung angewendet werden soll, inklusive Informationen über die Positionierung von Sensoren und anderer Apparatur, über den Umgang mit Querempfindlichkeiten und über die Validierung der Ergebnisse. Eine Methode kann mehrere Verfahren haben, da sie an einen bestimmten Bedarf angepasst werden kann.

Qualitätssicherung (QS): geplante und systematische Aktivitäten, eingebettet in ein Qualitätssystem, so dass die Qualitätsanforderungen an ein Produkt oder eine Dienstleistung erfüllt werden. Das beinhaltet systematisches Messen, Vergleichen mit einem Standard, Überwachen von Prozessen, verbunden mit einer Feedback-Schleife, die Fehlervermeidung gewährleistet.

Zufallsfehler: Ergebnis einer Messung abzüglich des Mittelwerts, der aus unendlich vielen Messungen desselben Parameters unter denselben Bedingungen resultieren würde.

Redundanz: die Duplikation wesentlicher Komponenten oder Funktionen eines Systems mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen. Es gibt mehrere Formen von Redundanz:

- Hardware-Redundanz (Verdoppelung, Verdreifachung usw. von Systemen)
- Deutliche funktionelle Redundanz, z. B. sowohl mechanische als auch hydraulische Bremsen in einem Fahrzeug
- Informationsredundanz, s. Fehlererkennungs- und Fehlerkorrekturmethoden.
- Zeitredundanz, einschließlich Methoden zur Erkennung temporärer Fehler
- Software-Redundanz

Zuverlässigkeit: Fähigkeit eines Geräts oder Systems, eine geforderte Funktion unter vorgegebene Bedingungen über einen bestimmten Zeitraum mit einem geringen Versagensrisiko korrekt auszuführen.

Wiederholbarkeit (von Messergebnissen): Grad der Übereinstimmung der Ergebnisse wiederholter Messungen desselben Parameters unter gleichen Messbedingungen.

Reproduzierbarkeit (von Messergebnissen): Grad der Übereinstimmung der Ergebnisse wiederholter Messungen desselben Parameters unter veränderten Messbedingungen.

Systematischer Fehler: Mittelwert, der sich aus einer unendlichen Anzahl von Messungen desselben Parameters unter Wiederholbarkeitsbedingungen ergeben würde, abzüglich des (wahren) Wertes des Parameters.

Technik: beliebiges chemisches oder physikalisches Prinzip, das zur Messung eines Parameters verwendet wird. Häufig stehen mehrere Techniken zur Verfügung, die zur Messung desselben Parameters verwendet werden können.

Unsicherheit: begrenzter Kenntnisstand, bei dem es unmöglich ist, den vorherrschenden Zustand exakt zu beschreiben, ein zukünftiges Ergebnis vorherzusagen oder bei dem es mehr als ein mögliches Ergebnis geben könnte. Bei Messmethoden ist sie definiert als das Vertrauensintervall des erwarteten Ergebnisses. Die Unsicherheit hängt sowohl von der Genauigkeit als auch von der Präzision des Messinstruments ab. Je geringer die Genauigkeit und Präzision eines Instruments umso höher die Messunsicherheit. Wenn man die Unsicherheit von Messergebnissen ausdrücken will, benötigt man normalerweise Begriffe wie *Standardunsicherheit*, *kombinierte Standardunsicherheit*, *erweiterte Unsicherheit* oder ihre "relativen" Formen. Zu beachten ist, dass Präzision häufig als die Standardabweichung wiederholter Messungen eines gegebenen Wertes ermittelt wird. Diese Methode ist jedoch nur korrekt, wenn das Instrument seinen technischen Spezifikationen entspricht. Wenn es nicht richtig funktioniert, ist die Unsicherheit größer als die Standardabweichung der wiederholten Messungen, und es ist offensichtlich, dass die Unsicherheit nicht nur von der Instrumentenpräzision abhängt.

B1.1.2 Erläuterungen

Fehlererkennung bezieht sich auf ein *Versagen* des Messsystems auf *Methodenebene*, d.h. das Ergebnis der Methode deckt sich nicht mit der prognostizierten Leistung der *Methode*. Der Begriff *Zuverlässigkeit* ist verknüpft mit dem Risiko, dass ein *Versagen* aufgetreten ist oder in Zukunft auftreten wird. Zu beachten ist, dass die *Versagensrate* einer Methode (d.h. die Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall, dass eine Methode versagt) ein inhärenter Teil der Beschreibung der *Verfahren* sein sollte. Der Begriff "Präzision" kann unterteilt werden in *Wiederholbarkeit* und *Reproduzierbarkeit*, und es sollte darauf hingewiesen werden, dass *Wiederholbarkeit* und *Reproduzierbarkeit* keine abstrakten Einheiten sind (was beim Endlager-Monitoring häufig der Fall für die "Genauigkeit" ist). Sie können experimentell getestet werden und können erste Hinweise auf mögliches *Versagen* geben.

Der Begriff "Kompatibilität" wird in diesem Bericht nicht verwendet. Stattdessen legen wir hier fest, dass, wenn die Unsicherheit einer Methode oder eines Verfahrens zu groß ist für eine effektive Bewertung, ob die Entwicklung einer Komponente innerhalb eines prognostizierten Rahmens liegt, dies einen Mangel an aussagekräftigem Input darstellt und keine technische Versagensart. Dieser Aspekt wird hier nicht weiter behandelt, da er sich nicht auf technisches *Versagen*, so wie es in diesem Bericht behandelt wird, bezieht, sondern hauptsächlich auf Monitoring-Strategien und ihre Interpretation. Für die o.g. "zuverlässige" Interpretation von Daten gilt derselbe Aspekt wie für die "Kompatibilität": Die Unsicherheit einer Methode oder eines Verfahrens und die Bandbreite der zu erwartenden Werte müssen vorher bekannt sein. Allerdings verknüpfen zusätzliche Aspekte dieses Themas mit dieser Aufgabe: Für eine korrekte Interpretation der Daten ist es wichtig zu wissen, ob ein *Versagen* aufgetreten ist.

"Gute" und "schlechte" Signale werden als *gültige* Sensormeldungen, Messungen oder Daten angesehen. Daten von einem ausgefallenen Sensor oder einer fehlgeschlagenen Methode werden als *ungültig* angesehen.

Sensor-*"Trend"* ist etwas, das hier nicht eigens definiert wird: Wenn der *"Trend"* etwas ist, was korrigiert werden kann – sei es auf eine vorher definierte Weise oder durch (Re)Kalibrierung – sollte er Teil des Verfahrens einer Methode sein. Wenn entschieden wurde, dass der *"Trend"* nicht innerhalb eines Verfahrens korrigiert wurde, spiegelt sich das in der (erhöhten) Unsicherheit der Methode wider, d.h. dies ist eher eine Eigenheit der Methode/des Verfahrens als eine Versagensart. Wenn ein unerwarteter Trend auftritt, der nicht Teil eines Verfahrens ist, d.h. der zu höheren Unsicherheiten führt als die, die das Verfahren angibt, dann *ist* das eine Versagensart. Ebenso muss der Einfluss des Monitoring auf die jeweilige Komponente als Teil einer Methode definiert werden, ist aber keine Versagensart. Dies gilt auch für die Tatsache, dass die meisten Sensoren auf Variationen mehrerer Parameter reagieren. Dies muss im Verfahren berücksichtigt werden – entweder in Form von Faktoren, die die Unsicherheiten des Verfahrens erhöhen, oder als Korrekturfaktoren, die dafür verwendet werden können, diese Querempfindlichkeiten zu kompensieren, indem man die Korrekturfaktoren auf die Sensorwerte anwendet. Unbekannte Querempfindlichkeiten können die Ergebnisse des Verfahrens beeinflussen. Dies kann aber eher nicht als Versagensart angesehen werden und sollte im Vorfeld durch Untersuchungen und Versuche ausgeschlossen werden. Deshalb sind externe Bewertungen und Qualitätssicherungssysteme wesentliche Bestandteile der Verfahren in vielen technischen, physikalischen oder chemischen Prozessen.

Gemäß obiger Diskussion sollte *"Fehlerdetektion"* durch *Entdeckung von Versagen bzw. Versagensarten* ersetzt werden. Ebenso sollte zwischen *gültigen* und *ungültigen* Ergebnissen einer Methode unterschieden werden (der Begriff *"zuverlässiger Sensor"* ergibt nur dann einen Sinn, wenn hervorgehoben werden soll, dass die Versagensrate niedrig ist).

Obwohl Aussagen über Unsicherheiten und Gültigkeit auf Methode- oder Verfahrensebene gemacht werden sollten, scheint es sinnvoll, die Erkennung von potenziellen Fehlern bereits auf der Sensorsignalebene anzusetzen. Zwei Hauptargumente dafür sind:

- Sensoren liefern wesentlich mehr Information als letztendlich in das Ergebnis einer Methode einfließen. Diese zusätzlichen Informationen können nützlich für die Erkennung von Versagensarten sein.
- Es ist zu erwarten, dass die Analyse von möglichen Versagensarten auf der Ebene der Sensortechnologie zu einer grundlegenden Richtlinie für die Auswahl geeigneter Monitoring-Gerätschaft führen wird.

Auf der Verfahrensebene gibt es jedoch zusätzliche Möglichkeiten zur Vermeidung, Entdeckung und – falls möglich – Korrektur von Versagensarten:

- durch die Definition geeigneter Installations-, Prüf-, QS- und AQS-Verfahren
- durch den Einsatz von Redundanz
- durch die Verwendung der gesammelten Informationen aus verschiedenen Methoden

B1.2 Fehlererkennungsmethoden

B1.2.1 Versagensarten

In Vorbereitung auf die im Folgenden vorgestellten möglichen Fehlerdetektionsmethoden, wird zunächst eine Übersicht über die möglichen Versagensarten gegeben. Eine *"Versagensart"* ist hier definiert als ein bestimmter Umstand, der zu *ungültigen* Messdaten führt, d.h. Messwerte, die durch andere Faktoren beeinflusst werden als in der Methode beschrieben sind. Ein Versagen kann zu Daten führen, die außerhalb des Unsicherheitsbereichs liegen, der in einer Methode oder einem Verfahren definiert ist. Es kann allerdings auch sein, dass die Daten noch innerhalb eines definierten Bereichs liegen, d.h. ein Versagen bedeutet

nicht zwangsläufig, dass die Messdaten außerhalb eines prognostizierten Wertebereichs fallen. Im schlimmsten Fall kann ein Versagen die Tatsache verdecken, dass eine messtechnisch beobachtete Endlagerkomponente sich anders als prognostiziert entwickelt, z. B. wenn die Temperatur schneller steigt als prognostiziert, ein defekter Sensor aber systematisch niedrigere Messwerte meldet. Noch einmal: die Fähigkeit, Versagensarten in der Monitoring-Kette zu entdecken ist ein wesentlicher Aspekt des Endlager-Monitorings. Die Versagensarten sind nach Konzept gelistet und hierarchisch sortiert:

Technisches Versagen

1. partieller oder kompletter Sensorsausfall
2. Ausfall der Signalübertragung
3. Ausfall der Signalumwandlung

Methodisches Versagen

4. Fehler bei der Sensorinstallation und -platzierung
5. nicht-identifizierte Querempfindlichkeit
6. fehlerhafte Korrekturmethoden (Trend, Querempfindlichkeiten)

Verfahrenstechnisches Versagen

7. Verlust der Redundanz (d. h. gleichzeitiges Versagen mehrerer Sensoren)
8. Versagen der Fehlerdetektions- und Fehlerkorrekturverfahren

In vielen und sehr unterschiedlichen sicherheitsrelevanten Bereichen von Anwendungen wurden unterschiedliche Methoden zur Fehlerdetektion entwickelt, von denen einige sehr spezifisch sind. Sie variieren hinsichtlich ihres erreichbaren Grades an Zuverlässigkeit und damit hinsichtlich des technischen Aufwands und der speziellen Anforderungen für die jeweilige Anwendung. In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über die verschiedenen Fehlererkennungsstrategien gegeben. All diese Methoden konzentrieren sich auf Fehlerdetektionsmaßnahmen, die das Versagen von Sensorelementen und den Ausfall der Signal-/Datenübertragung einschließen. Im MoDeRn-Projekt wurden diese als die beiden Hauptversagensarten hinsichtlich des MoDeRn-Themas identifiziert, weshalb sich die folgenden Abschnitte auf diese Arten konzentrieren.

B1.2.2 Ausfall von Sensoren

B1.2.2.1 Fehlerdetektion mittels Redundanz

Die wahrscheinlich bestbekannte Methode, Fehler zu entdecken, ist die Redundanz. Ein typischer Bereich, in dem Hardware-Redundanz eingesetzt wird, ist die Luft- und Raumfahrtindustrie, wo eine "m-von-n"-Redundanz eingesetzt wird (z. B. "2 von 3" oder "3 von 5"), wobei "n" die Anzahl paralleler, identischer Funktionsblöcke und "m" die Anzahl der Einzelergebnisse, die übereinstimmen müssen, um zu einem redundanten Ergebnis zu kommen, darstellen. Das Prinzip der Fehler-/Versagensentdeckung mittels Redundanz ist in Abb. B1 dargestellt.

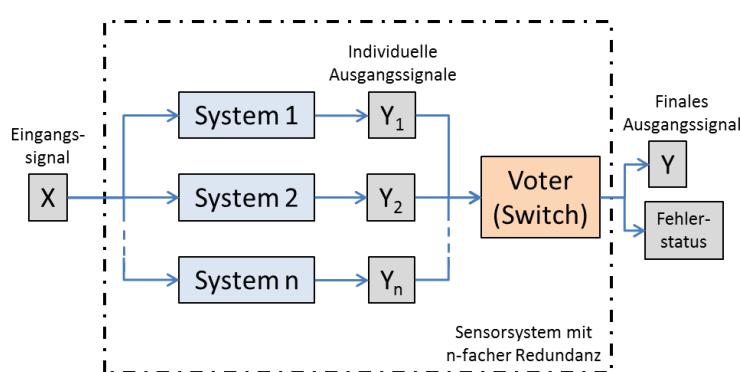


Abb. B1: Fehlerdetektion mittels Redundanz; geändert nach Weiler (2001)

Bei der Redundanz erhalten n übereinstimmende Systeme denselben Input x und produzieren n Outputs y_1 bis y_n . Diese werden an eine Entscheidungsstufe, einen Voter, übertragen, der die Ausgangssignale vergleicht und Signalabweichungen dazu verwendet, fehlerhafte

Funktionsblöcke zu ermitteln. Wenn die Ausgangssignale y_1 bis y_n analog sind, muss der Vergleich eine Toleranzgrenze einbeziehen, innerhalb der zwei analoge Werte als gleich erachtet werden. Bei digitalen Signalen gibt es diese Unschärfe nicht. Basierend auf dem Vergleich ermittelt der Voter eine Versagen und – wenn möglich – auch das korrekte Ausgangssignal y . Wenn nur eine minimale Redundanz verwendet wird, d.h. wenn die Anzahl der parallelen Systeme $n = 2$ ist, kann der Voter nur ein Versagen oder einen Fehler feststellen. Es ist nicht möglich zu ermitteln, welches der zwei Ausgangssignale y_1 oder y_2 das gültige Signal ist. Der Vorteil der Redundanz ist, dass sie prinzipiell auf jede Art von System angewendet werden kann. Anzumerken ist jedoch, dass Redundanz nicht immer realisiert werden kann, wenn man räumlich kleine Strukturen (Punkte) messtechnisch erfassen will.

Hinzu kommt, dass es einfach ist, Redundanz auf Sensorebene einzusetzen, es aber schwieriger sein kann, Redundanz bei Systemen anzuwenden. Unabhängig von den verwendeten Modellen, kann jede Art von Versagen, die in einer Abweichung in irgendeinem der Ausgangssignale y_1 bis y_n resultiert, entdeckt werden. Wird ein "m-von-n"-System verwendet, bei dem $n > 2$ ist, kann durch Vergleich zusammen mit einer Mehrheitsentscheidung der parallelen Systeme ein Versagen direkt korrigiert werden. Es besteht jedoch ein geringes Risiko, dass die Mehrheit der Systeme falsch ist und nicht die Minderheit – daher die Verwendung von Systemen mit $n > 3$.

Ein Nachteil der Redundanz ist, dass sich die Anzahl der zur Fehlerdetektion erforderlichen Schaltkreise n -fach erhöht. Wenn Fehler sich gleichzeitig auf die Mehrzahl der Ausgangssignale y_1 bis y_n auswirken, versagt die Redundanz, da der Voter Versagen nur über die verschiedenen Outputs ermitteln kann. Dies schränkt die Anwendbarkeit von Redundanz erheblich ein, besonders im Bereich der Fehlerdetektion mittels Sensorelementen. Unter den rauen Bedingungen in einem Untertagelabor für die Entsorgung radioaktiver Abfälle hat sich gezeigt, dass die Schnittstelle zu den Sensorelementen die wahrscheinlichste Stelle für ein Versagen ist. Es ist daher ziemlich wahrscheinlich, dass alle redundanten Sensorelemente zur selben Zeit und durch dieselbe Ursache zerstört werden. In diesem Fall kann der Voter keinerlei Abweichung zwischen den Ausgangssignalen der Sensoren feststellen. Anzumerken ist, dass Redundanz auch die Präzision erhöht, indem sie Sensorabweichungen, Sensor-Platzierungen und räumliche Heterogenitätseinflüsse mittelt. Redundanz ist daher für mehrere Ziele zweckdienlich.

B1.2.2.2 Fehlererkennung mittels bekannter Beziehungen

Streng genommen ist Fehlererkennung durch bekannte Beziehungen eine Methode, die auf Diversität (Vielfalt) basiert. Diversität oder *diversitäre Redundanz* ist eine spezielle Form der Redundanz, bei der mehrere Komponenten mit unterschiedlichen Auslegungen dazu verwendet werden, denselben Parameter zu messen. In Sensorsystemen verwendet diese Methode die zeitinvarianten Beziehungen zwischen voneinander unabhängigen Signalen innerhalb oder außerhalb des Systems. Ein Fehler führt zu einer Abweichung in den festen Beziehungen, und diese Inkonsistenz zwischen unabhängigen Signalen wird als Fehler registriert. Ein Beispiel für integrierte Fehlererkennung in einem Sensorelement ist ein Differenzdrucksensor mit redundanter Temperaturmessfunktion gemäß (Schneider 1996). Dieser Differenzdrucksensor besteht aus zwei Membranen (Abb. B2). Jede Membran bildet eine Elektrode und wird mit einem Druck p_1 oder p_2 beaufschlagt.

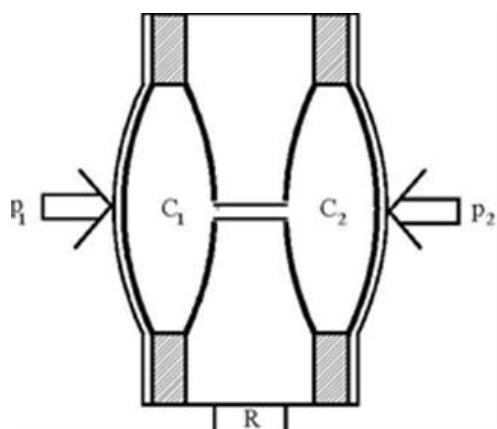


Abb. B2
Differenzdrucksensor (Schneider 1996)

In kurzer Distanz zu den Membranen befinden sich Gegenelektroden, so dass zwei druckabhängige Kapazitäten C_1 und C_2 zwischen den Membranen und den Gegenelektroden erzeugt werden. Beiden Membrane sind hydraulisch über eine Flüssigkeit gekoppelt bei leicht positivem Druck. Der Druck wird durch ein Loch in der Mitte der beiden Kammern kompensiert. Um ein redundantes Temperatursignal zu erzeugen, ist ein Temperatursensor (R) direkt mit dem Differenzdrucksensor verbunden.

Wenn $p_1 > p_2$, verringert sich der Abstand zwischen den Elektroden von Kondensator C_1 , während sich der Abstand bei Kondensator C_2 vergrößert. Das führt zu einer Erhöhung der Kapazität C_1 und einer Verringerung der Kapazität C_2 . Die Druckdifferenz Δp kann mittels folgender Gleichung berechnet werden (Schneider, 1996):

$$\Delta p = p_1 - p_2 \sim \frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2}$$

Zusätzlich zu der Änderung in den Kapazitäten C_1 und C_2 aufgrund der Druckdifferenz gibt es einen Sekundäreinfluss auf das Sensorelement durch die Temperatur T . Die Temperatur T beeinflusst die dielektrische Konstante, was zu einer Volumenänderung der hydraulischen Flüssigkeit führt. Diese unerwünschte Volumenänderung ist proportional zur Temperatur und wird näherungsweise wie folgt berechnet:

$$T \sim \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Berücksichtigt man die Temperatur, die durch einen zusätzlichen Temperatursensor am Differenzdrucksensorelement gemessen wird, stehen zwei voneinander unabhängige Temperatursignale zur Verfügung. Beide Signale werden kontinuierlich durch eine Verarbeitungseinheit/Rechnereinheit verglichen. Beschädigung des Sensors und der daraus resultierende Ölverlust würde eine erhebliche Temperaturdifferenz imitieren. Das System würde diesen Zustand identifizieren und einen Fehler anzeigen. Die Schwierigkeit bei der Verwendung von Diversität für die Fehlererkennung ist die Wahl von Verhältnissen, die geeignet sind, das Sensorelement zuverlässig zu überwachen. Im Gegensatz zur Redundanz kann Diversität daher nicht für jedes Sensorsystem verwendet werden.

In den Fällen, wo Diversität zur Fehlererkennung im Sensorelement verwendet werden kann, besteht ein deutlicher Vorteil gegenüber der Redundanz darin, dass verschiedene, unabhängige Signale zur Kontrolle der Konsistenz verwendet werden können. Diversität kann somit Fälle entdecken, wo ähnliche Fehler redundante Sensorelemente beeinflussen.

B1.2.2.3 Fehlererkennung mittels elektrischer Stimulation

Bei dieser Fehlererkennungsmethode wird das Sensorelement direkt mit elektrischen Impulsen stimuliert, die – zusammen mit der gemessenen Variable x – von allen nachfolgenden Komponenten des Sensorsystems verarbeitet werden. Bei einem korrekt arbeitenden Sensorsystem führt die elektrische Stimulation des Sensorelements zu einer bekannten Reaktion, die im Ausgangssignal y entdeckt werden kann. Eine grundlegende Anwendung ist die Messung des Isolationswiderstandes und der Kontinuität von Thermoelementen. Ersterer wird gemessen, indem man eine erhöhte Spannung (50 bis 500 V) zwischen einen Leiter und seine Schutzzummantelung legt, Letztere durch Messung des Widerstands entlang des Leiters (DC oder AC mit geringer Frequenz). Time domain reflectometry (TDR) kann ebenfalls als Stimulierungsmethode in Betracht gezogen werden – in diesem Fall insbesondere, um auf Kabelprobleme zu prüfen (Einschnitte und Kurzschlüsse, aber auch weniger ernste Störungen wie Knicke), da sie die Kabelimpedanz mehr oder weniger stark beeinflussen.

Eine ausgereifte Methode für Temperatur-Sensoren – Widerstandsthermometer (RTDs) und Thermoelemente – ist die dynamische Eigenerwärmung (*Loop Current Step Response, LCSR*), eine Technik, die für die In-situ-Diagnose in industriellen Prozessen angewendet wird, z.B. für nicht-zugängliche Sensoren in Kernkraftwerken. Beim LCSR-Test wird das Sensorelement durch einen elektrischen Strom erwärmt (DC bei RTDs - üblicherweise 40 bis 80 mA, AC bei Thermoelementen - üblicherweise 0,2 bis 2 A). Dabei erhitzt sich das Sensorelement um 10 bis 20°C, je nach Stromstärke und Fähigkeit des Sensors, Wärme abzuleiten.

Abb. B3 zeigt einen Versuchsaufbau zum Testen von RTDs mittels LCSR. Wird der Schalter geschlossen, steigt der Strom von üblicherweise 1 mA (zum Brückenabgleich) auf den zur Erwärmung notwendigen Wert. Das aus dieser Erwärmung resultierende Signal wird dann weiter analysiert.

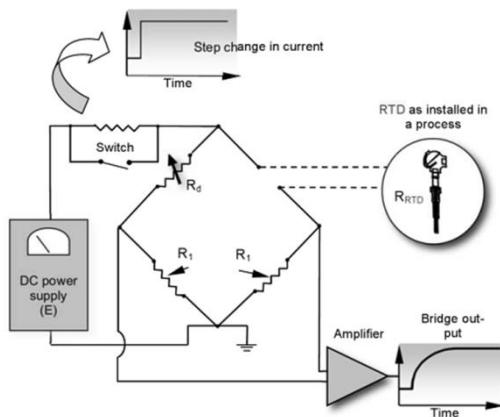


Abb. B3:
Wheatstone-Messbrücke zum Testen von RTDs mittels LCSR (Hashemain 2005)

Für das Endlager-Monitoring potenziell relevante Anwendungen dieser Methode sind:

- Erkennung vertauschter Thermoelement-Verbindungen (schlechte Polarität),
- Erkennung von Kabelproblemen – idealerweise in Kombination mit TDR (Time Domain Reflectometry) Ein typisches Beispiel ist die Ermittlung von Feuchtigkeit im RTD: Wenn Feuchtigkeit in einen RTD eindringt, sind sowohl die TDR-Signatur als auch die LCSR-Transiente betroffen. TDR lokализiert Impedanz-Änderungen aufgrund von Feuchtigkeitszutritt entlang des Kabels, während der LCSR-Test durch kürzere Ansprechzeiten Feuchtigkeitsaufnahme punktförmig am Sensor selbst genau aufzeigt. Obwohl der LCSR-Test keine komplexen Inhomogenitäten entdeckt, kann er als Screening-Test eingesetzt werden.

Ein Nachteil der Fehlerentdeckung mittels elektrischer Stimulation ist, dass diese Methode vorwiegend auf ein paar wenige Anwendungen beschränkt ist. Sie kann nur in Sensor-Elementen verwendet werden, bei denen das Messprinzip elektrisch umkehrbar ist, d.h. bei denen die durch die elektrischen Impulse hervorgerufenen Stimulationen dieselbe Größenordnung haben wie die Messgröße x . Dies ist der Fall bei den meisten integrierten Sensoren. Aufgrund der geringen Sensibilität des Sensorelements verglichen mit dem Stimulationssignal und der technisch begrenzten Anregungsamplitude ist es jedoch notwendig, spezielle Signalverarbeitungsmethoden einzusetzen, um das überlagerte Signal im Sensorsignal entdecken zu können. Während der Diagnose kann die Datenaufzeichnung durch die elektrische Stimulation beeinträchtigt werden, so dass es in diesem Fall notwendig ist, das kontinuierliche Monitoring des Sensorsystems für die Diagnose kurzzeitig zu unterbrechen. Ein weiterer Nachteil ist der erhöhte Energiebedarf für die Stimulation, der besonders kritische Auswirkungen bei Transpondern oder in batteriegespeisten Stromkreisen hat.

Der Hauptvorteil dieser Fehlererkennungsmethode ist, dass nicht nur das Sensorelement sondern die gesamte Signalverarbeitungskette funktionell geprüft wird und somit kein zusätzlicher Aufwand zur Entdeckung von Fehlern in den einzelnen Komponenten erforderlich ist. Bei einigen Sensorelementen, bei denen direkte Stimulation nicht durchgeführt werden kann, ist manchmal eine indirekte Stimulation über Querempfindlichkeiten möglich. Thermische Stimulation ist eine sehr geeignete Methode, da sie leicht mit Hilfe von integrierten Heizwiderständen umgesetzt werden kann und weil viele mikroelektronische Sensorelemente diese Querempfindlichkeit besitzen. Da diese Querempfindlichkeit in den nachgelagerten Stufen

kompensiert wird, hat sie keinen Einfluss auf die Messergebnisse. Somit ist ein kontinuierliches Selbst-Monitoring möglich. Eine Besonderheit dieser Methode ist, dass die Sensorsensibilität am Arbeitspunkt der Messgröße x gemessen werden kann und dass weiteres Wissen über den aktuellen Status des Sensors erlangt werden kann.

B1.2.2.4 Fehlererkennung mittels Zuverlässigkeitssindikatoren

Fehlererkennung mittels Zuverlässigkeitssindikatoren verwendet bestimmte Parameter eines Schaltkreises/Systems oder Sensors, um das Auftreten und die Entwicklung eines Versagens aufzuzeigen. Diese Parameter werden kontinuierlich überwacht, um zu ermitteln, ob sie bestimmte Bereiche/Werte über- oder unterschreiten, was nur passiert, wenn ein Fehler auftritt. Beispiele für Zuverlässigkeitssindikatoren sind Ruhestrommessungen in komplementären Metall-Oxid-Halbleitern, sogenannten integrierten CMOS-Schaltkreisen, oder Temperaturmessungen mit Thermoelementen in Datenerfassungssystemen, um auf abweichende Zustände innerhalb des Systems zu prüfen.

Diese Methode basiert auf dem Prinzip, dass, nachdem Ausgleichsströme aufgrund von Änderungen des Zustands oder in der Zeit abgeklungen sind, nur ein geringer statischer Versorgungsstrom aufgrund von Leckströmen in einem korrekt funktionierenden digitalen CMOS-Schaltkreis fließt. Im Falle eines Versagens kann dieser Dauerstrom erheblich ansteigen. Die Messung des Versorgungsstroms (I_{dd}) im Ruhezustand wird interner und externer I_{ddq} -Test genannt. Ein Nachteil ist die relativ hohe Kapazität des Amperemeters, die zu hohen Zeitkonstanten und langen Testzeiten führt. In komplexen Schaltkreisen besteht außerdem die Möglichkeit, dass Fehler, die nur einen kleinen Bereich des Schaltkreises betreffen, nur einen Reststromanteil unter dem Streubereich des Ruhestroms liegen, so dass sie schwer zu ermitteln sind. Um diese Nachteile von externen I_{ddq} -Tests zu kompensieren, werden eingebaute Stromsensoren (built-in current sensors, BICS) verwendet (Olbrich et al. 1996).

B1.2.2.5 Lokale Fehlererkennung

Die lokale Fehlererkennung eines Sensorsystems (local sensor validation, LSV) nach (Yung 1992a) erkennt Fehler durch die Analyse charakteristischer Signalanteile im ungefilterten Ausgangssignal y' des Systems. Diese Methode basiert auf der Annahme, dass Fehler oder Ausfälle an verschiedenen Stellen im System z.B. in Form von Kurzschlüssen, Unterbrechungen oder Übersteuerung des Operationsverstärkers auftreten können und dass es höchst effizient wäre, alle möglichen Ursachen von Fehlern zu überwachen. Die genauen Ursachen des Fehlers können nur ermittelt werden, wenn alle Sensorkomponenten und ihr Zusammenspiel genau bekannt sind. Trotzdem können bestimmte Signalcharakteristika im ungefilterten Ausgangssignal eines Sensorsystems auf ein Versagen hindeuten (Amadi-Echendu 1994). Gemäß (Yung 1992b) kann ein Versagen acht typische Ausgangssignale erzeugen, die in Abb. B4 dargestellt sind.

Für eine bessere Darstellung des Ausgangssignals y' wurde der Messwert x konstant gehalten, so dass Änderungen im Ausgangssignal nur durch ein zusätzliche Rauschzahl und die Auswirkungen des jeweiligen Fehlers verursacht werden können. Ein Grenzwertfehler tritt auf, wenn das Ausgangssignal einen bestimmten Schwellenwert über- oder unterschreitet. Technisch werden solche Ausgangssignale häufig durch Kurzschlüsse oder Unterbrechungen der Sensorkette verursacht. Als Schwellenwerte werden entweder prozess- oder sensorspezifische Parameter gewählt. Bei einem Sensor, dessen Schnittstelle 4-20 mA verbraucht, könnte der Schwellenwert bei einem Stromverbrauch oberhalb 20 mA liegen.

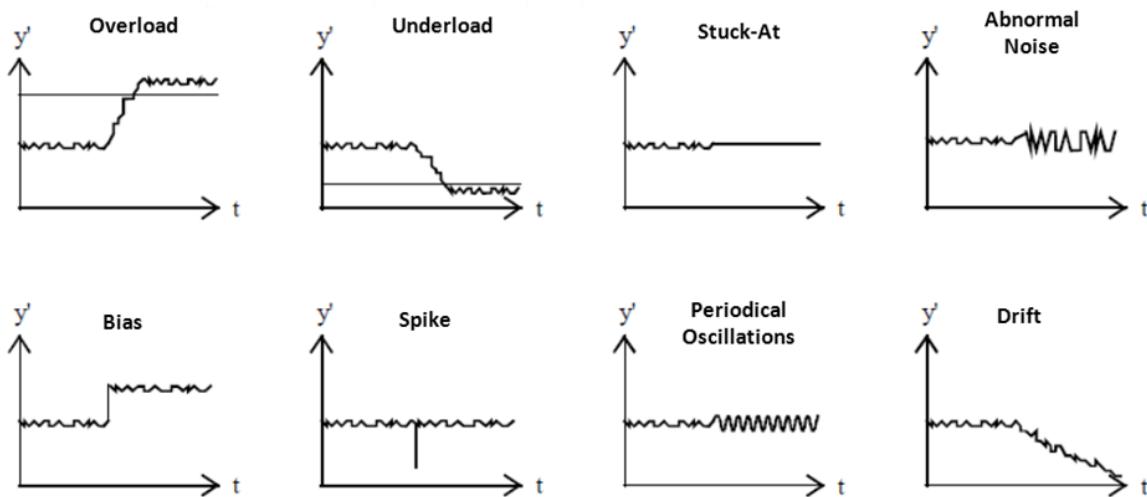


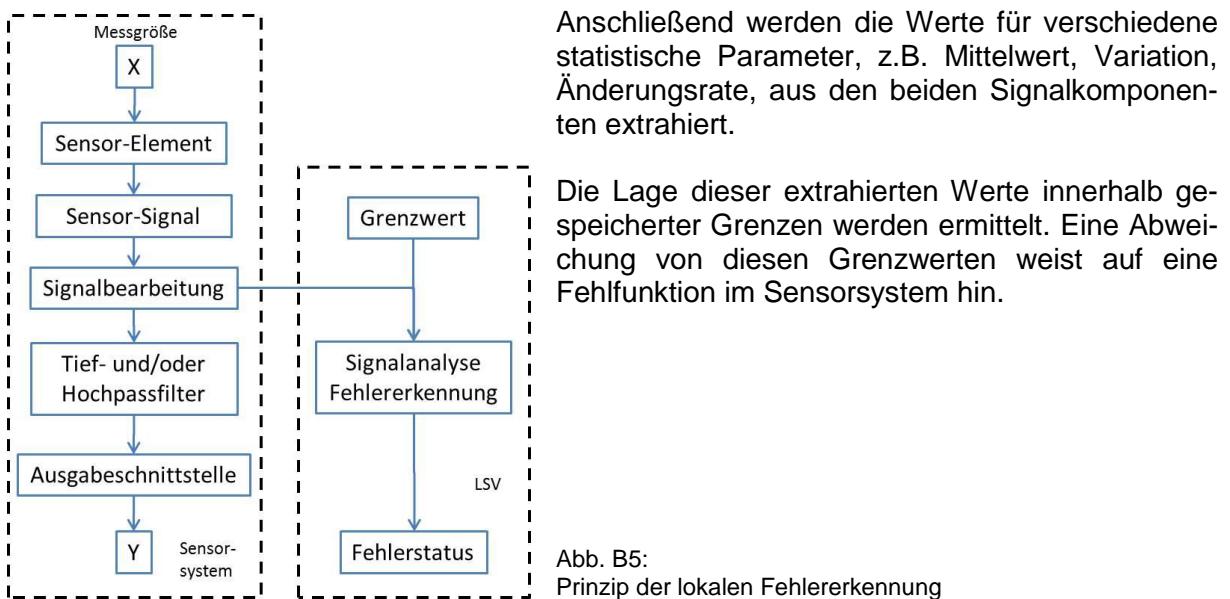
Abb. B4: Charakteristische Ausgangssignale im Falle eines Versagens (Yung 1992b)

Ein Bias-Fehler bewirkt eine Verschiebung des Ausgangssignals des Sensorsystems, die wesentlich schneller ist als eine regelmäßige Änderung in der gemessenen Variablen. Solch eine Verschiebung kann durch eine Ungenauigkeit im Strom- oder Spannungsreferenznetzwerk verursacht werden. Ein Spike ist eine kurzzeitige Verschiebung des Ausgangssignals y' , die – wie ein Bias-Fehler – deutlich schneller ist als eine akzeptable Änderung in der gemessenen Variablen. Spike-Fehler werden durch kurzzeitiges Versagen des Sensor-Systems hervorgerufen. Wenn ein "Stuck-at"-Fehler (Haftfehler) auftritt, bleibt das Ausgangssignal an einem konstanten Wert haften. Dieser Fehler wird üblicherweise durch einen Verlust der Sensorsensibilität gegenüber der gemessenen Variablen x hervorgerufen. Ein Oszillations-Fehler wird durch einen erheblichen und andauernden Anstieg im Rauschpegel verursacht. Diese Fehler sind üblicherweise durch äußere Ursachen bedingt, z.B. durch eine verrauschte Spannungsquelle oder einen schlechten Kontakt (im Sensor oder zwischen Sensor und Kabel). Wenn das Ausgangssignal ungewollte Signalwellen aufweist, die nicht durch die Messgröße verursacht werden, ist dies auf eine (ungewünschte) Oszillation oder Interferenz mit anderen Signalen/Stromleitungen zurückzuführen. Wenn ein Trend auftritt, gibt es einen langsamen, kontinuierlichen Anstieg oder Abfall des Ausgangssignals. Die Änderung ist deutlich langsamer als bei einem Bias-Fehler.

Gemäß Yung (1992b) repräsentieren die acht charakteristischen Ausgangssignale y' die meisten möglichen Fehler, die auftreten können. Jedoch tritt nicht jeder Fehlerart in jedem Sensorsystem auf. Daher wird in manchen Systemen die Suche nach bestimmten Signalcharakteristika nicht durchgeführt, um die Fehlererkennung zu vereinfachen. Grenzwert- und Stuck-at-Fehler treten jedoch in den meisten Sensorsystemen auf.

Bei der lokalen Fehlererkennung (LSV) wird ein Funktionsblock zur Signalanalyse so nah wie möglich zur Ausgangsschnittstelle installiert, so dass alle nachfolgenden Stufen des Sensorsystems auf Fehler überprüft werden können. Die direkte Verwendung des Sensorausgangssignals y ist zur Fehlererkennung nicht geeignet, da das Signal häufig aufgrund der Verwendung von Analog-Digital-Wandlern tiefpassgefiltert wird, so dass wichtige Frequenzanteile verloren gehen. In den meisten Fällen ist die Grenzfrequenz des Sensorelements erheblich höher und liefert Informationen außerhalb des tiefpassgefilterten Ausgangssignals y . Das Prinzip der lokalen Fehlererkennung ist in Abb. B5 dargestellt.

Für die Analyse wird das Sensorsignal mit Hilfe von zwei Filtern in Hoch- und Niedrigfrequenzkomponenten getrennt. Die Niedrigfrequenzkomponente enthält hauptsächlich das Messsignal, während die Hochfrequenzkomponente hauptsächlich das Rauschen enthält.



Anschließend werden die Werte für verschiedene statistische Parameter, z.B. Mittelwert, Variation, Änderungsrate, aus den beiden Signalkomponenten extrahiert.

Die Lage dieser extrahierten Werte innerhalb gespeicherter Grenzen werden ermittelt. Eine Abweichung von diesen Grenzwerten weist auf eine Fehlfunktion im Sensorsystem hin.

Abb. B5:
Prinzip der lokalen Fehlererkennung

Um eine Fehlfunktion des Sensors durch die Analyse des ungefilterten Ausgangssignals y' zu ermitteln, werden vier Indikatoren verwendet:

- **Grenzwertindikator:** Misst, ob das Ausgangssignal y' den Maximalwert über- oder den Minimalwert unterschreitet. Als Maximal-/Minimalwerte können entweder physikalische Grenzen (erreichte Betriebsspannung) oder anwendungsspezifische Grenzen (Maximal-/Minimalwerte des Sensorsystems) verwendet werden. Während der Initialisierung werden beide Werte in den Systemspeicher eingelesen.
- **Verschiebungsindektior:** Dieser Indikator wird verwendet, um eine ungewöhnliche Verschiebung des Ausgangssignals y' zu entdecken. Während der Initialisierung des Sensorsystems muss die Auslöseschwelle auf einen bestimmten Wert festgelegt werden.
- **Rauschindikator:** Die Varianz des Rauschens im Ausgangssignal wird mit einem oberen und unteren Grenzwert verglichen (die für den gewählten Frequenzbereich gelten) und der Indikator entsprechend gesetzt.
- **Trendindikator:** Mit diesem Indikator werden langfristige Abweichungen des Ausgangsmittelwertes y' von einem im System abgespeicherten Sollwert überprüft.

Jeder dieser Indikatoren kann drei mögliche Werte haben. 0 gibt an, dass das System korrekt funktioniert, während +1 und -1 angeben, dass das Ausgangssignal die Referenzwerte über- bzw. unterschreitet. Diese vier Indikatoren können dazu verwendet werden, acht Arten von Abweichungen des Ausgangssignals eines Sensorsystems aufzudecken. Jeder Indikator vermittelt bestimmte Informationen über die Fehlfunktion des Sensors, so dass über die Kombination der ausgelösten Indikatoren die Art des Versagens ermittelt werden kann.

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass nur lokal zugängliche Informationen, z.B. das Ausgangssignal und das dazugehörige Rauschen, zur Entdeckung von Fehlern verwendet werden können. Informationen von übergeordneten Systeminstanzen (z.B. Steuereinheit) können nicht berücksichtigt werden. Es ist zudem notwendig, die Referenzgrenzen, die die Indikatoren auslösen, zu speichern. Je nach vorgesehenem Einsatz des Sensorsystems müssen diese Werte ggf. angepasst werden, um die Fehlererkennung zu optimieren. Wenn diese Methode nicht für einen bestimmten Einsatz gedacht ist, müssen die Grenzspannen weit genug sein, um die Fehlerrate gering zu halten, was allerdings die Sensibilität der Fehlererkennungsmethode reduziert. Trendfehler können nur durch lange Beobachtungszeiträume entdeckt werden, die wesentlich länger sind als die erwartete Signaländerungsrate.

Ein Vorteil ist, dass, über eine simple Erweiterung nahe dem System-Output, diese Methode in vielen verschiedenen Sensorarten eingesetzt werden kann, ohne dass ein detailliertes mathematischen Modell, zugeschnitten auf den bestimmten Prozess, entwickelt werden muss. Es ist möglich, viele verschiedene Fehlerarten zu entdecken, ohne dass eine spezielle Entdeckungsschleife für jeden möglichen Fehler durchlaufen werden muss. Echtzeitfähigkeit kann ohne umfangreiche Mehrfachmessungen erreicht werden. Wenn die Referenzgrenzwerte adäquat festgelegt sind, können Fehler zuverlässig entdeckt werden mit einem Minimum an falschen Fehlermeldungen. Die Komplexität des Schaltkreises aufgrund zusätzlicher Komponenten, die zum Filtern und zur Signalverarbeitung benötigt werden, ist moderat.

B1.2.2.6 Fehlererkennung mittels Korrelation

Diese Methode kann eingesetzt werden, wenn mehrere Sensoren denselben Parameter messen, dabei aber in gleichwertigen Positionen hinsichtlich des Parameters positioniert sind (z.B. Temperaturmessung bei gleichem Abstand zu einer Wärmequelle, aber in entgegengesetzter Position). Es ist dann möglich zu beurteilen, ob die abgelesenen Werte eines Sensors gültig sind, indem man sie mit den Werten der anderen Sensoren korreliert. Dazu bedarf es natürlich Fachkenntnisse über den überwachten Prozess.

Wenn Sensoren, die unterschiedliche Parameter messen nah beieinander positioniert sind, können ebenso Korrelationen hergestellt werden, wenn diese Sensoren äquivalente zusätzliche Messungen vornehmen. Temperatur-Sensoren, die mit einer Druckmesszelle verbunden sind (zur Korrektur der Auswirkungen der Temperatur auf ihre Messwerte) können z.B. mit den Messwerten von benachbarten Thermoelementen korreliert werden, um deren Richtigkeit zu überprüfen und umgekehrt. Die Messwerte der Thermoelemente können zur Korrektur der Druckmesszellenwerte verwendet werden, wenn die damit verbundene Temperaturmessung fehlgeschlagen ist.

Indirekte Korrelationen können zwischen Sensoren, die unterschiedliche Parameter messen, hergestellt werden, wenn sie in Medien eingebaut sind, in denen diese Parameter miteinander verbunden sind. In ungesättigtem, eingeschlossenem Bentonit sind z.B. Feuchte und Gesamtdruck miteinander gekoppelt. Will man feststellen, ob ein Anstieg der Werte von einem Feuchtigkeitsfühler auf einem tatsächlichen Anstieg der Feuchte im Bentonit beruht, kann man die Werte von einem benachbarten Gesamtdrucksensor auf einen entsprechenden Druckanstieg prüfen. Auch hier bedarf es Fachkenntnisse über den überwachten Prozess.

B1.2.3 Fehler in der Datenübertragung

B1.2.3.1 Fehlerarten bei der Datenübertragung

Geht man davon aus, dass sich die Datenübertragung bei der Endlagerüberwachung auf die Übertragung von bitweisen, digitalen Daten beschränkt, bedeutet "Fehler" in diesem Zusammenhang den Erhalt von falschen Bit-Werten (d.h. "1" anstelle von "0" und umgekehrt). Übertragungsfehler können als Folge von Rauschen und Interferenzen auftreten, d.h. durch eine Veränderung des übertragenen Signals auf seinem Weg vom Sender zum Empfänger. Andere Ursachen für diese Art von Fehlern sind Übertragungskanalinterferenzen, Signalverzerrung und Synchronisierungsprobleme. Die folgenden vier Fehlerarten, die allgemein bei der Datenübertragung im Endlager-Monitoring auftreten können, wurden identifiziert:

- *Fehler in der elektro-mechanischen Einheit*: Aufgrund eines elektrischen oder mechanischen Schadens oder eines Stromausfalls werden keine aussagekräftigen Daten empfangen.
- *Datenfehler*: Diese können viele Ursachen haben, inkl. Teilbeschädigung elektrischer oder mechanischer Komponenten.
- *Protokollfehler*: Aufgrund von Fehlern in den verwendeten Protokollen können Daten falsch interpretiert werden. Die Protokolle basieren auf Algorithmen, die entweder hardware- oder softwarekodiert sind.
- *Kanalinterferenzen*: Die empfangenen Daten können aus anderen Quellen stammen.

Der relevante Indikator zur Quantifizierung von Übertragungsfehlern in einer digitalen Datenübertragungskette ist die "Bitfehlerrate" (BFR), d.h. die Anzahl der Bit-Fehler geteilt durch die Gesamtzahl der übertragenen Bits. Während die BFR ein gemessener Wert ist, ist die "Bitfehlerwahrscheinlichkeit" der Erwartungswert der BFR, d.h. die BFR kann zur Abschätzung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit eines bestimmten Übertragungssystems verwendet werden. Im Folgenden werden BFR und Bitfehlerwahrscheinlichkeit synonym verwendet. Wie in den nächsten Abschnitten erläutert wird, gibt es mehrere Methoden zur Entdeckung und Korrektur von fehlerhaft empfangenen Daten als Teil des angewandten Datenkodierungsschemas. Fehler in der digitalen Übertragung sind daher selten, besonders in bidirektionalen Systemen, die es dem Empfänger ermöglichen, beim Sender die erneute Sendung von fehlerhaft erhaltenen Daten anzufordern.

B1.2.3.2 Fehlererkennungsmethoden für die Datenübertragung

Für die vier im vergangenen Abschnitt definierten Fehlerarten können die folgenden Fehlererkennungsmethoden eingesetzt werden:

- *Allgemeiner Gerätefehler*: Diese Fehlerart ist einfach an der Tatsache zu erkennen, dass wiederholt keine aussagekräftigen Daten empfangen werden können. Eine zusätzliche Überprüfung des Übertragungskanals kann durchgeführt werden, um das Vorhandensein einer der anderen Fehlerarten auszuschließen.
- *Datenfehler*: Wie im Rest dieses Abschnitts erläutert wird, können Datenfehler mit Hilfe von Fehlererkennungsmethoden identifiziert werden, wobei die Wahrscheinlichkeit für unentdeckte Fehler von der verwendeten Methode abhängt.
- *Protokollfehler*: Die verwendeten Protokolle basieren auf Algorithmen, die entweder hardware- oder softwarekodiert sind. Ausreichende Tests der Algorithmen sollten derartige Fehler verhindern. Es können Selbsttestverfahren in den Sender- und Empfängereinheiten implementiert werden, um zu ermitteln, ob Algorithmen aus irgendeinem Grund modifiziert werden.
- *Kanalinterferenz*: Die räumliche Herkunft eines übertragenen Signals kann geschätzt werden, indem man an verschiedenen Positionen die Signalstärken misst und miteinander vergleicht. In bidirektionalen Systemen kann die Identität einer Übertragung durch Anforderung von kryptographischen Schlüsseln, kombiniert mit (verschlüsselten) Prüfsummen, verifiziert werden.

Von den obengenannten vier Fehlerarten haben Datenfehler die größte Relevanz, und es wurden viele Fehlererkennungsschemata zur Erkennung von Fehlern in digitalen Datenströmen entwickelt. All diese Methoden haben gemeinsam, dass sie dazu verwendet werden können, Fehler der gesamtheitlichen Übertragungskette zu erkennen, d.h. sie sind unabhängig von der spezifischen lokalen Fehlerursache. Das einfachste Schema ist die Verwendung eines "Paritätsbits", das einer Gruppe von Bits hinzugefügt wird und anzeigt, ob die Anzahl der "1en" in der Gruppe gerade oder ungerade ist. Eine sogenannte "Prüfsumme" kann an einen Datenblock angehängt werden, die es dem Empfänger ermöglicht, den empfangenen Datenblock zu verifizieren. Daten können auch einfach wiederholt in einem vordefinierten Muster gesendet werden.

Je nach Ursache, können Fehler unterschiedliche Muster haben: Im Falle von Rauschen (d.h. zufälligen Störungen) können die Fehler mehr oder weniger gleichmäßig im Datenstrom verteilt sein, wobei das Signal-Rauch-Verhältnis (SRV) einer Übertragungsmethode zur Abschätzung der zu erwartenden BFR verwendet werden kann. Dieselbe Art Analyse kann zur Berechnung der notwendigen Signalstärke verwendet werden, um das Verhältnis zwischen der Wahrscheinlichkeit unentdeckter Fehler und der für den eingesetzten Fehlererkennungscode benötigten (zusätzlichen) Energie zu optimieren.

Im Falle von Interferenzen können Muster vorhanden sein, die nur schwer durch ein einfaches Fehlererkennungsschema abgedeckt werden können: Im Falle von "Burstfehlern" (Bündelfehler, d.h. zusammenhängende Fehlerfolgen) ist ein Paritätsbit nicht geeignet, da

die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler unentdeckt bleibt, bis zu 50% betragen kann, wenn die Burst-Länge sich über den gesamten Datenblock erstreckt. Um diese spezielle Fehlerart anzugehen, wurden spezielle Fehlererkennungsschemata entwickelt. Im Falle von Burst-Fehlern wird z.B. die sogenannte zyklische Redundanzprüfung ("cyclic redundancy check", CRC) verwendet. Es sollte auch darauf hingewiesen werden, dass im Fall von Interferenzen eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses nicht immer eine geeignete Methode zur Reduzierung der BFR ist; andere Strategien können effizienter sein.

Da alle Fehlererkennungsschemata "Redundanz" in den Datenstrom einbringen, sollte die Redundanz eines Schemas gegenüber der Wahrscheinlichkeit, dass Übertragungsfehler unentdeckt bleiben, abgewogen werden. 1 "Redundanz" hat in diesem Kontext eine andere Bedeutung als in den vorangegangenen Abschnitten: Sie beschreibt die Anzahl übertragener Bits abzüglich der Anzahl Bits, die tatsächliche Informationen enthalten. Hinzu kommt, dass die Blocklänge eines Fehlererkennungsschemas aus zwei Gründen bedacht werden muss:

- Aufgrund der Wahrscheinlichkeit, dass die Fehlerrate mit zunehmender Blocklänge steigt, sollte die Blocklänge wesentlich kleiner sein als 1/BFR.
- Eine größere Blocklänge verringert die Redundanz, aber im Falle eines Übertragungsfehlers muss der gesamte Datenblock als ungültig angesehen werden.

Eine wichtige Fehlererkennungsmethode kann auch auf *Verfahrens-Ebene* angewandt werden: Da in manchen Fällen erwartet wird, dass sich die Monitoring-Daten eher langsam entwickeln, können gelegentliche "Spitzen" leicht identifiziert und mittels vordefinierter Methoden gefiltert werden. Letzteres ist auch deshalb wichtig, weil bei allen Fehlererkennungsmethoden eine Restwahrscheinlichkeit besteht, dass ein Fehler unentdeckt bleibt. Anstelle des Einsatzes von "teuren", hochgradig redundanten Methoden auf Übertragungskanalebene kann ein Filtern der Parameterentwicklungen auf Verfahrensebene also effizienter und robuster sein.

Aspekte der Fehlererkennung bei der niederfrequenten Datenübertragung

Drahtlose Datenübertragung von niederfrequenten elektromagnetischen Signalen (<100 kHz) wird für die Überbrückung von mittleren bis großen Entfernung (10 m bis >100 m) verwendet, kann aber auch für kürzere Distanzen (1-10 m) verwendet werden. Die Technologien, die derzeit speziell für größere Entfernung eingesetzt werden, können als "maßgeschneiderte" Lösungen bezeichnet werden, und Rückschlüsse hinsichtlich Fehlerarten basieren daher eher auf "Expertenurteil" als auf Erfahrung. Zusätzlich zu den im vorangegangenen Abschnitt behandelten Fehlererkennungsmethoden, sollten Folgende hervorgehoben werden:

- Allgemeiner Geräteausfall: Hinsichtlich der möglichen weiteren Analyse ist anzumerken, dass zur Fehlerortung und -behebung alle Maßnahmen auf den Empfänger über Tage beschränkt sind.
- Datenfehler: Anzumerken ist, dass starke externe Störungen (z.B. Blitzeinschlag) lange Datensequenzen beschädigen können und dass geeignete Fehlererkennungsmethoden gewählt werden müssen, die derartige Ereignisse mit einbeziehen. Der Einsatz bestimmter Modulationstechniken und der Einfluss nicht-linearer Komponenten können ebenfalls bestimmte Arten nicht-zufälliger Fehler begünstigen, was bei der Wahl (und Erprobung) von Fehlererkennungscodes berücksichtigt werden muss.
- Protokollfehler: -
- Kanalinterferenz: -

Aspekte der Fehlererkennung bei der hochfrequenten drahtlosen Datenübertragung

Hochfrequente Datenübertragung (MHz – GHz) wird zur Überbrückung von kurzen Distanzen verwendet (1-10 m). Ihr Einsatz ist bei längeren Strecken aufgrund der Signalabschwächung durch die geologischen Medien oder das Barrierenmaterial (z.B. Zement, Bentonit,

SalzmörTEL) eingeschränkt. Zusätzlich zu den im vorangegangenen Abschnitt behandelten Fehlererkennungsmethoden, sollten Folgende hervorgehoben werden:

- *Allgemeiner Geräteausfall:* Verwendet man eine einzige Fernbedienungseinrichtung zur Steuerung mehrerer Sensoren und Übertragungseinrichtungen, kann die Datenübertragung präzise synchronisiert werden. Durch Korrelation ist es möglich, fehlende oder beschädigte Datenframes zu ermitteln, was auf ein mögliches Versagen eines Sensors oder einer Übertragungseinheit hindeutet. Zusätzlich werden sowohl der Batteriestand als auch der RSSI (received signal strength index – Indikator für Empfangsfeldstärke) überwacht, um detailliertere Informationen, besonders über die Knotenpunkte, zu erhalten.
- *Datenfehler:* Es sind hauptsächlich zwei verschiedene Methoden implementiert; ein Framefehlerdetektor (Hardware) und eine einfache Prüfsumme, wie oben erwähnt. Wenn keine von beiden eine Fehlerwarnung meldet, während ein Datenframe empfangen wird, werden die Daten durch den Mikrocontroller des Sensors verarbeitet. Wenn jedes Feld des Frames gelesen wurde (und das System mit bidirektionalen Funktransceivern ausgestattet ist), sendet der Koordinator eine Bestätigungsmeldung an den entfernten Knoten, um ihn wissen zu lassen, dass die Daten korrekt empfangen wurden. Andernfalls versucht der Transmitter eine erneute Übertragung, um die Sensordaten korrekt an den Empfänger zu übermitteln.
- *Protokollfehler:* Nachrichten werden in beide Richtungen gesendet (Transmitter an Koordinator und umgekehrt) unter Verwendung eines Standardformats, das beiden Komponenten bekannt ist. Das Protokoll beginnt mit einer Überschriftsequenz und endet mit einer "End-of-Frame"-Datensequenz (EOF). Das Protokoll beinhaltet zusätzlich bestimmte Gerätekenndaten in komplementärem und nicht-komplementärem Format, um Fehler zu vermeiden.
- *Kanalinterferenz:* die Hochfrequenzbänder erlauben die Nutzung von mehr als einem Kanal in derselben Frequenz mit genügend großen Lücken zwischen ihnen, um die Koexistenz verschiedener Systeme in physisch geschlossenen Szenarien zu tolerieren, die auf verschiedenen Kanälen arbeiten. Desensibilisierung beschreibt die Fähigkeit eines Empfängers, Signale ihren Quellen eindeutig zuzuweisen. Die Desensibilisierung eines gewünschten Signals bei einer Referenzempfindlichkeit aufgrund eines Nachbarkanalsignals wird Nachbarkanalunterdrückung (*Adjacent Channel Rejection, ACR*) genannt.

B1.2.3.3 Fehlerkorrekturmethoden für die Datenübertragung

Zusätzlich zur Fehlererkennung existieren Schemata, die die (teilweise) Korrektur von Fehlern ermöglichen.

- In bidirektionalen Übertragungsleitungen können Rückwärtsfehlerkorrekturschemata verwendet werden: Wenn ein Fehler entdeckt wird, wird die erneute Sendung des fehlerhaften Datenblock beim Transmitter angefordert.
- Ein Fehlerkorrekturcode (error correction code, ECC) kann vor oder nach einem Datenblock gesendet und vom Empfänger im Falle eines Fehlers dazu verwendet werden, die Originaldaten (teilweise) zurückzugewinnen.

Im letzteren Fall gibt es viele Umsetzungsvarianten, die spezifische Korrekturschemata ermöglichen: Ein ECC kann z.B. dazu verwendet werden, die höherwertigen Bits zu korrigieren, während die niedriger wertigen Bits verglichen mit der Unsicherheit einer Messmethode als unkritisch erachtet werden. Andersherum kann es auch die bevorzugte Methode sein, die niedriger wertigen Bits zu korrigieren, was entweder zu sehr präzisen Daten führt oder zu Daten, die leicht als Ausreißer identifiziert werden können, z.B. wenn man Zeitleisten analysiert.

Fehlererkennungs- und -korrekturmethoden sind weit verbreitet in allen möglichen Anwendungen. Eine Vielzahl spezieller Aspekte, die im vorangegangenen Abschnitt zusammenge-

fasst wurden, gilt jedoch, wenn drahtlose Datenübertragungsmethoden eingesetzt werden müssen, weil drahtgebundene Lösungen die Sicherheitsfunktionen einer Barriere beeinträchtigen könnten. In diesem Fall kann die Stromversorgung als einschränkender Faktor angesehen werden, was zu der Notwendigkeit führt, nach optimierten Methoden zu suchen, die es ermöglichen, das Signal-Rausch-Verhältnis zu reduzieren und die Datenredundanz gering zu halten.

B1.2.4 Fehlererkennungsmethoden im Zusammenhang mit Fehlerarten und Messprinzipien

B1.2.4.1 Fehlererkennungsmethoden und Fehlerarten

In den vorangegangenen Abschnitten wurden mehrere Fehlerarten aufgeführt und mehrere Fehlererkennungsmethoden identifiziert. Tab. B1 gibt eine strukturierte Antwort auf die Frage, welche Fehlererkennungstechnik zur Entdeckung welcher Fehlerart eingesetzt werden kann. Ein technischer Fehler eines einzelnen Sensors kann z.B. durch Redundanz identifiziert werden; Redundanz mag aber versagen, wenn das Trendkorrekturverfahren nicht richtig funktioniert, weil alle redundanten Sensoren betroffen sein könnten. Da die Nutzbarkeit der Fehlererkennungsmethoden zum Teil von der spezifischen Methode abhängt, die eingesetzt werden soll, sollte eine derartige Aktion für jede Fehlererkennungstechnik durchgeführt werden.

Tab. B1 gibt einen Überblick darüber, welche Fehlerarten zu großen Problemen führen, weil sie unentdeckt bleiben könnten, und welche Arten weniger "problematisch" sind (ein einfacher Sensorausfall kann z.B. leicht durch Redundanz identifiziert werden).

Tab. B1: Fehlerarten und Fehlererkennungstechniken

	Redundanz	Diversität (Hardware)	Elektrische Stimulation	Verlässlichkeits-indikatoren	Lokale Fehlererkennung	Korrelation
Versagen von Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	Ja	Ja	Ja	Nein	Teilweise	Teilweise
Verlust von Redundanz	Ja	Ja	Ja	Nein	Teilweise	Teilweise
Fehler der Korrekturmethode	Ja	Ja	Ja	Ja	Teilweise	Teilweise
Nicht identifizierte gegenseitige Sensitivitäten	Ja	Ja	Nein	Nein	Fraglich	Ja
Verfälschung der Umgebungsbedingungen	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja
Fehler beim Sensoreinbau und Anschluss	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Teilweise
Fehler bei der Signalamwandlung	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Teilweise
Fehler bei der Signalübertragung	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Fraglich
Sensorversagen	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Fraglich

Gleichzeitig zeigt Tab. B1, welche Techniken für welche Fehlerart effektiv sind. Diese Tabelle ist auch hilfreich, wenn es darum geht, geeignete Techniken zur Fehlererkennung auszuwählen. Sie ist ebenfalls hilfreich, um Monitoring-Techniken oder Maßnahmen zu selektieren, mit denen es möglich ist, möglichst viele Fehlerarten und deren Berücksichtigung abzudecken. Redundanz beispielsweise stellt sich als sehr effektiv heraus und zusammen mit Diversität kann mehr oder weniger das gesamte Fehlerspektrum abgedeckt werden.

B1.2.4.2 Fehlererkennungsmethoden und Messprinzipien

Tab. B2 gibt einen Überblick über Messprinzipien geotechnischer Sensorsysteme, die im Rahmen eines Monitoring-Programms für ein Endlager verwendet werden können.

Tab. B2: Messprinzipien geotechnischer Sensorsysteme

Nr.	Messprinzip
1	Thermoelement
2	Elektrische Widerstandsänderungen <ul style="list-style-type: none"> • Thermistoren (RTD) • Dehnungsmessstreifen (inkl. piezoresistiver Effekte im Halbleiter) • Widerstandsblock (Feuchtigkeit) • Potentiometer
3	Piezo-elektrischer Effekt
4	Magnetische Induktionseffekte
5	Schwingdraht-Sensoren (Vibrating wire) <ul style="list-style-type: none"> • Statische Messungen • Dynamisch anhaltende Schwingung
6	Kapazitive Systeme <ul style="list-style-type: none"> • Verschiebungssensoren • Hygrometer
7	Elektromagnetische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> • TDR, TDT (Time Domain Reflectometry und Transmissometry) • FDR, FDC (Frequency Domain Reflectometry und calibration) • Phasentransmission
8	Wärmeausbreitung <ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitfähigkeit • Temperaturleitfähigkeit
9	Neutronenmoderation (Neutron-gamma-Sensor)
10	Psychrometer (Saugspannungen)
11	Tensiometer (Oberflächenspannung)
12	Radioaktiver Zerfall <ul style="list-style-type: none"> • Gasgefüllte Ionisierungskammer, gasgefüllte Vieldrahtproportionalkammer • Geiger-Müller Zähler • Szintillationszähler • Halbleiterdetektor
13	Elektrochemische Systeme <ul style="list-style-type: none"> • Potentiometer-Elektrode für pH-Wert Messungen (auch Eh) • ISFET (Ionen-sensitive Feld-Effekt-Transistoren (pH)) • Potentiostat (Korrosion)
	Andere Prinzipien
14	Infraroterkennung
15	Faseroptische Sensoren (chemische Sensoren) <ul style="list-style-type: none"> • Aktive Faserkerne • Aktiver Fasermantel • Optroden • Refraktometer • Fluoreszenzspektroskopie
16	Fabry-Perot Interferometer
17	Bragg-Gitter
18	OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) Rückstreuung (Raman, Rayleigh, Brillouin)

Insgesamt wurden 18 relevante Prinzipien identifiziert, 13 elektrische und 5 optische Prinzipien. Tab. B3 setzt die Messprinzipien in Verbindung mit den im vorigen Kapitel genannten Fehlererkennungsmethoden.

Mit Blick auf Tabelle B3 wird offensichtlich, dass nicht alle Fehlererkennungsmethoden für alle Messprinzipien angewendet werden können. Aber immerhin sind für die meisten Messprinzipien Fehlererkennungsmethoden verfügbar. Für einige wenige Prinzipien, wie piezo-

elektrische Effekte oder chemische Verfahren im Zusammenhang mit faseroptischen Sensoren, sind keine Fehlererkennungsmethoden verfügbar.

Tab. B3: Fehlerentdeckungsmethoden in Bezug zu den identifizierten Messprinzipien

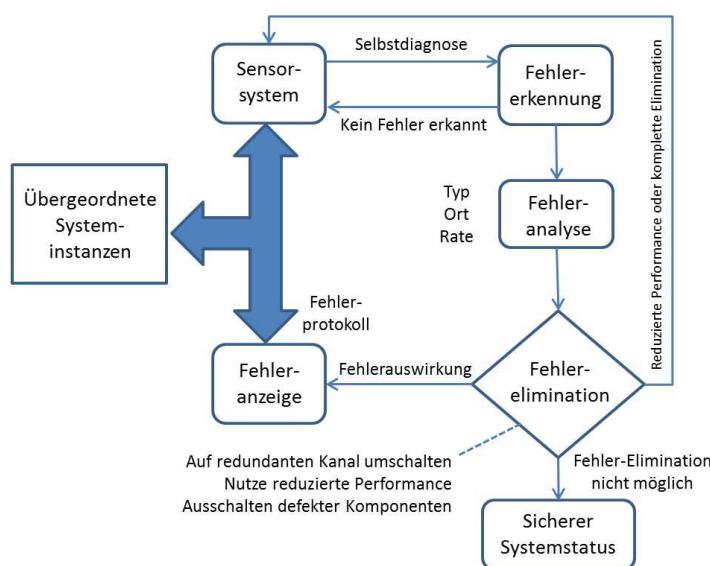
Nr.	Messprinzip	Redundanz	Diversität	Elektrische Stimulation	Verlässlichkeit s-Indikatoren	Lokale Fehlererkennung	Korrelation	Bemerkungen
1	Thermoelement	Mehrere Schweißpunkte	Verschiedene Metalle	Schleifenstrom-Sprungantwort	Signalkontinuität			
2	Elektrische Widerstandsänderungen Thermistoren (RTD)	X						
	Dehnungsmessstreifen	Mehrere in einer Konfiguration		Ausgangssignal proportional zum Eingangssignal		Langzeit-Drift		
	Widerstandsblock	X	Z.B.: Drucksensor: Ausgangssignal druckabhängig, Eingangssignal temperatur-abhängig		Eingangs- und Ausgangswiderstand			
	Potentiometer	X		Ausgangssignal proportional zum Eingangssignal		Bewegungs-blockade		
3	Piezo-elektrischer Effekt	X						
4	Magnetische Induktion	X		Widerstands-messer				
5	Schwingdrahtsensoren	X	Thermischer Einfluss					
	Statische Messungen	X		Re-magnetisierung	Spektralanalyse			
	Dynamisch Schwingung	X						
6	Kapazitive Systeme	X		Widerstands-messer		Widerstands-messer		
7	Elektromagnetische Verfahren	X		Zeitverlauf und Energieverlust				
8	Wärmeausbreitung	Erfassung von Temperaturgradienten			Stabile T-verhältnisse zum Messzeitpunkt			
9	Neutronenmoderation	X						Nur mobile Sensoren mit aktuelle Kalibrierung
10	Psychrometer	X						
11	Tensiometer	X						
12	Radioaktiver Zerfall	X						
13	Elektrochemische Systeme	X						
14	Infraroterkennung	X						
15	Faseroptische Sensoren	X				OTDR		Fehler betreffen alle Messungen einer Faser
	Optroden	X						
	Refraktometer	X						
	Fluoreszenzspektroskopie	X						
16	Fabry-Perot Interferometer	X			Ausreichende Lichtenergie			
17	Bragg-Gitter	X	Thermischer Einfluss					
18	OTDR	X	Druck und Temperatur			Inharent vorhanden		

B2 Eigensichere Sensoren inklusive Diagnostik

Unter industriellen Gesichtspunkten erfordert der Betrieb von Sensoren inklusive zugehöriger Elektronik in aggressiver Umgebung den Einsatz von Systemen, die intrinsisch sicher sind und deren Einsatz in spezifischen Umgebungen validiert und genehmigt ist. Da Sensoren oder Sensorsysteme speziell für den langfristigen Einsatz innerhalb von Einlagerungsbereichen nach deren Verschluss in einem Endlager vorzusehen sind, liegt der Einsatz von sogenannten „eigensicheren“ Sensoren nahe. Diese Sensorsysteme nutzen modernen Fehlererkennungsmethoden, deren Prinzipien im vorigen Kapitel dargelegt wurden. Sie wenden diese Prinzipien automatisch unter vorher definierten Bedingungen an.

Existierende Sensorsysteme sind prinzipiell ausgestattet mit vier funktionalen Blöcken zur Fehlererkennung, Analyse, Indizierung und Elimination, um eine intrinsische Sicherheit zu erzeugen.

Abb. B6 zeigt ein prinzipielles Blockdiagramm eines eigensicheren Sensors. Die Einheit zur Datenverarbeitung ist kontinuierlich im Modus der Selbstdiagnose, d. h., alle Funktionalitäten des Sensorelementes und auch alle zugehörigen Verarbeitungskomponenten werden permanent überwacht. Die Fehlererkennung in den Sensorelementen selbst ist ein spezieller Fall. Standartmethoden zur Selbstdiagnose können hier nicht verwendet werden, da Sensorelemente für gewöhnlich nicht-elektrische Werte (z. B. physikalische oder chemische Größen) in elektrische Signale umwandeln, gibt es keinen weiteren Zugang von der Sensorebene zu den nicht-elektrischen Größen. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass interne Signale oft überlagert werden von anderen Prozessebenen und somit nicht zur Fehlererkennung beitragen können. Wichtig ist, dass Methoden zur Fehlererkennung die Datenerfassung nicht beeinträchtigen dürfen.



Wird ein Fehler detektiert, beginnt augenblicklich die Fehleranalyse. Diese Funktionalität bestimmt die Art des Fehlers, die unterschieden wird in permanente Fehler, kurzzeitige Fehler, Fehlerrate und Ort seines Auftretens. Diese Informationen werden anschließend von der Fehler-Eliminationsfunktion verarbeitet.

Fig. B6:
Blockdiagramm eines eigensicheren
Sensorsystems

Der Zweck eines eigensicheren Sensorsystems ist, eine kontinuierliche Datenerfassung zu gewährleisten auch für den Fall, dass ein Fehler auftritt. Im Zuge der Fehlerelimination wird der defekte funktionale Block stillgelegt während das System auf einen redundanten Block wechselt oder eine Reduzierung der Leistungsfähigkeit gezielt in Kauf nimmt. Ist eine Fehlerelimination nicht möglich, wird der Sensor in einen sogenannten „sicheren System Status“ versetzt, d. h., eine Datenübertragung zur nächsten Systemebene wird unterbrochen, damit die Daten des defekten Sensors nicht als reale Messdaten anerkannt und interpretiert werden. Gerade Letzteres ist für den Einsatz im Rahmen eines Endlagermonitoring vor großer Bedeutung.

B3 Diskussion und Empfehlungen

In Abschnitt B1 wurde ein Überblick über potenzielle Fehlermodi gegeben. Durch die Anwendung in einer Vielzahl von sicherheitsrelevanten Bereichen wurde die Möglichkeit geschaffen, verschiedene teilweise sehr spezifische Methoden zur Fehlererkennung zu entwickeln. Die Methoden variieren in Bezug auf die erreichbare Verlässlichkeit unter Berücksichtigung des nötigen technischen Aufwandes und der spezifischen Anforderungen für ihren Einsatz. Abschnitt B1 gibt auch einen Überblick über verschiedene Strategien zur Fehlererkennung speziell mit Blick auf eine Fehlererkennung, die alle Komponenten inklusive der Datenerfassung und des Datentransfers, berücksichtigt. Die Methoden der Fehlererkennung wurden abschließend in Bezug gesetzt zu den möglichen Fehlermodi und Messprinzipien.

Die Beziehung von Fehlererkennungs-Methoden zu Fehlermodi kann Hinweise geben, welche Fehlermodi die größten Probleme im jeweiligen Anwendungsfall bedingen, insbesondere wenn sie unentdeckt bleiben und welche Fehlermodi auf einfache Weise behoben werden können (Ein kompletter Sensorausfall kann beispielsweise durch einfache Redundanz identifiziert und behoben werden). Es wurde auch aufgezeigt, welche effektiven Maßnahmen und Techniken für verschiedene Fehlermodi verfügbar sind. Dies kann hilfreich sein, wenn es darum geht, Techniken zu selektieren, die je nach Anwendung eine spezifische Fehlererkennung ermöglichen und es kann auch dazu beitragen, zusätzlich Monitoring-Technologien und Maßnahmen zu selektieren, mit denen möglichst viele Fehlermodi angesprochen werden können.

Eine gute Möglichkeit, die Verlässlichkeit von Sensoren zu erhöhen, ist die Verwendung von eigensicheren Sensoren. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn Sensoren über lange Zeiträume in Bereichen eingesetzt werden sollen, die einer Wartung nicht zugänglich sind. Diese Sensorsysteme wenden Fehlererkennungsmethoden automatisch unter vorher definierten Bedingungen an.

Die Ergebnisse eines Monitoring sollen als eine Grundlage für Entscheidungsprozesse im Verlauf des Endlagerprogramms dienen. Das bedeutet, dass robuste verlässliche Sensorsysteme und Verarbeitungsprozeduren notwendig sind. Fehlererkennung und Fehlerbehandlung spielen in dem Zusammenhang eine besondere Bedeutung.

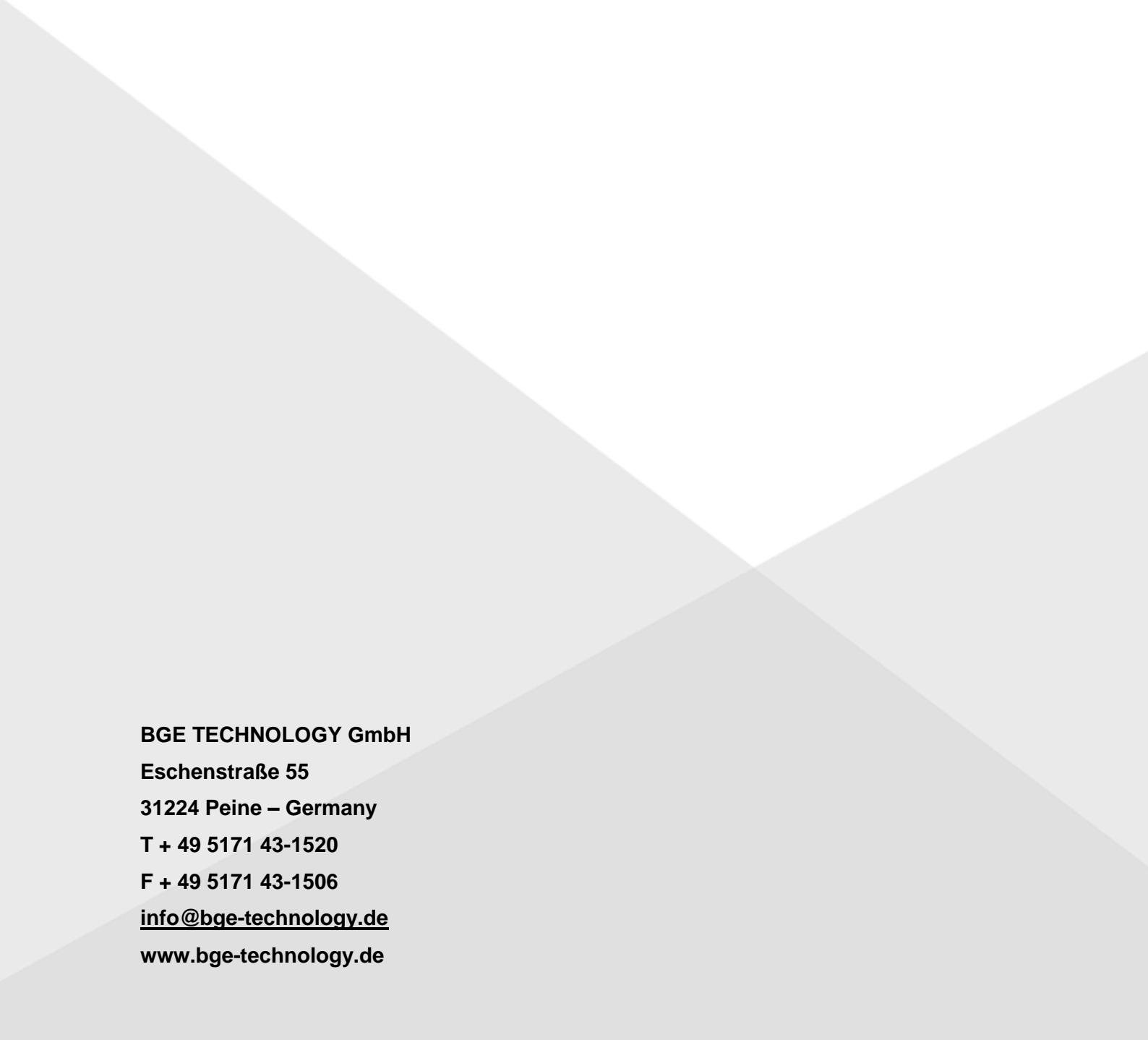
Die Verwendung von eigensicheren Sensoren im Rahmen von In-situ Versuchen in existierenden Untertagelaboratorien ist momentan sehr begrenzt. Der Grund dafür ist in erster Linie der deutlich höhere Preis dieser Sensorsysteme. Experimente in Untertagelaboratorien sind in der Regel auf eine Laufzeit von wenigen Jahren ausgerichtet und der Ausfall einzelner Sensoren ist in der Regel verkraftbar ohne den Erfolg des Versuches zu gefährden. Auf den Einsatz eigensicherer Sensoren wird daher gern verzichtet.

Will man allerdings ein Langzeit-Monitoring in spezifischen Endlagerkomponenten durchführen, sollte der Einsatz eigensicherer Sensoren, zumindest in begrenztem Umfang, eingeplant werden, um Fehlererkennung und deren Kompensation als inhärenten Bestandteil des Monitoring-Systems zu implementieren.

Literaturverzeichnis

- Aitemin, & MoDeRn-Partners (2013). MoDeRn: State of Art Report on Monitoring Technology. Tech. rep., European Commission.
- Amadi-Echendu, J. E., & Zhu, H. (1994). Detecting Changes in the Condition of Process Instruments. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 43(2).
- Hashemian, H. M. (2005). Sensor Performance and Reliability. ISA Press.
- Olbrich, T., Bradley, D. A., & Richardson, A. M. (1996). Build-In Self-Test in Intelligent Microsystems as a Contributor to System Quality and Performance. *Quality Engineering*, 8(4), 601-613.

- Schneider, G. (1996). Selbstüberwachung und Selbstkalibration von Sensoren. atp-Automatisierungstechnische Praxis, Oldenbourg Verlag, 38(9), 9-17.
- Weiler, D. (2001). Selbsttest und Fehlertoleranz mit zugelassener milder Degradation in integrierten CMOS Sensorsystemen. Master's thesis, Vom Fachbereich Elektrotechnik der Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg.
- Yung, S. K. (1992). Local Validation of Sensor Signals, Fault Diagnosis and Control Systems. In IEEE Colloquium (Bd. 125, S. 7.1-7.8). London.
- Yung, S. K. (1992). Signal Processing in Local Sensor Validation. Ph. D. Thesis, Oxford University, Oxford.



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