Übertragung des Sicherheitsnachweis-konzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine

ÜBERSICHT

Abschlussbericht

DBE TECHNOLOGY GmbH

Übertragung des Sicherheitsnachweis-konzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine

ÜBERSICHT

Abschlussbericht

S. Eberth, N. Müller-Hoeppe

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Dezember 2009

Das diesem Bericht zugrunde liegenden FuE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Kennzeichen 02 E 9521 durchgeführt.

Dieser Bericht unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts und darf nur mit Zustimmung der DBE TECHNOLOGY GmbH oder ihres Auftraggebers ganz oder in Teilen vervielfältigt werden.

Vorwort

Das Gesamtziel des FuE-Vorhabens ÜBERSICHT war es, analog zu dem FuE-Vorhaben „Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager“ (FKZ 02 E 9087), in dem auf konzeptioneller Basis das nachweisbare Zuverlässigkeitsniveau, früher auch als Sicherheitsniveau bezeichnet, eines Endlagers im Salz ermittelt wurde, das nachweisbare Zuverlässigkeitsniveau eines Endlagers in den Wirtsgesteinen Granit und Ton im Rahmen vorliegender Endlagerkonzepte konzeptionell zu bestimmen. Dabei ist sowohl die ungestörte als auch die gestörte Entwicklung des Endlagers zu betrachten und im Sinne der ICRP-Empfehlung sowohl ein Dosisgrenzwert für die ungestörte Entwicklung des Endlagers anzusetzen als auch ein Risikogrenzwert für die gestörte Entwicklung.

Um einen objektiven, einheitlichen Maßstab zur Bewertung der Sicherheit zu erhalten, wie er im System der Eurocodes als Ziel verankert ist und z. B. auch den Richtlinien des Umweltschutzes zur Beherrschung wassergefährdender Stoffe zu Grunde liegt, war eine nachweisbare obere Schranke für das potenzielle Gesamtrisiko zu ermitteln. Dieser Wert stellt einen einheitlichen Bewertungsmaßstab dar und lässt sich sowohl mit von konventionellen, technischen Anlagen ausgehenden, hypothetischen Risiken als auch mit realen Lebensrisiken von Menschen vergleichen. Der Vergleich war im Rahmen des Vorhabens durchzuführen.

Die im Rahmen des FuE-Vorhabens ÜBERSICHT durchgeführten Arbeiten wurden inhaltlich wie folgt gegliedert:

- Zusammenstellung von Informationen zu Endlagern und Verschlusskonzept in den Wirtsgesteinen Granit und Ton und Bestimmung der Wirkungsweise der Barrieren

- Entwicklung von Sicherheitsnachweiskonzepten für Endlagerkonzepte in Granit und Ton und Darstellung möglicher Entwicklungen des Endlagersystems

- Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus von Einzelbarrieren (Permeationsbarrieren)

- Quantitative Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus, mit dem die Sicherheit des Endlagers für die betrachteten Konzepte gewährleistet ist, in Konzepttiefe und Gegenüberstellung von Schranken für Risikowerte aus verschiedenen Lebensbereichen des Menschen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		1
1	Einleitung	9
2	Zusammenstellung von Informationen zu Endlagerkonzepten und Verschlusskonzepten in den Wirtsgesteinen Granit und Ton und Identifikation der Wirkungsmechanismen der Barrieren sowie eine vorläufige Klassifizierung der Barrieren	11
2.1	Endlagerkonzepte in nichtsalinaren Wirtsgesteinen	11
2.2	Funktion des Wirtsgesteins	13
2.2.1	Wirtsgestein Granit	13
2.2.2	Wirtsgestein Ton/Tongestein	13
2.3	Engineered Barrier Systems: Von der Abfallform bis zum Verschlusskonzept	14
2.3.1	Abfallform und -konditionierung	15
2.3.2	Gewählte Verschlusskonzepte	16
2.3.2.1	Schachtverschlüsse	17
2.3.2.2	Streckenverschlüsse	19
2.4	Unterteilung in Endlagerkonzepte im Granitgestein als Wirtsgestein und in Endlagerkonzepte im Tongestein als Wirts- und Barrierengestein	21
2.4.1	Behälterkonzepte für Endlager im Granitgestein	22
2.4.1.1	KBS-3-Behälterkonzept für Endlager im Granitgestein in Skandinavien	22
2.4.1.2	Behälterkonzept in Kanada	23
2.4.1.3	Behälterkonzept im schweizerischen Kristallin-I-Projekt	23
2.4.2	Puffer- und Versatzkonzept für Endlager im Granit	24
2.4.2.1	Puffer und Versatz im KBS-3-Behälterkonzept für Endlager im Granitgestein in Skandinavien	24
2.4.2.2	Puffer und Versatz im kanadischen Endlagerkonzept	25
2.4.2.3	Puffer und Versatz im schweizerischen Kristallin-I-Projekt	25
2.4.3	Behälterkonzepte für Endlager im Tongestein	26
2.4.3.1	Behälterkonzept im belgischen Endlager im Tongestein	26
2.4.3.2	Behälterkonzept im französischen Endlager im Tongestein	27
2.4.3.3	Behälterkonzept im schweizerischen Opalinuston-Projekt	29
2.4.4	Gewählte Puffer/Versatzmaterialien	30
2.4.4.1	Puffer und Versatz im belgischen Endlager im Tongestein	30

2.4.4.2 Puffer und Versatz im französischen Endlager im Tongestein 30
2.4.4.3 Puffer und Versatz im schweizerischen Opalinuston-Projekt 31
2.5 Entwicklung von Szenarien und Szenarienanalysen 31
2.5.1 Endlagerentwicklungen im Granit 33
2.5.1.1 Ungestörte Entwicklung (Basisszenario) für das KBS-3-Konzept im Granit 34
2.5.1.2 Gestörte Entwicklung des Endlagers im KBS-3-Konzept 37
2.5.1.3 Basisszenario für das kanadische Endlagerkonzept im Granit 41
2.5.1.4 Basisszenario im schweizerischen Kristallin-I-Projekt 42
2.5.1.5 Gestörte Entwicklung des Endlagers im schweizerischen Kristallin-I-Projekts 45
2.5.2 Entwicklungen eines Endlagers im Tongestein 46
2.5.2.1 Basisszenario im schweizerischen Opalinuston-Projekt 46
2.5.2.2 Alternative Entwicklung des Endlagers im schweizerischen Opalinuston-Projekt, pessimistische Parametersätze und What-if-Szenarien 50
2.6 Tabellarische Zusammenfassung der verschiedenen Entwicklungen der Endlagersysteme in den jeweiligen Wirtsgesteinsformationen 53
2.7 Bewertung der Funktionsweise der einzelnen Barrieren 57
2.8 Klassifizierung und Wirkungsmechanismen der einzelnen Barrieren im Hinblick auf die gestörte und ungestörte Entwicklung eines Endlagers 60
2.9 Zusammenfassung von Ergebnissen zu Barrieren in den Wirtsgesteinen Granit und Ton 62

3 Ermittlung eines funktionsbezogenen Sicherheitsnachweiskonzeptes für die Endlager im Granit bzw. Tongestein und vergleichende Gegenüberstellung mit der Vorgehensweise bei der Langzeitsicherheitsanalyse 63
3.1 Identifikation der für die gestörte bzw. ungestörte Entwicklung die Sicherheit bestimmenden Barrieren auf qualitativer Basis 63
3.1.1 Barrieren im Granit 65
3.1.2 Barrieren im Tongestein 67
3.1.3 Zusammenfassung der qualitativen Ergebnisse zu den Barrieren im Granit und im Tongestein 71
3.2 Ermittlung eines anwendbaren, funktionsbezogenen Sicherheitsnachweiskonzeptes 71
3.3 Vergleich der Vorgehensweise bei der Langzeitsicherheitsanalyse und bei Sicherheitsnachweisen nach der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte 80
3.4 Betrachtung der Barriereeigenschaften unter dem Aspekt der Nachweisbarkeit 81
3.5 Anwendung des funktionsbezogenen, risikobasierten Sicherheitsnachweiskonzeptes auf das Mehrbarrierensystem für Endlager 83

3.6	Exemplarische und vereinfachte Anwendung des Ansatzes nach Eurocodes auf das Mehrbarrierensystem	84
3.6.1	Betrachtung ausgewählter Barrieren im KBS-3-Konzept	84
3.6.2	Betrachtung ausgewählter Barrieren im Opalinuston-Projekt	86
3.6.3	Bemessungssituationen und Grenzzustände für die Barrieren im Endlager	89
3.7	Risiko – die vereinheitlichte Bewertungsbasis	92
3.8	Abschätzung der oberen Risikoschranke bei ungestörter Entwicklung eines Endlagers	94
3.8.1	Betrachtung eines Endlagers im Granit	96
3.8.1.1	Ungestörte Entwicklung (Basisszenario) für das KBS-3-Konzept im Granit	96
3.8.1.2	Gestörte Entwicklung des Endlagers im KBS-3-Konzept	97
3.8.2	Betrachtung eines Endlagers im Tongestein	102
3.8.2.1	Basisszenario für das Opalinuston-Projekt im Tongestein	103
3.8.2.2	What-if-Szenarien und menschliches Eindringen im Opalinuston-Projekt	108
3.9	Zusammenfassung der oberen Schranken für das Individualrisiko für ein Endlager im Granit und im Tongestein	111
4	Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus von ausgewählten Einzelbarrieren	115
4.1	Qualitätsmanagement	115
4.2	Der KBS-3-Behälter im Granit: Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus	117
4.2.1	Funktionsanforderungen an die Einzelelemente des Behälters	117
4.2.1.1	Herstellung der Kupferhülle des Abfallgebindes	119
4.2.1.2	Prüfmethoden für die Schweißnaht der Kupferhülle	122
4.2.1.3	Genauigkeit der Prüfmethoden für die Schweißnaht	124
4.2.2	Wahrscheinlichkeit der Einlagerung von unerkannt defekten Abfallgebinden	125
4.2.3	Tragfähigkeit des Gusseiseneinsatzes	127
4.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus	129
4.3	Schachtverschluss im Tongestein: Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus	130
4.3.1	Erzeugung eines konsistenten Datensatzes für die Auflockerungszone	132
4.3.2	Erzeugung eines konsistenten Datensatzes für die Schachtverfüllung	135
4.3.3	Generischer Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein	137
4.3.4	Widerlager: Untere Schottersäule	139
4.3.4.1	Nachweisverfahren / Nachweis der Verformungssicherheit	140

4.3.4.2 Ermittlung der Einwirkungen auf die untere Schottersäule 141
4.3.4.3 Ermittlung der resultierenden Setzungen der Schottersäule 144
4.3.4.4 Bewertung des Ergebnisses zum Widerlager 145
4.3.5 Dichtung: Bentonitdichtelement, Kontaktzone und Auflockerungszone 145
4.3.5.1 Ermittlung der Permeabilität des Dichtelements aus Bentonit 146
4.3.5.2 Permeabilität der Kontaktzone 149
4.3.5.3 Permeabilität der Auflockerungszone 151
4.3.6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zur Dichtung 155
4.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus 156
4.4 Streckenverschluss im Salzgestein: Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus 158
4.4.1 Bewertung der Herstellbarkeit 161
4.4.2 Generischer Streckenverschluss im Steinsalz 164
4.4.3 Hydraulischer Widerstand des generischen Streckenverschlusses 165
4.4.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zum hydraulischen Widerstand 169
4.4.5 Beständigkeit 170
4.4.6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zur Beständigkeit 172
4.4.7 Nachweis der Rissbeschränkung 173
4.4.7.1 Bauzustände 173
4.4.7.2 Transiente und stationäre Phase – Baukörper und Kontaktzone 174
4.4.7.3 Transiente und stationäre Phase – Auflockerungszone 177
4.4.7.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zur Rissbeschränkung 179
4.4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus 179
4.5 Organisatorische Maßnahmen zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit 180
4.5.1 Differenzierung der Überwachungsmaßnahmen bei der Planung 180
4.5.2 Differenzierung der Überwachungsmaßnahmen bei der Herstellung 181
4.5.3 Zusammenfassung wichtiger Aspekte zu den Überwachungsmaßnahmen 182
4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Zuverlässigkeitsniveau ausgewählter Einzelbarrieren für Endlager im Granit, Tongestein und Steinsalz 182

5 Abschätzung oberer Schranken für das von einem Endlager für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente ausgehende, hypothetische Risiko und Gegenüberstellung von gesellschaftlich akzeptierten Risiken 185

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zu ausgewählten Endlagerkonzepten im Granit, Tongestein und Salzgestein unter Berücksichtigung der Ergebnisse zum nachweisbaren Zuverlässigkeitsniveau von Einzelbarrieren 185

5.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für das KBS-3-Konzept eines Endlagers im Granitgestein 185

5.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse für das Opalinuston-Projekt eines Endlagers im Tongestein 186

5.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für ein Endlager im Salzgestein 187

5.2 Gegenüberstellung der Abschätzungen für das individuelle Risiko für Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Granit, Tongestein und Steinsalz 188

5.3 Vergleich der Ergebnisse mit akzeptierten hypothetischen Risiken aus konventionellen technischen Anlagen 189

5.4 Vergleich der Ergebnisse mit akzeptierten realen Lebensrisiken des Menschen 190

5.4.1 Akzeptierte reale Lebensrisiken: Arbeitsunfälle 191

5.4.2 Akzeptierte reale Lebensrisiken: Gesellschaftliches Leben, Lebensgewohnheiten, Mobilität 192

5.4.3 Unvermeidbare reale Lebensrisiken: Lebensumfeld, Kriminalität, Katastrophen 193

5.5 Zusammenfassung und Bewertung des Vergleichs der Ergebnisse mit akzeptierten realen Lebensrisiken des Menschen 194

6 Zusammenfassung und Ausblick 197

Abbildungsverzeichnis 205

Tabellenverzeichnis 209

Literaturverzeichnis 211

Abkürzungsverzeichnis 219

Glossar 221

Anhang 1: Statistische Bestimmung einer einzelnen Eigenschaft 225

Anhang 2: Ermittlung der räumlichen Permeabilitätsverteilung unter Anwendung eines Blockmodells 229

Anhang 3: Zusammenstellung von Ergebnissen zur Auflockerungszone im Salzgestein 239

1 Einleitung

Die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen ist in tiefen geologischen Gesteinsformationen vorgesehen. International gibt es Endlagerkonzepte mit unterschiedlichem Entwicklungstand in den Wirtsgesteinsformationen Granit (Schweden, Finnland, Kanada), Ton (Frankreich, Schweiz, Belgien), Salz (Deutschland) und Tuff (USA). In allen Endlagerkonzepten ist ein Mehrbarrierensystem zum Schutz der Biosphäre vor den schädlichen Auswirkungen der radioaktiven Abfälle vorgesehen. Die meisten dieser Barrieren sind technische oder geotechnische Barrieren, als natürliche Barriere wird in der Regel nur das Wirtsgestein in Ansatz gebracht.

Im Rahmen von Sicherheitsnachweisen ist zu zeigen, dass das Mehrbarrierensystem seine Funktion erfüllt. Dabei ist festzustellen, dass das Zuverlässigkeitsniveau, mit dem nachgewiesen wird, dass eine einzelne Barriere ihre Funktion erfüllt, beschränkt ist. Deshalb gibt es auch für das Mehrbarrierensystem nicht ausschließbare Szenarien, für die Freisetzungen oberhalb der Dosisgrenze ermittelt werden, auch wenn es sich dabei um Szenarien mit geringer oder sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit handelt. In diesem Zusammenhang ist die Verwendung einer Dosisgrenze nicht sinnvoll, da ein Ungleichgewicht in der Sicherheitsbewertung entsteht, wenn Ereignisse oder Zustände hoher und geringer Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem gleichen Maßstab bewertet werden, ohne die Eintrittswahrscheinlichkeit explizit mit zu berücksichtigen.

Die hier durchgeführten Untersuchungen hatten zum Ziel, auf Endlager in den Wirtsgesteinen Granit und Ton ein für ein Endlager im Salz entwickeltes, risikobasiertes Konzept zum Nachweis der Sicherheit zu übertragen, dem als objektiver einheitlicher Sicherheitsmaßstab das Risiko zu Grunde liegt. Damit wird ein Beitrag zur Vergleichbarkeit von Endlagerkonzepten in verschiedenen Wirtsgesteinen unter dem Aspekt der Sicherheit geleistet. Weiterhin wird dabei für die jeweiligen Endlagerkonzepte bei ungestörter und gestörter Endlagerentwicklung deutlich, welche Barrieren sicherheitsbestimmend sind.

Zur Erreichung des o. g. Ziels wurden folgende, einzelne Arbeitsschritte durchgeführt, die sich in der Gliederung des Berichts widerspiegeln. Der Bericht umfasst deshalb vier nachstehend aufgeführte, übergeordnete, an den Arbeitsschritten orientierte Abschnitte.

Im ersten Abschnitt werden Informationen zu den Endlagerkonzepten sowie den Verschlusskonzepten in den Wirtsgesteinen Granit und Ton zusammengestellt. Die vorgesehenen Mehrbarrierensysteme werden beschrieben. Es werden die Endlagerbedingungen aufgeführt, die einer ungestörten Entwicklung des Endlagers zugeschrieben werden sowie die Endlagerbedingungen, die nicht einer ungestörten Entwicklung des Endlagers zugeordnet werden können. Dabei werden die Funktion und die Wirkungsmechanismen der einzelnen Barrieren herausgearbeitet und mit Bezug auf die ungestörte bzw. gestörte Endlagerentwicklung eine Klassifizierung vorgenommen.

Im zweiten Schritt werden am Beispiel des KBS-3-Konzeptes im Wirtsgestein Granit (Schweden) und des Projektes Opalinuston (Schweiz) im Tongestein die die Sicherheit bestimmenden Barrieren für die ungestörte und die gestörte Entwicklung des Endlagers auf

qualitativer Basis identifiziert. Es wird ein Konzept für den Funktionsnachweis der jeweiligen Einzelbarrieren entwickelt. Auf dieser Grundlage wird ein Sicherheitsnachweiskonzept für das Mehrbarrierensystem in den Wirtsgesteinen Granit und Ton bereitgestellt. Dazu wird ein risikobasierter, methodischer Ansatz zur Ermittlung von nachweisbaren oberen Schranken für das von einem Endlager ausgehende Risiko bei ungestörter und gestörter Entwicklung angewendet. Auf Grundlage von veröffentlichten Dosisraten aus Langzeitsicherheitsanalysen werden für die Beispiele KBS-3-Konzept im Wirtsgestein Granit (Schweden) und für das Opalinuston-Projekt (Schweiz) obere Schranken für das jeweilige vom Endlager ausgehende Risiko ermittelt.

Im dritten Abschnitt erfolgt die Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus, mit dem die Funktionsfähigkeit von Einzelbarrieren nachgewiesen werden kann, wobei hier die Beschränkung auf Permeationsbarrieren vorgenommen wird. Dazu wird als Beispiel der Kupferbehälter im KBS-3-Konzept im Wirtsgestein Granit (Schweden) herangezogen. Für das Beispiel eines Schachtverschlusses im Tongestein wird zuerst ein generischer Schachtverschluss entwickelt, da für die Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus die veröffentlichten Datengrundlagen zu den jeweils einzelnen Endlagerkonzepten in Frankreich, der Schweiz und Belgien nicht ausreichen. Da weiterhin Schätzungen vorgenommen werden müssen, ist die quantitative Aussage zum erreichten Zuverlässigkeitsniveau für den Schachtverschluss im Tongestein nur im Rahmen der getroffenen Annahmen gültig. Die beschriebene Vorgehensweise zum Nachweis des Zuverlässigkeitsniveaus für den Schachtverschluss entspricht jedoch dem Stand der Technik und kann bei Vorliegen der erforderlichen Datengrundlage angepasst werden. Zum Vergleich und als Ergänzung wird die Nachweisführung für einen Streckenverschluss im Salz ebenfalls dargestellt.

Im vierten Abschnitt werden die oberen Schranken für das hypothetische Risiko, die auf Basis der vorliegenden Informationen zu den Endlagerkonzepten in den Wirtsgesteinen Granit und Ton für die Beispiele KBS-3-Konzept (Schweden) und Opalinuston-Projekt (Schweiz) ermittelt wurden, angegeben und um ältere Werte zu Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Salz (Deutschland) ergänzt. Diese Risikoschranken werden mit akzeptierten Schranken für das Risiko aus konventionellen technischen Anlagen verglichen und weiterhin den realen Lebensrisiken des Menschen gegenübergestellt.

2 Zusammenstellung von Informationen zu Endlagerkonzepten und Verschlusskonzepten in den Wirtsgesteinen Granit und Ton und Identifikation der Wirkungsmechanismen der Barrieren sowie eine vorläufige Klassifizierung der Barrieren

2.1 Endlagerkonzepte in nichtsalinaren Wirtsgesteinen

Neben dem in der Bundesrepublik Deutschland favorisierten Konzept der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Steinsalzformationen werden in anderen Ländern, vor allem unter Berücksichtigung der lokalen geologischen Gegebenheiten, andere Wirtsgesteine in Betracht gezogen. Als mögliche Wirtsgesteinsformationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, insbesondere ausgedienter Brennelemente (SF – Spent Fuel) und hochradioaktiver Abfälle (HAW – High Active Waste bzw. HLW – High Level Waste), aber auch für langlebige mittelaktive Abfälle (ILW – Intermediate Level Waste), wurden in einigen Industrienationen in den letzten Jahren vor allem Ton- und Tongesteinsformationen und Granit, als Vertreter magmatischer Gesteine, in Betracht gezogen /1/. Mit dem Yucca Mountain Project, das hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes eine gewisse Sonderstellung einnimmt, wird in den USA auch vulkanischer Tuff erforscht.

Dieser Bericht bezieht sich auf die Konzepte zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, ausgedienten Brennelementen und langlebigen mittelradioaktiven Abfällen, die in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden sollen. Diese Abfallarten werden in diesem Bericht als „radioaktive Abfälle“ bezeichnet, wenn die einzelnen Abfallarten nicht im Detail benannt werden. Endlagerkonzepte für schwach radioaktive und insbesondere kurzlebige radioaktive Abfälle werden in diesem Bericht nicht behandelt.

Im Ton bzw. Tongestein sind intensive Forschungsarbeiten und z. T. bereits Erkundungsarbeiten u. a. in Belgien, Frankreich, der Schweiz und in Spanien aufgenommen worden. Kristalline Gesteine, v. a. Granit werden in Schweden, Finnland, Kanada, der Schweiz, Spanien, Japan, Tschechien und Korea derzeit erforscht bzw. teilweise bereits in Untertage-Laboren erkundet. Es ist festzustellen, dass der Entwicklungsstand der Endlagerkonzepte in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich ist und deshalb international kein einheitliches Niveau vorhanden ist.

Aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes in den Konzepten zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in den oben genannten Ländern ist ebenso der verfügbare Literatursachstand qualitativ wie quantitativ sehr unterschiedlich. In der vorliegenden Arbeit werden die jeweiligen Konzepte für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen im Granit bzw. Tongestein exemplarisch am Beispiel ausgewählter Staaten herausgearbeitet und dargestellt. Die vorliegende Arbeit erhebt dabei aus den vorgenannten Gründen nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Für die Beschreibung der Endlagerkonzepte im Granit wird in erster Linie auf die Forschungsergebnisse aus Schweden und aus Finnland zurückgegriffen. In Schweden wurde das auf dem KBS-3-Behälter basierende Endlagerkonzept entwickelt. In Finnland wurde das schwedische KBS-3-Behälterkonzept aufgegriffen, dies wird aber an die lokalen geologischen Verhältnisse angepasst, wodurch es teilweise Abweichungen gibt. Diese werden gesondert beschrieben. Hinsichtlich der Endlagerkonzepte im Granit wird auch entsprechend verfügbarem Sachstand auf die Arbeiten der kanadischen AECL (Atomic Energy of Canada Ltd.) und auf das schweizerische Kristallin-Projekt zurückgegriffen.

Für die Beschreibung der Endlagerkonzepte im Tongestein wird auf die Schweiz (Opalinuston-Projekt) verwiesen, da für das Opalinuston-Projekt eine gute und umfangreiche, veröffentlichte Dokumentation vorliegt. In Belgien und in Frankreich werden ebenfalls intensive Forschungsarbeiten im Ton/Tongestein durchgeführt. Dennoch stand für die Bearbeitung dieses Vorhabens keine ausreichende Literaturgrundlage zur Verfügung.

Dem Deckgebirge wird für die Auslegung und Dimensionierung von Endlagern international wenig Bedeutung zugemessen. Das Deckgebirge verfügt normalerweise auch nicht über langfristig sicher prognostizierbare Barriereeigenschaften bzw. nur über ein geringes Isolationspotential. Bei Endlagerkonzepten, bei denen die Endlagerung in Teufen von mehreren hundert Metern realisiert werden soll, werden daher keine besonderen Anforderungen an das Deckgebirge gestellt bzw. diese werden nicht genauer spezifiziert /2/, /3/. Einzig bekannt ist das geplante Endlager „Konrad“ in Salzgitter für schwach- und mittelaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, bei dem die überlagernden Deckschichten - nicht das Deckgebirge - bestehend aus mächtigem weitgehend undurchlässigem Tongestein eine Barrierefunktion übernehmen. Im geplanten Endlager „Konrad“ befindet sich der Einlagerungsbereich im Korallenoolith als Wirtsgestein. Der Einlagerungsbereich liegt damit nicht im Barrieregestein.

Im Folgenden wird die Funktion der Wirtsgesteinsformationen Granit und Ton/Tongestein zunächst kurz erläutert. Anschließend werden in Bezug auf die Wirtsgesteinsformationen Granit und Ton/Tongestein die technischen und geotechnischen Barrieren (EBS - Engineered Barrier Systems) in den Endlagerkonzepten der jeweiligen Länder von der Abfallform über das Behälterkonzept, den Puffer/Versatz bis hin zum Verschlusskonzept vorgestellt und beschrieben.

Darauf aufbauend wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Szenarien und bei der Durchführung von Szenarienanalysen kurz erläutert und dann detailliert auf die mit den verschiedenen Endlagerentwicklungen verknüpften Szenarien eingegangen. In diesem Kontext wird die Funktionsweise der Barrieren beschrieben und abschließend die einzelnen Barrieren bzgl. ihrer Wirkungsmechanismen im Hinblick auf die ungestörte und gestörte Entwicklung des Endlagers klassifiziert.

2.2 Funktion des Wirtsgesteins

Für die hier betrachteten Endlagerkonzepte im Granit und Ton/Tongestein wird die Funktion des Wirtsgesteins nachstehend kurz erläutert, da diese Kenntnis für das Verständnis der zugehörigen Endlagerkonzepte notwendig ist.

2.2.1 Wirtsgestein Granit

Bei Granit handelt es sich um ein magmatisches Tiefengestein. In seiner Entstehungsgeschichte war es sehr hohen Temperaturen ausgesetzt und ist deshalb temperaturstabil. Es besitzt eine sehr hohe Festigkeit und eine sehr geringe Verformbarkeit. Es ist in der Regel klüftig und deshalb wasserführend. In ungeklüfteten Bereichen ist Granit sehr dicht.

Im Zusammenhang mit Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Granit wird von klüftigem, d. h. prinzipiell wasserführendem Granit ausgegangen. Dem Wirtsgestein Granit werden keine relevanten, dichtenden Barriereeigenschaften zugeordnet. Seine Funktion besteht im Wesentlichen darin, dank seiner Mächtigkeit von einigen 100 m und seiner hohen Festigkeit den mechanischen Schutz der technischen Barrieren in Bezug auf Ereignisse und Prozesse zu gewährleisten, die nahe der Erdoberfläche stattfinden. Weiterhin werden die Sorptionseigenschaften für Radionuklide des Wirtsgesteins Granit bei Bedarf sowie seine reduzierenden Eigenschaften in Ansatz gebracht, die ein stabiles geochemisches Milieu in der Tiefe des Endlagers gewährleisten, in der der radioaktive Abfall eingelagert ist.

2.2.2 Wirtsgestein Ton/Tongestein

Tone und Tongesteine sind Sedimente mit unterschiedlicher Bildungsgeschichte und können daher auch sehr unterschiedliche Bestandteile aufweisen. Gemeinsam ist den Tonen bzw. Tongesteinen jedoch ihr Klassifikationsmerkmal der sehr geringen Korngröße. Die Korngröße ist so klein, dass bei Tonen elektrostatische Effekte nicht vernachlässigt werden können, vorhandenes Wasser nicht mehr uneingeschränkt mobil ist und Transportprozesse deshalb über Diffusion erfolgen. Eine weitere Folge dieser Eigenschaften sind eine hohe Sorptionskapazität von Ton und Tongesteinen sowie reduzierende Eigenschaften.

Die Mächtigkeit von Tonschichten ist allerdings deutlich geringer als die von Granitvorkommen. Auch die Festigkeit von Ton bzw. Tongesteinen ist eher gering und weiterhin ebenso wie die Verformbarkeit maßgeblich vom Wassergehalt abhängig. So reicht die Bandbreite der Tone vom plastischen Ton bis zum sprödbruchgefährdeten Tongestein. Tone sind i. d. R. temperaturempfindlich, bei zu hohen Temperaturen verändern sie ihre Eigenschaften.

In Zusammenhang mit Endlagerkonzepten im Ton bzw. Tongestein wird dem Wirtsgestein eine Barrierefunktion zugeordnet, die zu einem auf seiner dichtenden Funktion beruht, d. h. der Verlangsamung von Transportprozessen durch Beschränkung auf Diffusion, zum anderen auf seiner Rückhaltefunktion für Radionuklide in Folge Sorption. Es wird davon

ausgegangen, dass das Wirtsgestein Ton/Tongestein nicht durch hydraulisch leitfähige Diskontinuitäten gestört ist.

Vom Wirtsgestein Ton bzw. Tongestein und den überlagernden Gebirgsschichten gemeinsam oder bei eher geringer Mächtigkeit des Wirtsgesteins von den überlagernden Gebirgsschichten allein ist der mechanische Schutz in Bezug auf Ereignisse und Prozesse zu gewährleisten, die nahe der Erdoberfläche stattfinden. In Bezug auf das Reduzieren möglicherweise sauerstoffreicher Wässer sowie die Rückhaltung von Bestandteilen stark mineralisierter Wässer aus überlagernden Schichten wird wiederum die Tonbarriere in Ansatz gebracht. Sie gewährleistet ein stabiles geochemisches Milieu im Endlager, wo sich die Einlagerungsbereiche der radioaktiven Abfälle befinden.

2.3 Engineered Barrier Systems: Von der Abfallform bis zum Verschlusskonzept

Unabhängig vom bevorzugten Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist die Abfallform maßgeblich durch den Brennstoffkreislauf bestimmt. Wird eine Wiederaufarbeitung der ausgedienten Brennelemente durchgeführt, entsteht wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfall, der in Glas eingeschmolzen und in Edelstahlkokillen gefüllt wird. Wird hingegen auf die Wiederaufarbeitung verzichtet und die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente vorgezogen, so werden deren Brennstäbe mit ihren Hüllrohren i. d. R. als ganze Brennelemente direkt ohne Behandlung bzw. Konditionierung nach der Abklingphase im Abklingbecken in geeignete Transport- bzw. Zwischenlagerbehälter oder direkt in Endlagerbehälter umgefüllt.

In Abhängigkeit von der favorisierten Wirtsgesteinsformation gibt es beim Behälterkonzept deutliche Unterschiede, die sich insbesondere aus den unterschiedlichen Barriereeigenschaften des Wirtsgesteins ergeben.

Solche Unterschiede sind auch bei der Verfüllung des Endlagerbergwerkes mit Versatz bzw. der Hinterfüllung der Abfallgebinde mit Puffermaterialien in den Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern vorhanden, weil je nach Behälterkonzept bzw. Barriereeigenschaften des Wirtsgesteins auch unterschiedliche Anforderungen an den Versatz bzw. die Puffermaterialien gestellt werden. Aus diesen Gründen wird der Bericht in den nachfolgenden Abschnitten, wenn das Behälterkonzept und das Versatz- bzw. Puffermaterial beschrieben werden, unterteilt in die Umsetzungen der Konzepte im Granit und im Tongestein. Der erste Abschnitt, der im Wesentlichen die Abfallform behandelt, gilt für Endlagerkonzepte im Granit und Tongestein gleichermaßen. Schacht- und Streckenverschlüsse sind im Wirtsgestein Granit von untergeordneter Bedeutung. Deshalb wird im Folgenden ein Schacht- und Streckenverschlusskonzept in Tongestein beschrieben, das in Bezug auf seinen konstruktiven Aufbau bei modifizierten Anforderungen auch im Wirtsgestein Granit eingesetzt werden kann.

2.3.1 Abfallform und -konditionierung

Je nach Abfallart werden die Abfälle unterschiedlich konditioniert. Hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle (HAW) werden gegenwärtig in (Borosilikat-)Glas verglast. Dieses Vorgehen ist international Standard und wird zur Konditionierung hochradioaktiver Abfälle angewendet /1/. Diese verglasten Abfälle enthalten nur noch geringe Anteile leichtflüchtiger Radionuklide. Die Glasmatrix ist aufgrund der geringen Auflösungsrate von Silicia in Wasser und der Umgebungsbedingungen im Endlager sehr beständig, so dass die Radionuklide im Falle eines Wasserzutritts nur langsam aus der Glasmatrix freigesetzt werden. Die Auflösungsraten der verglasten HAW in Wasser bewegen sich je nach Hersteller der verglasten Abfälle zwischen $1{,}5 \cdot 10^{-04}$ g/(m²d) (BNFL – British Nuclear Fuels Ltd.) und $2 \cdot 10^{-04}$ g/(m²d) (COGEMA, Frankreich) /4/. Damit ist der Abfallmatrix der verglasten HAW eine Barrierefunktion zuzuordnen, die auf einer langzeitigen Verzögerung der Freisetzung von Radionukliden beruht und einige zehntausend Jahre andauern kann.

Bei der direkten Endlagerung werden in der Regel die ausgedienten Brennelemente in geeignete Behälter verpackt und das Gebinde, bestehend aus der vorhandenen Urandioxid-(UO_2)- bzw. Uranmischoxid-(MOX)-Struktur des Kernbrennstoffs in den Hüllrohren der Brennstäbe und dem Behälter, direkt endgelagert. Teilweise ist auch vorgesehen nur die aus den Brennelementen herausgelösten Brennstäbe in den Behältern endzulagern. Die UO_2-Struktur bzw. MOX-Struktur stellt die eigentliche Abfallform des abgebrannten Kernbrennstoffs dar.

Aus den abgebrannten Brennelementen können leichtlösliche Radionuklide als sogenannte Instant Release Fraction (IRF) herausgelöst werden. Die Instant Release Fraction (IRF) besteht aus flüchtigen Radionukliden, die sich während des Reaktorbetriebes in kleinen Spalten z.B. zwischen den Hüllrohren und dem Brennstoff sammeln. Die Radionuklide werden schnell freigesetzt, wenn der Brennstoff in Kontakt mit Wasser tritt /5/. Für die Auflösung der Brennstoffmatrix selbst wird dagegen eine Rate von $4 \cdot 10^{-07}$/a angegeben /4/. Die Auflösungsrate der Matrix nimmt mit abnehmendem Sauerstoffgehalt ab, d. h. bei zunehmend reduzierenden Bedingungen, wie sie nach Verschluss des Endlagers wieder entstehen. So ist direkt nach Abschluss der Betriebsphase des Endlagers aufgrund der während der Betriebsphase erforderlichen Bewetterung des Endlagerbergwerkes mit aeroben Bedingungen auch in den Einlagerungsbereichen zu rechnen. Durch die Korrosion von Stahl mit zutretenden Wässern wird ein Teil des Sauerstoffs verbraucht, weiterhin binden reduzierende Mineralien im Versatz- und Puffermaterial sowie im Wirtsgestein einen anderen Teil des vorhandenen Sauerstoffs. Daher entwickeln sich nach dem Verschluss des Endlagers wieder reduzierende Bedingungen /5/.

Langlebige, mittelradioaktive Abfälle (ILW) stammen aus der Energiegewinnung, der Wiederaufarbeitung, aber auch aus Forschung und Industrie. Die Radioaktivität ist im Vergleich zu den HAW und dem SF relativ gering, jedoch beinhalten sie vergleichsweise große Mengen an leicht lösbaren Radionukliden. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Herkunft aus der Industrie, der Energiegewinnung, etc. ist die Abfallmatrix nicht einheitlich. Verschiedene Abfalltypen mit teilweise hoher chemischer Beständigkeit (Zement, Bitumen, Zirkaloy) machen eine einheitliche Konditionierung beim Erzeuger unmöglich. Daher werden die Abfälle in un-

terschiedlichen Gebindetypen je nach Erzeuger angeliefert. Im Allgemeinen handelt es sich aber um Stahl- oder Beton-/Faserzementfässer unterschiedlicher Größe, von denen eine bestimmte Anzahl (z. B. 4 bis 6 Stück) in einem Betoncontainer platziert wird. Aufgrund der einfachen Stahlfässer und der Umverpackung in Betoncontainern (Overpack) stellen diese Behälter keine langfristige Barriere dar und leisten daher auch keinen langfristigen Beitrag zur Verzögerung der Radionuklidfreisetzung.

In Tabelle 1 werden die Zeiträume dargestellt, in denen die Abfallmatrix zur Bindung der Radionuklide und somit zu einer Verzögerung der Freisetzung beitragen soll. In Tabelle 1 sind auch Länder berücksichtigt und Daten aufgeführt, deren Endlagerkonzepte in den weiteren Abschnitten des Berichtes nicht berücksichtigt werden, weil die Sachstandslage für eine weitergehende Bearbeitung nicht ausreichend ist.

Tabelle 1: Abfallform und angesetzte Zeitdauern für die Mobilisierung von Radionukliden in den Endlagerkonzepten verschiedener Länder /1/

Land	***Angaben zu angesetzten Zeitdauern der Mobilisierung***	***Abfallmatrix***	
		HAW	***SF***
Schweiz (Kristallin-Projekt)	150.000 a langsames Herauslösen von Radionukliden	Glas	k. A.
Frankreich	100.000 a Widerstand gegen Radionuklidfreisetzung	Glas	UO_2/MOX
Belgien	10.000 a Widerstand gegen Radionuklidfreisetzung	Glas	k. A.
Japan	>>10.000 a Einschluss/langsame Radionuklidfreisetzung	Glas	k. A.
Tschechien	10.000 a Rückhaltung	Glas	UO_2
Schweden	Verlangsamung der Freisetzung von Radionukliden	nur SF	UO_2
Finnland	Verlangsamung der Freisetzung von Radionukliden	nur SF	UO_2
Kanada	Verlangsamung der Freisetzung von Radionukliden	nur SF	UO_2
Spanien	Verlangsamung der Freisetzung von Radionukliden	nur SF	UO_2
Korea	Widerstand gegen Radionuklidfreisetzung	nur SF	UO_2

2.3.2 Gewählte Verschlusskonzepte

Bei den Verschlüssen ist zu unterscheiden zwischen Schacht- und Streckenverschlüssen. Da sowohl für Schacht- als auch für die Streckenverschlüsse in den einzelnen Endlagerkonzepten derzeit noch keine detaillierten Planungen vorliegen, werden die entsprechenden Verschlusskonzepte für Schächte und Strecken nur in dem dargestellten Umfang schematisch vorgestellt und allgemein beschrieben, unabhängig vom jeweils gewählten Wirts- bzw. Barrierengestein.

Die NAGRA /6/ stellt in ihrem Technischen Bericht „Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers“ Verschlusskonzepte für die Strecken- und Schachtverfüllung eines Endlagers in Tongestein vor.

Anhand des dort vorgestellten Konzeptes für den Verschluss eines Endlagers im Tongestein soll exemplarisch der Aufbau von Schacht- und Streckenverschlüssen gezeigt werden. Die

wesentlichen Elemente der Schacht- und Streckenverschlüsse bzw. der Aufbau dieser Verschlusssysteme ist im Grundsatz auch auf die Verschlussbauwerke für Endlager im Granit übertragbar, obwohl im Wirtsgestein Granit andere Anforderungen bestehen.

Im Konzept der NAGRA für ein Endlager im Tongestein ist vorgesehen, die Abfallgebinde in horizontalen Einlagerungsstrecken endzulagern. Während des Einlagerungsbetriebes wird nach der Einlagerung eines jeden Gebindes in einem Streckenabschnitt dieser Bereich mit den dazugehörigen Puffer- und Versatzmaterialien verfüllt und so im Rückbau schließlich auch die ganze Einlagerungsstrecke. Beim Übergang der Einlagerungsstrecke zur Hauptstrecke (Transportstrecke) wird ein Verschlussbauwerk angeordnet. Diese Streckenverschlüsse werden im Abschnitt 2.3.2.2 weiter behandelt. Nach dem Verschluss der Strecken werden abschließend die Schächte oder eventuell alternativ vorhandene Rampen verfüllt und mit Verschlussbauwerken versiegelt, siehe Abschnitt 2.3.2.1.

2.3.2.1 Schachtverschlüsse

Schachtverschlüsse haben im Allgemeinen die Aufgabe eine Trennung der eingelagerten Abfälle von der Biosphäre zu realisieren. Dazu ist anzumerken, dass der Bau von Schachtverschlüssen mit Dichtheitsanforderungen auch im klassischen Bergbau in bestimmten Fällen erforderlich ist, um die natürlichen Grundwasserhorizonte zu schützen. Im Falle des Verschlusses eines Endlagers für radioaktive Abfälle bestehen i. d. R. allerdings erhöhte Anforderungen, z. B. an die Lebensdauer der Schachtverschlüsse. Um dies zu gewährleisten, wird auf natürliche, langzeitig beständige Baustoffe zurückgegriffen, wie Schotter (setzungsstabile Schottersäulen), Bentonite für Dichtelemente und ggf. auch Asphalte. Für diese Materialien existieren natürliche Analoga, die die Langzeitbeständigkeit unter bestimmten Bedingungen bestätigen. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines Schachtverschlusses am Beispiel des Konzeptes der NAGRA für ein Endlager im Tongestein.

Der Schachtverschluss wird im aufgeführten Beispiel als hydraulische Barriere ausgelegt. Konstruktiv besteht ein solcher Schachtverschluss aus Widerlagern (hier: obere und untere Schottersäule) und einem oder mehreren Dichtelementen. Die Widerlager dienen zur Aufnahme der statischen und dynamischen Beanspruchungen durch Auflasten, Quelldrücke und hydraulische Einwirkungen, die Dichtelemente zur Begrenzung der Fluidströme.

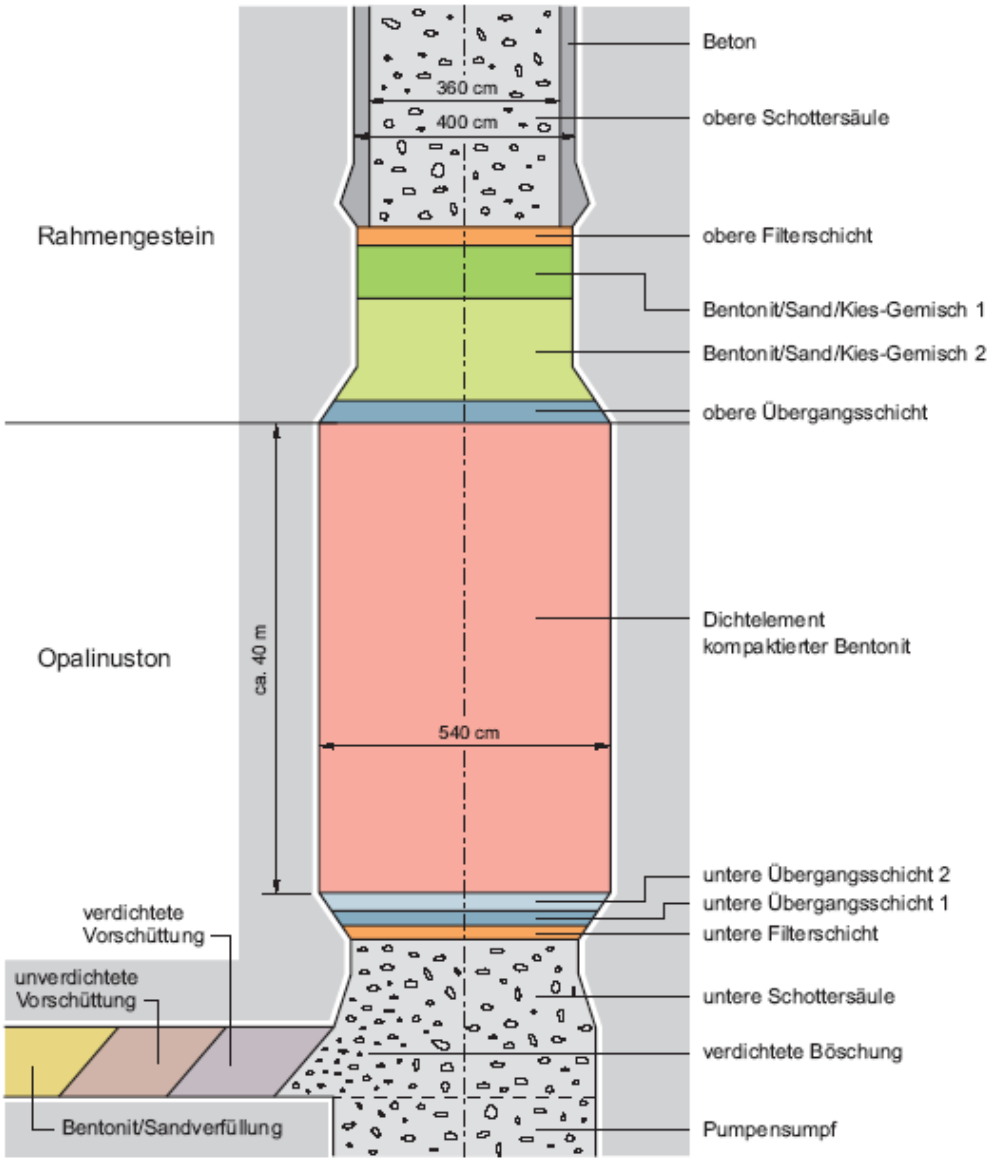


Abbildung 1: Aufbau eines Schachtverschlusses eines Endlagers im Tongestein /6/

Als Materialien für das Dichtelement ist der Einsatz von Bentonitgemischen geplant, deren Quellpotential durch den Bentonitanteil und den Zuschlagsstoff gesteuert werden kann.

Der schematische Aufbau des Schachtverschlusses lässt sich wie folgt beschreiben:

- Das untere Widerlager besteht aus Schotter, auch als untere Schottersäule bezeichnet. Wie bereits erwähnt gibt es zahlreiche Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Gesteinsschotter, so dass dieses Material geeignet ist nicht nur kurzzeitig sondern auch langzeitig die Aufgabe des Widerlagers zu übernehmen. Die untere Schottersäule beginnt im Schachttiefstem. Sie ist setzungsstabil auszubilden.
- Im Bereich der Streckeneinmündungen wird die Schottersäule mit einer unverdichteten und einer verdichteten Vorschüttung gegen Auslaufen in die Strecken gesichert.
- Auf die untere Schottersäule sind Filter- und Übergangsschichten aufgebracht, an die sich das Bentonitdichtelement anschließt. Bentonit bzw. bentonithaltige Mineralgemische werden häufig als Dichtelement vorgeschlagen. Bei Schachtverschlüssen im Salinar z. B. wird für Dichtelemente auch die Anwendung von asphalthaltigen Stoffgemischen bzw. reinen Asphalten vorgeschlagen /7/, /8/. Ob asphalthaltige Dichtelemente auch für Abdichtungsbauwerke im Tongestein und/oder Granit von Bedeutung sind, konnte für die Endlagerkonzepte der einzelnen Länder nicht herausgefunden werden.
- Im Bereich des Dichtelementes wird die Schachtkontur auf einen erheblich größeren Durchmesser aufgewältigt als die Schachtröhre selbst aufweist, damit stark aufgelockerte Zonen entfernt werden, die eine potenzielle Wegsamkeit darstellen. Die Dicke des Dichtelementes orientiert sich im schweizerischen Konzept an der Mächtigkeit der Barrierenschicht, d. h. sie beträgt mindestens 40 m. Vorzugsweise sind mehrere, redundante und diversitär wirkende Dichtelemente vorzusehen, so dass beim Ausfall eines Dichtelementes nicht die Dichtwirkung des gesamten Schachtverschlusses verloren geht. Durch diversitäre Dichtelemente lassen sich Abdichtungssysteme entwickeln, die auf unterschiedliche störende Einflüsse unempfindlich reagieren. Zum Beispiel dürfen geringe Setzungen nicht die Dichtwirkung des Schachtverschlusses außer Kraft setzen.
- Über dem Dichtelement schließen wieder Filter- und Übergangsschichten an.
- Im weiteren Bereich der Schachtröhre verbleiben tragende und dichtende Elemente des ursprünglichen Ausbaus aus der Betriebsphase des Endlagers. Im vorliegenden Beispiel ist der Übergangsbereich Gebirge Schacht mit einem Betonliner ausgebaut, alle anderen Schachteinbauten werden entfernt. Die Schachtröhre selbst wird abschließend z. B. mit Schotter, der oberen Schottersäule, verfüllt.
- Es wird generell angestrebt, dass die Schachtverfüllung aus dem umgebenden Gebirge ähnlichen (in den Materialeigenschaften kompatiblen) Materialien besteht.

2.3.2.2 Streckenverschlüsse

Analog zu den Schachtverschlüssen werden auch die Streckenverschlüsse als hydraulische Barrieren ausgelegt. Damit soll die durch die bergbaulichen Aktivitäten verletzte Barrierenwirkung des Wirtsgesteins wieder hergestellt und eine stützende Wirkung auf den betroffenen Gebirgsbereich erreicht werden.

Die Streckenverschlüsse schließen direkt an den Streckenversatz der Einlagerungsstrecke an. Sie bestehen aus einem Dichtsystem, um den geforderten hydraulischen Widerstand zur Minimierung des Fluidstromes zu gewährleisten, und einem statischen Widerlager zur Aufnahme der Kräfte aus Fluiddruck, Quelldruck und Gebirgsdruck. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den schematischen Aufbau eines Streckenverschlusses aus dem Endlagerkonzept der NAGRA /6/.

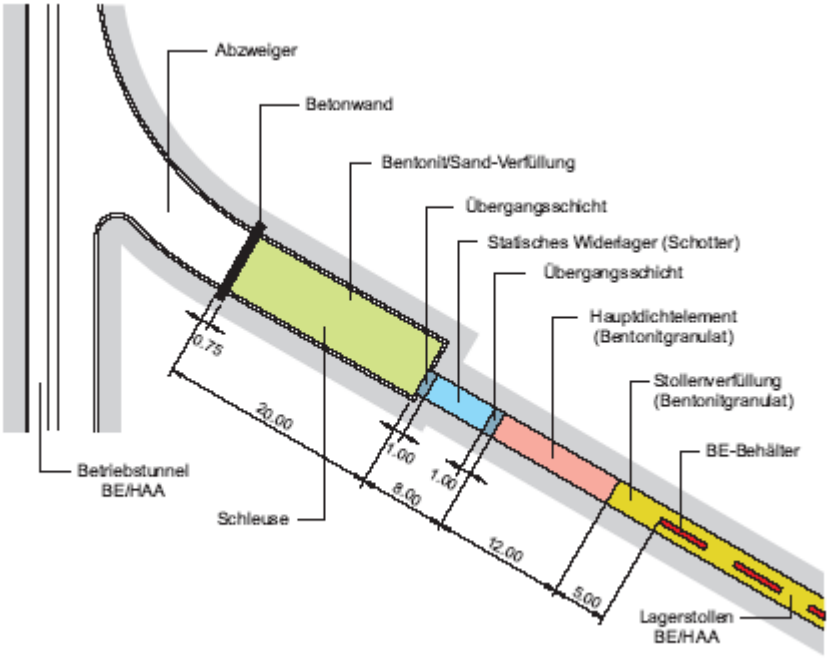


Abbildung 2: Aufbau eines Streckenverschlusses eines Endlagers im Tongestein /6/

Der schematische Aufbau des als Beispiel gewählten Streckenverschlusses des schweizerischen Endlagerkonzeptes lässt sich wie folgt beschreiben:

- An den Streckenversatz (Stollenverfüllung) des Einlagerungsbereiches der Einlagerungsstrecke schließt sich ein Bentonitdichtelement als Hauptdichtelement an.
- Nach dem Hauptdichtelement wird eine Übergangsschicht eingebracht.
- Anschließend folgt ein Widerlager, das aus Schotter besteht.
- Es folgt eine weitere Übergangsschicht.
- Es schließt eine Bentonit-Sand-Gemisch Verfüllung an, die den ehemaligen Zugang zur Einlagerungsstrecke (hier: ehemalige Schleuse) verschließt.
- Abschließend wird im Bereich der Streckeneinmündung eine Betonwand errichtet, die das sich dahinter befindende Bentonit-Sand-Gemisch stabilisiert.

In anderen Endlagerkonzepten sind Streckenverschlüsse mit gleichem Funktionsprinzip ebenfalls anwendbar. Unter Berücksichtigung des Barrierengesteins werden möglicherweise andere Materialien bzw. andere Materialkombinationen favorisiert.

2.4 Unterteilung in Endlagerkonzepte im Granitgestein als Wirtsgestein und in Endlagerkonzepte im Tongestein als Wirts- und Barrierengestein

Je nach Abfallart ist das Behälterkonzept unterschiedlich und den Anforderungen an die betriebliche Sicherheit und die Handhabbarkeit des Abfalls angepasst. Darüber hinaus wird dem Behälter eine Barrierenfunktion zugeordnet, die er je nach Wirtsgestein über einen definierten Zeitraum erfüllen muss. Beim Behälterkonzept sind daher deutlich Unterschiede zu erkennen, die aus den jeweiligen Endlagerkonzepten in den einzelnen Ländern resultieren /1/. Deshalb wird im Folgenden eine Trennung in der Beschreibung zwischen Endlagerkonzepten im Granit und im Tongestein vorgenommen, damit die Darstellung der jeweiligen Konzepte in sich geschlossen und übersichtlich bleibt.

Durch die Wahl des Wirtsgesteins als Barrierengestein wird auch die Wahl des Versatz- bzw. Puffermaterials bestimmt. Aus der internationalen Forschung geht hervor, dass v. a. bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Tongestein und im Granit meist Bentonit bzw. Bentonitgemische mit verschiedenen Zuschlägen, z. B. gebrochenem Gestein aus der Auffahrung, und in unterschiedlicher Zusammensetzung zum Einsatz kommen sollen.

Die Aufgaben des Puffer- bzw. Versatzmaterials lassen sich unabhängig von der gewählten Wirtsgesteinsformation wie folgt darstellen:

- Puffer- und Versatzbaustoffe sollen das Grubengebäude mechanisch stabilisieren und so die Ausbildung von durchgängigen Fließwegen entlang der Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungsbohrlöcher verhindern.
- Sie sollen selbst einen hydraulischen Widerstand ausbilden und zur Verlangsamung der Transportgeschwindigkeit von zutretenden Wässern führen.
- Die Puffermaterialien dienen als mechanischer Schutz vor Beschädigungen der Abfallgebinde. Dies gilt insbesondere bei der Bohrlochlagerung der Abfallgebinde in kristallinen Formationen.
- Sie dienen indirekt dem Korrosionsschutz der Behälter durch Stabilisierung des geochemischen Milieus.
- Radionuklide sollen ggf. durch die Verlangsamung ihrer Transportgeschwindigkeit über einen langen Zeitraum nach dem Versagen der Behälterbarriere oder bestenfalls sogar vollständig im Nahfeld der Behälter zurückgehalten werden.

Die Anforderungen an die Puffer- und Versatzkonzepte und deren Umsetzung unterscheiden sich allerdings je nach der gewählten Wirtsgesteinsformation und in Abhängigkeit vom geplanten Endlagerkonzept z. T. grundlegend. Aus diesem Grund wird auch hier eine Trennung zwischen den beiden Wirtsgesteinsformationen vorgenommen.

2.4.1 Behälterkonzepte für Endlager im Granitgestein

2.4.1.1 KBS-3-Behälterkonzept für Endlager im Granitgestein in Skandinavien

Schweden und Finnland planen Endlager im Granit ausschließlich zur direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente. In beiden Ländern kommt das KBS-3-Behälterkonzept zur Anwendung, welches maßgebend in Schweden entwickelt worden ist und von Finnland aufgrund gleicher geologischer Voraussetzungen unter Berücksichtigung lokationsspezifischer Besonderheiten angewendet wird. Die Korrosionsbeständigkeit des Behälters ist die wichtigste Voraussetzung, um seine Funktion als Barriere über den definierten Zeitraum sicherzustellen. Es werden Behälter mit Kupferummantelung und einem gusseisernen Einsatz, der die Brennelemente aufnimmt, favorisiert, wobei die Kupferschicht eine Dicke von 50 mm aufweist /9/, /10/, /11/. Die Behälter sind die Hauptbarriere und müssen ihre Funktion über einen definierten Zeitraum bewahren /1/. Ihnen wird eine planmäßige Lebensdauer von 100.000 a im geochemischen Milieu der jeweiligen Einlagerungsbereiche zugewiesen und selbst im Falle einer partiellen Undichtigkeit in Form kleinster Risse bzw. Löcher sollen die Abfallgebinde immer noch die Freisetzung von Radionukliden verlangsamen bzw. beschränken.

Die folgende Abbildung 3 zeigt schematisch das in Schweden und Finnland favorisierte Behälterkonzept sowie die Einlagerung in Bohrlöchern im Kristallin /12/.

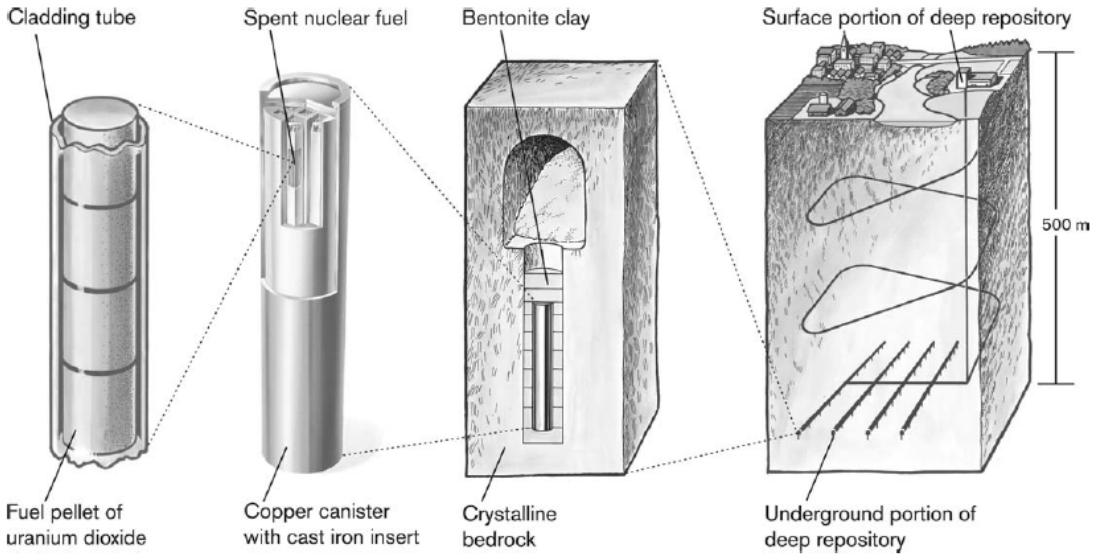


Abbildung 3: Schematische Darstellung des skandinavischen Behälter- und Einlagerungskonzepts /12/

Das erste Bild (von links nach rechts) zeigt einen Ausschnitt eines Brennstabs. Es werden schematisch die Urandioxid-Brennstoffpellets im Hüllrohr gezeigt. Das zweite Bild zeigt die Brennelemente im Einlagerungsbehälter und den darin befindlichen Gusseiseneinsatz. Im dritten Bild wird eine vertikale Einlagerungsbohrung mit Bentonitpuffer und Einlagerungsgebinde gezeigt. Die Einlagerungsstrecke wird im Rückbau versetzt. Das vierte Bild (rechts)

zeigt schematisch ein Endlager mit seinen Einlagerungsbohrlöchern, Einlagerungsstrecken, Zugangsstrecken, Schacht und Rampe.

2.4.1.2 Behälterkonzept in Kanada

In Kanada wird ebenfalls die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Granit favorisiert, da mit Skandinavien vergleichbare, geologische Voraussetzungen vorliegen. In Kanada plant man Brennelemente ebenfalls in Stahlcontainern mit Kupfermantel einzulagern /1/, /13/. In einer Variation des kanadischen Behälterkonzeptes sind Kupferbehälter mit einem speziellen Stahlkern vorgesehen, die höheren Drücken aus dem Überlagerungsdruck möglicher Eiszeiten standhalten sollen /14/. Dem Kupferbehälter wird auch im kanadischen Konzept die Hauptbarrierenwirkung zugeschrieben /15/. In einer weiteren Quelle /16/ werden auch Titanbehälter mit dünnen Wandungen bzw. Betonbehälter mit äußerst großen Wandstärken von ca. 100 cm angesprochen. Im State-Of-The-Art-Report /1/ über Barrierensysteme werden jedoch diese Alternativen nicht weiter spezifiziert, so dass aufgrund der vorliegenden Literatur keine Aussage über das tatsächlich geplante Behälterkonzept getroffen werden kann.

2.4.1.3 Behälterkonzept im schweizerischen Kristallin-I-Projekt

Auch in der Schweiz gab es Planungen zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Granitformationen. Das Kristallin-Projekt wird heute nur noch als Option für die Endlagerung radioaktiver Abfälle gewertet, der Schwerpunkt der Arbeiten konzentriert sich mittlerweile auf die Erforschung von Tongestein als Wirtsgesteinsformation für die Endlagerung.

Im schweizerischen Kristallin-I-Projekt /17/ sind zylindrische Stahlgussbehälter mit Wandstärken von 15 cm in den Endbereichen und 25 cm an der Mantelfläche vorgesehen. Die Deckel werden mit einem konischen Schraubengang aufgesetzt und anschließend mit dem Behälterkörper dicht verschweißt. Unter Endlagerbedingungen, d. h. unter der Einwirkung von korrodierenden Wässern, Bentonitquelldruck, erhöhter Temperatur und Gebirgsdruck soll ein Gebinde für mindestens 1000 a seine Integrität (Barrierenwirksamkeit) bewahren. Für den Nachweis der Festigkeit wird eine um 5 cm reduzierte Stärke angenommen, um der fortschreitenden Korrosion an der Behälterwand Rechnung zu tragen. Im geochemischen Umfeld im Endlager wird das eingelagerte Gebinde korrodieren, wobei zwischen flächiger, lokaler und Spannungsrisskorrosion unterschieden wird. Die flächenhafte und lokale Korrosion wird bei einer ungestörten Lagerzeit von 1000 a mit einer Korrosionsrate von 30 µm/a abgedeckt. In dieser abdeckenden Korrosionsrate sind sowohl die Korrosion unter aeroben Bedingungen in der Zeit nach Endlagerverschluss als auch die Korrosion unter anaeroben Bedingungen mit möglicher Sulfidbildung und bakterieller Einwirkung berücksichtigt /17/.

2.4.2 Puffer- und Versatzkonzept für Endlager im Granit

2.4.2.1 Puffer und Versatz im KBS-3-Behälterkonzept für Endlager im Granitgestein in Skandinavien

Das schwedische KBS-3-Endlagerkonzept sieht um das zylindrische Abfallgebinde einen Ring aus kompaktierten, vorgefertigten Bentonitelementen als Puffermaterial vor. Zwischen diesen Bentonitringen und dem Einlagerungsbehälter verbleibt ein offener Spalt von etwa d=10 mm Breite, der nach Zutritt von Wässern durch Quellprozesse des Bentonits verschlossen werden soll. Der Randspalt zwischen Bohrloch und Bentonitelement von ca. d=50 mm Breite sowie der Boden des Bohrlochs werden vor der Platzierung des Abfallgebindes mit Bentonitpulver verfüllt /10/. An das Materialgemisch des Puffers wird die Anforderung gestellt, einen ausreichend hohen Quelldruck zu mobilisieren und gleichzeitig einen Durchlässigkeitswert $k_f \leq 10^{-11}$ m/s aufzuweisen. Für den Versatz der Strecken über den Einlagerungsbohrlöchern ist ein Materialgemisch aus Bentonit und Schotter bzw. Bentonit und Sand vorgesehen. Durch die Setzungen von Lockergesteinen bzw. Sanden im Versatzmaterial können in der Firste Hohlräume entstehen, die durch die Quelleigenschaften des Bentonits nach dem Zufluss von Grubenwässern dauerhaft verschlossen werden sollen. Je nach Salzgehalt der zulaufenden Wässer muss zur Gewährleistung der Quelleigenschaften der Bentonitanteil im Versatzgemisch entsprechend angepasst werden. Er liegt je nach der Größe des Salzgehalts der zufließenden Wässer in der Größenordnung zwischen 10 % und 30 %. Der Versatz wird in die Strecken unmittelbar nach der Einlagerung der Abfallgebinde eingebracht, damit die Bentonitringe nicht zu hoch über die Streckensohle herausquellen, da grundsätzlich von der Anwesenheit von Wasser ausgegangen werden muss. Es hat sich als praktisch erwiesen, den Versatz lagenweise in situ mit Maschinen des Straßenbaus einzubauen und zu verdichten /18/.

Das finnische Endlagerkonzept lehnt sich an das schwedische KBS-3-Behälterkonzept an, weil es für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Kristallinformationen in Finnland unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten übernommen wird. Die Parallelen beginnen bei den Anforderungen an das Puffer-/Versatzmaterial und gehen bis hin zur Materialauswahl. Bei der Herstellung der Bentonitringe können verschiedene Techniken angewandt werden, so dass die Ringelemente in Größe und Beschaffenheit unterschiedlich sein können. Die Anforderungen an diese vorgefertigten Bentonitpufferelemente in den Einlagerungsbohrlöchern lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Bentonitpuffer muss chemisch und mechanisch stabil sein.
- Die Bentonitelemente dürfen andere Barrieren in ihrer Wirkung nicht beeinträchtigen, sie müssen mit den anderen Barrieren verträglich sein.
- Der Quelldruck des Bentonits soll zwischen 1 und 10 MPa betragen.
- Die Bentonitelemente müssen den Anforderungen entsprechend eine geringe Permeabilität, eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit, eine ausreichende Gaspermeabilität, ein gutes Absorptionsvermögen und eine ausreichende chemische Pufferkapazität aufweisen sowie eine Begrenzung der Freisetzung von Korrosionsprodukten und Radionukliden sicherstellen.

- Der Bentonitpuffer dient als Filter für Kolloide und Wachstumshemmer für Mikroorganismen.
- Der Bentonitpuffer soll plastische Eigenschaften aufweisen und Bewegungen der Grubenbaue ausgleichen, so dass keine punktuellen mechanischen Belastungen auf die Abfallgebinde zu erwarten sind.

In früheren finnischen Planungskonzepten wurden dem Streckenversatz keine Eigenschaften als technische Barriere zugewiesen. In neueren Planungen wurde die Notwendigkeit erkannt, ihn als Barriere zu ertüchtigen und in ein Multibarrierensystem zu integrieren. Außerdem wurden Untersuchungen mit Materialalternativen vorgenommen, da das ursprüngliche Material (70 % gebrochenes Gestein, 30 % Bentonit) bei höheren Salzgehalten der zufließenden Wässer möglicherweise nicht über die erforderlichen Eigenschaften (z. B. Quelleigenschaften) verfügt. Als alternatives Versatzmaterial wird glazigener Geschiebemergel in Betracht gezogen, welcher den gebrochenen Fels ersetzen soll. Ebenso wird die Verwendung von quellenden Tonen (vorkompaktierte Blöcke) diskutiert. Für die Ausführung des Versatzkörpers werden unterschiedliche Techniken vorgeschlagen. Es geht bei den unterschiedlichen Versatztechniken um die Ausführung des Versatzes als homogener Baukörper oder als Kompositbaukörper, bei dem in Lagen unterschiedliche Materialien eingebaut werden.

2.4.2.2 Puffer und Versatz im kanadischen Endlagerkonzept

Im kanadischen Endlagerkonzept ist vorgesehen, die kupferummantelten Behälter in horizontalen Strecken endzulagern. In die elliptischen Einlagerungsstrecken, die mit einem festen Betonboden ausgestattet werden sollen, werden kompaktierte Blöcke aus Gestein und Bentonit (Zusammensetzung 70 % gebrochenes Gestein, 25 % Ton, 5 % Bentonit) gestellt. Um die Behälter selbst soll ein 50 cm dicker Bentonit-Sand-Puffer aus vorkompaktierten Blöcken gelegt werden. Zur Anbindung der Blöcke an die Streckenkontur, besonders aber zur Firstanbindung, wird über dem Puffer ein Blasversatz aus 50 % Bentonit und 50 % gebrochenem Gestein eingebracht /15/.

Die Einlagerungsstrecken werden durch ein kompaktiertes Gemisch aus Granitschotter und Bentonit verschlossen. Für den Schacht ist ein Bentonit-Sandgemisch als Dichtelement in Verbindung mit Betonpfropfen als Widerlager vorgesehen /19/.

2.4.2.3 Puffer und Versatz im schweizerischen Kristallin-I-Projekt

Im schweizerischen Kristallin-I-Projekt wurde die horizontale Streckenlagerung geplant, d. h. die Abfallgebinde werden in die Strecken auf Podeste gelegt und im Rückbau wird die Strecke gefüllt und versetzt. Daher wird nicht zwischen Puffermaterial und Streckenversatz unterschieden. Die zum Einsatz kommenden vorgefertigten Bentonitblöcke in Größen von ca. d = 130 cm stellen gleichzeitig den Puffer und den Streckenversatz dar. Durch den Wärmeeintrag aus dem radioaktiven Zerfall in den Abfällen können Risse in den Bentonitblöcken durch Austrocknung entstehen, die durch das Quellen des Bentonits bei der Aufsättigung durch Selbstheilung verschlossen werden.

2.4.3 Behälterkonzepte für Endlager im Tongestein

2.4.3.1 Behälterkonzept im belgischen Endlager im Tongestein

Das belgische Behälterkonzept für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle umfasst zwei Stahlbehälter, einen äußeren Stahlcontainer aus Edelstahl und einen inneren Stahlbehälter aus Kohlenstoffstahl. Zwischen dem inneren Kohlenstoffstahlbehälter, der zwei Abfallkokillen - ihrerseits bestehend aus der Edelstahlkokille und den verglasten HAW-Abfällen - umschließt, und dem Edelstahlcontainer als Außenmantel wird zementhaltiges Puffermaterial gefüllt. Dieses sogenannte Supercontainer-Designkonzept /20/ besteht aus drei Hauptkomponenten, dem

(1) inneren Kohlenstoffstahlbehälter, der die HAW-Kokillen umschließt
(2) Puffermaterial aus Portlandzement
(3) äußeren Edelstahlbehälter

Der Kohlenstoffstahl wurde wegen seines gut erforschten Korrosionsverhaltens in Beton ausgewählt. In Kombination mit der Betonverfüllung ergibt sich aufgrund der Passivierung durch den hohen pH-Wert des Betons ein Korrosionsschutz für mehrere tausend Jahre, da die Korrosionsraten von Kohlenstoffstahl in passivierendem Milieu ausgesprochen gering sind. Die Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen das belgische Supercontainer-Designkonzept im Querschnitt und im Längsschnitt.

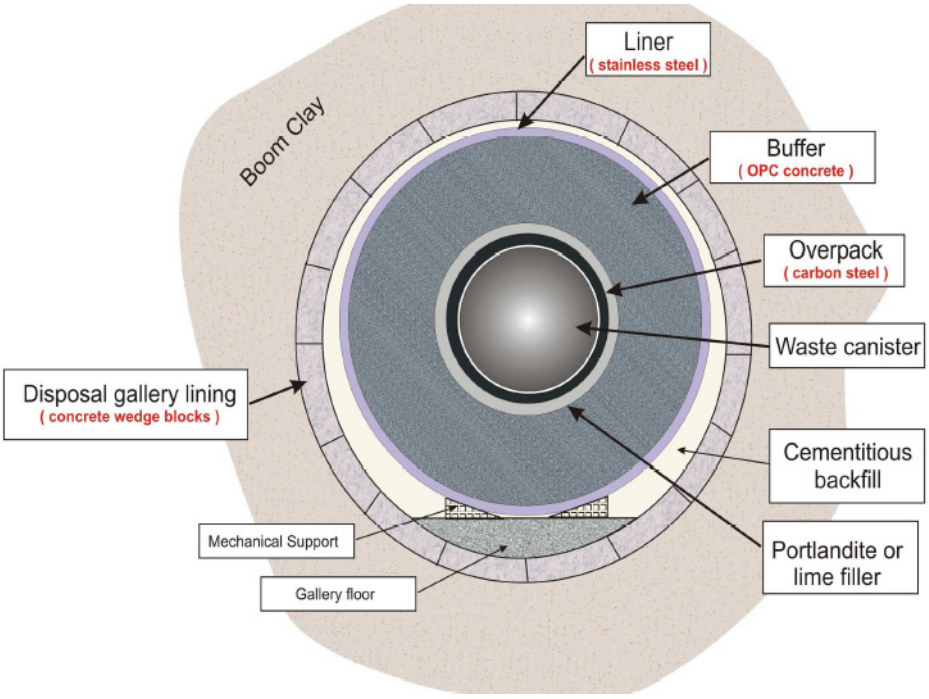


Abbildung 4: Belgisches Behälterkonzept für hochradioaktive Abfälle, Querschnitt /20/

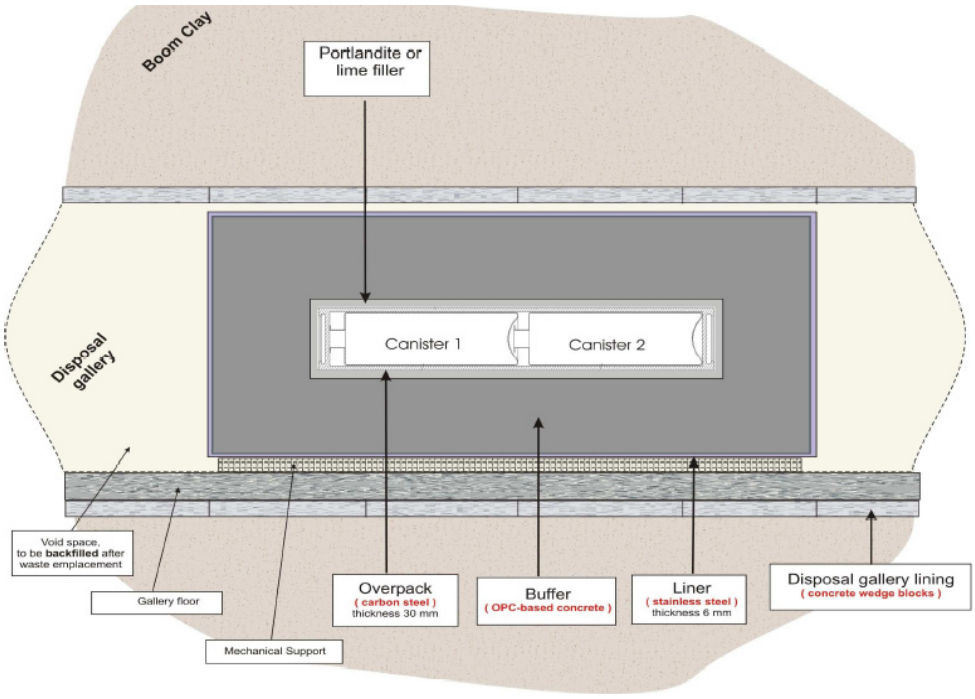


Abbildung 5: Belgisches Behälterkonzept für hochradioaktive Abfälle, Längsschnitt /20/

Der Längsschnitt zeigt, dass je zwei HAW-Kokillen in einen Supercontainer eingebaut werden, der seinerseits horizontal in einer Strecke auf Betonblöcken gelagert wird.

2.4.3.2 Behälterkonzept im französischen Endlager im Tongestein

Das französische Konzept zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in einer tiefen geologischen Tongesteinsformation sieht die Endlagerung von verglasten, hochradioaktiven Abfällen (HAW), von abgebrannten Brennelementen (SF) und langlebigen, mittelradioaktiven Abfällen (ILW) vor.

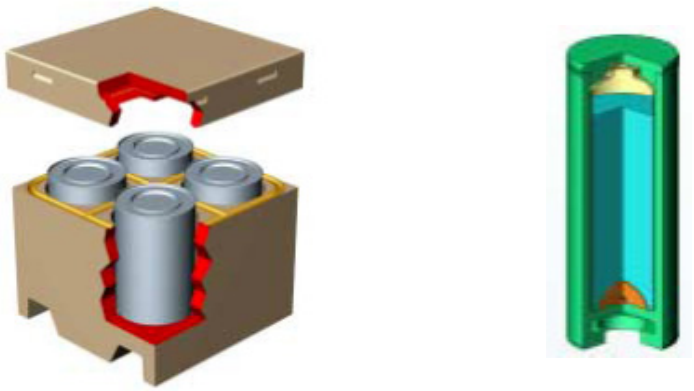


Abbildung 6: Französische ILW Behälter zusammengefasst in einem Container (links) und einheitliche HAW-Behälter (rechts) /21/

Hochradioaktive Abfälle (HAW) werden in den Wiederaufarbeitungsanlagen (WAA) verglast und in Edelstahlkokillen eingefüllt. Da die Freisetzung von Radionukliden aus der Glasmatrix von der Temperatur abhängt, müssen die hochradioaktiven Abfälle so lange wasserdicht eingeschlossen werden, bis die durch Zerfallsprozesse induzierte Temperaturerhöhung zurückgeht, um ein zu schnelles Herauslösen von Radionukliden aus dem Glas zu vermeiden. Deshalb wird bei Wasserzutritt die erforderliche Lebensdauer für die Behälter von HAW auf 1000 a festgelegt. Die Edelstahlkokillen aus der Wiederaufarbeitung werden zusätzlich in dickwandige Kohlenstoffstahlbehälter verpackt. Die Dicke der Wandungen hängt von dem Korrosionsabtrag innerhalb der ersten Phase nach der Einlagerung ab, weil die Umgebungsbedingungen im Endlager vor Wasserzutritt und Aufsättigung des Puffers und des Streckenversatzes oxidierend sind. Erst nach der Aufsättigungsphase stellt sich in den Endlagerstrecken durch die Bindung von Sauerstoff im Puffer und der beginnenden Oxidation der Behälter ein reduzierendes Milieu ein. Abbildung 6 zeigt rechts eine HAW-Kokille im Kohlenstoffstahlbehälter vorbereitet für die Endlagerung (schematische Darstellung). Für Kohlenstoffstahl als Behältermaterial sprechen folgende Vorteile /21/

- gute Verfügbarkeit,
- Robustheit,
- einfache Verarbeitungsmethoden durch erprobte Techniken,
- gute Schweißbarkeit, sehr gut bekanntes Korrosionsverhalten.

Ausgediente Brennelemente (SF) werden in dafür vorgesehene Stahlbehälter verpackt, damit die Uran-Matrix vor angreifenden Wässern geschützt ist, so lange durch hohe Temperaturen aufgrund des radioaktiven Zerfalls von einer erhöhten Löslichkeit in Wasser ausgegangen werden muss. Bei ausgedienten Brennelementen dauert die Zerfallsphase länger, weshalb auch die Wärmeproduktion länger andauert und damit die Temperatur deutlich langsamer abnimmt als bei HAW-Kokillen. Aus diesem Grund sollen die Behälter über einen Zeitraum von 10.000 a wasserdicht sein, so lange von einer höheren Löslichkeit der Abfallmatrix auszugehen ist. Zur Begrenzung der Oberflächentemperatur der befüllten Behälter darf nur eine begrenzte Anzahl von Brennelementen im Behälter vorhanden sein (z. B. vier UO_2-Brennelemente und ein MOX-Brennelement) /21/. Eine zu hohe Oberflächentemperatur kann negative Auswirkungen auf die Eigenschaften des Bentonitpuffers haben. Für die Endlagergebinde mit ausgedienten Brennelementen werden folgende Anforderungen definiert

- eine Beschränkung des Gewichts, um Transportierbarkeit und Handhabbarkeit zu gewährleisten (max. Gewicht von 100 - 110 t),
- eine maximale Oberflächentemperatur von weniger als 100 °C.
- eine geeignete mechanische Auslegung des Behälters, um in situ-Belastungen aufzunehmen.

In Frankreich, wie auch in andern Ländern, stammen die langlebigen mittelradioaktiven Abfälle (ILW) von unterschiedlichen Verursachern, z. B. aus der Forschung und Technik, der Medizin und der Energieerzeugung. Daher werden diese Abfälle aufgrund ihrer unterschiedlichen Herkunft nicht in einheitlichen Gebinden konditioniert, sondern es existiert eine Reihe von verschiedenen Behältern für diese Abfälle. Die verschiedenen Behälterformen für mittel-

radioaktive Abfälle werden in übergeordnete, aber einheitliche größere Gebinde verpackt. Dies ermöglicht ein einheitliches Transport- und Einlagerungssystem. Die Abbildung 6 (links) zeigt schematisch das Containerkonzept für mittelaktive Abfälle.

2.4.3.3 Behälterkonzept im schweizerischen Opalinuston-Projekt

In der Schweiz wird ebenfalls die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Tongesteinsformationen untersucht. Für hochradioaktive Abfallstoffe werden Behälter aus Kohlenstoffstahl favorisiert. Sie weisen eine Wanddicke von 250 mm auf. Für die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen werden Behälter mit 150 mm dicken Wänden vorgesehen. Die NAGRA geht von einer Lebensdauer von mindestens 1000 a aus, in denen die Behälter wasserdicht sein müssen. Tatsächlich wird von den Behältern aber eine Standzeit von bis zu 10.000 a erwartet, was anhand von Untersuchungen belegt werden konnte. Die Korrosion durch zulaufende Wässer ist der Hauptgrund für das Versagen der Behälterbarriere. Für die Korrosionsprozesse unter in situ-Bedingungen der Endlagerung wird von Korrosionsraten von 0,1 bis 10 µm pro Jahr ausgegangen. Die Daten basieren auf dem allgemeinen Fachwissen und wurden von einer internationalen Gruppe von Wissenschaftlern überprüft. Zusätzlich sind die hochradioaktiven, verglasten Abfälle mit einer Edelstahlverpackung aus der Wiederaufarbeitungsanlage versehen, von der aber bei der Quantifizierung der Dichtheit kein Kredit genommen wird. Ebenso wenig wird die Zirkaloy-Ummantelung der abgebrannten Brennstäbe in Ansatz gebracht.

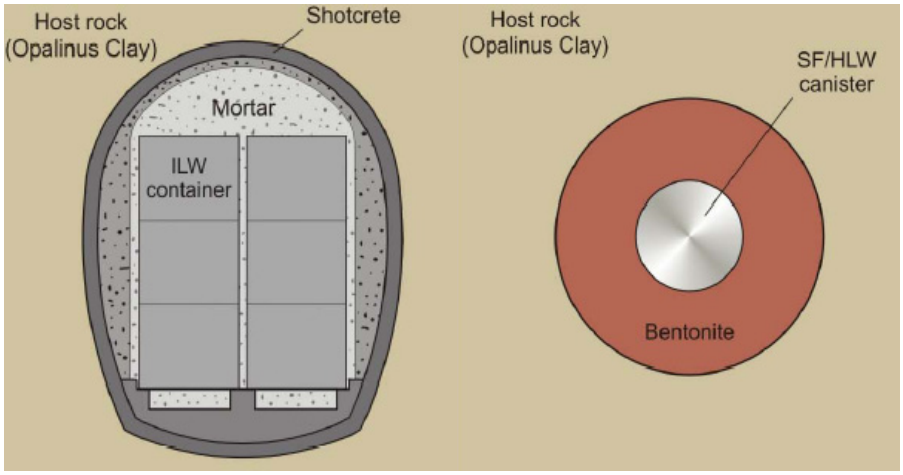


Abbildung 7: Streckenlagerung von Abfallgebinden im schweizerischen Konzept /22/

Auch in der Schweiz gibt es unterschiedliche Erzeuger mittelradioaktiver, langlebiger Abfälle, die je nach Herkunft in unterschiedlichen Behältern verpackt sind. Meist handelt es sich um Stahlfässer oder Beton-/Faserzementfässer mit unterschiedlichen Abmessungen und Gewichten. Diese Behälter werden verpackt in einheitlich große Container, für die die Transport- und Handhabungsprozesse im Endlager standardisiert sind. Diese Betoncontainer mit 20 - 25 cm dicken Wandungen werden in den Einlagerungskammern gestapelt und die verbleibenden Hohlräume mit einem Versatz auf Zementbasis verfüllt. Nicht alle Behälter der mittelaktiven Abfälle sind wasserdicht, so dass ein Austrag von Radionukliden in die Ze-

menthinterfüllung bereits etwa 100 a nach Wasserzufluss nicht ausgeschlossen werden kann. Aus diesem Grund werden die Behälter für mittelradioaktive Abfälle nicht als langzeitwirksame Barriere im Endlagerkonzept berücksichtigt /23/. Abbildung 7 zeigt die beiden Einlagerungsprinzipien für mittelaktive Abfälle (links) sowie ausgediente Brennelemente und hochradioaktive Abfälle (rechts).

Es sind zwei Einlagerungsprinzipien vorgesehen. Abbildung 7 zeigt einerseits die Verfüllung der Strecke mit Bentonit als Puffer- und Versatzmaterial bei der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen bzw. von abgebrannten Brennelementen (rechts) und andererseits die Verfüllung der Strecke bei der Einlagerung von mittelaktiven Abfällen mit zementhaltigen Baustoffen (links) /22/.

2.4.4 Gewählte Puffer/Versatzmaterialien

2.4.4.1 Puffer und Versatz im belgischen Endlager im Tongestein

Die im belgischen Endlagerkonzept vorgesehenen Supercontainer wurden in Kapitel 2.4.3.1 vorgestellt. Im Supercontainer ist der Puffer bereits integriert. Er besteht aus mit Portlandzement hergestelltem Beton. Die Zwischenräume vor und hinter den Containern sowie die seitlichen Räume zur Einlagerungsstrecke werden ebenfalls mit Beton verfüllt /20/. Bentonit und getrockneter, kompaktierter Boom Clay aus der Auffahrung des Endlagerbergwerkes selbst kommen als Versatzbaustoff für die Zugangsstrecken zum Einsatz /24/.

2.4.4.2 Puffer und Versatz im französischen Endlager im Tongestein

Im französischen Endlagerkonzept im Tongestein kommen gemäß internationalem Kenntnisstand ebenfalls

- Bentonit für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente,
- Beton für mittelaktive Abfälle

als Puffer- und Versatzmaterialien zum Einsatz.

Die Hauptaufgaben des Puffers/Versatzes lassen sich wie folgt zusammenfassen /1/

- Schaffung günstiger thermisch-hydraulischer Umgebungsbedingungen,
- Verzögerung der Freisetzung von Radionukliden.

Daraus lassen sich generelle Anforderungen an die Eigenschaften des Puffermaterials bzw. Versatzes formulieren:

- mechanische und geochemische Stabilität,
- geochemisches Rückhaltevermögen, Sorptionsvermögen.

2.4.4.3 Puffer und Versatz im schweizerischen Opalinuston-Projekt

Im schweizerischen Endlagerkonzept der NAGRA ist gemäß dem internationalen Kenntnisstand ebenfalls Bentonit als Puffer- bzw. Versatzmaterial bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bzw. abgebrannter Kernbrennstäbe vorgesehen. Die Einlagerungsstrecken für schwach- bzw. mittelradioaktive Abfälle werden mit zementhaltigen Verfüllstoffen versetzt. Generell stellt der Versatz eine Barriere dar, die folgende Aufgaben zu übernehmen hat:

- Umschließen der Abfallbehälter und Abschließen des Einlagerungsbereiches um den Behälter,
- Schutz der geologischen Barriere vor übermäßigem, punktuellem Wärmeeintrag,
- Verschluss der Einlagerungsstrecken und stützende Wirkung auf das Gebirge, d. h. Verringerung der Gebirgskonvergenz,
- Verminderung des Radionuklidtransports durch Sorption und Verlangsamung.

Aufgrund seiner enthaltenen Tonminerale ist Bentonit geochemisch kompatibel mit dem Tongestein der geologischen Barriere und daher grundsätzlich ein geeignetes Material für die Herstellung geotechnischer Barrieren. Zum Versatz der Einlagerungshohlräume und Strecken werden im schweizerischen Konzept Pellets bevorzugt, da die Hohlräume sich so besser verfüllen lassen und somit weniger Zwickelräume verbleiben. Bentonite sind temperaturempfindlich und sie können ihre positiven Quelleigenschaften verlieren, weshalb sie nur lokal begrenzt Temperaturen bis 125 °C ausgesetzt werden dürfen /23/.

2.5 Entwicklung von Szenarien und Szenarienanalysen

Für die Ableitung der Szenarien werden unabhängig von der Wirtsgesteinsformation sogenannte FEP (Features, Events and Processes) zu Grunde gelegt. Diese „Zustände (Eigenschaften/Besonderheiten), Ereignisse und Prozesse“ stellen die Grundlage zur Entwicklung von Szenarien für die Auslegung und die Sicherheitsanalyse eines Endlagers dar.

In dem jeweiligen Basisszenario wird eine Entwicklung des Endlagers beschrieben, wobei es sich meistens um die wahrscheinliche und ungestörte Entwicklung handelt. Unter Einbeziehung der Barrieren wird das Verhalten des Endlagersystems nach Verschluss für das Basisszenario im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse analysiert. So wird berechnet, wie die Radiotoxizität mit dem fortschreitenden radioaktiven Zerfall abnimmt, wie sich die Temperatur des Endlagers mit der Zeit entwickelt, wie sich mit dem Temperaturanstieg die hydraulischen Eigenschaften des Puffermaterials bzw. des Versatzes ändern und ebenso, wie sich der Grundwasserfluss als Verbindung in die Geosphäre entwickelt. Bezüglich der Entwicklung eines Endlagers können keine – auch nicht für Konzepte in gleichen Wirtsgesteinsformationen - für alle Endlagerkonzepte einheitlichen Szenarien abgeleitet werden, weil sich die in-situ Bedingungen der jeweiligen Endlagerstandorte unterscheiden (wie z. B. Zusammensetzung zufließender primärer Wässer, geochemisches Milieu, Gebirgsdruck, etc.), die eine große Rolle für die Prognose der Langzeitsicherheit im jeweils favorisierten Konzept spielen.

Sieht man vom schweizerischen Sicherheitskonzept /5/ ab, wurde eine systematische und geschlossene Vorgehensweise bei der Szenarienanalyse für die verschiedenen Endlagerkonzepte im Granit und im Tongestein – historisch bedingt – anfangs nur ansatzweise durchgeführt und nachträglich ergänzt. Deshalb gilt das Vorgehen bei der Szenarienanalyse entsprechend dem schweizerischen Sicherheitskonzept derzeit als Vorbild und wird international favorisiert. Die Vorgehensweise bei der Szenarienanalyse gemäß schweizerischem Sicherheitskonzept zeigt Abbildung 8.

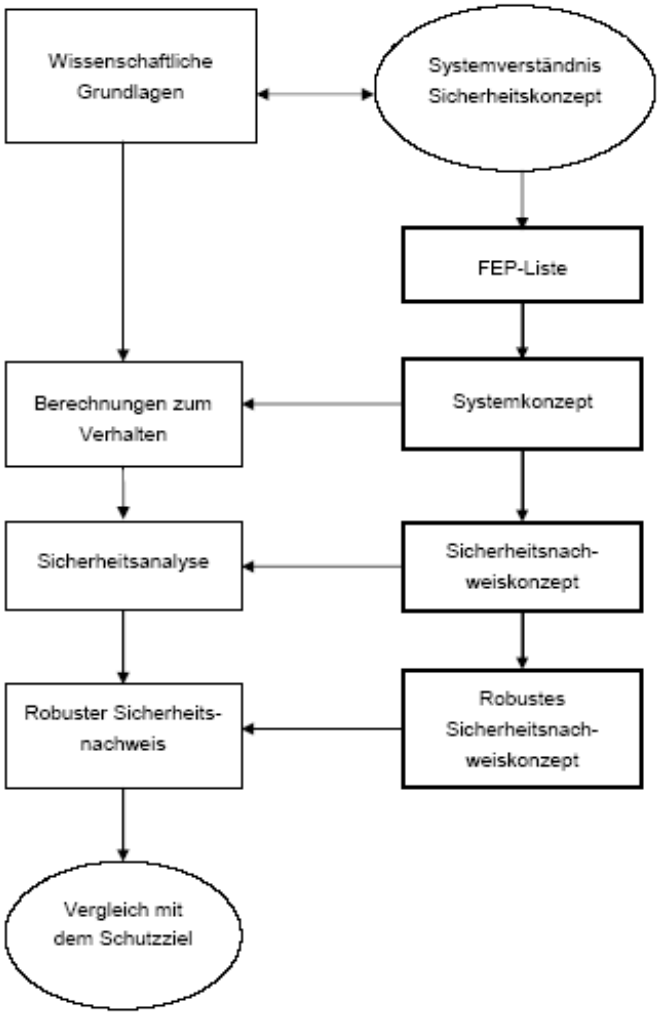


Abbildung 8: Schritte der Szenarienanalyse (rechts) und Bewertung durch die Konsequenzenanalyse (links) im schweizerischen Nachweiskonzept /5/

Im schweizerischen Endlagerkonzept wird davon ausgegangen, dass auf Basis vorhandener wissenschaftlicher Grundlagen ein ausreichend tiefgehendes Systemverständnis entwickelt wurde, so dass begleitend zum technischen Endlagerkonzept ein Sicherheitskonzept, an anderer Stelle auch als Sicherheitsstrategie bezeichnet, entwickelt werden kann. Im schweizerischen Sicherheitskonzept wird anschließend anhand der Liste der identifizierten FEP zuerst ein Systemkonzept entwickelt. In diesem Systemkonzept werden die Einflüsse und Kombinationen der einzelnen FEP zusammengefasst und dargestellt. Für dieses Systemkonzept werden orientierende Berechnungen zum Verhalten durchgeführt, auf deren

Grundlage entschieden werden kann, welche FEP bzw. FEP-Kombinationen für das Systemkonzept auslegungsrelevant bzw. notwendigerweise zu betrachten sind. Auf Grundlage des Systemkonzeptes in Verbindung mit den auslegungsrelevanten FEP-Kombinationen wird ein Sicherheitsnachweiskonzept entwickelt, in dem Szenarien formuliert werden, die die Sicherheit eines Endlagers belegen (sollen) und mit denen die Sicherheitsanalyse durchgeführt wird. Das Systemkonzept und sein Sicherheitsnachweiskonzept sowie die dazugehörige Bewertung durch die Sicherheitsanalyse entsprechen dem Basisszenario (Referenzfall). Im robusten Sicherheitsnachweiskonzept werden diejenigen FEP mit günstigen Datengrundlagen berücksichtigt, die auch sicher nachgewiesen sind /5/, und alle notwendigen FEP zur Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers zusätzlich aufgenommen, die sich ungünstig auswirken. Hier kommen Parametervariationen und pessimistisch ermittelte Datengrundlagen zum Einsatz, mit denen die Robustheit des Gesamtsystems geprüft und in einem weiteren Schritt durch die Bewertung der Ergebnisse belegt werden soll. Dieses robuste Sicherheitsnachweiskonzept ist nicht mit einer gestörten Endlagerentwicklung gleichzusetzen, da neben Fällen, die mit geringer Wahrscheinlichkeit auftreten, auch Berechnungsfälle und Ereignisse in das Konzept aufgenommen werden, die wahrscheinlich eintreten können und berücksichtigt werden müssen. Jedoch werden für diese sehr pessimistisch ermittelte Datensätze zugrunde gelegt. Zusätzlich werden auch Szenarien betrachtet, die nicht der erwarteten Entwicklung eines Endlagers zugerechnet werden. Es handelt sich z. B. um Szenarien, die zusätzlich betrachtet werden, da sie innerhalb des Basisszenarios und seinen Parametervariationen nicht physikalisch kompatibel abgebildet werden können. Diese Szenarien entsprechen dann einer alternativen Entwicklung des Endlagers, wobei es sich um eine ungestörte oder gestörte Entwicklung handeln kann. Aufgrund der Variation der Datengrundlage und der Berücksichtigung zusätzlicher Alternativszenarien geht das robuste Sicherheitsnachweiskonzept über die Betrachtung einer gestörten Endlagerentwicklung hinaus. Zum schweizerischen Sicherheitsnachweiskonzept ist festzuhalten, dass bei der angewendeten Vorgehensweise eine eindeutige Zuordnung der Szenarien zur ungestörten oder gestörten Endlagerentwicklung nicht möglich ist.

An dieser Stelle ist im Ergebnis der Literaturrecherche in Bezug auf die Szenarienanalyse festzustellen, dass international kein einheitliches Vorgehen bei der Zuordnung des Basisszenarios zur ungestörten oder gestörten Endlagerentwicklung erfolgt. So wird in den meisten Ländern eine wahrscheinliche, ungestörte Entwicklung als Basisszenario gewählt, in einzelnen Ländern aber auch abdeckend eine gestörte Entwicklung des Endlagersystems. Im beschriebenen schweizerischen Fall erfolgt als weitere Variante der kontinuierliche Übergang von ungestörter zu gestörter Entwicklung durch zunehmend pessimistischere Annahmen.

2.5.1 Endlagerentwicklungen im Granit

In den folgenden Kapiteln wird eine Zuordnung von Szenarien für Endlager im Granit zur gestörten bzw. ungestörten Entwicklung vorgenommen, obwohl einschränkend anzumerken ist, dass die Zuordnung – wie bereits unter Abschnitt 2.5 ausgeführt - nicht immer eindeutig möglich ist.

2.5.1.1 Ungestörte Entwicklung (Basisszenario) für das KBS-3-Konzept im Granit

Das schwedische und das finnische Endlagerkonzept bauen beide auf dem KBS-3-Behälterkonzept auf, so dass für die Standorte in beiden Ländern im Grundsatz die gleichen Überlegungen gelten.

Die gekoppelten Prozesse, die in einem Endlager im Granit während der als wahrscheinlich angesehenen Entwicklung ablaufen, werden durch die folgende Abbildung 9 am Beispiel des schwedischen Endlagerkonzeptes veranschaulicht /25/.

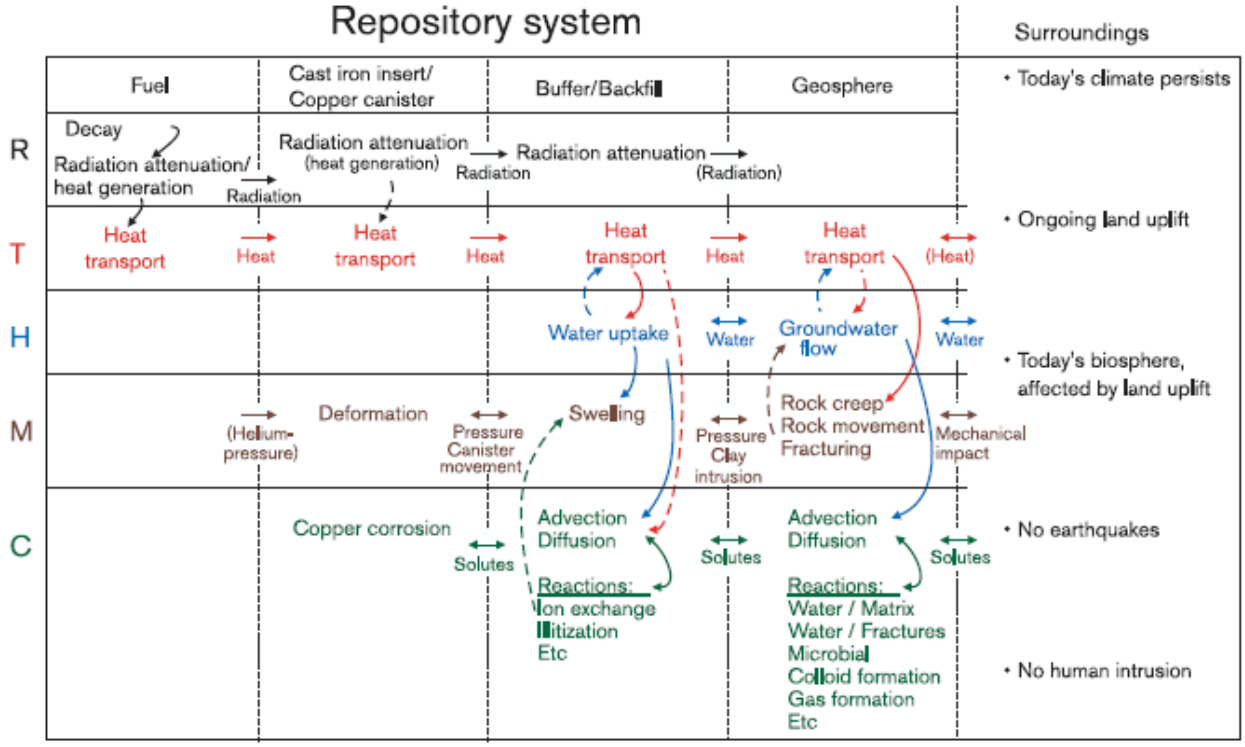


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Basisszenarien für die ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Granit (Schweden) /25/

Es werden fünf Ebenen charakterisiert und miteinander gekoppelt:

1. Durch den radioaktiven Zerfall auf der ***radiologischen Ebene (R)*** wird Strahlung abgegeben sowie Wärme freigesetzt.
2. Die freigesetzte Wärme induziert ***thermische Prozesse (T)***, die die Umgebungsbedingungen rund um die Behälter nachhaltig verändern. Durch Gasbildung wird im Behälter eine zusätzliche
3. ***mechanische Belastung (M)*** induziert. Weitere mechanische Belastungen auf den Behälter resultieren aus Deformationen des umliegenden Gebirges und dem Quelldruck des sich aufsättigenden und quellenden Versatzbaustoffs Bentonit.
4. Durch die thermischen Einflüsse, die mechanische und radiologische Belastung werden die ***hydraulischen Eigenschaften (H)*** verändert. Es kommt zu einer Wasseraufnahme, die das

5. ***geochemische Milieu (C)*** beeinflusst, was z. B. zu verändertem Korrosionsverhalten der Behälter führen kann.

Diese grafisch veranschaulichten Prozesse finden in der ungestörten Entwicklung des Endlagers unter der Annahme heutiger klimatischer Verhältnisse statt, mit einer Landhebung entsprechend den gegenwärtigen Hebungsraten und den damit verbundenen Einflüssen auf die Biosphäre. Es treten keine Erdbeben sowie kein menschlicher Eingriff in das verschlossene Endlager auf.

Im Fall der ungestörten Entwicklung bindet die vorhandene Abfallmatrix Radionuklide prinzipiell über einen langen Zeitraum von mindestens 10.000 a /10/. Diese Werte wurden aufgrund von gemessenen Lösungsraten prognostiziert. Bei intaktem Behälter sind die Lösungsraten der Abfallmatrix jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Die als Hauptbarriere dienenden Behälter sollen über 100.000 a dicht sein, was aus Korrosionsberechnungen unter der Annahme gleichbleibender geochemischer Umgebungsbedingungen abgeleitet werden konnte. In frühren Planungen wurden keine Behälterausfallraten im Basisszenario berücksichtigt /26/, d. h. es wurde davon ausgegangen, dass die etwa 4.500 einzulagernden Behälter ohne Defekte aus der Fabrikation ins Endlager gebracht werden können. Erst in späteren Planungen /27/ wurde die Wahrscheinlichkeit analysiert, mit der ein Fehler in der Schweißnaht eines Deckels nicht erkannt werden könnte. Geplant ist es, die Deckel mit einer 50 mm dicken Schweißnaht auf die Behältermantelfläche aufzuschweißen. Nach Untersuchungen reicht eine 15 mm dicke Schweißnaht am Deckel aus, um einen Korrosionswiderstand von 100.000 a zu gewährleisten. Das heißt, es darf bei der Herstellung der Schweißnähte ein Fehler von 35 mm bezogen auf die Dicke der Schweißnaht von 50 mm gemacht werden. Eine Abweichung von 35 mm bezogen auf die planmäßige Schweißnahtdicke wird aber mit Hilfe der zerstörungsfreien Prüfmethoden der Qualitätssicherung mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % erkannt. Gleichzeitig ist die Wahrscheinlichkeit einer derart ungenauen Schweißnaht aber nur auf 0,4 % beziffert worden, so dass mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 10^{-04} unter den hergestellten Behältern einer defekt ist /27/. Diese Rate unentdeckt defekter Behälter soll deshalb ergänzend in die Analysen aufgenommen werden. Da diese Erkenntnis im Vergleich zu den bereits durchgeführten und veröffentlichten Berechnungen neu ist, werden im Folgenden in diesem Bericht die Ergebnisse der alten Analysen verwendet und Ergebnisse von Analysen mit einer Anzahl von anfangs defekten Behältern nebeneinandergestellt. Obwohl sie im Rahmen der gestörten Endlagerentwicklung behandelt werden, ist die Zuordnung zur ungestörten oder gestörten Endlagerentwicklung nicht endgültig.

Für die Behälter wurde ein allseitiger Druck von p=13 MPa ermittelt, der sich aus dem Wasserdruck der Wassersäule des vollgelaufenen Endlagers und dem Quelldruck des sich bei der Aufsättigung aufquellenden Bentonits ergibt. Um Verdampfen von Wasser und damit die Bildung von Salzen an der Oberfläche der Behälter zu verhindern, sollte die Oberflächentemperatur auf weniger als 100 °C begrenzt werden. Außerdem können sich die positiven Quell- und Sorptionseigenschaften des Bentonitpuffers bei Temperaturen >100 °C negativ verändern. Eine obere Behältertemperatur wurde vor dem Hintergrund von Unwägbarkeiten in der Zusammensetzung und damit in der Wärmeentwicklung des abgebrannten Kern-

brennstoffs auf 90 °C begrenzt /9/, /12/, /18/. Für die Behälter wurde - wie bereits erwähnt - im Szenario der ungestörten Entwicklung angenommen, dass kein Behälter im Endlager defekt ist /26/.

Die Bentonitringe als Puffer in den Einlagerungsbohrlöchern sollen ungleichförmige Belastungen des Behälters durch Primärspannungsanisotropien im Gebirge ausgleichen und das Bohrloch stabilisieren, wie auch das Versatzmaterial in den Strecken die Einlagerungsstrecken stabilisieren soll. Die mechanische Stabilisierung durch den Versatz bewirkt in Folge seines Quellens einen Stützdruck im ausbruchsnahen Gebirgsbereich, der Risse und kleinere Klüfte verschließt. Daher wird nach Aufsättigung des Puffers bzw. Versatzes die Diffusion als der einzige Transportmechanismus für freigesetzte Radionuklide angesehen /10/.

In der ungestörten Entwicklung des Endlagers wird davon ausgegangen, dass sich die Eigenschaften des Wirtsgesteins nicht maßgeblich ändern. Dies bedeutet einerseits, dass die günstigen, reduzierenden Bedingungen sich nach der Einlagerung wieder einstellen und ein geochemisch stabiles Milieu erreicht wird, und andererseits, dass das Gebirge mechanisch standfest ist und sich mit bekannten bergbaulichen Methoden langfristig standsichere Einlagerungs- und Grubenräume bauen lassen. Prognostiziert werden je nach Auffahrungsmethoden Auflockerungszonen zwischen 3 cm (Tunnelbohrmaschine) und 30 cm in der Firste und an den Stößen bzw. 80 cm in der Sohle beim Sprengen /9/.

Positive Eigenschaften des Wirtsgesteins sind das Rückhaltevermögen (Sorption) von Radionukliden durch Kluftminerale und die Verdünnungseffekte durch stationären Grundwasserfluss (Advektion) in den Klüften /10/.

Für die ungestörte Endlagerentwicklung wird zusammenfassend angenommen:

- Es sind keine Ausfallraten der Behälter vor Ende der planmäßigen Standzeit zu erwarten. Für den Behälter wird für die Auslegung angenommen, dass eine isotrope Belastung von 15 MPa auf ihn einwirkt.
- Unter den vorherrschenden geochemischen Umgebungsbedingungen im Endlager tritt praktisch keine Korrosion am Kupfermantel des Gebindes auf, weil keine Stoffe vorkommen, die Kupfer korrodieren können /26/. Beim prognostizierten Betriebsablauf des Endlagers sind die Tiefenwässer im Endlager nahezu sauerstofffrei und die Konzentration von Sulfiden ist gering. Diese geochemisch stabilen Verhältnisse werden auch für die zukünftige, ungestörte Entwicklung des Endlagers erwartet und als Prognosegrundlage für den Zeitraum mehrerer zehntausend Jahre angesetzt, selbst dann, wenn durch die fortschreitende Landhebung auch mit einer Veränderung des hydraulischen Gradienten zu rechnen ist. In einer darauf folgenden Phase nach mehreren 10.000 bis 100.000 Jahren ist durch mögliche Eiszeiten und Klimaänderungen mit einer Veränderung der hydrochemischen Verhältnisse zu rechnen /28/, wobei davon ausgegangen wird, dass sich der Sauerstoffgehalt der Grubenwässer trotz sauerstoffreicher glazialer Schmelzwässer nicht ändert, da der Sauerstoff bereits beim Durchlaufen der Schmelzwässer in den Gesteinsschichten der Geosphäre durch Reaktionen mit den dort anstehenden Mineralen aufgebraucht wird /26/.

- Aufgrund der Annahme stabiler geochemischer Verhältnisse nach der kurzen Betriebsphase bis hin zu einem Prognosezeitraum von mehreren zehntausend Jahren wird eine außerordentlich geringe Kupferkorrosion erwartet. Als natürliches Analogon wird die finnische Kupferlagerstätte von Hyrkklölä zitiert. Der durch den Einlagerungsbetrieb eingebrachte Sauerstoff wird nach etwa 100 a aufgebraucht sein und die geochemischen Rahmenbedingungen im Endlager unter Tage entsprechen weitgehend wieder dem Unverritzten.
- Der Puffer und der Versatz übernehmen ihre Aufgaben wie in der Planung vorgesehen. Sie schützen den Behälter vor ungleichförmigen Belastungen und stützen das Gebirge, sorgen für stabile geochemische Verhältnisse und dienen als Sorptionsbarriere für eine Rückhaltung von Radionukliden, wenn die vorgesehene Behälterstandzeit von 100.000 a erreicht bzw. überschritten wurde und es zu einer Freisetzung von Radionukliden kommen kann. Gleichzeitig verhindern der geringpermeable Versatz und der Puffer aus Bentonit, dass die Einlagerungsräume potenzielle Fließwege für Tiefenwässer werden. Im skandinavischen Raum ist mit salinaren Tiefenwässern zu rechnen, deswegen werden die Bentonitgehalte des Versatzes so eingestellt, dass das erforderliche Quell- und damit Abdichtungsverhalten an den Firsten der versetzten Strecken gewährleistet wird.

2.5.1.2 Gestörte Entwicklung des Endlagers im KBS-3-Konzept

Der Behälter mit seiner ca. 50 mm dicken Kupferwandung und dem Gusseiseneinsatz, der die Brennelemente aufnimmt, stellt im KBS-3-Behälterkonzept die Hauptbarriere dar. Für die Korrosionsprognosen der Kupferbehälter selbst werden für die allgemeine Entwicklung des Endlagers Variationen des pH-Wertes der Wässer und Änderungen der Sulfidkonzentration angenommen /29/. Diese Änderungen sowie eine erhöhte Sauerstoffkonzentration der Wässer können prinzipiell bei Kupfer und bei Stahl eine erhöhte Korrosionsrate hervorrufen. Die detaillierte Betrachtung und Beurteilung der Korrosionsprozesse bei verschiedenen Szenarien stellt die zentrale Bedeutung des Behälters als Barriere in den Vordergrund. Neben der Korrosion ist die mechanische Beanspruchung des Behälters zu bewerten. Bezogen auf den Behälter sind auch gekoppelte Effekte durch mangelhaft eingesetzte Bentonitelemente von Bedeutung. So entsteht eine ungleichförmige Beanspruchung aus dem Quellen, des Weiteren kann es dazu kommen, dass der Puffer nicht mehr für ein geochemisch stabiles Milieu sorgen kann oder dass neue Transportwege für herausgelöste Radionuklide geschaffen werden /9/.

Da der Behälter die Hauptbarriere darstellt, werden für die gestörte Endlagerentwicklung Szenarien, die möglicherweise Einfluss auf den Einlagerungsbehälter haben, in den Vordergrund gestellt und durch Szenarienanalysen bewertet. Folgende Szenarien werden für die gestörte Endlagerentwicklung analysiert:

- Klimaszenario mit der Berücksichtigung von Eiszeiten: Durch Abschmelzen der Eisschichten nach Eiszeiten ist mit einem sauerstoffreichen Schmelzwasserangebot zu rechnen, welches bis in die Tiefe des Endlagers eindringen könnte und somit nachhaltig die geochemischen Umgebungsbedingungen verändern könnte, so dass das Korrosionsverhalten des Behälters negativ beeinflusst werden könnte. Das Wirtsgestein und der Bentonitpuffer in den Zugangsstrecken (Fernfeld) können jedoch ausreichende Mengen Sauerstoff aufnehmen bzw. die Mineralien des Deckgebirges können mit dem Sauerstoff reagieren, so dass davon auszugehen ist, dass das Grundwasser auch unter eiszeitlichem Schmelzwasser praktisch sauerstofffrei bleibt /9/. Der Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers wird sich somit auch nach eiszeitlicher Überprägung in weiten Bereichen des Endlagers nicht ändern, wodurch ein ausreichender Korrosionswiderstand der Behälter gegen das angreifende Wasser gewährleistet ist /26/. Nur an wenigen Stellen mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit und hohem hydraulischen Gradienten könnte sauerstoffreiches Schmelzwasser das Endlager erreichen. Dieser Einfluss ist aber nur auf kleine Bereiche des Endlagers begrenzt und auch nur zeitlich beschränkt. Durch den Bentonitpuffer im Nahfeld der Behälter können ebenfalls große Mengen Sauerstoff aufgenommen werden, so dass kein Sauerstoff mit dem Kupferbehälter in Berührung kommt.
  Durch Veränderungen der Fließwege und der Mineralisation der Wässer kann sich der Salzgehalt des Tiefenwassers verändern und somit Einfluss auf das Quellpotential des Bentonits im Versatz und im Puffer haben. Trotz dieser Auswirkungen wird davon ausgegangen, dass die Integrität der Barrieren - Puffer und Behälter - nicht in Frage gestellt wird. Klimaveränderungen können aber zusätzlich zu den geochemischen Veränderungen auch direkte Auswirkungen auf die Behälterintegrität durch mechanisch induzierte Zusatzbeanspruchungen haben. Bei einer eiszeitlichen Überprägung des Endlagerareals wird eine erhöhte mechanische Belastung auf die Behälter einwirken, sie wird mit bis zu 40 MPa isotroper Druck angegeben. Die ertragbare Belastung der Behälter liegt bei 80 - 110 MPa, so dass die Behälterintegrität gegeben ist.
- Erdbebenszenario: Im Erdbebenszenario werden die Auswirkungen von Erdbeben auf die Integrität der Endlagerbehälter untersucht. Der schwedische Granit ist seismisch nur gering aktiv, wobei nur am Rande des Granitschildes Erdbeben mit einer Stärke von max. 4,0 auf der Richterskala auftraten. Durch Simulationsberechnungen wurde festgestellt, dass Gesteinsbewegungen mit einem Versatz von mehr als 0,1 m durch ein Einlagerungsbohrloch ein Gebinde beschädigen könnten. Computergestützte Analysen wurden unter Zugrundelegung der Kluftnetzwerke an den jeweiligen möglichen Standortlokationen durchgeführt und ausgewertet. Für die untersuchten Lokationen wurde berechnet, dass im Betrachtungszeitraum kein Erdbeben auftritt, durch das ein Behälter beschädigt werden kann. Insgesamt wurden nur wenige Einzelbeben identifiziert, bei denen eine Beschädigung eines Behälters potenziell möglich wäre. Kumulative Effekte werden als vernachlässigbar eingestuft, so dass insgesamt die Betrachtung von Erdbeben in der langzeitigen Prognose für das Endlager keinen maßgeblichen Einfluss hat /26/.

- Menschliches Eindringen in das geschlossene Endlager: Aufgrund des Informationsverlustes von Daten, die das Endlager betreffen, ist ein Anbohren bzw. Aufwältigen des Endlagers nicht völlig auszuschließen. Aus diesem Grunde wurden Untersuchungen angestellt, die das Risiko eines Bohrtrupps beschreiben, der 300 a nach der Einlagerung das Endlager anbohrt. Die Wahrscheinlichkeit ein Gebinde zu durchbohren wird mit 10^{-07} geschätzt, die freigesetzte Dosis, der der Bohrtrupp ausgesetzt wäre, liegt aber in der Größenordnung der Hintergrundstrahlung. Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit ein Gebinde zu treffen, ist das Gesamtrisiko gering. Um ein Risiko von $1 \cdot 10^{-06}$ zu erreichen, muss ein Gebinde im Endlager direkt angebohrt werden. Beispielhaft wird angegeben, dass dabei von 25.000 Bohrungen ausgegangen werden muss, die 500 m tief heruntergebracht werden müssen. Wird nach dem Anbohren des Endlagers die offene Bohrung zurückgelassen und siedelt sich eine Familie auf dem Gelände an, die sich aus den Produkten der Region ernährt, ist die Familie dennoch keinem Risiko durch die freigesetzte radioaktive Belastung zu erkranken ausgesetzt, welches über dem akzeptierten Risiko von 10^{-06} /a liegt /26/.
- Canister defect scenario: Die Auswirkungen auf die Radionuklidfreisetzung durch eine Anzahl defekter Behälter wird im „canister defect scenario“ analysiert. In der Diskussion ist noch die Anzahl der als defekt anzusetzenden Behälter, die befüllt als Abfallgebinde möglicherweise endgelagert werden können. Zurzeit werden Herstellungsverfahren und Prüfmethoden der Schweißnähte optimiert, so dass noch nicht genau gesagt werden kann, wie viele Behälter potenziell defekt endgelagert werden können, da sie unbemerkt defekt ins Endlager gelangen. Eine vorläufige Zahl ist ein Behälter auf 4000 - 5000 (etwa ein endgelagerter Behälter bezogen auf die Gesamtanzahl endzulagernder Behälter) und eine pessimistische Schätzung geht von einem auf 1000 Behälter aus (etwa 0,1 % defekte Behälter) /26/. Bei einem defekten Behälter kann Wasser durch ein kleines Loch in das Behälterinnere eindringen und den Gusseiseneinsatz korrodieren. Durch das Loch (in der Größenordnung von etwa 1 mm²) kann Wasser in das Abfallgebinde einströmen, so lange der Druck des Grundwassers höher ist als der Gasdruck im Behälter. Durch das Angebot an Wasser korrodiert der Gusseiseneinsatz, so dass Gas im Inneren des Behälters gebildet wird. Für die Korrosionsvorgänge am Gusseiseneinsatz werden Korrosionsraten von 0,1 µm/a angesetzt /26/. Nach etwa 11.000 a stehen der Gasinnendruck und der Grundwasserdruck im Gleichgewicht, so dass der Wasserzufluss ins Gebindeinnere stoppt. Nach etwa 18.000 a ist eine etwa 5 cm im Durchmesser messende Korrosionsstelle am Gebinde vorhanden, an der die Korrosionsprozesse voranschreiten. Beim Fortschreiten dieser Korrosionsprozesse zwischen Kupfermantel und Gusseiseneinsatz wird mit einem Versagen des Kupfermantels nach 200.000 a gerechnet. Durch die sich vergrößernde Korrosionsstelle erhöht sich auch der Wassertransport in das Gebinde, wodurch die gesamte Oberfläche des Gusseiseneinsatzes zu korrodieren beginnt. Die damit verbundene Gasbildung erhöht den Innendruck im Behälter. Durch die Korrosionsprodukte entsteht eine Volumenzunahme, die zu einem weiteren Druckaufbau führt. Nach etwa 400.000 a kann sich der Deckel ablösen. Die Korrosion schreitet voran, so dass der gesamte Gusseiseneinsatz korrodiert wird. Nach etwa 700.000 a ist alles Gusseisen durch Korrosionsprozesse umgewandelt, so dass der Gasdruck im Inneren des Behälters abnimmt und kein Gas mehr in den Puffer freigesetzt wird. Trotz fortschreitender Korrosionsprozesse und bedingter Radionuklidfreisetzung in den Puffer stellt ein solches Abfallgebinde immer noch eine Barriere dar /26/. In diesem Zusammenhang ist auch der Gusseiseinein-

satz für die ausgedienten Brennelemente in den Kupferbehältern erwähnenswert. Im „canister defect scenario“ wird davon ausgegangen, dass durch den großen Massenanteil des Gusseisens ein dauerhaft reduzierendes Milieu vorherrscht und das sich durch die fortschreitende Korrosion bildende Wasserstoffgas einer erhöhten Auflösung der Urandioxidmatrix entgegenwirkt /29/. Es wird eine Auflösungsrate von 10^{-08} /a (vgl. dazu Kapitel 2.3.1: $4 \cdot 10^{-07}$/a) in Radionuklidtransportmodellierungen angenommen. Ein generelles Problem in diesem Zusammenhang stellt die gute Löslichkeit von Cäsium, Jod, Chlor, Nickel und Strontium dar, für diese Elemente wird bei der gestörten Entwicklung des Endlagers die gleiche Transportrate angenommen, mit der sie aus dem abgebrannten Brennstoff freigesetzt werden. Die Möglichkeit einer schnellen Freisetzung dieser in der Uranmatrix nicht fest gebundenen Elemente kann bei vorzeitigem Behälterversagen nicht ausgeschlossen werden /10/.

Unabhängig vom gestörten Szenario sind noch folgende Fragestellungen zu beantworten, die z. T. vorstehend bereits angedeutet worden sind:

- Mangelhafter Einbau der Bentonitpufferelemente: Die damit verbundenen Auswirkungen auf die Rückhalteeigenschaften und auf das geochemische Milieu im Nahfeld des Behälters sind zu quantifizieren /12/. Es wird davon ausgegangen, dass sich Defekte bei der Herstellung der kompaktierten Pufferelemente und nach dem Einbau im Endlager aufspüren lassen, weshalb defekte Pufferelemente nicht in einem Szenario behandelt werden sollten. Es besteht jedoch die Möglichkeit, in späteren Planungen diese im Basisszenario zu berücksichtigen /26/.
- Veränderung der Bentoniteigenschaften: Mögliche Veränderungen z. B. in Folge Temperaturerhöhung durch die eingelagerten Abfälle oder Gefrieren des Bentonits bei Eiszeiten, wenn die durch den radioaktiven Zerfall erhöhten Temperaturen schon abgeklungen sind, sind ggf. zu beschreiben und bzgl. ihrer Auswirkungen zu bewerten /12/.

Derzeit werden auch Analysen vorgenommen, die das Wirtsgestein und die Verschlüsse betreffen. Hervorzuheben ist die Wirkung salinarer Wässer auf die Quelleigenschaften des Bentonits. Als Versatz und Verfüllmaterial werden vorzugsweise durch Auffahrung gewonnenes Gestein aus dem Endlagerbergwerk und Bentonit in definiertem Mischungsverhältnis eingesetzt, um die erforderlichen Quelldrücke zu erreichen. Durch die mineralogische Zusammensetzung des Wirtsgesteins werden die Eigenschaften und das Quellvermögen des Bentonits ggf. verändert, z. B. kann es durch die Anwesenheit von Kalium zur Illitisierung durch Umwandlung von Tonmineralen im Bentonit kommen /30/.

Das finnische Endlagerkonzept weist durch das ebenfalls verwendete KBS-3-Behälterkonzept große Übereinstimmung mit dem schwedischen Endlagerkonzept auf. Dennoch sind aufgrund lokaler Besonderheiten in manchen Punkten Unterschiede zum schwedischen Endlagerkonzept vorhanden. Weiterhin werden auch andere, im Vergleich mit dem schwedischen Ansatz konservativere Szenarien betrachtet.

So werden für den Behälter drei „canister defect“ -Szenarien berücksichtigt:

1. vom Anfang der Einlagerung an ein kleines Loch mit der Größe von A = 5 mm²,
2. vom Anfang der Einlagerung an ein Loch der Größe von A = 1 cm²,
3. vollständiges Behälterversagen nach 10.000 a.

Bei einem defekten Behälter wird das hydromechanische Verhalten durch den Wasser- und Gastransport sowie durch die Korrosion des Eisens einerseits beeinflusst und andererseits durch die Permeabilität des Puffers, die Korrosionsrate, den Frac-Druck für Gas durch den Puffer und den Ort sowie die Größe der Korrosionsstelle. In der Sicherheitsanalyse wird dies berücksichtigt, indem eine Gasblase aus Wasserstoff, entstanden aus der Behälterkorrosion im oberen Teil des Behälters, unterstellt wird. Ein Auspressen von kontaminiertem Wasser ist in Folge der Gasblase zwar wenig wahrscheinlich, wird aber in der Sicherheitsanalyse betrachtet /28/. Weitere Informationen zu den Ergebnissen dieser Betrachtungen wurden nicht angegeben.

Für die Nachbetriebsphase werden zusätzlich gestörte Entwicklungen berücksichtigt, die sich mit den schwedischen Analysen decken, aber in den einzelnen Kennwerten bzw. Ergebnissen abweichen, weshalb sie hier kurz vorgestellt werden:

- Eiszeiten mit einer Überdeckung von 2 km Eis, was einem zusätzlichen Überlagerungsdruck von 15 - 20 MPa gleichkommt.
- Erdbeben aus glazialer Beanspruchung bei oder kurz nach der Schmelze der Eisschicht. Hier wird unterstellt, dass neue Störungen aufgrund glazialer Beanspruchung selten sind, meist treten zusätzliche Bewegungen an vorhandenen Störzonen auf. Durch einen ausreichenden Abstand zu größeren Störzonen kann ein Defekt der Behälter minimiert werden, die Wahrscheinlichkeit für einen Behälterbruch wurde zu 0,0014 % berechnet. Untersuchungen haben ergeben, dass für den Standort maximal Verschiebungen von 10 cm durch glaziale Beben zu erwarten sind.

Im Sicherheitskonzept wird die thermische Ausdehnung der betroffenen Endlagerbereiche durch lokale Überbeanspruchung bzw. glaziale Beben insofern berücksichtigt, als dass die konstruktive Gestaltung des Behälternahbereiches so erfolgt, dass ein Versatz von 10 cm an Störzonen nicht zu einer signifikanten Beschädigung an den Einlagerungsbehältern führt. Der Einfluss der thermischen Ausdehnung und glazialer Beben werden getrennt betrachtet, da erst in fortgeschrittener Nachbetriebszeit mit glazialen Auswirkungen zu rechnen ist /28/.

2.5.1.3 Basisszenario für das kanadische Endlagerkonzept im Granit

In Kanada sollen ausschließlich ausgediente Brennelemente endgelagert werden, d. h. die Abfallmatrix besteht aus UO_2. Die Abfallmatrix wird dabei als weitgehend lösungsstabil angesehen. Nicht in der Matrix gebundene und daher leichtlösliche Isotope (^{135}Cs, ^{129}I, ^{99}T, ^{14}C) werden nach dem Versagen der Behälter ggf. sofort freigesetzt /19/.

Durch den anfangs erhöhten Sauerstoffgehalt in den Einlagerungsbereichen in den ersten ca. 300 a nach der Einlagerung der Gebinde bestehen kurzzeitig oxidierende Umgebungsbedingungen. Nachdem der freie Sauerstoff durch beginnende Korrosion aufgebraucht ist, stellen sich wieder geochemisch günstige reduzierende Umgebungsbedingungen im Endlager ein /19/. Aufgrund des reduzierenden Milieus im verschlossenen Endlager treten in der ungestörten Entwicklung nahezu keine Korrosionsprozesse an dem Kupferbehälter auf, so dass die Behälter über den Zeitraum von 1000.000 a korrosionsbeständig sind /15/.

Um die Einlagerungsbehälter werden vorkompaktierte Blöcke aus Bentonit-Sand-Gemisch gelegt und verbleibende Resthohlräume zwischen den Pufferelementen und der Streckenkontur werden mit Blasversatz aus Bentonitgemischen verschlossen /15/. Die Hauptaufgabe des Puffers bzw. Streckenversatzes ist die Minimierung des Wasserzuflusses und die Beschränkung der Ausbreitung von Radionukliden nach dem Versagen der Behälter. Die Aufsättigung des Puffers bzw. Streckenversatzes kann in Abhängigkeit von den hydraulischen Bedingungen im Wirtsgestein mehrere hundert bis tausend Jahre andauern. Durch die Zerfallswärme, die von den Abfallgebinden in den Puffer bzw. Streckenversatz abgegeben wird, können Austrocknungsrisse auftreten, die durch Quellen in der Aufsättigungsphase wieder verschlossen werden. Nach der Aufsättigung und dem damit verbundenen Quellprozess wird für den Puffer/Versatz eine Durchlässigkeit von $k_f = 10^{-11}$ m/s prognostiziert. Die Durchflussraten für Wässer durch den Puffer sind dann sehr gering, so dass der maßgebende Transportprozess für die nach dem Behälterversagen freigesetzten Radionuklide die Diffusion ist /19/.

Im Bereich des Wirtsgesteins werden freigesetzte Radionuklide vornehmlich durch Advektion im Kluftsystem transportiert. Bei der Standortwahl sollen deshalb Standorte mit einem dichten Netzwerk von Großklüften gemieden werden.

Im Basisszenario wird das Behälterversagen mit sofortiger Lösung nicht an die Matrix gebundener Radionuklide durch zufließende Grundwässer betrachtet /31/. Ob das Basisszenario, z. B. aufgrund initialer Behälterdefekte, der ungestörten Entwicklung zuzuordnen ist, oder abdeckend die gestörte Entwicklung als Basisszenario gewählt wurde, da der Behälter als korrosionsbeständig angesehen wurde, ist offen.

Im Basisszenario werden auch die Auswirklungen einer Grundwasserbohrung betrachtet. Durch den Transport durch das Wirtsgestein kommt es bereits zu einer Verdünnung der durch die Bohrung freigesetzten Radionuklidmengen. Eine Sorption der Radionuklide an den Mineralien des Deckgebirges wird dabei berücksichtigt /15/.

2.5.1.4 Basisszenario im schweizerischen Kristallin-I-Projekt

Im schweizerischen Kristallin-Projekt für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Granit ist ausschließlich die Endlagerung von verglasten, hochradioaktiven Abfällen vorgesehen. Da die Abfallform (Glasmatrix) der hochradioaktiven, verglasten Abfälle selbst eine wirksame Barriere gegen Herauslösen von Radionukliden darstellt, unterscheidet sich das schweizeri-

sche Konzept für die Endlagerung im Granit von den skandinavischen Konzepten trotz des gleichen Wirtsgesteins.

Den Stahlgussbehältern mit 250 mm Wandstärke wird auf Grund der Korrosion keine lange Standzeit beigemessen, so dass der Zeitraum für die Barrierenwirkung des Behälters auf 1000 a angesetzt wird. Für die Behälter wird ein allseitiger Druck von 20 MPa als Einwirkung angesetzt, den er in diesem Zeitraum standhält.

Die maximale Oberflächentemperatur des Abfallgebindes wird auf 100 °C begrenzt. Wie auch im schwedischen und finnischen Endlagerkonzept dient diese Beschränkung dem Schutz des den Behälter umgebenden Bentonitpuffers vor Veränderungen im Gefüge /3/.

Die mit 1000 a angesetzte Standzeit der Behälter sorgt in dieser Zeit der hohen Temperaturen für einen vollständigen Einschluss der Abfälle. Durch die allmähliche Korrosion des Stahlbehälters wird freier Sauerstoff aus der Einlagerungsphase verbraucht, so dass sich ein insgesamt reduzierendes Milieu einstellt, wodurch prinzipiell das Herauslösen von Radionukliden aus dem verglasten Abfall verlangsamt wird /17/.

Der Versatz aus vorgefertigten Bentonitelementen soll aufgrund seiner sehr geringen Permeabilität einerseits Wasserzuflüsse zu den Endlagerbehältern verhindern bzw. verzögern, so dass auch nach dem Versagen der Behälter auf Grund des Bentonitpuffers nur lokal geringe Wasserzutritte erfolgen und die herausgelöste Menge von Radionukliden aus der Abfallmatrix gering ist. Andererseits wird nach erfolgter Aufsättigung und nach dem Behälterversagen die Ausbreitung von aus der Abfallmatrix herausgelösten Radionukliden durch die geringe Transportgeschwindigkeit und Sorption verzögert. Es wird dabei von einer Rückhaltung von Radionukliden über mehr als 10.000 a ausgegangen.

Unter den geochemischen Rahmenbedingungen im Endlager ist die Freisetzungsrate von Radionukliden aus den verglasen Abfällen aufgrund der homogenen Verteilung in der Glasmatrix nur abhängig von der Korrosionsrate des verwendeten Glases. Mit der vollständigen Glaskorrosion ist erst nach 150.000 a zu rechnen /17/. Für die Glaskorrosion wird im Basisszenario (Referenzfall) eine Auflösungsrate von $3{,}8 \cdot 10^{-04}$ kg/(m²·a) angenommen /5/. Es werden unterschiedliche Korrosionsraten für die Gläser je nach Herkunft aus der Wiederaufarbeitung angegeben, vgl. z. B. Kapitel 2.3.1.

Die Strecken- und Schachtverschlüsse sollen so eingebracht werden, dass potenzielle Fließwege nur über gering permeable Bereiche der Wirtsgesteinsformation bestehen.

Bei der Auslegung des Endlagers ist auf einen ausreichenden Abstand zu wasserführenden Klüften zu achten. Es ist bereits bei der Standortsuche zu prüfen, ob eine Formation ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Kluftnetzwerk aufweist.

Trotz seiner Klüftigkeit ist das Wirtsgestein aufgrund seiner geringen Wasserfließrate eine wichtige Barriere. Der Austrag von Radionukliden aus den Einlagerungsräumen erfolgt durch Advektion durch das (Poren)Netzwerk des Kluftsystems, es erfolgt jedoch eine Verlangsa-

mung des Radionuklidtransportes durch Diffusion in stationäres Porenwasser und durch Sorption an den Oberflächen /17/.

Das schweizerische Basisszenario beinhaltet nicht ausschließlich die ungestörte Entwicklung des Endlagers. Darüber hinaus werden viele FEP-Kombinationen genannt, die in den vorgestellten Grundsituationen zur Endlagersicherheit der ungestörten, aber zumindest teilweise auch der gestörten Entwicklung des Endlagers zugeordnet werden:

- FEP bezüglich technischer Barrieren:
  - defekte oder gebrochene Behälter
  - Unsicherheiten zum Zeitpunkt des Behälterversagens
  - Sorption der Radionuklide an den Korrosionsprodukten des Behälters
  - Gasproduktion, Gasdruck und Freisetzung von Gasen
  - Zersetzung des Bentonits und Erosion
  - Absinken des Behälters
- FEP im Hinblick auf die geologische Barriere:
  - Mechanismen des Grundwasserflusses und Transportprozesse der freigesetzten Radionuklide
  - Transportwege durch die geologische Barriere, Matrixdiffusion, Charakteristik der Poren
- FEP bezüglich der zukünftigen Entwicklung des geologischen Standortes:
  - Bewegungen (horizontal, vertikal, an Störungen,...)
  - Verwitterung des Grundgebirges, Erosion
  - Magmatische Aktivität
  - Hydrothermale Aktivität
- FEP im Hinblick auf langfristige Klimaveränderungen:
  - Grundwasserchemismus, -austrittszonen, -austausch
  - Erosion
  - Permafrost, Eisüberdeckung
- „Human Intrusion“ – menschliche Störeinflüsse:
  - Wasserhaushalt, Grundwasserbohrungen
  - Bergbau, Tiefbohrungen, geothermische Nutzung

Wie bereits erwähnt, wird im Basisszenario des schweizerischen Kristallin-I-Projekts nicht explizit zwischen ungestörter und gestörter Endlagerentwicklung unterschieden, vgl. Kapitel 2.5. Es erfolgt vielmehr ein kontinuierlicher Übergang zwischen ungestörter und gestörter Entwicklung durch schrittweise Verschlechterung auslegungsrelevanter Kenngrößen. Trotzdem werden im folgenden Kapitel die FEP näher beschrieben, die eher einer gestörten bzw. im schweizerischen Fall auch einer alternativen Entwicklung des Endlagers zugeordnet werden können.

2.5.1.5 Gestörte Entwicklung des Endlagers im schweizerischen Kristallin-I-Projekts

Für vom Basisszenario abweichende Entwicklungen eines Endlagers im Granit wurden in der Schweiz grundlegende Fragestellungen abgeleitet, die zusätzlich Berücksichtigung finden müssen /17/. Es ist zu beachten, dass die aufgezählten Fragestellungen nicht explizit einer gestörten Endlagerentwicklung zugeordnet werden können. Im schweizerischen Sicherheitskonzept werden zusätzlich Alternativ-Szenarien aus den FEP entwickelt, die die Sicherheit und Robustheit eines Endlagersystems belegen sollen. Die Alternativ-Szenarien behandeln weniger wahrscheinlich eintretende Szenarien des Endlagers bzw. physikalisch mit dem Basisszenario inkompatible Parametervarianten sowie Varianten mit z. T. pessimistisch abgeschätzten Parameterwerten. Somit stellen diese Alternativ-Szenarien nicht unbedingt den Fall einer gestörten Endlagerentwicklung dar, sondern sie werden ergänzend zum Basisszenario betrachtet, das als wahrscheinlichster Fall angesehen wird. Mit der Betrachtung der Alternativ-Szenarien werden jedoch Aussagen über weniger wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagers getroffen.

- Bei den Behältern wird speziell Spannungsrisskorrosion an der Schweißnaht betrachtet.
- Es wird mit einem konservativen Ansatz für die Auflösung der Glasmatrix und einer damit verbundenen Radionuklidfreisetzung bereits 1500 a nach dem Korrosionsversagen der Behälter gerechnet. Dabei wird eine Glaskorrosionsrate von $3{,}8 \cdot 10^{-02}$ kg/(m²·a) angenommen /5/.
- Der Versatz bzw. Puffer kann sein Gefüge durch Umwandlung von Montmorillonit in Illit verändern, wobei sich sein erwünschtes Quellvermögen verringern kann. Eine Sättigung mit Kalium ist zu vermeiden, weil Kalium-Ionen in das Gefüge eingebaut werden könnten und somit die mineralogische Umwandlung hervorrufen würden. Diese Umwandlung im Mineralgefüge tritt bei einer Temperatur ab etwa 110 °C auf. Die Gefügeumwandlung braucht aber nicht weiter berücksichtigt werden, da einerseits die dazu notwendigen hohen Temperaturen durch die abklingenden Zerfallsprozesse nicht dauerhaft vorhanden sind und andererseits keine ausreichend großen Kaliumquellen zur Verfügung stehen.
- Durch zu hohe Temperaturen an der Behälteroberfläche kann das zulaufende Wasser verdampfen und der Bentonit zementieren. Diese Zementation kann zu einem Verlust der Quelleigenschaften im Bentonit führen. Allerdings ist die Zementationszone nur klein und hat somit keine signifikante Auswirkung auf die Eigenschaften der vorkompaktierten Bentonitblöcke.
- Verwitterungsprozesse im Versatz durch mineralogische Umwandlungen (Montmorillonit verwittert zu Chlorit) können bei der vorherrschenden chemischen Zusammensetzung des Grundwassers ausgeschlossen werden. Eine teilweise Umwandlung des Bentonits, d. h. aus dem ursprünglichen Montmorillonit bildet sich durch den Austausch von Kaliumionen das Tonmineral Illit, kann nicht ganz ausgeschlossen werden, ist aber im Hinblick auf die Eigenschaften des Versatzes ohne Bedeutung.
- Für das Wirtsgestein bzw. Deckgebirge stellen das unbeabsichtigte Anbohren des Endlagers zur Trinkwasserentnahme aus einem sehr tiefen Brunnen (tiefe Grundwasserbohrung) und für die Abdichtungsbauwerke das Versagen aller Strecken- und Schachtverschlüsse die zu betrachtenden Szenarien für die gestörte Entwicklung des Endlagers dar. Beim Transport der Schadstoffe durch die Strecken und Schächte werden zwei Szenarien untersucht, zum einen wird als Haupttransportweg die Auflockerungszone

um die Einlagerungsräume sowie Strecken und Schächte betrachtet, zum anderen werden die verfüllten Grubenräume selbst als Haupttransportweg untersucht.
- In den Analysen einer alternativen Entwicklung des Endlagerstandortes werden auch alternative Klimaentwicklungen im Vergleich zum heutigen Klima betrachtet. Die Auswirkungen von feuchtem, trockenem und eiszeitlichem Klima werden untersucht, wobei die klimabedingten Szenarien im Wesentlichen nur die Biosphäre verändern.

2.5.2 Entwicklungen eines Endlagers im Tongestein

Trotz fortgeschrittener Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Ton- bzw. Tongesteinsformationen in Belgien und Frankreich konnte in der verfügbaren Literatur zu den für den Langzeitsicherheitsnachweis jeweils zugrunde gelegten (Basis-)Szenarien für die jeweiligen Endlagerentwicklungen keine ausführliche Information gefunden werden. Sehr gut dokumentiert ist hingegen die Szenarienbeschreibung und -analyse aus dem schweizerischen Endlagerkonzept im Opalinuston, auf das sich die folgenden Ausführungen beschränken.

2.5.2.1 Basisszenario im schweizerischen Opalinuston-Projekt

Das schweizerische Endlagerkonzept sieht die Entsorgung der radioaktiven Abfälle in einer tiefen geologischen Opalinuston-Formation im Zürcher Weinland vor. Im Vergleich zum schweizerischen Kristallin-I-Projekt ist im Opalinuston-Projekt nicht nur die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (HAW) sondern auch von ausgedienten Brennelementen (SF) vorgesehen.

Die Entwicklung eines Basisszenarios erfolgte auf Grundlage von qualitativ formulierten Sicherheitsanforderungen/-eigenschaften an das Endlagersystem, die dann rückgekoppelt die Annahmen und Randbedingungen für das Basisszenario bilden.

Die qualitativ formulierten Sicherheitsanforderungen/-eigenschaften des Endlagersystems lauten:

- Die Gesteinsformation am Standort ist geologisch stabil und für menschliche Eingriffe uninteressant (keine Bedeutung als Rohstofflagerstätte).
- Das Barrierengestein weist eine geringe hydraulische Durchlässigkeit auf, verfügt über eine feine, homogene Porenstruktur, ist selbstheilend und wirkt als Barriere gegen Radionuklidtransport.
- Das geochemische Milieu unterstützt die Langzeitstabilität der technischen Barrieren, sorgt für eine Immobilisierung und Retardation von Radionukliden.
- Der Bentonitpuffer weist ähnliche Eigenschaften auf wie das Wirtsgestein und wirkt als Barriere gegen Radionuklidtransporte. Er sorgt für günstige Umgebungsbedingungen für die Einlagerungsbehälter.

- Die Einlagerungsbehälter sind mechanisch stabil unter den geomechanischen Beanspruchungen und korrosionsbeständig gegen das Milieu über einen vorgesehenen Zeitraum.
- Die ausgedienten Brennstäbe und die hochradioaktiven Abfälle sind stabil in dem geochemischen Milieu der Puffer- bzw. Versatzmaterialien und der Formation selbst.

Aus den qualitativ formulierten Sicherheitsanforderungen/-eigenschaften und dem vorhandenen Systemverständnis wiederum werden die Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse abgeleitet, aus denen das Basisszenario bestimmt wird. Das Basisszenario beschreibt das Verhalten des Endlagersystems so, wie es aufgrund von Untersuchungen und Analysen erwartet wird und auch wahrscheinlich ist. Aus dem Basisszenario ergeben sich für das EBS und seine Komponenten die in Tabelle 2 aufgeführten Entwicklungen für EBS relevante Ereignisse und Prozesse.

Tabelle 2: EBS-Komponenten und FEP im schweizerischen Opalinuston-Projekt /32/

EBS-Komponente	***Eigenschaften, Ereignisse, Prozesse***	***Erwartete Entwicklung, erwartete Eigenschaften***
Abfallmatrix: *Ausgedienter Kernbrennstoff*	Radioaktives Inventar und Zerfall	Die eingebrachte Abfallmenge sowie die Zerfallswärme sind bekannt.
	Nach Behälterversagen Herauslösen von sofort freisetzbaren Radionukliden (IRF)	Die sofort freisetzbaren Radionuklide werden unmittelbar nach dem Versagen der Behälter freigesetzt.
	Auflösung der Abfallmatrix	Durch das Redoxpotential von H_2 (aus der Behälterkorrosion freigesetzt) extrem geringe Auflösungsrate der Abfallmatrix von $4 \cdot 10^{-07}$/a.
Abfallmatrix: *Verglaste, hochradioaktive Abfälle*	Radioaktives Inventar und Zerfall	Die eingebrachte Abfallmenge sowie die Zerfallswärme sind bekannt.
	Nach Behälterversagen Auflösung des Glases	Unterschiedliche Lösungsraten für unterschiedliche Gläser, basierend auf Laborversuchen. Gläser der französischen COGEMA weisen eine Auflösungsrate von $7{,}3 \cdot 10^{-05}$ kg/(m²·a) auf, britische BNFL-Gläser von $5{,}5 \cdot 10^{-04}$ kg/(m²·a)
Behälter: *Stahlbehälter für ausgediente Brennelemente und hochradioaktive, verglaste Abfälle*	Korrosion, Versagen der Behälter nach 10.000 a	Kurze Phase der Korrosion unter aeroben Bedingungen (begrenzter Sauerstoffgehalt im Endlager), begrenzter Lochfraß und mikrobielle Korrosion, langsame anaerobe Korrosion, Standzeit 10.000 a. Frühzeitiges Versagen durch Risskorrosion im Behälter; nur teilweise versagende Ummantelung verzögert die Freisetzung durch die (geringe) Korrosionsrate, aber Einschluss der Radionuklide im Behälter nur 1000 a.
	Gasbildung	Durch anaerobe Korrosion Wasserstoffproduktion mit einer geringen Rate.
	Redoxreaktionen	Durch Korrosion reduzierendes Milieu.
	Volumenvergrößerung durch Korrosionsprodukte	Nur kleine Effekte im Hinblick auf die Lebensdauer eines Behälters.
Korrodierter Stahlbehälter: *Ausgedienter Kernbrennstoff und hochradioaktive, verglaste Abfälle*	Freisetzung von Radionukliden	Reduzierendes Milieu, Radionuklide verbleiben im Nahfeld des Behälters bzw. im nur begrenzt mobilen Bentonitporenwasser.
	Sorption auf Korrosionsprodukten	Sorption von Radionukliden auf Korrosionsprodukten.

EBS-Komponente	***Eigenschaften, Ereignisse, Prozesse***	***Erwartete Entwicklung, erwartete Eigenschaften***
Puffer: *Bentonit*	Wiederaufsättigung	Langsame Aufsättigung verzögert Korrosionsbeginn des Behälters und damit als Folge die Freisetzung von Radionukliden.
	Thermische Umwandlung	Thermische Gefügeumwandlung kann klein gehalten werden, wenn die Oberflächentemperaturen niedrig gehalten werden; dann geringer Einfluss thermischer Umwandlungsprozesse auf Quellen und Plastizität.
	Gastransport	Freisetzung ins Wirtsgestein über Erweiterung der Fließwege, nur geringe Wasserauspressung.
	Mikrobielle Effekte	Keine signifikanten Effekte, weil Mikroorganismen in dichtem Bentonit nicht lebensfähig sind.
	Nach Behälterversagen Radionuklidtransport	Transport durch Diffusion, gute Sorption, chemische Stabilität (große Menge an Bentonit), kleine Fließrate, mineralogisch der Wirtsgesteinsbarriere ähnlich, hydraulische Leitfähigkeit $k_f = 10^{-13}$ m/s, geringe Kolloidkonzentration.
Versatz, Wirtsgestein: *Bentonit und Auflockerungszone*	Erhöhter hydraulischer Fluss entlang der Auflockerungszone	Etwa 10fach höhere hydraulische Leitfähigkeit ($k_f = 10^{-12}$ m/s), aber keine Verbindung von Rissen. Verbindungen über die Auflockerungszone von Einlagerungsstrecken mit anderen Teilen des Grubengebäudes werden mit Dichtelementen an Streckenenden begrenzt.
	Gastransport	Aufweitung der Fließwege entlang der Auflockerungszone in das Wirtsgestein; Veränderung der Wassertransporteigenschaften zwischen Bentonit und Auflockerungszone werden nicht erwartet.
	Streckenkonvergenz und Kompaktion des Bentonits	Die Versatzkompaktion ist beendet, bevor die Behälter versagen. Die Kompaktion durch Konvergenz wird durch das Quellen begrenzt.
Langlebige, mittelaktive Abfälle (ILW)	Radioaktives Inventar und Zerfall	Radioaktives Inventar, Halbwertszeiten und Zerfallswärme sind bekannt.
	Versagen der Container, Auflösung und Auslaugung von Radionukliden aus Matrix, Behälter, Container	Behälterversagen nach etwa 100 a, Freisetzung von Radionukliden möglich, langsame Aufsättigung, Freisetzung aus zementierten und bituminierten Abfällen schwer einschätzbar.
	Auslaugung von Radionukliden aus Nahfeld	Reduzierende Umgebung im Nahfeld, durch zementhaltige Abfälle begrenzte Löslichkeit.
	Gasbildung	Korrosion von Metallen, biologischer Abbau von Organika.
	Ersetzung von Wasser durch Gas in Porenräumen	Porenwasser kann teilweise durch Gas ersetzt werden, das trifft auf die Umgebung der Container und des Betons zu.
Versatz, Puffer, Wirtsgestein: *Zementmörtel, und Auflockerungszone*	Wiederaufsättigung	Zeitdauer der Wiederaufsättigung in der Größenordnung mehrerer 100 a.
	Durch Auflösung des Zementmörtels Erhöhung des pH-Werts im Wirtsgestein	Tiefe der Reaktionsfront begrenzt, zusätzlich (bleibt unberücksichtigt) Rückgang der Porosität und Selbstschließung von Poren.
	Radionuklidtransport in Einlagerungsstrecken	Transport durch Diffusion, kleine Fließraten, gute Sorption.
	Streckenkonvergenz und Kompaktion	Diese Effekte können durch die Materialwahl abgeschwächt werden.
Versetzte Tunnel, Rampen, Schächte	Radionuklidtransport durch Advektion	Kein vorherrschender Transportmechanismus aufgrund begrenzter Leitfähigkeit in der Auflockerungszone und effektiver Strecken- und Schachtverschlüsse, Streckenversatz mit $k_f = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s, geringer hydraulischer Gradient.
	Transport von Gas, das ^{14}C enthält	Flüchtiges ^{14}C nicht erwartet, möglicher Transport durch Fließwege im Wirtsgestein und der Auflockerungszone.

EBS-Komponente	***Eigenschaften, Ereignisse, Prozesse***	***Erwartete Entwicklung, erwartete Eigenschaften***
Streckenverschlüsse, Versatz	Gasdruckaufbau und -transport in den Einlagerungsstrecken für mittelaktive Abfälle	Das Gasspeicherpotential im Versatz wird nicht berücksichtigt, d. h. eine Speicherung von entstehendem Gas wird nicht in Ansatz gebracht.
Wirtsgestein	Länge des vertikalen Transportpfades	Typisch sind 50 m Transportweglänge, mindestens jedoch 40 m.
	Advektion	Hydraulische Leitfähigkeit $k_f = 2 \cdot 10^{-14}$ m/s.
	Verzögerung des Radionuklidtransports	Die meisten Radionuklide werden aufgrund von Sorption zurückgehalten.
	Gasfreisetzung	Diffusion von Gas, 2-Phasen-Fluss, langsame horizontale Ausbreitung aufgrund geringer Gasproduktion und dichtem Gebirge aufgrund ausreichend hoher Spannungen, Selbstverschluss der Fließwege durch Quellprozesse.
	Homogener Gebirgsaufbau, keine heterogenen Strukturen	Nur geringe Heterogenität des Wirtsgesteins (kein geschichteter Aufbau, keine hydraulisch aktiven Diskontinuitäten), Selbstverschluss von Fließwegen.
Geosphäre	Neo-tektonische Aktivität	Auswahl einer Formation mit vernachlässigbarer neotektonischer Aktivität, d. h. geringe Hebung/Erosion, kleine seismische Aktivität, keine magmatische Aktivität.
	Rückhaltevermögen regionaler und lokaler Aquifere	Nicht berücksichtigt.
	Rohstoffvorkommen	Auswahl einer Formation ohne Rohstoffvorkommen.

Das Basisszenario wird aus einer Kombination vieler FEP zusammengestellt und basiert auf folgenden präzisierten Annahmen und Randbedingungen:

- Das Endlager weist ein Isolationsvermögen für die Abfälle von der Biosphäre von mehreren Millionen Jahren auf.
- Das Wirtsgestein bewahrt seine sicherheitsbestimmenden Eigenschaften über den Zeitraum von mehreren Millionen Jahren.
- Das geochemische Milieu bleibt über den Zeitraum von mehreren Millionen Jahren erhalten.
- Die Puffer- und Versatzmaterialien behalten ihre günstigen Materialeigenschaften (vergleichbar mit denen des Wirtsgesteins) über den Betrachtungszeitraum von mehreren Millionen Jahren bei.
- Die Abfallmatrix der abgebrannten Brennelemente und die der hochradioaktiven Abfälle sind so beschaffen, dass die Radionuklide in der jeweiligen Matrix gehalten und auch nach dem Versagen der Behälter nicht herausgelöst werden können. Bei langlebigen mittelaktiven Abfällen wird von der Abfallmatrix kein Kredit genommen.
- Die Einlagerungsbehälter garantieren für eine begrenzte Zeit (10.000 a) den vollständigen Einschluss.
- Für die Umgebungsbedingungen im Einlagerungsbereich des Endlagers wird eine vollständige Aufsättigung unterstellt, wenn Porenwasser mit den Abfällen in Kontakt kommt.

Neben dem Basisszenario werden ergänzend Alternativ-Szenarien betrachtet, die Parametervariationen der Eingangskenngrößen beinhalten, um die Bandbreite der ermittelten Parameter und Materialkennwerte zu erfassen. Zu den betrachteten Alternativ-Szenarien gehören Untersuchungen zum Klimawechsel, d. h. die rechnerische Berücksichtigung von

Eiszeiten in der Wahl der Parameter in Bezug auf die erwartete Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager. Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass der Einfluss von eiszeitlicher Überprägung ohne Bedeutung ist, da nur geringe Änderungen der Wasserdurchflussrate durch das Endlager auch nur geringen Einfluss auf die Freisetzung von Radionukliden haben /32/. Diese Alternativ-Szenarien sind im folgenden Kapitel 2.5.2.2 vorgestellt. Dort sind auch die FEP/Szenarien beschrieben, die eher einer gestörten Endlagerentwicklung zugeordnet werden können.

Im schweizerischen Nachweiskonzept wird die Radionuklidfreisetzung aufgrund menschlicher Eingriffe in das Endlager gesondert betrachtet und ist nicht Bestandteil des Basisszenarios. Das Ereignis „Human Intrusion“ wird trotz der Möglichkeit des Eintritts aufgrund verlorengegangener Informationen über den Endlagerstandort als gesondertes Szenario untersucht und nicht mit anderen Szenarien überlagert.

2.5.2.2 Alternative Entwicklung des Endlagers im schweizerischen Opalinuston-Projekt, pessimistische Parametersätze und What-if-Szenarien

Im schweizerischen Endlagerkonzept im Opalinuston werden neben dem Basisszenario und den bereits erwähnten alternativen Klimaszenarien auch What-if-Analysen durchgeführt und Super-FEP betrachtet. Während das Basisszenario mit pessimistischer Parameterwahl ansatzweise als gestörte Entwicklung angesehen werden kann, beschreiben die alternativen Szenarien durch den Menschen nicht beeinflusste alternative Entwicklungen, Super-FEP alternative Entwicklungen, die durch menschliche Entscheidungen hervorgerufen werden, wie z. B. die Zeitdauer der Kernenergienutzung und damit die Modifikation der Anzahl der einzulagernden Gebinde, etc. In die Gruppe der Super-FEP wird auch der menschliche Eingriff in das Endlager eingeordnet.

Die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen eines menschlichen Eingriffs in das Endlagersystem werden durch folgende Maßnahmen zu minimieren versucht:

- Das Wissen über das Endlager wird erhalten. Es sind noch nicht näher spezifizierte Maßnahmen geplant, das Wissen um das Endlager zu erhalten, so dass nachfolgende Generationen über die Konsequenzen eines Aufwältigens des Endlagers, den Inhalt und die Gefahren informiert sind.
- Mit der Auswahl einer Tongesteinsformation wurde eine Formation ausgewählt, die langfristig nicht für die Rohstoffgewinnung interessant wird.
- Durch die Einlagerung verfestigter Abfälle in Behältern bleiben bei einem Anbohren des Endlagers die Effekte stets auf einen kleinen Teilbereich des Endlagers beschränkt. Wird ein Behälter direkt angebohrt oder neben einen Behälter gebohrt, besteht nicht die Gefahr, dass sich eine Art „Kurzschluss“ bildet und das gesamte Endlagersystem von dem Eingriff betroffen ist. Die begrenzte Größe der Einlagerungstunnel für die langlebigen mittelradioaktiven Abfälle trägt dazu ebenfalls bei.

Die Analysen mit pessimistischer Parameterwahl bzw. die What-if-Analysen beschäftigen sich mit von dem Basisszenario abweichenden Bedingungen. Sie dienen dazu, die Robustheit des Gesamtsystems zu prüfen und sind nur ansatzweise mit einer gestörten Entwicklung des Endlagers gleichzusetzen. Insbesondere die What-if-Analysen beschreiben durch die Auswahl von im Grundsatz zwar möglichen, aber in Versuchen und Untersuchungen nicht beobachteten, sehr konservativen Parametern ein wahrscheinlich nicht eintretendes Szenario, mit dem die Robustheit des Gesamtsystems geprüft werden kann. Damit beschreibt eine What-if-Analyse nicht den Fall einer gestörten Endlagerentwicklung. Mit Hilfe der What-if-Analysen kann abdeckend gezeigt werden, dass das Endlagersystem auch bei sehr konservativer und der Wahl sehr gering wahrscheinlicher Parameter sicher ist. Die explizite Analyse einer „gestörten Entwicklung“ des Endlagers findet im schweizerischen Sicherheitsnachweiskonzept nicht statt.

Eine Auswahl an pessimistischen Parametersätzen und What-if-Analysefällen wird ohne Anspruch auf Vollständigkeit in Tabelle 3 wiedergegeben /32/.

Tabelle 3: Pessimistische Parametersätze und What-if-Analysen im schweizerischen Opalinuston-Projekt /32/

Pessimistische Parameter, What-if-Analyse	***Konzeptunsicherheiten***	***Parametervariationen***
Prüfung der Robustheit des favorisierten Endlagersystems	Hohe Durchflussrate	100fache Zunahme der Wasserfließrate in die Geosphäre, Basiswert war $k_f = 2 \cdot 10^{-14}$ m/s.
	Transport von Radionukliden entlang durchlässiger, transmissiver Diskontinuitäten	• die HAW/SF-Behälter betreffend mit 10^{-10} m²/s • die ILW-Behälter betreffend mit 10^{-10} m²/s • die HAW/SF-Behälter betreffend mit 10^{-9} m²/s • die ILW-Behälter betreffend mit 10^{-9} m²/s
	Verkürzter Transportpfad durch das Wirtsgestein	30 m Transportpfad durch die Wirtsgesteinsbarriere
	Ungehinderter Transport von gasförmigen ^{14}C durch das Wirtsgestein sowie Strecken und Schächte	Drei unterschiedliche Werte für die Gaspermeabilität
	Schlechte und pessimistische geochemische Datenschätzung des Nahfeldes und der Geosphäre	• Durchflussrate wie im Basisszenario • 10fach erhöhte Durchflussrate • 100fach erhöhte Durchflussrate
	Erhöhte Auflösungsrate von abgebrannten Brennelementen, die Angaben zu den einzelnen Radionukliden sind in /32/ zu finden	• 10fach erhöhte Auflösungsrate • 100fach erhöhte Auflösungsrate
	Ausgediente Brennelemente: erhöhte Lösungsrate von Radionukliden aus der Brennstabhülle	10fache Erhöhung der Lösungsrate gegenüber dem Basisszenario
	Durch Gase bedingte Freisetzung herausgelöster Radionuklide über das Wirtsgestein sowie Rampen und Schächte	Untersuchung mit zwei unterschiedlichen Fließraten

Pessimistische Parameter, What-if-Analyse	***Konzeptunsicherheiten***	***Parametervariationen***
Veränderungen in der Biosphäre	Klimaszenarien	• Trockener/wärmer als heutiges Klima • Feuchter/wärmer als heutiges Klima • Eiszeitliches Klima

Abbildung 10 zeigt den durch die betrachteten What-if-Analysen beeinflussten Bereich bzw. die Folgen für die ingenieurtechnisch hergestellten Barrieren, das Wirtsgestein, das Deckgebirge und die Biosphäre. In rot sind dabei die Auswirkungen der What-if-Analysen dargestellt, in grau und schwarz die pessimistischen bzw. alternativen Variationen der Parameter.

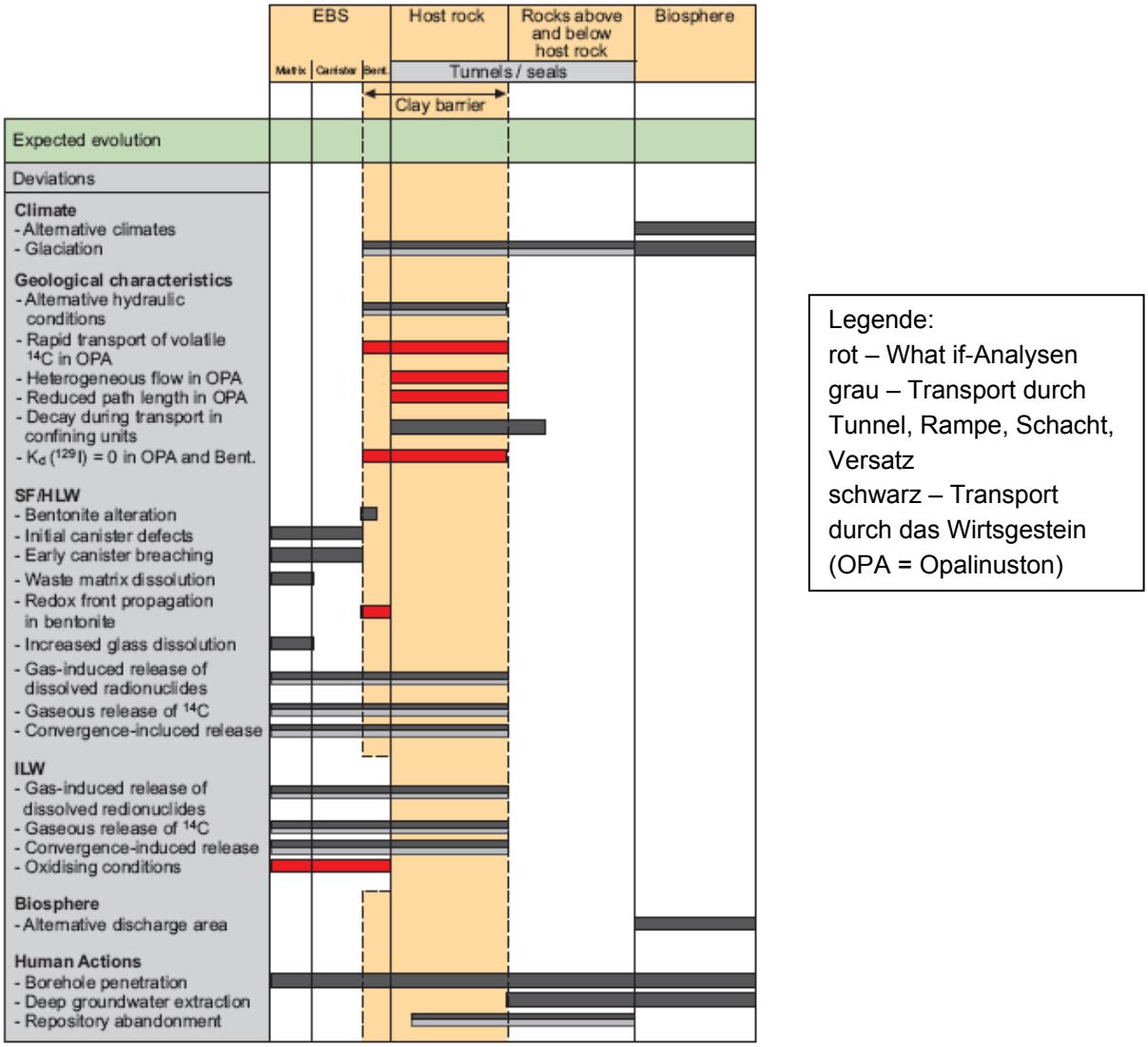


Abbildung 10: Darstellung des Einfluss(bereich)es möglicher Abweichungen vom Basisszenario bezogen auf das Endlagersystem /32/

2.6 Tabellarische Zusammenfassung der verschiedenen Entwicklungen der Endlagersysteme in den jeweiligen Wirtsgesteinsformationen

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel, in denen für ausgewählte Endlagerkonzepte ungestörte, alternative und gestörte Endlagerentwicklungen sowie What-if-Szenarien, die keiner Endlagerentwicklung zugeordnet werden, vorgestellt worden sind, werden diese Entwicklungen in Tabelle 4 zusammengefasst und einander gegenübergestellt. Das KBS-3-Behälterkonzept wird stellvertretend für Schweden und Finnland in Tabelle 4 aufgeführt. Gibt es Unterschiede beim KBS-3-Behälterkonzept zwischen Schweden und Finnland, dient das schwedische Konzept als Basis und der Unterschied zu Finnland wird dargestellt. Weiterhin werden das Kristallin-I-Projekt und das Opalinustonprojekt der Schweiz betrachtet. In Tabelle 4 werden ungestörte und alternative Entwicklungen sowie gestörte Entwicklung und What-if-Szenarien zusammengefasst. Eine solche Zusammenfassung, insbesondere von gestörter Entwicklung und What-if-Szenarien, ist aus methodischen Gründen zwar nicht uneingeschränkt zu befürworten, aber auf Basis des vorliegenden Informationsstandes eine weitere Detaillierung nicht sinnvoll möglich. Ist die Zuordnung noch offen, erfolgt keine Gegenüberstellung.

Tabelle 4: Tabellarischer Vergleich und Zusammenfassung der barrierenspezifischen Entwicklungen für den gestörten und den ungestörten Fall bei Endlagerkonzepten im Granit und im Ton

Funktionen und Einwirkungen	***Ungestörte oder alternative Entwicklung des Endlagers***	***Gestörte Entwicklung des Endlagers oder What-if-Szenarien***
Widerstand der Abfallmatrix gegen Korrosion und Auslaugung von Radionukliden	KBS-3: 10.000 a Widerstand gegen das Herauslösen von Radionukliden aus der Abfallmatrix (SF) vorhanden, Auflösungsrate von 10^{-08} /a unter (reduzierenden) Endlagerbedingungen.	KBS-3: Gute Löslichkeit von Jod, Cäsium, Chlor, Nickel und Strontium, gleiche Transportrate wie Freisetzungsrate, schnelle Freisetzung bei vorzeitigem Behälterversagen, Wasserstoff aus Korrosion wirkt dabei einer schnelleren Auflösung der UO_2-Matrix entgegen.
	Schweiz (Kristallin): Vollständige Glaskorrosion nach 150.000 a, Glaskorrosionsrate $3{,}8 \cdot 10^{-04}$ kg/(m² a)	Schweiz (Kristallin): Freisetzung der Radionuklide aus der Glasmatrix 1.500 a nach dem Korrosionsversagen der Behälter, Glaskorrosionsrate $3{,}8 \cdot 10^{-02}$ kg/(m² a)
	Schweiz (Opalinuston): Gemäß Versuchen zur Auslaugung von verglasten HAW (Berücksichtigung verschiedener Glaskorrosionsraten je nach Herkunft der HAW), langsame Auflösung von SF (Auflösungsrate $4 \cdot 10^{-07}$ /a), sofortige Freisetzung der IRF, d. h. der nicht an die Matrix gebundenen Radionuklide.	Schweiz (Opalinuston): 10- und 100fach erhöhte Auflösungsraten für SF

Funktionen und Einwirkungen	***Ungestörte oder alternative Entwicklung des Endlagers***	***Gestörte Entwicklung des Endlagers oder What-if-Szenarien***
Dichtheit der Behälter trotz Korrosion und mechanischer Belastung	KBS-3: Dichtheit der Behälter über 100.000 a (Korrosionswiderstand). Als einwirkende Behälterbelastung wird ein isotroper Druck von 15 MPa angesetzt, die ertragbare Belastung des Behälters wurde zu 80 - 110 MPa isotroper Druck ermittelt.	KBS-3: Klimaänderungen wie Eiszeiten haben nur oberflächennahen Einfluss, Sauerstoff wird in Deckgebirgsschichten aufgenommen und beeinflusst höchstens kleine Bereiche des Endlagers, aber auf den Behälter wirken erhöhte mechanische Belastungen bis p = 40 MPa isotroper Druck → keine Beeinträchtigung der Behälterintegrität. Beanspruchungen aus Erdbeben haben keinen Einfluss auf die Behälterintegrität, da der maximale Versatz an Kluftzonen auf $\underline{<}$ 10 cm abgeschätzt wurde. Prinzipielle Untersuchungen zum Einfluss von Veränderungen der Grundwasserzusammensetzung, z. B. des pH-Wertes und der Sulfidkonzentration des Wassers → Erhöhung der Spalt- und Spannungsrisskorrosion, höhere Korrosionsrate für Stahl durch höheren Sauerstoffgehalt z. B. durch eiszeitliches Schmelzwasser, Wasserstoff aus Korrosion wirkt dabei der Auflösung der UO_2-Matrix entgegen. Noch nicht abschließend behandelt: Ungleichmäßige Beanspruchung durch schlecht eingebaute Pufferelemente sowie Änderungen des geochemischen Milieus → mechanische Zusatzbeanspruchungen, erhöhte Korrosion.
	Schweiz (Kristallin): Dichtheit der Behälter über mindestens 1000 a, nur lokal geringer Wasserzutritt. Als einwirkende Behälterbelastung wird p = 20 MPa isotroper Druck angesetzt, dem der Behälter Stand hält.	Schweiz (Kristallin): Spannungsrisskorrosion an der Schweißnaht, keine weiteren Angaben.
	Schweiz (Opalinuston): Dichtheit der Behälter über 10.000 a, begrenzter Lochfraß, begrenzte mikrobielle Korrosion, nur kurzzeitig aerobe Korrosion, Korrosionsrate 0,1 – 10 µm/a, im Mittel 1 µm/a unter anaeroben Bedingungen.	Frühzeitiges Versagen durch Spannungsrisskorrosion im Behälter verkürzt Standzeit auf 1000 a. Schweiz (Opalinuston): 10fach erhöhte Lösungsraten von SF aus Brennstabhülle.
Beschränkte Dichtheit der Behälter wegen Behälterdefekten		KBS-3-Schweden: Trotz Qualitätskontrolle kann ca. 1 von 4000 - 5000 Behältern mit Defekt (ca. 1 mm² Loch) ins Endlager kommen.
		KBS-3-Schweden: Trotz Qualitätskontrolle kommt 1 von 1000 Behältern mit Defekt (ca. 1 mm² Loch) ins Endlager, erstes Volllaufen des Behälters mit Wasser nach ca. 11.000 a, dabei dauerhaft reduzierendes Milieu durch hohen Eisenanteil.

Funktionen und Einwirkungen	***Ungestörte oder alternative Entwicklung des Endlagers***	***Gestörte Entwicklung des Endlagers oder What-if-Szenarien***
		KBS-3 Finnland: Drei Szenarien werden betrachtet: 5 mm²-Loch, 1 cm²-Loch im Behälter zu Beginn der Einlagerung, dabei Auspressen von kontaminierten Wässern durch Gasblase ohne Verzögerung der Radionuklidfreisetzung und vollständiges Versagen aller Behälter nach 10.000 a. Weiterhin werden tektonisch bedingte Behälterbrüche betrachtet. Prinzipielle Untersuchungen zum gekoppelten hydromechanischen Verhalten von Behälter und Puffer bei Berücksichtigung von Wasser- und Gastransport, Korrosionsrate, Frac-Druck durch Gasbildung.
	Schweiz (Kristallin): Berücksichtigt in FEP-Analysen, keine weiteren Angaben.	Schweiz (Kristallin): Berücksichtigt in FEP-Analysen, keine weiteren Angaben.
	Schweiz (Opalinuston): Berücksichtigt, keine weiteren Angaben.	Schweiz (Opalinuston): Berücksichtigt, keine weiteren Angaben.
Funktionen*) des Bentonitpuffers bzw. Versatzes und seine Entwicklung	KBS-3: Vermeidung ungleichmäßiger Behälterbelastung, Stabilisierung der Strecken, Gewährleistung nur diffusiver (langsamer) Transportprozesse, Sorptionsbarriere, Stabilisierung des geochemischen Milieus.	KBS-3: Änderung der Bentoniteigenschaften • durch thermische Einwirkungen, • Wirkung salinarer Wässer auf das Quellen, • Wirkung der mineralogischen Zusammensetzung von Zuschlägen im Versatz. Beim Zufluss sauerstoffreicher, eiszeitlicher Schmelzwässer → Sauerstoffaufnahme durch den Bentonitpuffer.
	Schweiz (Kristallin): Stabilisierung der Strecken, Verlangsamung der Transportgeschwindigkeit (Diffusion) von Wässern und Radionukliden, Sorptionsbarriere, Stabilisierung des geochemischen Milieus.	Schweiz (Kristallin): Verschiedene Umwandlungsprozesse des Bentonits im Hinblick auf Gefügeänderung betrachtet wie • Umwandlung von Montmorillonit zu Illit, • Zementation an der Behälteroberfläche bei zu hohen Temperaturen (T > 100°C), • Verwitterung von Montmorillonit zu Chlorit → Potenzieller Verlust der Quelleigenschaften, Änderung des geochemischen Milieus.
	Schweiz (Opalinuston): langsame Aufsättigung und langsame Transportgeschwindigkeit (Diffusion) verzögert Behälterkorrosion, Sorption, Stabilisierung des geochemischen Milieus, diffusiver Transport und Sorption von Radionukliden nach Behälterversagen.	Schweiz (Opalinuston): Transport von Radionukliden mit unterschiedlichen, gegenüber dem Basisszenario höheren Fließraten aufgrund verschiedener Einzeleffekte.

Funktionen und Einwirkungen	***Ungestörte oder alternative Entwicklung des Endlagers***	***Gestörte Entwicklung des Endlagers oder / What-if-Szenarien***
Funktionen*) des Wirtsgesteins und Entwicklung seiner Eigenschaften	KBS-3: Mechanisch standfest, geochemisch günstiges, stabiles Umfeld, Rückhaltung bzw. Retardation von Radionukliden.	KBS-3: Bei erhöhtem Zufluss eiszeitlicher Schmelzwässer wird Sauerstoff aufgenommen → klimatische Änderungen wirken sich nicht aus. Erdbeben erzeugen maximal 10 cm Versatz an Kluftzonen.
	Zusätzlich KBS-3-Finnland: Durch thermische Lasten erhöhter Beanspruchungszustand im Wirtsgestein wurde berücksichtigt.	
		Zusätzlich KBS-3-Finnland: Sorption an Rissoberflächen und Diffusion von Radionukliden in stationäres Porenwasser bei Transport in wasserführenden Rissen und Klüften wurde berücksichtigt, keine Berücksichtigung des Sorptionsverhaltens in der Wirtsgesteinsmatrix und des Deckgebirges.
	Schweiz (Kristallin): Transport von Radionukliden durch Advektion durch Kluft- und Porennetzwerk, Verlangsamung des Radionuklidtransports durch Diffusion in stationäres Porenwasser, Sorption an der Riss- bzw. Porenoberfläche.	Schweiz (Kristallin): keine Angaben über Änderungen der Eigenschaften des Wirtsgesteins.
	Schweiz (Opalinuston): Homogenes Wirtgestein, 50 m vertikaler Transportpfad, keine Veränderung der Transporteigenschaften, geringe Durchflussrate, Sorption, diffusiver Transport von Gas,10fach höhere hydraulische Leitfähigkeit in der Auflockerungszone, Selbstverschluss von Fließwegen durch Quellen.	Schweiz (Opalinuston): 30 m vertikaler Transportpfad, Radionuklidtrandsport durch transmissive Diskontinuitäten, ungehinderter Transport von ^{14}C durch das Wirtsgestein bei Variation der Gaspermeabilität, Transport von Radionukliden mit unterschiedlichen Fließraten, bis zu 100fach höhere Wasserfließrate in die Geosphäre.
Funktionen*) der Strecken- bzw. Schachtverschlüsse und ihre Entwicklung	KBS-3: Einlagerungsstrecken werden keine Hauptfließwege.	KBS-3: Änderung der Eigenschaften des Bentonits, die zum Verlust der Quellfähigkeit führen (salinare Wässer).
	Schweiz (Kristallin): Wasserzuflüsse werden von den Endlagerbehältern ferngehalten, Sorptionsbarriere für Radionuklide.	Schweiz (Kristallin): Versagen aller Strecken und Schachtverschlüsse, Haupttransportwege sind Auflockerungszone um Strecken und Schächte bzw. die Grubenräume selbst.
	Schweiz (Opalinuston): Wirksame Strecken- und Schachtverschlüsse, geringe hydraulische Leitfähigkeit, kein vorherrschender Transportmechanismus vorhanden.	Schweiz (Opalinuston): Transport von Radionukliden mit unterschiedlichen Fließraten, unterschiedliche Fließraten für herausgelöste Radionuklide über Strecken, Rampen, Schächte.

*) Die Funktionen können nicht durch ein Stichwort benannt werden und sind deshalb im Text mit beschrieben

Funktionen und Einwirkungen	***Ungestörte oder alternative Entwicklung des Endlagers***	***Gestörte Entwicklung des Endlagers oder / What-if-Szenarien***
Einwirkungen infolge Klimaveränderungen	KBS-3: Keine Berücksichtigung klimatischer Änderungen.	KBS-3: Eiszeiten haben daher nur geringe Einflüsse. Zusatzbeanspruchungen durch Eisdecke, durch Eiszeiten, Erdbeben aus glazialer Beanspruchung, kaum neue Störzonen, maximal 10 cm Verschiebung an vorhandenen Störzonen, tektonische Beben. Höherer Sauerstoffgehalt eiszeitlicher Schmelzwässer grundsätzlich möglich, es wird aber angenommen, dass Sauerstoff im Wirtsgestein und Puffer gebunden wird.
	Schweiz (Kristallin): Keine Berücksichtigung klimatischer Änderungen.	Schweiz (Kristallin): Feuchtes, trockenes und eiszeitliches Klima.
	Schweiz (Opalinuston): Berücksichtigung klimatischer Änderungen, Formation ohne neotektonische Aktivität, geringe Hebung und Erosion, keine seismische und keine magmatische Aktivität.	Schweiz (Opalinuston): Feuchtes, trockenes und eiszeitliches Klima, Vereisung hat Einfluss auf Wirtsgestein, Versatz und Puffer.
Human Intrusion	KBS-3: Nach 300 a ist alles Wissen über das Endlager verloren, trotzdem kein menschliches Eindringen ins Endlager.	KBS-3: Zwei Szenarien: Bohrtrupp bohrt Endlager direkt an und eine Familie lässt sich wenig später an dem Bohrungsort nieder (Selbstversorgerfamilie).
	Schweiz (Kristallin): Kein menschliches Eindringen ins Endlager.	Schweiz (Kristallin): Anbohren mit tiefer Grundwasserbohrung (Brunnen), Bergbau, Tiefbohrungen.
	Schweiz (Opalinuston): Kein menschliches Eindringen ins Endlager, da keine Rohstoffvorkommen, geringe Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten Anbohrens.	Schweiz (Opalinuston): Anbohren wird unterstellt.

2.7 Bewertung der Funktionsweise der einzelnen Barrieren

Die Funktionsweise der einzelnen Barrieren wird durch ihren maßgebenden Wirkungsmechanismus bestimmt, der die Freisetzung von Radionukliden ver- bzw. behindert. Diese Definition geht über die klassische Definition von Barrierenwirkung hinaus, die sich auf die Ver- bzw. Behinderung des Transports von Fluiden bezieht. Folgende Barriere- bzw. Transportmechanismen für Radionuklide sind identifiziert worden:

- Mechanische Fixierung: Die Radionuklide sind in eine Festkörperstruktur eingebunden. Diese muss (z. B. durch Korrosion) zerstört werden, damit ein Transport von Radionukliden möglich ist.
- Permeation: Ein Stoff (Permeat) durchdringt bzw. durchwandert einen Festkörper. Die treibende Kraft ist ein Gradient. Der Begriff wird hier übergeordnet für Transportprozesse verwendet /33/.
- Diffusion: Allgemein beschreibt die Diffusion die räumliche Verteilung gelöster Stoffe durch Molekularbewegungen von Orten hoher Konzentration zu Orten niedriger Konzentration. Durch den diffusiven Transport und des in vielen Gesteinen nicht geradlinigen Kluftsystems ist es möglich, dass es trotz hoher Strömungsgeschwindigkeiten in den Klüften nur zu einer langsamen Ausbreitung von Schadstoffen kommt /34/.

- Advektion: Die Advektion beschreibt den Transport wassergelöster Stoffe durch ein Medium mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Porenwassers /34/. Das Wirtsgestein (v. a. klüftiger Granit) und das Deckgebirge können durch Advektion Schadstoffe im Porenwasser von Wegsamkeiten transportieren.
- Sorption: Die Sorption bezeichnet den Oberbegriff für eine Anlagerung eines Stoffes (z. B. Kolloide, Partikel) in einem Phasengrenzgebiet. Die Anreicherung der Schadstoffe, zum Beispiel an den Oberflächen der Poren oder in Klüften des Puffermaterials oder des Wirtsgesteins, kann durch chemische oder physikalische Bindung erfolgen /34/. Sorption findet meist an den Grenzflächen zwischen flüssiger und fester, aber auch zwischen gasförmiger und fester Phase statt. Unterschieden wird dabei noch die Adsorption und Absorption. Bei der Adsorption lagert sich aufzunehmender Stoff (Sorptiv) an der Oberfläche des aufnehmenden Stoffs (Sorbens) an. Dieser Prozess kann reversibel sein und wird z. B. durch Konzentrationsänderungen und Temperatur beeinflusst. Bei der Absorption wird das Sorptiv irreversibel fest in das Sorbens gebunden, aufgenommen oder eingelagert. Beide Prozesse (Adsorption und Absorption) sind nicht immer eindeutig zuzuordnen, weshalb im Sprachgebrauch meist nur Sorption verwendet wird /35/. Aufgrund des radioaktiven Zerfalls kann auch die reversible Adsorption hilfreich sein.
- Chemische Pufferung/chemische Barriere: Durch Veränderung der chemischen Randbedingungen, z. B. des pH-Wertes, wird der Ablauf chemischer Prozesse, die die Freisetzung von Radionukliden bewirken, verlangsamt oder beschränkt, z. B. durch Absenkung von Löslichkeitsgrenzen.

In der folgenden Tabelle 5 wird dargestellt, welche Wirkungsmechanismen zu welchen Barrieren (EBS-Komponenten) gehören. Dabei ist zu beachten, dass eine Zuordnung der Barrieren zu den maßgebenden Mechanismen vorgenommen wurde. Natürlich stellen z.B. auch die ringförmigen Pufferelemente aus Bentonit Permeationsbarrieren dar, weil sie nach der Aufsättigung Wasserflüsse weitgehend verhindern. Die Tabelle 5 ermöglicht eine erste qualitative Klassifizierung der Barrieren hinsichtlich ihrer Wirkungsweise.

Tabelle 5 berücksichtigt auch die Literaturangaben /1/ zu den Endlagerkonzepten in Ländern, auf die in den vorherigen Abschnitten nicht im Einzelnen eingegangen worden ist, weil ausreichend detaillierte Informationen nicht zur Verfügung stehen. Belgien wurde dabei nicht berücksichtigt, weil das Behälterkonzept vollständig überarbeitet wurde, für die Schweiz sind nur Angaben zum Kristallin-I-Projekt aufgeführt.

Tabelle 5: Wirkungsmechanismen der einzelnen Barrieren in den Endlagerkonzepten und ihre Funktion

EBS – Wirkung	*EBS – Komponente*	*Funktion*	*Abfall*	*Land*
Rückhaltung durch mechanische Fixierung	Abfall in Glas eingeschmolzen	Hohe Beständigkeit gegen Auslaugen, geringe Radionuklidfreisetzungsrate	HAW	Japan, Schweiz (Kristallin-I), Tschechien, Belgien, Frankreich
	Zustandsform des Abfalls: UO_2 /MOX	Hohe Beständigkeit gegen Auslaugen, geringe Radionuklidfreisetzungsrate	SF	Frankreich, Kanada, KBS-3, Spanien, Tschechien
	Zementierte/betonierte Abfallmatrix	Geringe Permeabilität und verlangsamte Radionuklidfreisetzung	ILW, LLW	Großbritannien, Tschechien
Permeation	Edelstahl-/Stahl-Behälter	Einschluss des Abfalls, keine Radionuklidfreisetzung bei intaktem Behälter, geringe Radionuklidfreisetzungsrate bei korrodiertem Behälter bzw. bei lokal defektem Behälter	HAW	Tschechien, Frankreich, Schweiz (Kristallin-I)
	Kupfer-Stahl/Eisen-Behälter		SF	Frankreich, Kanada, Korea, KBS-3, Tschechien
	Stahl-/Beton-Behälter		ILW, LLW	Frankreich, Großbritannien, Tschechien
Diffusion bzw. Permeation	Bentonit-Puffer	Geringerer Wasserzufluss zum Behälter, langsamer Transport der Radionuklide, falls Behälter nicht uneingeschränkt wirksam	HAW	Frankreich, Schweiz (Kristallin-I), Tschechien
			SF	Frankreich, Kanada, Korea, Spanien, KBS-3, Tschechien
			ILW, LLW	Tschechien
Chemisches Puffern bei hydraulischem Transport	Bentonit-Sand-Gemisch	Chemisches Puffern von zutretenden Wässern, Stabilisierung des geochemischen Milieus im Behälternahfeld, Absenkung der Löslichkeitsgrenzen von Radionukliden	HAW	Japan
	Kompaktierter Schotter mit Bentonit		SF	KBS-3, Kanada
	Beton-/Zementversatz		ILW, LLW	Frankreich, Großbritannien
	Korrodierte Stahlbehälter(teile)	Schaffung reduzierender Umgebungsbedingungen	HAW	z.B. KBS-3, Schweiz, keine länderspezifischen Angaben
			SF	
Hydraulische Separation	Abdichtungen (z.B. Streckenverschluss) aus Ton oder Bentonit und Beton	Verlangsamung des Radionuklidtransports durch hydraulische Separation der Felder nach Endlagerverschluss durch Permeabilitätskontraste (hydraulischer Käfig).	HAW	Frankreich, Japan, Tschechien
			SF	Spanien, Frankreich, Kanada, Tschechien
			ILW, LLW	Frankreich, Großbritannien, Tschechien

EBS – Wirkung	*EBS – Komponente*	*Funktion*	*Abfall*	*Land*
Sorption	Zementierte/betonierte Abfallmatrix	Verhinderung bzw. Verzögerung der Radionuklidfreisetzung	ILW, LLW	Großbritannien, Tschechien
	Bentonit-Puffer		HAW	Frankreich, Schweiz (Kristallin-I), Tschechien
			SF	Frankreich, Kanada, Korea, Spanien, KBS-3, Tschechien
			ILW, LLW	Tschechien
	Bentonit-Sand-Gemisch		HAW	Japan
	Kompaktierter Schotter mit Bentonit		SF	Kanada, KBS-3
	Beton-/Zementversatz		ILW, LLW	Frankreich, Großbritannien
	Verschlüsse aus Ton bzw. Bentonit oder Beton		HAW	Frankreich, Japan, Tschechien
			SF	Spanien, Frankreich, Kanada, Tschechien
			ILW, LLW	Frankreich, Großbritannien, Tschechien

Anmerkung: Hier ist auch LLW – Longlived Low Level Waste – mit aufgeführt

2.8 Klassifizierung und Wirkungsmechanismen der einzelnen Barrieren im Hinblick auf die gestörte und ungestörte Entwicklung eines Endlagers

Dieser Abschnitt behandelt beispielhaft das Zusammenwirken der einzelnen Barrieren bei Endlagerkonzepten im Granit und im Tongestein. Die tabellarische Darstellung in Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigt, dass bei den hier betrachteten gestörten Endlagerentwicklungen für die jeweiligen Endlagersysteme die Sicherheit vor maßgeblichen Radionuklidfreisetzungen durch die Anordnung redundanter, diversitärer Barrieren über die definierten Zeiträume weiterhin gewährleistet ist.

Deutlich erkennbar ist hier die zentrale Bedeutung der Barriere „Behälter“ im Endlagerkonzept im Granitgestein. Dem Wirtsgestein sind aufgrund seiner Fließwege und der größeren Durchflussrate nicht die gleichen positiven Barriereeigenschaften zuzuordnen, wie z. B. der Barriere „Wirtsgestein Ton“, wo die Barrierefunktion der Behälter nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Tabelle 6: Tabellarischer Vergleich von die Barrieren betreffenden Szenarien für eine gestörte und ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Granitgestein. Das X bedeutet „ohne Bemerkung zutreffend“, (X) bedeutet „keine Barrierefunktion“

GRANIT	***Ungestörtes Szenario: kein Behälter defekt, Puffer ist planmäßig eingebaut (Basisszenario, SR97)***	***Gestörtes Szenario: Behälter mit Fabrikationsfehlern: 1 mm² Loch***	***Gestörtes Szenario: Wegsamkeiten im Puffer und Versatz durch fehlerhaften Einbau (als fiktiv angenommen)***
Aufsättigung von **Versatz** und **Puffer**	X	X	X
Kupfer-Eisen-Behälter als Permeationsbarriere soll für mindestens 100.000 Jahre die Radionuklide vollständig einschließen	X	Langsame Radionuklidfreisetzung durch einen oder mehrere defekte Behälter	Früherer Wasserkontakt durch neue, zusätzliche Fließwege, lokal schneller einsetzende Korrosion
Rückhaltung der Radionuklide durch stabile **Abfallmatrix**	X	X	X
Puffer, Versatz und **Verschlüsse** wirken als Diffusionsbarriere	X	X	Auch advektiver Transport der Radionuklide lokal über Fließwege
Puffer, Versatz und **Verschlüsse** wirken als Sorbens	X	X	X
Wirtsgestein wirkt als Sorbens und Diffusionsbarriere	Geringe Sorptionswirkung, advektiver Transport	Geringe Sorptionswirkung, advektiver Transport	Geringe Sorptionswirkung, advektiver Transport
Freisetzung der Radionuklide an **Deckgebirge** und **Geosphäre** über Advektion und Diffusion, hier treten Verdünnungseffekte auf	(X)	(X)	(X)

Tabelle 7: Tabellarischer Vergleich von die Barrieren betreffenden Szenarien für eine gestörte und ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Tongestein. Das X bedeutet „ohne Bemerkung zutreffend“, (X) bedeutet „keine Barrierefunktion“

TONGESTEIN	***Ungestörtes Szenario: mit der Zeit tritt Wasser in das Endlager ein***	***Gestörtes Szenario: Behälter ist vorzeitig defekt***	***Gestörtes Szenario: Erhöhte Fließraten im Wirtsgestein, Puffer und Versatz***
Aufsättigung von **Versatz** und **Puffer**	X	X	X
Edelstahl-Behälter als Permeationsbarriere, korrodiert mit der Zeit bei Wasserkontakt	Sofortige Radionuklidfreisetzung (IRF) nach 10.000 Jahren	Sofortige Radionuklidfreisetzung (IRF) nach vorzeitigem Behälterversagen nach 1000 Jahren	Früherer Wasserkontakt durch Fließwege, lokal schneller einsetzende Korrosion, aber Pufferung durch reduzierendes Milieu (Eisenkorrosion)
Rückhaltung der Radionuklide durch stabile **Abfallmatrix**	X	X	X
Puffer, Versatz und **Verschlüsse** wirken als Diffusionsbarriere	X	X	Auch advektiver Transport der Radionuklide über Fließwege
Puffer, Versatz und **Verschlüsse** wirken als Sorbens	X	X	X
Wirtsgestein wirkt als Diffusionsbarriere	X	X	Auch advektiver Transport über transmissive Diskontinuitäten
Wirtsgestein wirkt als Sorbens	X	X	X
Freisetzung der Radionuklide an **Deckgebirge** und **Geosphäre** über Advektion und Diffusion, hier treten Verdünnungseffekte auf	(X)	(X)	(X)

2.9 Zusammenfassung von Ergebnissen zu Barrieren in den Wirtsgesteinen Granit und Ton

Unabhängig von der Wahl des Wirtsgesteins ist in den verschiedenen Endlagerkonzepten ein Mehrbarrierensystem aus technischen, geotechnischen und natürlichen Barrieren vorgesehen, die z. T. in Reihe und z. T. parallel angeordnet sind. Die einzelnen Barrieren haben unterschiedliche Funktionen und beruhen deshalb auf unterschiedlichen Wirkungsmechanismen. Dabei ist festzustellen, dass die einzelnen Barrieren auch nach teilweisem oder vollständigem Verlust ihrer ursprünglichen (Dicht)Funktion noch zur Radionuklidrückhaltung beitragen können, vorzugsweise durch Gewährleistung reduzierender Umgebungsbedingungen und damit Absenkung der Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide oder durch Sorptionswirkung.

So ist zu jedem Zeitpunkt ein Mehrbarrierensystem vorhanden, sowohl bei ungestörter als auch bei gestörter Endlagerentwicklung wie die ausgewählten Beispiele der Szenarienanalyse zeigen.

3 Ermittlung eines funktionsbezogenen Sicherheitsnachweiskonzeptes für die Endlager im Granit bzw. Tongestein und vergleichende Gegenüberstellung mit der Vorgehensweise bei der Langzeitsicherheitsanalyse

Um ein auf die Barrierefunktionen bezogenes Sicherheitsnachweiskonzept für Endlager im Granit und Tongestein zu ermitteln, ist die Kenntnis der technischen Verschlusskonzepte Voraussetzung. Auf der Basis der in Kapitel 2 erarbeiteten Informationen sollen nunmehr in einem ersten Schritt die maßgebenden, die Sicherheit bestimmenden Barrieren auf qualitativer Basis identifiziert werden.

Dazu werden die Mehrbarrierensysteme im Granit und Tongestein bei ungestörter Barrierefunktion und beispielhaft bei gestörter Funktion einzelner Barrieren betrachtet. Im zweiten Schritt wird ein anwendbares, funktionsbezogenes Sicherheitsnachweiskonzept beschrieben und seine Anwendung auf Barrieren in einem Endlager herausgearbeitet. Als Basis für das funktionsbezogene Sicherheitsnachweiskonzept soll ein bereits bekanntes und angewendetes Konzept zum Einsatz kommen, für das eine generelle Akzeptanz zumindest in Teilen der technisch orientierten Fachöffentlichkeit vorhanden ist und zahlreiche Erfahrungen aus der Praxis bzgl. seiner „Fehleranfälligkeit“ zugrunde gelegt werden können. Die Durchsicht nationaler und internationaler Literatur zeigte, dass über die methodische Konzeption des Langzeitsicherheitsnachweises von geplanten Endlagern insgesamt wenig publiziert worden ist, vgl. Kapitel 2.5. Dies gilt auch für die methodische Konzeption des Nachweises der jeweiligen Barrierefunktionen, d. h. das funktionsbezogene Sicherheitsnachweiskonzept. Dabei ist vorlaufend festzuhalten, dass ein funktionsbezogenes Sicherheitskonzept sich i. d. R. nicht direkt auf eine personenbezogene Größe wie die Individualdosis bezieht, sondern auf die ungestörte bzw. gestörte Barrierefunktion sowohl von einzelnen Barrieren als auch des Mehrbarrierensystems.

Im dritten Schritt erfolgt eine vergleichende Darstellung der Vorgehensweise bei der Langzeitsicherheitsanalyse und bei Anwendung des auf die Barrierefunktionen bezogenen Sicherheitsnachweiskonzeptes an ausgewählten Beispielen.

3.1 Identifikation der für die gestörte bzw. ungestörte Entwicklung die Sicherheit bestimmenden Barrieren auf qualitativer Basis

Eine höhere Robustheit/Zuverlässigkeit bei der Verhinderung bzw. Begrenzung von Radionuklidfreisetzungen aus einem Endlager wird mit voneinander unabhängig wirkenden Barrieren erreicht. Ein einfacher Ansatz ist die Schaffung von redundanten, räumlich getrennten Barrieren. Weisen diese Barrieren weiterhin einen anderen Aufbau bzw. ein anderes Funktionsprinzip auf, wird i. d. R. sichergestellt, dass sich die Barrieren auch im Versagensmodus unterscheiden, und insbesondere im Fall einer gestörten Barrierefunktion bzw. einer gestörten Endlagerentwicklung nicht aufgrund der gleichen Ursache versagen (common mode failure). Man spricht von den Sicherheitsprinzipien Redundanz (d. h. eine andere Barriere übernimmt die Funktion der versagenden Barriere), Diversität (d. h. die Barrieren sind in ihrem Funktionskonzept unterschiedlich) und räumliche Trennung (d. h. die Barrieren sind unterschiedlichen lokalen Randbedingungen und Einwirkungen unterworfen).

Ein solches Mehrbarrierensystem ist in der Lage, selbst im Fall einer gestörten Barrierefunktion bzw. Endlagerentwicklung die Radionuklidfreisetzung zu verhindern bzw. zu begrenzen.

Die für die Sicherheit maßgebenden Barrieren im Fall der ungestörten und gestörten Entwicklung des Endlagers werden im Folgenden identifiziert, wobei ggf. eine Kopplung der ungestörten und gestörten Barrierefunktion zur entsprechenden Endlagerentwicklung vorhanden ist. Dazu werden die jeweils aktiven Barrierefunktionen für die ungestörte und die gestörte Entwicklung des Endlagers über die Zeit für das schwedische KBS-3-Konzept im Granit und für das schweizerische Opalinuston-Projekt im Tongestein in Anlehnung an /32/ dargestellt, vgl. Abbildung 11. Grundlage der Darstellung sind die aufgeführten Szenarien (vgl. Kapitel 2.5.1.1 und 2.5.1.2 sowie 2.5.2.1 und 2.5.2.2), wobei allerdings ausschließlich die betrachtet werden, die sich auf die Verhinderung bzw. Verlangsamung des Radionuklidtransports beziehen. Der radioaktive Zerfall wird begleitend mit dargestellt, obwohl er keine Barrierefunktion ist. Er charakterisiert jedoch die Abnahme des Gefährdungspotenzials. Außerdem hängt vom radioaktiven Zerfall das jeweilige Inventar der Abfallmatrix ab, das sich zeitlich verändert.

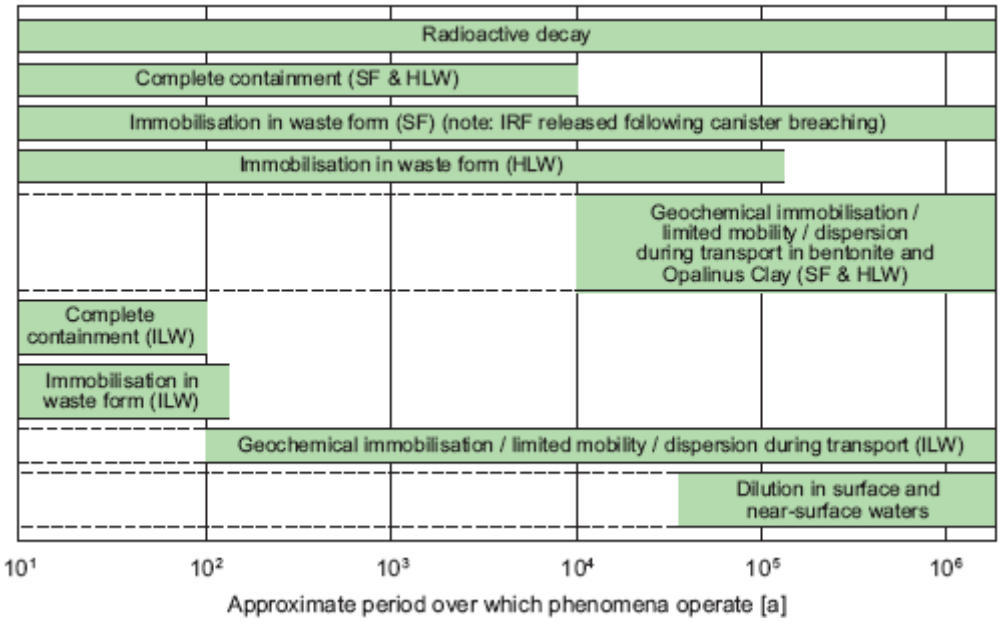


Abbildung 11: Zeitmaßstab der Wirksamkeit von Barrieren im Endlagerkonzept der NAGRA /32/

Wie bereits erwähnt beschränken sich die detaillierteren Betrachtungen im Folgenden auf das schwedische KBS-3-Konzept und das schweizerische Opalinuston-Projekt.

3.1.1 Barrieren im Granit

Für die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Granit mit dem KBS-3-Behälterkonzept gilt bei ungestörter Barrierefunktion, dass

- der Kupferbehälter seine Integrität bewahrt und die Abfälle über die prognostizierte Standzeit (100.000 a) von seiner Umgebung isoliert,
- nach dem teilweisen Versagen des Behälters nach 100.000 a sich die Abfallmatrix der abgebrannten Brennelemente mit der Auflösungsrate von 10^{-8}/a auflöst und Radionuklide zeitverzögert freigesetzt werden,
- der Bentonitpuffer eine effektive hydraulische und geochemische Barriere darstellt und den Behälter vor mechanischen Einflüssen schützt,
- das geochemische Milieu des Puffers/Versatzes und des Wirtsgesteins die Korrosion am Behälter verzögert und der Standort geologisch stabil ist,
- zukünftige Klima- und Umgebungsänderungen auf die Sicherheit des Endlagers keinen Einfluss haben /36/.

Aufgrund von Fertigungsfehlern in der Schweißnaht des Behälters, die in der Qualitätskontrolle nicht entdeckt werden, soll in neueren Untersuchungen im KBS-3-Behälterkonzept von mindestens einem defekten Behälter im Endlager ausgegangen werden. Da es sich um einen unentdeckten Fertigungsfehler handelt, ist der Defekt allerdings klein. Angenommen wird ein kleiner punktförmiger Defekt in der Größe von 1 mm². Der Behälter sorgt nicht mehr für den vollständigen Einschluss des Abfallinventars, allerdings besitzt er durch die langsame Wasserzuflussrate und die stark beschränkte und verzögerte Freisetzung der Radionuklide über einen langen Zeitraum immer noch eine Barrierefunktion. Der zeitliche Ablauf der Radionuklidfreisetzung bei einem defekten Behälter im KBS-3-Konzept gliedert sich wie folgt:

- 0 - 11.000 a: Wasser fließt langsam durch den Bentonitpuffer in den defekten Behälter, da der äußere Wasserdruck größer ist als der Gasdruck im Behälter. Durch den Korrosionsprozess wird das Wasser verbraucht, es baut sich ein Gasdruck im Behälterinnern auf, der weiteres Zuströmen von Wasser verhindert.
- 11.000 - 18.000 a: Die Korrosionsprodukte füllen den Spalt zwischen Kupferhülle und Gusseiseneinsatz aus.
- 18.000 - 200.000 a: An der Korrosionsstelle des Behälters tritt eine Volumenvergrößerung durch die Korrosionsprodukte auf. Nach 200.000 a versagt der Kupfermantel partiell an der Korrosionsstelle.
- 200.000 - 400.000 a: Der Defekt wächst aufgrund des fortschreitenden Korrosionsvorgangs weiter, so dass auch der Wassertransport in den Behälter zunimmt. Die gesamte Fläche des gusseisernen Behältereinsatzes beginnt zu korrodieren. Durch die Korrosionsprodukte vergrößert sich das Volumen des Behältereinsatzes, so dass nach etwa 400.000 a der Deckel abplatzt. Gas entweicht in den Puffer.
- 400.000 - 700.000 a: Nach etwa 700.000 a ist der gesamte Gusseiseneinsatz korrodiert. Durch das Ende des Korrosionsvorgangs wird kein neues Korrosionsgas gebildet und der Gasdruck im Behälter sinkt. Die Gasfreisetzung nimmt ab.

Die Darstellung der jeweils aktiven Barrierefunktionen des Mehrbarrierensystems ist von innen (oben) nach außen (unten) zeitabhängig für den ungestörten Fall in Abbildung12 und den gestörten Fall in Abbildung13 veranschaulicht.

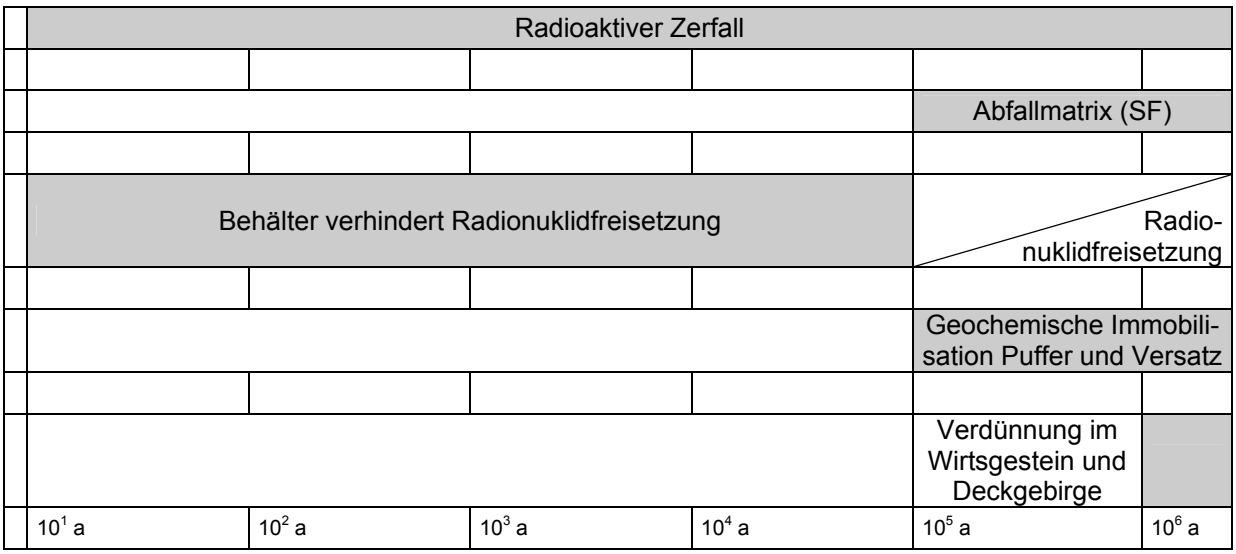


Abbildung 12: Wirksamkeit der Barrieren im KBS-3-Konzept im Granit bei ungestörten Barrierefunktionen (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)

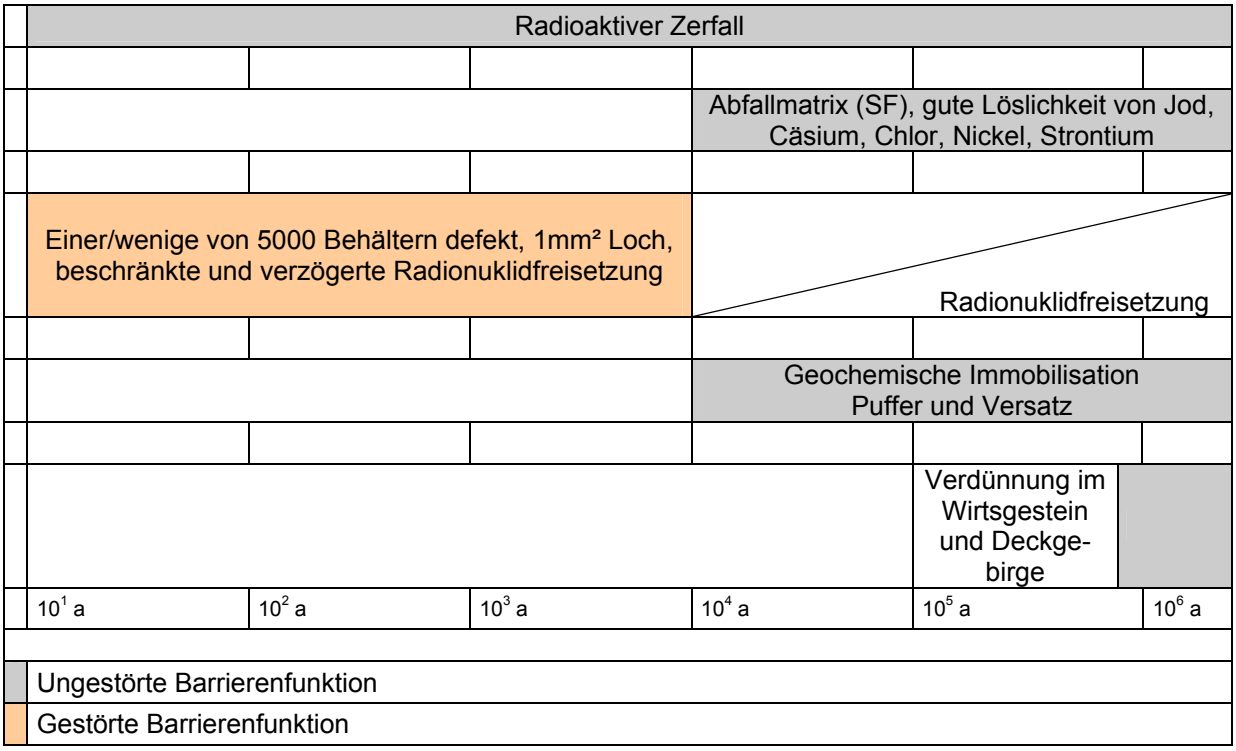


Abbildung 13: Wirksamkeit der Barrieren im KBS-3-Konzept im Granit bei gestörter Barrierefunktion des Behälters (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)

Abbildung 12 und Abbildung13 zeigen in Anlehnung an Abbildung 11 die ungestörte (grau) und die gestörte (orange) Entwicklung eines Endlagers im Granit mit dem zugrunde liegenden KBS-3-Behälterkonzept, die im vorliegenden Fall stark gekoppelt ist mit der ungestörten bzw. gestörten Funktion der Barriere Behälter. In Bezug auf die Radionuklidfreisetzung wird dem Wirtsgestein keine Barrierefunktion zugewiesen, im Wirtsgestein wird nur Verdünnung angenommen. Als Barriere zur Rückhaltung und Sorption der Radionuklide dienen ausschließlich Puffer und Versatz.

3.1.2 Barrieren im Tongestein

Aufbauend auf den Angaben für SF und HAW in Abbildung 11 erfolgt nachstehend die Darstellung der jeweils aktiven Barrierefunktionen ebenfalls von innen (oben) nach außen (unten) zeitabhängig für den ungestörten Fall in Abbildung14 und den gestörten Fall in Abbildung15 und Abbildung 17.

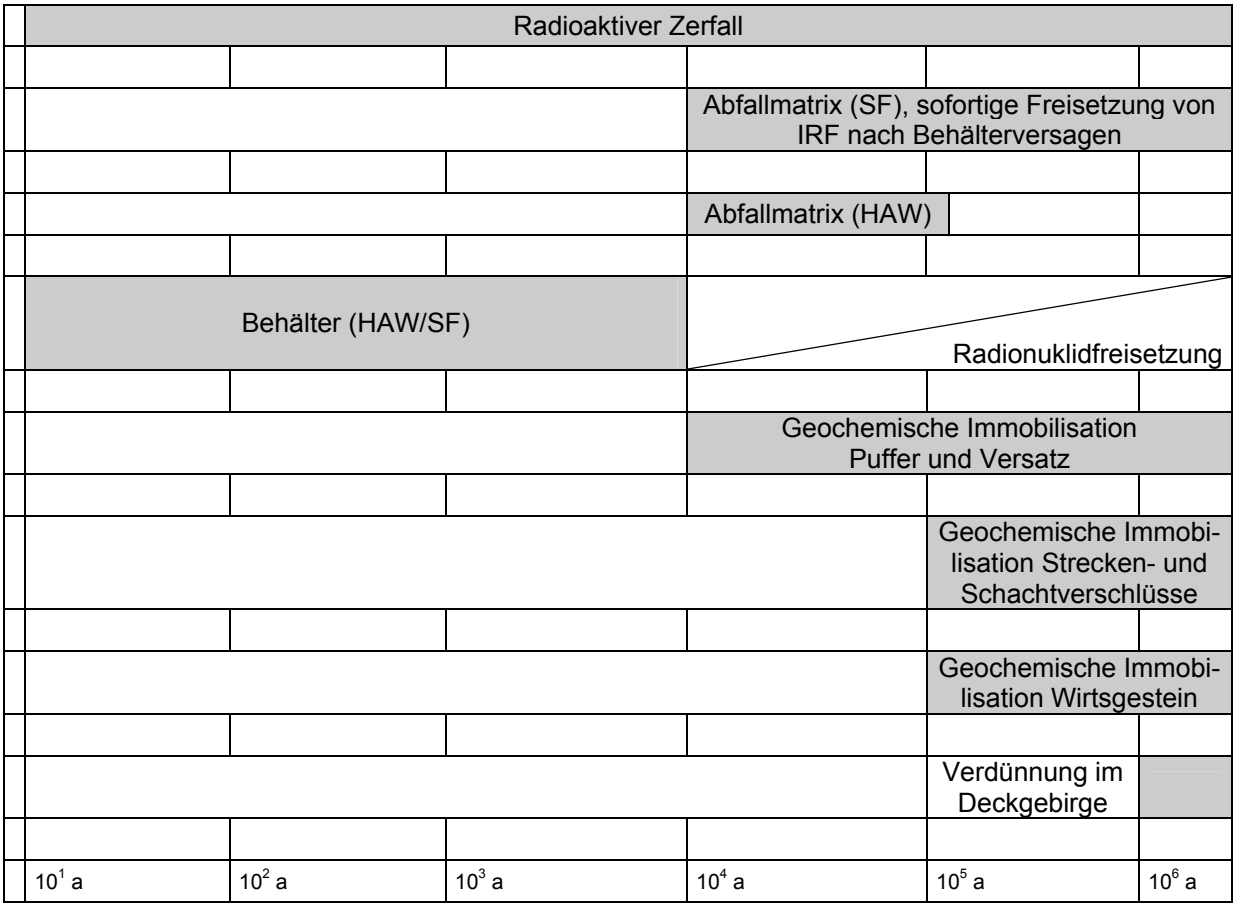


Abbildung 14: Wirksamkeit der Barrieren im Opalinuston-Projekt im Tongestein bei ungestörten Barrierefunktionen (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)

Dabei ist bzgl. der Behälterbarriere anzumerken, dass abweichend vom Endlagerkonzept im Granit eine sofortige Freisetzung eines Teils der Radionuklide (IRF) aus einem defekten Behälter angenommen wird. Dieses ist insofern verständlich, da kein initialer Behälterdefekt unterstellt wird, sondern Behälterversagen durch Flächenkorrosion abdeckend der angesetzte Versagensmodus für den Behälter ist. Die dann maßgebenden Barrieren sind im Tongestein der Puffer und Versatz sowie das Wirtsgestein und Verschlüsse.

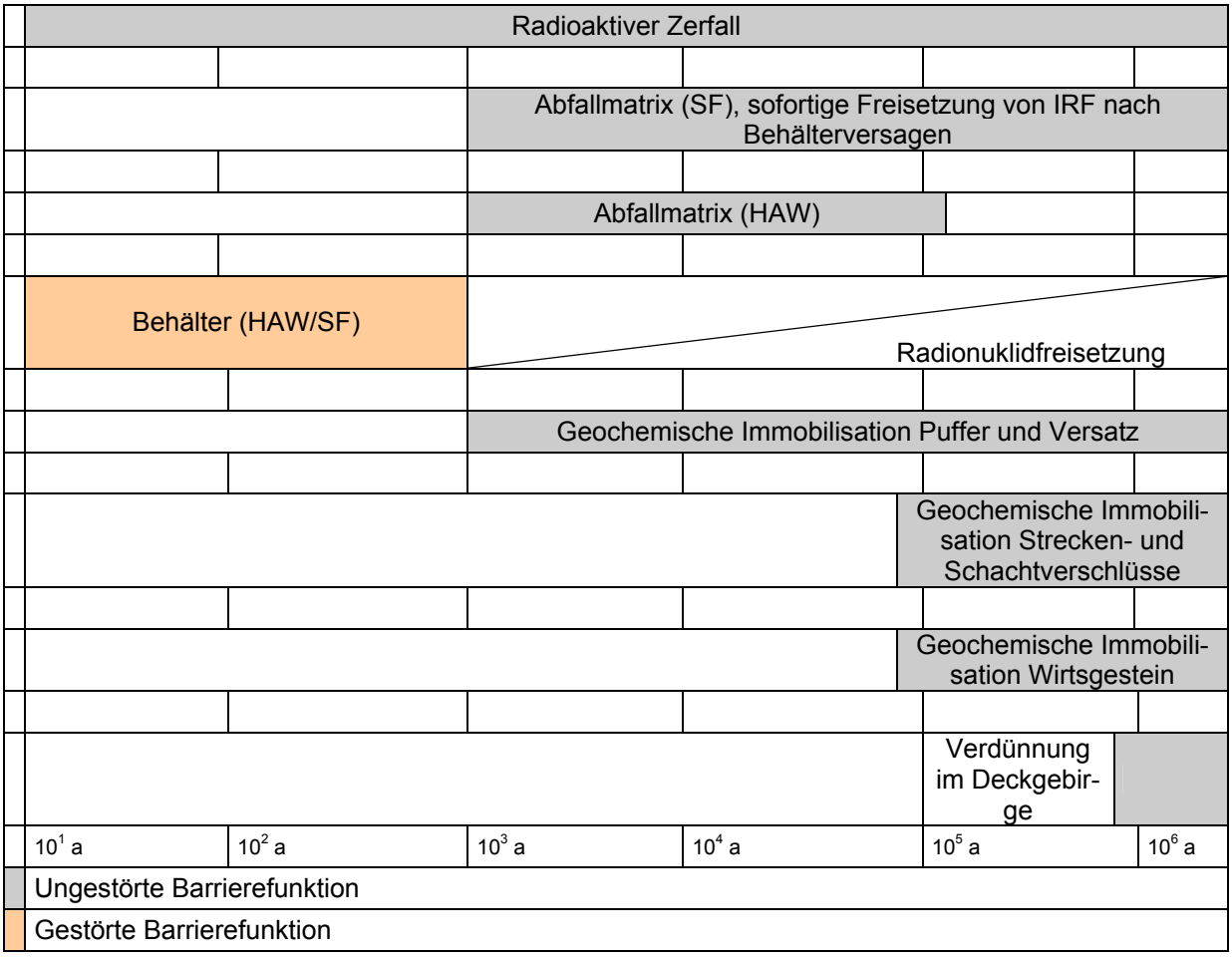


Abbildung 15: Wirksamkeit der Barrieren im Opalinuston-Projekt im Ton bei der gestörten Barrierefunktion „vorzeitiges Behälterversagen“ (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)

Abbildung14 zeigt das Zusammenspiel einzelner, jeweils aktiver Barrieren über den Zeitraum, der in der Langzeitsicherheitsanalyse für das Endlager im Opalinuston betrachtet wird. Aus Abbildung 14 geht hervor, dass es sich bzgl. der Radionuklidfreisetzung um ein 3-Barrierensystem handelt. Allerdings ist die Barriere Behälter im Vergleich zum Betrachtungszeitraum nur für einen relativ kurzen Zeitraum wirksam. Die langzeitigen, weitaus bedeutenderen Barrieren sind Puffer bzw. Versatz sowie Verschlüsse und das Wirtsgestein, die eine schnelle Freisetzung verhindern. So zeigt Abbildung 15 die Bedeutung dieser Barrieren bei frühem Behälterversagen.

Dieser Sachverhalt wird durch Abbildung 16 untermauert, die zeigt, dass die maximale Dosis (oberes Diagramm) bzw. der Zeitpunkt der maximalen Dosis (unteres Diagramm) für hochradioaktive Abfälle (HAW, in Abbildung 17 als HLW bezeichnet) und ausgediente Brennelemente (SF) nahezu unabhängig vom Versagenszeitpunkt der Behälter sind. Ausgehend von einer Behälterstandzeit von 10.000 a werden Variationen mit Behälterstandzeiten von 1000 a und 100.000 a durchgeführt. Der Zeitpunkt 1000 a beschreibt das vorzeitige Behälterversagen. Unabhängig von der Behälterstandzeit liegen die freisetzungsbedingten Dosen (oberes Bild) in der gleichen Größenordnung. In der Zeit des Ausbreitens der maximalen Dosis ergeben sich zugunsten einer längeren Behälterstandzeit auch keine großen Unterschiede. Dies belegt, dass die Barriere Behälter im Gesamtkonzept für die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Tongestein nur von untergeordneter Bedeutung ist.

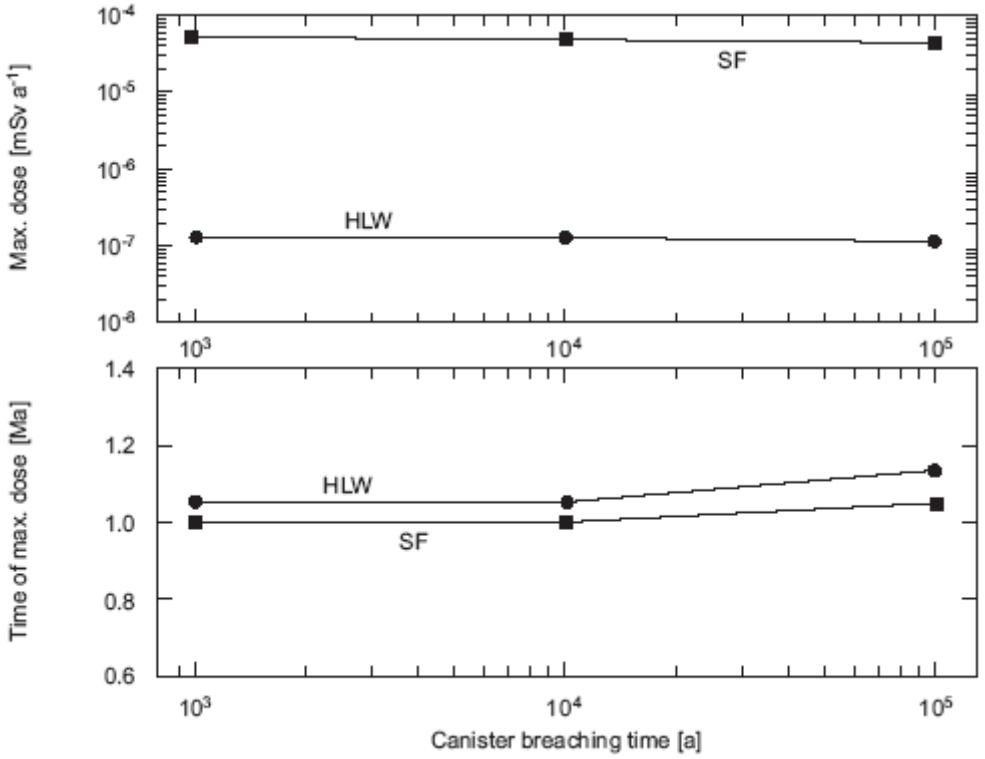


Abbildung 16: Gegenüberstellung des Zeitpunktes des Behälterversagens mit der maximalen Dosis (oben) und dem Zeitpunkt ihres Auftretens (unten) /32/

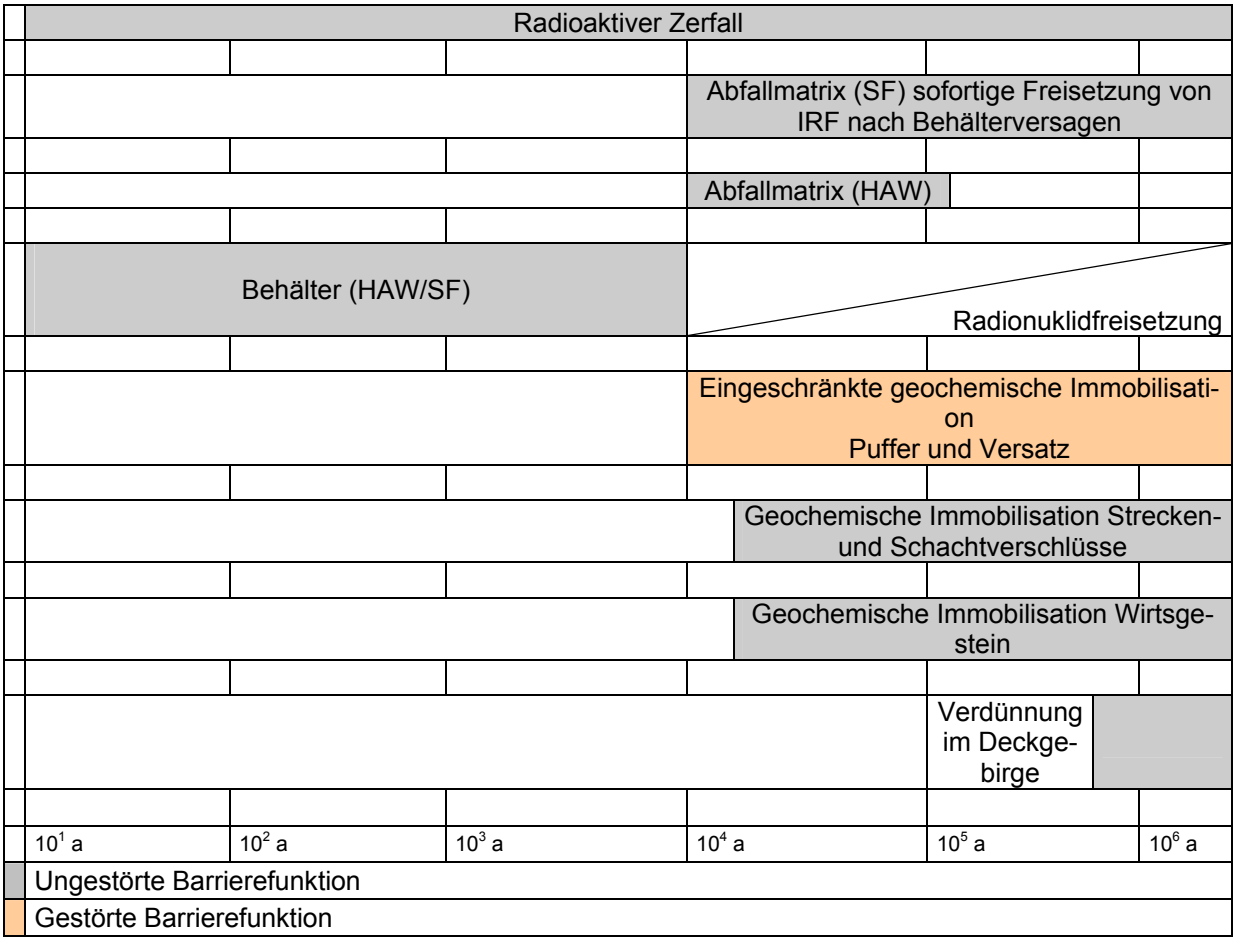


Abbildung 17: Wirksamkeit der Barrieren im Opalinuston-Projekt im Tongestein bei gestörten Barrierefunktionen „Puffer und Versatz“ (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)

In Abbildung 17 ist beispielhaft eine gestörte Barrierefunktion von Puffer und Versatz unterstellt. In diesem Fall sind immer noch die Barrierefunktionen von Behälter, Wirtsgestein und Verschlüssen vorhanden. Ergänzend soll noch hinzugefügt werden, dass durch die Annahme der sofortigen Freisetzung der IRF auch die Rückhaltefunktion der Abfallmatrix in der Langzeitsicherheitsanalyse nur eingeschränkt berücksichtigt ist.

Im Rahmen des Opalinuston-Projektes wurden auch transmissive Diskontinuitäten im Wirtsgestein im Sinne einer gestörten Barrierefunktion des Wirtsgesteins betrachtet (vgl. Tabelle 7). Dieser Fall wurde hier nicht durch eine Abbildung veranschaulicht.

Aus Abbildung 15 und Abbildung 16 wird deutlich, dass für das Opalinuston-Projekt als Beispiel für ein Endlagerkonzept im Tongestein die Barrierefunktion von Bentonitpuffer/-versatz und Wirtsgestein dominant ist, d. h. Puffer/Versatz und Wirtsgestein/Verschlüsse zusammen bilden die maßgebenden Barrieren.

3.1.3 Zusammenfassung der qualitativen Ergebnisse zu den Barrieren im Granit und im Tongestein

Aus Tabelle 6 und Tabelle 7 in Kapitel 2.8 und den Abbildung 12 bis Abbildung 15 sowie Abbildung 17 wird deutlich, dass die sicherheitsbestimmenden Barrieren beim Konzept der Endlagerung in kristallinen Granitgesteinen der Behälter und der Bentonitpuffer und im Tongestein der Bentonitpuffer/-versatz, die Verschlüsse und das Wirtsgestein sind.

Bemerkenswert ist, dass in Bezug auf die Radionuklidfreisetzung i. d. R. gleichzeitig nur 2 Barrieren maßgeblich aktiv sind, siehe Abbildung 12 bis Abbildung 15 und Abbildung 17. Dies gilt auch im Fall einer gestörten Entwicklung. Die anderen Barrieren sind zwar vorhanden, gemäß den durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen sind sie jedoch von jeweils untergeordneter Bedeutung, da ihre Barrierefunktion gar nicht zum Tragen kommt oder von ihr kein Kredit genommen wird. Sie werden häufig mit konservativen, pauschalen Ansätzen behandelt. Allerdings ist die Frage zu stellen, ob sich hier nicht ein unvollständiges Bild ergibt, wie sich in Tabelle 6 in Kapitel 2.8 andeutet. So wurde im KBS-3-Konzept ein defekter Puffer nicht betrachtet und dementsprechend auch die Kombination defekter Behälter und defekter Puffer nicht hinreichend zuverlässig ausgeschlossen. In Bezug auf das Konzept im Opalinuston wird nicht transparent, ob auch wenig wahrscheinliche Kombinationen mit ggf. erheblichen Auswirkungen erfasst sind.

Dazu erfolgt ergänzend eine Betrachtung, der ein dem Stand der Technik entsprechendes, funktionsbezogenes, risikobasiertes Sicherheitsnachweiskonzept für Barrieren zu Grunde liegt.

Dabei liegt für Standorte im Granit der Schwerpunkt auf den technischen Barrieren, da hier für den Langzeitsicherheitsnachweis die Integrität des Behälters und des Puffermaterials von ausschlaggebender Bedeutung ist. Für Standorte im Tongestein ist das geologische Umfeld für den Langzeitsicherheitsnachweis von größerer Bedeutung. Daher sind dort Störungen des Wirtsgesteins, die aus Auffahrung und Einlagerung resultieren, zu begrenzen und den Strecken- und Schachtverschlüssen wird besondere Bedeutung zugemessen.

3.2 Ermittlung eines anwendbaren, funktionsbezogenen Sicherheitsnachweiskonzeptes

Vorlaufend zu den weiteren Betrachtungen soll zunächst eine Präzisierung des Begriffs Sicherheit erfolgen, wie er dem Stand der Technik entsprechenden funktionsbezogenen, risikobasierten Sicherheitskonzepten zu Grunde liegt. Der Begriff „Sicherheit“ wird nach *absoluter Sicherheit* und *relativer Sicherheit* unterschieden. Unter absoluter Sicherheit versteht man die vollständige Abwesenheit von Gefahren und damit einen unerreichbaren Zustand. Sicherheit im relativen Sinne beschreibt die Abwesenheit einer bestimmten Gefahr. Ein Zustand in diesem Sinne gilt dann als sicher, wenn er nur ein geringes Risiko beinhaltet, das klein ist gegenüber dem Risiko aus dem alltäglichen Lebensumfeld und deshalb als tolerierbar gilt, vgl. dazu auch Kapitel 5. Diese relative Sicherheit bildet die Basis für risikobasierte Sicherheitsnachweiskonzepte gemäß Stand der Technik.

Bei technischen Anlagen, deren „Sicherheit“ nicht durch (regelmäßige) direkte Produktprüfung überprüft werden kann, sondern die auf Basis von Modellen ausgelegt werden, ist in der Technik grundsätzlich ein Sicherheitsnachweiskonzept erforderlich, um eine anforderungsgerechte Auslegung zu gewährleisten.

Um ein funktionsbezogenes, anwendbares Sicherheitsnachweiskonzept zur Bewertung der Barrierenfunktion der Barrieren in einem Endlager zu ermitteln, wurde nationale und internationale Literatur gesichtet. Im Wesentlichen wurden die internationalen Reviews von Sicherheitsanalysen zu Endlagern herangezogen. Aus dieser Literatur konnte jedoch kein solches funktionsbezogenes, risikobasiertes Sicherheitsnachweiskonzept abgeleitet werden.

Aus diesem Grund wurden weiterhin Anwendungsdokumente zur Bemessung kerntechnischer Anlagen herangezogen. Gerade für den Behälterbau und den kerntechnischen Anlagenbau sind zwei Standardwerke vorhanden, die für die Bemessung und Ausführung maßgeblich sind. In Bezug auf ein Sicherheitsnachweiskonzept für eine Wirtsgesteinsbarriere bzw. geotechnische Barriere spielen diese erwähnten Standardwerke nur eine untergeordnete Rolle, lediglich für den Nachweis eines Einlagerungsbehälters können sie möglicherweise wertvolle Hinweise liefern. Das AD 2000-Regelwerk für die Dimensionierung, Ausführung und Prüfung von Druckbehältern hält sich an ein in sich geschlossenes Sicherheitsnachweiskonzept, welches keine Rückschlüsse auf die in diesem Konzept zugrunde gelegten Sicherheits- und Zuverlässigkeitsüberlegungen zulässt. Werden in diesem Zusammenhang Auslegungen anhand anderer Methoden durchgeführt, die ebenfalls dem Stand der Technik entsprechen, muss stets das Gesamtkonzept der AD 2000 berücksichtigt werden /37/. Diese Anmerkung in der AD 2000 bezieht sich eindeutig auf das Sicherheitskonzept der Eurocodes, in dem mit der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte gearbeitet wird. Ähnlich wird in den Regeln des Kerntechnischen Ausschusses verfahren. Die KTA-Regeln zum Bau und zur Dimensionierung kerntechnischer Anlagen setzen ebenfalls auf ein in sich geschlossenes Sicherheitsnachweiskonzept /38/. Die Sicherheitsnachweiskonzepte der diskutierten Regelwerke für den Druckbehälterbau und den kerntechnischen Anlagenbau sind zwar geeignet für die jeweilige Bauaufgabe, sie sind aber nicht geeignet, als Sicherheitsnachweiskonzept für die o. g. Barrieren in einem Endlager herangezogen zu werden.

Im Fall der Barrieren in einem Endlager werden durch standortspezifische Untersuchungen technisch nicht standardisierte gesteins-, milieu- und materialbezogene Kenngrößen bestimmt und abgeleitet sowie Unsicherheiten (Ungewissheiten) ermittelt. Auch Bauwerke, insbesondere wenn es sich um geotechnische Bauwerke handelt, sind in diesem Sinne nicht technisch standardisiert, sondern sie werden an die Standortsituation angepasst. Solche nicht standardisierte Situationen, in deren Umfeld Barrieren ausgelegt werden müssen, lassen sich dementsprechend prinzipiell durch ein Sicherheitsnachweiskonzept in Anlehnung an das bautechnische Regelwerk der Eurocodes nach der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte bewerten. Dieses Konzept lässt es weiterhin zu, für unterschiedliche Barrieren (die technische Barriere „Behälter“, die geotechnische Barriere „Verschluss“ und die geologische Barriere „Wirtsgestein“) ein einheitliches Nachweiskonzept anzuwenden und so in sich konsistente Bewertungen durchzuführen.

Da für die Auslegung bzw. zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Barrieren eines Endlagers ein einheitliches Konzept von Vorteil ist, wird als Sicherheitsnachweiskonzept für die jeweiligen Barrieren der Anwendung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte in Anlehnung an die Eurocodes aus dem Bauwesen der Vorzug gegeben. Es wird im Folgenden beschrieben.

Das Sicherheitsnachweiskonzept der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte ist Stand der Technik und ist im Regelwerk der Eurocodes (EN 1990 bis EN 1999) auf europäischer Ebene für das Bauwesen vereinheitlicht /39/. Es gilt in Verbindung mit den nationalen Anwendungsdokumenten in den Ländern der EU. Den Eurocodes liegt ein semiprobabilistisches, zuverlässigkeitsorientiertes Sicherheitsnachweiskonzept zu Grunde, das auf einem Risikoansatz basiert. Im Forschungsvorhaben 02 E 9087 /40/ wurde gezeigt, dass das Konzept im Grundsatz auf die (geo)technischen Barrieren eines Endlagersystems im Salz übertragbar und sinnvoll anwendbar ist.

Bei vertiefter Betrachtung macht dieses Regelwerk deutlich, dass (bau)technisch – wie bereits oben erwähnt - nie eine absolute Sicherheit erreicht werden kann, sondern das von einem Bauwerksversagen ausgehende Risiko nur hinreichend gering gehalten werden kann. Als Maß für das von einem Bauwerksversagen ausgehende Risiko wird primär der Verlust seiner Sicherheitsfunktion, i. d. R. die Tragfähigkeit, herangezogen, die mit Verlust von Leben und Gesundheit gleichgesetzt wird. In diesem Zusammenhang dient das Risiko als ein Maß, das nicht nur das Ausmaß eines Schadens beschreibt, sondern auch die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens berücksichtigt. Bei gleichem Risiko ist also bei geringen Auswirkungen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses höher als bei großen Auswirkungen.

Klassisch wird zur Ermittlung des Risikos eine Risikoanalyse durchgeführt. Im Bauwesen erfolgt bei der Auslegung nach Eurocode jedoch keine Risikoanalyse. Die Einhaltung der in den Eurocodes beschriebenen Verfahrensweisen gewährleistet, dass das Risiko unterhalb der akzeptierten Schranke für das Versagensrisiko (= Verlust der Sicherheitsfunktion) bleibt /40/. Aufgrund der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten ist diese Methode in ihrer Umsetzung den früheren deterministischen Verfahren so ähnlich, dass oftmals gar nicht erkannt wird, dass ein risikobasiertes Sicherheitsnachweiskonzept zur Anwendung kommt.

Die Vorgehensweise bei diesem Sicherheitsnachweiskonzept soll an Hand der Funktion „Tragfähigkeit (früher: Standsicherheit)“ erläutert werden, weil darauf die Regelungen der Eurocodes überwiegend abzielen. Die Tragfähigkeit ist eine sicherheitsrelevante Funktion von Bauwerken, d. h. sie müssen den auf sie einwirkenden Einwirkungskombinationen, z. B. verschiedene Lasten, sicher widerstehen und so ihre Tragfähigkeit bewahren. Ist die Funktion Tragfähigkeit nicht gewährleistet, besteht Gefahr für Leben und Gesundheit. (Anmerkung: Die hier verwendeten Begriffe entsprechen den Sprachregelungen der Eurocodes. Sie sind im Glossar erläutert.)

Als Grundlage für den Tragfähigkeitsnachweis nach der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte dient die Grenzbedingung für eine sicherheitsrelevante Funktion (Grenzzustand der Tragfähigkeit) /39/, /41/:

$$E_d \leq R_d \tag{3.1}$$

Gl. 3.1 sagt aus, dass die Bemessungswerte der Beanspruchungen E_d kleiner oder höchstens gleich dem Bemessungswiderstand R_d des Tragwerks sein dürfen.
Für E_d gilt:

$$E_d = \gamma_{Ed} E(F_{d1}, F_{d2}; ...; a_{d1}, a_{d2}; ...; X_{d1}, X_{d2}; ...) \tag{3.2}$$

mit	γ_{Ed}	Teilsicherheitsbeiwert für Modellunsicherheit Einwirkungsmodell
	F_{d1}, F_{d2}	Bemessungswerte einer Einwirkung
	a_{d1}, a_{d2}	Bemessungswerte der geometrischen Größen
	X_{d1}, X_{d2}	Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften

Für die Bemessungswerte der Einwirkungen gilt:

$$F_d = \gamma_f F_{rep} \tag{3.3}$$

mit	F_d	Bemessungswert der Einwirkung
	γ_f	Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung, der u. a. ungünstige Abweichungen der Einwirkung und Unsicherheiten der Abschätzung der Wirkung der Einwirkung beinhaltet
	F_{rep}	repräsentativer Wert der Einwirkung, z. B. F_k
	F_k	charakteristischer Wert der Einwirkung

Für die geometrischen Größen gilt:

$$a_d = a_{nom} + \Delta a \tag{3.4}$$

mit	a_{nom}	Nennwert der Geometrie
	Δa	berücksichtigt ggf. ungünstige Abweichungen vom Nennwert

Für die Baustoffeigenschaften gilt:

$$X_d = \frac{\eta X_k}{\gamma_m} \tag{3.5}$$

mit	X_d	Bemessungswert der Baustoffeigenschaft
	γ_m	Teilsicherheitsbeiwert der Baustoffeigenschaft, der u. a. ungünstige Abweichungen vom charakteristischen Wert beinhaltet

X_k	charakteristischer Wert der Baustoffeigenschaften
η	Umrechnungsfaktor für Lastdauer, Feuchte, Temperatur,...

Auf der rechten Seite von Gl. 3.1 stellt R_d den Bemessungswiderstand dar. Für R_d gilt:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(a_{d1}, a_{d2}; ...; X_{d1}, X_{d2}; ...) \tag{3.6}$$

mit

γ_{Rd}	Teilsicherheitsbeiwert für Modellunsicherheit Widerstandsmodell
a_{d1}, a_{d2}	Bemessungswerte der geometrischen Größen
X_{d1}, X_{d2}	Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften

Auf Gl. 3.6 beruhen die Nachweisformen von R_d. Eine oft verwendete Nachweisform unter Berücksichtigung der charakteristischen Baustoffeigenschaften, der Geometrieeinflüsse und der Teilsicherheitsbeiwerte lautet:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\left(\frac{X_k}{\gamma_m}, a_{nom}\right) \tag{3.7}$$

mit

γ_{Rd}	Teilsicherheitsbeiwert für Modellunsicherheit Widerstandsmodell
X_k	charakteristischer Wert der Baustoffeigenschaften
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert der jeweiligen Baustoffeigenschaft, der u. a. ungünstige Abweichungen vom charakteristischen Wert beinhaltet
a_{nom}	Nennwert der Geometrie

Für den Nachweis der Tragfähigkeit müssen ggf. für unterschiedliche Bemessungssituationen Einwirkungen in verschiedenen Kombinationen für verschiedene Versagensmechanismen untersucht werden, wobei bei der Kombination der Einwirkungen die Wahrscheinlichkeit ihres gleichzeitigen Auftretens berücksichtigt wird.

Relevante Bemessungssituationen sind z. B.:

- ständige Situationen, die den üblichen Nutzungsbedingungen des Tragwerks entsprechen,
- vorübergehende Situationen, die sich auf zeitlich begrenzte Zustände beziehen, z. B. Bauzustände,
- außergewöhnliche Situationen, die sich auf außergewöhnliche Bedingungen für das Tragwerk beziehen, z. B. Anprall, Explosionen /41/,
- Situationen bei Erdbeben, die die Bedingungen bei Erdbebeneinwirkungen auf das Tragwerk umfassen.

Für außergewöhnliche Situationen werden wahrscheinliche, i. d. R. aber andere Einwirkungskombinationen und geringere Teilsicherheitsbeiwerte angesetzt als in ständigen Situationen. Damit wird in der Praxis die geringe Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens sehr ungünstiger Werte berücksichtigt, ohne dass dabei eine Erhöhung des Gesamtrisikos erfolgt.

Um die Tragfähigkeit eines Tragsystems nachzuweisen, werden die charakteristischen Werte der Einwirkungen oder der Beanspruchungen mit den zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerten multipliziert (und damit i. d. R. erhöht) und so Bemessungswerte bestimmt. Die Widerstände werden durch andere zugehörige Teilsicherheitsbeiwerte dividiert (und damit i.d.R. vermindert) und so ebenfalls die Bemessungswerte für die Widerstände bestimmt. Die Teilsicherheitsbeiwerte müssen für jede Einflussgröße individuell zugeordnet werden, wobei ihre Größe z. B. von der statistischen Streuung der Einflussgröße oder der möglichen Genauigkeit ihrer Ermittlung abhängt. Abschließend wird der Quotient zwischen den Bemessungswerten der Beanspruchungen und den Bemessungswerten der Widerstände ermittelt. Tragfähigkeit ist gegeben, wenn der Wert ≤ 1 ist.

Prinzipiell können Teilsicherheitsbeiwerte auf folgende Weise bestimmt werden:

- durch Kalibration an der bisherigen Erfahrung
- durch statistische Auswertung von Versuchsergebnissen oder Messungen

Auch die Kombination beider o.g. und weiter unten erläuterter Verfahren ist möglich. Dann ist eine spezielle in /39/ beschriebene Verfahrensweise anzuwenden. Die Beziehung zwischen den Teilsicherheitsbeiwerten ist in Abbildung 18 dargestellt, die z. B. teilweise mittels statistischer Verfahren (typischerweise z. B. γ_m) und teilweise auch durch Kalibration z. B. γ_{Rd}, γ_{Ed} ermittelt werden.

Abbildung 18: Beziehung zwischen den einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten /39/

Neben Anforderungen an die Sicherheitsfunktion Tragfähigkeit gibt es auch Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeitsfunktion Nutzung. Da jedoch bei Verlust der Tragfähigkeit Gefahr für Leben und Gesundheit besteht, ist für die Gewährleistung der Tragfähigkeit ein höheres Zuverlässigkeitsniveau (früher: Sicherheitsniveau) einzuhalten als für Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeitsfunktion Nutzung. Es wird also unterschieden zwischen dem Zuverlässigkeitsniveau (= Ausschluss des Bauwerksversagens) bei Gefahr für Leben und Gesundheit und materiellem Schaden, wobei die Abstufung des Zuverlässigkeitsniveaus bzgl. Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit sich i. d. R. nach dem Ausmaß des materiellen Schadens bemisst.

Die Zuverlässigkeit ist somit eine zentrale Größe im Sicherheitsnachweiskonzept, das den Eurocodes zu Grunde liegt. In /39/ wird das Sicherheitsnachweiskonzept beschrieben und ein Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden gegeben. Abbildung 19 zeigt in einem Diagramm die Hierarchie der verschiedenen Methoden zur Kalibrierung der Bemessungsgleichungen für die Grenzzustände mit Teilsicherheitsbeiwerten.

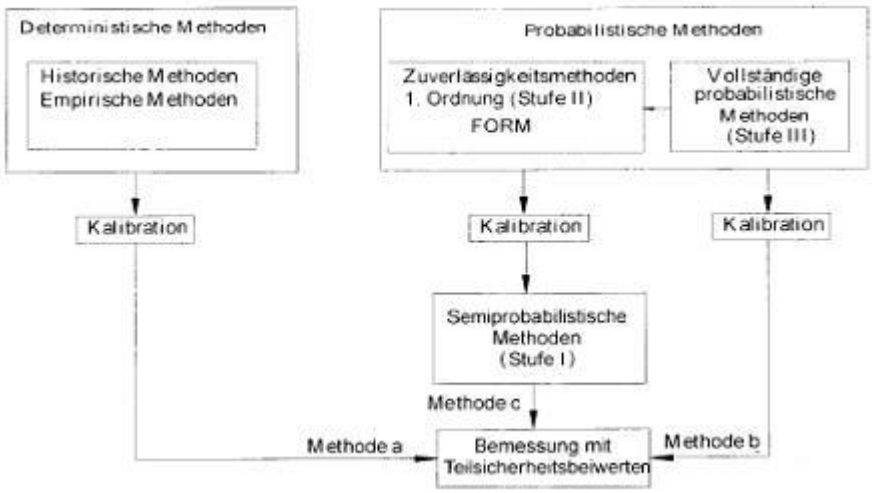


Abbildung 19: Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden /39/

Die probabilistischen Methoden für die Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte können in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden:

- die vollständig probabilistischen Methoden (Stufe III) und
- die Zuverlässigkeitsmethoden 1. Ordnung (FORM) (Stufe II)

Bei den Stufe-II- und Stufe-III-Methoden wird als Maß für die Zuverlässigkeit die Überlebenswahrscheinlichkeit (des Bauwerks) $p_s = (1 - p_f)$ benutzt, wobei p_f die Versagenswahrscheinlichkeit für die betrachtete Versagensart für einen bestimmten Bezugszeitraum ist. Liegt die Versagenswahrscheinlichkeit höher als eine vorgegebene Bezugsgröße p_0, wird das Bauwerk als unsicher betrachtet.

Im Rahmen des Stufe-II-Verfahrens wird der Zuverlässigkeitsindex β als Maß für die Zuverlässigkeit betrachtet. Es gilt $p_f = \Phi(-\beta)$, wobei Φ die kumulative Verteilungsfunktion für die standardisierte Normalverteilung ist. Die Beziehung zwischen p_f und β ist in Tabelle 8 angegeben.

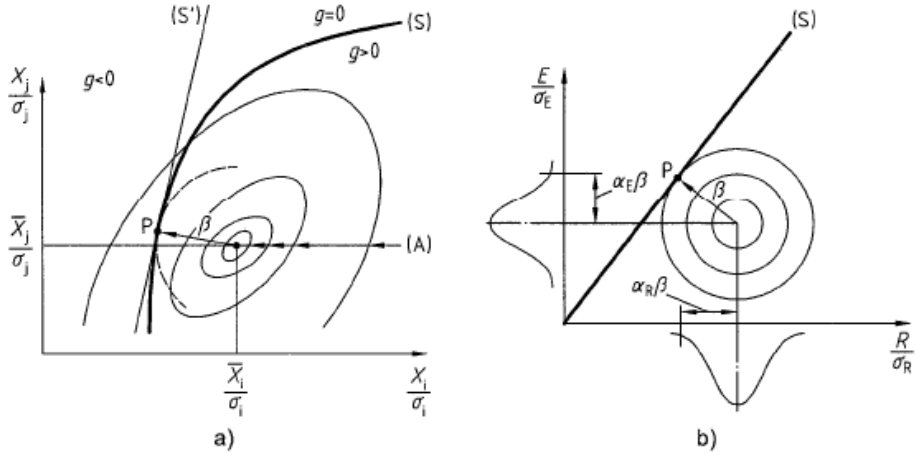
Tabelle 8: Beziehung zwischen β und p_f /39/

p_f	10^{-01}	10^{-02}	10^{-03}	10^{-04}	10^{-05}	10^{-06}	10^{-07}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f kann mit der Grenzzustandsgleichung g derart dargestellt werden, dass für $g > 0$ Überleben und für $g \leq 0$ Versagen eintritt, d. h. $p_f = \text{Prob}(g \leq 0)$.

Wenn R der Widerstand und E die Auswirkung der Einwirkungen ist, dann lautet die Grenzzustandsfunktion $g = R - E$ mit R, E und g als Zufallsvariable. Ist g normal verteilt, wird β als $\beta = \mu_g/\sigma_g$ angenommen, wobei μ_g der Mittelwert von g und σ_g die Standardabweichung von g sind. Dann gilt $\mu_g - \beta\sigma_g = 0$ und $p_f = \text{Prob}(g < 0) = \text{Prob}(g < \mu_g - \beta\sigma_g)$, vgl. auch Abbildung 20.

Bei anderen Verteilungen als der Normalverteilung kann β als konventionelles, d. h. übliches Maß für die Zuverlässigkeit von $p_s = (1 - p_f)$ aufgefasst werden.



Legende

a) Hyperraum der standardisierten Basisvariablen X_i

(A) Linien gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte

(S) Versagensoberfläche

(S′) linearisierte Versagensoberfläche

(P) Bemessungspunkt

b) Ebene der standardisierten (nicht korrelierten) Widerstände R und Beanspruchungen (E)

(S) Versagensgrenze $g = R - E = 0$

(P) Bemessungpunkt

Abbildung 20: Bemessungspunkt und Zuverlässigkeitsindex β nach Methode 1. Ordnung (FORM) /41/

Anzumerken ist, dass insbesondere die erste Generation der Eurocodes /42/ im Wesentlichen auf Methode a (Abbildung 19) beruhen. Die Methode c unter Verwendung des Zuverlässigkeitsindex β nach der Methode 1. Ordnung /39/, /41/ oder gleichwertige Methoden wurden bzw. werden hauptsächlich bei der Weiterentwicklung der Eurocodes angesetzt. In diesem Sinne sind die „Versagenswahrscheinlichkeit“ und der zugehörige Zuverlässigkeitsindex lediglich operative Werte, die nicht die wirklichen Versagensraten ausdrücken, sondern nur für die Kalibrierung der Normen und für Vergleiche der Zuverlässigkeitsniveaus verschiedener Tragwerke verwendet werden.

So beinhaltet der Sicherheitsnachweis mit den Teilsicherheitsbeiwerten der Eurocodes in Form von Gl. 3.1 i. d. R., dass das Bauwerk bei einer vorgegebenen Schranke für die Versagenswahrscheinlichkeit p_f von 10^{-04} bezogen auf die Lebensdauer des Tragwerks im Hinblick auf die Tragfähigkeit mit einem Zuverlässigkeitsniveau von mindestens $(1\text{-}10^{-04})$ nicht vorzeitig versagen wird bzw. dass die Überlebenswahrscheinlichkeit $p_s > (1\text{-}10^{-04})$ bezogen auf die Lebensdauer beträgt. Im Fall der Funktion Tragfähigkeit beträgt also die Schranke für das Versagensrisiko 10^{-04} bezogen auf die Lebensdauer des Bauwerkes. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass diese Schranke in Verbindung mit der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte auch für Barrierenbauwerke für wasser- und umweltgefährdende Stoffe in Bezug auf die Funktion Dichtheit angewandt wird /43/, /44/. Bei diesen Barrierebauwerken ist der Dichtheitsnachweis im Range eines Tragfähigkeitsnachweises zu sehen, da es bei diesen Bauwerken bei Verlust der Dichtheit zu einer Gefahr für Leben und Gesundheit kommen kann /43/. Diese Schranke für das Zuverlässigkeitsniveau wird im Folgenden, auch wenn es sich um operative Werte handelt, für die Barrieren im Endlager zum Vergleich herangezogen.

Wie bereits erwähnt, können die Teilsicherheitsbeiwerte mit statistischen Methoden aus Versuchsdaten unter Einsatz erprobter Baustoffe des Bauwesens ermittelt werden oder, sofern diese Werte in technischen Regelwerken bereits veröffentlicht worden sind, aus diesen übernommen werden. Letzteres gilt in erster Linie für den Bau technischer Barrieren. Die Verwendung von Versuchsdaten ist für geotechnische und geologische Barrieren notwendig, weil die Ermittlung der charakteristischen Werte i. d. R.. standortbezogen für die geologischen Barrieren und ggf. sogar lokationsbezogen für die geotechnischen Barrieren zu erfolgen hat. Dabei ist zu beachten, dass die aus Versuchsdaten ermittelten Werte denselben Grad der Zuverlässigkeit für die zu betrachtenden Grenzzustände aufweisen wie die dazugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte /39/.

Bei der Anwendung entsprechender Teilsicherheitswerte sind die langen Standzeiten von Barrierebauwerken im Endlager zu berücksichtigen. So ist festzustellen, dass sich der Betrachtungszeitraum der Eurocodes an einer Lebensdauer von Bauwerken orientiert, die üblicherweise 50 bis 100 Jahre beträgt. Dieser Sachverhalt ist insbesondere in Bezug auf die Dauerhaftigkeit/Langzeitstabilität der Barrierebauwerke zu berücksichtigen, da die Einwirkung Korrosion, wie die Ausführungen in den vorausgegangenen Kapiteln zeigen, über lange Zeiträume dominant werden kann. Trotzdem dient bei den folgenden Betrachtungen das Zuverlässigkeitsniveau gemäß Eurocodes als Maßstab für die Barrierebauwerke, wobei angenommen wird, dass es bei spezieller Beachtung der Dauerhaftigkeit/Langzeitstabilität auch für endlagerrelevante Lebensdauern gilt.

3.3 Vergleich der Vorgehensweise bei der Langzeitsicherheitsanalyse und bei Sicherheitsnachweisen nach der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte

Ein Vergleich der Vorgehensweise bei der Sicherheitsanalyse für ein Endlager gemäß schweizerischen Nachweiskonzept und der Vorgehensweise bei den Sicherheitsnachweisen im Rahmen zuverlässigkeitsorientierter Sicherheits(nachweis)konzepte gemäß Stand der Technik und die daraus abgeleiteten Bearbeitungsstufen im Rahmen der Nachweisführungen zeigen die Vergleichbarkeit der Vorgehensweise bei unterschiedlicher Begriffsbildung. Abbildung 8 in Kapitel 2.5 zeigt den Ablauf aus FEP Szenarien abzuleiten, diese zu analysieren, um so zu einer Bewertung der Konsequenzen zu gelangen. Im Vergleich dazu wird die Vorgehensweise bei der Anwendung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte im Bauwesen vorgestellt (Abbildung 21), wie sie z. B. bei der technischen Auslegung von geotechnischen Barrieren zur Anwendung kommt.

FEP, Systemkonzept ↓	Identifikation des Systems*), der Einwirkungen und Bemessungssituationen ↓
Sicherheitsnachweiskonzept, Ableitung von Szenarien ↓	Entwicklung von Einwirkungskombinationen für verschiedene Bemessungssituationen ↓
Szenarienanalyse ↓	Ermittlung der Zustandsgrößen für verschiedene Bemessungssituationen ↓
Analyse und Bewertung der Konsequenzen ↓	Vergleich der Zustandsgrößen mit den zulässigen Werten und Bewertung ↓
Robuster Sicherheitsnachweis	Zuverlässigkeitsanalyse**)

*) enthält das Sicherheitsnachweiskonzept **) i.d.R. nicht explizit betrachtet

Abbildung 21: Vergleich der Vorgehensweisen bei der Langzeitsicherheitsanalyse im schweizerischen Nachweiskonzept und den Sicherheitsnachweisen im Bauwesen

In Bezug auf die Vergleichbarkeit der Vorgehensweisen bei den Sicherheitsanalysen ist ergänzend anzumerken, dass im Vergleich zu Abbildung 8 bei dem zuverlässigkeitsorientierten Sicherheitsnachweiskonzept im Bauwesen - wie auch aus Abbildung 21 ersichtlich - einzelne Bearbeitungsschritte anderen Bearbeitungsstufen zugeordnet sind. Während die FEP noch in etwa den Einwirkungen gleichzusetzen sind sowie die verschiedenen Bemessungssituationen dem Basisszenario und den Alternativszenarien entsprechen, sind die Szenarien einschließlich mancher Alternativszenarien z. T. den Einwirkungskombinationen, z. T. aber auch den Bemessungssituationen zuzuordnen. Weiterhin ist festzustellen, dass der Bearbeitungsschritt robustes Sicherheitsnachweiskonzept i. d. R. nicht explizit durchgeführt wird, da hinreichend pessimistische Datengrundlagen z. B. automatisch über das Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden.

3.4 Betrachtung der Barriereeigenschaften unter dem Aspekt der Nachweisbarkeit

Ein wichtiger Aspekt bei der zuverlässigkeitsorientierten Betrachtung in Bezug auf die Nachweisführung der Barrierefunktion ist die Güte der Daten und der Datenermittlung. Die folgende Tabelle 9 zeigt die einzelnen Barrieren in einem Endlager und die nachweisrelevanten Barriereeigenschaften in Bezug auf die Ver-/Behinderung der Radionuklidfreisetzung. Wie Tabelle 9 entnommen werden kann, werden die barrierenrelevanten Eigenschaften auf der Basis von „ entkoppelten“ Versuchen ermittelt, deren Dauer im Verhältnis zum Nachweiszeitraum für ein Endlager kurz ist. Die Prognose des Endlagersystems in den Langzeitsicherheitsanalysen und damit der zeitlichen Entwicklung der Barrieren für endlagerrelevante Zeiträume beruht deshalb in der Regel auf Versuchen (Kurzzeit) und rechnerischen Prognosemodellen. Insofern stellt sich im Hinblick auf die Extrapolation von Versuchsdaten eine ähnliche Frage wie in Bezug auf die Erweiterung der Nachweiszeiträume bzw. der Verlängerung der Lebensdauern für Bauwerke.

Um die damit vorgenommene Extrapolation der Eigenschaften auf lange Zeiträume abzusichern, werden z. B. zum Beleg der Dauerhaftigkeit/Langzeitstabilität der Barrierenbaustoffe natürliche und historische Analoga mit herangezogen. Anhand dieser Analoga kann das langzeitige Verhalten einzelner, ausgewählter Materialien unter z. T. mit dem Endlager vergleichbaren oder sogar konservativeren Umgebungsbedingungen belegt werden. Natürliche bzw. historische Analoga existieren unter anderem für:

- das Korrosionsverhalten und die Langzeitstabilität von Kupfer aufgrund von geologischen Vorkommen gediegenen Kupfers und archäologischer Funde,
- den Nachweis der Stabilität der Abfallmatrix von Brennelementen durch natürlich vorkommende Uranlagerstätten sowie den Naturreaktor in Oklo/Gabun,
- die langzeitige Stabilität von verglasten Abfällen durch Studium natürlicher (vulkanischer) und archäologischer Gläser,
- die langzeitige Stabilität von Tonen und Bentoniten anhand von natürlichen Lagerstätten sowie in Tonen konservierten organischen Materialien.

Anhand der (nicht vollständig) aufgezählten natürlichen und historischen Analoga wird belegt, dass die in den einzelnen Endlagerkonzepten vorgeschlagenen Materialien ihre langfristige Eignung prinzipiell bewiesen haben. Diese Materialien werden deshalb bevorzugt als Baustoffe für (geo-)technische Barrieren eingesetzt.

Bezug nehmend auf die Aussagen bzgl. des Zuverlässigkeitsniveaus der Versuchsdaten in Kapitel 3.2 lässt sich feststellen, dass das Zuverlässigkeitsniveau sehr unterschiedlich ist. So ist z. T. eine große und belastbare Datenbasis vorhanden, z. T. liegen nur exemplarische Werte vor. Dazu ist anzumerken, dass in /39/ Vorgaben zur versuchsgestützten Bemessung vorhanden sind. Da detaillierte Vorgaben allerdings erst der aktuell gültigen Fassung der EN 1990 /39/ zu entnehmen sind, wurden diese bei den bisher durchgeführten Versuchen oft intuitiv richtig umgesetzt, konnten aber nicht systematisch berücksichtigt werden.

Tabelle 9: Nachweisrelevante Barriereeigenschaften und ihre Ermittlung

EBS / Widerstand	*Abfallmatrix*	*Behälter /Ummantelung*	*Puffer, Versatz, Verschlüsse*	*Wirtsgestein*	*Deckgebirge*
Löslichkeit	Bestimmung der Radionuklidlöslichkeit unter endlagernahen Bedingungen in Laborversuchen		Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide unter endlagernahen Bedingungen in Laborversuchen	Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide unter endlagernahen Bedingungen in Laborversuchen	Deckgebirge hat i. d. R. keine Barrierenfunktion, auch wegen Prognoseunsicherheit nach glazialer Einwirkung. Ggf. Ansatz von Verdünnung bei klassischen hydrogeologischen Ansätzen
Korrosion		Korrosionsrate unter endlagernahen Bedingungen in Labor- und Technikumsversuchen, URL Experimente			
Defekte/ Rissbildung		Ermittlung thermomechanischer Parameter für die Auslegung unter endlagernahen Bedingungen (Labor- und Technikumsversuche, Prototyp), Durchführung technischer Auslegungen, Prüf- und QS-Verfahren	Aufsättigung und Quellverhalten, Labor- und Technikumsversuche, URL Experimente, Prüf- und QS-Verfahren		
Transport	Radionuklidfreisetzung aus der Abfallmatrix unter endlagernahen Bedingungen in Laborversuchen		Transport von Radionukliden, Laborversuche, Technikumsversuche und URL Experimente mit Tracern	Transport von Radionukliden, Laborversuche, URL Experimente in Tracern	
			Wasser- und Gastransport, Labor- und Technikumsversuche, URL Experimente	Wasser- und Gastransport, URL Experimente	
			Oberflächendiffusion der Radionuklide, Laborversuche, URL Experimente (an geeigneten Isotopen, Tracern)	Oberflächendiffusion der Radionuklide, Laborversuche, URL Experimente (an geeigneten Isotopen, Tracern)	
Sorption			Sorption von Radionukliden, Laborversuche, URL Experimente (an geeigneten Isotopen, Tracern)	Sorption von Radionukliden, Laborversuche, URL Experimente (an geeigneten Isotopen, Tracern)	

Anmerkung: URL – Underground Research Laboratory (Untertagelabor)

3.5 Anwendung des funktionsbezogenen, risikobasierten Sicherheitsnachweiskonzeptes auf das Mehrbarrierensystem für Endlager

Für das Sicherheitsnachweiskonzept der einzelnen Barrieren eines Mehrbarrierensystems gelten dieselben Überlegungen und Ansätze wie zum Nachweis eines einzelnen Barrierebauwerks, die in dem vorangegangenen Abschnitt vorgestellt und beschrieben wurden.

Jede Barriere eines Mehrbarrierensystems ist wie eine Einzelbarriere gegen Versagen, d. h. den Verlust ihrer Funktionsfähigkeit, nachzuweisen. Handelt es sich bei den Barrieren gemäß Kapitel 3.1 um redundante, voneinander unabhängige Barrieren, z. B. mit anderen Wirkprinzipien, dürfen die Versagenswahrscheinlichkeiten p_f bzw. die Schranken für p_f der einzelnen Barrieren miteinander multipliziert werden, um die Versagenswahrscheinlichkeit bzw. die entsprechenden Schranken für das Mehrbarrierensystem zu erhalten. Dabei ist zu beachten, welche Barrieren jeweils in Kombination aktiv sind, siehe Kapitel 3.1.

Mit Hilfe der Beziehung $E_d \leq R_d$ (Gl. 3.1) wird nach Eurocode der Funktionsnachweis für jede Einzelbarriere geführt. Wird dieser Nachweis mit Hilfe der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte analog zu den Eurocodes geführt, wird, wie bereits beschrieben, eine Schranke für die Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-04} bezogen auf die Lebensdauer des Bauwerkes erreicht. Existiert nun neben einer ersten „Hauptbarriere“ eine zweite Barriere und wird diese ebenfalls mit der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte für ein entsprechendes Zuverlässigkeitsniveau ausgelegt, so gilt für ihre Versagenswahrscheinlichkeit p_f ebenfalls der Zahlenwert 10^{-04} bezogen auf ihre Lebensdauer.

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f unabhängiger in Reihe angeordneter Barrieren bei Mehrbarrierensystemen kann dann durch die Multiplikation der Versagenswahrscheinlichkeiten p_{fi} der Einzelbarrieren nach Gl. 3.8 beschrieben werden:

$$p_f = p_{f1} \cdot p_{f2} \cdot \ldots \cdot p_{fn} \qquad (3.8)$$

Werden also zwei unabhängig voneinander wirkende Barrieren mit dem Instrumentarium des Eurocodes nachgewiesen, so ergibt sich als Versagenswahrscheinlichkeit p_f für vorzeitiges Versagen des Zweibarrierensystems das Produkt der Wahrscheinlichkeiten p_{f1} und p_{f2} der Einzelbarrieren:

$$p_f = 10^{-04} \cdot 10^{-04} = 10^{-08}$$

Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse eines HAW/SF-Endlagers werden Szenariengruppen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von ~10^{-08} /a nicht mehr betrachtet. Z. B. werden im Fall der WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) in den USA Szenariengruppen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 10^{-4} in 10.000 Jahren nicht mehr berücksichtigt /45/. Insofern ist im Falle zweier unabhängig voneinander wirkender Barrieren als Szenario dann höchstens der Ausfall jeweils einer Barriere bei den Langzeitsicherheitsanalysen zu berücksichtigen. Dazu ist anzumerken, dass vorläufig konservativ die Bezugszeiträume pro Lebensdauer und pro Jahr gleichgesetzt werden, da die Vereinheitlichung der unterschiedlichen Bezugszeit-

räume nach Eurocode und endlagerrelevanter Nachweiszeiträume noch der Untersuchung bedarf.

3.6 Exemplarische und vereinfachte Anwendung des Ansatzes nach Eurocodes auf das Mehrbarrierensystem

Mit Hilfe des risikobezogenen Ansatzes entsprechend den Eurocodes wird im Folgenden eine Schranke für die Versagenswahrscheinlichkeit der sicherheitsbestimmenden Barrieren des Multibarrierensystems im Endlager abgeleitet, wobei der Auswahl der sicherheitsbestimmenden Barrieren die Identifikation in Kapitel 3.1 zu Grunde liegt. Dabei wird unterstellt, dass die Schranken für die Versagenswahrscheinlichkeiten auch für endlagerrelevante Lebensdauern/Nachweiszeiträume gelten. Weiterhin wird angenommen, dass für jede Einzelbarriere entsprechend dem technischen Standard eine Risikoschranke für ihr Versagen, d.h. dass sie ihre Funktion nicht mehr erfüllt, angesetzt werden kann.

Wird das zuvor beschriebene und vorgeschlagene Sicherheitsnachweiskonzept unter Verwendung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte angewendet, so ist mit dem Nachweis $E_d \leq R_d$ nach Gl. 3.1 gleichzeitig ein bestimmtes Zuverlässigkeitsniveau verknüpft. D. h. das Risiko, dass die Barriere ihre Funktion nicht erfüllt oder vor Ende ihrer planmäßigen Lebensdauer versagt, unterschreitet die Schranke von 10^{-04}. Die Barriere ist somit in der Lage, den Beanspruchungen, die auf sie einwirken, zuverlässig standzuhalten, ohne ihre Funktionsfähigkeit zu verlieren. So wird z. B. der Kupferbehälter nicht durch den anstehenden Gebirgsdruck zerstört und in seiner Funktionsfähigkeit beeinträchtigt.

3.6.1 Betrachtung ausgewählter Barrieren im KBS-3-Konzept

Für die Betrachtungen werden die Barrieren Behälter und Bentonitpuffer bzw. Versatz zu Grunde gelegt, vgl. dazu die Identifikation der jeweils aktiven Barrieren auf qualitativer Basis in Kapitel 3.1, im Zeitraum der Behälterstandzeit von 100.000 a.

Der in Kapitel 3.2 beschriebene Ansatz wird in vereinfachter Form (siehe Kapitel 3.5) zur Bestimmung der oberen Schranken für die Versagenswahrscheinlichkeit dieses in Reihe angeordneten Zweibarrierensystems angewendet, wie das folgende (vereinfachende) Flussdiagramm veranschaulicht. Das tatsächliche Flussdiagramm ist komplizierter, weil neben anderen Einflussgrößen z. B. noch die geochemischen Einflüsse auf die Behälter bei nicht intaktem Puffer berücksichtigt werden müssen.

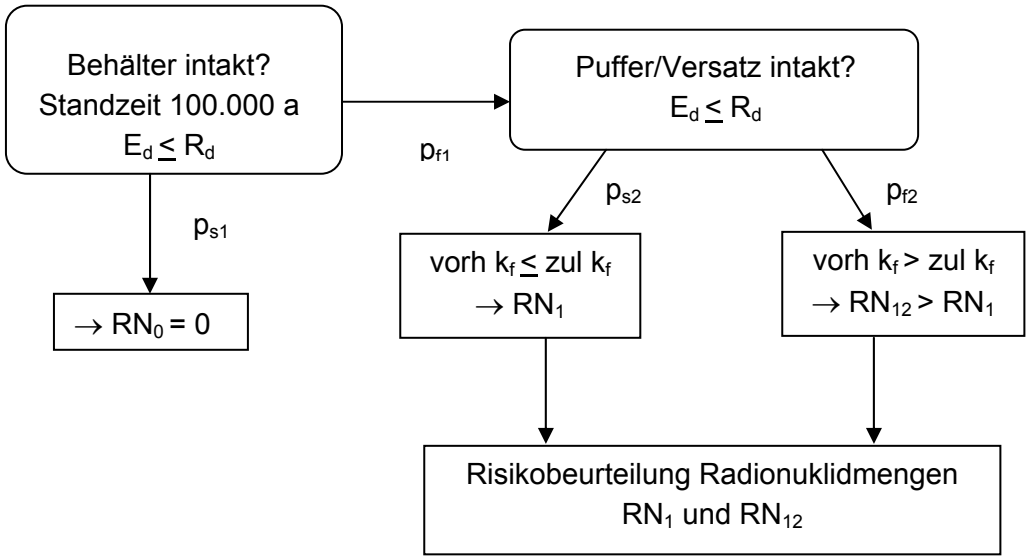


Abbildung 22: Flussdiagramm gestörte/ungestörte Barrierenfunktionen in einem Endlager im Granit

mit ***Betrachtungszeitraum 100.000 a***

- RN_1 Radionuklidmenge in kontaminiertem Wasser bei Austritt aus dem defekten Behälter bei intaktem Puffer
- RN_{12} Radionuklidmenge in kontaminiertem Wasser bei Austritt aus dem defekten Behälter und nicht intaktem Puffer
- p_{f1} Wahrscheinlichkeit vorzeitiges Versagen Behälter ($\leq 10^{-4}$)
- p_{s1} Überlebenswahrscheinlichkeit Behälter ($> 1\text{-}10^{-4}$)
- p_{f2} Wahrscheinlichkeit vorzeitiges Versagen Puffer/Versatz ($\leq 10^{-4}$)
- p_{s2} Überlebenswahrscheinlichkeit Puffer/Versatz ($> 1\text{-}10^{-4}$)

Das Flussdiagramm in Abbildung 22 zeigt, dass bezogen auf eine Behälter–Puffer/Versatz-Kombination die Wahrscheinlichkeit eines gemeinsamen, vorzeitigen Ausfalls unter den vorgenommenen Annahmen nur $p_{f1} \cdot p_{f2} \leq 10^{-8}$ beträgt und somit nicht zu betrachten ist. Anders sieht es jedoch bei Betrachtung der Einlagerung der in Kapitel 2.5.1.2 genannten 4000 - 5000 Behälter aus. Die Wahrscheinlichkeitsschranke, dass wenigstens ein Behälter vorzeitig versagt, steigt auf 0,4 – 0,5. Somit ist dieser Fall – wie auch in der Szenarienanalyse bereits erfolgt – zu betrachten. Der gleiche Sachverhalt gilt jedoch auch für den Bentonitpuffer. Bei 4000 - 5000 Bentonitpuffern steigt die Wahrscheinlichkeit, dass einer der Bentonitpuffer seine Funktion nicht oder nur eingeschränkt erfüllt, unter den vorgenommenen Annahmen auf ebenfalls 0,4 bis 0,5 an. Diese beiden Fälle sind also zu betrachten. Die Wahrscheinlichkeitsschranke, dass eine Kombination von defektem Behälter und einem seine Funktion nicht wie vorgesehen erfüllenden Bentonitpuffer liegt jedoch wiederum bei 10^{-4} und damit deutlich niedriger. Allerdings sollte dieser Fall ergänzend betrachtet werden.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der kombinatorische Ansatz nur gilt, wenn Einwirkungen bzw. Kombinationen von Einwirkungen hinreichend zuverlässig ausgeschlossen werden können, die die Funktion beider Barrieren gleichermaßen beeinträchtigen. Ein Beispiel für eine Einwirkung, die die Funktion beider Barrieren gleichermaßen beeinträchtigt, wäre z. B. ein Versatz von mehr als 10 cm durch Gesteinsbewegungen infolge Erdbeben (Kapitel 2.5.1.2).

Das Flussdiagramm in Abbildung 22 demonstriert beispielhaft, wie die auslegungsbestimmenden Kombinationen für das Mehrbarrierensystem auf Grundlage der zuverlässigkeitsorientierten Betrachtung nach Eurocode ermittelt werden können. Es liefert jedoch keine Aussagen über eine möglicherweise freigesetzte Dosis, weil diese von den Funktionsanforderungen abhängt, die der jeweiligen Barriere zugewiesen werden. Aus den notwendigen Berechnungskombinationen, den Funktionsanforderungen an die Barrieren und den ggf. freigesetzten Radionukliden ergibt sich die freigesetzte Dosis, die in die Risikobewertung einfließt, siehe dazu Kapitel 3.7 und 3.8.

3.6.2 Betrachtung ausgewählter Barrieren im Opalinuston-Projekt

Wie im Falle der Barrieren im KBS-3-Konzept wird für die Betrachtungen ein Zeitraum von 100.000 a zu Grunde gelegt. Da die Behälterstandzeit mindestens 1000 a beträgt, ist im Nachweiszeitraum von 100.000 a der Ausfall der Behälter zu berücksichtigen. Der Behälter stellt für ein Endlager im Tongestein, wie schon in Kapitel 3.1 festgestellt, keine „Hauptbarriere“ dar. Berücksichtigt werden deshalb im Wesentlichen die Barrieren Puffer/Versatz und die parallel angeordneten Barrieren Wirtsgestein und Verschlüsse. Im relevanten Zeitraum ist ein in Reihe angeordnetes Zweibarrierensystem aktiv, wie das (vereinfachende) Flussdiagramm in Abbildung 23 zeigt. Es wird wiederum für die Bestimmung einer oberen Schranke für die Versagenswahrscheinlichkeit der vereinfachte Ansatz gemäß Kapitel 3.5 verwendet. Das tatsächliche Flussdiagramm ist komplizierter, weil die Barrieren Puffer/Versatz und Wirtsgestein/Verschlüsse eine Redundanz aufgrund diversitärer Funktionsprinzipien besitzen. Zum einen weisen sie aufgrund ihrer geringen hydraulischen Leitfähigkeit eine abdichtende Funktion auf, zum anderen zeigen sie aufgrund ihrer Sorptionskapazität eine Rückhaltefunktion, die nicht zwangsläufig an geringe Transportgeschwindigkeiten gebunden ist, sondern auch auf langen Fließwegen auftritt.

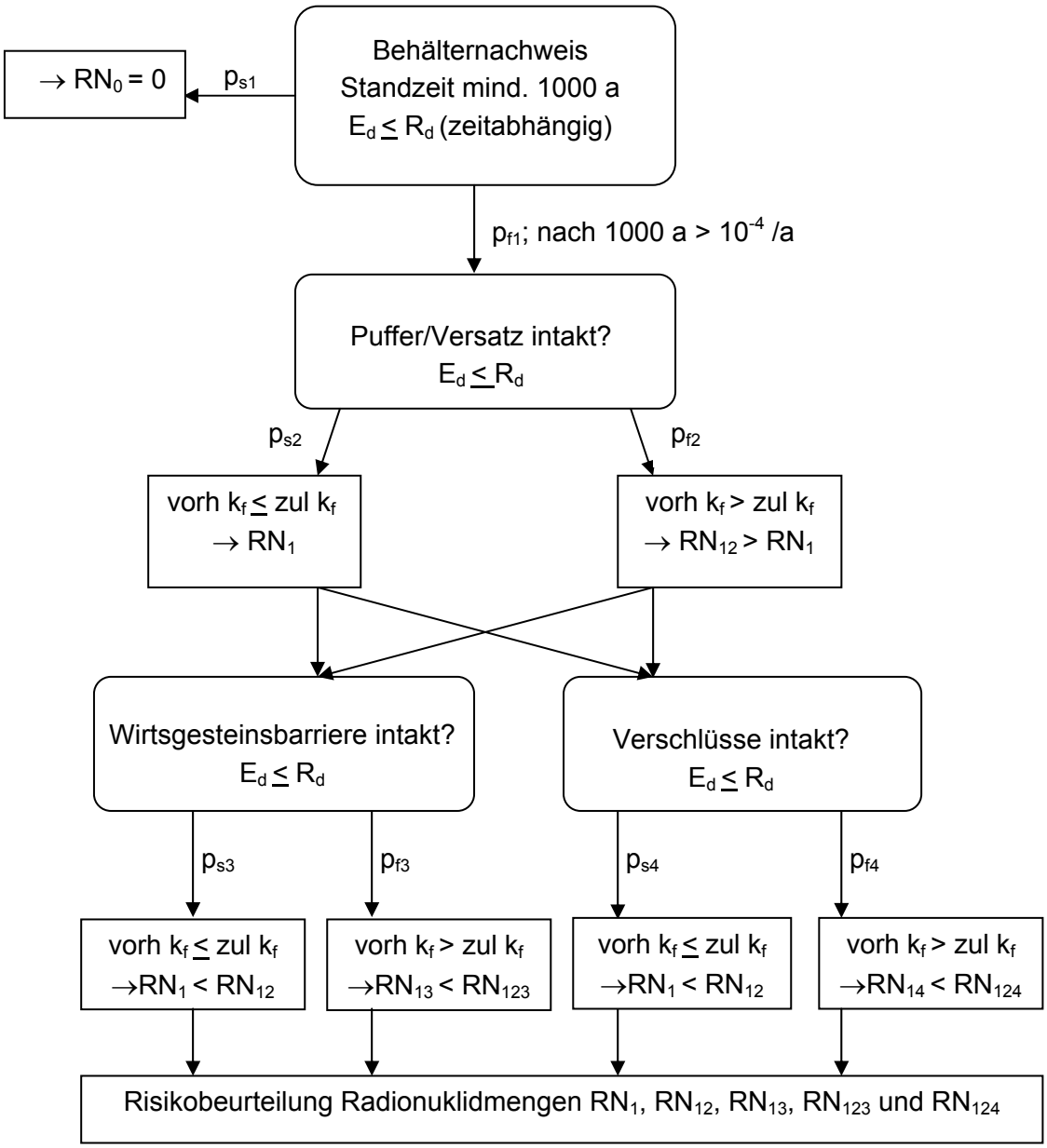


Abbildung 23: Flussdiagramm gestörte/ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Tongestein

mit ***Betrachtungszeitraum 100.000 a***

RN_1 Radionuklidmenge in kontaminiertem Wasser nach Behälterversagen

RN_{12} Radionuklidmenge in kontaminiertem Wasser nach Behälterversagen und nicht intaktem Puffer

RN_{13} Radionuklidmenge in kontaminiertem Wasser nach Behälterversagen bei Austritt aus dem intakten Puffer, aber nicht intaktem Wirtsgestein

RN_{123} Radionuklidmenge in kontaminiertem Wasser nach Behälterversagen, nicht intaktem Puffer und nicht intaktem Wirtsgestein

RN_{124} Radionuklidmenge in kontaminiertem Wasser nach Behälterversagen, nicht intaktem Puffer und nicht intakten Verschlüssen

p_{f1} Wahrscheinlichkeit vorzeitiges Versagen Behälter ($\leq 10^{-4}$, nach planmäßiger Standzeit größer)

p_{s1} Überlebenswahrscheinlichkeit Behälter ($>1\text{-}10^{-4}$, nach planmäßiger Standzeit kleiner)

p_{f2} Wahrscheinlichkeit vorzeitiges Versagen Puffer/Versatz ($\leq 10^{-4}$)

p_{s2} Überlebenswahrscheinlichkeit Puffer/Versatz ($> 1\text{-}10^{-4}$)

p_{f3} Versagenswahrscheinlichkeit Wirtsgesteinsbarriere (gesonderte Bewertung erforderlich)

p_{s3} Überlebenswahrscheinlichkeit Wirtsgesteinsbarriere (gesonderte Bewertung erforderlich)

p_{f4} Wahrscheinlichkeit vorzeitiges Versagen Verschluss ($\leq 10^{-4}$)

p_{s4} Überlebenswahrscheinlichkeit Verschluss ($> 1\text{-}10^{-4}$)

Für die folgenden Betrachtungen wird die Barrierenkombination Puffer/Versatz – Verschlüsse herangezogen, da auf diese das technische Sicherheitsnachweiskonzept der Eurocodes anwendbar ist, während das Zuverlässigkeitsniveau der Wirtsgesteinsbarriere gesondert ermittelt werden muss. Das Flussdiagramm in Abbildung 23 zeigt, dass bezogen auf eine Puffer/Versatz – Verschluss Kombination die Wahrscheinlichkeit eines gemeinsamen vorzeitigen Ausfalls unter den vorgenommenen Annahmen nur $p_{f2} \cdot p_{f4} \leq 10^{-8}$ beträgt und somit nicht zu betrachten ist. Anders sieht es jedoch bei Verwendung von mehr als z. B. 1000 Bentonitpuffern aus. Die Wahrscheinlichkeitsschranke dafür, dass einer der Bentonitpuffer seine Funktion nicht oder nur eingeschränkt erfüllt, steigt bei angenommen 1000 Bentonitpuffern auf bis zu 0,1 an. Es ist also die Kombination von funktionsunfähigem Bentonitpuffer und Verschlüssen zu betrachten. Bei den Verschlüssen handelt es sich aber um zwei Verschlüsse, den Streckenverschluss und den Schachtverschluss, die jeweils in Reihe geschaltet sind und deren Wahrscheinlichkeit für vorzeitiges Versagen jeweils kleiner 10^{-4} ist, so dass ein gemeinsamer Ausfall von Schacht- und Streckenverschlüssen nicht berücksichtigt werden muss. Es wird deutlich, dass die Barrierenfunktion des Bentonitpuffers bei intaktem Wirtsgestein von untergeordneter Bedeutung ist. Dies gilt wie im Falle des Endlagerkonzeptes im Granit allerdings nur, wenn Einwirkungen hinreichend zuverlässig ausgeschlossen werden, die die Funktion von jeweils zwei in Reihe angeordneten Barrieren gleichermaßen beeinträchtigen, z. B. glaziale Einwirkungen. Zu der untergeordneten Bedeutung des Bentonitpuffers ist weiterhin anzumerken, dass sich diese ohne Berücksichtigung der Rückhaltewirkung in Folge Sorption ergibt. Für die Fragestellung Rückhaltung durch Sorption ist der Bentonitpuffer von hoher Bedeutung, da die geochemischen Bedingungen im Nahfeld der Behälter am besten bekannt sind und deshalb am zuverlässigsten beurteilt werden können /40/.

Das Flussdiagramm in Abbildung 23 demonstriert erneut, wie die auslegungsbestimmenden Kombinationen für das Mehrbarrierensystem auf Grundlage der zuverlässigkeitsorientierten Betrachtung nach Eurocode ermittelt werden können. Es liefert jedoch, wie auch im Falle eines Endlagers im Granit, keine Aussagen über eine möglicherweise freigesetzte Dosis, weil diese von den Funktionsanforderungen abhängt, die der jeweiligen Barriere zugewiesen werden. Aus den notwendigen Berechnungskombinationen, den Funktionsanforderungen an die Barrieren und den ggf. freigesetzten Radionukliden ergibt sich die potenziell freigesetzte Dosis, die in eine Risikobewertung einfließt, siehe dazu Kapitel 3.7 und 3.8.

3.6.3 Bemessungssituationen und Grenzzustände für die Barrieren im Endlager

Wie bereits in Kapitel 3.2 angegeben, werden in den Eurocodes verschiedene Bemessungssituationen betrachtet, die sowohl in Bezug auf die Nutzungsbedingungen des Bauwerks als auch die Bezugszeiträume unterschieden werden. Innerhalb einer Bemessungssituation werden i. d. R. verschiedene Einwirkungskombinationen betrachtet. Eine Bemessungssituation entspricht gemäß Abbildung 8 und Abbildung 21 am ehesten einem Szenario mit Variantenbetrachtungen, wobei wiederum übliche und außergewöhnliche Bemessungssituationen unterschieden werden. Dabei ist es möglich, dass die verschiedenen Bemessungssituationen sowohl zeitlich aufeinander folgen als auch dass sie alternativ ohne Präferenz einer Bemessungssituation behandelt werden, d. h. sie werden im Sinne von alternativen „Referenzszenarien“ behandelt. Eine der zeitlichen Abfolge von Bemessungssituationen analoge Betrachtung der Endlagerentwicklung ist ebenfalls üblich, wie Abbildung 24 zeigt /46/.

Aus Abbildung 24 geht hervor, dass in den aufgeführten Phasen eines Endlagers nicht nur die FEP bzw. FEP-Kombinationen von Bedeutung sind, sondern auch die allgemeine Charakterisierung der (Nutzungs-)Bedingungen in ein Szenario eingeht. Sie sind in Kapitel 2.5.1.2 für das schweizerische Opalinuston-Projekt als allgemeine Annahmen und Randbedingungen z. B. für das Basisszenario beschrieben. Innerhalb des Basisszenarios werden verschiedene Variationen in vergleichbarer Weise betrachtet, wie für Bemessungssituationen verschiedene Einwirkungen und Einwirkungskombinationen zu betrachten sind.

Bezogen auf die Barrieren eines Endlagers charakterisieren die verschiedenen Bemessungssituationen das allgemeine Umfeld, das herrscht, wenn die Barrieren den Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen unterworfen sind. Für verschiedene, insbesondere zeitlich aufeinander folgende Bemessungssituationen und die zugehörigen Einwirkungskombinationen sind für die einzelnen Barrieren ggf. unterschiedliche Grenzzustandsbedingungen/ Versagensmechanismen zu betrachten. In Anlehnung an Abbildung 24 ist es auch für die barrierespezifischen Bemessungssituationen sinnvoll, die Betriebs-, die transiente, die monotone/stationäre und ggf. auch die geologische Phase zu unterscheiden. Weiterhin sind für die Barrieren i. d. R. die Bauzustände zu betrachten, vgl. Kapitel 3.2. Außergewöhnlichen Bemessungssituationen können die Barrieren nur in der Betriebsphase ausgesetzt sein. Die Situation Erdbeben ist, wie die Ausführungen in Kapitel 2.5.1.2 zeigen, für Barrieren durchaus zu betrachten.

Wie bereits erwähnt, sind für die o. g. Bemessungssituationen für die jeweiligen Barrieren verschiedene Grenzzustände zu betrachten. Beispiele sind in Tabelle 10 aufgeführt, wobei an dieser Stelle angemerkt werden soll, dass auf die Auslegung einzelner Barrieren und die zu betrachtenden Grenzzustände in Kapitel 4 noch vertieft eingegangen wird. Unter Zugrundelegung der Angaben in Kapitel 2 lassen sich für einzelne Barrieren die in Tabelle 10 angegebenen, notwendigen Nachweise bzgl. der für die Grenzzustände ableiten.

Jahre	100	500	10^3	10^4	10^5	10^6
Situation	Transiente Phase	Monotone/stationäre Phase		Geologische Phase		
Phänomen						
thermisch	Thermische Phase					
	THM-Kopplung					
hydraulisch	Wiederauf-sättigung einzelner Bereiche	Wiederaufsättigung ganzer Einlagerungsbereiche		Gesättigtes Medium		
		Konvergenzbedingte Flüsse			Flüsse gemäß natürlicher Gradienten	
mechanisch	Konvergenz Konsolidierung des Tons, zunehmender Einschluss			Abnahme der mechanischen Widerstandsfähigkeit		
				Zunehmende Auflast aus geologischem Medium	Mechanisches Gleichgewicht	
chemisch	Transiente oxidierende/ reduzierende Bedingungen	Umwandlung der Komponenten in reduzierendem Medium			Chemisches Gleichgewicht	
radiologisch	Radiolyse					
Radionuklide			Beginn RN-Freisetzung	RN-Transport innerhalb der Einlagerungsbereiche	RN-Transport aus den Einlagerungsbereichen	

Abbildung 24: Zeitliche Gliederung der Endlagerentwicklung in Zeitphasen am Beispiel (nach ANDRA /46/) des französischen Konzepts im Tongestein

Tabelle 10: Barriere und Einzelnachweise für verschiedene Grenzzustände

Barriere	***Nachweise***
Behälter einschließlich Schweißnähten, Verschraubungen u. ä.	• Festigkeitsnachweise unter Berücksichtigung kombinierter thermischer und mechanischer Beanspruchungen • Nachweis der Dauerhaftigkeit unter Berücksichtigung des geochemischen Milieus und des Transports von Wässern
Puffer/Versatz einschließlich einbaubedingter (Arbeits)fugen und Kontaktzonen	• Nachweis der Rissbeschränkung unter kombinierter Berücksichtigung von thermischen und (hydro)mechanischen Beanspruchungen • Nachweis der Erosions- und Suffosionssicherheit (Piping) unter hydromechanischen Beanspruchungen • Nachweis der planmäßigen Transporteigenschaften unter Berücksichtigung thermischer und geochemischer Einwirkungen • Nachweis der Aufnahme von Verschiebungsdifferenzen aus Erdbeben
Wirtsgestein einschließlich Grubengebäude und Ausbau, wenn Ausbau erforderlich	• Tragfähigkeitsnachweise unter Betrachtung der kombinierten thermischen und mechanischen Beanspruchungen • Nachweis der Rissbeschränkung unter kombinierter thermischer und (hydro)mechanischer Beanspruchungen • Nachweis der planmäßigen Transporteigenschaften unter Berücksichtigung thermischer und geochemischer Einwirkungen
Verschlüsse einschließlich Widerlager	• Nachweis der Tragfähigkeit unter (hydro)mechanischer Belastung • Nachweis der Verformungsbeschränkung unter (hydro)mechanischer Belastung • Nachweis der Dauerhaftigkeit/Langzeitstabilität • Nachweis der Rissbeschränkung unter (hydro)mechanischer Belastung • Nachweis der planmäßigen Transporteigenschaften unter Berücksichtigung des geochemischen Milieus

Die o. a. Nachweise sind für die Endlagerkonzepte im Granit und Tongestein gleichermaßen zu führen. Ob ein Nachweis tatsächlich erforderlich ist, ergibt sich aus den Funktionsanforderungen an die jeweilige Barriere bzw. Komponente und in Abhängigkeit der Bemessungssituation. Hier sind Nachweise zusammengefasst, die sich aus Kapitel 2 ergeben und die gemäß funktionsbezogenem Sicherheitsnachweiskonzept zu führen sind. Dabei ist es sinnvoll, die in Abbildung 24 angegebenen Phasen als Bemessungssituationen aufzunehmen und die Randbedingungen für die Barrieren bzw. Komponenten entsprechend diesen Phasen zu definieren. Dies gilt insbesondere, da für die einzelnen Barrieren in den verschiedenen Phasen sich die Anforderungen bzw. die zu betrachtenden Grenzzustände unterscheiden.

3.7 Risiko – die vereinheitlichte Bewertungsbasis

In Kapitel 3.5 und 3.6 ist beschrieben, wie eine Wahrscheinlichkeitsschranke für das Versagen der Funktionsfähigkeit einer Barriere bzw. eines Mehrbarrierensystems abgeleitet werden kann. Welche Anforderungen jedoch an ihre Funktionsfähigkeit zu stellen sind, ergibt sich in Deutschland aus den Vorgaben des § 47 der Strahlenschutzverordnung. Die einzuhaltenden Werte der Strahlenschutzverordnung sind so bestimmt worden, dass durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen, zu denen auch ein Endlager in seiner Betriebsphase zählt, Einzelpersonen der Bevölkerung keiner zusätzlichen Dosisrate ausgesetzt werden, die größer ist als die Schwankung der natürlichen Hintergrundstrahlung. Sinngemäß wird diese Regelung derzeit auch auf ein Endlager in der Nachbetriebsphase angewendet /47/, d. h. aus einem Endlager freigesetzte Radionuklide dürfen nicht zu Individualdosen führen, die über diesen Werten liegen.

Gemäß Strahlenschutzverordnung ist eine obere Grenze für die Individualdosis D von 0,3 mSv/a festgesetzt. In der Schweiz /32/ wird dieser Wert mit 0,1 mSv/a beziffert. In Schweden /26/ ist der Grenzwert auf Grundlage des individuellen Risikos von $RI(D) = 10^{-05}$/a, einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden, zu 0,15 mSv/a festgelegt. Die Regelung in Schweden zeigt, dass äquivalent zur Betrachtung der Individualdosis eine Risikobetrachtung möglich ist, die das Risiko einen Gesundheitsschaden zu erleiden mit der Dosis verknüpft. Zur Ermittlung des Risikos wird eine lineare Dosis-Wirkungsbeziehung angesetzt /48/

$$RI = (5{,}7 \cdot 10^{-2}\ /\mathrm{Sv}) \cdot D \qquad (3.9)$$

mit

D = Dosisrate [Sv/a]
$5{,}7 \cdot 10^{-2}$ = Risikokoeffizient [1/Sv]
R = individuelles, radiologisches Risiko

Mit Hilfe dieser Beziehung lässt sich auf Grundlage der meist sehr konservativen Prognose der freigesetzten Dosis ebenso konservativ das individuelle Risiko ermitteln, das sich bei ungestörter Entwicklung des Endlagers bzw. anforderungsgerechter Funktionsfähigkeit des

Mehrbarrierensystems ergibt. Allerdings ist diese Beziehung nicht anwendbar, wenn es sich um Szenarien mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und vergleichsweise großer Freisetzung handelt. Die Kenntnis der Individualdosis allein führt dann nicht zu einer zufriedenstellenden Beurteilung, weil nur die freigesetzte Dosis, nicht aber die Wahrscheinlichkeit ihres Eintritts berücksichtigt wird. Deshalb empfiehlt die ICRP /49/, /50/ zur Beurteilung eines Endlagers folgende zwei Prinzipien einzuhalten:

(1) Oberer Dosisrichtwert (dose upper bound): Für Freisetzungen aus einem Endlager infolge von „allmählichen“ (stetigen) Prozessen soll die erwartete Jahresdosis für Personen der kritischen Gruppe geringer sein als der obere Dosisrichtwert (dose upper bound), der von den nationalen Behörden orientiert an den individuellen Dosisgrenzwerten zugeteilt wurde, welcher gegenwärtig einer mittleren jährlichen Dosis von 1 mSv bei länger anhaltender Exposition entspricht.
(2) Oberer Risikorichtwert (risk upper bound): Das Sicherheitsniveau eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle soll so sein, dass das vom Endlager ausgehende vorhersehbare Risiko eines Gesundheitsschadens in einem Jahr für eine Person der kritischen Gruppe infolge von zerstörerischen (unstetigen) Prozessen, die nicht über das (vorstehende) Prinzip (1) erfasst sind, geringer ist als ein oberer Risikorichtwert (risk upper bound), der von den nationalen Behörden orientiert an dem individuellen Risikogrenzwert für Gesundheitsschäden von Eins zu Hunderttausend pro Jahr (10^{-05}/a) zugeteilt wurde.

Damit lässt sich Gl. 3.9 wie folgt umformulieren und auf die ungestörte und gestörte Entwicklung eines Endlagers anwenden.

$$RI = p_D \cdot (5{,}7 \cdot 10^{-2}\ /Sv) \cdot D \qquad (3.10)$$

mit

p_D = Wahrscheinlichkeit der Freisetzung der Dosis D

Die Ermittlung des individuellen Risikos berücksichtigt nicht nur die Dosis sondern auch die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens. Das individuelle Risiko erlaubt die Kombination von Szenarien untereinander, die mit einer Gewichtung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in die Analyse eingehen. Auf dieser Basis ist eine gesamtheitliche Bewertung der Auswirkungen eines Endlagers möglich, und es wird einerseits verhindert, dass das individuelle Risiko nicht von wenig wahrscheinlichen Szenarien mit möglicherweise hohen Freisetzungen bestimmt wird, andererseits, dass keine Optimierung in Bezug auf wenig wahrscheinliche Szenarien erfolgt, möglicherweise unter Inkaufnahme höherer Individualrisiken aus der wahrscheinlichen, ungestörten Entwicklung.

Aufbauend auf dem vorgestellten methodischen Ansatz zum Funktionsnachweis von Barrieren entsprechend dem Sicherheitskonzept der Eurocodes sollen in den nächsten Abschnitten auf Grundlage von Gl. 3.10 Zahlenwerte für das individuelle Risiko abgeschätzt werden. Die Zahlenwerte für die freigesetzen Individualdosen werden dazu der internationalen Literatur entnommen.

Mittels des Risikoansatzes ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit, dass eine Barriere ihre Funktion nicht erfüllt, zu verknüpfen mit der Dosis, die in diesem Fall freigesetzt wird, und so diesen Sachverhalt auf die einheitliche Bewertungsbasis Risiko zu beziehen.

Weiterhin erlaubt die Bezugsbasis Risiko den Vergleich des von einem Endlager ausgehenden Risikos mit anderen, gesellschaftlich akzeptierten Risiken. Dieser Vergleich wird in Kapitel 5 vorgenommen.

Als gesellschaftlich akzeptiertes Risiko wird i. d. R. international übereinstimmend ein Wert von 10^{-06}/a benannt, was einem Lebenszeitrisiko von 10^{-4} entspricht. Dieser Wert findet auch für die von einem Endlager ausgehenden Risiken Verwendung, vgl. z. B. Kapitel 2.5.1.2 (Human intrusion).

3.8 Abschätzung der oberen Risikoschranke bei ungestörter Entwicklung eines Endlagers

Im Folgenden werden auf der Grundlage von veröffentlichten Ergebnissen zu freigesetzten Dosisraten obere Schanken für das von einem Endlager ausgehende individuelle Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens bestimmt. Dazu werden u. a. die in Kapitel 3.2, 3.5 und 3.6 durchgeführten Betrachtungen zu den Versagensrisiken von einzelnen Barrieren benutzt. Wie schon in Kapitel 3.6 erläutert, lassen sich aus den Eurocodes nur Angaben zu Schranken für den Verlust der Funktionsfähigkeit einer Barriere ableiten. Welche Menge an Radionukliden freigesetzt wird, wenn es zum Verlust der Funktionsfähigkeit kommt, muss durch Freisetzungsberechnungen bestimmt werden. Die potenziell freigesetzten Individualdosen werden hier der Literatur entnommen.

Zum Vergleich wird das individuelle Risiko ermittelt, das sich auf Basis von aus der Literatur entnommenen Ergebnissen probabilistischer Analysen ergibt. Dazu wird nachstehend die Vorgehensweise, die den probabilistischen Analysen zu Grunde liegt, kurz vorgestellt. Die zur Erläuterung verwendeten Angaben und Grafiken sind dem schweizerischen Opalinuston-Projekt entnommen.

In Kapitel 2.5.2.1 ist das Basisszenario im schweizerischen Opalinuston-Projekt beschrieben. In Tabelle 2 sind für ausgewählte EBS-Komponenten FEP zusammengestellt und die erwartete Entwicklung bzw. die erwarteten Eigenschaften sind beschrieben. Nun nehmen Eigenschaften wie z. B. die hydraulische Leitfähigkeit keine festen Werte an, sondern unterliegen i. d. R. Streuungen, während Entwicklungen z. B. mit Prognoseunsicherheiten behaftet sind. Bei probabilistischen Analysen wird dieser Sachverhalt berücksichtigt, indem Parametern keine festen Werte zugewiesen werden, sondern für diese geeignete Verteilungsfunktionen angenommen werden, vgl. Abbildung 25.

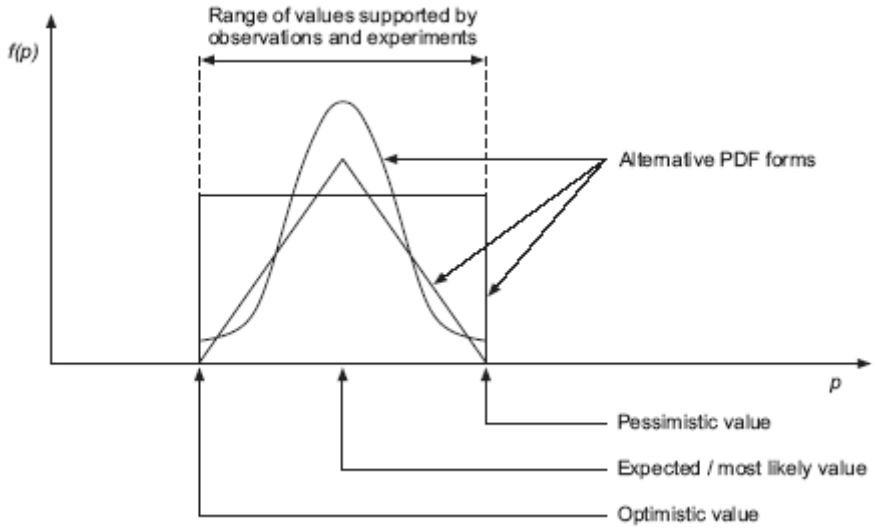


Abbildung 25: Aus Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgeleitete Parametervariationen für das Basisszenario (Referenzfall) im schweizerischen Sicherheitsnachweis /32/

In den probabilistischen Langzeitsicherheitsanalysen wird nunmehr nicht mehr mit festen Eingangsgrößen gearbeitet, sondern diese werden zufällig aus dem durch die Verteilungsfunktionen aufgespannten Parameterraum gewählt, z. B. mittels Monte-Carlo-Verfahren. Erfolgt die Wahl der Eingangsgrößen ohne weitere Einschränkungen aus dem gesamten Parameterraum, liegt es in der Natur der Sache, dass insbesondere bei wenigen Simulationen, im Folgenden als Realisationen bezeichnet, sich die Ergebnisse vorzugsweise um die eher unkritischen „Mittelwerte“ gruppieren. D. h., um wenig wahrscheinliche Parameterkombinationen, die aber ggf. zu hohen Radionuklidfreisetzungen und radiologischen Konsequenzen führen, mit einer hinreichenden statistischen Sicherheit zu erfassen, ist eine sehr große Zahl an Realisationen (10^5 oder größer) erforderlich. Um die Zahl der Realisationen im Rahmen realistischer Rechenleistungen zu begrenzen, ist es möglich, bestimmte Aufteilungen des Parameterraums zu erzwingen. Als Beispiel sei das Hypercube-Verfahren genannt, mit dem eine gleichmäßige Belegung des Parameterraums erzielt wird. Weiterhin ist es z. B. möglich, einen bestimmten Anteil pessimistisch gewählter Parameter bei den Realisationen zu erzwingen. Diese Vorgehensweise wird bei den probabilistischen Langzeitsicherheitsanalyen vorzugsweise gewählt. Sie ist plausibel, allerdings konnte der Literatur nicht entnommen werden, wie bestimmte Anteile pessimistisch gewählter Parameter begründet sind bzw. welcher Zuverlässigkeitsgedanke dahinter steht.

Im Gegensatz dazu beruht, wie bereits beschrieben, die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte nach Eurocode auf dem Zuverlässigkeitsansatz. Bei ordnungsgemäßer Auslegung lässt sich den Barrieren in Abhängigkeit von ihrer tatsächlichen konstruktiven Gestaltung (einschließlich der Güte der verwendeten Qualitätssicherungsverfahren) ein Zuverlässigkeitsniveau in Bezug auf ihre Funktionsfähigkeit zuweisen. Dabei kommt, wie schon in Kapitel 3.2 beschrieben, folgende Vorgehensweise zur Anwendung. Über die Grenzzustandsbedingungen nach Gl. 3.1 werden unter Zugrundelegung der Bemessungswerte in den Einwirkungsmodellen und Widerstandsmodellen, die dem vorgegebenen Zuverlässigkeitsniveau entsprechend ermittelt werden, nur noch die möglicherweise kritischen und damit auslegungsbestimmen-

den Grenzbereiche überprüft. Es werden praktisch also nur noch die möglicherweise kritischen Ränder der Verteilungsfunktionen von Parametern und Parameterkombinationen im Parameterraum betrachtet, vgl. Abbildung 20. Dazu sind vergleichsweise nur noch wenige Realisationen notwendig.

Am Beispiel des schwedischen KBS-3-Konzepts für ein Endlager im Granit und des schweizerischen Opalinuston-Projekts für ein Endlager im Tongestein wird in den folgenden Kapiteln, soweit es die veröffentlichten Ergebnisse zulassen, eine Schranke für das jeweilige individuelle Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens ermittelt. Dabei werden sowohl die Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen aus der Langzeitsicherheitsanalyse herangezogen als auch die Zuverlässigkeitsbetrachtungen nach Eurocode. Aufgrund des auch in der technischen Realisierung weit fortgeschrittenen Entwicklungsstandes eignet sich insbesondere das schwedische KBS-3-Konzept gut für eine vergleichende Darstellung der klassischen Vorgehensweise bei der Langzeitsicherheitsanalyse und der Vorgehensweise nach Eurocode.

3.8.1 Betrachtung eines Endlagers im Granit

3.8.1.1 Ungestörte Entwicklung (Basisszenario) für das KBS-3-Konzept im Granit

Das Basisszenario ist in Kapitel 2.5.1.1 beschrieben. Die dem Basisszenario zu Grunde liegenden Annahmen und Randbedingungen für das Endlagersystem sind nachstehend wiederholt:

- keine Klimaänderungen,
- weitergehende Landhebung (wie derzeit),
- keine Erdbeben,
- kein menschlicher Eingriff in das Endlager.

Es werden der Abbau der Radiotoxizität und die damit verbundene Produktion von Zerfallswärme auf das Endlager berücksichtigt. Weiterhin finden die hydraulische Entwicklung durch die Aufsättigung des Puffers und des Versatzes, die ihre planmäßige Funktion erfüllen, sowie die langzeitigen Flüsse des (tiefen) Grundwassers in der Geosphäre und in die Biosphäre Eingang in das Basisszenario. Unter diesen Annahmen und Randbedingungen wird die Integrität des Kupferbehälters nachgewiesen. Eine Freisetzung von Radionukliden findet nicht statt, wobei analog zu älteren Betrachtungen ein Nachweiszeitraum von 100.000 Jahren zu Grunde gelegt wird. Der sichere Einschluss der Radionuklide ist im Basisszenario für diesen Zeitraum gewährleistet. Dementsprechend besteht auch kein individuelles, radiologisches Risiko.

Ob dieses Basisszenario auch für 1 Mio. Jahre angesetzt wird oder abdeckend nur noch das in Kapitel 2.5.1.2 beschriebene Behälter-Defekt-Szenario betrachtet wird, ließ sich der Literatur nicht entnehmen.

3.8.1.2 Gestörte Entwicklung des Endlagers im KBS-3-Konzept

Von der SKB wurden auch Berechnungsergebnisse zur Radionuklidfreisetzung vorgestellt /26/. Die Simulation berücksichtigt einen defekten Behälter auf ca. 5000 produzierte Behälter. Analog zu Kapitel 2.5.1.2 wird dieses Szenario der gestörten Entwicklung des Endlagers zugeordnet, obwohl, wie bereits erwähnt, die Zuordnung noch nicht abschließend geklärt ist. Eine detaillierte Analyse des Szenarios zeigte, dass erst nach 200.000 a ein kontinuierlicher Wasserzufluss als Folge des initialen Defekts stattfindet, so dass auch erst nach dieser Zeit die Radionuklide aus der Abfallmatrix der Brennelemente gelöst werden und der Transport von Radionukliden beginnen kann. Es werden nur leichtlösliche Radionuklide entlang der Fließwege durch den Puffer und das Wirtsgestein transportiert, andere Nuklide lösen sich nicht oder nur sehr schwer aus der Brennelementmatrix. Abbildung 26 zeigt die freigesetzten Dosisraten in die Biosphäre von unterschiedlichen, leichtlöslichen Radionukliden für einen schwedischen Standort „Aberg“ unter Berücksichtigung des o. g. Behälterdefekts.

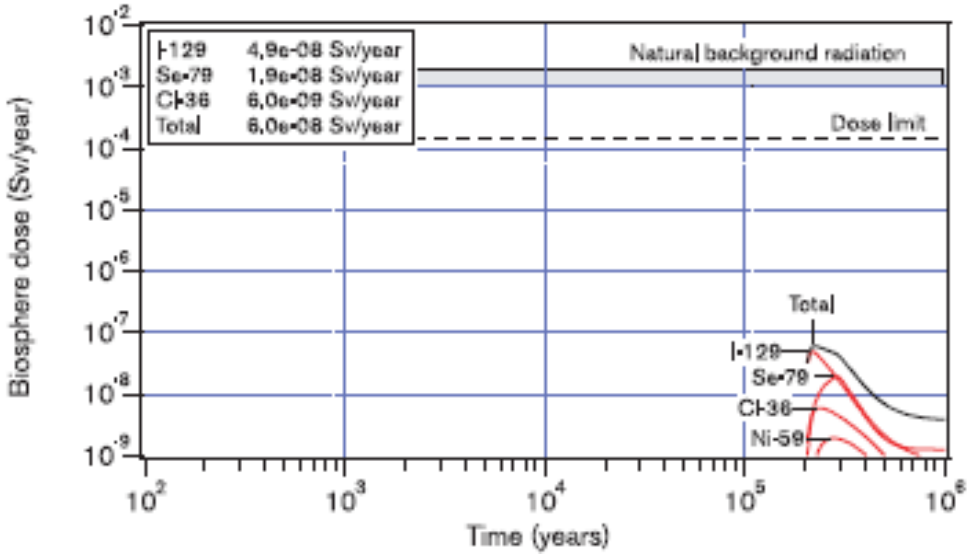


Abbildung 26: Prognostizierte Dosisrate für die Lokation „Aberg“ in Schweden (Sv/a) aufgetragen über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre

Die ablesbare Dosis liegt für das beschriebene Szenario mit $D < 10^{-07}$ Sv/a sehr deutlich unterhalb des festgelegten Grenzwertes in Schweden, der $D = 0{,}15$ mSv/a $= 0{,}15 \cdot 10^{-03}$ Sv/a beträgt.

Mit Hilfe des Risikokoeffizienten kann aus der prognostizierten Individualdosis auf das Individualrisiko geschlossen werden. Es gilt für das o. g. Szenario ein statistisches Risiko von

$$RI(D) \leq 5{,}7 \cdot 10^{-02}\ 1/\text{Sv} \cdot 1 \cdot 10^{-07}\ \text{Sv/a} \approx 5{,}7 \cdot 10^{-09}\ 1/\text{a} \qquad (3.11)$$

einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden in Folge des Endlagers zu erleiden. Die Existenz von einem defekten Behälter auf ca. 5000 liegt mit einer Ausschussquote von $2 \cdot 10^{-4}$ /Behälter etwas schlechter als der technische Standard, der nach Eurocode zu gewährleisten ist. Insofern ist im vorliegenden Fall $p_D = p_f = 1$ anzusetzen und eine

Verringerung des Risikos durch Berücksichtigung einer Eintrittswahrscheinlichkeit < 1 ist nicht vorhanden.

Dies zeigt deutlich, dass dieses Szenario eher als außerplanmäßiges (außergewöhnliches) Szenario der ungestörten Endlagerentwicklung zuzuordnen ist als der gestörten Endlagerentwicklung.

Der Fall eines mangelhaft eingebauten bzw. defekten Bentonitpuffers wurde nicht untersucht und damit auch keine zugehörige Radionuklidfreisetzung prognostiziert. Daher sind keine Angaben zur Dosisrate verfügbar und deshalb kann für diesen Fall auch kein individuelles Risiko angegeben werden. Aus den Untersuchungen in Kapitel 3.6.1 ergibt sich, dass der Fall untersucht werden muss. Auch in Kapitel 2.5.1.2 ist dieser Fall bereits erwähnt, allerdings wird seine Untersuchungswürdigkeit offensichtlich noch diskutiert.

In Kapitel 3.6.1 ist aufgeführt, dass die Kombination von defektem Behälter und defektem Bentonitpuffer vorsorglich untersucht werden sollte, wenn diese beiden Barrieren einen technischen Standard erreichen, wie er in den Eurocodes beschrieben ist, auch wenn die obere Schranke für die Wahrscheinlichkeit vorzeitigen Versagens beider Barrieren 10^{-8} beträgt. Bei 4.000 – 5.000 Behältern steigt diese Wahrscheinlichkeit jedoch auf 10^{-4}. Dass dieser Sachverhalt untersucht wurde, ist aus den veröffentlichten Analysen nicht erkennbar. Wird eine Schranke von 10^{-8} jedoch überschritten, ist dieser Fall gerade zu untersuchen, weil derzeit nicht ausgeschlossen werden kann, dass gerade dieser Fall bei geringer Eintrittswahrscheinlichkeit zu vergleichsweise hohen Freisetzungen führt.

Für das Szenario mit einem defekten Behälter wurden probabilistische Analysen für drei Standorte im Vergleich („Aberg“, „Beberg“ und „Ceberg“) durchgeführt. Für verlässliche und konservativ angesetzte Daten wurde dabei unterstellt, dass sie in 90 % der Fälle zutreffen. Für pessimistisch abgeschätzte Daten wurde angenommen, dass sie in 10 % der Fälle zutreffen /26/.

Es wurden zwei Fälle betrachtet. Zum einen wurde der Austritt von Radionukliden in Torfmoore, die aufgrund ihres chemischen Milieus bestimmte Radionuklide anreichern, berechnet (Abbildung 27), zum anderen wurde der Austritt von Radionukliden in Brunnen bzw. Quellen ermittelt (Abbildung 28). Die in Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellten gestrichelten, vertikalen Linien zeigen die mittleren Werte der Dosisraten für alle Realisationen an. Diese mittleren Werte können mit der Risikogrenze verglichen werden, die in Schweden festgelegt wurde. An dieser Stelle ist klarzustellen, dass es sich bei der Risikogrenze nicht um das Risiko handelt, einen durch das Endlager induzierten, radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden, sondern es wird die Dosis D = 0,15 mSv/a angegeben, die einem individuellen Risiko von 10^{-5} /a entspricht.

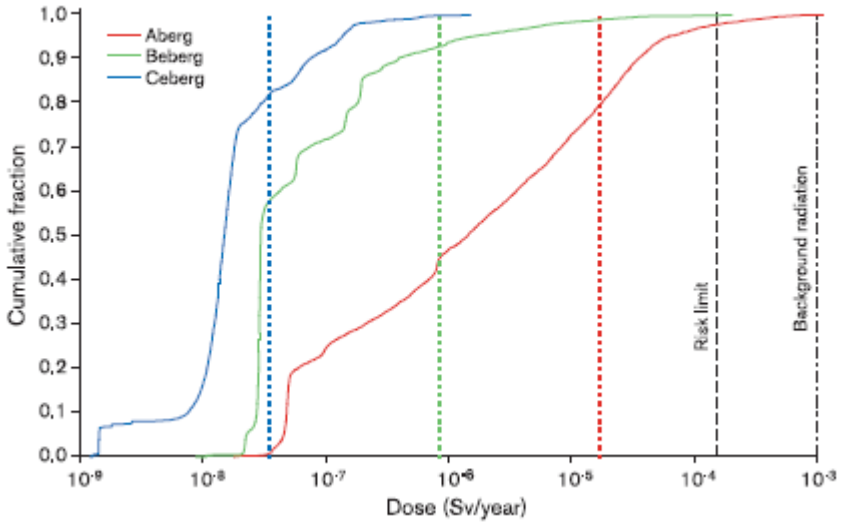


Abbildung 27: Probabilistische Ergebnisse der Dosisraten für das Expositionsmodell Torfmoor für 3 Standorte. Die vertikalen Linien zeigen jeweils den mittleren Wert.

In Abbildung 27 sind die Dosisraten (Sv/a) beim Austritt in Torfmoore an den drei Standorten bezogen auf 0 – 100 % aller Realisationen kumuliert aufgetragen. Im Ergebnis bieten alle drei untersuchten Standorte ein ausreichend großes Maß an Sicherheit im Bezug auf den mittleren Radionuklidaustrag, d. h. die mittleren Werte der prognostizierten Dosisraten liegen deutlich unterhalb der vorgegebenen Grenze. Ob es jedoch wenig wahrscheinliche Fälle mit hohen Freisetzungsraten gibt, lässt sich Abbildung 27 nicht entnehmen. Weiterhin ist unklar, ob die Zahl der Realisationen überhaupt ausreicht, diese wenig wahrscheinlichen Fälle zu erfassen oder mit ausreichender statistischer Sicherheit auszuschließen. So zeigt Abbildung 27 für den Standort Aberg deutlich, dass es Realisationen gibt, die nicht nur den Grenzwert, sondern auch den Wert der natürlichen Hintergrundstrahlung überschreiten.

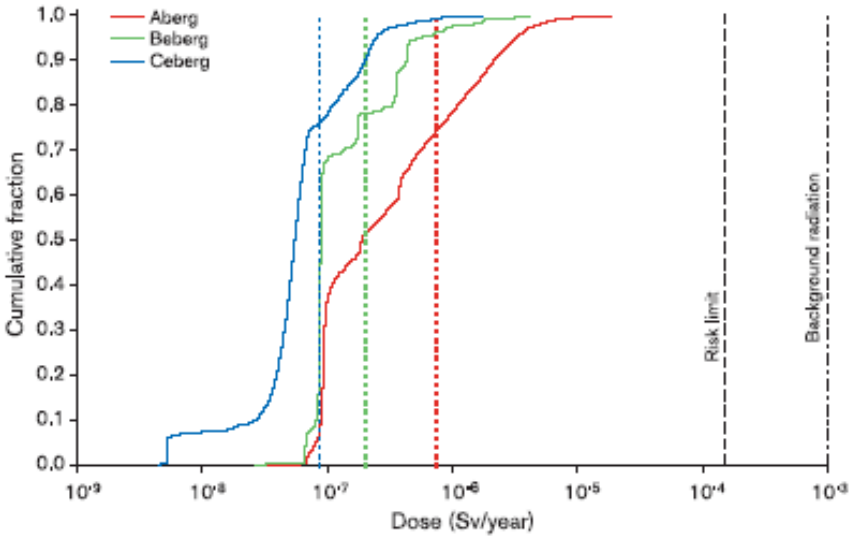


Abbildung 28: Probabilistische Ergebnisse der Dosisraten für das Expositionsmodell „Brunnen und Quellen“ für 3 Standorte. Die vertikalen Linien zeigen jeweils den mittleren Wert.

In Abbildung 28 sind die Dosisraten (Sv/a) für das Expositionsmodell „Brunnen und Quellen“ an den drei Standorten bezogen auf 0 – 100 % aller Realisationen kumuliert aufgetragen. Im Ergebnis bieten alle drei untersuchten Standorte ein ausreichend großes Maß an Sicherheit im Bezug auf den mittleren Radionuklidaustrag in Brunnen und Quellen, d. h. die mittleren Werte der prognostizierten Dosisraten liegen deutlich unterhalb der vorgegebenen Grenze. Bzgl. wenig wahrscheinlicher Fälle mit möglicherweise hohen Freisetzungsraten kann jedoch aus den bereits o. g. Gründen keine Aussage getroffen werden.

Aus den probabilistischen Analysen (die den Biosphärenpfad nicht berücksichtigen) lassen sich für den ungünstigsten Fall, d. h. den Standort „Aberg“ mit Expositionsmodell „Torfmoor“, folgende obere Schranken für das individuelle Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens ableiten, wobei die nachstehend angegebenen Prozentsätze der Überschreitungen Abbildung 27 entnommen wurden.

Mittlerer Wert mit ca. 23 % Überschreitungen:
$RI(D) \leq 0,23 \cdot 5,7 \cdot 10^{-02}$ 1/Sv $0,2 \cdot 10^{-04}$ Sv/a = $0,3 \cdot 10^{-06}$ 1/a
Dosisgrenzwert mit ca. 3 % Überschreitungen:
$RI(D) \leq 0,03 \cdot 5,7 \cdot 10^{-02}$ 1/Sv $0,15 \cdot 10^{-03}$ Sv/a = $0,3 \cdot 10^{-06}$ 1/a
Wert der Hintergrundstrahlung mit ca. 1 % Überschreitungen:
$RI(D) \leq 0,01 \cdot 5,7 \cdot 10^{-02}$ 1/Sv $\cdot 1 \cdot 10^{-03}$ Sv/a = $0,6 \cdot 10^{-06}$ 1/a

Bei den o.g. Werten handelt es sich deshalb um obere Schranken, weil im Rahmen der probabilistischen Analysen bereits pessimistische Parametersätze mit berücksichtigt wurden. Dennoch zeigen die ermittelten Risikowerte beispielhaft auf, dass insbesondere für wenig wahrscheinliche Fälle höhere Freisetzungsraten auftreten können, die möglicherweise das vom Endlager ausgehende, individuelle Risiko bestimmen.

Den o. g. Ausführungen soll ergänzend hinzugefügt werden, dass neben dem o. g. in /26/ vorgestellten Behälter-Defekt-Szenario für die Beurteilung der gestörten Entwicklung des Endlagers noch folgende Szenarien betrachtet wurden:

- Erweitertes Behälter-Defekt-Szenario: Es wird eine größere Anzahl von vornherein defekter Behälter in Rechnung gestellt. Diese pessimistische Schätzung berücksichtigt 5 defekte Behälter auf 5000 Stück, d. h. 1 defekter auf 1000 intakte Behälter. Alle weiteren Berechnungsgrundlagen entsprechen dem Basisszenario.
- Ein weiteres Szenario, das nicht durch das Basisszenario abgedeckt wird, ist das Klimawechsel-Szenario. Es wird angenommen, dass sich im Prognosezeitraum das Klima durch den Wechsel von der gegenwärtigen Warmzeit zur Kaltzeit verändern wird. Der Klimawechsel beeinflusst maßgeblich die Biosphäre und weniger die Geosphäre. Es wird davon ausgegangen, dass die veränderte Zusammensetzung des Grundwassers aufgrund von abschmelzenden Eismassen keinen Einfluss auf die Geochemie des Endlagers hat, bzw. dieser Einfluss keine Rolle für die Puffer-/Versatzmaterialien bzw. Behältermaterialien spielt. Eiszeiten sollten keine zusätzlichen Risse/Störzonen in der Gesteinsformation verursachen. Die mechanische Beanspruchung der Behälter in Folge der Dicke des überprägenden Eispanzers kann aufgenommen werden, so dass daraus

resultierend kein Behälter zusätzlich ausfällt. Klimawechsel führen daher nicht zu einer Beeinträchtigung der Integrität der technischen Barrieren und damit nicht zu einer erhöhten Freisetzung von Radionukliden /26/.

- Aufgrund der langen Nachweiszeiträume für Endlager ist eine Störung durch Erdbeben in Betracht zu ziehen, nicht zuletzt auch aufgrund der mit Sicherheit stattfindenden Klimaänderungen. Die Folgen von Erdbeben werden als relativ gering eingeschätzt. Mögliche Folgen sind Versätze an vorhandenen Störzonen in einer Größenordnung von bis zu 10 cm, wobei die kumulativen Effekte vernachlässigt werden können. Um die Folgen von Erdbeben jedoch trotzdem zu berücksichtigen, wurde das Behälterversagen im Rahmen probabilistischer Berechnungen betrachtet. In 90 % aller Fälle wurde kein Behälterversagen angenommen, in 10 % aller Fälle konnte ein Behälterversagen nicht ausgeschlossen werden, wobei die maximale Behälterausfallrate aber begrenzt wurde.
- Der menschliche Eingriff in das Endlager wurde ebenfalls berücksichtigt. Das größte Risiko würde ein Bohrtrupp erfahren, der direkt einen Einlagerungsbehälter anbohrt. Die Dosis, die der Bohrtrupp erfahren würde, läge deutlich über der natürlichen Hintergrundstrahlung. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bohrtrupp eine ausreichend tiefe Bohrung niederbringt und dabei genau einen Einlagerungsbehälter anbohrt ist jedoch so gering, dass das Gesundheitsrisiko trotz der erhöhten freigesetzten Dosis insgesamt gering bleibt, vgl. Kapitel 2.5.1.2. Das Risiko einer Gefahr für eine anschließend in dem Gebiet des aufgelassenen Bohrlochs siedelnden Familie ist jedoch ebenfalls gering und liegt unter dem in Schweden gesellschaftlich akzeptierten Risiko von 10^{-6} /a für in Schweden typische Ökosysteme sowie den Fall, dass größere Bevölkerungsgruppen von einer radiologischen Belastung betroffen sind /26/.

Zusammenfassend kann nach der Beurteilung der einzelnen vorgestellten und beschriebenen Szenarien, die einer gestörten Endlagerentwicklung zugeordnet werden, festgehalten werden, dass die Berücksichtigung einer erhöhten Behälterausfallrate die o. g. Szenarien abdeckt, da die anderen beschriebenen Szenarien nicht zu einer erhöhten Freisetzung von Radionukliden führen oder sie unabhängig von der Zahl der defekten Behälter sind, wie der o. a. menschliche Eingriff.

Für die Risikobewertung wird vorgeschlagen /26/, dass das o. g. erweiterte Behälter-Defekt-Szenario und das Erdbebenszenario ohne Gewichtungsfaktoren zum Behälter-Defekt-Szenario (1 defekter Behälter) hinzugefügt werden sollen, weil diese beiden Szenarien selbst schon Gewichtungsfaktoren in Form der zu berücksichtigenden Initialdefekte und Defekte aus Erdbeben enthalten.

Das für die gestörte Endlagerentwicklung ermittelte individuelle Risiko stellt im vorliegenden Fall des Endlagers im Granit das Gesamtrisiko dar, da es im Fall der ungestörten Entwicklung (Basisszenario) im Betrachtungszeitraum zu keiner Freisetzung von Radionukliden kommt. Aus den vorlaufenden Betrachtungen zeigt sich, dass in Folge des Endlagers nur ein sehr geringes individuelles Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens zu erwarten ist. Das Risiko, aufgrund der radiologischen Belastung aus dem Endlager zu erkranken, liegt bei Zugrundelegung der durchgeführten Analysen deutlich unterhalb des allgemein unabwendbaren radiologischen Risikos aus der natürlichen Hintergrundstrahlung, deren Dosisrate in Abbildung 27 und Abbildung 28 mit angegeben ist.

Allerdings ist festzustellen, dass das Szenario von mangelhaft eingebautem Bentonitpuffer und Versatz noch nicht in die Betrachtungen einbezogen ist. Weiterhin ist ebenfalls noch nicht abschließend geklärt, ob die Kombination von einem defektem Behälter und mangelhaft eingebautem Bentonitpuffer von den Untersuchungen ausgeschlossen werden kann oder ob sie zwar eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit aufweist, diese aber immer noch so hoch ist, dass das Szenario zusätzlich untersucht werden muss. Dies gilt insbesondere, da es möglicherweise zu hohen Freisetzungen führt.

An diesem Beispiel wird offensichtlich, wie schnell und transparent bei der Vorgehensweise nach Eurocode, bei der nur die „kritischen Ränder“ untersucht werden, mit Hilfe der Zuverlässigkeitsbetrachtungen nach Kapitel 3.2 und auf Basis sehr weniger Überlegungen (Kapitel 3.6.1) möglicherweise auslegungsbestimmende Fälle erfasst werden, die auf Grund ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit einerseits, der vergleichsweise geringen Anzahl von Realisationen bei der klassischen Vorgehensweise bei den probabilistischen Analysen im Langzeitsicherheitsnachweis andererseits sonst nicht erfasst werden.

3.8.2 Betrachtung eines Endlagers im Tongestein

Wie im schwedischen Endlagerkonzept gibt es auch im schweizerischen Opalinuston-Projekt /32/ ein Basisszenario. Abweichend von der Vorgehensweise in Schweden werden keine Szenarien für die ungestörte und die gestörte Entwicklung des Endlagers unterschieden. Das Basisszenario enthält mit seinen ergänzenden Szenarien sowohl die ungestörte als auch die gestörte Endlagerentwicklung. Diese Vorgehensweise ergibt sich aus dem in Kapitel 3.8 beschriebenen probabilistischen Ansatz, mit dem im Opalinuston-Projekt im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises umfangreiche Analysen durchgeführt wurden. Durch die Benutzung von stetigen Verteilungsfunktionen, die gemäß Abbildung 25 auch pessimistische Parameterwerte enthalten, gehen, wie in Kapitel 2.5 bereits erwähnt, ungestörte und gestörte Endlagerentwicklung kontinuierlich ineinander über. Des Weiteren wurden die in Kapitel 2.5.2.2 bereits angesprochenen What-if-Szenarien betrachtet. Abbildung 29 veranschaulicht, dass diese vermutlich als sehr gering wahrscheinlich einzustufen sind. Sie sind aber physikalisch nicht ausgeschlossen und werden deshalb genutzt, die Robustheit des Endlagersystems zu zeigen. Sie können als Sicherheitsabstand/-faktor interpretiert werden.

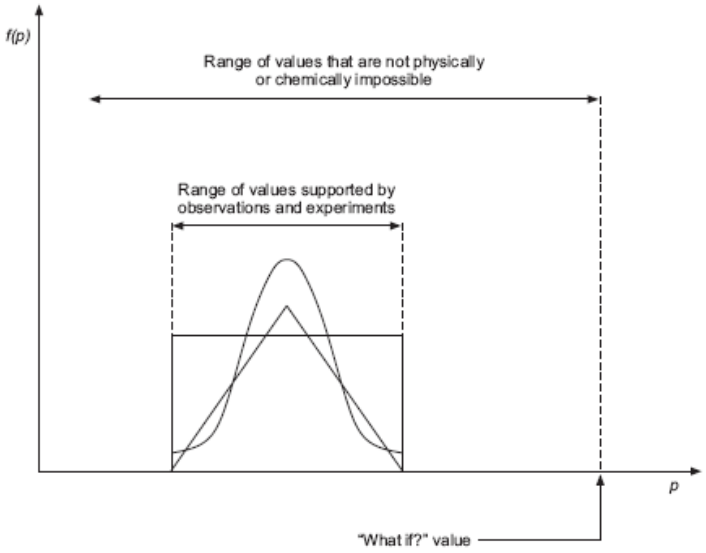


Abbildung 29: What-if-Analysen: Wahrscheinlichkeitsverteilung der abgeleiteten Parametervariationen im Vergleich zur Parameterwahl bei What-if-Analysen im schweizerischen Sicherheitsnachweis (schematisch) /32/

Menschliches Eindringen wird, wie bereits erwähnt, im schweizerischen Opalinuston-Projekt ebenfalls berücksichtigt und als gesondertes Szenario behandelt.

Im Folgenden werden das Basisszenario mit seinen ergänzenden Szenarien, die What-if-Szenarien und das Szenario „menschliche Eindringen“ und ihre Konsequenzen beschrieben. Diese werden in Bezug auf das aus ihnen resultierende Individualrisiko ausgewertet.

3.8.2.1 Basisszenario für das Opalinuston-Projekt im Tongestein

Das Basisszenario ist in Kapitel 2.5.2.1 beschrieben. Die dem Basisszenario zu Grunde liegenden Annahmen für das Endlagersystem sind nachstehend wiederholt bzw. weiter detailliert:

- Das Endlager weist ein Isolationsvermögen für die Abfälle von der Biosphäre von mehreren Millionen Jahren auf.
- Das Wirtsgestein bewahrt seine sicherheitsbestimmenden Eigenschaften über den Zeitraum von mehreren Millionen Jahren. Diese Eigenschaften verändern sich auch nicht durch Einflüsse aus dem Endlager selbst (z. B. Gasbildung), auch nicht durch Klimawechsel, geologische Prozesse und menschliche Aktivitäten. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Wirtsgesteins, des Puffers und des Versatzes ist der maßgebende Transportmechanismus durch das Nahfeld um die Abfälle sowie durch die Wirtsgesteinsbarriere die Diffusion. Entlang der Schachtverschlüsse und der Streckenverschlüsse entstehen durch konstruktive Maßnahmen keine zusätzlichen und neuen Transportwege.
- Das geochemische Milieu bleibt über den Zeitraum von mehreren Millionen Jahren erhalten.

- Die Puffer- und Versatzmaterialien behalten ihre günstigen Materialeigenschaften (vergleichbar mit denen des Wirtsgesteins) über den Betrachtungszeitraum von mehreren Millionen Jahren bei.
- Die Abfallmatrix der abgebrannten Brennelemente und die der hochradioaktiven Abfälle ist so beschaffen, dass die Radionuklide in der jeweiligen Matrix gehalten und auch nach dem Versagen der Behälter nur sehr langsam herausgelöst werden können. Bei langlebigen mittelaktiven Abfällen wird von der Abfallmatrix kein Kredit genommen.
- Die Einlagerungsbehälter garantieren für eine begrenzte Zeit (10.000 a) den vollständigen Einschluss, obwohl Behälterdefekte an wenigen Behältern nicht ausgeschlossen werden können. Nach einer Standzeit von 10.000 a versagen alle Behälter gleichzeitig. Sie stellen dann keine Permeationsbarriere gegen Wasserzutritt und Freisetzung von Radionukliden mehr dar.
- Für die Umgebungsbedingungen im Einlagerungsbereich des Endlagers wird eine vollständige Aufsättigung unterstellt, wenn Porenwasser mit den Abfällen in Kontakt kommt.

Eine detaillierte Beschreibung der FEP, die dem Basisszenario, das den Referenzfall enthält, zugeordnet sind, ist in Kapitel 2.5.2.1 gegeben. Im Rahmen des Basisszenarios wurden viele Variationen der einzelnen Parameter vorgenommen. Das Basisszenario deckt folgende Variationen ab:

- Behälterinventar: Variablen sind der Grad des Abbrandes und die Zusammensetzung des abgebrannten Kernbrennstoffes.
- Standzeit der Behälter: Im Basisszenario wird 10.000 a Standzeit angesetzt, eine Variation ist die Reduktion der Standzeit der Behälter auf 1000 a.
- Geochemische Daten für das Nahfeld: Variation von Sorptionseigenschaften und Löslichkeit der einzelnen Radionuklide aus der Abfallmatrix. Im Basisszenario werden die auf realistischen Annahmen beruhenden Werte verwendet, für die Variation werden pessimistisch und optimistisch abgeschätzte Werte verwendet. Für die Freisetzung von Radionukliden aus den Hüllrohren wird eine Rate von $3 \cdot 10^{-05}$ 1/a angesetzt. Die Löslichkeit der Abfallmatrix ist in Realität deutlich geringer, vgl. Kapitel 2.5.2.1, detaillierte Angaben hierzu enthält /32/.
- Auflösungsrate der hochradioaktiven Abfälle: Die Glaskorrosionsrate wird prinzipiell durch die Temperatur und durch die Zusammensetzung der Lösung bestimmt. Langzeitige Extrapolationen von Laborversuchsdaten können zu großen Unsicherheiten führen. In der Variation werden extrem pessimistisch abgeschätzte Werte angesetzt. Für die Glasauflösungsrate werden folgende Werte angenommen:
  - COGEMA[1]-Glas: $7{,}3 \cdot 10^{-05}$ kg/(m²·a), als Variation $4{,}0 \cdot 10^{-02}$ kg/(m²·a)
  - BNFL[2]-Glas: $5{,}5 \cdot 10^{-04}$ kg/(m²·a), als Variation $4{,}0 \cdot 10^{-02}$ kg/(m²·a)
- Durchflussbeiwert im Bentonitpuffer: $k_f = 10^{-13}$ m/s.
- Durchflussbeiwert in der Auflockerungszone: $k_f = 10^{-12}$ m/s.
- Durchflussbeiwert im Versatz in Strecken, Rampen und Schächten $k_f = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

[1] COGEMA: französische Betreibergesellschaft der Wiederaufarbeitungsanlage La Hague

[2] BNFL: British Nuclear Fuels Ltd., britische Betreibergesellschaft der Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield

- Durchflussbeiwert im Opalinuston: Unsicherheiten in den gemessenen Werten führen zu einer Bandbreitenabschätzung um den Faktor 10 nach oben und unten. Der Durchflussbeiwert für Opalinuston wird mit $k_f = 2 \cdot 10^{-14}$ m/s angegeben.
- Sorptionsparameter des Opalinustons: Realistisch ermittelte Sorptionskonstanten für einige Elemente werden in der Variationsberechnung durch pessimistisch abgeschätzte Werte ersetzt. Detaillierte Angaben hierzu enthält z. B. /32/.
- Diffusionskonstanten im Opalinuston: Realistisch ermittelte Diffusionskonstanten für einige Elemente werden in der Variationsberechnung durch pessimistisch abgeschätzte Werte ersetzt. Detaillierte Angaben hierzu enthält z. B. /32/.
- Freisetzung von Kohlenstoff ^{14}C. Im Basisszenario wird angenommen, dass das freiwerdende ^{14}C aus dem Hüllrohr organisch ist und das ^{14}C aus der Abfallmatrix anorganisch.

Weitere Angaben zum Basisszenario sind in Kapitel 2.5.2.1 und in /32/ enthalten.

Neben dem Basisszenario mit seinen Parametervariationen werden für das Endlager im Opalinuston auch ergänzende Szenarien in Berechnungsvarianten betrachtet. Sie werden durch die Parametervariationen des Basisszenarios nicht abgedeckt, da sie in das Basisszenario nicht physikalisch kompatibel integriert werden können. Sie werden deshalb ergänzend untersucht.

- Begrenzte Lösbarkeit des Abfalls. Wenn keine Radionuklide durch den Bentonit transportiert werden können, so nimmt die Auflösungsrate der Abfallmatrix ab, weil die Rate der Auflösung mit der Rate des Transports gekoppelt ist.
- Thermische Alterung des Bentonits. In der inneren Hälfte des Bentonitpuffers findet eine thermische Alterung statt, die mit einer Erhöhung der Radionukliddiffusion einhergeht, während die Sorptionseigenschaften nicht beeinflusst werden.
- Eiszeitlich induzierte Fließwege im Opalinuston. Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass Eiszeiten keine bedeutenden Auswirkungen auf das Endlager haben, da kleine Abweichungen in der Wasserdurchflussrate auch nur kleine Auswirkungen auf die Freisetzung von Radionukliden haben werden. Die Auswirkungen von mehrfacher eiszeitlicher Kompaktion und Drainage des Opalinustons sollen für den Zeitraum von 1000.000 a untersucht und abgeschätzt werden.
- Zusätzliche Barrierenwirkung durch umgebende Deckgebirgsschichten. Im Basisszenario wird nur die Wirtsgesteinsbarriere von mindestens 40 m Opalinuston für den Nachweis angesetzt, die umgebenden Deckgebirgsschichten und Aquifere werden hingegen nicht berücksichtigt. Um die Auswirkungen dieser Elemente mit zu berücksichtigen, werden in einer Variation Deckgebirgsschichten und Aquifere mit in die Simulation aufgenommen.
- Im Basisszenario werden die Transportraten von Radionukliden über Strecke und Rampen/Schacht als gering im Vergleich zu den Transportraten durch das Wirtsgestein angesehen. In einer zusätzlichen Berechnung wird der Radionuklidaustrag über das Wirtsgestein und parallel über Rampen/Schacht und Strecke ermittelt.

- Im Basisszenario wird postuliert, dass die Streckenkonvergenz abgeschlossen ist, bevor nach 10.000 a die Behälter versagen. Die Streckenkonvergenz hat somit keine Auswirkung auf die Radionuklidfreisetzung von hochradioaktiven Abfällen bzw. ausgedienten Brennelementen. Bei der Lagerung von mittelradioaktiven Abfällen hingegen wird angenommen, dass die Streckenkonvergenz in der Auffahrungsphase am größten ist und mit der Aufsättigung des Versatzes beendet wird. In einer zusätzlichen Berechnung wird unterstellt, dass die Streckenkonvergenz fortschreitet und entlang der Transportstrecken zu einer erhöhten Durchflussrate führen kann. Dies betrifft aufgrund der geringen Behälterstandzeit nur mittelradioaktive Abfälle.
- Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass kein Porenwasser im Barrierennahfeld durch Gas ersetzt wird. In einer Zusatzberechnung wird der Effekt von erhöhter Radionuklidfreisetzung durch gasdruckinduzierte Porenwasserfreisetzung untersucht.
- Als Variationsberechnung zum Basisszenario wird angenommen, dass alles freiwerdende ^{14}C organisch ist.

Genauere Beschreibungen zu den einzelnen Variationen sind in /32/ enthalten.

Abbildung 30 zeigt die Berechnungsergebnisse des Basisszenarios (Referenzfall einschließlich Parametervariationen) in der ersten Zeile sowie in den folgenden Zeilen die der Berechnungsvarianten. Die Berechnungsergebnisse werden jeweils für die einzelne Abfallart vorgestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die in den Zusatzberechnungen untersuchten Szenarien insgesamt nicht zu Freisetzungen führen, die die Bandbreite der Variationen des Basisszenarios überschreiten. Die aus Abbildung 30 ablesbare Dosis für die aufgeführten Berechnungsvarianten liegt mit $D < 10^{-3}$ mSv/a sehr deutlich unterhalb des festgelegten Grenzwertes in der Schweiz, der 0,1 mSv/a beträgt.

Mit Hilfe des Risikokoeffizienten kann aus der Individualdosis auf das Individualrisiko geschlossen werden. Es gilt für das Referenzszenario ohne Parametervariationen mit der über alle Abfallarten summierten Dosis

$$D = D(SF) + D(HAW) + D(ILW) = 4 \cdot 10^{-05} + 1 \cdot 10^{-07} + 4 \cdot 10^{-06} = 4{,}4 \cdot 10^{-05} \text{ mSv/a}$$

ein statistisches Risiko von

$$RI(D) \leq 5{,}7 \cdot 10^{-02} \text{ 1/Sv} \cdot 4{,}4 \cdot 10^{-08} \text{ Sv/a} = 2{,}5 \cdot 10^{-09} \text{ 1/a}$$

einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden in Folge des Endlagers zu erleiden.

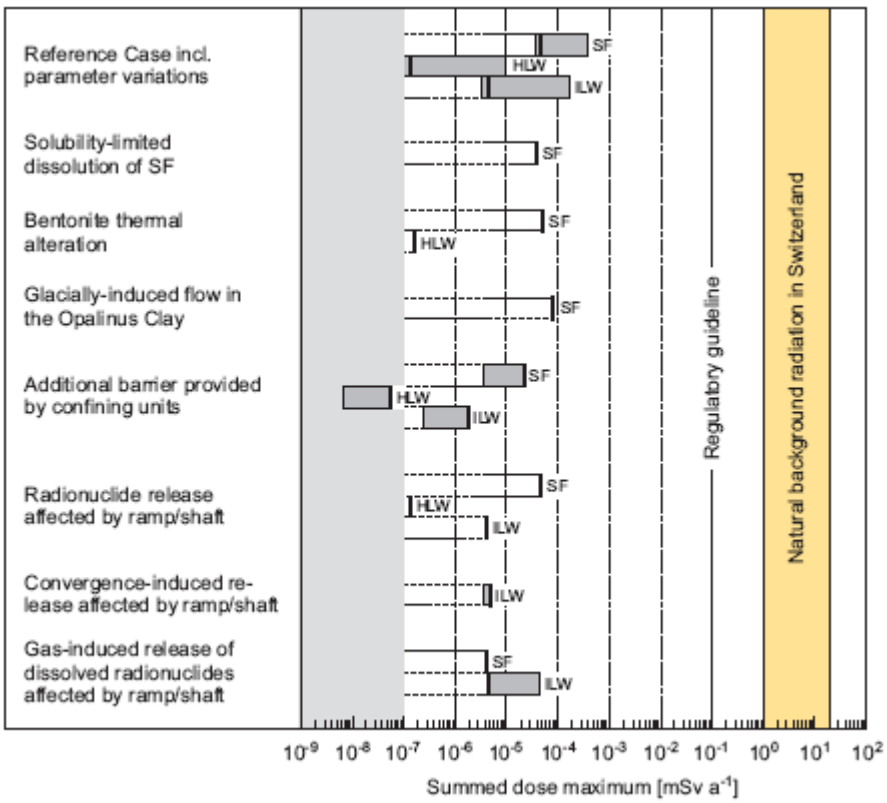


Abbildung 30: Basisszenario: Referenzfall mit Parametervariationen und ergänzende Szenarien/ Berechnungsvarianten (der dicke Strich zeigt das jeweilige Szenario ohne Parametervariationen an)

Aus den Parametervariationen des Bassisszenarios zum Referenzfall und den ergänzenden Szenarien/Berechnungsvarianten lässt sich in Bezug auf die freigesetzte Dosis folgende obere Schranke für das Basisszenario mit Parametervariationen ableiten:

$$D = D(SF) + D(HAW) + D(ILW) = 3 \cdot 10^{-04} + 1 \cdot 10^{-05} + 2 \cdot 10^{-04} = 5{,}1 \cdot 10^{-04} \text{ mSv/a},$$

woraus sich ein individuelle Risiko von

$$RI(D) = 5{,}7 \cdot 10^{-02} 1/\text{Sv} \cdot 5{,}1 \cdot 10^{-07} \text{ Sv/a} = 2{,}9 \cdot 10^{-08}/\text{a}$$

errechnet, einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden. Eine Aussage zur statistischen Sicherheit lässt sich aus den Angaben in Abbildung 30 nicht ableiten.

Die o. g. Werte werden deshalb als obere Schranken bezeichnet, weil im Rahmen der probabilistischen Analysen bereits pessimistische Parametersätze mit berücksichtigt wurden. Inwieweit allerdings wenig wahrscheinliche Fälle mit höheren Freisetzungsraten erfasst sind, lässt sich Abbildung 30 nicht entnehmen.

3.8.2.2 What-if-Szenarien und menschliches Eindringen im Opalinuston-Projekt

Im Folgenden wird auf die bereits erwähnten What-if-Szenarien sowie den Fall des menschlichen Eindringens in das verschlossene Endlager eingegangen. Dazu wird als Beispiel ebenfalls die Langzeitsicherheitsanalyse für das schweizerische Opalinuston-Projekt herangezogen /32/.

Im Rahmen der What-if-Szenarien zur Prüfung der Robustheit des Endlagersystems werden folgende Fälle analysiert:

- Hohe Durchflussraten in der Geosphäre. Ausgehend vom Basiswert von $k_f = 2 \cdot 10^{-14}$ m/s wird ein 100fach höherer Durchflussbeiwert angenommen, der aber wissenschaftlich nicht begründet ist.
- Transport entlang transmissiver Diskontinuitäten. Höherpermeable Diskontinuitäten könnten im Opalinuston vorhanden sein, obwohl es dafür keine konkreten Hinweise gibt. Aufgrund dieser Diskontinuitäten kommt es zum advektiven Transport von Radionukliden in Verbindung mit Matrixdiffusion in z. B. stationäres Porenwasser. Es werden dafür Werte der Transmissivität von 10^{-09} – 10^{-10} m²/s angesetzt.
- Erhöhte Auflösungsraten der Abfallmatrix bei abgebranntem Kernbrennstoff. Es wird mit 10fach und 100fach höheren Auflösungsraten gearbeitet. Beide Werte liegen jedoch außerhalb des wissenschaftlichen Erfahrungsbereichs. Detaillierte Angaben zu zeitabhängigen Lösungsraten sind /32/ zu entnehmen.
- Veränderungen des Redox-Potentials. Durch Veränderung des Redox-Potentials können Sorptions- und Löslichkeitseigenschaften im Nahfeld verändert werden und die Auflösungsraten der abgebrannten Brennelemente vergrößert werden. Ein 10-fach erhöhter Wert für die Auflösungsrate wird jeweils für die Berechnung angenommen. Die Löslichkeiten der einzelnen Radionuklide sind z. B. in /32/ angegeben.
- Freisetzung von Radionukliden über die Rampe durch Gasdruck. Durch einen erhöhten Gasdruck wird Porenwasser ausgepresst und aus dem Abfall bereits herausgelöste Radionuklide werden über die Rampen freigesetzt.
- Unbehinderter Transport flüchtigen ^{14}C-Gases durch das Wirtsgestein. Im Basisszenario wird ^{14}C im Porenwasser gelöst und durch Diffusion und Advektion durch das Wirtsgestein transportiert. Für den „What-if“-Fall wird ^{14}C als flüchtig angenommen und entweicht, nachdem sich der Porenraum des Gesteins gefüllt hat, rasch über Gaswegsamkeiten durch den Opalinuston. Es erreicht das Sandsteindeckgebirge und akkumuliert sich dort.
- Erhöhte Freisetzungsrate aus den Hüllrohren von abgebrannten Brennelementen. Entgegen der wissenschaftlichen Erfahrung wird eine 10fach höhere Freisetzungsrate aus den Hüllrohren von $3 \cdot 10^{-04}$/a angesetzt.
- Keine Sorption von Jod im Nahfeld und in der Geosphäre. Entgegen der wissenschaftlichen Erfahrung wird Jod nicht im Versatz (Bentonit, Beton) und im Wirtsgestein (Opalinuston) sorbiert. Die Sorptionsparameter werden für diesen What-if-Fall auf den Wert „0“ gesetzt.

- Verringerte Mächtigkeit der Wirtsgesteinsbarriere (statt 40 m nur noch 30 m Mächtigkeit). Entgegen der Planung, in der alle Abfallgebinde mindestens 40 m Überdeckung mit der Wirtsgesteinsbarriere aufweisen müssen, wird ein What-if-Fall postuliert, in dem die Wirtsgesteinsüberdeckung nur noch 30 m mächtig ist.

Abbildung 31 zeigt die freigesetzten Dosisraten für die What-if-Analysen. Den What-if-Szenarien wird keine Eintrittswahrscheinlichkeit zugewiesen, da die What-if-Szenarien ja gerade Parametersätze beinhalten, die wissenschaftlich nicht zu begründen sind und weil vorangegangene Untersuchungen nicht auf solche Zahlenwerte schließen ließen, siehe dazu nochmals Abbildung 29. Es wird auch keine Überlagerung von What-if-Szenarien vorgenommen.

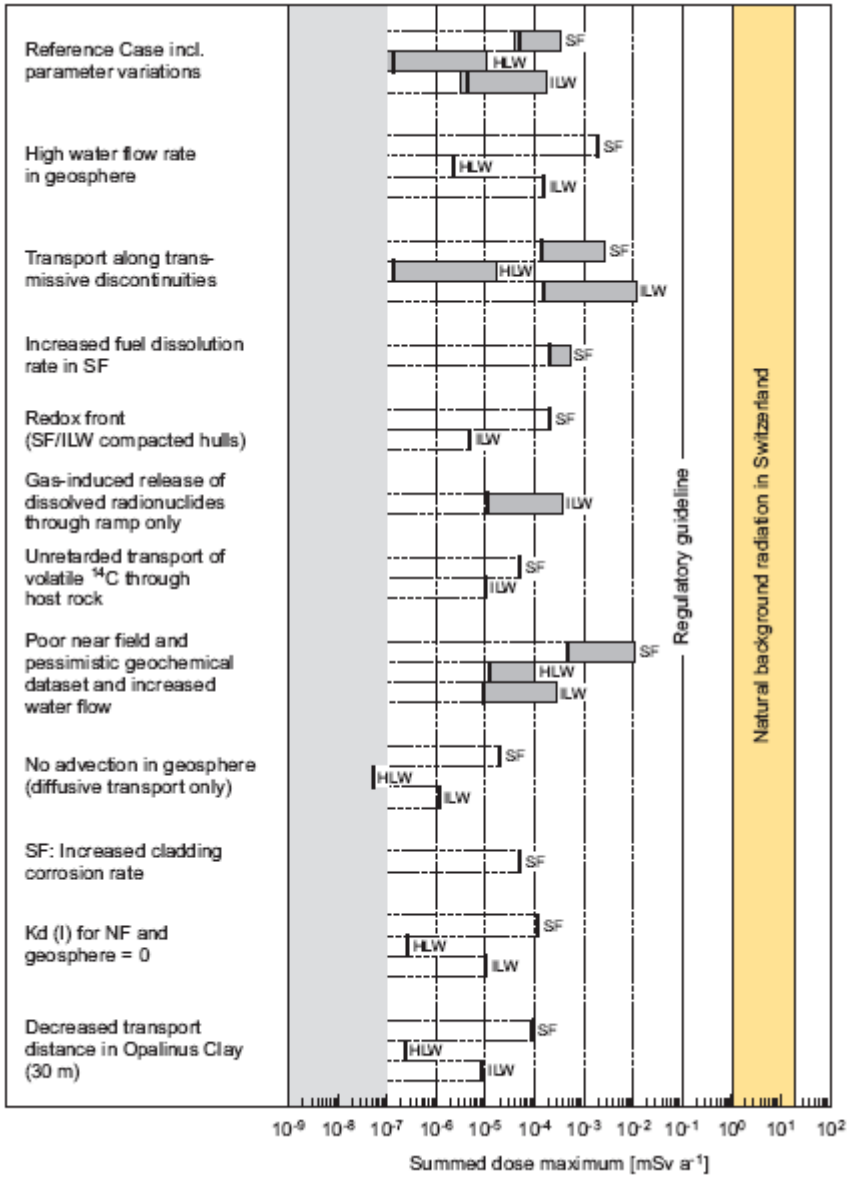


Abbildung 31: What-if-Analyseergebnisse im Vergleich zum Referenzfall (der dicke Strich zeigt das jeweilige Szenario ohne Parametervariationen an)

Trotz der sehr pessimistischen Parametergrundlage zeigt sich das Endlagersystem so robust, dass auch bei den Szenarien der What-if-Analysen keine Radionuklidfreisetzung oberhalb der in der Schweiz geltenden Grenzwerte für die Dosisrate prognostiziert wird (Abbildung 31). Aus den What-if-Analyse-Ergebnissen für die Dosisrate lassen sich über Gl. 3.9 Werte für das individuelle Risiko ermitteln, für die ebenfalls keine Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt wird. Die maximale Dosisrate ergibt sich für den Transport entlang transmissiver Diskontinuitäten summiert über alle Abfallarten zu

$$D = D(SF) + D(HAW) + D(ILW) = 3 \cdot 10^{-03} + 2 \cdot 10^{-05} + 1{,}4 \cdot 10^{-02} \approx 1{,}7 \cdot 10^{-02} \text{ mSv/a}$$

und daraus eine rechnerische obere Schranke für das Individualrisiko von

$$RI(D) \leq 5{,}7 \cdot 10^{-02} \text{ 1/Sv} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-05} \text{ Sv/a} \approx 10^{-06} \text{ 1/a}.$$

Die vorlaufenden Betrachtungen zeigen, dass in Folge des Endlagers nur ein sehr geringes Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens zu erwarten ist. Das Risiko, aufgrund der radiologischen Belastung aus dem Endlager zu erkranken, liegt bei Zugrundelegung der durchgeführten Analysen – analog zu dem betrachteten KBS-3-Konzept für ein Endlager im Granit - deutlich unterhalb des allgemein unabwendbaren Risikos aus der natürlichen Hintergrundstrahlung, deren Dosisrate in Abbildung 30 und Abbildung 31 mit angegeben ist und deren Dosis-Wertebereich der Schweiz 1 - 20 mSv/a beträgt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass trotz der ausgesprochen pessimistisch zu beurteilenden Parameterauswahl das robuste Endlagersystem einzelne, starke Abweichungen von den als wahrscheinlich geltenden, auf der Basis von Beobachtungen und Versuchen abgeleiteten Berechnungsparametern kompensiert. Allerdings ist unklar, ob bzw. inwieweit die in Kapitel 3.6.2 unter dem Aspekt der Zuverlässigkeit als zu untersuchend identifizierten Berechnungskombinationen erfasst sind. Die What-if-Analyse-Ergebnisse deuten allerdings darauf hin, dass dies zutrifft, da die höchsten Freisetzungsraten im Fall transmissiver Diskontinuitäten (z. B. Versagen von Verschlüssen oder der Wirtsgesteinsbarriere) sowie bei schlechten Nahfeldbedingungen und erhöhtem Fluss im Nahfeld (Pufferversagen) auftreten, die auch in Kapitel 3.6.2 als auslegungsbestimmend identifiziert wurden. Insofern ist festzuhalten, dass offensichtlich nicht nur eine Übereinstimmung in Bezug auf die Vorgehensweise bei der Langzeitsicherheitsanalyse im schweizerischen Nachweiskonzept und der Sicherheitsnachweisführung nach Eurocodes besteht (Abbildung 21), sondern bei Einbezug der What-if-Analysen auch in Bezug auf die Ergebnisse. Dazu ist anzumerken, dass z. B. ein Funktionsversagen (z. B. der Tragfähigkeit nach Eurocode) auch ein Fall ist, der – berücksichtigt man die Anzahl der vorhandenen Bauwerke – selten beobachtet wird, insbesondere wenn die Fälle „menschliches Versagen“ abgezogen werden.

Der Vollständigkeit halber und zum Vergleich werden nachstehend noch die Dosisraten angegeben, die durch unbeabsichtigtes, menschliches Eindringen in das verschlossene Endlager freigesetzt werden. Das menschliche Eindringen umfasst das Anbohren des Endlagers und wird durch drei Szenarien berücksichtigt:

1. Eine Einlagerungsstrecke (ausgediente Brennelemente oder hochradioaktive Abfälle) wird zwischen zwei Behältern angebohrt. Im pessimistischen Fall trifft die Bohrung das Nahfeld von vier Einlagerungsbehältern. Unmittelbar nach dem Versagen der Behälter und einer (ebenfalls pessimistisch angenommenen) hohen Durchflussrate wird eine Dosisfreisetzung von max. $D = 7{,}6 \cdot 10^{-05}$ mSv/a für ausgediente Brennelemente ermittelt. Für das Nahfeld von vier HAW-Behältern wurde eine freigesetzte Dosis von $D = 1{,}3 \cdot 10^{-05}$ mSv/a prognostiziert. Der Zeitpunkt der größten freigesetzten Dosis fällt mit dem Behälterversagen von 10.000 a zusammen /32/.
2. In einer Einlagerungsstrecke (ausgediente Brennelemente oder hochradioaktive Abfälle) wird ein Behälter für abgebrannte Kernbrennstäbe direkt angebohrt. Dieses Ereignis kann bei einer pessimistisch hohen Durchflussrate und damit hohem Zufluss von kontaminierten Wässern in die Bohrung zu einer Freisetzung von max. $D = 2{,}5 \cdot 10^{-03}$ mSv/a führen. Der Zeitpunkt der größten freigesetzten Dosis fällt mit dem Behälterversagen von 10.000 a zusammen /32/.
3. In einer Einlagerungsstrecke (langlebige mittelradioaktive Abfälle) wird ein Behälter direkt angebohrt. Bei der größten Durchflussrate wird eine Freisetzung von maximal $D = 1{,}4 \cdot 10^{-02}$ mSv/a berechnet zum Zeitpunkt von 700 - 1400 a nach der Bohrung /32/.

Aus dem Fall 3, der zur maximalen freigesetzten Dosis führt, errechnet sich ein Individualrisiko von etwa 10^{-06} /a.

3.9 Zusammenfassung der oberen Schranken für das Individualrisiko für ein Endlager im Granit und im Tongestein

Zur Ermittlung der oberen Schranken für das Individualrisiko werden nachstehend für verschiedene untersuchte Szenarien die rechnerisch ermittelten Dosisraten bzw. die angegebenen Risikowerte zusammengestellt. Im Falle des Endlagers im Granit in Schweden gelten die in Tabelle 11 angegebenen Werte.

Tabelle 11: Zusammenstellung der vorhandenen Analyseergebnisse für das schwedische Endlagerkonzept im Granit

Szenario	***ungestört***	***gestört***
Basisszenario	Dichter Einschluss 0 mSv/a	1 defekter Behälter*) $D \leq 10^{-04}$ mSv/a
Ergänzendes Szenario (defekte Behälter, Erdbeben → erhöhte Anzahl defekter Behälter)	-	5 defekte Behälter $D \leq 5 \cdot 10^{-04}$ mSv/a
Menschlicher Eingriff	$RI \leq 10^{-6}$ /a	
Bandbreite Standorte und Biosphären	-	1 defekter Behälter*) $D \leq 9 \cdot 10^{-05}$ bis $2 \cdot 10^{-02}$ mSv/a (mittlere Werte)

*) Zuordnung zur gestörten Endlagerentwicklung noch nicht endgültig festgelegt

Bei der Ermittlung der oberen Schranke für das individuelle Risiko im Falle des Endlagers im Opalinuston in der Schweiz hilft Abbildung 32. Sie zeigt zusammenfassend die Ergebnisse verschiedener Szenarien und ihrer Variationen, die die Bandbreite markieren. Dabei wird nicht mehr unterschieden zwischen den einzelnen Abfallarten, sondern es werden die Beiträge der einzelnen Abfallarten zur Gesamtdosisrate zusammengefasst.

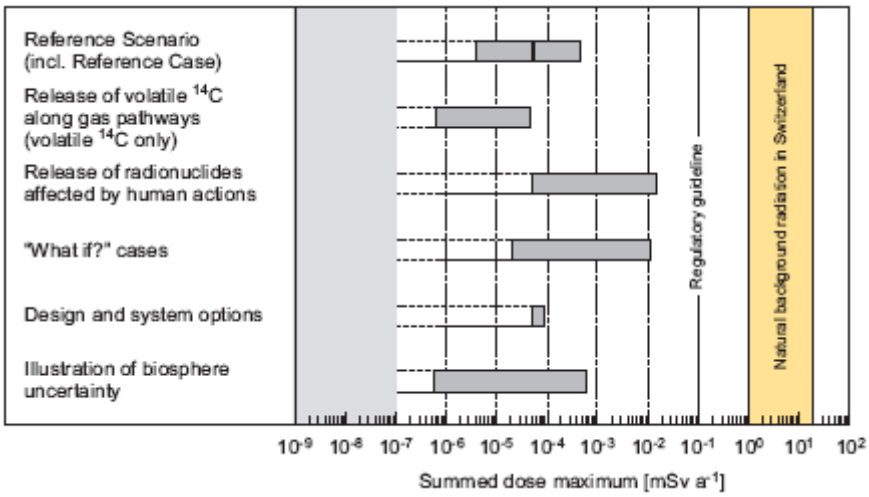


Abbildung 32: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für das schweizerische Endlagerkonzept im Opalinuston

Beispielhaft werden die Schranken für das individuelle Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens für das schwedische Endlagerkonzept im Granit und das schweizerische Endlagerkonzept im Opalinuston für ausgewählte Szenarien zusammengefasst, vgl. Tabelle 12. Die Risikoschranken wurden unter Verwendung von Gl. 3.9 aus den Angaben von Tabelle 11 und Abbildung 32 errechnet, wobei die Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien unberücksichtigt blieb.

Tabelle 12: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für das individuelle Risiko für das schwedische Endlagerkonzept im Granit und das schweizerische Konzept im Opalinuston

Szenario	***Schweden (Granit)***	***Schweiz (Tongestein)***
Basisszenario	1 bis 5 defekte Behälter $RI \leq 6 \cdot 10^{-09}$ bis $5 \cdot 10^{-08}$ /a (ohne dichten Einschluss)	$RI \leq 3 \cdot 10^{-10}$ bis $3 \cdot 10^{-08}$ /a (Referenzfall $RI \leq 3 \cdot 10^{-09}$ /a)
Menschlicher Eingriff	$RI \leq 10^{-6}$ /a	$RI \leq 10^{-6}$ /a
Bandbreite Standorte/Biosphären (Schweden) und Biosphären (Schweiz)	1 defekter Behälter $RI \leq 5 \cdot 10^{-9}$ bis 10^{-6} /a	$RI \leq 4 \cdot 10^{-11}$ bis $3 \cdot 10^{-08}$ /a
Vergleichswert: natürliche Hintergrundstrahlung	$RI \leq 5 \cdot 10^{-5}$ /a	$RI \leq 6 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$/a

Aus Tabelle 12 wird deutlich, dass das Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens aus einem Endlager für hochradioaktive Abfälle bzw. ausgediente Brennelemente sehr gering ist. Das relativ größte Risiko ergibt sich durch den menschlichen Eingriff in das Endlager. Hohe Werte ergeben sich rechnerisch (ohne Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit) im schweizerischen Opalinuston-Projekt auch für What-if-Szenarien, die in Bezug auf den Freisetzungspfad dem menschlichen Eingriff ähnlich sind. Ebenfalls von Bedeutung ist die sich später ausbildende Biosphäre, wie am Beispiel der in Schweden untersuchten Biosphären deutlich wird.

Lässt man den menschlichen Eingriff außer Betracht, zeigen die Risikowerte, dass das vom Endlager ausgehende Risiko sich weitgehend unabhängig vom Wirtsgestein des Endlagers zeigt. Es wird wesentlich durch das an das Wirtsgestein angepasste technische Endlagerkonzept bestimmt. Diese Aussage gilt auch bei Berücksichtigung der qualitativen Ergebnisse zur Zuverlässigkeit für die Mehrbarrierensysteme.

Hierzu ist allerdings ergänzend anzumerken, dass jedes der beiden betrachteten Systeme noch eigene Konservativitäten enthält, die nicht berücksichtigt wurden, da auch ohne ihre Berücksichtigung die prognostizierten Dosis- bzw. Risikowerte unterhalb der vorgegebenen Grenzen lagen. Deshalb ist zur Tabelle 12 einschränkend festzustellen, dass es sich um eine Gegenüberstellung von Prognosewerten handelt. Eine vergleichende Bewertung der Endlagersysteme ist auf Grundlage von Tabelle 12 nicht möglich.

4 Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus von ausgewählten Einzelbarrieren

In diesem Abschnitt werden Analysen zur Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus ausgewählter Barrieren durchgeführt. Mit Hilfe von Daten aus der Literatur, deren Quellen jeweils angegeben werden, wird unter Anwendung des zuverlässigkeitsorientierten Sicherheitskonzeptes der Eurocodes, welches als geeignetes Sicherheitsnachweiskonzept im zweiten Kapitel identifiziert worden ist, das Zuverlässigkeitsniveau für ausgewählte Barrieren weiter konkretisiert. Als Maßstab dient das in Kapitel 3.5 und 3.6 für das Zusammenwirken der einzelnen Barrieren unterstellte Zuverlässigkeitsniveau, das den Regelanforderungen nach Eurocode entspricht. Die Konkretisierung beinhaltet notwendigerweise auch die Einbeziehung der Vorgaben zur Überwachung und Prüfung nach Eurocode.

Im Rahmen des zuverlässigkeitsorientierten Sicherheitskonzeptes der Eurocodes werden grundlegende Anforderungen an das Qualitätsmanagement gestellt. Dies ist deshalb erforderlich, weil die rein rechnerische Ermittlung eines Zuverlässigkeitsniveaus, ohne Gewährleistung, dass die einzelne Barriere tatsächlich planungsgemäß ausgeführt ist und die in den Berechnungen angenommenen Eigenschaften tatsächlich aufweist (siehe dazu die Hinweise in Kapitel 3.4), bedeutungslos ist. Ein angemessenes Qualitätsmanagement stellt jedoch sicher, dass die betrachtete Barriere die geplanten Eigenschaften tatsächlich besitzt. Aus diesem Grund werden in die folgenden Konkretisierungen die Qualitätsmanagementmaßnahmen mit einbezogen.

Als Beispiele für die Konkretisierung der Zuverlässigkeit werden der Kupferbehälter im KBS-3-Konzept als technische Barriere und ein Schachtverschluss im Tongestein als geotechnische Barriere herangezogen. Ergänzend erfolgt eine Darstellung der Zuverlässigkeit von Streckenverschlüssen im Salzgestein. Diese Barrieren werden deshalb gewählt, weil sie einerseits typisch sind für die jeweiligen an das Wirtsgestein angepassten technischen Lösungen, andererseits liegen in der Literatur in einem Umfang Daten vor, der eine exemplarische Zuverlässigkeitsbetrachtung zulässt. Der Konkretisierung der Zuverlässigkeit der Einzelbarrieren vorangestellt ist eine zusammenfassende Darstellung von ausgewählten Vorgaben zum Qualitätsmanagement, die auf Barrieren im Endlager zutreffen und anwendbar sind.

4.1 Qualitätsmanagement

Für Tragwerke, die auf Grundlage der Eurocodes des Bauwesens (DIN EN 1990 bis DIN EN 1999) ausgelegt werden, ist die geforderte Zuverlässigkeit, wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, durch den Entwurf und die Bemessung einerseits, durch planmäßige Ausführung und geeignetes Qualitätsmanagement andererseits sicherzustellen.

Nach Eurocode 1 sind im Rahmen des Qualitätsmanagements folgende, übergeordnete Maßnahmen zur Qualitätssicherung als erforderlich aufgeführt:

- Die Festlegung der Zuverlässigkeitsanforderungen
- Organisatorische Maßnahmen und
- Überwachungen in der Planungsphase und bei der Ausführung

Maßnahmen zur Überwachung und Instandhaltung bei Nutzung, d. h. nach Verschluss, sind im Fall der Barrieren im Endlager nicht anwendbar. Im Eurocode (EN1990) /39/ wird darauf hingewiesen, dass - falls zutreffend - auch EN ISO 9001:1994 für die Qualitätsmanagementmaßnahmen angewendet werden kann. Dabei sollte im Fall von Barrieren in einem Endlager auch ein Abgleich mit den Empfehlungen der IAEA zum Qualitätsmanagement erfolgen /51/.

Die Festlegung der Zuverlässigkeitsanforderungen richtet sich nach der Schadensfolgeklasse. Der Festlegung der Schadensfolgeklassen liegt der bereits in Kapitel 3.2 beschriebene Risikoansatz zu Grunde. Im Eurocode (EN1990) /39/ werden Schadensfolgeklassen vorgestellt, in die die Bauwerke eingeordnet werden und in denen das Ausmaß der Schäden beim Bauwerksversagen anschaulich beschrieben ist.

Die höchste Schadensfolgeklasse ist die Klasse CC3, in die Bauwerke eingestuft werden, bei deren Versagen hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, umweltbeeinträchtigende oder soziale Folgen zu beklagen wären. In diese Kategorie fallen z. B. große öffentliche Bauten wie Tribünen und Konzertsäle.

Die Schadensfolgeklasse CC2 umfasst Bauwerke, deren Versagen mittelschwere Folgen für das menschliche Leben, aber beträchtliche Folgen für die Umwelt, Wirtschaft oder Gesellschaft nach sich zieht. In diese Klasse fallen z. B. Wohn- und Bürogebäude.

Die Schadensfolgeklasse CC1 umfasst Bauwerke, deren Versagen niedrige Folgen für Menschenleben und niedrige Folgen für die Umwelt, Wirtschaft oder Gesellschaft nach sich zieht, z. B. landwirtschaftliche Gebäude wie Scheunen.

Sinngemäß können diese Schadensfolgeklassen auch für Barrierebauwerke angesetzt werden /43/. Dies gilt auch für Barrieren in einem Endlager.

Im Kapitel 3.6 wurde den einzelnen Barrieren – nicht dem Mehrbarrierensystem - eine Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} /Lebensdauer zugeordnet. Dies entspricht Schadensfolgeklasse CC2. Gemäß dem Risikoansatz bestimmt die Einstufung in eine Schadensfolgeklasse auch die Zuverlässigkeitsanforderungen, so dass mit den Schadensfolgeklassen die Zuverlässigkeitsklassen RC1, RC2 und RC3 verknüpft sind. Im Regelfall ist mit der Schadensfolgeklasse CC2 Zuverlässigkeitsklasse RC2 verknüpft. Prinzipiell kann eine Veränderung der Zuverlässigkeitsklasse über eine Veränderung der Teilsicherheitsbeiwerte erfolgen. Allerdings werden zum Erreichen der Zuverlässigkeitsklasse RC3 andere Maßnahmen als die Erhöhung der Teilsicherheitsbeiwerte bevorzugt /39/. Die Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse legt die Anforderungen an das Qualitätsmanagement fest. Die betrifft z. B. die Organisation der Überwachung (wer prüft), den Inhalt der Überwachung (was wird wo geprüft) und den Umfang der Überwachung (wie oft wird geprüft). D. h. für die einzelnen Barrieren ist als Teil des Qualitätsmanagements ein Qualitätssicherungsprogramm bereitzustellen. Ein solches Qualitätssicherungsprogramm umfasst Prüfpläne, in denen die

qualitätssichernden Verfahrensschritte beschrieben werden, und Qualitätsvereinbarungen, in denen die qualitätszusichernden Eigenschaften beschrieben werden. Erst nach Aufstellung eines realisierbaren Qualitätssicherungsprogramms für die funktionsbestimmenden Eigenschaften ist die Funktionsfähigkeit der individuellen Barriere prinzipiell nachweisbar. Erst bei Umsetzung des Qualitätssicherungsprogramms ist die Funktionsfähigkeit der einzelnen Barriere gewährleistet. Damit kann die nachgewiesene Zuverlässigkeit der Barriere ggf. von ihrer Prüfbarkeit, d. h. den Prüfmöglichkeiten und den Prüfverfahren abhängen. Als Beispiel für diesen Fall dient im Folgenden die technische Barriere Kupferbehälter, die der Produktprüfung unterliegt. Am Beispiel des Schachtverschlusses bzw. eines Streckenverschlusses als geotechnische Barriere wird gezeigt, wie vorgegangen wird, wenn eine Produktprüfung analog zum Kupferbehälter nicht möglich ist.

4.2 Der KBS-3-Behälter im Granit: Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus

In Bezug auf die für den Behälter nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften /34/ (s. a. Kapitel 3.6.3)

- Herstellbarkeit
- Dichtheit (= hydraulischer Widerstand)
- Mechanische Widerstandsfähigkeit
    - Tragfähigkeit
    - Rissbeschränkung
- Beständigkeit (= Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität)

wird er im Folgenden in seinem Aufbau detaillierter beschrieben und die Funktion seiner Einzelelemente herausgearbeitet. Weiterhin wird auf seine Herstellung und die mit der Herstellung verbundenen Qualitätssicherungsmaßnahmen vertieft eingegangen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Szenario des initial defekten Behälters offensichtlich von Bedeutung ist, vgl. Kapitel 2 und 3. So lassen sich am Beispiel des KBS-3-Behälters bzw. des Abfallgebindes ausgewählte Aspekte der Produktprüfung und die damit verbundenen Qualitätssicherungsmaßnahmen veranschaulichen.

4.2.1 Funktionsanforderungen an die Einzelelemente des Behälters

Der Kupferbehälter im KBS-3-Behälterkonzept besteht, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, aus dem Gusseiseneinsatz und der Kupferhülle, vgl. Abbildung 33. Der Gusseiseneinsatz dient zur Aufnahme der ausgedienten Brennelemente. Er übernimmt die Tragfunktion und stellt durch seine beschränkten Verformungen damit auch die Voraussetzung für die Rissbeschränkung der Kupferhülle her. Die Kupferhülle gewährleistet in Verbindung mit dem Gusseiseneinsatz die Rissbeschränkung als Voraussetzung für Dichtheit, die Kupferhülle allein gewährleistet die Dauerhaftigkeit bzw. Langzeitbeständigkeit des Abfallgebindes und damit die langzeitige Dichtheit aufgrund ihres Korrosionswiderstandes. Die Dichtheit ist jedoch nur gegeben, wenn sich die Kupferhülle anforderungsgerecht herstellen lässt.

Der Gusseiseneinsatz wird gegossen und maschinell nachbearbeitet. Er wird in Bezug auf seine Herstellung nicht näher betrachtet, da die Fertigung eines solchen Einsatzes Stand der Technik ist. Die Kupferhülle stellt die höheren Anforderungen an die Herstellungsgüte. Sie wird deshalb im Folgenden im Hinblick auf die Herstellbarkeit und Herstellungsgüte vertieft untersucht.

Für den Gusseiseneinsatz werden Informationen zu seiner Tragfähigkeit zusammengestellt und bewertet. Die Lagesicherheit des Behälters wird nicht von dem Behälter selbst sondern in Kombination mit Puffer und Wirtsgestein sichergestellt. Der Nachweis der Lagesicherheit wird hier im Zusammenhang mit der Barriere Behälter nicht betrachtet.

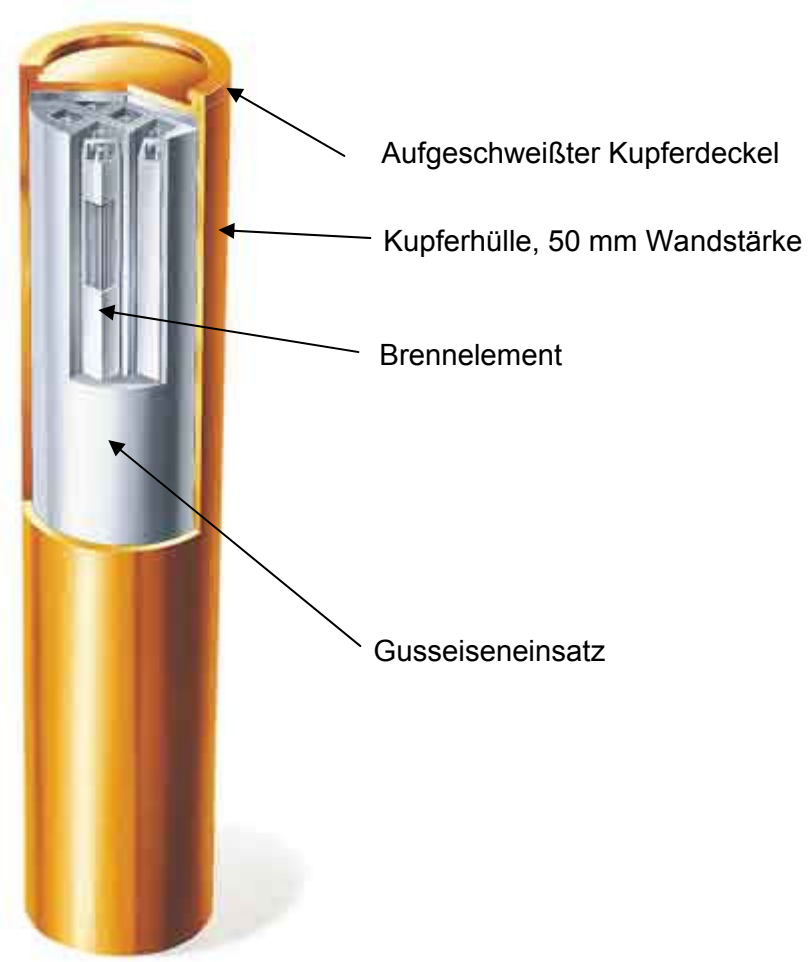


Abbildung 33: Aufbau des kupfernen Endlagerbehälters mit Gusseiseneinsatz im KBS-3-Konzept

4.2.1.1 Herstellung der Kupferhülle des Abfallgebindes

Die Kupferhülle kann mit mehreren Herstellungsverfahren hergestellt werden:

- Durch Walzen werden Kupferplatten über einer halbrunden Matrize zu halben Zylinderschalen hergestellt. Um ein Rohr zu erhalten, werden zwei Halbschalen aufeinandergeschweißt.
- Durch Schmieden kann ein nahtloses Rohr herstellt werden, auf das der Boden und der Deckel aufgeschweißt werden.
- Nach Erhitzen eines Kupferblocks auf ca. 700 °C wird dieser über eine Extruderpresse mit variablen Innendurchmessern in mehreren Schritten zu einem Rohr extrudiert. Deckel und Boden müssen anschließend aufgeschweißt werden.
- Durch Schmieden wird ein zuvor durch Pressen erzeugter Rohling mit ausgestanztem Loch auf einem Dorn warm verformt und somit ein Rohr erhalten.
- Warmumformung mit einem Dorn und einer Matrize. Ein erhitzter Kupferblock wird mit einem Dorn auf einer Matrize in mehreren Umformungsschritten durch Ziehen zu einem Zylinder mit Boden hergestellt. Bei dieser arbeitsintensiven Herstellungsmethode ist der Boden integriert und es muss nur noch der Deckel aufgeschweißt werden.

Die unterschiedlichen Herstellungsverfahren wurden in jeweils entsprechend für den Herstellungsprozess ausgestatteten Unternehmen angewendet und in der Literatur diskutiert /52/, es ist aber noch kein Hinweis zu finden, welches Verfahren bevorzugt angewendet werden soll. Jedoch zeigt allein der Sachverhalt, dass mehrere Herstellungsverfahren für die Kupferhülle zur Verfügung stehen, dass die Herstellung standardmäßig machbar ist. Aus den verschiedenen Herstellungsverfahren kann das am besten geeignete Verfahren gewählt und für die Produktion angewendet werden. Jedoch ist allen Herstellungsvarianten gemeinsam, dass zumindest eine Schweißnaht in der Kupferhülle erforderlich ist, um das Abfallgebinde endlagergerecht fertig zu stellen. Diese Schweißnaht wird im Folgenden weiter betrachtet, da Schwachstellen in Metallbehältern vorzugsweise im Bereich von Schweißnähten auftreten.

Bei der SKB /52/ wurden zwei Verfahren vorgeschlagen, mit denen z. B. die Deckel aufgeschweißt werden können.

1. Electron Beam Welding (EBW) – Elektronenstrahlschweißverfahren: Dabei handelt es sich um ein Schweißverfahren, bei dem der Deckel mit dem Behälter unter Vakuum durch einen starken Elektronenstrom aufgeschmolzen wird. Wichtig beim Schweißprozess ist die Fokussierung des Elektronenstrahls. Ist der Strahl zu breit, kann das geschmolzene Kupfer verlaufen. Bei einem zu schmalen Elektronenstrahl können Defekte und Fehlstellen in der Naht auftreten. Prinzipiell kann mit dem Elektronenstrahlschweißverfahren eine tiefe, schmale Schweißnaht hergestellt werden, außerdem kann eine hohe Schweißgeschwindigkeit erreicht werden. Zum Schweißen der Behälter wird das Verfahren seit 1998 probehalber angewendet und kontinuierlich im Sinne einer Rückfallposition weiterentwickelt, obwohl für die Behälterherstellung in Serie das folgende Verfahren angewendet werden soll /53/, /54/.

2. Friction Stir Welding (FSW) – Reibrührschweißen: Das Reibrührschweißverfahren wurde 1991 in Großbritannien entwickelt. Das Reibwerkzeug erzeugt durch seine Drehbewegung Wärme, die den Werkstoff zähflüssig werden lässt. Die Schmelztemperatur wird dabei nicht erreicht. Beim Schweißvorgang wird das Gefüge nicht verändert, es ist verfahrenstechnisch keine Porenbildung möglich. Außerdem werden keine Zusatzstoffe zum Schweißen benötigt. Obwohl wenig Erfahrung mit dem Reibrührschweißverfahren in Bezug auf Kupfer vorlag, wurde das Verfahren von der SKB aufgegriffen, und es wird aufgrund seiner offensichtlichen Vorteile nunmehr bevorzugt. So zeigen die Schweißnähte eine hohe Qualität, sie weisen keine Einschlüsse und keine Gefügeveränderungen aufgrund der moderaten Wärmeentwicklung unterhalb des Schmelzpunktes auf. Die einfache Beherrschbarkeit des Verfahrens garantiert die hohe Qualität auch unter den späteren Produktionsbedingungen /53/, /55/.

Das Friction Stir Welding (FSW) ist nachstehend weiter erläutert. Abbildung 34 zeigt eine fertige Schweißnaht, die mit dem FSW-Verfahren erstellt wurde. Links oben im Bild ist die Stelle erkennbar, an der das Werkzeug aus dem Material herausgezogen wurde. Dieses Problem wurde erkannt und kann durch einen automatisch, sich langsam kontinuierlich zurückziehenden Pin vermieden werden, so dass die Dicke der Naht durch die Rückzugsbewegung des Werkzeuges fortlaufend abnimmt.

Abbildung 34: Schweißnaht mit dem Friction Stir Welding-Verfahren erstellt /52/

Abbildung 35 zeigt das Funktionsprinzip des FSW-Verfahrens. Das Werkzeug wird unter Druck gegen die Laufrichtung der Schweißnaht gedreht. Somit wird das Material erhitzt und „verrührt“, wodurch sich eine homogene Schweißnaht ausbildet. Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass der Werkstoff nicht über seine Schmelztemperatur erhitzt wird und somit zusätzliche Wärmespannungen und Nahtdefekte nach dem Schweißen gering sind bzw. ganz vermieden werden können.

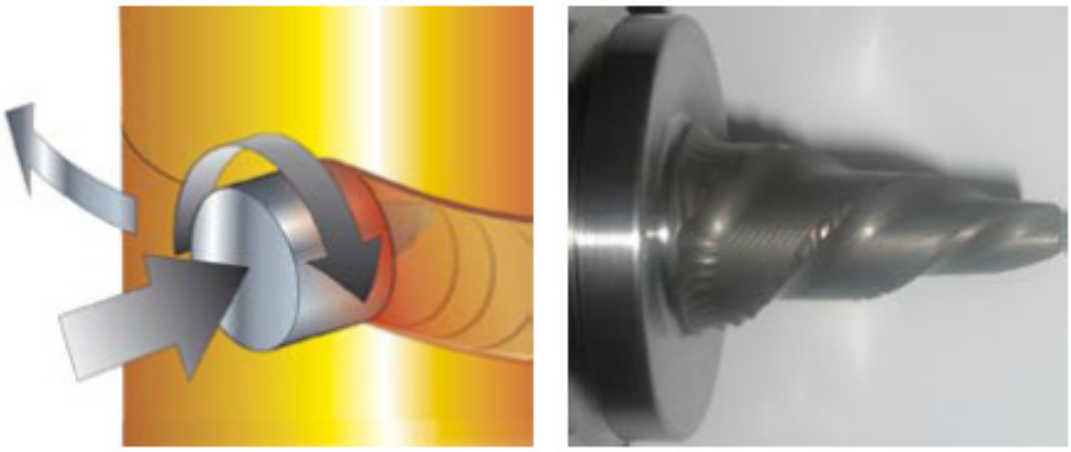


Abbildung 35: Funktionsprinzip und Werkzeug für das Friction Stir Welding-Verfahren /52/

Abbildung 36 zeigt einen makroskopischen Schnitt durch eine Schweißnaht, die mit dem FSW-Verfahren erstellt wurde. Aus Abbildung 36 wird deutlich, dass das Gefüge der Schweißnaht sehr gleichmäßig und insgesamt homogen ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Verfahren einerseits wegen der maschinellen Herstellung der Schweißnähte und andererseits wegen des gleichmäßigen Gefüges der Schweißnaht, wodurch Fehlstellen vermieden werden, prinzipiell für die Aufgabe geeignet ist. Es wird bei der SKB angewendet und derzeit für die großtechnische Behälterproduktion weiterentwickelt.

Abbildung 36: Makroskopischer Schnitt durch das Schweißnahtgefüge einer Friction Stir-Schweißnaht /52/

4.2.1.2 Prüfmethoden für die Schweißnaht der Kupferhülle

Trotz des hochwertigen Schweißverfahrens stellt die Schweißnaht erfahrungsgemäß eine potenzielle Schwachstelle in Bezug auf die Behälterintegrität dar. Genau an dieser Stelle ist deshalb die Behälterintegrität im Rahmen der Qualitätssicherung zu prüfen.

Um die Güte einer ausgeführten Schweißnaht zu prüfen, müssen zerstörungsfreie Methoden angewendet werden. Im Grundsatz sind fünf unterschiedliche zerstörungsfreie Prüfverfahren verfügbar:

1. Die Prüfung von Schweißnähten erfolgt mittels Durchstrahlung (DIN EN 444, DIN EN 1435, DIN EN 12517) mit Gamma- oder Röntgenstrahlen und die Aufzeichnung der durchdrungenen Strahlung auf einen Film, wodurch der Gefügeaufbau bzw. Fehler im Gefüge sichtbar gemacht werden.

2. Die Dichtigkeit von Behältern kann über Gasleckageraten (DIN EN 1779) nachgewiesen werden. Für dieses Verfahren ist es notwendig, den Behälter unter Druck zu setzen oder ihn zu evakuieren. Beides scheidet für den befüllten Endlagerbehälter aus, da keine Information über die Schweißnahtdicke erhalten wird.

3. Mit Eindringmitteln (DIN EN 571) können Risse und Öffnungen in der Gefügeoberfläche detektiert und unter speziellem Licht sichtbar gemacht werden. Dieses Verfahren eignet sich vornehmlich nur für kleine Bauteile und dient dazu, z. B. Spannungsrisse auf Gefügeebene zu lokalisieren.

4. Mit Ultraschallwellensendern werden in den zu prüfenden Bauteilbereich Ultraschallwellen eingestrahlt und deren Reflexion wird aufgezeichnet. Ein gestörtes Gefüge mit Fehlstellen, Lunkern oder Rissen zeigt andere Schallwellenreflexionen als ein ungestörtes, intaktes Gefüge. Die Ultraschallprüfung (DIN EN 10228, DIN EN 1713, DIN EN 1714) von Schweißnähten ist ein Verfahren, mit dem auch ein befüllter Einlagerungsbehälter auf Dichtheit geprüft werden kann.

5. Mit Hilfe der Wirbelstromprüfung (DIN EN 12084, DIN EN 1711) können Inhomogenitäten im Prüfgut, seine Dicke und die Dicken von Beschichtungen, metallurgische und mechanische Eigenschaften von Rohren, Profilen, Schmiede- und Gussstücken während des Betriebes geprüft und bestimmt werden. Das Prinzip beruht auf der Induktion von elektrischem Strom in einem leitenden Material. Die Messgrößen werden beeinflusst von der Leitfähigkeit des Materials, der Permeabilität sowie durch Größe und Geometrie des Prüfkörpers.

Im schwedischen KBS-3-Behälterkozept ist vorgesehen, die Prüfung der Schweißnähte am Behälter vorzugsweise durch Ultraschallwellenprüfungen vorzunehmen.

Abbildung 37 zeigt schematisch die Ultraschallprüfung eines Behälters mit aufgeschweißtem Deckel. Teilbild a zeigt die Prüfung der Naht auf Fehlstellen in radialer Richtung über den Umfang. Die Teilbilder b und c zeigen die Prüfung auf Fehlstellen in der Naht in axialer Rich-

tung der Schweißnaht über den Umfang mit zwei Methoden. Die Teilbilder d und e zeigen die Ultraschallprüfung in axialer und radialer Richtung der Schweißnaht über den Umfang des Behälters. Bei der Methode in Teilbild d wird ein Einstrahlwinkel von 45° gewählt, um durch Transmission und Reflexion der Ultraschallwellen Fehlstellen aufzuspüren. In Teilbild e wird die Anordnung der Ultraschallwellenköpfe für die Prüfung der unteren Schweißnahtabschnitte dargestellt, die nicht durch die Anordnung weiterer Prüfköpfe in der Deckelsicke wie in Teilbild d dargestellt, geprüft werden können /52/.

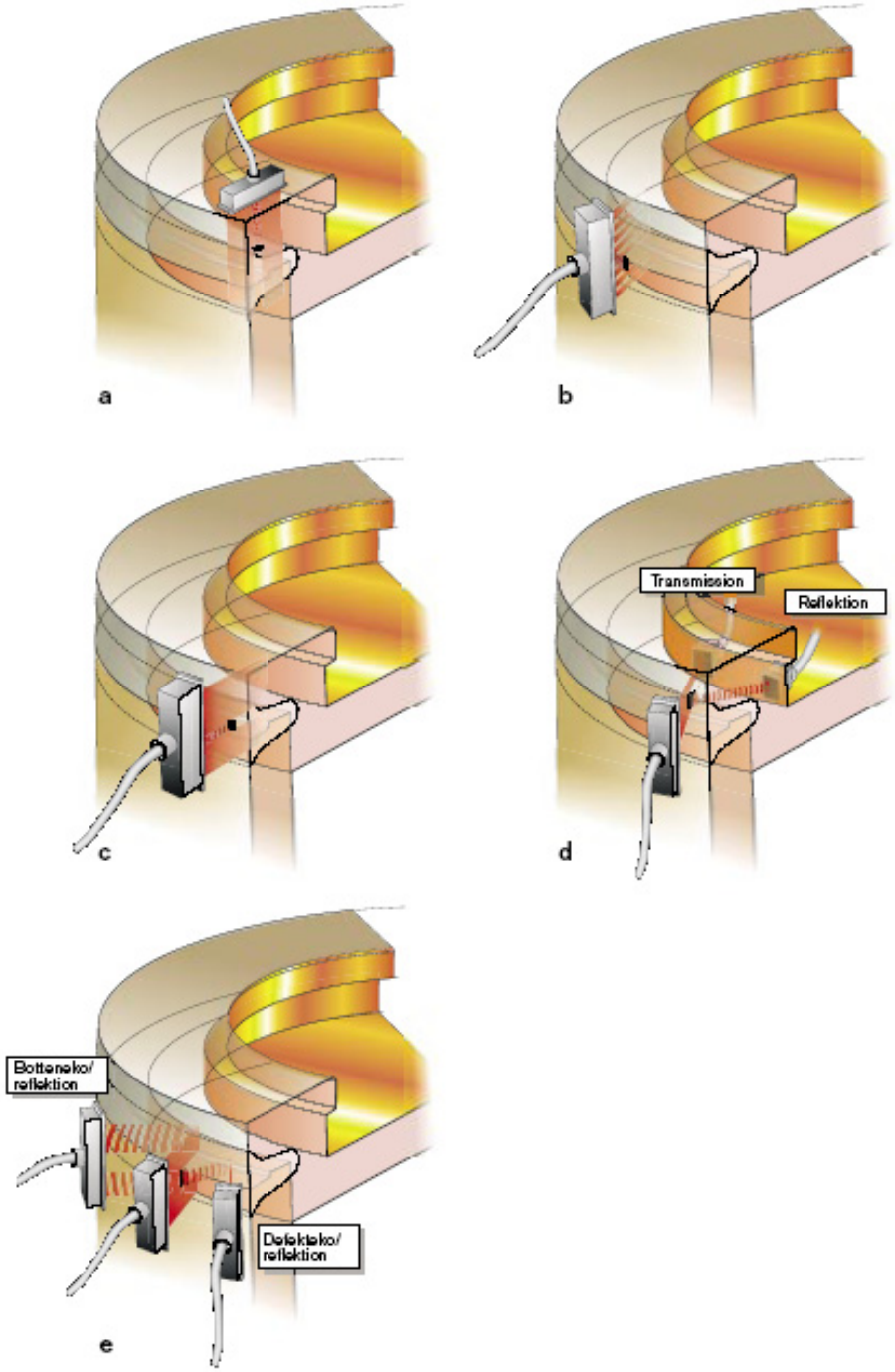


Abbildung 37: Ultraschallprüfung der Behälter im KBS-3-Konzept

Weitere zerstörungsfreie Prüfmethoden, die bei der SKB zur Überprüfung ausgeführter Schweißnähte angewendet und auf ihre Eignung hin geprüft werden, sind neben der beschriebenen Ultraschallprüfung radiografische Methoden und die Wirbelstromprüfung.

Es wurde ein Forschungsprogramm initiiert, um die Verlässlichkeit der Prüfmethode beim Entdecken von Defekten in Schweißnähten beschreiben zu können. In diesem Forschungsprogramm soll untersucht werden, wie groß die Wahrscheinlichkeit unentdeckter Defekte ist und welche Defekte in welcher Größenordnung unentdeckt bleiben. Somit soll eine Aussage getroffen werden können, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, einen defekten Behälter endzulagern /56/. Diesem Programm sind Arbeiten in Kooperation mit der Industrie vorangegangen, deren Ergebnisse zur Genauigkeit der einzelnen Verfahren im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

4.2.1.3 Genauigkeit der Prüfmethoden für die Schweißnaht

Es wurden bereits Untersuchungen zur Anwendung und Anwendbarkeit verschiedener zerstörungsfreier Prüfmethoden durchgeführt. Wichtige Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend kurz skizziert. Dabei geht es in erster Linie um die Genauigkeit der einzelnen Verfahren bei der Anwendung.

- Durchstrahlungsprüfung: Der Strahlungsdetektor löst mit einer Genauigkeit von 0,4 mm auf /57/, so dass Nahtdefekte mit einer Größe von mehr als 0,4 mm erkannt werden können. Bei Schweißnähten, die mit dem Reibrührschweißverfahren (FSW) hergestellt worden sind, konnten in Anwendungsserien mit dem Durchstrahlungsverfahren Fehler in der Schweißnahtdicke mit 90 % Wahrscheinlichkeit bei 95 % Zuverlässigkeit entdeckt werden, wenn der Fehler größer oder gleich 30 % der Materialdicke war, d. h. bei 50 mm Nahtdicke konnten Abweichungen in der Schweißnahtdicke von 15 mm oder mehr erkannt werden /58/.
- Wirbelstromprüfung: Es können nur Schweißnahtfehler im Nahbereich der Oberfläche erkannt werden. Schweißnahtfehler mit einer Größe von 0,8 mm und mehr konnten im Experiment nur bis ca. 4 mm Entfernung von der Behälteroberfläche bzw. der Schweißnahtoberfläche in die Schweißnaht hinein erkannt werden /59/.
- Im Vergleich wurden Durchstrahlung und Ultraschallwellen bei Schweißnähten, die mit dem Elektronenstrahlschweißverfahren hergestellt worden sind, getestet. Die Durchstrahlung bietet eine bessere räumliche Auflösung, aber einen schwachen Kontrast auf den Bildern. Bei der Schweißnahtprüfung am Behälter muss ein relativ kleiner Winkel von der Strahlungsquelle zur Schweißnaht aus geometrischen Gründen eingehalten werden, so dass eine ungünstig kleine Projektionsfläche der Schweißnaht erhalten wird. Die Prüfung mit Ultraschallwellen liefert ähnlich gute Ergebnisse bei der Prüfung der Schweißnähte wie die Durchstrahlung. Zusätzlich bietet sie weitere Vorteile. Mit der Ultraschallprüfung können geschweißte von nicht geschweißten Bereichen sehr gut unterschieden werden. Darüber hinaus sind die Bilder aus der Ultraschallprüfung sehr kontrastreich. Allerdings hat die Ultraschallsprüfung auch Nachteile: Kleine Defekte zeigen Schallwellenmuster, die nur schwer vom Hintergrundrauschen des ungestörten Materials zu unterscheiden sind. Daher liegt der Schwerpunkt bei der Optimierung der Ultraschallwellenprüfung auf der Un-

terdrückung und Filterung des Hintergrundrauschens. Die Schallwellenreflexion von Fehlstellen hängt stark von der einstrahlenden Frequenz ab. Bilder von Ultraschallprüfungen mit unterschiedlichen Einstrahlfrequenzen können sich daher ergänzen, so dass auf dem einen Bild Details erkennbar werden, die auf dem gleichen Bildausschnitt aufgenommen bei einer anderen Frequenz nicht erkennbar gewesen sind /60/. Bei Schweißnähten, die mit dem Reibrührschweißverfahren (FSW) hergestellt worden sind, konnten mit der Ultraschallprüfung Fehler in der Schweißnahtdicke entdeckt werden, wenn der Fehler größer als 15 % - 20 % der Materialdicke war, d. h. bei 50 mm Nahtdicke konnten Abweichungen in der Schweißnahtdicke ab etwa 7,5 mm oder mehr erkannt werden /58/.

Anhand der Genauigkeit eines Prüfverfahrens allein, Fehlstellen der ausgeführten Schweißnähte zu entdecken, kann noch keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit getroffen werden, mit der ein nicht den Anforderungen genügendes Abfallgebinde die Einkapselungsanlage verlässt und endgelagert wird. Dazu ist festzulegen, welche Größe der Fehlstellen maximal zulässig ist, so dass die Kupferhülle ihre Funktionsanforderungen noch erfüllt, d. h. die qualitätszusichernde Eigenschaft der Schweißnaht ist festzulegen. Auf dieser Grundlage kann die Wahrscheinlichkeit von funktionsbeeinträchtigenden Fehlstellen ermittelt werden.

4.2.2 Wahrscheinlichkeit der Einlagerung von unerkannt defekten Abfallgebinden

Da bei Anwendung des Reibrührschweißverfahrens (FSW) bei dem es sich trotz seines Namens um ein Umformverfahren handelt, kein zusätzliches Schweißgut zum Einsatz kommt und der Schmelzpunkt nicht überschritten wird, stellt die Schweißnaht bei qualitätsgerechter Ausführung keine Korrosionsschwachstelle dar.

Die Wahrscheinlichkeit überhaupt einen defekten Behälter endzulagern, setzt sich somit aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Schweißnahtdefekt auftritt, und der Wahrscheinlichkeit, den Defekt in der Schweißnaht trotz Anwendung zerstörungsfreier Prüfmethoden nicht zu erkennen, zusammen.

In den entsprechenden Normen zur Prüfung von Schweißnähten und Materialien mit zerstörungsfreien Prüfmethoden, wie sie zuvor beschrieben worden sind, wurden keine Angaben über die Erkennungsgenauigkeit von Fehlstellen bzw. der kleinsten Größe von erkennbaren Fehlstellen gemacht. Somit können aufgrund fehlender direkt abzulesender Angaben keine Aussagen über die Wahrscheinlichkeit von nicht entdeckten Fabrikationsfehlern gemacht werden. Auch in der Literatur sind nur wenige Hinweise auf Ergebnisse zur Wahrscheinlichkeit der Nichterkennung von Defekten und Schweißnahtfehlern bei Prüfverfahren zu finden.

Die Anwendung der Eurocodes im Bauwesen stellt jedoch eine Versagenswahrscheinlichkeit von kleiner als 10^{-04} bezogen auf die Lebensdauer eines Bauwerks sicher. Schweißverbindungen gehören im Bauwesen zu den tragfähigkeits- und dichtheitsrelevanten Verbindungen, durch deren Prüfung die normgerechte Ausführung sichergestellt werden muss. Um mit geschweißten Konstruktionen im Bauwesen eine Versagenswahrscheinlichkeit $p_f \leq 10^{-04}$ bezogen auf die Lebensdauer zu erreichen, müssen die Prüfmethoden für Schweißnähte und deren normgerechte Anwendung diese Wahrscheinlichkeit von $p_f \leq 10^{-04}$ für vorzeitiges

Versagen garantieren. Diese Aussage ist nicht direkt in den veröffentlichten Normentexten zu Schweißnähten und ihren Prüfverfahren abzulesen. Dort wird ausschließlich die Anwendung und Methodik der Prüfverfahren beschrieben. Durch die Beschränkung der Wahrscheinlichkeit für vorzeitiges Versagen auf $p_f \leq 10^{-04}$ durch die Anwendung der Eurocodes des Bauwesens müssen die Prüfmethoden jedoch Fehler auflösen, die das Zuverlässigkeitsniveau gefährden.

Als Akzeptanzkriterium für die Schweißnaht der Kupferhülle des KBS-3-Behälters gilt eine Größenabweichung in der Dicke von $\Delta d = 35$ mm bezogen auf die Gesamtdicke der Schweißnaht von $d = 50$ mm, die toleriert werden kann. Trotz der Größenabweichung von $\Delta d = 35$ mm kann unter den erwarteten Endlagerbedingungen immer noch von einem Korrosionswiderstand über den Zeitraum 100.000 a ausgegangen werden /61/. Eine Schweißnahtdicke von $d_{min} = 15$ mm stellt also die qualitätszusichernde Eigenschaft dar.

Die folgende Abbildung 38 zeigt die Wahrscheinlichkeit der Defekterkennung bei Anwendung geeigneter zerstörungsfreier Prüfmethoden (grüne Linie) in Abhängigkeit der Defektgröße sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit, trotz geeigneter Schweißtechnik einen Schweißnahtfehler zu produzieren (rote Linie).

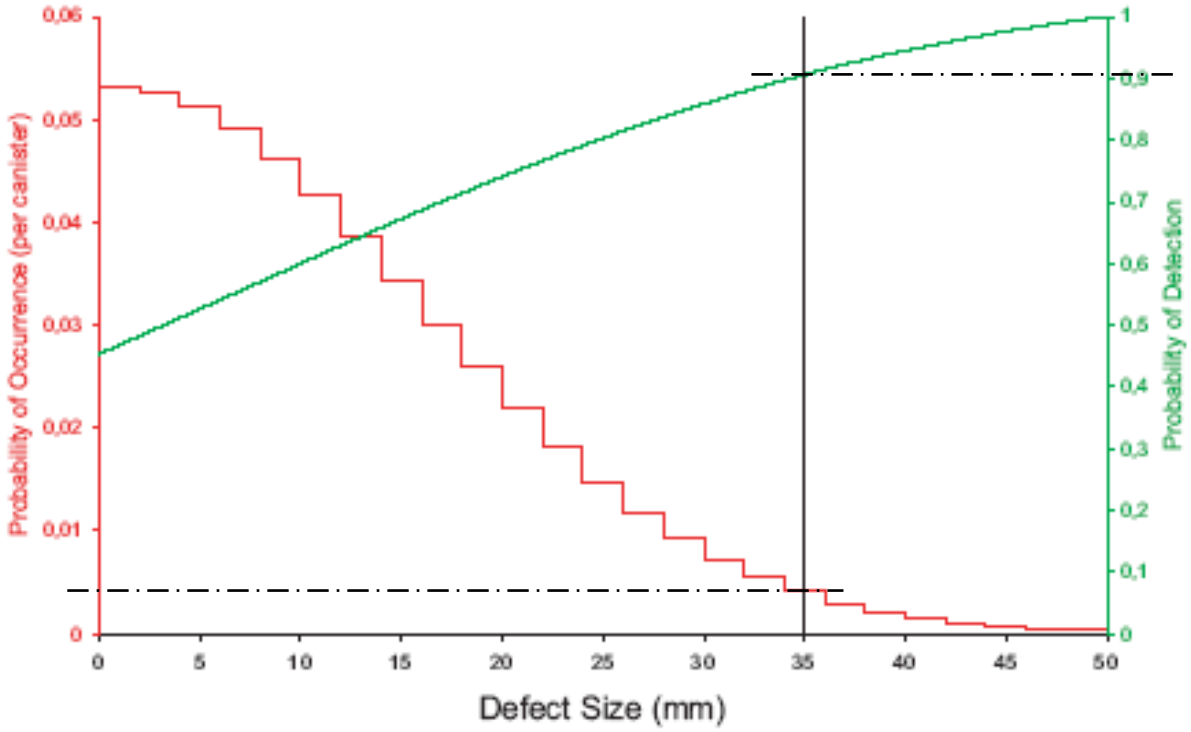


Abbildung 38: Erkennungswahrscheinlichkeit durch zerstörungsfreie Prüfmethoden (grün) und Auftretenswahrscheinlichkeit eines Defekts (rot), dargestellt jeweils über die Größe des Defekts /61/

Bei einer zugelassenen Abweichung in der Schweißnahtdicke von $\Delta d = 35$ mm wird aus Abbildung 38 eine Eintrittswahrscheinlichkeit (rote Linie) von ca. 0,004 abgelesen. Gleichzeitig können mit den Methoden der zerstörungsfreien Schweißnahtprüfung etwas über 90 % der

Defekte dieser Größe erkannt werden, d. h. die Gefahr des Nichtentdeckens beträgt weniger als 10 %. Werden die beiden Eintrittswahrscheinlichkeiten multipliziert, so wird eine Wahrscheinlichkeit von $p_f = 0{,}004 \cdot 0{,}09 = 3{,}6 \cdot 10^{-04}$ errechnet, mit der ein Behälter trotz Prüfung defekt endgelagert wird. Dieser Wert liegt allerdings über dem Wert von $p_f = 10^{-04}$, der nach Eurocode die Grenze bildet. Die Größenordnung der Versagenswahrscheinlichkeit für die Funktionsfähigkeit von $p_f \sim 10^{-04}$ oder kleiner, die nach Eurocode gefordert ist, wird allerdings erreicht. Es ist davon auszugehen, dass bei Optimierung der Prüfverfahren der geforderte Wert erreicht oder unterschritten wird. Die Ergebnisse des zuvor angesprochenen Forschungsvorhabens bleiben abzuwarten.

Die Festlegung der Zuverlässigkeitsanforderungen, die von SKB vorgeben wurden, nämlich die Prüfmethoden so zu gestalten, dass höchstens 1 defekter auf 1000 produzierte Behälter nicht erkannt wird /62/, wird erfüllt. In der Literatur sind keine Hinweise darauf gegeben worden, aus welchen Gründen die Grenze von $p_f = 10^{-03}$ (d. h. 1 defekter Behälter auf 1000 produzierte Behälter) als Ziel gewählt worden ist, insbesondere da in der Langzeitsicherheitsanalyse von keinem bzw. 1 defekten Behälter auf 4000 – 5000 Behälter ausgegangen wurde und somit die Qualitätsanforderungen mit den Annahmen in der Langzeitsicherheitsanalyse nicht kompatibel sind.

4.2.3 Tragfähigkeit des Gusseiseneinsatzes

In diesem Kapitel werden die vorliegenden Informationen zur Tragfähigkeit des Behälters und damit des Gusseiseneinsatzes, dem die Tragfunktion zugewiesen ist, zusammengestellt und den mechanischen Einwirkungen gegenübergestellt, denen er ausgesetzt ist.

Die KBS-3-Behälter werden für ausgediente Brennelemente aus Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren mit unterschiedlichen gusseisernen Einsätzen ausgestattet, weshalb ihre maximale, ertragbare Belastung für isotropen Druck unterschiedlich hoch ist. Endlagerbehälter, die Brennelemente aus Druckwasserreaktoren aufnehmen, können isotropen Drücken von p = 110 MPa standhalten, während Endlagerbehälter, die ausgediente Brennelemente aus Siedewasserreaktoren aufnehmen, nur Drücken von p = 80 MPa standhalten. Aus den Angaben geht nicht hervor, ob es sich bei den vorgenannten Drücken um Bemessungswiderstände auf Grundlage von Bemessungswerten oder um Abschätzungen auf der Basis von charakteristischen Werten handelt, vgl. Kapitel 3.2. Die Angemessenheit des Widerstandsmodells kann deshalb nicht bewertet werden.

Gemäß Kapitel 3.6.3 ist der Behälter folgenden Bemessungssituationen ausgesetzt:

- Bauzustände: Beanspruchungen in Folge des Einlagerungsvorganges und der Positionierung im Bohrloch
- Transiente Phase: Thermomechanische, hydromechanische und mechanische Beanspruchungen in Folge Temperaturentwicklung und Aufsättigungsvorgängen
- Monotone/stationäre Phase: Langfristige hydromechanische und mechanische Beanspruchungen

Für die Bauzustände und die transiente Phase liegen keine ausreichenden Informationen bzgl. der Behälterbelastung vor. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die für die monotone/stationäre Phase ermittelten Belastungen abdeckend sind. Die Ermittlung der Belastung ist nachstehend beschrieben.

Der KBS-3-Behälter wird in einer tiefen kristallinen Gesteinsformation im baltischen Granitschild in den vertikalen Bohrlöchern endgelagert. In das Bohrloch werden ringförmige Bentonitpufferelemente eingebaut, in die das kupferne Einlagerungsgebinde eingesetzt wird. Aufgrund des Quellens des Bentonits wird auf den Behälter zusätzlich zu dem Wasserdruck in der Teufe des Endlagers ein Quelldruck ausgeübt. In einem Klimawechselszenario wird die Überprägung des Endlagers von einer 2 km dicken Eisschicht angenommen. Aufgrund der vorherrschenden Bedingungen bei der Endlagerung und der eiszeitlichen Überprägung treten folgende Einwirkungen auf das Gebinde auf:

- In der Endlagerteufe von ca. 500 m herrscht ein Grundwasserdruck von h = 5 MPa vor.
- Es wird von einem maximalen Quelldruck von q = 8 MPa aus dem Bentonitquellen ausgegangen.
- Im Basisszenario ohne den Einfluss eiszeitlicher Überprägung wird eine isotrope Druckbeanspruchung des Behälters von max p = 13 MPa ermittelt. Angesetzt wird ein isotroper Druck von p = 15 MPa.
- Aufgrund von eiszeitlicher Überprägung wird ein hydrostatischer Druck von max. p = 32 MPa auf das Endlagergebinde erwartet. Mit dem Quelldruck wird ein Gesamtdruck auf das Gebinde von p = 40 MPa prognostiziert /26/.

Da eine eiszeitliche Überprägung im Nachweiszeitraum zu erwarten ist, ist der Druck von p = 40 MPa in Bezug auf die Tragfähigkeit auslegungsbestimmend. Der charakteristische Wert des Einwirkungsmodells beträgt also 40 MPa. Es setzt sich zusammen aus der (hydrostatischen) Belastung durch den Wasserdruck, dem Quelldruck und dem Überlagerungsdruck aus der Eisdecke.

Unter der Annahme, dass die für den Behälter angegebenen ertragbaren Drücke Bemessungswiderstände gemäß Kapitel 3.2 darstellen, kann eingeschätzt werden, dass der Behälter für die betrachteten Einwirkungen ein ausreichend hohes Zuverlässigkeitsniveau im Sinne der Eurocodes aufweist.

Dazu ist, wie bereits erwähnt, einschränkend anzumerken, dass diese Aussage für die hier diskutierten Einwirkungen gilt, eine Vollständigkeitsprüfung in Bezug auf die Einwirkungen wurde hier nicht durchgeführt.

4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus

In Bezug auf die unter 4.2 aufgeführten nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften für die einzelne Barriere Behälter lässt sich das Ergebnis der Bestimmung des nachweisbaren Zuverlässigkeitsniveaus des KBS-3-Behälters wie folgt zusammenfassen.

Die qualitätsgerechte Herstellbarkeit des Behälters ist mit einem nachweisbaren Zuverlässigkeitsniveau von $p_s = (1\text{-}3{,}6 \cdot 10^{-4})$ gesichert. Entsprechende Produktions- und Prüfverfahren sind verfügbar. Dies entspricht nicht ganz dem Zuverlässigkeitsniveau von $p_s = (1\text{-}10^{-4})$ nach Eurocode, es ist aber zu erwarten, dass mit zunehmender Prozessoptimierung in Bezug auf das Schweiß- und Prüfverfahren bei laufender Produktion die Ausschussquote sich auf diesen Wert verringert bzw. ihn unterschreitet.

Damit ist zu erwarten, dass die Kupferhülle (bei beschränkten Verformungen des Gusseiseneinsatzes) die Funktionsanforderungen

- Dichtheit
- Beständigkeit

hinreichend zuverlässig erfüllen wird.

Bzgl. des Gusseiseneinsatzes ist festzustellen, dass keine ausreichenden Informationen vorliegen, um einschätzen zu können, ob das vorliegende, auslegungsbestimmende Einwirkungsmodell Druck aus eiszeitlicher Überprägung abdeckend ist. Weiterhin ist nicht klar, ob der Bemessungswiderstand auf Grundlage von Bemessungswerten ermittelt wurde. Wird jedoch angenommen, dass

- das Einwirkungsmodell Druck aus eiszeitlicher Überprägung abdeckend ist und
- der Bemessungswiderstand für die Tragfähigkeit des Gusseiseneinsatzes auf Bemessungswerten beruht,

ist die Tragfähigkeit des KBS-3-Behälters zuverlässig gegeben.

Bei gesicherter Tragfähigkeit sind die Verformungen von Eisen und Stahl unter mechanischer Belastung i. d. R. gering. Damit ist auch die Rissbeschränkung der Kupferhülle zuverlässig gegeben.

Die Lagesicherheit ist nicht durch den Behälter zu gewährleisten und ist deshalb nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Unter den o. g. Annahmen kann davon ausgegangen werden, dass der KBS-3-Behälter bei laufender Produktion und Prüfung die an ihn gestellten Anforderungen hinreichend zuverlässig im Sinne des funktionsbezogenen, risikobasierten Sicherheitsnachweiskonzeptes nach Eurocode erfüllt.

4.3 Schachtverschluss im Tongestein: Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus

In Bezug auf die für den Schachtverschluss nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften /34/ (s. a. Kapitel 3.6.3)

- Herstellbarkeit
- Dichtheit (= hydraulischer Widerstand)
- Hydromechanische Widerstandsfähigkeit (= Integrität)
  - Tragfähigkeit
  - Rissbeschränkung
  - Verformungssicherheit
  - Erosions- und Suffosionssicherheit
- Beständigkeit (= Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität)

wird er im Folgenden in seinem Aufbau detaillierter beschrieben und die Funktion seiner Einzelelemente herausgearbeitet. Der Aufbau eines Schachtverschlusses im Tongestein ist für das Opalinuston-Projekt in Abbildung 1 dargestellt und sein Aufbau in Kapitel 2.3.2.1 beschrieben. Dem Schachtverschluss wird nicht nur der eigentliche Baukörper, der hier im Wesentlichen aus Dichtelement und Widerlagern besteht, sondern auch die Kontaktzone zum und die Auflockerungszone im umgebenden Gestein zugeordnet. Er besteht also aus den Einzelelementen

- Widerlager,
- Dichtelement,
- Kontaktzone,
- Auflockerungszone,

die entweder unterschiedliche Funktionen besitzen, wie Widerlager und Dichtelement, oder unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, wie die drei parallel angeordneten Elemente Dichtelement, Kontaktzone und Auflockerungszone. Sie weisen ggf. unterschiedliche hydraulische Eigenschaften auf, ihr hydraulischer Widerstand ist aber integral in Bezug auf die Radionuklidfreisetzung maßgebend.

Gemäß Abbildung 1 sind, sieht man von den geringmächtigen Filter- und Übergangsschichten ab, als Baustoffe im Wesentlichen Schotter für die Widerlager und Bentonit für das Dichtelement vorgesehen. Bentonit ist ein natürlich vorkommendes Tonmaterial, das auf Grund seiner dichtenden Eigenschaften, seiner hohen Ionenaustauschkapazität, seiner Dauerhaftigkeit und nicht zuletzt seiner Umweltverträglichkeit als Abdichtungsmaterial für konventionelle Deponien verwendet wird. Schotter und Bentonit zählen zu den nicht (Schotter) bzw. wenig (Bentonit) kohäsiven Baustoffen bzw. körnigen Erdstoffen. In Abbildung 39 ist zusammengestellt, welche Einzelnachweise für den in Abbildung 1 dargestellten Schachtverschluss geführt werden müssen, wenn man die Empfehlungen nach /34/ zu Grunde legt, die für konventionelle Deponieabdichtungen aus Bentonit gelten, und die Auflockerungszone im umgebenden Gestein zusätzlich berücksichtigt. Den Empfehlungen /34/ liegt das gleiche

Sicherheits(nachweis)konzept zu Grunde wie den Eurocodes. Die aus ihnen resultierenden Vorgaben können also uneingeschränkt in die weiteren Betrachtungen zum Zuverlässigkeitsniveau eines Schachtverschlusses im Tongestein einbezogen werden.

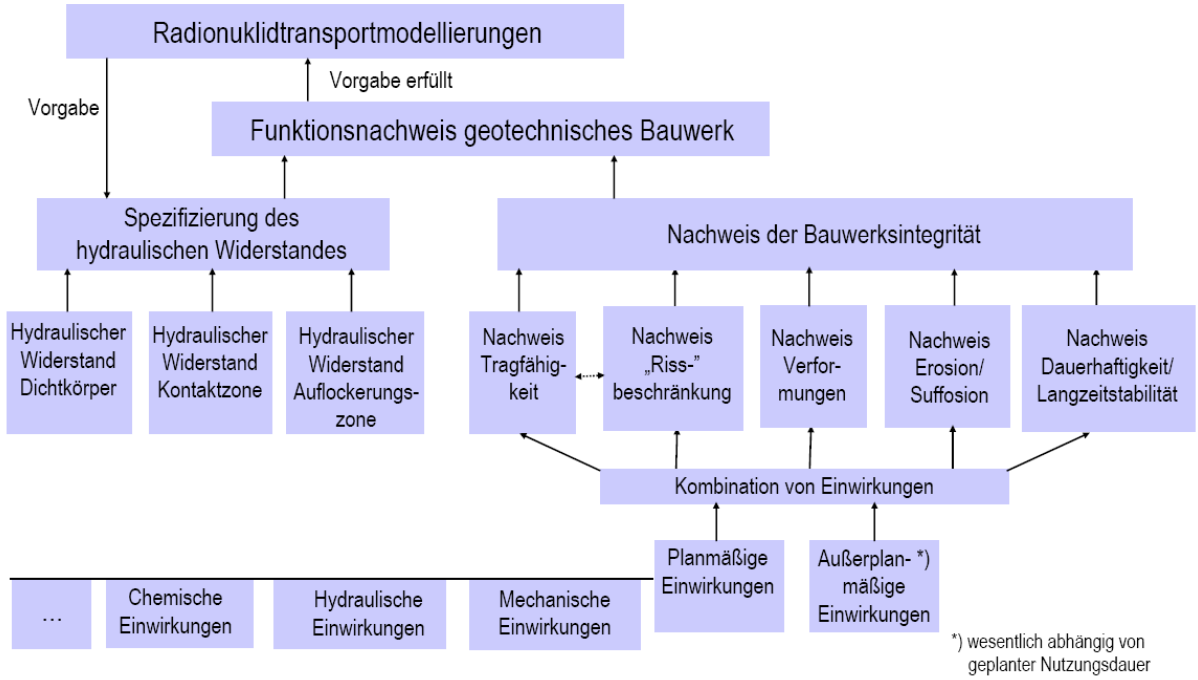


Abbildung 39: Verknüpfung zwischen den Radionuklidtransportmodellierungen im Langzeitsicherheitsnachweis und den funktionsbezogenen Einzelnachweisen für den Schachtverschluss im Tongestein

Leider sind für den Schachtverschluss im Tongestein mit Ausnahme der für die Transportmodellierungen erforderlichen geometrischen Abmessungen Länge und Durchmesser kaum technische Daten angegeben. Auch wurden noch keine Schachtverschlüsse dieses Aufbaus im Tongestein erstellt. Der Schachtverschluss ist jedoch in Bezug auf seinen prinzipiellen Aufbau baugleich mit Schachtverschlüssen im Salzgestein, die im Zusammenhang mit der Trockenverwahrung von Salzbergwerken bereits ausgeführt wurden, und für die, insbesondere im Zusammenhang mit dem FuE-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth /63/, eine umfangreiche, veröffentlichte Datenbasis vorhanden ist. Auf diese wird für die Auslegung der Widerlager (obere und untere Schottersäule) sowie des Dichtelementes aus Bentonit im Hinblick auf die Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus zurückgegriffen. Bei den Filter- und Übergangsschichten handelt es sich um konstruktive Elemente, auf die nicht vertieft eingegangen wird.

Wie bereits ausgeführt, wird dem Schachtverschluss auch die Auflockerungszone im umgebenden Tongestein zugeordnet. Für ihre Bewertung im Rahmen des Funktionsnachweises Dichtheit sind ebenfalls Daten erforderlich. Daten zu Auflockerungszonen im Tongestein liegen aus dem Untertagelabor in Mont Terri (Schweiz) und vom Standort Bure (Frankreich) vor. Auf diese wird ebenfalls im Rahmen der Zuverlässigkeitsbetrachtungen zurückgegriffen.

Auf der o. g. Datenbasis für Schottersäule, Dichtelement und Auflockerungszone wird ein generischer Schachtverschluss im Tongestein entwickelt, für den das Zuverlässigkeitsniveau bestimmt wird. Dem generischen Schachtverschluss werden Datensätze von unterschiedlichen Standorten und Projekten zugeordnet. Deshalb wird im Folgenden darauf geachtet, dass diese jeweils in sich konsistent, miteinander verträglich und realistisch sind, so dass auch ein realistisches Ergebnis bzgl. des Zuverlässigkeitsniveaus für den Schachtverschluss erzielt wird. Dies gilt auch, wenn im Einzelfall Daten geschätzt werden müssen, was nach Möglichkeit aber vermieden wird.

4.3.1 Erzeugung eines konsistenten Datensatzes für die Auflockerungszone

Für die vorliegende Fragestellung ist ein in sich konsistenter Datensatz für die geohydraulische Charakterisierung der Auflockerungszone bereitzustellen, der es zulässt, charakteristische Werte und Bemessungswerte zu ermitteln. Eine Sichtung des verfügbaren Materials ergab, dass mit Hilfe von /64/ für den Standort Bure ein solcher Datensatz erzeugt werden kann. Für den Versuchsort in einer Strecke mit den Abmessungen H : B = 4,30 m : 4,60 m, die sich in 445 m Teufe befindet, wurde die gemessene Gaspermeabilität in Abhängigkeit von der Entfernung von der Kontur ermittelt, vgl. Abbildung 40.

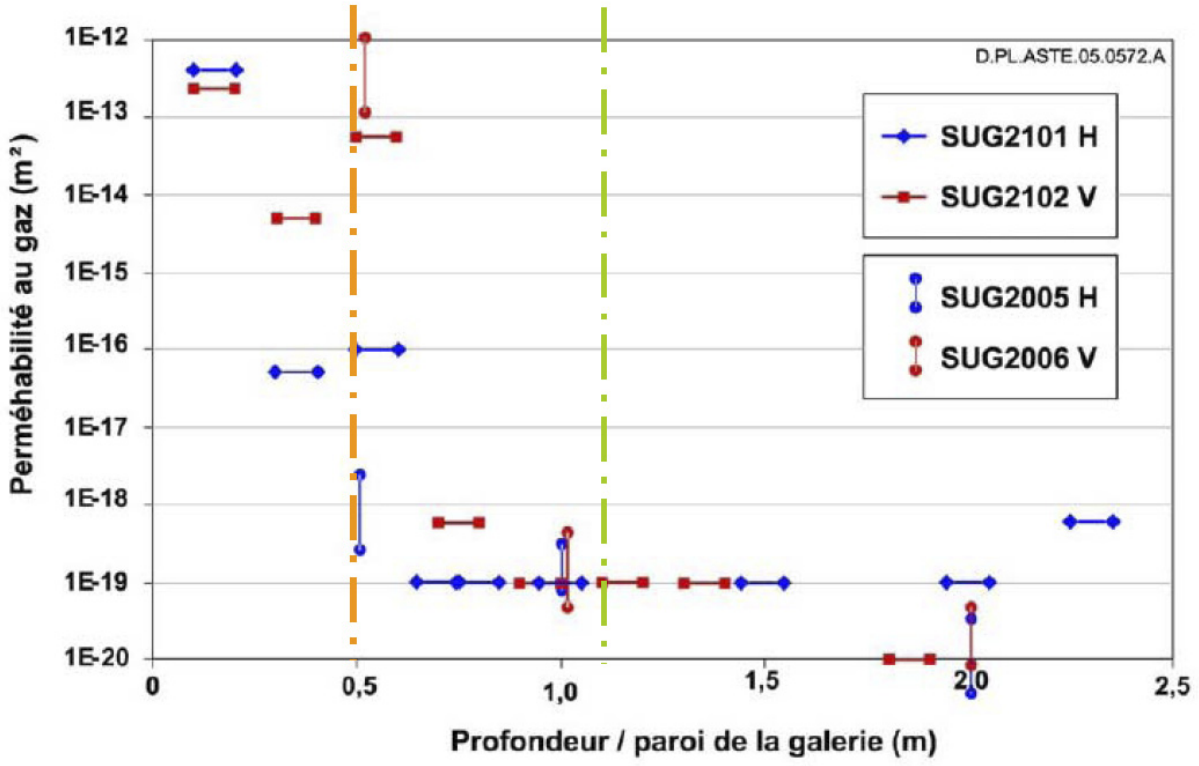


Abbildung 40: Messwerte der Permeabilität in Abhängigkeit von der Entfernung von der Streckenkontur, Standort Bure, Teufe z = 445 m /64/.

Im Folgenden wird angenommen, dass im Bereich der Auflockerungszone, in dem die kleinste Hauptspannung sehr gering ist, der Beginn der Auflockerung (Dilatanz) mit dem spannungsbasierten Kriterium nach Mohr-Coulomb beschrieben werden kann. Die Ausdehnung der Auflockerungszone, auch als plastische Zone bezeichnet, rund um die als kreisförmig angenommene Schachtröhre kann dann bei Annahme eines isotropen Grundspannungszustandes im Gebirge und in einem homogenen Gebirgsausschnitt mit Gl. 4.1 ermittelt werden.

$$\frac{r_0}{r_a} = \left[\frac{2}{\kappa + 1} \cdot \frac{(\kappa - 1) \cdot p_g + \sigma_D}{\sigma_D} \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}} \tag{4.1}$$

mit

$$\kappa = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

r_0 plastische Zone

r_a Hohlraumradius

p_g Gebirgsdruck

σ_D einaxiale Druckfestigkeit

φ Winkel der inneren Reibung

Der Gebirgsdruck ergibt sich zu

$$p_g = z \cdot \gamma \tag{4.2}$$

mit

z Teufe

γ Wichte

Im „Dossier 2005 Referentiel du Site Meuse/Haute Marne, Tome 2“ /64/ sind für den Standort Bure Angaben zum Winkel der inneren Reibung $\varphi_{i,dil}$ und der einaxialen Druckfestigkeit $\sigma_{D,dil}$ bei beginnender Auflockerung (Dilatanzfestigkeit) angegeben, siehe Tabelle 13. Die Werte sind den geomechanischen Klassen A bis E zugeordnet, die sich wiederum auf lithologische Einheiten beziehen. Angegeben sind Mittelwerte für die einaxialen Dilatanzfestigkeiten, ebenso wie für den Winkel der inneren Reibung, der in Abhängigkeit von der Normalspannung ermittelt wurde.

Tabelle 13: Einaxiale Druckfestigkeit (Dilatanzfestigkeit) und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit von der Normalspannung (Mittelwerte) bei beginnender Auflockerung für die geomechanischen Klassen A bis E /64/

Geomechanische Klasse	*Einaxiale Dilatanzfestigkeit $\sigma_{D,Dil}$ [MPa]*	*Winkel der inneren Reibung bei Dilatanz $\varphi_{i,Dil}$ [°]*	*Zugehörige Normalspannung σ_N [MPa]*
A	17,7	12	0
		10	5
		9	12
B bis E	15,0	10	0
		9	5
		8	12

Die Mittelwerte aus Tabelle 13 werden in Gl. 4.1 eingesetzt und die Ausdehnung der Auflockerungszone bestimmt und mit der Ausdehnung des Bereichs deutlich erhöhter Permeabilitätswerte in Abbildung 40 verglichen. Für die geomechanische Klasse A konnte keine Übereinstimmung erzielt werden, für die geomechanische Klasse B bis E ergab sich jedoch trotz des einfachen Modells ein gute Übereinstimmung, wobei eine nicht konservative Untergrenze durch die rote Linie, eine konservative Obergrenze durch die grüne Linie gekennzeichnet ist (Abbildung 40). Zur Bestimmung der Ausdehnung der Untergrenze kamen folgende Werte /64/ zum Einsatz:

- Teufe (Versuchsort Bure): 445 m
- Mittlere Dichte des Gebirges: 2500 kg/m³
- Teufendruck nach Gl. 4.2: 10,9 MPa
- Einaxiale Dilatanzfestigkeit: 15 MPa
- Winkel der inneren Reibung, konturnah (d. h. $\sigma_N = 0$): 10°
- Hohlraumradius (Versuchsort Bure, Mittelwert aus halber Streckenhöhe 2,15 m und halber Streckenbreite 2,30 m): 2,225 m

Mit Hilfe von Gl. 4.1 wird eine Untergrenze der Auflockerungszone von 0,49 m (rote Linie) ermittelt. Diesem Modell liegt zu Grunde, dass die aufgelockerte Zone bis zum Erreichen der Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb ihre vollständige Tragfähigkeit besitzt. Unterstellt man jedoch eine Tragfähigkeit von 0, bedeutet das eine fiktive Erhöhung des Hohlraumradius um 0,49 m. Damit ergibt sich eine Auflockerungszone von 1,09 m, wenn man den geometrisch vorhandenen Hohlraumradius beibehält. Wie Abbildung 40 zeigt, wird damit der Übergangsbereich zwischen der aufgelockerten Zone mit erhöhten Permeabilitätswerten und dem nicht aufgelockerten Bereich gut erfasst.

Für die einaxiale Dilatanzfestigkeit wird angenommen, dass sie normalverteilt ist und dass für sie der gleiche Variationskoeffizient zu Grunde gelegt werden kann, wie für die einaxiale Druckfestigkeit. Für die einaxiale Druckfestigkeit der geomechanischen Klassen B und C kann nach /64/ ein Variationskoeffizient von 6,8/21 = 0,324 bestimmt werden.

Damit ist ein konsistenter Datensatz für die geohydraulische Charakterisierung der Auflockerungszone erzeugt, der im Folgenden weiter verwendet wird. Für die Lokation des generischen Schachtverschlusses sind damit folgende Daten festgelegt. Das Dichtelement befindet sich in 445 m Teufe am Standort Bure. Der ungestörte Teufendruck in dieser Teufe beträgt 10,9 MPa. Der Schacht hat ohne Ausbau und ohne Nachschnitt einen lichten Durchmesser von 4,45 m. Die Permeabilitätswerte der Auflockerungszone in Abhängigkeit von der Kontur können Abbildung 40 entnommen werden.

4.3.2 Erzeugung eines konsistenten Datensatzes für die Schachtverfüllung

Für die vorliegende Fragestellung wird als nächster Schritt ein konsistenter Datensatz für die Schachtverfüllung bereitgestellt. Eine Sichtung des verfügbaren Materials ergab, dass die in /65/ beschriebene Verfüllung von Salzdetfurth Schacht I sich dafür eignet. Die dort realisierte Verfüllung des Schachtes und der prinzipielle Aufbau des Hauptdichtelementes aus Bentonit sind in Abbildung 41 dargestellt. Der lichte Durchmesser des Schachtes wird mit 5,25 m angegeben /63/, die Dicke des Schachtmauerwerks beträgt etwa 0,5 m. Die Kennwerte der verwendeten Baustoffe Hartgesteinsschotter (Diabas) und Bentonit (binäres Bentonitgemisch, Abbildung 42) können dem zugehörigen FuE-Vorhaben /63/ entnommen werden. Sie werden im Zusammenhang in den folgenden Kapiteln jeweils im Zusammenhang mit den Einzelnachweisen angegeben.

Die Dicke des Dichtelementes (Hauptdichtelementes) wird in /65/ mit 12 m angegeben, einschließlich der Filter- und Übergangsschichten beträgt die Höhe des Dichtelementes 15 m, vgl. Abbildung 41.

Die geometrischen Daten der Schachtverfüllung Salzdetfurth Schacht I lassen sich wie folgt zusammenfassen. Die Teufenlage des Hauptdichtelementes liegt zwischen 421 m und 406 m, der Schachtdurchmesser beträgt 5,25 m und nach Entfernen des Schachtmauerwerkes etwa 6,25 m. Die Höhe der unteren Schottersäule beträgt ca. 500 m. Damit ist praktisch bewiesen, dass eine solche Schachtverfüllung technisch realisiert werden kann. Das Beispiel zeigt die Herstellbarkeit einer solchen Schachtverfüllung, sie wird deshalb im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Damit ist auch ein konsistenter Datensatz für die Schachtverfüllung vorhanden, der im Folgenden weiter verwendet wird. Für die Schachtverfüllung des generischen Schachtverschlusses werden damit folgende Daten festgelegt. Die obere und die untere Schottersäule bestehen aus Hartgesteinsschotter (Diabas). Das Hauptdichtelement wird aus binärem Bentonitgemisch erstellt, seine Dicke beträgt 12 m. Einschließlich Filter- und Übergangsschichten beträgt die Dicke des Hauptdichtelementes 15 m.

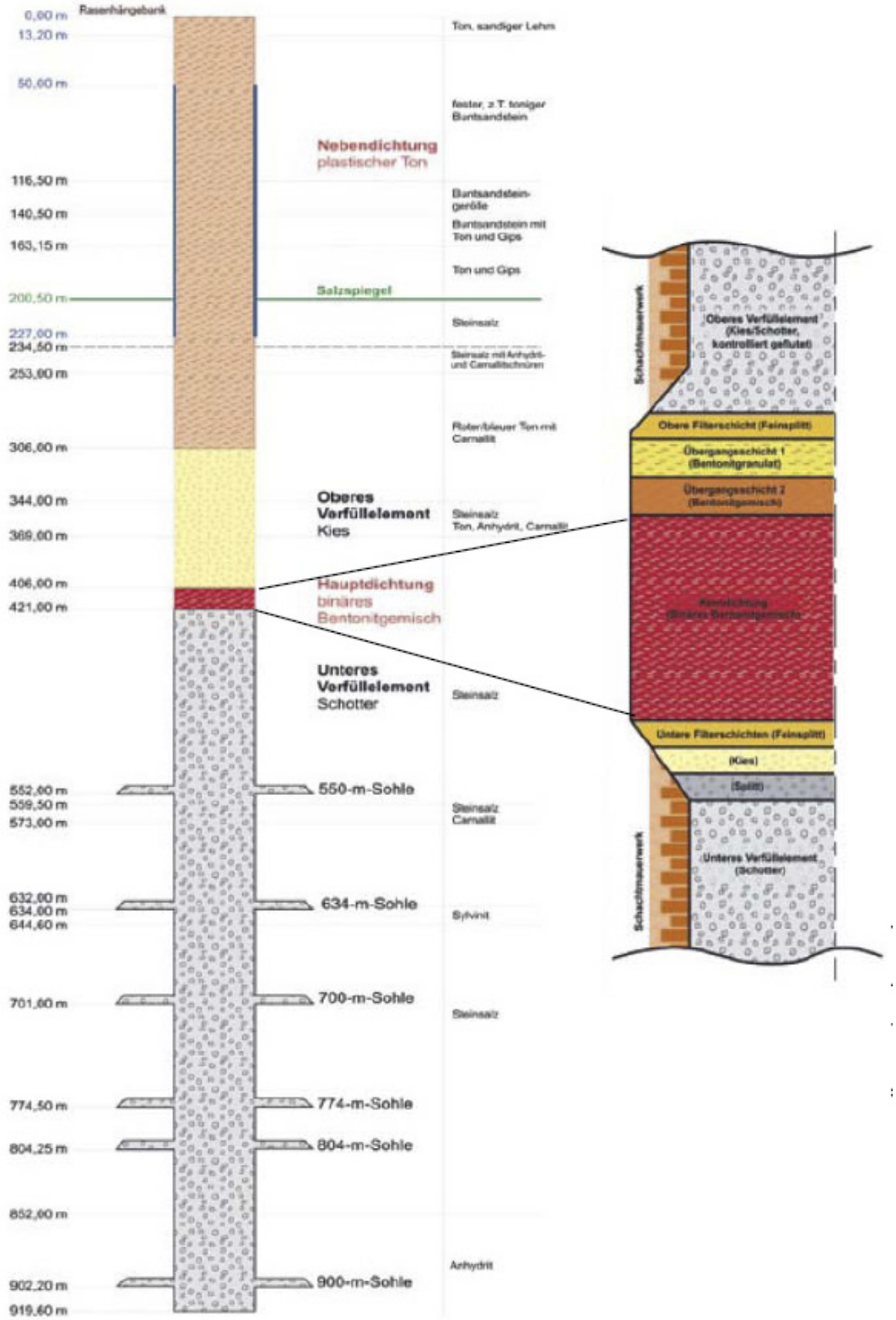


Abbildung 41: Schachtverfüllung Salzdetfurth Schacht I /65/

Abbildung 42: Binäres Bentonitgemisch Schachtverfüllung Salzdetfurth Schacht I /65/

4.3.3 Generischer Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein

Der generische Schachtverschluss baut auf dem schweizerischen Konzept für einen Schachtverschluss im Tongestein auf. Abbildung 1 kann entnommen werden, dass die schweizerischen Planungen für ein Endlager im Tongestein von einem einsöhlig aufgefahren Bergwerk ausgehen. Die Höhe der unteren Schottersäule unterhalb des Hauptdichtelementes sollte demnach 150 m nicht überschreiten, wenn man die gleichen Abstände von ca. 130 m zwischen 550-m-Sohle (oberste Sohle) und Hauptdichtelement sowie von 20 m zwischen 900-m-Sohle (tiefste Sohle) und Schachttiefstem wie im Fall der Schachtverfüllung Salzdetfurth Schacht I zu Grunde legt (Abbildung 41). Die Höhe der unteren Schottersäule beträgt also ca. 150 m. Abweichend von Schachtverschlüssen im Salzgestein wird für den generischen Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein davon ausgegangen, dass der gesamte Schacht ausgebaut ist. Im Bereich der unteren Schottersäule wird ein Ausbau aus Ziegelmauerwerk angenommen, der im Schacht verbleibt, da er mit Tongestein dauerhaft verträglich ist. Als Verfüllmaterial für die untere Schottersäule wird Hartgesteinsschotter (Diabas) analog zu Salzdetfurth Schacht I verwendet.

Die Standortdaten entsprechen dem Standort Bure, sie werden als Ergebnis der Standorterkundung für das Hauptdichtelement in 445 m Teufe unterstellt. Die Standorterkundung wird vor dem Nachschnitt durchgeführt. Dementsprechend beträgt der Schachtdurchmesser des generischen Schachtverschlusses ohne Ausbau und ohne Nachschnitt der Auflockerungszone 4,45 m, was ein relativ geringer Durchmesser ist, der aber sowohl mit dem schweizerischen Konzept (Abbildung 1) und den Standortdaten Bure (Abbildung 40) kompatibel ist. Das hier betrachtete Hauptdichtelement besitzt analog zum Schachtverschluss Salzdetfurth einschließlich Filter- und Übergangsschichten eine Dicke von 15 m und ist aus Konsistenzgründen im Teufeniveau zwischen 452 m und 437 m angeordnet. Die Dichtschicht aus binärem Bentonitgemisch ist 12 m dick und befindet sich zwischen 451 m und 439 m Teufe.

Der Schachtdurchmesser für den ausgebauten Schacht wird entsprechend dem schweizerischen Konzept in Abbildung 1 zu 3,60 m angenommen, so dass bei einem Schachtdurchmesser von 4,45 m für den Schachtausbau aus Ziegelmauerwerk eine Dicke von ca. 40 cm verbleibt. Der generische Schachtverschluss ist in Abbildung 43 dargestellt. Sieht man von der Dicke des Hauptdichtelementes ab, steht der generische Schachtverschluss mit dem schweizerischen Schachtverschlusskonzept für ein Endlager im Tongestein in guter Übereinstimmung.

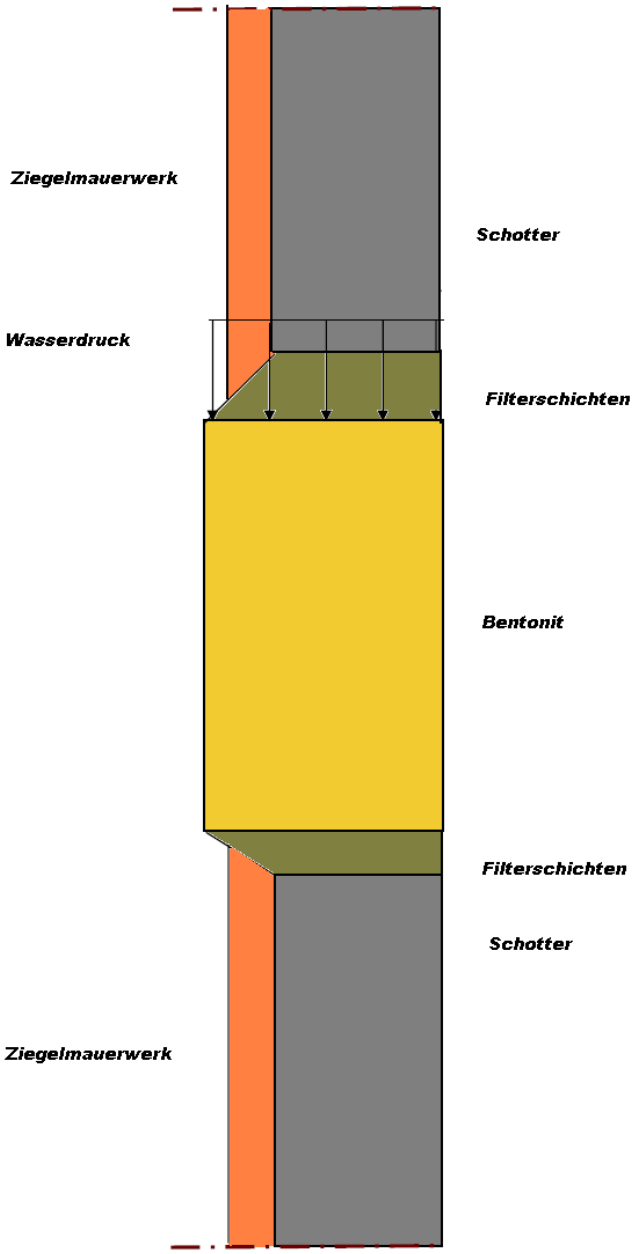


Abbildung 43: Generischer Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein

Bei dem Schachtverschlusskonzept sind Trag- und Dichtfunktion voneinander getrennt. Im Rahmen des Funktionsnachweises für das geotechnische Bauwerk gemäß Abbildung 39 übernimmt das Dichtelement die Abdichtungsfunktion. Als Maßstab für die Funktionsfähigkeit des Dichtelementes dient eine integrale hydraulische Leitfähigkeit bezogen auf den Schachtdurchmesser nach Nachschnitt der Auflockerungszone von $k_f = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s, wie sie in Tabelle 2 (Kapitel 2.5.2.1) im Basisszenario des schweizerischen Konzeptes für Schächte und Rampen angegeben ist. Dieser Wert entspricht in etwa einer integralen Permeabilität von $k = 5 \cdot 10^{-18}$ m², die im Mittel zuverlässig erreicht werden muss. Die Schottersäule übernimmt die Tragfunktion und muss die Lagesicherheit des Dichtelementes gewährleisten. Als zulässige Grenze für die Setzung (Verformung) der Schottersäule wird bei einer Einbaudichte des Bentonits von 1,60 – 1,75 g/cm³ ein Wert von 30 cm zu Grunde gelegt, wie sie in /66/ für ein 10 m dickes Dichtelement abgeleitet wurde.

Gemäß Abbildung 39 sind für verschiedene Einzelelemente des Schachtverschlusses folgende Einzelnachweise zu führen, um die Funktionsfähigkeit des Schachtverschlusses sicherzustellen. Die Schottersäule gewährleistet, wie bereits erwähnt, die Lagesicherheit des Dichtelementes. Dazu sind die Einzelnachweise der Tragfähigkeit und der Verformungsbeschränkung für die Schottersäule zu führen. Die Filter- und Übergangsschichten sind konstruktiv so gewählt, dass äußere und Kontakterosions- bzw. –suffosionssicherheit für das Dichtelement gegeben sind. Dies ist auch ein Grund, den Ziegelausbau im Bereich der Schottersäule im Schacht zu belassen, und so äußere und Kontakterosion bzw. -suffosion zwischen Gebirge und Schottersäule während der Wiederaufsättigung des Endlagers zu vermeiden. Für das Dichtelement sind der Nachweis der Rissbeschränkung zu führen sowie der Nachweis des erforderlichen hydraulischen Widerstandes. Da es sich bei dem Dichtelement um einen körnigen Erdstoff handelt, sind auch die innere Erosions- und Suffosionssicherheit zu gewährleisten. Für die Kontaktzone sind ebenfalls der Nachweis der Rissbeschränkung und des erforderlichen hydraulischen Widerstandes sowie der Nachweis der Kontakterosions- und Kontaktsuffosionssicherheit zu führen. Für die Auflockerungszone ist die Rissbeschränkung und der erforderliche hydraulische Widerstand nachzuweisen, in Bezug auf Erosions- und Suffosionssicherheit wird davon ausgegangen, dass diese gegeben sind.

Auf die Betrachtung des Nachweises der Dauerhaftigkeit der Baustoffe im Wirtsgestein Ton wird verzichtet. Bei den gewählten Baustoffen für die Schachtverfüllung wird diese als gegeben vorausgesetzt, da grundsätzlich davon auszugehen ist, dass sie als faktisch arteigen eine hohe Übereinstimmung mit dem Wirtsgestein aufweisen.

4.3.4 Widerlager: Untere Schottersäule

Für die Lagesicherheit des Dichtelementes ist im Wesentlichen die untere Schottersäule maßgebend. Sie wird deshalb im Folgenden exemplarisch betrachtet.

Für die Schottersäulen sind prinzipiell folgende Bemessungssituationen in Bezug auf ihre Funktionen Tragfähigkeit und Verformungsbeschränkung zu betrachten, s. a. Kapitel 3.6.3:

- Bauzustände
- Transiente Phase
- Monotone/stationäre Phase
- Erdbeben

Die nachstehenden Betrachtungen beschränken sich auf den Nachweis der Verformungsbeschränkung, da angenommen wird, dass das Schachtmauerwerk und der Hartgesteinsschotter eine so hohe Festigkeit aufweisen, dass Festigkeitsversagen, wie Kornbruch, hinreichend zuverlässig ausgeschlossen werden kann.

In Bezug auf die Bemessungssituationen wird nur die transiente Phase betrachtet, weil Setzungen, die bereits beim Einbau der Schottersäule auftreten, für das erst nachfolgend eingebaute Dichtelement ohne Belang sind und während der stationären Phase, d. h. nach Aufsättigung des Porenraums im Schotter, die Schottersäule nur noch durch die effektiven von oben einwirkenden Drücke belastet wird, während vor Aufsättigung der totale von oben wirkende Druck berücksichtigt werden muss. Die Bemessungssituation Erdbeben wäre prinzipiell zu untersuchen, ihre Berücksichtigung ginge jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

4.3.4.1 Nachweisverfahren / Nachweis der Verformungssicherheit

Die Spannungen und Verformungen in der Schottersäule werden nach der Silotheorie berechnet. Die Untersuchungen im FuE-Vorhaben Schacht Salzdetfurth zeigen, dass die analytische Lösung nach Silotheorie sehr gut mit Messergebnissen in der Schottersäule und Beobachtungen sowie auch mit dem Ergebnis genauerer, numerischer Berechnungen übereinstimmt. Die hier verwendete analytische Lösung ist nachstehend aufgeführt.

Die vertikalen Spannungen in einer geschichteten Schottersäule lassen sich nach /67/ wie folgt ermitteln

$$\sigma_z = \frac{\rho \cdot g \cdot A}{\lambda \cdot U \cdot \tan\varphi_W}[1 - e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot U \cdot \tan\varphi_W}{A}}] + p_0 \cdot e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot \tan\varphi_W}{A}} \qquad (4.3)$$

mit

ρ	Einbaudichte des (angefeuchteten) Schotters
g	Erdbeschleunigung
A	Schachtquerschnitt
U	Schachtumfang
z	Tiefe (ab Oberkante Schottersäule)
φ_W	Wandreibungswinkel
φ	Winkel der inneren Reibung des Schotters
λ	Horizontallastverhältnis, hier mit $\lambda = (1 - \sin\varphi)$ für den Ruhedruck
p_0	Auflast auf die Schottersäule

Die Horizontalspannungen betragen dann

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \cdot \sigma_z \tag{4.4}$$

Die Verschiebungen in Folge der Auflast p_0 auf eine Schottersäule ergeben sich bei behinderter Querdehnung

$$\varepsilon_x = 0 = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \text{(für } \varepsilon_y \text{ entsprechend)} \tag{4.5}$$

mit

E	Elastizitätsmodul
ν	Querdehnzahl

dann wie folgt

$$\varepsilon_z = \frac{p_0 \cdot (1 - 2\lambda\nu)}{E} \cdot e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot U \cdot \tan\varphi_W}{A}} \tag{4.6}$$

$$\Delta l = \frac{p_0 \cdot (1 - 2\lambda\nu)}{E} \int_0^L e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot U \cdot \tan\varphi_W}{A}} dz \tag{4.7}$$

mit

L	Länge der Schottersäule
Δl	Verschiebung der Schottersäule

4.3.4.2 Ermittlung der Einwirkungen auf die untere Schottersäule

1. Belastung aus oberer Schottersäule

Die Vertikalbelastung aus der oberhalb des Dichtelementes eingebauten Schottersäule/Schachtverfüllung (vgl. Abbildung 43) resultiert aus der Vertikalkomponente der Silospannungen σ_z. Aufgrund des Siloeffektes verbleibt nur noch eine kleine Vertikalkomponente, die auf die Oberkante des Bentonitdichtelementes und damit auf die untere Schottersäule einwirkt. Auf eine genaue Ermittlung der Spannungen auf den Siloboden (hier: die Oberkante des Bentonitdichtelementes) wird hier der Einfachheit halber verzichtet, stattdessen kommt der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{F,1}$ = 1,35 zur Anwendung.

Die vertikalen Silospannungen ergeben sich aus Gl. 4.3 für lange Schottersäulen zu:

$$\sigma_z = \frac{\rho \cdot g \cdot A}{\lambda \cdot \tan\varphi_W \cdot U} \tag{4.8}$$

mit

ρ	Einbaudichte des feuchten Schotters: 1700 kg/m³ (bilanzierter Wert /63/)
g	Erdbeschleunigung: 9,81m/s²
A	Schachtquerschnitt: $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 3{,}6^2}{4} = 10{,}2\ m^2$
U	Schachtumfang: $U = \pi \cdot d = \pi \cdot 3{,}6 = 11{,}3\ m$
φ	Winkel der inneren Reibung des feuchten Schotters: 36° (Mittelwert) /66/
φ_W	Wandreibungswinkel Ziegelmauerwerk / Schotter: 21° (Mittelwert) /66/
λ	Horizontallastverhältnis: $\lambda = (1 - \sin\varphi)$

Die Auslegung von Silozellen tritt in der Baupraxis häufig auf und deshalb ist ein hoher Kenntnisstand vorhanden. Für die Schüttgutkennwerte des Schotters Winkel der inneren Reibung, Horizontallastverhältnis und Wandreibungswinkel ist es ausreichend die Mittelwerte zu kennen /68/, wenn gemäß /68/ vorgegangen wird und die Mittelwerte jeweils wie erforderlich abgemindert oder erhöht werden. Für die maximalen Vertikallasten auf den Siloboden sind für den Wandreibungskoeffizienten $\mu = \tan \varphi_W$ und das Horizontallastverhältnis der untere Grenzwert und für den Winkel der inneren Reibung der obere Grenzwert als charakteristische Werte anzusetzen, d. h. $\mu = \tan \varphi_W / a_\mu$, $\lambda = \lambda_m / a_\lambda$ und $\varphi = \varphi_m / a_\varphi$. Für a_μ, a_λ und a_φ werden hier die vereinfachten Werte von 1,1 angenommen /68/. Damit ergeben sich die charakteristischen Werte $\mu = 0{,}35$, $\lambda = 0{,}32$ und $\varphi = 40°$.

Werden alle Eingangswerte in Gl. 4.8 eingesetzt wird folgendes Ergebnis erhalten:

$$\sigma_{z,oben} = \frac{\rho \cdot g \cdot A}{\lambda \cdot \mu \cdot U} = \frac{1700 \cdot 9{,}81 \cdot 10{,}2}{0{,}32 \cdot 0{,}35 \cdot 11{,}3} = 134407 N/m^2 \approx 0{,}13 MPa$$

Aus der oberen Schottersäule werden $\sigma_{z,\ oben}$ = 0,13 MPa als Vertikalkomponente über das Dichtelement in das Widerlager (die untere Schottersäule) übertragen. Diese Vertikalbelastung kann Setzungen in der Schottersäule hervorrufen und ist deshalb als Einwirkung zu berücksichtigen.

2. Eigenlast des Bentonitdichtelementes

Es wird konservativ davon ausgegangen, dass das Dichtelement auf Grund seiner Dicke von nur 15 m keine lastabtragende Wirkung, sondern nur abdichtende Funktion hat. Daher werden die Eigenlast des Dichtelements und die Vertikallast aus der oberen Schottersäule vollständig über das Dichtelement auf das Widerlager (untere Schottersäule) weitergeleitet.

Die geforderte Einbautrockendichte von ρ_{tr} = 1,75 g/cm³ stellt eine obere, technisch erreichbare Grenze dar und muss mit Qualitätssicherungsmaßnahmen sichergestellt werden. D. h. eine unbeabsichtigte Erhöhung der Einbautrockendichte ist nicht ohne weiteres möglich. Aus diesem Grund wird für die Ermittlung der Auflast aus dem Dichtelement (Bentonitdichtelement, Filter- und Übergangsschichten) der Einbauwert der Trockendichte des Bentonits von ρ_{tr} = 1,75 g/cm³ eingesetzt, d. h. es kommt ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{F,2}$ = 1,0 zur Anwendung.

Der charakteristische Wert der Auflast (Druck) auf die Schottersäule durch die Eigenlast $p_{D,k}$ des Dichtelements errechnet sich zu:

$$p_{D,k} = \rho \cdot d \cdot g = 1750 \cdot 15 \cdot 9{,}81 = 257.512\ N/m^2 \approx 0{,}26\ MPa$$

mit

ρ	Einbaudichte des Bentonits: 1750 kg/m³
d	Dicke des Dichtelements: d = 15 m
g	Erdbeschleunigung: g = 9,81 m/s²

Der Vertikaldruck $p_{D,k}$ in Folge des Eigengewichts des Dichtelementes kann Setzungen in der Schottersäule hervorrufen und ist deshalb ebenfalls als Einwirkung zu berücksichtigen

3. Belastung aus Flüssigkeitsdruck ab Oberkante Betonitdichtelement

Die Oberkante des Dichtelementes aus Bentonit liegt in einer Teufe von z = 439 m. Eine Veränderung der Teufenlage wird in diesem Beispiel nicht berücksichtigt, ist aber prinzipiell z. B. im Rahmen glazialer Szenarien mit zu betrachten. Da die Teufenlage im vorliegenden Fall gut bekannt ist, kommt ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{F,3}$ = 1,0 zur Anwendung. Für die zufließenden Wässer wird eine Dichte von 1,15 g/cm³ angesetzt, d.h. sie werden als mineralisiert angenommen. Der Grad der Mineralisation ist standortspezifisch zu ermitteln. Der charakteristische Wert des maximalen Laugendrucks $p_{L,k}$ berechnet sich so zu:

$$p_{L,k} = \rho \cdot z \cdot g = 1150 \cdot 439 \cdot 9{,}81 = 4952.579\ N/m^2 \approx 5{,}0\ MPa$$

mit

ρ	Dichte der mineralisierten Wässer: ρ = 1150 kg/m³
z	Teufe: z = 439 m
g	Erdbeschleunigung: g = 9,81 m/s²

Aus der oberen Flüssigkeitssäule werden $p_{L,k}$ = 5,0 MPaals Vertikalkomponente über das Dichtelement in das Widerlager (die untere Schottersäule) übertragen. Diese Vertikalbelastung ist ebenfalls als Einwirkung zu berücksichtigen.

Unter Verwendung der ermittelten Zwischenergebnisse, d. h. mit dem Vertikaldruck aus der oberen Schottersäule von $\sigma_{z,oben}$ = 0,13 MPa, der Eigenlast des Dichtelements $p_{D,k}$ = 0,26 MPa und des Laugendrucks $p_{L,k}$ = 5,0 MPa sowie den aufgeführten Teilsicherheitsbeiwerten ergibt sich der Bemessungswert der maßgebenden Einwirkungskombination gemäß Gl. 3.1 wie folgt:

$$E_d = \gamma_{F,1} \cdot \sigma_{z,oben} + \gamma_{F,2} \cdot p_{D,k} + \gamma_{F,3} \cdot p_{L,k} = 1{,}35 \cdot 0{,}13 + 1{,}0 \cdot 0{,}26 + 1{,}0 \cdot 5{,}0 = 5{,}44\ MPa \approx 5{,}5\ MPa$$

4.3.4.3 Ermittlung der resultierenden Setzungen der Schottersäule

Um den Verformungswiderstand bzw. die resultierenden Setzungen in Folge der Einwirkungen zu quantifizieren, kommt Gl. 4.7 zur Anwendung. Während der Bemessungswert der Einwirkungen E_d für p_0 eingesetzt wird, lässt sich der Verformungswiderstand nicht so offensichtlich formulieren. Es werden die Verformungen in Folge des Bemessungswertes der Einwirkungen unter Ansatz des geringsten Verformungswiderstandes ermittelt. Der geringste Verformungswiderstand tritt bei der gleichen Kombination der charakteristischen Werte auf, wie die größte Spannung auf den Siloboden, d. h. $\mu = \tan \varphi_W/a_\mu$ 0,35, $\lambda = \lambda_m/a_\lambda$ = 0,32 und $\varphi = \varphi_m/a_\varphi$ = 40°. Die elastischen Konstanten werden analog zu /66/ als Mittelwerte bzw. Nennwerte eingesetzt, d. h.

E	Elastizitätsmodul: 200 MPa
v	Querdehnzahl: 0,32
L	Länge der Schottersäule: 150 m
A	Schachtquerschnitt: 10,2 m²
U	Schachtumfang: 11,3 m

Da der Verformungswiderstand durch Integration ermittelt wird, in den ein maßgeblicher Anteil der Schottersäulenhöhe eingeht, kann in diesem Fall von vorsichtig geschätzten Mittelwerten ausgegangen werden. Ein gesonderter Teilsicherheitsbeiwert zur Abminderung der Verformungen braucht nicht berücksichtigt zu werden.

Durch Integration der nichtlinearen Stauchungen nach Gl. 4.7 /66/ über die Höhe der Schottersäule erhält man die rechnerischen Setzungen zu

$$\Delta l = \frac{p_0 \cdot (1 - 2\lambda\nu)}{E} \cdot \frac{1}{\frac{\lambda \cdot U \cdot \mu}{A}} \cdot \left[-e^{\frac{-L \cdot \lambda \cdot U \cdot \mu}{A}} + 1 \right] = 0{,}18 \text{ m}$$

In den Eingangsgrößen wurden Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{F,\,i}$ zugrunde gelegt. Des Weiteren werden die mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagten Materialkennwerte eingesetzt. Die Ermittlung der Setzungen erfolgt daher auf dem Niveau eines Tragfähigkeitsnachweises mit Teilsicherheitsbeiwerten. Das Setzungsverhalten ist bedeutsam für die langzeitige Funktion des Dichtelements, da bei zu großen Setzungen die notwendigen Eigenschaften des Dichtelements nicht sichergestellt werden können bzw. das Dichtelement seine Wirkung als Abdichtungsbauwerk verliert.

Die Wärmedehnungen des Schotters nach Einbringen und Temperaturerhöhung auf Gebirgstemperatur wurden hier vereinfachend nicht berücksichtigt, da sie günstig im Hinblick auf die Einspannung der Schottersäule wirken. Im FuE-Vorhaben Schacht Salzdetfurth wurde dieser Effekt messtechnisch erfasst /63/.

4.3.4.4 Bewertung des Ergebnisses zum Widerlager

Mit vorh. Δl = 18 cm < zul. Δl = 30 cm wurde die Einhaltung der zulässigen Setzung zuverlässig nachgewiesen.

Zwecks Plausibilitätsprüfung erfolgt ein Vergleich mit Berechnungsergebnissen aus der Literatur /66/. Numerische Berechnungen mit FLAC3D zeigten Setzungen von 0,15 m bei einem Schachtdurchmesser d = 8 m (A = 50,24 m² und U = 25,13 m) sowie einem E-Modul für Schotter von E = 200 MPa sowie Modifikationen des Winkels der inneren Reibung. Setzungsberechnungen mit analytischen Verfahren zeigten Ergebnisse in der gleichen Größenordnung. Die Verwendung der Gl. 4.7 mit den Zahlenwerten aus /66/ ergaben Setzungen von 0,12 m und bestätigen die dort veröffentlichten Zahlenwerte.

Die nach Eurocode rechnerisch ermittelten Setzungswerte liegen systematisch über vergleichbaren Werten aus der Literatur und somit auf der sicheren Seite, allerdings durchaus in der gleichen Größenordnung und sind somit nicht zu konservativ.

Unter der Annahme, dass der Grenzwert von Δl = 30 cm zulässig ist, kann eingeschätzt werden, dass das Widerlager für die betrachteten Einwirkungen ein ausreichend hohes Zuverlässigkeitsniveau im Sinne der Eurocodes aufweist. Die Aussage gilt für die hier diskutierten Einwirkungen, wobei die Bemessungssituation Erdbeben als nicht maßgebend unterstellt wurde.

4.3.5 Dichtung: Bentonitdichtelement, Kontaktzone und Auflockerungszone

Wie aus Abbildung 39 hervorgeht, wird der hydraulische Widerstand der Dichtung durch die parallel geschalteten Elemente Bentonitdichtelement, Kontaktzone und Auflockerungszone bestimmt. Sie weisen eine sogenannte integrale Permeabilität oder Systempermeabilität auf, die sich aus dem Gesamtvolumenstrom durch alle parallelen Elemente der Dichtung errechnet, indem der Gesamtvolumenstrom

$$\dot{V} = \frac{z}{d} \cdot \left(k_{f,D} \cdot A_D + k_{f,K} \cdot A_K + k_{f,ALZ} \cdot A_{ALZ} \right) \qquad (4.9)$$

mit

z	Druckhöhe
d	Dicke des Dichtelements
$k_{f,D}$	hydraulische Leitfähigkeit des Dichtelements
A_D	Fläche des Dichtelements
$k_{f,K}$	hydraulische Leitfähigkeit der Kontaktzone
A_K	Fläche der Kontaktzone
$k_{f,ALZ}$	hydraulische Leitfähigkeit der Auflockerungszone
A_{ALZ}	Fläche der Auflockerungszone

auf den Kernquerschnitt des Dichtelements A_D bezogen wird, d.h.

$$k_{f,int} = \frac{\dot{V} \cdot d}{A_D \cdot z} \qquad (4.10)$$

Für den Querschnitt des Dichtelements wird angenommen, dass der stark aufgelockerte Bereich der Auflockerungszone bis in 0,5 m Tiefe entfernt wird, vgl. Abbildung 40. Der Kontaktzone wird als Arbeitshypothese eine Dicke von 0,1 mm zugewiesen. Die nach dem Nachschnitt verbleibende, zu berücksichtigende Auflockerungszone umfasst den Bereich zwischen 0,5 m und 1,10 m bezogen auf die Stoßkontur vor dem Nachschnitt.

In Bezug auf die Bemessungssituationen wird nur die stationäre Phase nach Aufsättigung der Einlagerungsbereiche betrachtet, da sie für die Radionuklidfreisetzung maßgebend ist, vgl. auch Kapitel 3.6.3.

4.3.5.1 Ermittlung der Permeabilität des Dichtelements aus Bentonit

In diesem Abschnitt wird die Permeabilität des Bentonitdichtelements ermittelt. Es wird der Bemessungswert für die Permeabilität k bzw. für die hydraulische Leitfähigkeit k_f bestimmt. Die hydraulischen Leitfähigkeit k_f für einen Bentonit bestimmter Zusammensetzung lässt sich in Abhängigkeit der Trockendichte beim Einbau ρ_{tr} formulieren, wenn der Bentonit so eingespannt ist, dass bei seiner Durchfeuchtung ein hinreichender Quelldruck mobilisiert wird. Dabei ist zu beachten, dass mit zunehmender Salinität der Lösung der Quelldruck abnimmt bzw. die hydraulische Leitfähigkeit zunimmt, vgl. Abbildung 44.

Für das Dichtelement aus Bentonit kann davon ausgegangen werden, dass es hinreichend eingespannt ist, so dass die hydraulische Leitfähigkeit (Durchlässigkeit) ohne Einschränkung in Abhängigkeit der Bentonittrockendichte beim Einbau formuliert werden kann. Technisch realisierbar sind bei qualitätsgerechter Bauausführung Einbautrockendichten im Wertebereich von $\rho_{tr} = 1{,}60 t/m^3$ bis $\rho_{tr} = 1{,}75 t/m^3$ /66/, vgl. das farbig markierte Intervall in Abbildung 44. In diesem Intervall werden die 11 gemessenen Werte der hydraulischen Leitfähigkeit als logarithmisch normalverteilt angenommen, wobei in diesem sehr kleinen Intervall die Abhängigkeit von der Einbautrockendichte näherungsweise vernachlässigt wird.

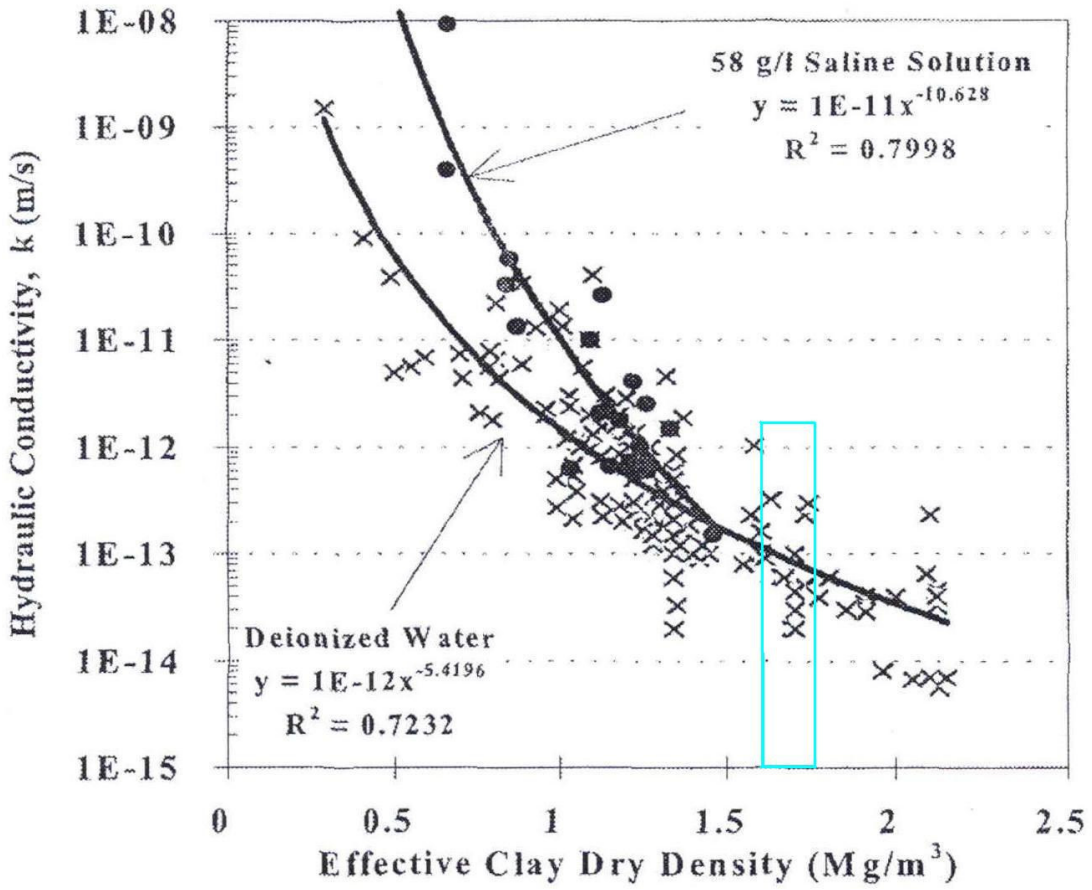


Abbildung 44: **Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Bentonittrockendichte-Zusammenstellung von Literaturdaten nach Dixon in /66/**

Tabelle 14: **Versuchswerte zur hydraulischen Leitfähigkeit von Bentonit bei einer Trockendichte im Intervall 1,60 g/cm³ < ρ_{tr} < 1,75 g/cm³ (Abbildung 44)**

Versuchswerte k_f (abgelesen) [m/s]	***Versuchswerte ln k_f (normiert)***
$3 \cdot 10^{-13}$	-28,83
$3 \cdot 10^{-13}$	-28,83
$2 \cdot 10^{-13}$	-29,24
$1 \cdot 10^{-13}$	-29,93
$9 \cdot 10^{-14}$	-30,04
$6 \cdot 10^{-14}$	-30,44
$5 \cdot 10^{-14}$	-30,63
$4 \cdot 10^{-14}$	-30,85
$4 \cdot 10^{-14}$	-30,85
$3 \cdot 10^{-14}$	-31,14
$2 \cdot 10^{-14}$	31,54
Mittelwert, hier: $m_x = 7,6 \cdot 10^{-14}$	***-30,21***
Standardabweichung, s_x	***0,9226***
Variationskoeffizient, V_x	***0,0305***

Es werden drei Berechnungen vergleichend durchgeführt (Anhang 1):

1. ***Bestimmung von X_k als 5-%-Fraktile***
   Aus Tabelle D.1 aus dem EC /39/ wird $k_n = 1{,}72$ für 10 ≈ 11 Stichproben abgelesen und daraus dann $k_f = 3{,}7 \cdot 10^{-13}\, m/s$ erhalten.

2. ***Bestimmung von X_k als 95-%-Konfidenzintervall /69/***
   Unter Zugrundelegung einer Student-t-Verteilung wird $k_n = 1{,}81$ für (n-1) bei 11 Stichproben abgelesen und daraus dann $k_f = 1{,}3 \cdot 10^{-13}\, m/s$ erhalten.

3. ***Bestimmung von X_d als direkter Bemessungswert***
   Aus Tabelle D.2 aus dem EC /39/ wird $k_{d,n} = 3{,}23$ für 10 ≈ 11 Stichproben abgelesen und daraus dann $k_f = 1{,}5 \cdot 10^{-12}\, m/s$ erhalten (Überschreitungswahrscheinlichkeit p_f < 0,1%).

Für die Umrechnung der hydraulischen Leitfähigkeit in die Permeabilität ist die Kenntnis der dynamischen Viskosität des durchströmenden Fluids notwendig. Für normales Wasser bei 20 °C wird ein Umrechnungsfaktor von $1 \cdot 10^{-07}$ verwendet, mit dem sich die hydraulische Leitfähigkeit in die Permeabilität überführen lässt. Dieser wird auch hier näherungsweise angesetzt.

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von p < 0,1 % im Dichtelement der Bemessungswert der Permeabilität nicht über $k = 1{,}5 \cdot 10^{-19}\, m^2$ liegt.

Dazu ist anzumerken, dass der o. g. Betrachtung eine zwar bereichsweise unterschiedliche, aber innerhalb der Bereiche homogene Verteilung der Permeabilität zu Grunde liegt. Inwieweit dies gerechtfertigt ist, lässt sich auf Basis der vorliegenden Informationen nicht beurteilen. Ob ggf. in Anlehnung an /34/ ein Blockmodell zur Beurteilung der Systemdurchlässigkeit sinnvolll angewendet werden kann, ist offen und wäre noch zu prüfen, vgl. auch Kapitel 4.4.4 und Anhang 2.

Der Nachweis der Rissbeschränkung, der verknüpft ist mit einem zuverlässig mobilisierbaren Quelldruck, wird für das Dichtelement nicht geführt, sondern abdeckend die Kontaktzone betrachtet, vgl. Kapitel 4.3.5.2.

Der Nachweis der inneren Erosions- bzw. Suffosionsssicherheit wäre prinzipiell insbesondere für die Aufsättigungsphase zu betrachten, vgl. Abbildung 42 mit der nachstehenden Abbildung 45. Für diese Nachweisführung liegen jedoch keine Daten vor, so dass an dieser Stelle lediglich auf die Notwendigkeit der Betrachtung dieses Sachverhalts verwiesen wird.

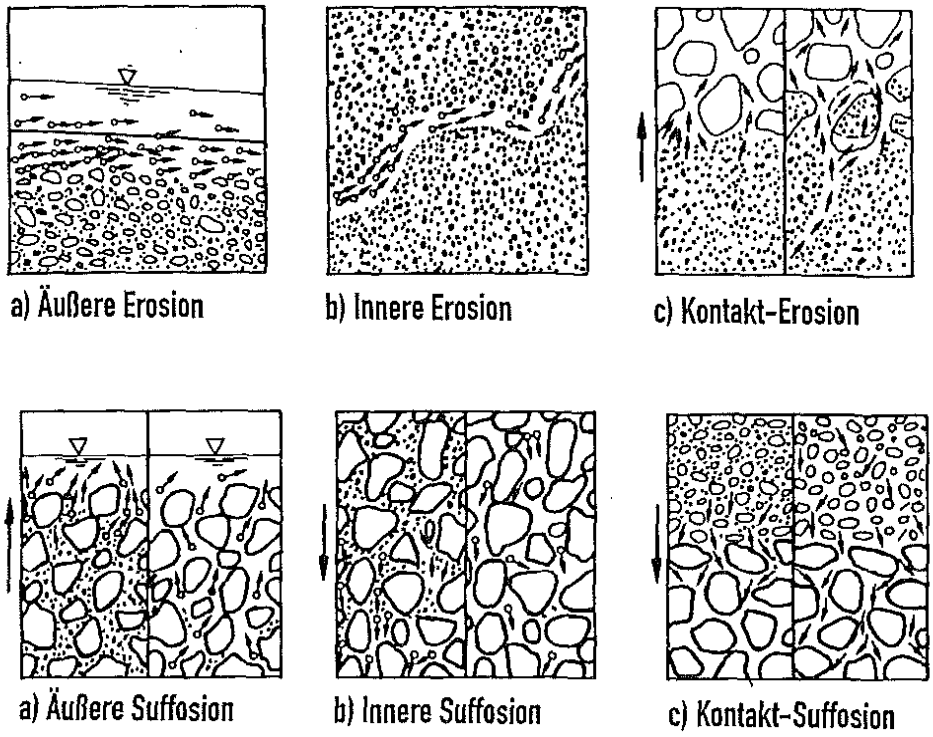


Abbildung 45: Qualitative Darstellung von Erosions- und Suffosionsvorgängen nach /34/

4.3.5.2 Permeabilität der Kontaktzone

Messergebnisse zur Permeabilität der Kontaktzone zwischen Dichtelement aus Bentonit und Gebirgskontur liegen nicht vor. Allerdings lässt die extrem feine Partikelstruktur der Tonminerale im µm-Bereich die Schlussfolgerung zu, dass bei Mobilisierung eines hinreichend großen Quelldrucks die kleinen Tonpartikel Unebenheiten der Gebirgskontur vollständig ausfüllen und der Bereich einer geringeren Packungsdichte der Tonminerale im Konturbereich weniger als 0,1 mm dick ist. Auf Grund ihres geringen Flächenanteils ist die Kontaktzone bei ausreichendem Quelldruck in Bezug auf die hydraulische Leitfähigkeit des Systems von geringer Bedeutung.

In der Kontaktzone ist der Nachweis des ausreichenden hydraulischen Widerstandes als Nachweis der Rissbeschränkung zu führen, d. h. ein ausreichender Kontaktdruck ist zu gewährleisten.

Nach Sitz /70/ sind zum Nachweis der Dichtheit der Kontaktfuge effektive Drücke erforderlich, die gewährleistet sind, wenn der Kontaktdruck, d. h. der wirksame Quelldruck $p_q > 1$ MPa beträgt. Diese Werte gelten für Dichtelemente aus Bentonit im Salzgestein und im gesättigten Zustand. Der Wert von 1 MPa für den erforderlichen, wirksamen Quelldruck wird auch für Tongestein als Nachweiskriterium angesetzt.

Positiv wirkende Spannungen sind mit einem Teilsicherheitsbeiwert abzumindern, im EC wird im Falle von Tragfähigkeitsnachweisen γ_R = 0,9 vorgeschrieben, in /71/ wird bei hydraulischen Einwirkungen sogar ein Wert von γ_R = 0,7 empfohlen.

In der Aufsättigungsphase dürfen keine hohen Fluiddrücke anliegen, da ansonsten der Verbund in der Kontaktfuge nicht gewährleistet ist. Die Größenordnung der tolerierbaren Fluiddrücke während der Aufsättigung ist nicht bekannt. Erst nach der Aufsättigung des Dichtelements stehen die Porenwasserdrücke in der Kontaktzone des Gebirges und im Dichtelement im Gleichgewicht, so dass der anliegende Fluiddruck kein Aufreißen des Kontaktbereichs verursachen kann.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Gebirgskontur keinen Quelldruck entwickelt und sich weiterhin unter dem Quelldruck verformt, so dass der tatsächlich vorhandene bzw. der zuverlässig zu erwartende Kontaktdruck auf Basis der vorhandenen Daten nicht ermittelt werden kann. Deshalb wird an Hand einer Plausibilitätsbetrachtung abgeschätzt, ob prinzipiell ein ausreichender Kontaktdruck mobilisiert werden kann.

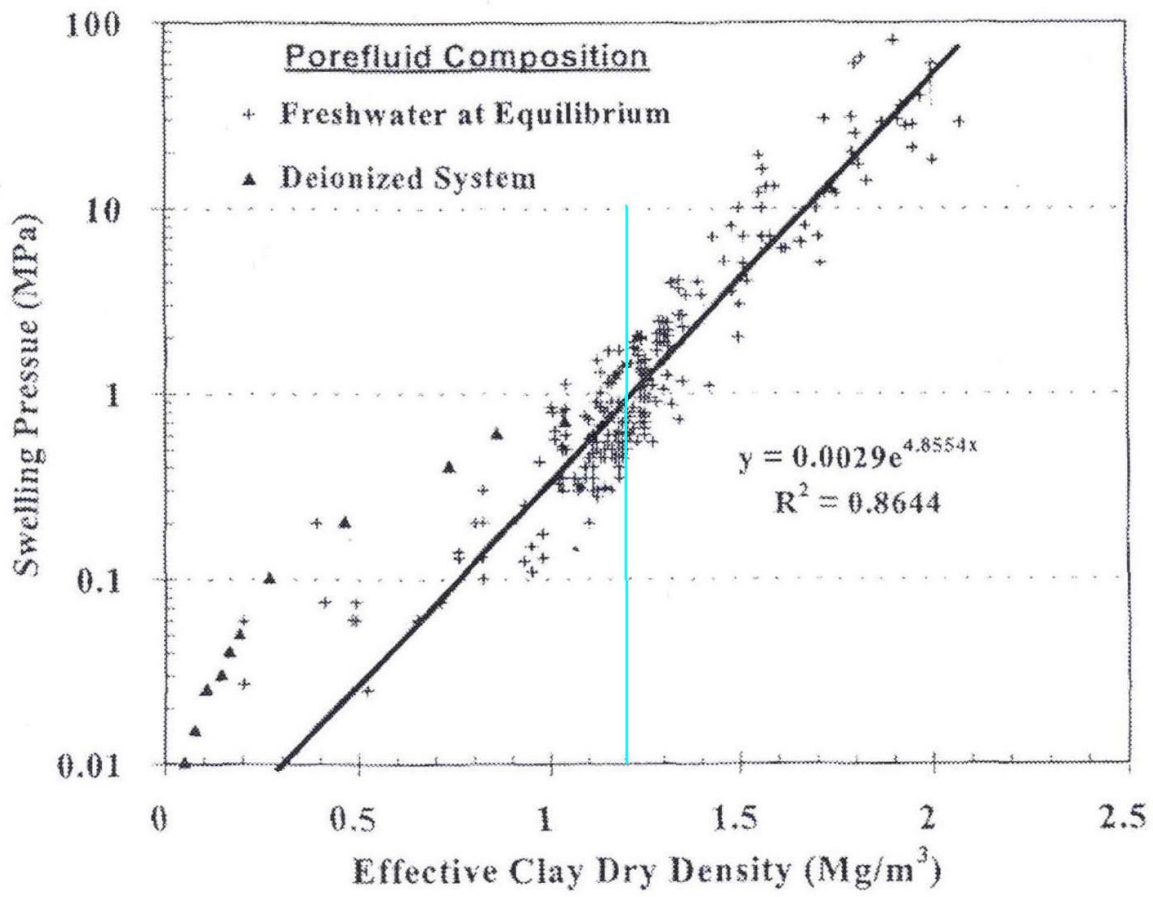


Abbildung 46: Quelldruck in Abhängigkeit von der Bentonittrockendichte - Zusammenstellung von Literaturdaten nach Dixon in /66/

Aus Abbildung 46 lässt sich der Quelldruck in Abhängigkeit der Bentonittrockendichte entnehmen. Ein Quelldruck von 1 MPa wird im Mittel bei einer Bentonittrockendichte von 1,2 g/cm³ erreicht. Bei einer Einbautrockendichte von $\rho_{tr,grenz}$ = 1,4 g/cm³ liegen keine Messwerte unter p_q = 1 MPa vor. Im Rahmen der Plausibilitätsbetrachtung wird geprüft, wie weit der Schachtradius im Dichtelement durch den Quelldruck erweitert werden muss, um im Mittel eine Bentonittrockendichte von 1,4 g/cm³ zu erreichen, wenn die mittlere Einbaudichte ρ_{tr} = 1,675 g/cm³ beträgt. Vereinfachend wird nur die Flächenzunahme betrachtet. Auf Grundlage von Abbildung 40 wird ein Nachschnitt der Gebirgskontur zur Entfernung der Auflockerungszone von 0,5 m angenommen, so dass der Schachtdurchmesser nach dem Nachschnitt 5,45 m beträgt (s. a. schweizerisches Konzept), d.h. der Schachtradius beträgt $r_{s,Nachschnitt}$ = 2,725 m. Für die Zunahme der Fläche gilt dann

$$\Delta A = \frac{\rho_{tr}}{\rho_{tr,grenz}} \cdot \pi \cdot r_{S,Nachschnitt}^2 \quad = 28 \text{ m}^2 \qquad (4.11)$$

Aus Gl. 4.11 ergibt sich, dass im aufgesättigten Zustand der Radius des Dichtelementes um Δr = 1,32 m zunehmen müsste, um im Mittel $\rho_{tr,grenz}$ = 1,4 g/cm³ zu erreichen. Diese Zahl lässt die Schlussfolgerung zu, dass ein wirksamer Quelldruck von 1 MPa mobilisiert werden kann, was einer mittleren Permeabilität von $k_f = 1 \cdot 10^{-12} \cdot 1{,}4^{-5{,}4196} = 1{,}6 \cdot 10^{-13}$ m/s entspricht, vgl. Abbildung 46.

Auf eine genauere Abschätzung der Permeabilität der Kontaktzone wird an dieser Stelle verzichtet, da ihr Beitrag zur Systemdurchlässigkeit auch bei höherer Permeabilität aufgrund ihres geringen Flächenanteils vernachlässigbar ist. Es wird nur die Relevanz der Kontaktzone abgeschätzt. Auf einen Teilsicherheitsbeiwert wird im Rahmen dieser Plausibilitätsbetrachtung ebenfalls verzichtet.

Mögliche Verformungen (Spreizverformungen) in der Kontaktzone /34/ zwischen Dichtelement und Schachtkontur werden ebenso wenig betrachtet wie der Fall einer Kontakterosion/-suffosion. Zur Bewertung der Verformungen /34/ sind keine Grenzbedingungen verfügbar. In Bezug auf die Kontakterosion und -suffosion wird von einer sehr langsamen Aufsättigung bei kleinen hydraulischen Gradienten ausgegangen, so dass diese Prozesse als vernachlässigbar eingestuft werden können.

4.3.5.3 Permeabilität der Auflockerungszone

Wie bereits erwähnt, wird der Auflockerungszone der Bereich bis zu einer Entfernung von 1,10 m von der Kontur zugeordnet. Der stark aufgelockerte Bereich bis in die Tiefe von 0,5 m wird nachgeschnitten. Analog zu Abbildung 40 wird für die nachfolgend durchgeführten Betrachtungen davon ausgegangen, dass die Auflockerungszone sich auch nach dem Nachschnitt in einen stark aufgelockerten und einen moderat aufgelockerten Bereich gliedert. Der moderat aufgelockerte Bereich liegt zwischen 0,60 m < $r_{ALZ,m}$< 1,10 m von der ehemaligen Kontur entfernt. Es handelt sich dabei um eine Annahme, die allerdings noch zu belegen ist. Die aus Abbildung 40 abgelesenen Werte der Permeabilität für die moderat auf-

gelockerte Zone sind in Tabelle 15 angegeben, wobei unterstellt wird, dass sich die Permeabilität der Auflockerungszone in diesem Bereich zwischen Nachschnitt und Einbau des Dichtelements aus Bentonit nicht signifikant verändert. Weiterhin wird angenommen, dass Gas- und Flüssigkeitspermeabilität in der Auflockerungszone gleich sind.

Tabelle 15: Ergebnisse aus 8 Messungen zur Bestimmung der Permeabilität im moderat geschädigten Konturbereich zwischen 0,6 m < $r_{Alz,m}$ < 1,10 m vom ehemaligen Stoß entfernt

Laufende Nummer	*Koordinate Radius $r_{Alz,m}$ [m]*	*Permeabilität k (abgelesen) [m²]*	*Hydraulische Leitfähigkeit k_f [m/s]*	*ln(k_f) (normiert)*
1	0,60	1,00E-19	1,00E-12	-27,63
2	0,65	9,00E-19	9,00E-12	-25,43
3	0,75	1,00E-19	1,00E-12	-27,63
4	0,85	1,00E-19	1,00E-12	-27,63
5	0,95	1,00E-19	1,00E-12	-27,63
6	1	2,00E-19	2,00E-12	-26,94
7	1	2,00E-19	2,00E-12	-26,94
8	1,1	1,00E-19	1,00E-12	-27,63
Mittelwert, m_x		1,6E-19	***1,6E-12***	***-27,18***
Standardabweichung, s_x				***0,7731***
Variationskoeffizient, V_x				***0,0284***

Es werden drei Berechnungen vergleichend durchgeführt (Anhang 1):

1. ***Bestimmung von X_k als 5-%-Fraktile***
   Aus Tabelle D.1 aus dem EC /39/ wird $k_n = 1{,}74$ für 8 Stichproben abgelesen und daraus dann $k_f = 6{,}0 \cdot 10^{-12}\, m/s$ erhalten.

2. ***Bestimmung von X_k als 95-%-Konfidenzintervall /69/***
   Unter Zugrundelegung einer Student-t-Verteilung wird $k_n = 1{,}90$ für (n-1) bei 8 Stichproben abgelesen und daraus dann $k_f = 2{,}6 \cdot 10^{-12}\, m/s$ erhalten.

3. ***Bestimmung von X_d als direkter Bemessungswert***
   Aus Tabelle D.2 aus dem EC /39/ wird $k_{d,n} = 3{,}27$ für 8 Stichproben abgelesen und daraus dann $k_f = 2{,}0 \cdot 10^{-11}\, m/s$ erhalten. (Überschreitungswahrscheinlichkeit p_f < 0,1 %).

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von p_f < 0,1 % in der moderat aufgelockerten Zone der Bemessungswert der Permeabilität nicht über $k = 2{,}0 \cdot 10^{-18}\, m^2$ liegt.

Der stark aufgelockerten Zone in der Entfernung von 0,5 m bis 0,6 m von der ehemaligen Stoßkontur kann keine Permeabilität zugeordnet werden, da keine Daten verfügbar sind. Wie aus Abbildung 40 ersichtlich liegen auch für die nicht nachgeschnittene Auflockerungszone im Konturbereich zwischen 0 und 10 cm keine Daten vor. Deshalb wird abgeschätzt, welche Permeabilität bzw. hydraulische Leitfähigkeit (Durchlässigkeit) der stark aufgelockerte Bereich maximal erreichen darf, um die die Anforderungen an die integrale Durchlässigkeit $k_f \geq 5 \cdot 10^{-11}$ m/s gemäß Kapitel 4.3.3 zu erfüllen.

Im Hinblick auf die spätere Angabe des Zuverlässigkeitsniveaus werden für den stark aufgelockerten Bereich ebenfalls 3 Berechnungsfälle untersucht. Die zulässige integrale Durchlässigkeit wird in Gl. 4.10 eingesetzt und daraus bei bekannter Durchlässigkeit und bekannten Flächenanteilen die jeweils zulässige Durchlässigkeit für den hoch aufgelockerten Bereich bestimmt. Mit

$$k_{f,ALZ,h} = \frac{k_{f,\mathrm{int}egral} \cdot A_D - k_{f,D} \cdot A_D - k_{f,K} \cdot A_k - k_{f,ALZ,m} \cdot A_{ALz,m}}{A_{ALZ,h}} \quad , \qquad (4.12)$$

Querschnitt des Betonitdichtelements: $A_D = \pi \cdot 2{,}725^2 = 23{,}33$ m²
Querschnitt der Kontaktzone: $A_K = 2\pi \cdot 2{,}725^2 \cdot 0{,}0001 = 0{,}002$ m²
Querschnitt der moderat aufgelockerten Zone: $A_{ALZ,m} = \pi(3{,}325^2 - 2{,}825^2) = 9{,}66$ m²
Querschnitt der hoch aufgelockerten Zone: $A_{ALZ,h} = \pi(2{,}825^2 - 2{,}725^2) = 1{,}74$ m²

und den jeweiligen Werten für $k_{f,D}$, $k_{f,K}$ und $k_{f;ALZ,m}$ gemäß Kapitel 4.3.5.1 bis 4.3.5.3 ergeben sich für die hoch aufgelockerte Zone $k_{f;ALZ,h}$ die in Tabelle 16 aufgeführten Durchlässigkeiten bzw. Permeabilitäten als Zielwerte.

Tabelle 16: Charakteristische bzw. Bemessungswerte der Durchlässigkeiten und Permeabilitäten für die hoch aufgelockerte Zone

	$k_{f,\,ALZ,h}$ [m/s]	$k_{ALZ,h}$ [m²]
X_k als 5-%-Fraktile	$6{,}3 \cdot 10^{-10}$	$6{,}3 \cdot 10^{-17}$
X_k als 95-%-Konfidenzintervall	$6{,}5 \cdot 10^{-10}$	$6{,}5 \cdot 10^{-17}$
X_d als direkter Bemessungswert (p_f < 0,1 %)	$5{,}4 \cdot 10^{-10}$	$5{,}4 \cdot 10^{-17}$

Ob diese Zielwerte tatsächlich erreicht werden, kann nicht beurteilt werden, da keine Daten vorliegen.

Auch für die Auflockerungszone ist vorsorglich anzumerken, dass der o. g. Betrachtung eine zwar bereichsweise unterschiedliche, aber innerhalb der Bereiche eine homogene Verteilung der Permeabilität zu Grunde liegt. Inwieweit dies gerechtfertigt ist, lässt sich auf Basis der vorliegenden Informationen nicht beurteilen. Ob ggf. in Anlehnung an /34/ ein Blockmodell zur Beurteilung der Systemdurchlässigkeit sinnvoll angewendet werden kann, ist offen und wäre auch hier noch zu prüfen (Kapitel 4.4.4).

Jedoch wird aus den vorgenommenen Betrachtungen offensichtlich, dass die Permeabilität der Auflockerungszone mit hoher Wahrscheinlichkeit die Systempermeabilität bestimmt, ein Ergebnis, das auch für das Salzgestein gilt, wie die Feuchteverteilung (Sättigung) im aufgewältigten Dichtelement des Bohrschachtes Salzdetfurth zeigt, vgl. Abbildung 47 /63/

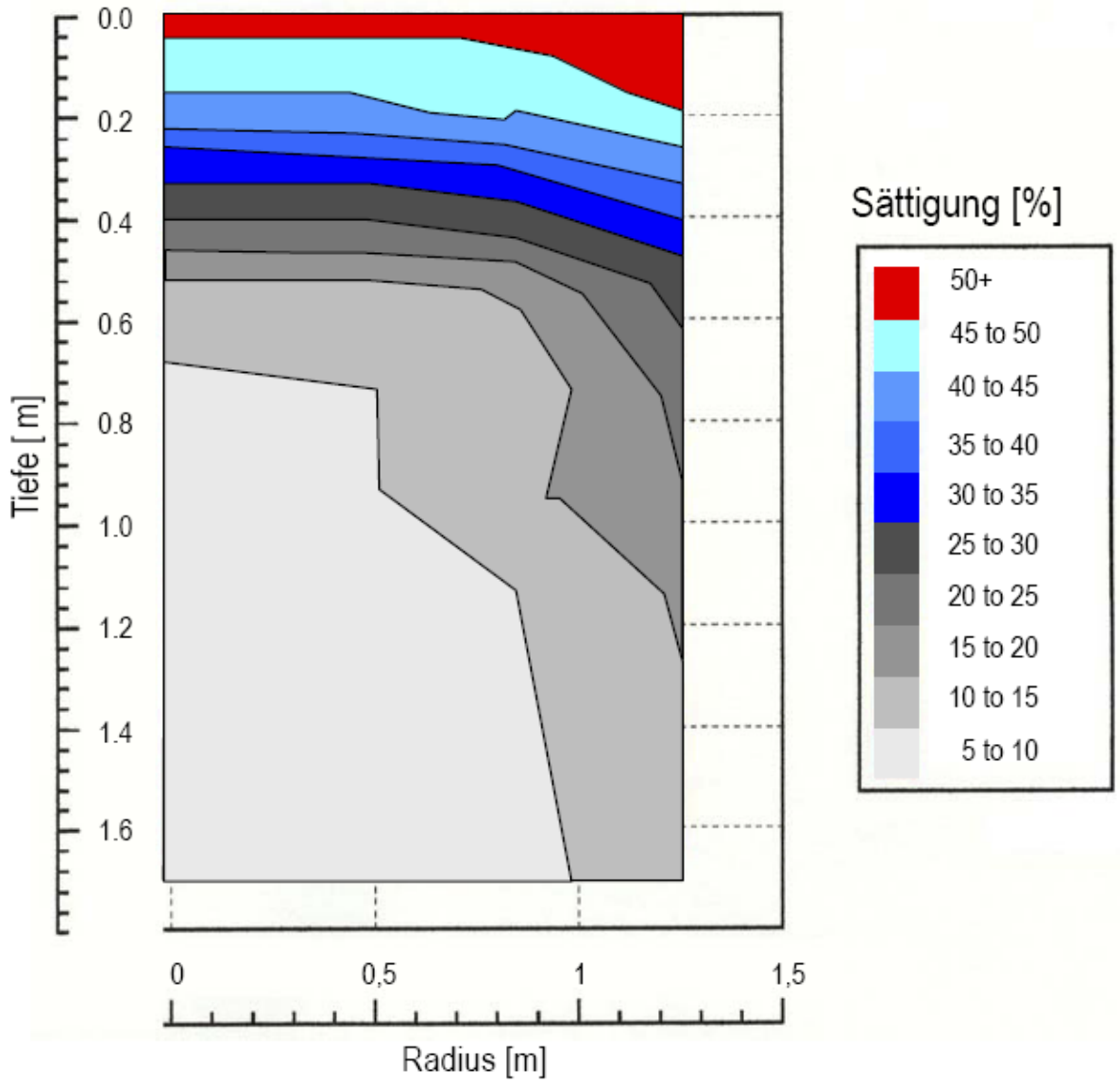


Abbildung 47: Sättigung im aufgewältigten Dichtelement des Bohrschachtes Salzdetfurth /63/

Bzgl. des Nachweises der Rissbeschränkung ist offen, wie die Auflockerungszone zu behandeln ist, d. h. ob eine Betrachtung der Permeabilitätswerte abdeckend ist oder ob zusätzlich ein effektiver Druck nachzuweisen ist und z. B. ein Frac-Kriterium $p_{fl} < \sigma_3$ erfüllt sein muss, um sicherzustellen, dass es in Folge des Porendrucks nicht zu einer Risserweiterung kommt. Dies gilt insbesondere für die hier nicht betrachtete Aufsättigungsphase.

4.3.6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zur Dichtung

Wie in Kapitel 2.5.2.1 (Tabelle 2) aufgeführt besteht die Anforderung an die Dichtung, eine integrale Durchlässigkeit von $k_f = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s nicht zu überschreiten. Weiterhin wurde der Auflockerungszone gesondert als Anforderung eine Durchlässigkeit $k_f = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s zugeordnet. Obwohl Tabelle 2 nicht entnommen werden kann, ob es sich bei den aufgeführten Durchlässigkeitsanforderungen um Bemessungswerte X_d oder einen der beiden charakteristischen Werte X_k handelt, wird davon ausgegangen, dass es sich bei den genannten Anforderungen um „mittlere“ Werte handelt.

Aus diesem Grund werden hier die Durchlässigkeitsanforderungen den charakteristischen Werten der Durchlässigkeit X_k des 95-%-Konfidenzintervalls gegenübergestellt. Anschließend werden die Bemessungswerte X_d vergleichend herangezogen, um zu prüfen, welche Bandbreite sie beschreiben. Weiterhin kann auf diese Weise den Bemessungswerten die Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_f < 0{,}1\%$ zugeordnet werden.

Die 5-%-Fraktile wird hier nicht in die Diskussion einbezogen, obwohl sie in den meisten Fällen als charakteristischer Wert für die Auslegung verwendet wird und nicht das 95-%-Konfidenzintervall bezogen auf den mittleren Wert. Dieser Ansatz wird jedoch im vorliegenden Fall als zu konservativ eingeschätzt, da die Dichtung abweichend von üblichen Bauwerken sehr große Abmessungen aufweist. In diesem Fall wird in der Geotechnik /69/ davon ausgegangen, dass sich das Verhalten dem mittleren Wert nähert und deshalb der Ansatz eines vorsichtig geschätzten Mittelwertes zulässig ist /72/. Diese Einschätzung deckt sich mit den Ansätzen der Langzeitsicherheitsanalyse.

Im Folgenden soll zunächst auf die Auflockerungszone eingegangen werden, da sie im Zusammenhang mit der integralen Durchlässigkeit auch in die Bewertung der Zuverlässigkeit des Schachtverschlusses einfließt. Für die Auflockerungszone ist festzustellen, dass die Anforderung $k_f = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s bei Zugrundelegung des 95-%-Konfidenzintervalls für X_k mit $k_f = 2{,}6 \cdot 10^{-12}$ m/s im Bereich der moderat aufgelockerten Zone nicht erfüllt wird. Für den hier als hoch aufgelockerte Zone bezeichneten Bereich liegen keine Messwerte vor, eine Bewertung der Zuverlässigkeit ist dementsprechend nicht möglich. Dies gilt insbesondere, wenn zusätzlich bedacht wird, dass dieser Bereich durch den Auffahrungsvorgang bzw. den Nachschnitt besonderen mechanischen Einwirkungen unterworfen wurde.

Ob in der Auflockerungszone zusätzlich ggf. spannungsbasierte Kriterien (z. B. ein Frac-Kriterium) erfüllt werden müssen, um Rissbeschränkung zu gewährleisten, ist offen.

Im zweiten Schritt werden das Dichtelement aus Bentonit und die Kontaktzone betrachtet. Wie aus Kapitel 4.3.5.1 hervorgeht, erfüllt das Bentonitdichtelement mit dem 95-%-Konfidenzintervall für X_k mit $k_f = 1{,}3 \cdot 10^{-13}$ m/s und auch der Bemessungswert X_d mit $k_f = 1{,}5 \cdot 10^{-12}$ m/s die Anforderung $k_f = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s, wobei sich der vorsichtig geschätzte Mittelwert X_k und der Bemessungswert X_d für $p_f < 0{,}1$ % etwa um den Faktor 10, d. h. eine Größenordnung unterscheiden. Für die Durchlässigkeit der Kontaktzone wurde lediglich eine Abschätzung im Rahmen einer Plausibilitätsbetrachtung durchgeführt. Diese führt zwar zu einer gegenüber dem eigentlichen Dichtelement erhöhten Durchlässigkeit, die aber aufgrund

ihres geringen Flächenanteils von vernachlässigbarer Bedeutung ist. Sehr viel wichtiger ist, wie auch in /66/ ausgeführt, die zuverlässige Gewährleistung einer ausreichenden Kontaktspannung, die hier ebenfalls analog zu /66/, /70/ ohne weitere Prüfung zu 1 MPa als erforderlicher Bemessungswiderstand angesetzt wird. Für die Kontaktspannung wurde nur eine indirekte Abschätzung vorgenommen, die im Ergebnis allerdings zeigt, dass in der maßgebenden Bemessungssituation eine ausreichende Kontaktspannung gewährleistet sein dürfte. Eine tiefer gehende Bewertung bedarf jedoch weiterführender Untersuchungen, in die auch der Verformungswiderstand des umgebenden Tongesteins einfließt. Die Betrachtungen zur Rissbeschränkung in der Kontaktzone decken den Nachweis der Rissbeschränkung im Dichtelement ab.

Der Nachweis der Spreizverformung in der Kontaktzone wurde hier mangels Daten nicht behandelt, er wird als nicht auslegungsbestimmend unterstellt. Auch Erosions- und Suffosionsvorgänge im Dichtelement und in der Kontaktzone werden als nicht auslegungsbestimmend eingestuft, da in Übereinstimmung mit den Angaben in Tabelle 2 von kleinen hydraulischen Gradienten ausgegangen wird. Weiterhin wird die Beständigkeit der Dichtung aufgrund der großen Übereinstimmung der Materialien als gegeben angesehen.

Im Ergebnis der durchgeführten Betrachtungen für die Dichtung des generischen Schachtverschlusses ist festzustellen, dass ihre Zuverlässigkeit im Sinne der Eurocodes nicht bewertet werden kann. Dabei wird die Zuverlässigkeit der Abdichtungsfunktion nach derzeitigem Kenntnisstand von der Auflockerungszone im Gebirge bestimmt. Für sie sind in interessierenden Bereichen gar keine Daten verfügbar und ihre Funktionsfähigkeit kann deshalb im Sinne der Eurocodes nicht bewertet werden. Werden jedoch nur Dichtelement und Kontaktzone betrachtet, kann eingeschätzt werden, dass diese beiden Elemente für die betrachtete Bemessungssituation und die damit verbundenen Einwirkungen ein ausreichend hohes Zuverlässigkeitsniveau im Sinne der Eurocodes aufweisen.

4.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus

In Bezug auf die unter 4.3 aufgeführten, nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften für eine einzelne Barriere lässt sich das Ergebnis der Bestimmung des nachweisbaren Zuverlässigkeitsniveaus des generischen Schachtverschlusses wie folgt zusammenfassen.

Die Herstellbarkeit des Schachtverschlusses ist an Hand des nahezu baugleichen Schachtverschlusses demonstriert.

Für das Widerlager „untere Schottersäule“ ist der maßgebende Nachweis der Verformungssicherheit mit hinreichendem Zuverlässigkeitsniveau geführt, d. h. es gilt $p_f < 10^{-04}$/ Lebensdauer.

In Bezug auf die Dichtung kann abgeschätzt werden, dass für das Dichtelement und die Kontaktzone zum umgebenden Gestein ein hinreichendes Zuverlässigkeitsniveau für die Widerstände R_d in Bezug auf die Funktion Dichtheit und hydromechanische Widerstandsfä-

higkeit nachgewiesen werden kann (p_f < 0,1%), obwohl nicht jeder Einzelnachweis explizit betrachtet wurde. Die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungsseite wurden hier nicht explizit ausgewiesen, i. d. R. wird, neben einem (eher kleinen) additiven Sicherheitselement auf der Seite des hydraulischen Druckes, insbesondere eine Verringerung der Dicke des Dichtelementes mittels Teilsicherheitsbeiwert vorgenommen /44/, /69/. Dieses Vorgehen ist im Fall des generischen Schachtverschlusses ohne Schwierigkeiten möglich, so dass davon ausgegangen werden kann, dass das geforderte Zuverlässigkeitsniveau von $p_f < 10^{-04}$/ Lebensdauer erreicht wird. Dies gilt auch für den Nachweis der Beständigkeit. Für die Auflockerungszone kann derzeit keine Aussage in Bezug auf die Erfüllung der Anforderung und das damit verbundene Zuverlässigkeitsniveau getroffen werden, weil schlicht die notwendigen Daten fehlen.

Nach EC7 /69/ „sollte berücksichtigt werden, dass die Kenntnis der Baugrundverhältnisse vom Umfang und von der Güte der Baugrunduntersuchungen abhängt. Deren Kenntnis und die Überwachung der Bauarbeiten sind im Allgemeinen wichtiger für die Einhaltung der grundsätzlichen Anforderungen als die Genauigkeit der Rechenmodelle und die Teilsicherheitsbeiwerte." Im vorliegenden Fall ist als Baugrund das umgebende Gebirge mit seiner Auflockerungszone anzusehen. Im Fall der Auflockerungszone sind deshalb weitere Untersuchungen unumgänglich. Weiterhin gilt nach EC7 /69/ „falls für einen speziellen Grenzzustand kein zuverlässiges Rechenmodell zur Verfügung steht, muss der Nachweis mit einem anderen Grenzzustand geführt werden, wobei Teilsicherheitsbeiwerte anzusetzen sind, mit denen gesichert ist, dass der speziell zu untersuchende Grenzzustand nicht überschritten wird. Alternativ ist die Bemessung mit zulässigen Werten, Modellversuchen und Probebelastungen auszuführen, oder die Beobachtungsmethode anzuwenden." Aus diesen Zitaten wird deutlich, dass das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte nicht angewendet werden muss, wenn mit anderen Bemessungsmethoden das gleiche Maß an Zuverlässigkeit erreicht werden kann.

Bei der Bewertung der berechneten Durchlässigkeiten für die Dichtung sind dabei folgende Einflüsse zu beachten und ggf. in die Bewertung mit aufzunehmen:

- Die Permeabilitätsentwicklung im Bereich der Kontur ist nach der Aufsättigung zu quantifizieren. Nach einem Wasserzufluss und anschließender Aufsättigung des Tongesteins und des Bentonitdichtelements können Wegsamkeiten durch die Ausbildung eines Quelldrucks verschlossen werden. Somit würde sich die Permeabilität sehr stark verringern. Die Mobilisierung eines entsprechend wirksamen Quelldrucks und die damit verbundene Permeabilitätsrückbildung sind allerdings positiv nachzuweisen.
- Bei ausreichend langen Dichtelementen gleichen sich lokale Abweichungen vom Mittelwert über die Gesamtlänge aus. In dem Fall wäre der Mittelwert der Permeabilität der Wert, an den sich der Bemessungswert annähern wird. Es liegen aber derzeit keine Informationen vor, wie lang eine Dichtung sein muss, um mit dem Mittelwert als Bemessungswert arbeiten zu können.
- Die Einflüsse eines Nachschnitts der stark aufgelockerten Konturbereiche sind zu prüfen und die Quantifizierung der zeitabhängigen Neubildung der Zonen erhöhter Durchlässigkeit vorzunehmen. Für eine konkrete Auslegung sind weitere Untersuchungsergebnisse erforderlich. In der vorhandenen Literatur waren solche Ergebnisse nicht zu finden.

- In diesem Beispiel wurde vereinfachend die Datenbasis der Permeabilitätsmessungen aus einer Strecke auf einen Schacht übertragen. In-situ wurden kleinere Auflockerungszonen um Schächte herum beobachtet als um Strecken. Da mit dieser Berechnung allerdings nur gezeigt werden sollte, ob die vorhandene Datenbasis und der vorhandene Kenntnisstand ausreichend für eine Abschätzung des Bemessungswertes der Permeabilität in der Auflockerungszone sind, ist die Übertragbarkeit der Daten aus der Strecke auf den Schacht von untergeordneter Bedeutung.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass das Tongestein in der Lage ist aufgrund seiner Sorptionsfähigkeit Radionuklide zurückzuhalten (Rückhaltefunktion), auch wenn seine hydraulische Leitfähigkeit vergleichsweise hoch ist.

4.4 Streckenverschluss im Salzgestein: Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus

Im Rahmen der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist der Bau von Streckenverschlüssen, auch als Abdichtungen bezeichnet, geplant /1/. Als Material für die Streckenverschlüsse ist Salzbeton vorgesehen. Abbildung 48 zeigt schematisch einen horizontalen Streckenverschluss im Steinsalz. Der Baukörper aus Salzbeton bindet in das umgebende Steinsalzgebirge ein, da im Bereich des Streckenverschlusses die Auflockerungszone vor Einbau des Baukörpers nachgeschnitten wird.

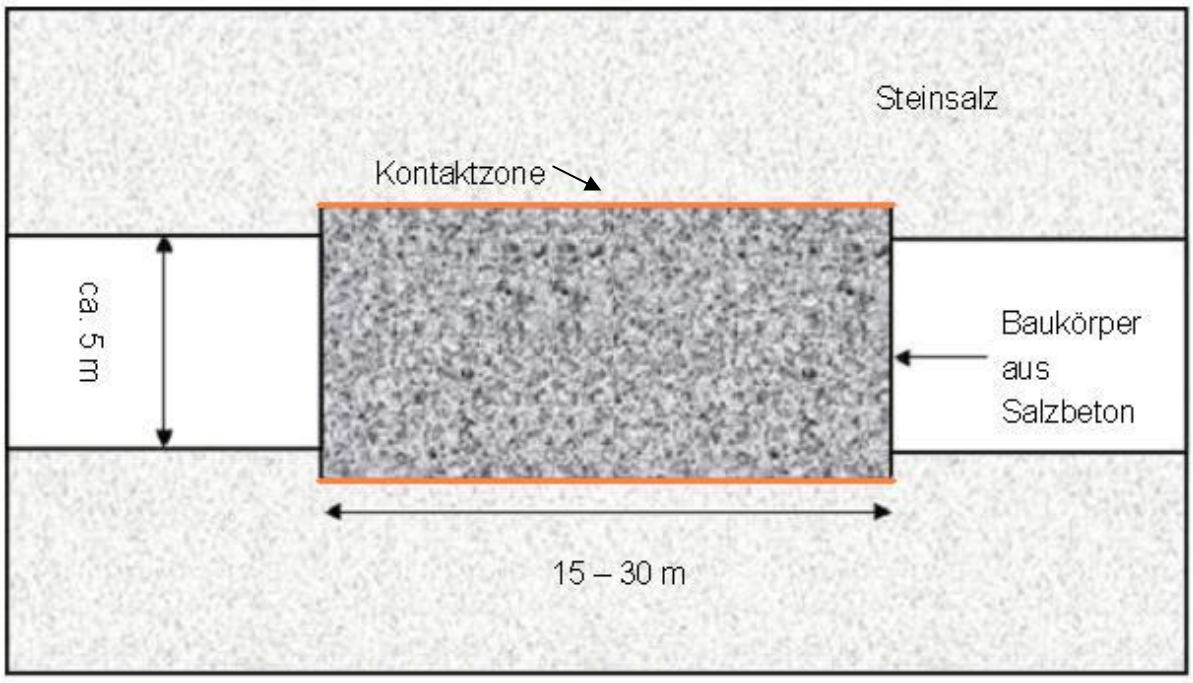


Abbildung 48: Prinzipskizze eines horizontalen Streckenverschlusses im Steinsalz mit Abmessungen (nach /73/)

Der Aufbau eines Streckenverschlusses im Salzgestein, wie er im Rahmen der Stilllegung des ERAM vorgesehen ist, ist in Abbildung 49 dargestellt. Die Streckenverschlüsse werden

im Rückbau errichtet, sie sind durch plastische Fugen von weiteren Verfüllmaßnahmen getrennt, um potentielle Zwangsspannungen gering zu halten. Ein solcher als Paralleldamm ausgebildeter Streckenverschluss dient als Beispiel für die Darstellung der Zuverlässigkeit eines Streckenverschlusses im Steinsalz.

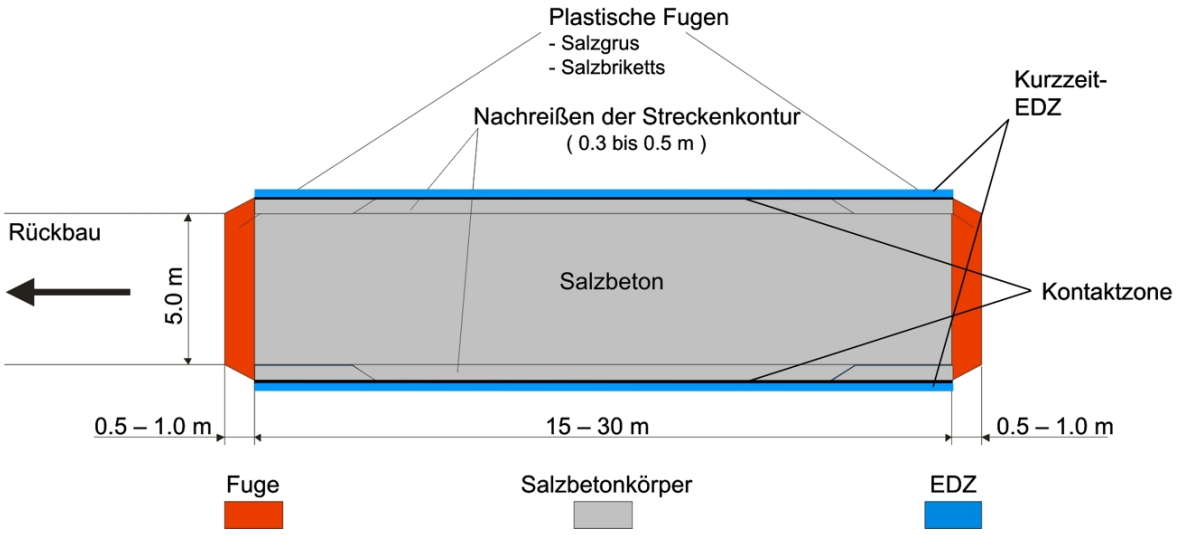


Abbildung 49: Schematische Darstellung eines Abdichtungssegmentes im Salzgestein (Stilllegung ERAM /73/)

In Abbildung 50 ist zusammengestellt, welche Einzelnachweise für den in Abbildung 48 dargestellten Streckenverschluss geführt werden müssen, wenn man eine Übertragung der Empfehlungen nach /34/ vornimmt, die für konventionelle Deponieabdichtungen vorzugsweise aus Bentonit gelten, und die Auflockerungszone im umgebenden Gestein zusätzlich berücksichtigt. Den Empfehlungen /34/ liegt das gleiche Sicherheits(nachweis)konzept zu Grunde, wie den Eurocodes. Die aus ihnen resultierenden Vorgaben können also uneingeschränkt in die weiteren Betrachtungen zum Zuverlässigkeitsniveau eines Streckenverschlusses im Salzgestein einbezogen werden.

In Bezug auf die für den Streckenverschluss nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften /34/

- Herstellbarkeit
- Dichtheit (= hydraulischer Widerstand)
- Hydromechanische Widerstandsfähigkeit (= Integrität)
    - Tragfähigkeit
    - Rissbeschränkung
    - Verformungssicherheit
- Beständigkeit (= Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität)

wird im Folgenden die Funktion seiner Einzelelemente herausgearbeitet. Analog zum Schachtverschluss im Tongestein werden dem Streckenverschluss nicht nur der eigentliche

Baukörper, der hier gleichzeitig die Dichtungs- und die Widerlagerfunktion wahrnimmt, sondern auch die Kontaktzone zum und die Auflockerungszone im umgebenden Salzgestein zugeordnet, vgl. Abbildung 49. Er besteht also ebenfalls aus den drei parallel angeordneten Einzelelementen

- Dichtelement,
- Kontaktzone und
- Auflockerungszone,

die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, deren hydraulischer Widerstand aber integral in Bezug auf die Radionuklidfreisetzung maßgebend ist.

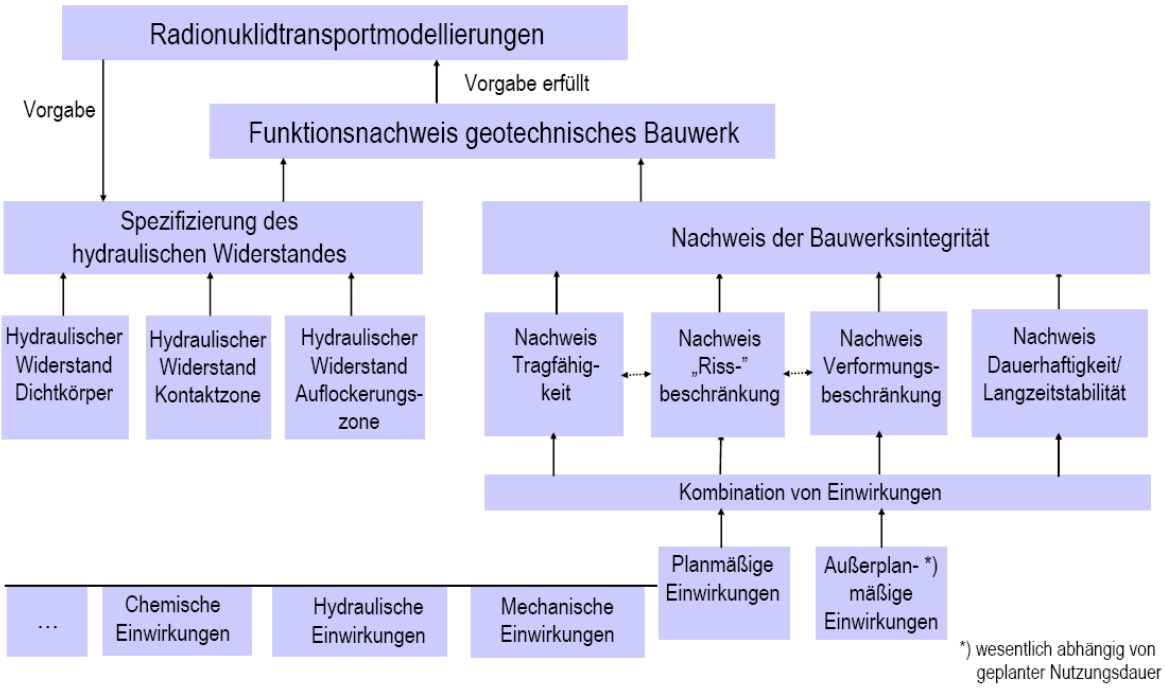


Abbildung 50: Verknüpfung zwischen den Radionuklidtransportmodellierungen im Langzeitsicherheitsnachweis und den funktionsbezogenen Einzelnachweisen für den Streckenverschluss im Salzgestein

Aus der Konzeptplanung zu den Streckenverschlüssen (Abdichtungen) im Rahmen des Stilllegungskonzepts für das ERAM ist eine umfangreiche, veröffentlichte Datenbasis vorhanden /73/, /74/, /75/, /76/. Auf diese wird im Folgenden zurückgegriffen.

Weiterhin werden veröffentlichte Daten aus Untersuchungen am ASSE-Vordamm herangezogen. Der ASSE-Vordamm wurde im Dammbauversuchsfeld des Forschungsbergwerks ASSE auf der 945-m-Sohle 1991/92 als Teil eines Dammbauwerkes im Maßstab 1:1 gebaut. Das ursprünglich geplante Dammbauwerk bestand aus mehreren Elementen und sollte dazu dienen, die Wirksamkeit einer geotechnischen Barriere für ein späteres Endlager für radioaktive Abfälle zu untersuchen. Da der ASSE-Vordamm ebenfalls aus Salzbeton sowie nach

vergleichbaren Konstruktionsprinzipien wie die im ERAM geplanten Streckenverschlüsse (Abdichtungen) errichtet wurde, wurde am ASSE-Vordamm ein Untersuchungsprogramm durchgeführt, mit dem Ziel, die Durchlässigkeit der Kontaktzone am Bauwerk in situ zu ermitteln. Dazu ist anzumerken, dass für das Element ASSE-Vordamm im Konzept des ursprünglich geplanten Dammbauwerkes keine hydraulischen Anforderungen formuliert wurden. Da er aber für Untersuchungen zur Verfügung stand, wurden an ihm Messwerte zur Durchlässigkeit der Kontaktzone ermittelt. Auf die Daten wird im Rahmen der Zuverlässigkeitsbetrachtungen zurückgegriffen. Dazu ist anzumerken, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen der ASSE-Vordamm mehr als 10 Jahre dem aufkriechenden Steinsalz ausgesetzt war. Weiterhin wird in Bezug auf die Bewertung der Herstellbarkeit auf das Beispiel ASSE-Vordamm zurückgegriffen.

4.4.1 Bewertung der Herstellbarkeit

Die anforderungsgerechte Herstellbarkeit eines Streckenverschlusses aus Salzbeton wird am Beispiel des im Maßstab 1:1 errichteten ASSE-Vordamms diskutiert. Dazu wird der ASSE-Vordamm zunächst detaillierter beschrieben sowie der Bauvorgang erläutert.

In der "Dammstrecke Nord" auf der 945-m-Sohle wurden im Dammbauversuchsfeld des Forschungsbergwerks ASSE als Teile des nicht fertig gestellten Dammbauwerkes eine mit Basaltschotter gefüllte Druckkammer mit einer Länge von 11,5 m, eine 0,8 m dicke Stützmauer aus Salzbetonformsteinen, eine 0,3 m dicke Stirndichtung aus Gussasphaltsteinen (bindet 0,5 m umlaufend in das Gebirge ein), eine 1,20 m dicke Stützmauer aus Salzbetonformsteinen sowie daran anschließend der Vordamm eingebaut, vgl. Abbildung 51. Der Vordamm wurde in 2 Bauabschnitten mit 4 bzw. 3 Betonierabschnitten im Zeitraum von 10/91 bis 01/92 erstellt, vgl. Abbildung 52 und Abbildung 53. Der vorhandene Firstspalt zwischen den oberen Betonierabschnitten und der Firste wurde mit Salzbeton handverstopft. Die potenziell verbliebenen Hohlräume an der Firste wurden über Injektionsschläuche abschließend mit Injektionsmittel auf Zementbasis verpresst. Die Grundabmessungen des Vordamms sind L x B x H = 8,0 m x 5,5 m x 3,4 m. Er hat ein Gesamtvolumen von 128 m³. Als Baustoff wurde Salzbeton in der Zusammensetzung 380 kg Hochofenzement (HOZ 25 HS/NW), 169 l = 198 kg NaCl-Lösung, gesättigt und 1496 kg Steinsalz als Zuschlagstoff (Körnung 0 – 16 mm) jeweils bezogen auf 1 m³ Salzbeton verwendet. Vor dem Vordamm ist im Hangenden ein Großbohrloch mit einer Höhe von 10,25 m und einem Durchmesser von 2,5 m als Teil der geplanten, aber nicht fertig gestellten Bitumendichtung aufgefahren. Im Vordamm wurden 2 Messquerschnitte (IP2, IP3) mit je 5 Messstellen, bestehend aus Druckaufnehmern, Gasprobeentnahmestellen und Leitfähigkeitssensoren, jeweils für Gasdruck- und Leitfähigkeitsmessungen eingebaut. Die Sensoren wurden z. T. in Schlitzen im Anstehenden mit Salzbeton eingesetzt /77/.

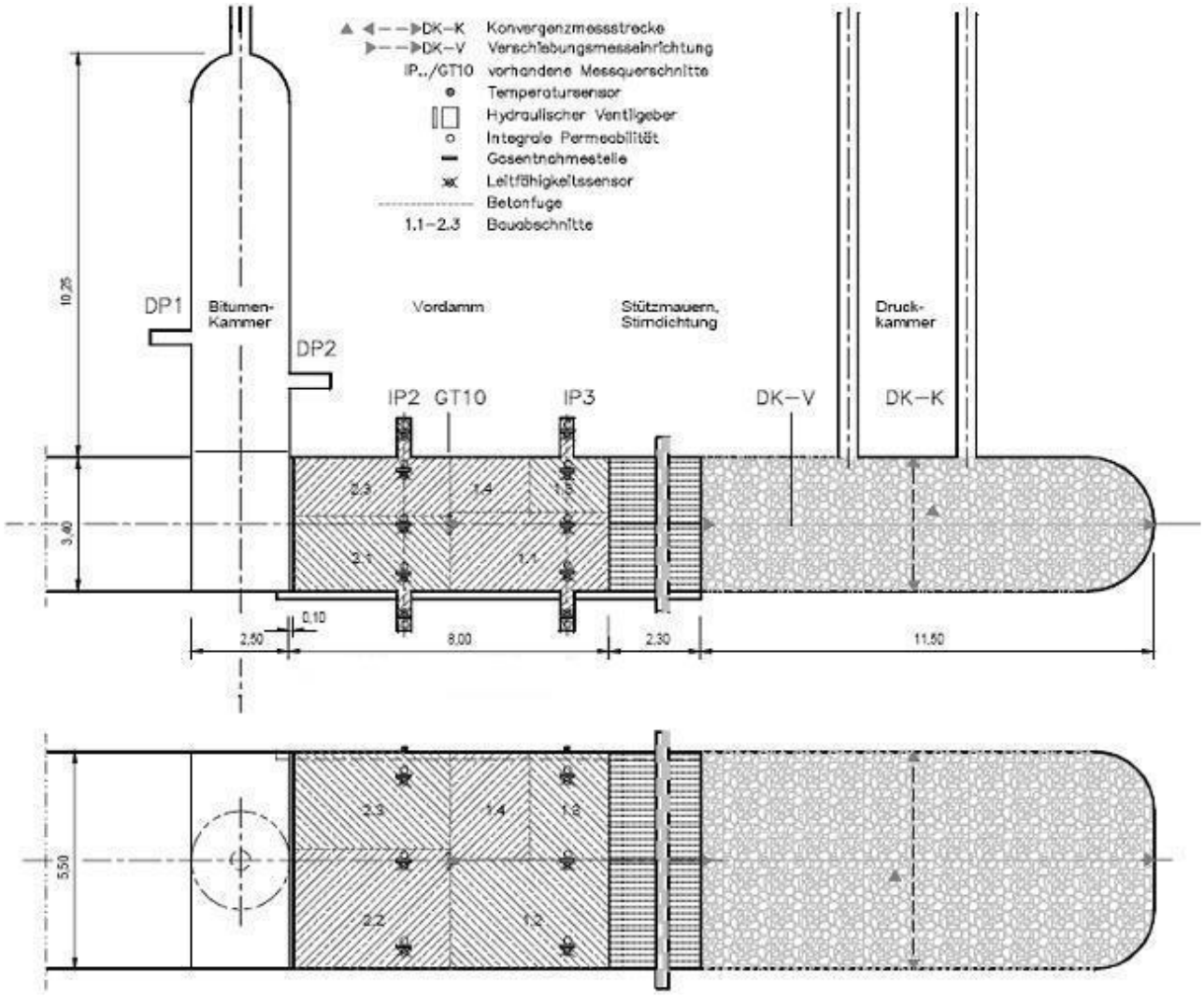


Abbildung 51: Fertiggestellte Teile des Versuchdammbauwerkes in der Asse

Obwohl die Aufgabenstellung, einen Streckenverschluss als monolithischen Betonkörper zu betonieren, trivial erscheint, zeigen die vorgenommenen Untersuchungen am in situ Bauwerk, dass der handverstopfte und nachinjizierte Firstspalt (Abbildung 53) sich als signifikante Schwachstelle erwies, wie die späteren Messungen zeigen, vgl. Kapitel 4.4.3 und 4.4.4.

Um die qualitätsgerechte Herstellbarkeit zu gewährleisten, sind deshalb konstruktive Veränderungen erforderlich. So ist z. B. ein leichtes Anschrägen der Firste zweckmäßig, die ein direktes Betonieren gegen die Firste ermöglicht, um diese Schwachstelle zu eliminieren.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der ASSE-Vordamm nur eine Länge von 8 m aufwies. Bei einem 15 – 30 m langen Streckenverschluss vergleichbar zu Abbildung 49 ist deshalb eine große Anzahl von Betonierabschnitten zu planen oder es ist sicherzustellen, dass sich der Salzbeton 15 bis 30 m weit ausbreitet.

Abbildung 52: Betonage des ASSE-Vordamms

Abbildung 53: Handverstopfen des Firstspaltes, im Vordergrund Injektionsleitungen

4.4.2 Generischer Streckenverschluss im Steinsalz

Auf Grundlage der veröffentlichten Datenbasen zu den Streckenverschlüssen (Abdichtungen) ERAM und ASSE-Vordamm wird daraus ein generischer Streckenverschluss entworfen, an Hand dessen beispielhaft Zuverlässigkeitsbetrachtungen durchgeführt werden.

Der generische Streckenverschluss baut auf dem Streckenverschlusskonzept des ERAM /73/, /74/ auf. Der Streckenverschluss wird im Steinsalz aus Salzbeton errichtet. Als Maßstab für seine Funktionsfähigkeit dient eine integrale Permeabilität von $k = 10^{-18}$ m², die im Mittel (zuverlässig) erreicht werden muss. Beim Streckenverschluss sind Trag- und Dichtfunktion miteinander kombiniert. Dementsprechend ist ein tragfähiger Verbund in der Kontaktzone zwischen Baukörper und Salzgebirge zu gewährleisten, so dass die Lagesicherheit gegeben ist. Bei dem als Paralleldamm ausgebildeten generischen Streckenverschluss wird ein kohäsiver Verbund zwischen Baukörper und umgebendem Salzgestein unterstellt. Da der erforderliche, integrale hydraulische Widerstand eine Rissbeschränkung in den drei parallel angeordneten Elementen Baukörper, Kontaktzone und Auflockerungszone zwingend voraussetzt, ist im Fall des generischen Streckenverschlusses im Salzgestein der Nachweis der Rissbeschränkung abdeckend für den Nachweis der Tragfähigkeit und der Verformungsbeschränkung. Weiterhin sind für die drei parallel angeordneten Elemente der Nachweis der Beständigkeit (Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität) und des ausreichenden hydraulischen Widerstandes (Dichtheit) zu führen, vgl. Abbildung 50.

Der generische Streckenverschluss ist in einer Teufe von 480 m im Steinsalz angeordnet und wird in einer nachgeschnittenen Strecke erstellt. Die Querschnittsabmessungen der Strecke betragen nach dem Nachschnitt H x B = 3,4 m x 5,5 m. Die Länge des Streckenverschlusses beträgt 25 m. Der zu seiner Herstellung verwendete Salzbeton wird in mehreren Schichten frisch in frisch betoniert. Der Salzbeton entwickelt beim Abbinden Hydratationswärme, d. h. während der Bauzustände treten thermische Einwirkungen aus dem Betonierprozess auf, die bei Abkühlung zu Rissbildung führen können. Während seiner Standzeit ist der Streckenverschluss der mechanischen Einwirkung des aufkriechenden Gebirges ausgesetzt, weiterhin sind (hydro)mechanische Einwirkungen in Folge eines sich aufbauenden, einseitig anstehenden Lösungsdrucks in Ansatz zu bringen. Der anstehende Lösungsdruck beträgt maximal 6 MPa. Die Bandbreite möglicher einwirkender Salzlösungen wird durch gesättigte NaCl-Lösung und IP21-Lösung repräsentiert, wobei letztere Salzbeton korrodiert. Im Sinne von Abbildung 50 sind also thermische Einwirkungen, mechanische Einwirkungen, hydraulische Einwirkungen und chemische Einwirkungen zu berücksichtigen.

Für die Streckenverschlüsse aus Salzbeton sind demnach prinzipiell folgende Bemessungssituationen in Bezug auf ihre Funktion Rissbeschränkung (abdeckend für Tragfähigkeit und Verformungsbeschränkung) und Dichtheit zu betrachten, s. a. Kapitel 3.6.3:

- Bauzustände
- Transiente Phase
- Stationäre Phase
- Erdbeben

Für den Nachweis der Dichtheit und der Beständigkeit sind die transiente Phase und die stationäre Phase zu untersuchen. Die Bemessungssituation Erdbeben wird hier nicht untersucht, es wird angenommen, dass sie nicht auslegungsbestimmend ist.

4.4.3 Hydraulischer Widerstand des generischen Streckenverschlusses

Wie aus dem Vergleich von Abbildung 39 und Abbildung 50 hervorgeht, wird der hydraulische Widerstand des Streckenverschlusses im Salzgestein analog zum Schachtverschluss im Tongestein durch die parallel geschalteten Elemente Baukörper aus Salzbeton, Kontaktzone und Auflockerungszone bestimmt. Sie weisen eine integrale Permeabilität oder Systempermeabilität auf, die sich aus dem Gesamtvolumenstrom durch alle parallelen Elemente der Dichtung errechnet, indem der Gesamtvolumenstrom gemäß Gl. 4.9 durch alle drei Elemente bestimmt und auf die Länge des Streckenverschlusses und seine Querschnittsfläche bezogen wird. Die Anforderung an die integrale Permeabilität beträgt, wie schon erwähnt, $k_{int} = 10^{-18}$ m².

In Bezug auf die Bewertung des hydraulischen Widerstandes für den generischen Streckenverschluss wird hier für alle drei Elemente auf die Untersuchungen am ASSE-Vordamm /73/, /76/ zurückgegriffen. Die Untersuchungen wurden im Zusammenhang mit den Steckenverschlüssen (Abdichtungen) des ERAM durchgeführt. Sie waren erforderlich, da es das deutsche, technische Regelwerk /44/ im Falle von Barrierebauwerken aus Beton, die der Rückhaltung umweltgefährdender Stoffe dienen, nicht erlaubt, Durchlässigkeiten von Fugenkonstruktionen bzw. Kontaktzonen nur auf Grundlage von Expertenschätzungen zu bewerten.

Während der Nachweis eines hinreichenden hydraulischen Widerstandes für den Baukörper (bei vorhandener Rissbeschränkung) auf Grundlage von Laborversuchen erfolgen darf, ist dies für Kontaktzonen unzulässig. Der hydraulische Widerstand von Kontaktzonen muss an Hand von Untersuchungen an vergleichbaren Bauwerken erfolgen. Diese Forderung des technischen Regelwerks beruht auf der Erfahrung, dass Kontaktzonen häufig einen Bereich erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit darstellen. Allerdings ist es ausreichend, vergleichbare Bauwerke zu betrachten, ein genau baugleicher Prototyp ist nicht erforderlich.

Ein mit den Streckenabdichtungen des ERAM vergleichbares Bauwerk stellte der ASSE-Vordamm dar. Er stand für die Untersuchung der Kontaktzone zur Verfügung. Zur Untersuchung seiner Kontaktzone wurden Permeabilitätsmessungen, Spannungsmessungen (Hydrofrac) und Ultraschallmessungen durchgeführt. Die Permeabilitätsmessungen beschränkten sich nicht nur auf die Kontaktzone, sondern umfassten auch den Baukörper und die (ehemalige) Auflockerungszone im Salzgestein. Ausgewählte Ergebnisse der Permeabili-

tätsmessungen mit Gas sind in Abbildung 54 dargestellt. In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen mit Gas vollständig angegeben. Exemplarische Messungen mit Salzlösung erzielten vergleichbare Ergebnisse /76/. Laboruntersuchungen an der Salzbetonrezeptur M2, die für die Streckenverschlüsse (Abdichtungen) des ERAM durchgeführt wurden, zeigten ebenfalls sehr geringe Permeabilitätswerte /74/.

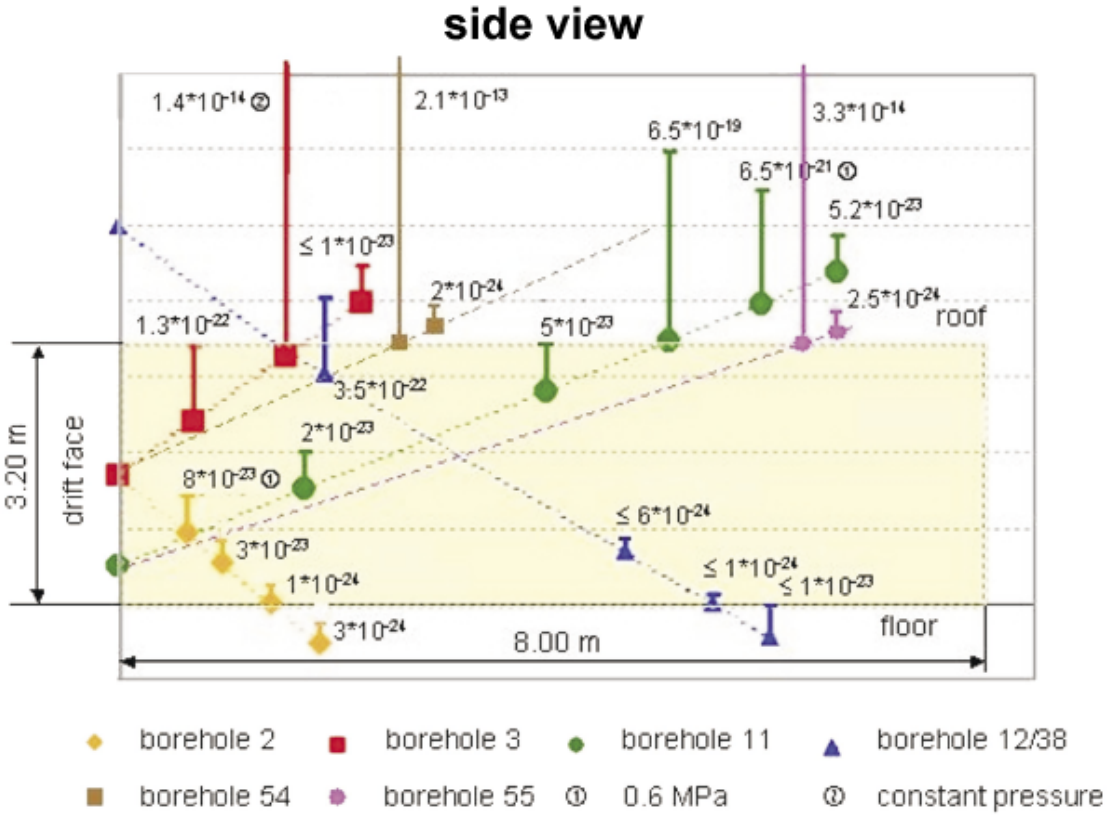


Abbildung 54: Seitenansicht des ASSE-Vordamms mit Bohrungen von der Ortsbrust aus in den Damm, in die Kontaktzone und in die ehemalige Auflockerungszone; Richtungen der Bohrungen mit den gemessenen Permeabilitäten [m²] /76/, /78/, /79/

Die Auswertung von Messungen aus den einzelnen Bohrungen ist in Tabelle 17 dargestellt. Die kursiv dargestellten Werte sind in Abbildung 54 enthalten, die anderen Messergebnisse sind nicht in Abbildung 54 vorhanden.

Tabelle 17: Gemessene Gaspermeabilitäten von Pulse-Tests bei i. d. R. 1,2 MPa Prüfdruck. Abweichende Versuchsrandbedingungen sind in Abbildung 54 angegeben

Lage	*Sohlbohrungen*	*Firstbohrungen*	*Stoßbohrungen Süd*	*Stoßbohrungen Nord*
Baukörper	*$8 \cdot 10^{-23}$ m²* *$3 \cdot 10^{-23}$ m²* *$6 \cdot 10^{-23}$ m²*	*$1{,}3 \cdot 10^{-22}$ m²* *$3{,}5 \cdot 10^{-22}$ m²* *$5 \cdot 10^{-23}$ m²* *$2 \cdot 10^{-23}$ m²*	$4{,}4 \cdot 10^{-24}$ m² $1{,}5 \cdot 10^{-23}$ m² $1{,}3 \cdot 10^{-22}$ m²	$8 \cdot 10^{-24}$ m² $6 \cdot 10^{-24}$ m² $7 \cdot 10^{-24}$ m²
Kontaktzone	*$1 \cdot 10^{-24}$ m²* *$1 \cdot 10^{-24}$ m²*	*$1{,}4 \cdot 10^{-14}$ m²* *$2{,}1 \cdot 10^{-13}$ m²* *$6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m²* *$3{,}3 \cdot 10^{-14}$ m²*	$7 \cdot 10^{-23}$ m² $2{,}5 \cdot 10^{-23}$ m²	$4 \cdot 10^{-23}$ m² $6 \cdot 10^{-23}$ m²
(ehemalige) Auflockerungs-zone	*$3 \cdot 10^{-24}$ m²* *$1 \cdot 10^{-23}$ m²*	*$1 \cdot 10^{-23}$ m²* *$2 \cdot 10^{-24}$ m²* *$6{,}5 \cdot 10^{-21}$ m²* *$5{,}2 \cdot 10^{-23}$ m²* *$2{,}5 \cdot 10^{-24}$ m²*	$1 \cdot 10^{-23}$ m² $4{,}6 \cdot 10^{-22}$ m²	$8 \cdot 10^{-24}$ m² $1{,}2 \cdot 10^{-22}$ m²

Die Permeabilitätsuntersuchungen zeigen, dass mit Ausnahme der Kontaktzone in der Firste in allen Elementen des Streckenverschlusses an jeder gemessenen Stelle (Stöße, Sohle) die Zielvorgabe der Permeabilität von $k = 1{,}0 \cdot 10^{-18}$ m² bereits von jedem Einzelwert erfüllt wird, vgl. Abbildung 54. Die hohe Permeabilität in der Firste ist ein Ergebnis der Bauausführung, die für einen Streckenverschluss mit Dichtheitsanforderungen an dieser Stelle verbessert werden muss. Der in der Firste vorhandene Einzelwert von $6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m² zeigt, dass geringe Permeabilitätswerte auch in der Firste prinzipiell erreichbar sind. Die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen werden im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbewertung detaillierter ausgewertet.

In der folgenden Tabelle 18 werden für die Permeabilitätswerte die beiden charakteristischen Werte X_k und der Bemessungswert X_d (/39/, s. a. Kapitel 4.3.5) für die drei Elemente Baukörper, Kontaktzone und (ehemalige) Auflockerungszone getrennt angegeben. Aufgrund ihrer abweichenden, konstruktiven Ausführung als handverstopfter Firstspalt und anschließend nachinjizierter Firste werden die Werte für die Kontaktzone in der Firste und die übrige Kontaktzone getrennt ausgewertet.

Tabelle 18: Charakteristische und Bemessungwerte der Permeabilität für den Baukörper, die Kontaktzone und die (ehemalige) Auflockerungszone

Element	*X_k als 5-%-Fraktile [m²]*	*X_k als 95-%-Konfidenz-intervall [m²]*	*X_d mit p_f < 0,1 % [m²]*	*Zum Vergleich: Mittelwert [m²]*
Baukörper	$3 \cdot 10^{-22}$	$5 \cdot 10^{-23}$	$3 \cdot 10^{-21}$	$3 \cdot 10^{-23}$
Kontaktzone allgemein ohne Firste	$4 \cdot 10^{-22}$	$7 \cdot 10^{-23}$	$1 \cdot 10^{-20}$	$1 \cdot 10^{-23}$
Kontaktzone Firste*	$6{,}2 \cdot 10^{-13}$	$4{,}7 \cdot 10^{-13}$	$6{,}3 \cdot 10^{-12}$	$4{,}6 \cdot 10^{-14}$
(ehemalige) Auflockerungs-zone	$2 \cdot 10^{-21}$	$1 \cdot 10^{-22}$	$8 \cdot 10^{-20}$	$2 \cdot 10^{-23}$

* der Wert von $6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m² wurde nicht berücksichtigt

Unterstellt man, dass es gelingt, die Kontaktzone in der Firste mit gleicher Qualität wie die Kontaktzone in der Sohle und den Stößen herzustellen, zeigen die Ergebnisse in Tabelle 18, dass die Permeabilitäten in der (ehemaligen) Auflockerungszone im umgebenden Salzgestein stärker streuen als im Baukörper bei insgesamt sehr geringen Permeabilitätswerten.

Zur Bewertung der Erfüllung der Anforderung bzgl. der integralen Permeabilität wird diese nunmehr mit Hilfe von Gl. 4.9 und Gl. 4.10 bestimmt. Für die anteiligen Querschnittsflächen werden dabei folgende Werte zu Grunde gelegt, wobei der Querschnitt des ASSE-Vordamms durch eine Ellipse angenähert wird. Bei einem Verhältnis H : B = 3,40 m : 5,50 m weist der Baukörper eine Fläche von A_D = 12,02 m² auf. Für die Kontaktzone wird eine Breite von 10 cm angenommen, der Kontaktzone im Firstbereich wird die maximale Streckenbreite von 5,50 m zugeordnet, der Rest Sohle und Stößen. Die zugehörigen Flächenanteile betragen dann $A_{K,Firste}$ = 0,55 m² und $A_{K,allg.}$ = 0,72 m². Die (ehemalige) Auflockerungszone wird als 50 cm tief angenommen, ihre Querschnittsfläche beträgt somit A_{ALZ} = 7,30 m². Die ermittelten integralen Permeabilitäten sind in Tabelle 19 angegeben, wobei der Firste einmal die in Tabelle 18 aufgeführten Werte zugeordnet werden und ein weiteres Mal der exemplarische Wert von $6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m². Aus Tabelle 19 wird deutlich (handverstopfter Firstspalt), dass in beiden Fällen der vergleichsweise kleine Querschnitt der Kontaktzone in der Firste die integrale Permeabilität bestimmt. Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse sind zusätzlich die Durchflussraten angegeben, die sich aus den jeweiligen integralen Permeabilitäten unter den in Kapitel 4.4.2 genannten Randbedingungen ergeben würden, wobei vereinfachend die Viskositäten von Wasser und Salzlösung gleichgesetzt werden und so ein Umrechnungsfaktor von 10^{-07} zur Anwendung kommt (s. a. Kapitel 4.3.5.1).

Tabelle 19: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für die integrale Permeabilität

Integrale Permeabilität/Durchflussraten	*X_k als 5-%-Fraktile*	*X_k als 95-%-Konfidenzintervall*	*X_d mit $p_f < 0{,}1\%$*	*Zum-Vergleich: Mittelwert*
k_{int} (Tabelle 18) [m²]	$2{,}8 \cdot 10^{-14}$	$2{,}2 \cdot 10^{-14}$	$2{,}9 \cdot 10^{-13}$	$2{,}1 \cdot 10^{-15}$
k_{int} ($6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m²) [m²]	$3{,}1 \cdot 10^{-20}$	$3{,}0 \cdot 10^{-20}$	$8{,}2 \cdot 10^{-20}$	$3{,}0 \cdot 10^{-20}$
$\dot{V}$ (Tabelle 18) [m³/s]	$8{,}08 \cdot 10^{-5}$	$6{,}35 \cdot 10^{-5}$	$8{,}37 \cdot 10^{-4}$	$6{,}06 \cdot 10^{-6}$
$\dot{V}$ ($6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m²) [m³/s]	$8{,}94 \cdot 10^{-11}$	$8{,}65 \cdot 10^{-11}$	$2{,}37 \cdot 10^{-10}$	$8{,}65 \cdot 10^{-11}$
$\dot{V}$ (Tabelle 18) [l/d]	6981	5486	72.317	523
$\dot{V}$ ($6{,}5 \cdot 10^{-19}$ m²) [l/d]	0,0077	0,0075	0,020	0,0075

Im Ergebnis bleibt festzustellen, dass ein Streckenverschluss aus Salzbeton bei sorgfältiger Bauausführung prinzipiell in der Lage ist, die hydraulische Anforderung bzgl. der integralen Permeabilität zuverlässig zu erfüllen (wenn der Nachweis der Rissbeschränkung gelingt, siehe Kapitel 4.4.7).

4.4.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zum hydraulischen Widerstand

Wie in Kapitel 4.3.5 bereits erwähnt, wird in /34/ ein Verfahren beschrieben, wie eine Systemdurchlässigkeit mittels eines Blockmodells ermittelt werden kann. Eine Abdichtung wird in Blöcke unterteilt (die z. B. einzelnen Dichtungslagen entsprechen) und den Blöcken wird über Monte-Carlo-Simulation jeweils ein individueller k-Wert zugelost, der die Schwankung der Durchlässigkeit berücksichtigt. Somit ergibt sich eine Vielzahl möglicher Fließwege durch die Abdichtung. Die Durchlässigkeit der einzelnen Fließwege wird durch eine mittlere Durchlässigkeit abgeschätzt, die aus den Durchlässigkeiten der den Fließweg bildenden Blöcke berechnet wird. Der Fließweg mit der höchsten Durchlässigkeit wird gespeichert. Durch häufige Wiederholung dieses Vorganges kann eine maximale Systemdurchlässigkeit der Abdichtung berechnet werden, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 %) nicht überschritten wird. Diese Systemdurchlässigkeit kann dann mit Anforderungen aus den Regelwerken verglichen werden.

Im vorliegenden Fall des Streckenverschlusses im Steinsalz sind die Blöcke jedoch nicht in Reihe geschaltet, sondern parallel angeordnete Elemente, für die möglicherweise ein kritischer Weg maßgebend ist. Deshalb wurde am Beispiel der Permeabilitätsdaten der Kontaktzone des ASSE-Vordamms alternativ ein geostatistisches Verfahren probeweise angewendet, siehe Anhang 2. Dabei wurden die hohen Permeabilitätswerte in der Firste berücksichtigt. In Abbildung 55 ist die Zerlegung der in eine Ebene projizierten Kontaktzone in Blöcke gezeigt (links: Projektion Sohle, rechts: Projektion Firste). In den Blöcken dargestellt ist der Exponent der Permeabilität, der sich aus der Interpolation im Mittel für jeden Block ergibt. Stützstellen sind die durch schwarze Quadrate markierten Messdaten.

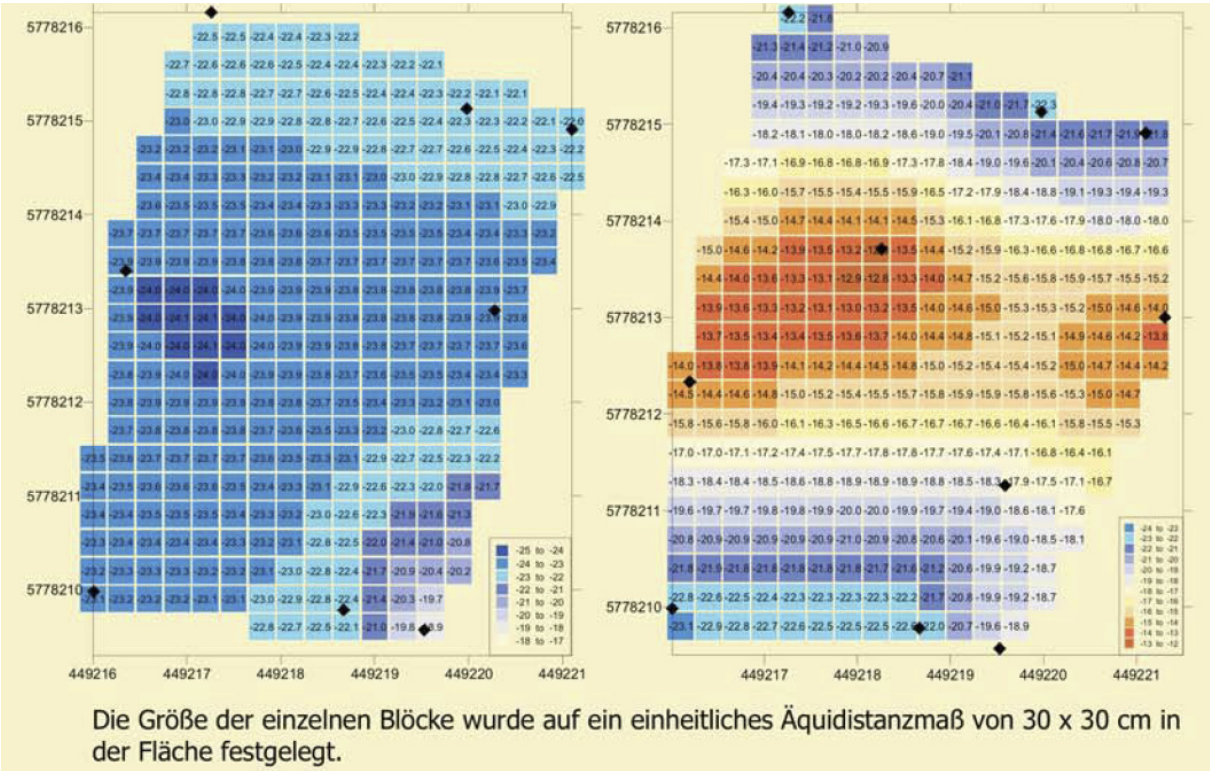


Abbildung 55: Blockkarten der räumlichen Verteilung der Permeabilität in der Kontaktzone (links Sohle und Stöße, rechts Firste und Stöße) des ASSE-Vordamms als Projektion (s. a. Anhang 2)

Vergleicht man die Werte für k_{int} in Tabelle 19 mit den Ergebnissen in Abbildung 55, stellt man fest, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den nach EC /39/, /69/ ermittelten, auslegungsbestimmenden Permeabilitäten und den mittels geostatistischer Verfahren bestimmten, auslegungsbestimmenden Permeabilitäten fest, bei dem individuelle Wegsamkeiten berücksichtigt werden.

Weiterhin wird deutlich, dass es entsprechend sinnvoll ist, das Zuverlässigkeitsniveau des hydraulischen Widerstandes nicht nur an Hand der Durchlässigkeit zu bewerten, sondern auch einen auf die Dicke bzw. Länge der Dichtung bezogenen Teilsicherheitsbeiwert einzuführen. Denn im Falle eines Dichtheitsnachweises ist die wirksame Länge durchaus mit Unsicherheiten behaftet und nicht zuverlässig bekannt.

4.4.5 Beständigkeit

Im Zusammenhang mit der Stilllegung des ERAM wurden Untersuchungen zur Beständigkeit (Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität) von Salzbeton der Rezeptur M2 durchgeführt, die für die Streckenverschlüsse (Abdichtungen) vorgesehen ist. Die Rezeptur Salzbeton M2 setzt sich aus jeweils 16,4 Massen-% Zement (CEM III) und Steinkohlenfilterasche, 13,5 Massen-% Wasser und 53,8 Massen-% Steinsalzgrus als Zuschlagstoff zusammen /80/.

Analog zu Normalbeton ist Salzbeton nicht beständig gegen alle Arten von Salzlösungen. Wie bereits in Kapitel 4.4.2 aufgeführt, ist die Bandbreite möglicher Salzlösungen durch die Lösungszusammensetzungen NaCl-gesättigt und IP21 repräsentiert. Während Salzbeton gegen NaCl-gesättigte Salzlösung beständig ist, wird er durch IP21-Lösung korrodiert. Auf Grundlage von Kaskadenversuchen, Laboruntersuchungen und vorhandenen geochemischen Langzeitdaten aus dem Forschungsbergwerk Asse wurden Datensätze für die geochemische Modellierung abgeleitet /75/. Unter Ansatz von Bandbreiten für die angesetzte Salzösung, die Betonzusammensetzung und die thermodynamischen Konstanten wurde auf Grundlage von 10.000 Rechenfällen das 95-%-Konfidenzintervall für das maximale Korrosionspotenzial ermittelt. Als auslegungsbestimmend ergab sich die Zusammensetzung der einwirkenden Lösung, ein Ergebnis, das mit vorhandenen Kenntnissen zum Normalbeton übereinstimmt.

Auf Basis gekoppelter chemisch-hydraulischer Berechnungen wurde das Korrosionsverhalten eines Streckenverschlusses (Abdichtung) bei korrosivem Angriff durch IP21-Lösung modelliert. Da die Permeabilität des Streckenverschlusses bei chemischem Angriff durch Korrosion zunimmt, vgl. Abbildung 56, ist die Anfangspermeabilität des Streckenverschlusses aus Salzbeton von entscheidender Bedeutung. Denn mit zunehmender Durchflussrate laufen die Korrosionsvorgänge schneller ab. Bei Erfüllung der Anforderung von $k_{int} = 10^{-18}$ m² ergibt sich unter den Randbedingungen des ERAM, die in etwa dem generischen Streckenverschluss entsprechen, ein korrodierter Bereich von ca. 30 cm in 10.000 Jahren /75/, der als Opferschicht betrachtet werden kann und dessen Einfluss auf das sonstige Verhalten des Streckenverschlusses vernachlässigt werden kann.

Die in /75/ veröffentlichten Ergebnisse stehen in vollständiger Übereinstimmung mit dem betontechnischen Regelwerk /44/, das besagt, dass sich bei Ausschluss durchgehender Trennrisse eine begrenzte Korrosionsfront ausbildet.

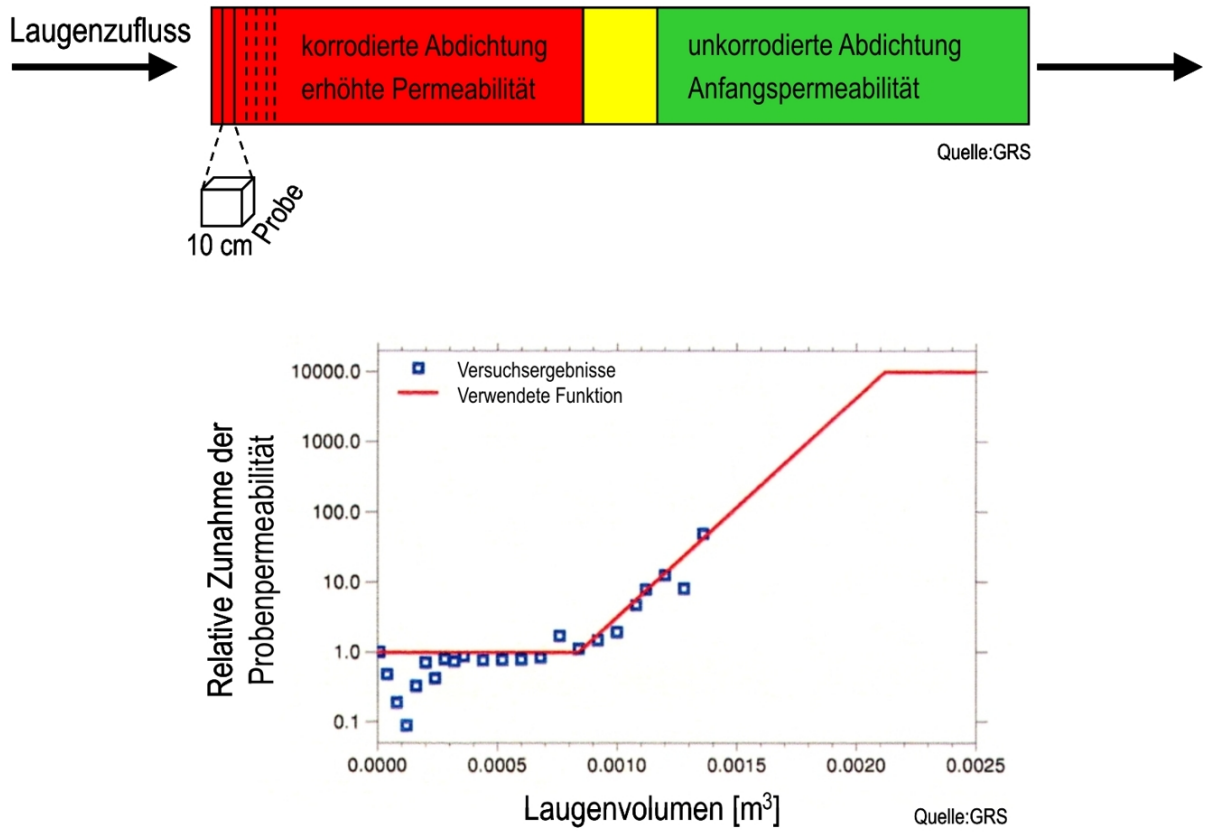


Abbildung 56: Zunahme der Permeabilität bei Durchströmung mit korrodierender IP21-Lösung /75/

Bei nicht durchgehenden Rissen, auch wenn sie vorhanden sind, verliert das korrodierende Medium sein Korrosionspotenzial in Richtung Rissspitze und die Korrosionsfront beschränkt sich auf einen vergleichsweise kleinen Bereich. Insofern kommt dem im folgenden Kapitel 4.4.7 beschriebenen Nachweis der Rissbeschränkung erhebliche Bedeutung zu, da in Kapitel 4.4.3 gezeigt ist, dass die geforderte geringe Anfangspermeabilität erreichbar ist.

Im Ergebnis ist analog zum Nachweis des hydraulischen Widerstandes festzustellen, dass ein Streckenverschluss aus Salzbeton bei sorgfältiger Bauausführung prinzipiell in der Lage ist, die Anforderung bzgl. der Beständigkeit zuverlässig zu erfüllen, wenn der Nachweis der Rissbeschränkung gelingt, siehe Kapitel 4.4.7.

4.4.6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zur Beständigkeit

Für den Nachweis der Beständigkeit ist analog zum Nachweis des hydraulischen Widerstandes der Ansatz von Blockmodellen zu diskutieren, vgl. Kapitel 4.4.4. Weiterhin ist im Fall des Streckenverschlusses im Steinsalz zu prüfen, ob eine mögliche Umläufigkeit über die (ehemalige) Auflockerungszone zu erhöhten Korrosionsraten führt, da in der Auflockerungszone im Salz keine Abreicherung der korrosiven Salzlösung stattfindet. Untersuchungen sind dazu in der Literatur nicht gefunden worden.

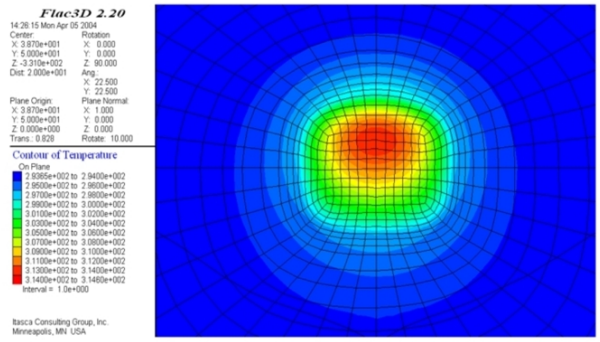
Am Beispiel des Nachweises der Beständigkeit wird deutlich, welche Bedeutung dem zu Grunde gelegten Nachweiszeitraum bzw. der erforderlichen Lebensdauer des Streckenverschlusses zukommt. Während bei vergleichsweise kurzen Nachweiszeiträumen für übliche Betonkonstruktionen der Korrosionseinfluss durch pauschalisierte Sicherheitsfaktoren (Betonüberdeckung in Abhängigkeit der Umweltklasse) berücksichtigt werden kann, ist die Zulässigkeit eines solchen Vorgehens im Falle von langen und sehr langen Betrachtungszeiträumen >> 50 – 100 Jahre für den Streckenverschluss im Steinsalz analog zur Vorgehensweise bei der Abdichtung im ERAM jeweils nachzuweisen.

4.4.7 Nachweis der Rissbeschränkung

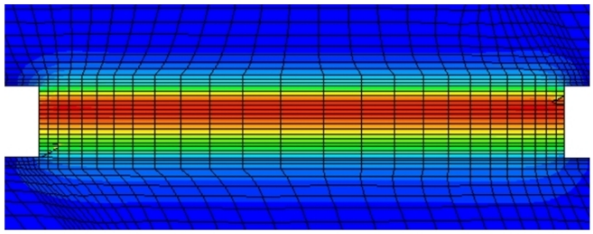
Da der Streckenverschluss Dichtfunktion und Widerlagerfunktion wahrnimmt, ist der Nachweis der Rissbeschränkung gleichermaßen für den Baukörper, die Kontaktzone und die (ehemalige) Auflockerungszone zu führen. Dabei werden Baukörper und Kontaktzone gemeinsam behandelt, da über die Kontaktzone die auf den Baukörper wirkenden Beanspruchungen in das Gebirge übertragen werden. In diesen Fällen ist der Nachweis für die Kontaktzone auch für die Auflockerungszone abdeckend. In Bezug auf die Rissbeschränkung in Folge der hydraulischen Einwirkung Lösungsdruck wird die Auflockerungszone gesondert behandelt.

4.4.7.1 Bauzustände

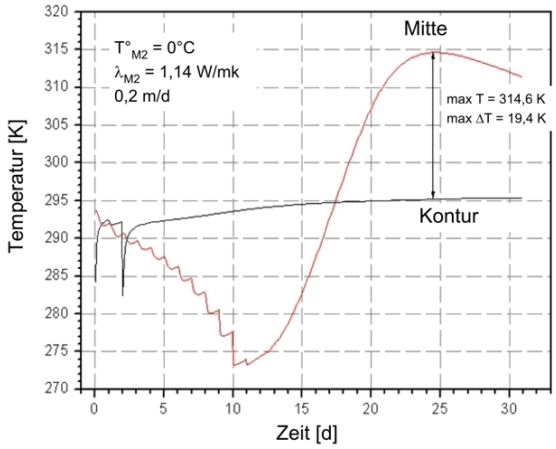
Für die Bemessungssituation Bauzustände sind ausschließlich die thermischen Einwirkungen in Folge der Hydratationswärme des Salzbetons zu berücksichtigen, Einwirkungen aus aufkriechendem Salzgebirge und anstehender Lösungsdruck sind im Zeitraum der Bauzustände nicht vorhanden. Maßgebend für den Nachweis der Rissbeschränkung ist die Abkühlphase des Salzbetons, der als Suspension eingebracht wird, während des Abbindens Wärme entwickelt und dann als erhärteter Festkörper wieder abkühlt. Während der Abkühlung entstehen thermomechanische Zwangszugspannungen im Baukörper und im umgebenden Salzgestein. Diese Zwangszugspannungen können Rissbildung verursachen.



Temperaturverteilung - Querschnitt



Temperaturverteilung - Längsschnitt



Quelle: BfS/DBE

Abbildung 57: Temperaturverteilung im Streckenverschluss (Abdichtung) und maximale Temperaturdifferenzen /73/

Für den Nachweis der Rissbeschränkung wurde im Fall der Streckenverschlüsse (Abdichtungen) des ERAM als Grenzbedingung ein auf empirischer Erfahrung beruhendes Temperaturkriterium angewandt, das besagt, dass die maximalen Temperaturdifferenzen im Baukörper $\Delta T = 20$ K nicht überschreiten dürfen. Dazu wurden Temperaturberechnungen durchgeführt /73/, siehe Abbildung 57.

Die Temperaturberechnungen ergaben, dass für den Nachweis der Rissbeschränkung ein Kühlen der Salzbetonsuspension auf ca. 0 °C erforderlich ist. Auf diese Weise wird die Temperaturdifferenz in Folge Hydratationswärme im Baukörper reduziert.

Um eine Kühlung der Salzbetonsuspension zu vermeiden, wurden weiterführende Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, die Rissbeschränkung für die Bauzustände unter Abbau von Konservativitäten an Hand spannungsbasierter Kriterien nachzuweisen. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit sind derzeit keine ausreichenden, veröffentlichten Daten verfügbar.

4.4.7.2 Transiente und stationäre Phase – Baukörper und Kontaktzone

Für den Baukörper und die Kontaktzone ist der ungünstigste Zeitpunkt erreicht, wenn einerseits die hydraulische Einwirkung, d. h. der einseitige Lösungsdruck seinen Maximalwert von 6 MPa erreicht hat, andererseits der Gebirgsdruck in Folge des aufkriechenden Gebirges aber noch so gering ist, dass die Festigkeit des Baukörpers und der Kontaktzone (Kohäsion bei Normalspannung 0) maßgebend sind für die Übertragung des hydrostatischen Lösungsdrucks in das Gebirge.

Nachweisverfahren

Die auslegungsbestimmenden Spannungen im Baukörper und in der Kontaktzone werden analytisch ermittelt /81/, /82/. Dieses alte Verfahren ist sehr einfach und anschaulich und wird heute i. d. R. nur zur Vorbemessung eingesetzt, während die eigentliche Auslegung mit Hilfe numerischer Berechnungen erfolgt. Hier wird es aus Gründen der Anschaulichkeit verwendet, außerdem hat es sich in der Praxis durchaus bewährt.

Im Hinblick auf Schubversagen in der Kontaktzone ist die zulässige Schubspannung maßgebend, wobei überprüft wird, ob die (fiktive) Widerlagerlänge des Streckenverschlusses ausreicht. Dazu wird konservativ der Querschnitt als flächengleicher Kreis approximiert. Es gilt /81/

$$\text{erf } L_{W,T} = \frac{A \cdot p_L}{U \cdot zul\ \tau} \qquad (4.13)$$

mit

erf $L_{w,T}$ = Länge des Streckenverschlusses zur Ableitung der statischen Last
A = Querschnitt der Stirnfläche des Streckenverschlusses
p_L = hydrostatischer Druck auf der Stirnfläche
U = Umfang des Streckenverschlusses
zul τ = zulässige Schubspannung in der Kontaktzone

Im Hinblick auf Biegezugversagen ist der Baukörper aus Salzbeton maßgebend. Die für den Biegespannungsnachweis erforderliche (fiktive) Widerlagerlänge lässt sich wie folgt bestimmen /82/

$$erf\ L_{w,bz} = r \sqrt{\frac{0{,}375\ (1+v) \cdot p_L}{zul\ \sigma_Z}} \qquad (4.14)$$

mit

erf $L_{w,bz}$= Länge des Streckenverschlusses zur Aufnahme der Biegezugspannungen
r = Radius des Streckenverschlusses
p_L = hydrostatischer Druck auf der Stirnfläche
v = Querdehnzahl des Salzbetons
zul σ_z = zulässige Zugspannung im Baukörper

Zusammenstellung der erforderlichen Kenngrößen

Länge des Streckenverschlusses: L = 25 m
Querschnitt der Stirnfläche des Streckenverschlusses: A = 12,02 m²
Radius des Streckenverschlusses: r = 1,96 m
Umfang des Streckenverschlusses: U = 12,32 m
Hydrostatischer Druck auf die Stirnfläche: p_L = 6 MPa
Querdehnzahl: v = 0,33

Auflaufender Gebirgsdruck wird vereinfachend und damit konservativ nicht berücksichtigt.

Die zulässige Schubspannung entspricht dem Bemessungswert der Scherfestigkeit. Da zur Scherfestigkeit Steinsalz/Salzbeton keine veröffentlichten Daten verfügbar sind, wird unterstellt, dass bei fehlendem Gebirgsdruck Rissbildung durch indirekten Zug erfolgt, so dass statt der Scherfestigkeit die Spaltzugfestigkeit konservativ in Ansatz gebracht werden kann. Weiterhin wird angenommen, dass für die Rissbildung in der Kontaktzone die Spaltzugfestigkeit des Steinsalzes maßgebend ist. Diese Annahme erscheint insofern gerechtfertigt, da die am ASSE-Vordamm durchgeführten Hydrofracuntersuchungen in der Kontaktzone Aufreißfestigkeiten zeigten, die typisch für Steinsalz sind /73/, /76/.

In /83/ sind Ergebnisse zu Spaltzugfestigkeiten einiger Steinsalze veröffentlicht. Für das Steinsalz „Allertalgraben Typ D, 500 m Teufe“ wurden 16 Probekörper geprüft. Diese zeigten einen Mittelwert der Spaltzugfestigkeit von σ_{sz} = 1,96 MPa und einen Variationskoeffizienten von 0,28. Die sich daraus ergebenden beiden charakteristischen Werte sowie die unter Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten γ_m = 1,5 für Tragfähigkeit und zusätzlich γ = 1,25 für Rissbeschränkung ermittelten Bemessungswerte sind in Tabelle 20 angegeben.

Tabelle 20: Charakteristische und Bemessungswerte der Spaltzugfestigkeit von Steinsalz

Spaltzugfestigkeit σ_{sz}	***X_k als 5-%-Fraktile***	***X_k als 95-%-Konfidenzintervall***	***X_d mit p_f < 0,1%***
$\sigma_{sz,k}$ [MPa]	1,02*)	1,72	-
$\sigma_{sz,d}$ [MPa] (Tragfähigkeit)	0,68	1,15	kein Wert bestimmbar
$\sigma_{sz,d}$ [MPa] (Rissbeschränkung)	0,54	0,92	

*) Die Bestimmung erfolgte auf Basis des Wertes für 10 Probekörper in Tabelle 29

Für die einaxiale Zugfestigkeit von Salzbeton M2 für die Streckenverschlüsse (Abdichtungen) des ERAM wird eine Bandbreite von 2,04 – 3,03 MPa angegeben /74/. Es wird angenommen, dass die Zugfestigkeit normalverteilt ist und die Bandbreite symmetrisch um den Mittelwert angeordnet ist, der sich dann zu 2,54 ergibt. Da Angaben zum Variationskoeffizienten nicht veröffentlicht sind, wird angenommen, dass der Variationskoeffizient der einaxialen Zugfestigkeit von Salzbeton dem Variationskoeffizienten von Normalbeton entspricht. In /84/ ist für Normalbeton ein Wert von 0,236 angegeben. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass eine sehr große Zahl von Versuchen vorliegt (hier gewählt: 30). Die sich unter diesen Annahmen ergebenden charakteristischen Werte und Bemessungswerte der einaxialen Zugfestigkeit für den Salzbeton sind in Tabelle 21 angegeben.

Tabelle 21: Charakteristische und Bemessungswerte der einaxialen Zugfestigkeit von Salzbeton

Einaxiale Zugfestigkeit σ_z	***X_k als 5-%-Fraktile***	***X_k als 95-%-Konfidenz-intervall***	***X_d mit $p_f < 0{,}1\%$***
$\sigma_{z,k}$ [MPa]	1,54	2,35	-
$\sigma_{z,d}$ [MPa] (Tragfähigkeit)	1,03	1,57	0,66
$\sigma_{z,d}$ [MPa] (Rissbeschränkung)	0,82	1,26	0,53

Rissbeschränkung für Baukörper und Kontaktzone

Auf Grundlage von Gl. 4.13 und Gl. 4.14 ergeben sich bei Ansatz der 5-%-Fraktile mit $\sigma_{sz,d}$ = 0,54 MPa und $\sigma_{z,d}$ = 0,82 MPa die erforderlichen Widerlagerlängen zu

$L_{w,T}$ = 10,85 m und $L_{w,bz}$ = 3,74 m < 25 m = vorh L

und bei Anwendung des 95-%-Konfidenzintervalls mit $\sigma_{sz,d}$ = 0,92 MPa und $\sigma_{z,d}$ = 1,26 MPa die erforderlichen Widerlagerlängen zu

$L_{w,T}$ = 6,36 m und $L_{w,bz}$ = 3,02 m < 25 m = vorh L

Für den Baukörper und die Kontaktzone ist somit der Nachweis der Rissbeschränkung zuverlässig geführt.

4.4.7.3 Transiente und stationäre Phase – Auflockerungszone

Für die Auflockerungszone ist der ungünstigste Zeitpunkt erreicht, wenn die hydraulische Einwirkung zu minimalen effektiven Drücken, d. h. minimaler Differenz zwischen totalem Druck und Porendruck, führt. In Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs des Druckaufbaus kann dieser Zeitpunkt im gesamten Zeitraum bis zum Erreichen des Maximaldrucks auftreten.

Für den Nachweis der Rissbeschränkung in der Auflockerungszone wurde im Fall der Streckenverschlüsse (Abdichtungen) des ERAM als Grenzbedingung das Fluidkriterium (Minimalspannungskriterium, Frac-Kriterium) bzw. die effektive Dilatanzbedingung für Steinsalz angewendet. Diese Kriterien besagen, dass der Porendruck der eindringenden Salzlösung geringer ist als die herrschende Gebirgsspannung und deshalb keine Erweiterung der Poren/Risse erfolgt und damit eine Zunahme der Permeabilität ausgeschlossen ist.

Die Berechnungsergebnisse zur Streckenabdichtung des ERAM sind in Abbildung 58 dargestellt. Abbildung 58 zeigt deutlich, dass es sehr lange dauert, bis das Kriterium erfüllt ist und auch nicht die gesamte Länge der Abdichtung als wirksam betrachtet werden darf. Für das

ERAM ist allerdings festzustellen, dass sich der hydraulische Druck an den Abdichtungen nur sehr langsam aufbaut, da der Zufluss von Salzlösung aufgrund der Deckgebirgseigenschaften nur langsam erfolgt, siehe dazu mögliche Verläufe des Druckaufbaus (grüne und blaue Linie in Abbildung 58). Bei instantanem Druckaufbau wäre der Nachweis für die Auflockerungszone nicht erbracht, da der Porendruck den Gebirgsdruck überschreitet, siehe ebenfalls Abbildung 58 (orange Linie).

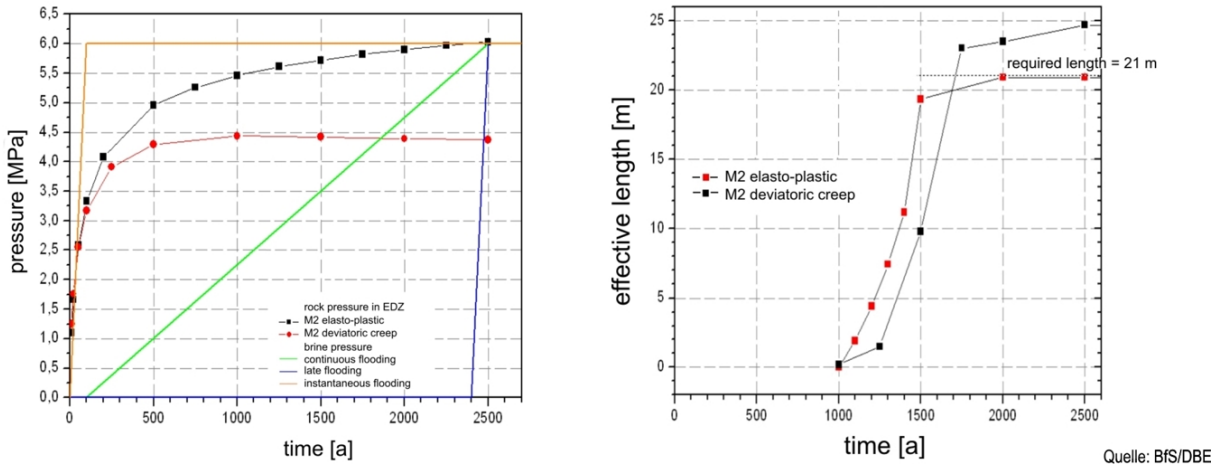


Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf des Druckaufbaus und effektive Länge des Streckenverschlusses (Abdichtung) /73/

Da der Nachweis der Rissbeschränkung für die Auflockerungszone, wie am o. g. Beispiel ausgeführt, einerseits vom Zuflussszenario abhängt, andererseits vom kriechbedingten Spannungsaufbau in der ehemaligen Auflockerungszone (vgl. Abbildung 58) kann für den generischen Streckenverschluss keine belastbare allgemeingültige Zuverlässigkeitsaussage abgeleitet werden. Dies gilt, obwohl die Permeabilitätsmessungen am ASSE-Vordamm in der ehemaligen Auflockerungszone zeigen, dass sehr geringe Permeabilitäten erreicht werden, wenn das Fluidkriterium tatsächlich eingehalten wird. Dies wird deutlich, wenn man die in Tabelle 22 angegebenen Ergebnisse der Hydrofracmessungen in der Kontaktzone des ASSE-Vordamms mit den Permeabilitätswerten in Tabelle 17 und gleichzeitig berücksichtigt, dass der bei den Permeabilitätsmessungen verwendete Prüfdruck i. d. R. 1,2 MPa betrug und somit das Fluidkriterium erfüllt war.

Tabelle 22: Ergebnisse der Hydrofracmessungen in der Kontaktzone am ASSE-Vordamm. Die Hydrofracmessungen wurden in den gleichen Bohrungen wie die Permeabilitätstests durchgeführt /76/.

Position	***Ruhedruck nach einer Stunde [MPa]***	
	Vorn	***Mitte***
Sohle	3,5	15,6
Nordstoß	2,5	6,9
Südstoß	6,6	13.1
Firste	kein Druckaufbau	2,1

Eine Zusammenstellung von weiterführenden Informationen zur Auflockerungszone ist in Anhang 3 gegeben.

4.4.7.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse zur Rissbeschränkung

Während der Nachweis der Rissbeschränkung für den Baukörper und die Kontaktzone für die transiente und stationäre Phase zuverlässig geführt werden kann, wird der Nachweis bzgl. der Rissbeschränkung der Bauzustände noch als nicht ausreichend erachtet, da er auf Basis eines empirischen Kriteriums geführt wurde. Die Erfüllung eines empirischen Kriteriums deutet jedoch darauf hin, dass ein Nachweis prinzipiell geführt werden kann und lediglich einer vertieften Untersuchung bedarf.

In Bezug auf die ehemalige Auflockerungszone können keine allgemein gültigen Aussagen zur Zuverlässigkeit des Nachweises der Rissbeschränkung vorgenommen werden, da in diesen Nachweis mit der Druckaufbaurate der Salzlösung (Einwirkung) und dem kriechbedingten Spannungsaufbau (Widerstand) in der ehemaligen Auflockerungszone zwei Prozesse eingehen, die von den standortspezifischen bzw. lokationsspezifischen Randbedingungen abhängen, ein Sachverhalt, der unter dem Aspekt eines technisch orientierten Sicherheits(nachweis)konzeptes gesehen unbefriedigend ist, da zumindest eine der Größen, i. d. R. der Widerstand (wenn nicht ausreichend) durch technische Maßnahmen bestimmt oder zumindest günstig beeinflusst werden sollte.

4.4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsniveaus

In Bezug auf die unter 4.4 aufgeführten, nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften für eine einzelne Barriere lässt sich das Ergebnis der Bestimmung des nachweisbaren Zuverlässigkeitsniveaus des generischen Streckenverschlusses im Salzgestein wie folgt zusammenfassen.

Die Herstellbarkeit des Streckenverschlusses kann nach konstruktiver Veränderung als gegeben angesehen werden.

Die Dichtfunktion des Streckenverschlusses aus Salzbeton im Steinsalz kann zuverlässig nachgewiesen werden, wenn der Nachweis der Rissbeschränkung gelingt. Dies gilt im Grundsatz auch für den Nachweis der Beständigkeit, wobei eine mögliche Umläufigkeit in der Auflockerungszone zwar noch zu untersuchen ist. Da aber die Durchflussraten bei der geringen Permeabilität der (ehemaligen) Auflockerungszone (Kapitel 4.4.3) ebenfalls gering sind, wenn der Nachweis der Rissbeschränkung gelingt, dürfte dieser Nachweis führbar sein. Dazu ist anzumerken, dass der Nachweis der Beständigkeit von der erforderlichen Lebensdauer des Streckenverschlusses bzw. vom zu Grunde gelegten Nachweiszeitraum abhängt.

Bzgl. des Nachweises der Rissbeschränkung in der (ehemaligen) Auflockerungszone ist festzustellen, dass dieser sowohl im Hinblick auf die Einwirkungen (Druckaufbaurate der Salzlösung) als auch in Bezug auf den Widerstand (kriechbedingter Spannungsaufbau in der ehemaligen Auflockerungszone) von standort- bzw. lokationsspezifischen Randbedingungen abhängt und deshalb keine Zuverlässigkeitsbewertung vorgenommen werden kann.

Ob im Fall eines Streckenverschlusses für die Zuverlässigkeitsbewertung die 5-%-Fraktile herangezogen werden muss oder das 95-%-Konfidenzintervall, bezogen auf den Mittelwert, hängt nicht nur von der jeweils zu betrachtenden Kenngröße ab, sondern auch z. B. von der Länge des Streckenverschlusses und ist deshalb im Einzelfall zu bewerten, vgl. Anhang 1.

4.5 Organisatorische Maßnahmen zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit

Die organisatorischen Maßnahmen zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit umfassen Überwachungsmaßnahmen bei der Planung und bei der Herstellung, wobei die Überwachung bei der Herstellung auch Prüfungen an der fertig gestellten Barriere umfassen kann. Während im Falle des KBS-3-Behälters am fertigen „Produkt Abfallgebinde“ Prüfungen vorgenommen werden können, z. B. mit den in Kapitel 4.2.1.2 beschriebenen Prüfmethoden für die Schweißnähte, ist eine vergleichbare Prüfung am fertig gestellten Schacht- oder Streckenverschluss mit den derzeit verfügbaren Prüfverfahren nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich /76/, /78/. Dementsprechend kommt den Überwachungsmaßnahmen bei der Planung (DSL) und bei der Herstellung (IL) eine große Bedeutung zu. In den folgenden beiden Kapitel 4.5.1 und 4.5.2 werden die grundlegenden Vorgaben für die Organisation der Überwachungsmaßnahmen (wer prüft) nach /39/ auszugsweise wiedergegeben.

Standardmäßig werden dabei den Zuverlässigkeitsklassen RC1, RC2 und RC3 die Überwachungsklassen DSL1, DSL2 und DSL3 bzw. IL1, IL2 und IL3 zugeordnet. Allerdings ist festzustellen, dass im Fall der vorgestellten Barrieren Kupferbehälter, Schachtverschluss und Streckenverschluss die der Auslegung zu Grunde gelegte Zuverlässigkeitsklasse RC2 entspricht, diese jedoch mit Überwachungsmaßnahmen verknüpft wird, die den höheren Klassen DSL3 und IL3 entsprechen. Dieses Vorgehen ist nicht zwingend für Komponenten, die der kerntechnischen/radiologischen Sicherheit dienen, jedoch i. d. R. üblich, vgl. Kapitel 4.1.

4.5.1 Differenzierung der Überwachungsmaßnahmen bei der Planung

Die Differenzierung der Überwachungsmaßnahmen bei der Planung /39/ besteht in verschiedenen organisatorischen Qualitätssicherungsmaßnahmen, die kombiniert werden können. Beispielweise kann die Festlegung einer bestimmten Stufe für Überwachungsmaßnahmen mit anderen Maßnahmen wie der Klassifizierung des Planers oder der Prüfinstanz verbunden sein.

In Tabelle 23 werden drei mögliche Stufen für Überwachungsmaßnahmen bei der Planung (DSL) angegeben. Diese Stufen können mit den Zuverlässigkeitsklassen, die je nach Bedeutung des Tragwerks (hier: der Barriere) in nationalen Vorschriften oder den Planungsgrundlagen gefordert werden, verknüpft sein und durch geeignete Qualitätssicherungsmaßnahmen konkretisiert werden.

Tabelle 23: Überwachungsmaßnahmen bei der Planung (DSL)

Überwachungsmaß-nahmen bei der Planung	***Merkmale***	***Mindestanforderungen an die Prüfung von Auslegungsberechnungen, von Zeichnungen und Anweisungen***
DSL3 in Verbindung mit RC3	Verstärkte Überwachung	Prüfung durch unabhängige Drittstelle: Prüfung durch eine von der Planungsstelle organisatorisch unabhängigen Prüfstelle (Fremdüberwachung)
DSL2 in Verbindung mit RC2	Normale Überwachung	Prüfung durch eine von der Planungsstelle unabhängigen Prüfstelle in der eigenen Organisation (Eigenüberwachung durch eigene Prüfstelle)
DSL1 in Verbindung mit RC1	Normale Überwachung	Eigenüberwachung: Prüfung durch die Planungsstelle selbst.

Die Differenzierung der Überwachungsmaßnahmen bei der Planung kann auch eine Klassifizierung der Planer oder Prüfer (Prüfingenieure, Gutachter usw.) je nach Kompetenz und Erfahrung und organisatorischer Zugehörigkeit bedeuten.

Die Differenzierung der Überwachungsmaßnahmen kann auch auf Basis einer unterschiedlichen Modellierung der Einwirkungen nach Art und Größe erfolgen oder in Aktiv- oder Passivmaßnahmen zur Begrenzung der Einwirkung bestehen. Als Beispiel für diesen Fall kann die in Kapitel 4.4.7.1 für den Streckenverschluss aus Salzbeton beschriebene aktive Kühlungsmaßnahme zur Beschränkung der Temperaturdifferenzen in Folge Hydratation dienen, die im Falle ihrer Realisierung zu überwachen ist.

4.5.2 Differenzierung der Überwachungsmaßnahmen bei der Herstellung

In Tabelle 24 werden drei Überwachungsstufen für die Herstellung (IL) angegeben /39/. Die verschiedenen Überwachungsstufen können durch verschiedene Qualitätssicherungsmaßnahmen konkretisiert werden. Weitere Hinweise sind den Ausführungsnormen zu entnehmen, auf die in den bauartspezifischen Eurocodes 2 bis 6 und 9 (EN 1992 bis EN 1996 und EN 1999) Bezug genommen wird.

Tabelle 24: Überwachungsmaßnahmen bei der Herstellung (IL)

Überwachungsstufe	***Merkmale***	***Anforderungen***
IL3 in Verbindung mit RC3	Verstärkte Überwachung	Überwachung durch unabhängige Drittstelle (Fremdüberwachung)
IL2 in Verbindung mit RC2	Normale Überwachung	Überwachung durch Überwachungsstelle der eigenen Organisation
IL1 in Verbindung mit RC1	Normale Überwachung	Eigenüberwachung

Zusammen mit den Überwachungsstufen werden Prüfpläne definiert. Da diese sowohl von den Baustoffen als auch dem Herstellungsprozess (was wird wann wie oft geprüft) abhängen, werden Einzelheiten in den jeweiligen Ausführungsnormen angegeben.

4.5.3 Zusammenfassung wichtiger Aspekte zu den Überwachungsmaßnahmen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Anwendung von organisatorischen Maßnahmen zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit Stand der Technik ist. Eine Verknüpfung von Schadensfolgeklassen und Zuverlässigkeitsklassen mit Überwachungsmaßnahmen, die jeweils höheren Zuverlässigkeitsklassen zugeordnet sind, ist uneingeschränkt möglich, häufig sinnvoll und wird voraussichtlich auf (geo)technische Barrieren in einem Endlager zur Anwendung kommen. Die Prüfpläne hängen von den Baustoffen und dem Herstellungsprozess der (geo)technischen Barriere ab. Die Bereitstellung adäquater Prüfpläne und deren Umsetzung sind als letzter Schritt Bestandteil des Nachweises der Zuverlässigkeit (geo)technischer Barrieren.

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Zuverlässigkeitsniveau ausgewählter Einzelbarrieren für Endlager im Granit, Tongestein und Steinsalz

Bevor eine abschließende Bewertung vorgenommen wird, werden die wesentlichen Ergebnisse nochmals kurz zusammengefasst:

Endlagerbehälter für ein Endlager im Granit:
Unter Zuhilfenahme der von der SKB veröffentlichten Daten zum KBS-3-Behälterkonzept werden die Herstellungsprozesse des Behälters und die Prüfverfahren der Schweißnähte vorgestellt. Da Schweißverbindungen nicht vollkommen fehlerfrei herzustellen sind, muss die Prüfung der Schweißnaht mit geeigneten Verfahren eine möglichst hohe Fehlererkennung aufweisen. Mit der Prüfung durch Ultraschallwellen wurden Erfahrungen gesammelt, so dass Defekte in Schweißnähten, die oberhalb der geforderten Toleranz liegen, mit einer Wahrscheinlichkeit von $p_f = 3{,}6 \cdot 10^{-04}$ erkannt werden. Die Anforderungen der SKB liegen bei einem defekten Behälter maximal auf 1000 produzierte Behälter.

Es ist davon auszugehen, dass es mit zunehmender Erfahrung im Produktionsprozess und bei entsprechender Optimierung der Prüfverfahren möglich ist, das Zuverlässigkeitsniveau von $p_f \leq 1 \cdot 10^{-04}$ der Eurocodes bezogen auf den Einzelbehälter zu erreichen.

Die anforderungsgerechte Herstellung des Behälters verbunden mit dem Nachweis der Dichtheit (Beschränkung möglicher Fehlstellen bzw. Initialdefekte) ist Voraussetzung für die Nachweise der Tragfähigkeit und der Beständigkeit, die dann als führbar eingeschätzt werden. Der Nachweis der anforderungsgerechten Herstellung ist deshalb systembestimmend.

Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein:
Unter Verwendung der Datenbasis für den generischen Schachtverschluss im Tongestein konnte plausibel dargelegt werden, dass für das Element Schottersäule (Widerlager) der Nachweis der Verformungsbeschränkung sowie für die Elemente Dichtelement und Kontaktzone die Nachweise des geforderten hydraulischen Widerstandes hinreichend zuverlässig ($p_f \leq 1 \cdot 10^{-04}$ /Lebensdauer) geführt werden können. Für die (ehemalige) Auflockerungszone im Tongestein reicht die vorliegende Datenbasis dazu nicht aus, wobei nach derzeitigem Kenntnisstand der Nachweis der Rissbeschränkung in gleicher Weise systembestimmend ist wie der Nachweis des hydraulischen Widerstandes.

Die bei körnigen Erdstoffen ebenfalls zu betrachtenden Nachweise der Erosions- und Suffosionssicherheit sind zwar zu führen, können i. d. R. aber durch konstruktive Maßnahmen beherrscht werden und werden deshalb als nicht systembestimmend eingeschätzt. Dies gilt auch für den fehlenden Nachweis der Spreizverformungen in der Kontaktzone zwischen Bentonitdichtelement und Schachtkontur.

Streckenverschluss für ein Endlager im Salzgestein:
Unter Verwendung der Datenbasis für den generischen Streckenverschluss im Salzgestein konnte plausibel dargelegt werden, dass für die Elemente Baukörper und Kontaktzone die Nachweise des geforderten hydraulischen Widerstandes zuverlässig geführt werden können ($p_f \leq 1 \cdot 10^{-04}$ /Lebensdauer), wenn auch die (ehemalige) Auflockerungszone im umgebenden Steinsalz eine hinreichend geringe Permeabilität aufweist. Dass eine so geringe Permeabilität prinzipiell erreichbar ist, zeigen die Untersuchungen am ASSE-Vordamm sowie die Ergebnisse aus FuE-Vorhaben /85/, /86/. Für den die Permeabilität der (ehemaligen) Auflockerungszone bestimmenden Nachweis der Rissbeschränkung sind standortspezifische bzw. lokationsspezifische Einwirkungen und Einflüsse maßgebend, dementsprechend hängt das nachweisbare Zuverlässigkeitsniveau derzeit von standortspezifischen und lokationsspezifischen Gegebenheiten ab.

Der Nachweis der Beständigkeit hängt von der geforderten Lebensdauer (Nachweiszeitraum) des Streckenverschlusses ab, ist aber prinzipiell führbar. Weiterhin wird er vom Nachweis der Rissbeschränkung in der (ehemaligen) Auflockerungszone mit beeinflusst, in welchem Umfang, kann auf Grundlage der veröffentlichten Datenbasis derzeit nicht abgeschätzt werden.

Bewertung der gefundenen Ergebnisse:
Beim Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein und beim Streckenverschluss für ein Endlager im Salzgestein handelt es sich in beiden Fällen um eine geotechnische Barriere, während der Behälter in einem Endlager im Granitgestein eine rein technische Barriere darstellt. Die Prüfung technischer Barrieren kann mit genau kalibrierten Maschinen immer unter denselben Umgebungsbedingungen durchgeführt werden, während für die Bewertung geotechnischer Barrieren immer lokationsbezogen Daten aus dem geologischen Umfeld erhoben werden müssen. Diese lokationsbezogen zu erhebenden Daten sind im Falle des generischen Schachtverschlusses im Tongestein in Anlehnung an die Lokation Bure bei weitem nicht ausreichend gewesen, um einen belastbaren Bemessungswert für die Permeabilität in der Auflockerungszone zu ermitteln. Es sind weiterführende Forschungsar-

beiten notwendig, um die Größe und die Permeabilität der Auflockerungszone quantifizieren zu können, und vor allem sind Arbeiten notwendig, die die zeitabhängige Entwicklung der konturnahen Auflockerungszone behandeln. Gerade die stark aufgelockerte Konturzone muss vor dem Einbau eines Verschlusses entfernt werden, damit die lokal stark erhöhten Permeabilitäten keine Schwächezone im Barrierensystem darstellen. Ähnlich wie im Salzgestein ist auch im Tongestein davon auszugehen, dass sich nach dem Nachschnitt zeitnah eine neue Auflockerungszone im Konturnahbereich ausbildet. Dieses Verhalten ist gezielt zu untersuchen. Darüber hinaus ist die Aufsättigung des Tongesteins zu berücksichtigen. Die NAGRA /32/ setzt sinnvollerweise die Permeabilität der Auflockerungszone nach der Aufsättigungsphase für den Langzeitsicherheitsnachweis an. Durch die Aufsättigung des Tongesteins kommt es zum Quellen, wobei geöffnete Wegsamkeiten verschlossen werden können. Der Quellprozess ist zu untersuchen und in der Ermittlung der Bemessungswerte der Permeabilität in der (ehemaligen) Auflockerungszone zu berücksichtigen.

Anhand der vorhandenen Datenbasis aus in-situ-Messungen in Strecken mit ausgeführten Bauwerken im Salzgestein wird deutlich, dass mit der Weiterentwicklung des Standes der Wissenschaft und Forschung Unsicherheiten abgebaut und realistischere Aussagen bezüglich Zuverlässigkeit der Abdichtungswirkung von Barrieren getroffen werden können. So kann auf Grundlage der vorhandenen Untersuchungsergebnisse festgestellt werden, dass ausreichend niedrige Permeabilitäten in der (ehemaligen) Auflockerungszone prinzipiell erreichbar sind.

Allerdings ist festzustellen, dass dem Nachweis der Rissbeschränkung im Rahmen der durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen bisher wenig Bedeutung beigemessen wurde, obwohl er, wie die Beispiele zeigen, für die Funktionsfähigkeit der einzelnen Barrieren zu den systembestimmenden Nachweisen gehört.

Setzt man die möglichen Fehlstellen bzw. Initialdefekte in der Schweißnaht des Kupferbehälters Rissen gleich, ergibt sich für die drei ausgewählten Beispiele der Einzelbarrieren Kupferbehälter für ein Endlager im Granitgestein, Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein und Streckenverschluss für ein Endlager im Salzgestein trotz ihres unterschiedlichen Aufbaus, dass genau dieser Nachweis der Rissbeschränkung die Grundlage für den Nachweis der Dichtheit bzw. des ausreichenden hydraulischen Widerstandes und ggf. der Beständigkeit bildet.

Diese Aussagen treffen insbesondere auf die (ehemaligen) Auflockerungszonen des Schachtverschlusses im Tongestein und des Streckenverschlusses im Salzgestein zu. In Bezug auf den Kupferbehälter im Granit wurde mit der Entwicklung geeigneter Prüfverfahren bereits auf diesen Sachverhalt reagiert.

5 Abschätzung oberer Schranken für das von einem Endlager für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente ausgehende, hypothetische Risiko und Gegenüberstellung von gesellschaftlich akzeptierten Risiken

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse aus den vorangegangenen Recherchen einschließlich der Schranken für das hypothetische Risiko, einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden in Folge eines Endlagers für HAW und SF zu erleiden, zusammengefasst. Unter Einbeziehung des nach Eurocode ermittelten Zuverlässigkeitsniveaus für Einzelbarrieren wird dann geprüft, ob die in Kapitel 2 und 3 vorgenommene Zuordnung einzelner FEP bzw. Szenarien zur ungestörten oder gestörten Endlagerentwicklung bzw. What-If-Szenarien aufrecht erhalten werden kann oder ob Modifizierungen vorzunehmen sind.

Vorsorglich ist anzumerken, dass das Ergebnis dieser Prüfung in Bezug auf die verschiedenen Wirtsgesteinsformationen und Endlagerkonzepte keine vergleichende Gegenüberstellung untereinander zulässt, weil das Ergebnis davon abhängt, welche Einzelbarriere für eine genauere Betrachtung ausgewählt wurde. Allerdings zeigt die Prüfung sowohl für das schwedische KBS-3-Konzept im Granit als auch für das schweizerische Opalinuston-Projekt im Tongestein exemplarisch FEP bzw. Szenarien auf, die für das nachweisbare Zuverlässigkeitsniveau des Endlagers bestimmend sind und damit für das vom Endlager potenziell ausgehende Risiko.

Auf Basis von Ergebnissen zu den ermittelten Dosisraten für berücksichtigte FEP und Szenarien, die den FEP und Szenarien ähnlich sind, die das Zuverlässigkeitsniveau von Einzelbarrieren bestimmen, wird dann für diese Fälle eine Risikoschranke quantitativ abgeleitet.

Im letzten Schritt erfolgt eine Gegenüberstellung des vom HAW/SF-Endlager ausgehenden, potenziellen Risikos, einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden, mit realen Lebensrisiken.

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zu ausgewählten Endlagerkonzepten im Granit, Tongestein und Salzgestein unter Berücksichtigung der Ergebnisse zum nachweisbaren Zuverlässigkeitsniveau von Einzelbarrieren

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die verschiedenen Endlagerkonzepte und Wirtsgesteinsformationen kurz zusammengefasst.

5.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für das KBS-3-Konzept eines Endlagers im Granitgestein

Gemäß Kapitel 4.2.2 beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Behälter defekt endgelagert wird, $p_f \leq 3{,}6 \cdot 10^{-04}$ pro Abfallgebinde, wobei aus verschiedenen Quellen eine Bandbreite von $1 \cdot 10^{-03}$ (Anforderung) und von $2 \cdot 10^{-04}$ (Schätzung einer von 5000) entnommen werden kann. Bei Einlagerung von 4000 – 5000 Behältern kann nicht ausgeschlossen werden, dass Abfall-

gebinde mit Initialdefekten in das Endlager eingelagert werden. Für das Einbringen von möglicherweise defekten Bentonitpuffern liegen keine Zahlenwerte vor. Es wird entsprechend Eurocode angenommen, dass jeder einzelne Bentonitpuffer mit einer Wahrscheinlichkeit von $p_s \geq (1 - 10^{-04})$ seine Barrierefunktion erfüllt und nicht vorzeitig versagt. Bei Einbau von 4000 – 5000 Betonitpuffern kann ebenfalls mindestens ein defekter Betonitpuffer im Endlager nicht ausgeschlossen werden. Dieser Fall ist also zu untersuchen. Die Kombination defekter Behälter und defekter Bentonitpuffer nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit von $< 3{,}6 \cdot 10^{-8}$ bzw. $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ bei 5000 Bentonitpuffern und 5000 Behältern auf und bleibt hier unberücksichtigt.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass auf Grundlage der vorliegenden Daten die Einlagerung defekter Abfallgebinde als wahrscheinlich einzustufen ist, dieses Szenario mit zu betrachten und der „ungestörten Entwicklung“ des Endlagers zuzuordnen ist.

In Kapitel 3.8.1.2 ist aufgeführt, dass für den Standort „Aberg“ bei einem defekten Behälter bei probabilistischen Analysen für die ungünstige Biosphäre Torfmoor eine mittlere freigesetzte Dosisrate von ca. $0{,}2 \cdot 10^{-04}$ Sv/a errechnet wird. Superponiert man die potenziell freigesetzten Dosisraten von mehreren defekten Behältern linear, lässt sich abschätzen, dass ab einer Zahl von 7 – 8 defekten Behältern eine mittlere Dosisrate von $0{,}15 \cdot 10^{-03}$ Sv/a erreicht wird und damit die in Schweden akzeptierte Risikogrenze von $RI = 10^{-06}$ /a überschritten wird. Bei Zugrundelegung günstigerer Biosphären oder der Standorte „Beberg“ und „Ceberg“, liegen die mittleren freigesetzten Dosisraten deutlich unter den akzeptierten Dosis- und Risikogrenzwerten.

5.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse für das Opalinuston-Projekt eines Endlagers im Tongestein

Einleitend zu diesem Kapitel soll angemerkt werden, dass bei der folgenden Betrachtung die Integrität der Wirtsgesteinsbarriere nicht diskutiert wird. Sie wird als nicht auslegungsbestimmend unterstellt, da ihre Integrität uneingeschränkt vorausgesetzt wird.

Für den generischen Schachtverschluss wurde gezeigt, dass für die Elemente Schottersäule, Bentonitdichtelement und Kontaktzone ein Zuverlässigkeitsniveau $p_s \geq (1 - 10^{-04})$ /Lebensdauer erreicht wird. Da insgesamt nur eine geringe Zahl von z. B. zwei Schachtverschlüssen zu erwarten ist, kann davon ausgegangen werden, dass der Verschluss der Schächte insgesamt mit dem gleichen Zuverlässigkeitsniveau erfolgt. Als offener Punkt ergibt sich allerdings die (ehemalige) Auflockerungszone im Tongestein. Für sie liegt keine belastbare Datenbasis vor.

Für die weiteren Betrachtungen wird deshalb unterstellt, dass der erforderliche hydraulische Widerstand, der mindestens gewährleistet sein muss, um die hydraulischen Anforderungen an den Schachtverschluss integral zu erfüllen, tatsächlich erreicht wird. Die ermittelte erforderliche Durchlässigkeit betrug ca. $5 \cdot 10^{-10}$ m/s (vgl. Tabelle 16) für die hoch aufgelockerte Zone. Weiterhin wird angenommen, dass in der (ehemaligen) Auflockerungszone im Bereich

der Streckenverschlüsse im Tongestein vergleichbare Verhältnisse angetroffen werden wie im Falle des Schachtverschlusses.

Zur Abschätzung einer Dosis- bzw. Risikoschranke wird der Fall einer höher leitfähigen Auflockerungszone um Schacht- und Streckenverschlüsse mit dem What-if-Fall „Transport entlang transmissiver Diskontinuitäten“ gleichgesetzt. Für diesen What-if-Fall wurden Transmissivitäten in einer Bandbreite von 10^{-09} bis 10^{-10} m²/s angesetzt, für die sich in vielen Fällen eine äquivalente Durchlässigkeit in gleicher Größenordnung ergibt. Bei diesem Ansatz liegt die erforderliche Durchlässigkeit der (ehemaligen) Auflockerungszone genau innerhalb dieser Bandbreite. So kann aus diesem Whatf-if-Fall in Verbindung mit den in Abbildung 31 angegebenen Dosisraten eine Schranke für die Dosis und das Risiko abgeleitet werden. Es ergeben sich mit

$$D = D(SF) + D(HAW) + D(ILW) = 2{,}5 \cdot 10^{-03} + 2 \cdot 10^{-05} + 1{,}2 \cdot 10^{-02} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-02}\ \text{mSv/a}$$

und

$$RI(D) = 5{,}7 \cdot 10^{-02}\,1/\text{Sv} \cdot\ 1{,}5 \cdot 10^{-05}\ \text{Sv/a} \approx 9 \cdot 10^{-07}/\text{a}$$

immer noch sehr kleine Dosis- und Risikowerte. Dennoch ist zu beachten, dass der „Transport entlang transmissiver Diskontinuitäten“, wenn man die (ehemalige) Auflockerungszone so bezeichnet, kein What-if-Fall ist, sondern ein Szenario, das im Rahmen des Basisszenarios mit zu betrachten ist, solange nicht zuverlässig gezeigt ist, dass die (ehemalige) Auflockerungszone tatsächlich die im Basisszenario (Referenzfall: $k_f = 10^{-12}$ m/s) angesetzten geringen Durchlässigkeiten aufweist.

Da im Falle des schweizerischen Opalinuston-Projektes von einer begrenzten Behälterstandzeit von mindestens 1000 bis im „Mittel“ 10.000 Jahren ausgegangen wird, wäre prinzipiell die Kombination „Transport entlang transmissiver Diskontinuitäten“ und defekter Bentonitpuffer auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zu untersuchen. Darauf wird jedoch hier verzichtet, da dieser Fall, wie aus Abbildung 23 hervorgeht, zu komplex ist, um eine einfache quantitative Abschätzung zuzulassen.

5.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für ein Endlager im Salzgestein

Für ein Endlager im Salzgestein stellt sich die Situation anders dar als in den Wirtsgesteinen Granit und Ton. In /40/ wurde ein Dichtheitskriterium angegeben, mit dem gezeigt werden kann, dass die Dichtheit der ungestörten Salzbarriere bei ausreichender Mächtigkeit für sehr lange Zeiten nachweisbar ist, d.h. eine „Aufsättigung“ des Endlagers über die Wirtsgesteinsbarriere erfolgt nicht. Dementsprechend verbleiben als einzige Wegsamkeiten die Schächte und Strecken, über die ein Zutritt von Wässern bzw. Salzlösungen erfolgen kann. In Kapitel 4.4 ist am Beispiel des Streckenverschlusses im Steinsalz dargelegt, dass es möglich ist, sehr gering permeable Streckenverschlüsse herzustellen. Dies gilt grundsätzlich auch für Schachtverschlüsse /63/, /65/. Mit Ausnahme der (ehemaligen) Auflockerungszone im Salzgestein, die standortspezifisch bzw. lokationsspezifisch zu bewerten ist, kann für die übrigen

Elemente der Verschlüsse lebensdauerbezogen ein den Vorgaben der Eurocodes genügendes Zuverlässigkeitsniveau nachgewiesen werden. Ordnet man Schacht- und Streckenverschlüsse in Reihe an, weist bei einer Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f < 1 \cdot 10^{-04}$/ Lebensdauer für jeden Verschluss bei nur zwei Schächten und einer geringen Anzahl von Zugangsstrecken in das Endlager der gleichzeitige Ausfall von Schacht- und Streckenverschlüssen nur eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit ($\leq 10^{-8}$) auf und wird hier analog zu vergleichbaren Kombinationen für Endlagerkonzepte im Granit und Tongestein nicht betrachtet.

Unter den o.g. Voraussetzungen ist zu prüfen, ob es überhaupt zu einem Transport von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre kommt /45/, oder ob dieser Fall auf Grund seiner geringen Eintrittswahrscheinlichkeit nicht mehr betrachtet werden muss. Dazu ist einschränkend festzustellen, dass eine Bewertung der (ehemaligen) Auflockerungszone derzeit nur standort- und lokationsspezifisch möglich ist und deshalb analog zu Endlagerkonzepten im Tongestein derzeit mit einer plausibel geschätzten Bandbreite für die Durchlässigkeit der Auflockerungszone gearbeitet werden muss. Da die Untersuchungen, ob bzw. in welchen Fällen es überhaupt zu einer Freisetzung von Radionukliden kommt, nicht abgeschlossen sind, können dazu auch keine Dosis- bzw. Risikoschranken abgeschätzt werden. In /40/ wurde auf Grundlage sehr viel weniger detaillierter Untersuchungen eine Abschätzung vorgenommen und eine Schranke für das Risiko von $RI < 10^{-6}$ /a abgeleitet. In Ermangelung neuerer Werte wird diese Schranke hier zu Grunde gelegt. Der hier beschriebene Stand der Untersuchungen lässt allerdings die Einschätzung zu, dass das von einem Endlager im Salzgestein ausgehende Risiko vergleichbar zum schweizerischen Konzept im Tongestein durch ein regulativ vorgegebenes „Human Intrusion“ Szenario und somit formal bestimmt wird.

5.2 Gegenüberstellung der Abschätzungen für das individuelle Risiko für Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Granit, Tongestein und Steinsalz

Die aus den Ergebnissen der Langzeitsicherheitsanalysen abgeleiteten Werte für das mittlere, individuelle Risiko sind bereits in Kapitel 3.9 Tabelle 12 zusammengefasst. Sie liegen sowohl für das Basisszenario des schwedischen KBS-3-Konzeptes im Granit als auch für das Basisszenario des Opalinuston-Projektes im Tongestein um mehr als eine Größenordnung unter dem in Schweden regulativ als Akzeptanzgrenze vorgegebenen Wert für das Individualrisiko von 10^{-6}/a /25/. Dies gilt im Fall des schweizerischen Opalinustonprojektes auch für die Bandbreite der betrachteten Biosphären. In Schweden wurden nicht nur verschiedene Biosphären, sondern auch 3 Standorte vergleichend betrachtet. Sieht man vom Standort „Aberg“ (= Äspö, siehe /25/) in Verbindung mit einer sehr ungünstig gewählten Biosphäre ab, die die Akzeptanzgrenze für das Individualrisiko erreicht, liegen hier die ermittelten Individualrisiken für die behandelten Fälle deutlich unterhalb der Akzeptanzgrenze.

Die Einbeziehung der Untersuchung des Zuverlässigkeitsniveaus führt sowohl im Fall des schwedischen KBS-3-Konzeptes als auch im Fall des schweizerischen Opalinuston-Projektes zu einer Veränderung in der Zuordnung der auslegungsbestimmenden FEP bzw.

Szenarien, jedoch mit der o. g. Ausnahme nicht zu einer Überschreitung der in Schweden geltenden Akzeptanzgrenze für das Individualrisiko, wie an Hand von Abschätzungen gezeigt werden konnte.

Für ein Endlagerkonzept im Salzgestein liegen keine verwendbaren, neueren Untersuchungsergebnisse vor, deshalb wird die in /40/ ermittelte Risikoschranke RI $\leq 10^{-6}$ /a, die auf Abschätzungen mit geringem Detaillierungsgrad beruht, herangezogen.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass das vom Endlager ausgehende Individualrisiko mit Ausnahme des o. g. Falls am Standort „Aberg“ die Akzeptanzgrenze von RI $\leq 10^{-6}$ /a unabhängig von der Wirtsgesteinsformation bei angepasstem Endlagerkonzept nicht überschreitet. Das individuelle Risiko, das sich aus der natürlichen, radioaktiven Hintergrundstrahlung ergibt, liegt in Schweden um fast zwei Größenordnungen und in der Schweiz bis zu drei Größenordnungen höher. Dieses Ergebnis dürfte auch auf das deutsche Endlagerkonzept im Salzgestein zutreffen.

Weiterhin ist festzustellen, dass sowohl im Fall des schwedischen KBS-3-Konzeptes als auch des schweizerischen Opalinuston-Projektes die Akzeptanzgrenze von RI ≤ 10^{-6}/a vorzugsweise durch das regulativ festgelegte „Human intrusion“ Szenario erreicht wurde (vgl. Tabelle 12), ein Ergebnis, das auch für das deutsche Endlagerkonzept im Salzgestein vermutet werden kann.

In Bezug auf die Vergleichbarkeit der Abschätzungen ist einschränkend festzustellen, dass die als Basis dienenden Dosisraten rechnerisch ermittelt wurden, die konzeptspezifische Konservativitäten enthalten, die in den hier vorgenommenen Abschätzungen nicht erfasst sind.

5.3 Vergleich der Ergebnisse mit akzeptierten hypothetischen Risiken aus konventionellen technischen Anlagen

Um einen Vergleich des Risikos aus einem Endlager für radioaktive Abfälle mit anderen technischen Anlagen zu erhalten, wird das Individualrisiko von $1{,}0 \cdot 10^{-06}$ /a eines radiologischen Gesundheitsschadens durch die Auswirkungen eines Endlagers, das z. B. in Schweden akzeptiert ist (vgl. Kapitel 2.5.1.2 und /25/), den akzeptierten oder zumindest tolerierten Todesfall-Risikowerten aus konventionellen Anlagen gegenübergestellt.

Für die Risiken aus konventionellen technischen Anlagen stehen gesellschaftlich akzeptierte oder zumindest tolerierte Risikogrenzwerte aus den Niederlanden und aus Großbritannien zur Verfügung /87/.

Für Betriebe der chemischen Industrie ist in den Niederlanden ein Individualrisiko von $1{,}0 \cdot 10^{-06}$/a einzuhalten. Gleichzeitig darf das Individualrisiko aller industriellen Anlagen an einem Standort nicht größer werden als $1{,}0 \cdot 10^{-05}$/a.

Für Großbritannien gelten folgende Werte. Für Mitarbeiter der chemischen Industrie wird ein Individualrisiko von $1{,}0 \cdot 10^{-03}$ /a toleriert, für die Öffentlichkeit ein maximales Individualrisiko

von $1{,}0 \cdot 10^{-04}$ /a. Ein weithin akzeptiertes Individualrisiko von $1{,}0 \cdot 10^{-06}$ /a erfordert keine Aktionen zur Risikominimierung mehr.

Für Flughäfen gilt z. B. in den sogenannten Public Safety Zones ein Individualrisiko von $1{,}0 \cdot 10^{-05}$/a /87/.

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es keine festgelegten Risikomanagementstrategien, die Industriebranchen oder andere Einrichtungen mit einem hohen möglichen Schadenspotential unterstützen, risikobasierte Entscheidungen zur Verringerung des Individualrisikos zu treffen /88/. In Branchen ohne festgelegte Risikogrenze wird als Orientierung das Risiko von $1{,}0 \cdot 10^{-05}$ /a vorgeschlagen. Dieser Wert gilt in Ländern mit hohem technischem Standard in vielen Fällen als ein zumutbares Individualrisiko /86/.

5.4 Vergleich der Ergebnisse mit akzeptierten realen Lebensrisiken des Menschen

Einleitend wird den Betrachtungen zu akzeptierten, realen Lebensrisiken des Menschen das altersabhängige mittlere Todesfallrisiko vorangestellt (Tabelle 25), das vom Lebensalter dominiert wird. Diesem quasi natürlichen Risiko überlagern sich die recht unterschiedlichen Berufsrisiken und die Risiken aus individuellen Aktivitäten verschiedenster Art und auch des persönlichen Lebensstils. Diese Zahlen dürfen zur Ermittlung des Gesamtrisikos einer Person mit guter Näherung addiert werden /89/.

Tabelle 25: Mittleres Todesfallrisiko in Abhängigkeit des Lebensalters

Lebensalter	*Durchschnittliche Todesfallrate pro Jahr (über alles)*
25	$1{,}1 \cdot 10^{-03}$
35	$1{,}0 \cdot 10^{-03}$
45	$3{,}0 \cdot 10^{-03}$
55	$8{,}0 \cdot 10^{-03}$
65	$2{,}0 \cdot 10^{-02}$
75	$5{,}0 \cdot 10^{-02}$

Da radiologisch bedingte Gesundheitsschäden i. d. R. mit Krebserkrankungen gleichgesetzt werden, wird hier auch ein allgemeines Todesfallrisiko (über alles) einer tödlich verlaufenden Krebserkrankung angegeben, das $2{,}8 \cdot 10^{-03}$ /a beträgt /89/.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die akzeptierten, realen Risiken im täglichen Leben vorgestellt. Mit Hilfe dieser Zahlen wird aufgezeigt, dass gesellschaftlich akzeptierte Risiken durch Arbeit, Leben, Naturkatastrophen z. T. viel größer sind als das Risiko, in Folge eines Endlagers für radioaktive Abfälle einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden.

In den Unfallstatistiken von Berufsgenossenschaften werden Zahlen zu meldepflichtigen Arbeitsunfällen mit drei oder mehr Krankheitstagen veröffentlicht. Diese Zahlen werden für den

Vergleich nicht herangezogen, weil eine nicht-tödliche Krebserkrankung in Folge eines Endlagers deutlich schwerwiegender zu bewerten ist als z. B. Schnitt-, Platzwunden oder Quetschungen, die in den Zahlen meldepflichtiger Arbeitsunfälle enthalten sind.

Nachfolgende Zahlenwerte beziehen sich deshalb auf das allgemein akzeptierte oder zumindest tolerierte Todesfallrisiko aus Bereichen des täglichen Lebens. Im radiologischen Risiko eines Endlagers sind auch nicht tödlich verlaufende Krankheiten enthalten. Mit dieser Herangehensweise wird das nicht-tödliche und tödliche Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens von $1 \cdot 10^{-06}$ /a in Folge eines Endlagers verglichen mit Zahlenwerten tödlicher Risiken aus unterschiedlichen Bereichen des täglichen Lebens. Somit ist die Gegenüberstellung in Bezug auf das von einem Endlager ausgehende Risiko konservativ bewertet, da die Risikozahlenwerte aus konventionellen Anlagen bzw. dem Lebensumfeld immer das Todesfallrisiko beziffern.

5.4.1 Akzeptierte reale Lebensrisiken: Arbeitsunfälle

In der Unfallstatistik der Berufsgenossenschaft Bergbau sind Zahlenwerte für die Anzahl der tödlich verlaufenden Arbeitsunfälle und der tödlich verlaufenden Wegeunfälle verzeichnet. Wegeunfälle bezeichnen die Unfälle, die auf dem Weg zur Arbeit und von der Arbeit zurück passieren. Sie sind über den Arbeitgeber mit versichert und werden deshalb mit erfasst. Die Zahlenwerte der Unfallstatistik speziell für den Bergbau werden hier dargestellt und sind deshalb von besonderem Interesse, weil es sich bei einem Endlager zumindest in der Betriebsphase auch um ein Bergwerk handelt. So kann das vom Bergbaubetrieb ausgehende Individualrisiko dem vom verschlossenen Endlager ausgehenden Individualrisiko gegenübergestellt werden.

Im Jahre 2003 hat die Bergbau-Berufsgenossenschaft 5,9 neue Renten je 100 Millionen Arbeitsstunden ausgezahlt, die auf tödliche Arbeitsunfälle zurückzuführen sind /90/. In einem Arbeitsjahr werden im Bergbau in Deutschland nicht mehr als 1600 Stunden (eher weniger) pro im Bergbau Beschäftigten gearbeitet. Bezogen auf ein Lebensjahr (Zeitjahr) und einem im Bergbau Beschäftigten beträgt das Risiko eines tödlichen Arbeitsunfalls im Bergbau ca. $1{,}0 \cdot 10^{-04}$ /a. Ebenfalls im Jahre 2003 hat die Bergbau-Berufsgenossenschaft 4,2 neue Renten je 100.000 Versicherte ausgezahlt, die auf tödliche Wegeunfälle zurückzuführen sind /90/. Das Risiko eines tödlichen Wegeunfalls für Beschäftigte im Bergbau beträgt demnach $4{,}2 \cdot 10^{-05}$ /a. Weitere Berufsrisiken sind /89/ entnommen und werden in Tabelle 26 wiedergegeben.

Tabelle 26: Verschiedene Berufsrisiken

Berufsrisiko	*Durchschnittliche Todesfallrate pro Jahr*
Holzfällen, Holztransport	$1{,}0 \cdot 10^{-03}$
Forstbetrieb	$9{,}0 \cdot 10^{-04}$
Bauarbeiter auf Baustellen	$5{,}0 \cdot 10^{-04}$
Chemische Industrie	$1{,}5 \cdot 10^{-04}$
Mechanische Fabrik	$1{,}0 \cdot 10^{-04}$
Bergbau in Deutschland	$1{,}0 \cdot 10^{-04}$
Büroarbeit	$5{,}0 \cdot 10^{-05}$

Dieses Zahlenmaterial der Tabelle 26 stammt mit Ausnahme des Zahlenwertes für den Bergbau /90/ aus einer schweizerischen Quelle /89/. Es ist daher bezüglich seiner Aussagekraft beschränkt auf den westeuropäischen bzw. US-amerikanischen Raum. Gerade bei Staaten mit einem niedrigeren technischen Standard ist die Übertragbarkeit i. d. R. nicht gegeben.

Tabelle 26 zeigt, dass berufsbedingte Risiken um zwei bis drei Größenordnungen höher sind als die in Schweden geltende Akzeptanzgrenze für das Individualrisiko in Folge eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle.

5.4.2 Akzeptierte reale Lebensrisiken: Gesellschaftliches Leben, Lebensgewohnheiten, Mobilität

In der nachfolgenden Tabelle 27 werden die Risiken dargestellt, denen Menschen aufgrund von Lebensgewohnheiten und aufgrund des eigenen gesellschaftlichen Lebens ausgesetzt sind, so z. B. Risiken aus dem häuslichen Umfeld /89/ oder der aktiven Teilnahme am Straßenverkehr /87/. Diese Risiken können individuell zumindest beeinflusst werden. Die Zahl der Selbstmorde wird zum Vergleich angegeben /91/. Sie werden an dieser Stelle den individuell beeinflussbaren Risiken zugeordnet.

Tabelle 27: Individuell beeinflussbare Risiken in Folge Lebensgewohnheiten, dem gesellschaftlichen Leben und Mobilität

Art des Risikos	*Durchschnittliche Todesfallrate pro Jahr*
Zigarettenrauchen (ohne Mengenangabe)	$3{,}6 \cdot 10^{-03}$
Zigarettenrauchen (20 Stück/Tag)	$5{,}0 \cdot 10^{-03}$
Alkoholkonsum (1 Flasche Wein/Tag)	$3{,}0 \cdot 10^{-03}$
Deltafliegen als Hobby	$1{,}0 \cdot 10^{-03}$
Bergwandern	$5{,}0 \cdot 10^{-05}$
Laufen in der Stadt	$2{,}0 \cdot 10^{-05}$
Fahrradfahren	$4{,}0 \cdot 10^{-05}$
10.000 km Autofahren allgemein	$1{,}0 \cdot 10^{-04}$
10.000 km Autobahnfahrt	$3{,}0 \cdot 10^{-05}$

Art des Risikos	*Durchschnittliche Todesfallrate pro Jahr*
Mopedfahren	$2{,}0 \cdot 10^{-04}$
Motorradfahren	$1{,}0 \cdot 10^{-03}$ - $1{,}5 \cdot 10^{-03}$
Verkehrsunfälle, allgemein	$2{,}4 \cdot 10^{-04}$
10.000 km Bahnfahrt	$1{,}0 \cdot 10^{-05}$
Fliegen	$1{,}0 \cdot 10^{-06}$
Tod durch Stromschläge	$5{,}3 \cdot 10^{-06}$
Unfälle im Haus	$1{,}1 \cdot 10^{-04}$
Selbstmorde in Deutschland	$2{,}7 \cdot 10^{-04}$

Einige Zahlenangaben in Tabelle 27 beziehen sich auf die Schweiz /89/, andere sind einer amerikanischen Quelle /92/ entnommen. Das Zahlenmaterial ist daher bezüglich seiner Aussagekraft wiederum beschränkt auf den westeuropäischen bzw. US-amerikanischen Raum gültig.

Tabelle 27 zeigt, dass die Risiken des gesellschaftlichen Lebens, wie z. B. im Haus und im Straßenverkehr sowie durch Lebensgewohnheiten, um ein bis drei Größenordnungen höher sind als die in Schweden geltende Akzeptanzgrenze für das Individualrisiko in Folge eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle.

5.4.3 Unvermeidbare reale Lebensrisiken: Lebensumfeld, Kriminalität, Katastrophen

In der nachfolgenden Tabelle 28 werden die Risiken dargestellt /87/, /92/, die durch das Lebensumfeld selbst bedingt sind und dem sich Menschen nicht oder nur eingeschränkt bewusst entziehen können, z. B. die Risiken aus Kriminalität, Feuer, Naturereignissen (Katastrophen) sowie Nutzung von Gebäuden und Brücken.

Tabelle 28: Nicht beeinflussbare Risiken aus dem Lebensumfeld und durch Katastrophen

Art des Risikos	*Durchschnittliche Todesfallrate pro Jahr*
Kriminalität (Mord/Totschlag)	$1{,}0 \cdot 10^{-04}$
Feuer in Gebäuden	$1{,}0 \cdot 10^{-05}$ - $1{,}4 \cdot 10^{-05}$
Bienenstich	$2{,}0 \cdot 10^{-07}$
Blitzschlag (Gewitter)	$1{,}0 \cdot 10^{-06}$ - $5{,}0 \cdot 10^{-07}$
Erdbeben (Kalifornien)	$2{,}0 \cdot 10^{-06}$
Staudammversagen	$1{,}0 \cdot 10^{-07}$
Einsturz von:	***Eintrittswahrscheinlichkeit pro Jahr***
Gebäuden*	$1{,}0 \cdot 10^{-06}$
Brücken*	$1{,}0 \cdot 10^{-04}$

* Zahlenwerte für ältere Bauwerke, die vor Einführung risikobasierter Regelwerke errichtet wurden /93/

Einige Zahlenangaben in Tabelle 28 beziehen sich auf die Schweiz, andere sind einer amerikanischen Quelle entnommen. Das Zahlenmaterial ist daher bezüglich seiner Aussagekraft beschränkt auf den westeuropäischen bzw. US-amerikanischen Raum gültig.

Tabelle 28 zeigt, dass Risiken durch das Lebensumfeld, dem Personen sich kaum entziehen können, teilweise um bis zu zwei Größenordnungen höher sind als die in Schweden geltende Akzeptanzgrenze für das Individualrisiko in Folge eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle.

5.5 Zusammenfassung und Bewertung des Vergleichs der Ergebnisse mit akzeptierten realen Lebensrisiken des Menschen

Anhand der veröffentlichten Zahlen zu Individualrisiken aus konventionellen (Industrie-)Anlagen (chemische Industrie, Flughafen), im Beruf, im täglichen Leben (Lebensgewohnheiten, Mobilität) und im nicht aktiv beeinflussbaren Lebensumfeld (Kriminalität, Katastrophen) konnte gezeigt werden, dass die einzuhaltende Akzeptanzgrenze für das Individualrisiko von $1{,}0 \cdot 10^{-06}$ 1/a, einen radiologisch verursachten Gesundheitsschaden aus einem Endlager für radioaktive Abfälle zu erleiden, um mindestens ein bis drei Größenordnungen (d. h. um den Faktor 10 bis 1000) geringer ist als das Todesfallrisiko aus einem der genannten Bereiche.

Trotz der höheren Risiken aus allen Bereichen des täglichen Lebens werden diese scheinbar bewusst akzeptiert und sogar im Falle von Sport (Extremsport) oder Konsum (Tabak, Alkohol) freiwillig eingegangen. Es liegt demnach eine unterschiedliche individuelle Bewertung der Risiken vor. Es gibt also Risiken, die gesellschaftlich akzeptiert werden, und solche, die gesellschaftlich nicht akzeptiert werden. Allgemeingültige Akzeptanzkriterien für Risiken können nur selten angegeben werden. Vielmehr ist eine Unterscheidung vorzunehmen, ob das jeweilige Risiko freiwillig eingegangen wird (z. B. Extrem-Sportarten, Tabakgenuss, Alkoholgenuss), ob es ein berufliches Risiko ist oder eins, das von außen und dementsprechend durch den Einzelnen nicht beeinflussbar auferlegt wurde /88/.

Ein weiterer Aspekt bei der Akzeptanz ist die mögliche Auswirkung eines Schadensereignisses. Obwohl 10 Schadensereignisse pro Jahr mit je einem Todesopfer im Rahmen einer Risikobewertung genau so zu bewerten sind wie ein Schadensereignis pro Jahr mit 10 Todesopfern, wird das Schadensereignis mit den 10 Toten subjektiv als höheres Risiko bewertet. Abbildung 59 zeigt ein Risiko-Diagramm mit den Bereichen von akzeptierten und nicht akzeptierten Risiken in Abhängigkeit der Schadensauswirkung.

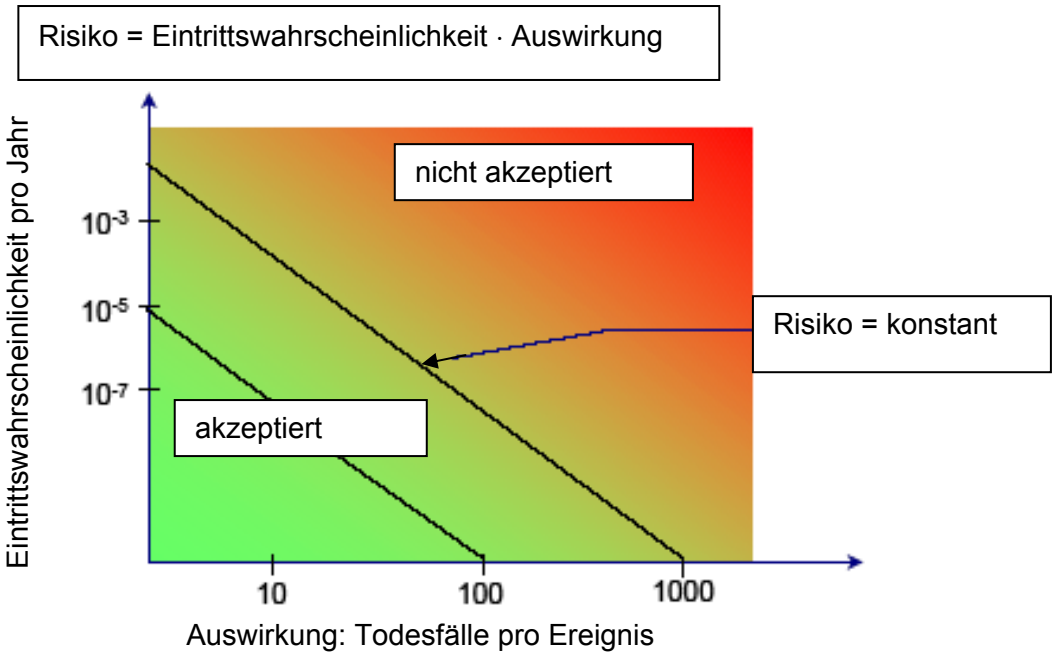


Abbildung 59: Risiko-Diagramm mit Angabe der Bereiche des akzeptierten und nicht akzeptierten Risikos /88/

Obwohl die Wahrscheinlichkeit, einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden aufgrund eines Endlagers zu erleiden, sehr gering ist und auch die potenzielle Zahl (Rechenwert) von Todesfällen so gering ist, dass sie sogar gegenüber der Zahl von potenziellen Todesfällen in Folge der natürlichen, radioaktiven Hintergrundstrahlung, klein ist, wird die Endlagerung radioaktiver Abfälle in weiten Teilen der Gesellschaft subjektiv als stark risikobehaftet empfunden. Es ist zu vermuten, dass dafür die gleichen Gründe gelten, die auch sämtliche Aktivitäten in Zusammenhang mit der Nutzung von Kernenergie subjektiv als riskant erscheinen lassen. Dies hat mehrere Ursachen /93/:

- Sachverhalte, die für das menschliche Verständnis nur schwer nachzuvollziehen und zu begreifen sind, werden oft als Unsicherheit wahrgenommen. Das Phänomen Radioaktivität und die Auswirkungen der bei Atombombenexplosionen freigesetzten Energiemenge werden natürlich im Zusammenhang mit der Kernenergienutzung gesehen und daraus eine Unsicherheit bzw. Ängste abgeleitet /93/.
- Das Urteilsvermögen von Einzelpersonen ist oftmals bei technisch komplexen Zusammenhängen überfordert. Daher wird der Rat von Experten gesucht. Gerade aber die Uneinigkeit der Expertenmeinung bei Fragestellungen um die Nutzung der Kernenergie und die Entsorgung radioaktiver Abfälle hat zu einem mangelnden Vertrauen in die Fachleute und daraus folgend zu einer Ablehnung geführt, weil der Einzelne in seiner Urteilskraft überfordert ist /93/.
- Aufgrund der hohen Sicherungsmaßnahmen kerntechnischer Anlagen wird irrtümlich davon ausgegangen, dass von diesen Anlagen auch automatisch ein großes Gefahrenpotential ausgeht, weil sie so aufwendig gesichert werden. Das Gegenteil ist der Fall, denn kerntechnische Anlagen werden vor störenden Aktivitäten aus der Gesellschaft geschützt und nicht die Gesellschaft vor den Anlagen /93/.

Diese psychologischen Aspekte bei der Bewertung des Risikos von kerntechnischen Anlagen führen zu einer kontroversen Diskussion der Endlagerung radioaktiver Abfälle, die in vielen Fällen mit einer strikten Ablehnung einhergeht. Aber selbst ein Aufgreifen der Zweifel und Ängste in der Gesellschaft führt nicht immer zu dem Ziel, dass Bedenken ausgeräumt werden können. Vielmehr ist festzustellen, dass in weiten Teilen Menschen an einer Überzeugung auch dann noch festhalten, wenn diese widerlegt werden kann. Ängste und Bedenken werden also nicht ausgeräumt, sondern es kommt zu einer Spannung zwischen eigener Überzeugung und Realität. Um diese innere Spannung zu vermeiden, versucht der Betroffene häufig die Realität zu ignorieren /93/.

Neben den o. g. psychologischen Aspekten sollte auch eine oft unsachliche und bewusst auf Emotionen angelegte Informationspolitik genannt werden, die das subjektive Risikoempfinden beeinflusst und zu einer Verunsicherung in weiten Teilen der Bevölkerung führt und damit nicht gerade zur Lösung der Endlagerfrage beiträgt.

Die zuvor beschriebenen Betrachtungen tragen dazu bei, die Diskrepanz zwischen höheren und offenbar akzeptierten Risiken aus konventionellen Anlagen und vor allem auch aus den eigenen Lebensgewohnheiten und dem sehr niedrigen und trotzdem gesellschaftlich nicht akzeptierten Risiko für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zu erklären, wobei offen ist, wie dieses Problem gelöst werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst, wobei wesentliche Ergebnisse in anderer Reihenfolge dargestellt sind. Während der Aufbau des Berichts sich an der in der Einleitung genannten Gliederung orientiert, zeigt sich im Ergebnis der Bearbeitung des FuE-Vorhabens, dass die ursprünglich unabhängig voneinander behandelten Aspekte „Barrieren in Langzeitsicherheitsanalyse“ und „funktionsbezogene Nachweisführung von Barrieren“ methodisch auf einheitliche Grundlage gestellt werden können. Damit bietet sich eine vereinheitlichte Darstellung an, die mit technischen Beschreibungen beginnt, an die sich Ausführungen zur funktionsbezogenen Nachweisführung einzelner Barrieren als sicherheitstechnische Komponenten anschließen. Diese einzelnen Barrieren bilden das Mehrbarrierensystem, das im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse bewertet wird. Im Kontext der vorgenommenen Vereinheitlichung der Bewertungsgrundlage für die Sicherheit eines HAW/SF-Endlagers ergibt sich als zwangsläufige Folge die Diskussion des geeigneten Bewertungsmaßstabes „Dosis“ bzw. „Risiko“. Da diese Diskussion derzeit auch im politischen Raum geführt wird, werden aktuelle Entwicklungen und Erkenntnisse, die im Zeitraum der Bearbeitung des FuE-Vorhabens noch nicht vorlagen, kurz mit angesprochen. Eine Gegenüberstellung der vom Endlager ausgehenden hypothetischen Risiken und gesellschaftlich akzeptierten Risiken runden die Zusammenfassung inhaltlich ab. Offene Fragestellungen, die sich aus dem FuE-Vorhaben vordringlich ergeben, werden aufgeführt und abschließend ein Ausblick auf mögliche zukünftige Vorteile einer Weiterentwicklung der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise gegeben.

Für die Endlagerkonzepte und die zugehörigen Verschlusskonzepte in den Wirtsgesteinen Granit und Ton wurden die Mehrbarrierensysteme beschrieben. Unabhängig von der Wahl des Wirtsgesteins in den verschiedenen Endlagerkonzepten ist ein Mehrbarrierensystem aus technischen, geotechnischen und natürlichen Barrieren vorgesehen, die z. T. in Reihe und z. T. parallel angeordnet sind. Die einzelnen Barrieren haben unterschiedliche Funktionen und beruhen deshalb auf unterschiedlichen Wirkungsmechanismen. Dabei ist festzustellen, dass die einzelnen Barrieren auch nach teilweisem oder vollständigem Verlust ihrer ursprünglichen Funktion, meist der Dichtfunktion, noch zur Radionuklidrückhaltung beitragen können. Bei vollständigem Verlust der Dichtfunktion geschieht dies vorzugsweise durch Gewährleistung reduzierender Umgebungsbedingungen und damit Absenkung der Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide oder durch Sorptionswirkung. Bei nur teilweisem Verlust der Dichtfunktiobn ist weiterhin nur eine begrenzte Durchströmbarkeit der Barriere vorhanden. So ist zu jedem Zeitpunkt ein Mehrbarrierensystem vorhanden, sowohl bei ungestörter als auch bei gestörter Endlagerentwicklung.

Am Beispiel des KBS-3-Konzeptes im Wirtsgestein Granit (Schweden) und des Projektes Opalinuston (Schweiz) im Tongestein wurden die die Sicherheit bestimmenden Barrieren für die ungestörte und die gestörte Entwicklung des Endlagers auf qualitativer Basis identifiziert. Aus den qualitativen Betrachtungen wird deutlich, dass die sicherheitsbestimmenden Barrieren beim Konzept der Endlagerung in kristallinen Granitgesteinen der Behälter und der Bentonitpuffer und im Tongestein die Verschlüsse und das Wirtsgestein sind. Dabei ist bemerkenswert, dass in Bezug auf die Radionuklidfreisetzung i. d. R. gleichzeitig nur zwei in Reihe angeordnete Barrieren maßgeblich aktiv sind. Dies gilt auch im Fall einer gestörten

Entwicklung. Die anderen Barrieren sind zwar vorhanden, gemäß den durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen sind sie jedoch von jeweils untergeordneter Bedeutung, da ihre Barrierefunktion gar nicht zum Tragen kommt oder von ihr kein Kredit genommen wird. Sie werden häufig mit konservativen, pauschalen Ansätzen behandelt.

Es wurde ein Konzept für den Funktionsnachweis von Einzelbarrieren ermittelt. Für die Auslegung bzw. zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Barrieren eines Endlagers wurde die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte exemplarisch angewendet. Sie ist für das Bauwesen Stand der Technik und im Regelwerk der Eurocodes (EN 1990 bis EN 1999) auf europäischer Ebene vereinheitlicht. Den Eurocodes liegt ein semiprobabilistisches, zuverlässigkeitsorientiertes Sicherheitsnachweiskonzept zu Grunde, das auf einem Risikoansatz basiert. Als Maß für das von einem Bauwerksversagen ausgehende Risiko wird primär der Verlust seiner Sicherheitsfunktion herangezogen.

Wird der Nachweis der Sicherheitsfunktion mit Hilfe der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte analog zu den Eurocodes geführt, wird eine obere Schranke für den vorzeitigen Verlust der Sicherheitsfunktion (Versagenswahrscheinlichkeit) von 10^{-04} bezogen auf die Lebensdauer des Bauwerkes erreicht. Diese Ansätze werden auch für Barrierebauwerke zum Schutz vor umweltgefährdenden Flüssigkeiten verwendet und hier auf die Barrieren eines Mehrbarrierensystems in einem HAW/SF-Endlager übertragen. Für jede einzelne Barriere ist der Nachweis gegen Versagen, d.h. den Verlust ihrer Funktionsfähigkeit, zu führen.

An Hand der Beispiele Kupferbehälter im Granit, Schachtverschluss im Ton und Streckenverschluss im Salz erfolgte der Nachweis Funktionsfähigkeit und damit die Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus.

Als erstes Beispiel wurde der Kupferbehälter im KBS-3-Konzept im Wirtsgestein Granit (Schweden) betrachtet.

Unter Zuhilfenahme der von der SKB veröffentlichten Daten zum KBS-3-Behälterkonzept wurden die Herstellungsprozesse des Behälters und die Prüfverfahren der Schweißnähte vorgestellt. Da Schweißverbindungen nicht vollkommen fehlerfrei herzustellen sind, muss die Prüfung der Schweißnaht mit geeigneten Verfahren eine möglichst hohe Fehlererkennung aufweisen. Mit Prüfverfahren auf Basis von Ultraschallwellen liegen ausreichend Erfahrungen vor, so dass Defekte in Schweißnähten, die oberhalb der geforderten Toleranz liegen, nur mit einer Wahrscheinlichkeit von bis zu $3{,}6 \cdot 10^{-04}$ nicht erkannt werden. Es ist davon auszugehen, dass es mit zunehmender Erfahrung im Produktionsprozess und bei entsprechender Optimierung der Prüfverfahren sowie unter Berücksichtigung dessen, dass nur ein geringer Teil der Behälter relevante Mängel aufweist, möglich ist, das übliche Zuverlässigkeitsniveau des Eurocodes mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von $< 1 \cdot 10^{-04}$ bezogen auf den Einzelbehälter zu erreichen.

Die anforderungsgerechte Herstellung des Behälters verbunden mit dem Nachweis der Dichtheit (Beschränkung möglicher Fehlstellen bzw. Initialdefekte) ist Voraussetzung für die Nachweise der Tragfähigkeit und der Beständigkeit, die dann als führbar eingeschätzt werden. Der Nachweis der anforderungsgerechten Herstellung ist deshalb systembestimmend.

Für das zweite Beispiel, ein Schachtverschluss im Tongestein, wurde zuerst ein generischer Schachtverschluss entwickelt, da für die Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus die veröffentlichten Datengrundlagen zu den jeweils einzelnen Endlagerkonzepten in Frankreich, der Schweiz und Belgien nicht ausreichten. Da weiterhin Schätzungen vorgenommen werden mussten, ist die quantitative Aussage zum erreichbaren Zuverlässigkeitsniveau für den Schachtverschluss im Tongestein nur im Rahmen der getroffenen Annahmen gültig. Die für das in Kapitel 4.3.3 beschriebene Beispiel angewendete Vorgehensweise zum Nachweis des Zuverlässigkeitsniveaus für den Schachtverschluss entspricht jedoch dem Stand der Technik und kann bei Vorliegen der erforderlichen Datengrundlage angepasst werden.

Unter Verwendung der Datenbasis für den generischen Schachtverschluss im Tongestein konnte plausibel dargelegt werden, dass für das Element Schottersäule (Widerlager) der Nachweis der Verformungsbeschränkung sowie für die Elemente Dichtelement und Kontaktzone die Nachweise des geforderten hydraulischen Widerstandes hinreichend zuverlässig geführt werden können. Für die (ehemalige) Auflockerungszone im Tongestein reicht die vorliegende Datenbasis dazu nicht aus, wobei nach derzeitigem Kenntnisstand der Nachweis der Rissbeschränkung in gleicher Weise systembestimmend ist wie der Nachweis des hydraulischen Widerstandes.

Als drittes und letztes Beispiel wird zum Vergleich und als Ergänzung die Nachweisführung für einen generischen Streckenverschluss im Salz dargestellt.

Unter Verwendung der Datenbasis für einen generischen Streckenverschluss im Salzgestein konnte plausibel dargelegt werden, dass für die Elemente Baukörper und Kontaktzone die Nachweise des geforderten hydraulischen Widerstandes zuverlässig geführt werden können, unter der Voraussetzung, dass auch die (ehemalige) Auflockerungszone im umgebenden Steinsalz eine hinreichend geringe Permeabilität aufweist. Dass eine so geringe Permeabilität prinzipiell erreichbar ist, zeigen vorgenommene in situ Untersuchungen. Für den die Permeabilität der (ehemaligen) Auflockerungszone bestimmenden Nachweis der Rissbeschränkung sind standortspezifische bzw. lokationsspezifische Einwirkungen und Einflüsse maßgebend, dementsprechend hängt das nachweisbare Zuverlässigkeitsniveau nach aktuellem Kenntnisstand von standortspezifischen und lokationsspezifischen Gegebenheiten ab.

Der Nachweis der Dauerhaftigkeit/Beständigkeit hängt von der geforderten Lebensdauer (Nachweiszeitraum) des Streckenverschlusses ab, ist aber prinzipiell führbar. Weiterhin wird er vom Nachweis der Rissbeschränkung in der (ehemaligen) Auflockerungszone mit beeinflusst, in welchem Umfang, kann auf Grundlage der veröffentlichten Datenbasis derzeit nicht abgeschätzt werden.

Für alle drei Beispiele ist festzustellen, dass dem Nachweis der Rissbeschränkung für die Funktionsfähigkeit der einzelnen Barrieren zu den systembestimmenden Nachweisen gehört, obwohl ihm bisher im Rahmen der durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen wenig Bedeutung beigemessen wurde. Setzt man die möglichen Fehlstellen bzw. Initialdefekte in der Schweißnaht des Kupferbehälters Rissen gleich, ergibt sich für die drei ausgewählten Beispiele der Einzelbarrieren Kupferbehälter für ein Endlager im Granitgestein,

Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein und Streckenverschluss für ein Endlager im Salzgestein trotz ihres unterschiedlichen Aufbaus, dass genau dieser Nachweis die Grundlage für den Nachweis der Dichtheit bzw. des ausreichenden hydraulischen Widerstandes und ggf. der Beständigkeit bildet.

Diese Aussagen treffen insbesondere auf die (ehemaligen) Auflockerungszonen des Schachtverschlusses im Tongestein und des Streckenverschlusses im Salzgestein zu. In Bezug auf den Kupferbehälter im Granit wurde mit der Entwicklung geeigneter Prüfverfahren für die Schweißnaht bereits auf diesen Sachverhalt reagiert.

In diesem Zusammenhang soll darauf hingewiesen werden, dass ein wichtiger Aspekt bei der zuverlässigkeitsorientierten Betrachtung in Bezug auf die Nachweisführung der Barrierefunktion die Güte der Daten und der Datenermittlung ist. Bezug nehmend auf die Aussagen bzgl. des Zuverlässigkeitsniveaus der Versuchsdaten lässt sich feststellen, dass das Zuverlässigkeitsniveau sehr unterschiedlich ist. So ist z. T. eine große und belastbare Datenbasis vorhanden, z. T. liegen nur exemplarische Werte vor. Dieser Sachverhalt wird durch die vorgenommenen Nachweisführungen offensichtlich.

Die drei Beispiele zeigen, dass die zuverlässigkeitsorientierte Nachweisführung gemäß Eurocodes für die einzelnen Barrieren des Mehrbarrierensystems eines HAW/SF-Endlagers in der Praxis umgesetzt werden kann. Damit beschreibt das nachweisbare Zuverlässigkeitsniveau, mit dem ein vorzeitiges Versagen einer Barriere ausgeschlossen werden kann, genau das Zuverlässigkeitsniveau mit dem erhöhte Lösungszutritts- bzw. Radionuklidtransportraten durch diese Barriere ausgeschlossen werden können.

Existiert nun neben einer ersten „Hauptbarriere“ eine zweite Barriere und wird diese ebenfalls mit der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte für ein entsprechendes Zuverlässigkeitsniveau ausgelegt, so gilt für den vorzeitigen Verlust der Funktionsfähigkeit der Zahlenwert 10^{-04} als obere Schranke. Werden also zwei unabhängig voneinander wirkende redundante Barrieren mit dem Instrumentarium des Eurocodes nachgewiesen, so ergibt sich als Wahrscheinlichkeit für vorzeitiges Versagen des Zweibarrierensystems das Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Einzelbarrieren zu 10^{-08}.

Im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager werden Entwicklungen mit derart geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten als nicht relevant angesehen und nicht mehr betrachtet. Die Handhabe, die das jeweilige nationale Regelwerk dazu bietet, ist dabei unterschiedlich. Für das Endlager WIPP in den USA sind Ereignisse bzw. Entwicklungen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner 1:10.000, d.h. 10^{-4} bezogen auf den Betrachtungszeitraum, nicht mehr zu berücksichtigen. In Schweden gilt ein oberer Risikorichtwert von 10^{-6}/a als Akzeptanzgrenze. Es ist offensichtlich, dass Entwicklungen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 10^{-8} bezogen auf die Lebensdauer von Barrierebauwerken nur zu erheblich kleineren Individualrisiken führen können.

In Deutschland wurde diese Frage bei der Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen [BMU 2009] an ein HAW/SF-Endlager intensiv und teilweise kontrovers diskutiert. Dies fand seinen Ausdruck in der mehrfachen Neufassung der Definition der noch zu betrachtenden

geringwahrscheinlichen Entwicklungen und der nicht mehr zu betrachtenden äußerst geringwahrscheinlichen (unwahrscheinlichen) Entwicklungen bzw. der Abgrenzung zwischen beiden. In der vorläufig letzten Fassung vom Juli 2009 wird „das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten“ den nicht mehr zu betrachtenden unwahrscheinlichen Entwicklungen zugeordnet [BMU 2009].

In Übereinstimmung mit der o. a. Aussage in den Sicherheitsanforderungen konkretisiert das Zuverlässigkeitsniveau, mit dem ein vorzeitiges Versagen des Mehrbarrierensystems ausgeschlossen werden kann, das nachweisbare Zuverlässigkeitsniveau mit dem erhöhte Radionuklidfreisetzungen aus einem HAW/SF-Endlager ausgeschlossen werden können. Das Zuverlässigkeitsniveau des Mehrbarrierensystems beschreibt somit die Zuverlässigkeit seiner Sicherheitsfunktion oder komplementär die Geringfügigkeit des Risikos des Verlusts seiner Sicherheitsfunktion.

In einem weiteren Schritt wurde der zuverlässigkeitsorientierte methodische Ansatz zur Beschreibung des Barriereversagens unter Verwendung der in den Langzeitsicherheitsanalysen konservativ ermittelten Freisetzungsraten von Radionukliden (Dosisraten) und der vereinheitlichten Bezugsbasis Risiko zur Ermittlung oberer Schranken für das von einem Endlager ausgehende individuelle Risiko benutzt. Dazu wurden die abgeleiteten Wahrscheinlichkeitsschranken für das Versagen der Funktionsfähigkeit einer Barriere bzw. eines Mehrbarrierensystems verwendet. Welche Anforderungen jedoch an Funktionsfähigkeit des Mehrbarrierensystems in Bezug auf die Beschränkung des Radionuklidtransports zu stellen sind, ergibt sich aus den regulativen Vorgaben einzelner Länder zu radiologischen Schutzzielen.

In Bezug auf die einzuhaltenden radiologischen Schutzziele gelten in Deutschland derzeit die Vorgaben des § 47 der Strahlenschutzverordnung. Gemäß Strahlenschutzverordnung ist eine obere Grenze für die Individualdosis von 0,3 mSv/a festgesetzt. In der Schweiz wird ein Dosisgrenzwert von 0,1 mSv/a verwendet. Im Zuge der Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen [GRS-A3110, 2003] an ein HAW/SF-Endlager wurde zunächst eine Absenkung auf 0,1 mSv/a für wahrscheinliche und 1 mSv/a für gering wahrscheinliche Entwicklungen diskutiert. In der vorläufig letzten Fassung wurden radiologische Lebenszeitrisiken von 10^{-4} bzw. 10^{-3} angegeben, die 0,015 mSv/a bzw. 0,15 mSv/a entsprechen [BMU 2009]. In Schweden ist der Dosisgrenzwert auf Grundlage des individuellen Risikos von 10^{-05}/a, einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden, zu 0,15 mSv/a festgelegt. Der niedrigere Risikorichtwert von 10^{-06}/a gilt in Schweden als Akzeptanzgrenze. Die regulativen Festlegungen in Schweden zeigen, dass äquivalent zur Betrachtung der Individualdosis eine Risikobetrachtung in gleicher Weise möglich und regulativ umsetzbar ist, wenn das individuelle Risiko einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden zu erleiden mit der Individualdosis verknüpft wird.

Zur Ermittlung des der Individualdosis äquvalenten individuellen Risikos wird eine lineare Dosis-Wirkungsbeziehung unter Verwendung des von der ICRP empfohlenen Risikokoeffizienten angesetzt. Mit Hilfe dieser Beziehung lässt sich auf Grundlage der meist sehr konservativen Prognose der freigesetzten Dosis ebenso konservativ das individuelle Risiko ermitteln, das sich bei der als wahrscheinlich anzusehenden, ungestörten Entwicklung des

Endlagers bzw. anforderungsgerechter Funktionsfähigkeit des Mehrbarrierensystems ergibt. Bei gestörter Entwicklung bzw. eingeschränkter Funktionsfähigkeit des Mehrbarrierensystems, die grundsätzlich nicht als wahrscheinlich anzusetzen ist, wird bei der Ermittlung des individuellen Risikos nicht nur die Dosis berücksichtigt sondern auch die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens. Auf dieser Basis ist eine gesamtheitliche Bewertung der Auswirkungen eines Endlagers möglich und es wird einerseits verhindert, dass das abgeschätzte individuelle Risiko nicht von wenig wahrscheinlichen Szenarien mit möglicherweise hohen Freisetzungen bestimmt wird, andererseits, dass keine Optimierung des Endlagerkonzeptes und seines Mehrbarrierensystems in Bezug auf wenig wahrscheinliche Szenarien erfolgt, möglicherweise unter unbeabsichtigter Inkaufnahme – weil nur die Individualdosis betrachtet wird - höherer Individualrisiken aus der wahrscheinlichen, ungestörten Entwicklung.

Auf Grundlage des Ansatzes zum Funktionsnachweis von Barrieren entsprechend dem Sicherheitskonzept der Eurocodes und der Dosis-Wirkungsbeziehung nach ICRP wurden Zahlenwerte für das individuelle Risiko abgeschätzt, da es mittels des Risikoansatzes möglich ist, die Wahrscheinlichkeit, dass eine Barriere ihre Funktion nicht erfüllt, zu verknüpfen mit der Dosis, die sich in diesem Fall in Folge der freigesetzten Radionuklide ergibt, und so diesen Sachverhalt auf die einheitliche Bewertungsbasis Risiko zu beziehen. Auf Grundlage veröffentlichter Dosisraten aus Langzeitsicherheitsanalysen wurden so für die Beispiele KBS-3-Konzept im Wirtsgestein Granit (Schweden) und für das Opalinuston-Projekt (Schweiz) obere Schranken für das jeweilige vom Endlager ausgehende hypothetische Risiko ermittelt und um ältere Werte zu Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Salz (Deutschland) ergänzt.

Aus diesen Untersuchungen wird deutlich, dass das Risiko eines radiologisch bedingten Gesundheitsschadens in Folge eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle bzw. ausgediente Brennelemente sehr gering ist. Das relativ größte Risiko ergibt sich durch den menschlichen Eingriff in das Endlager, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit aber nicht prognostizierbar ist. Hohe Werte ergeben sich rechnerisch (ebenfalls ohne Berücksichtigung der nicht sinnvoll zu quantifizierenden Eintrittswahrscheinlichkeit) im schweizerischen Opalinuston-Projekt auch für What-if-Szenarien, die in Bezug auf den Freisetzungspfad dem menschlichen Eingriff ähnlich sind. Für das KBS-3-Konzept ist die sich später ausbildende Biosphäre von Bedeutung.

Die Bezugsbasis Risiko erlaubt den Vergleich des von einem Endlager ausgehenden Risikos mit anderen, gesellschaftlich akzeptierten Risiken.

Dazu wurden die ermittelten Risikoschranken mit akzeptierten Schranken für das Risiko aus konventionellen technischen Anlagen verglichen und weiterhin den realen Lebensrisiken des Menschen gegenübergestellt.

Anhand der veröffentlichten Zahlen zu Individualrisiken aus konventionellen (Industrie-)Anlagen (chemische Industrie, Flughafen), im Beruf, im täglichen Leben (Lebensgewohnheiten, Mobilität) und im nicht aktiv beeinflussbaren Lebensumfeld (Kriminalität, Katastrophen) konnte gezeigt werden, dass die z. B. in Schweden einzuhaltende Akzeptanzgrenze für das Individualrisiko von $1{,}0 \cdot 10^{-06}$ /a, einen radiologisch verursachten

Gesundheitsschaden aus einem Endlager für radioaktive Abfälle zu erleiden, um mindestens ein bis drei Größenordnungen (d. h. um den Faktor 10 bis 1000) geringer ist als das Todesfallrisiko aus einem der genannten Bereiche.

Trotz der höheren Risiken aus allen Bereichen des täglichen Lebens werden diese scheinbar bewusst akzeptiert und sogar im Falle von Sport (Extremsport) oder Konsum (Tabak, Alkohol) freiwillig eingegangen. Es liegt demnach eine unterschiedliche individuelle Bewertung der Risiken vor. Es gibt also Risiken, die (gesellschaftlich) akzeptiert werden, und solche, die nicht (gesellschaftlich) akzeptiert werden. Jedoch steigt die (individuelle) Akzeptanz offensichtlich, wenn das jeweilige Risiko freiwillig eingegangen wird. Ein weiterer Aspekt bei der Akzeptanz ist die mögliche Auswirkung eines Schadensereignisses. Obwohl 10 Schadensereignisse pro Jahr mit je einem Todesopfer im Rahmen einer Risikobewertung genau so zu bewerten sind wie ein Schadensereignis pro Jahr mit 10 Todesopfern, wird das Schadensereignis mit den 10 Toten subjektiv als höheres Risiko bewertet.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Endlagerung radioaktiver Abfälle in weiten Teilen der Gesellschaft subjektiv als stark risikobehaftet empfunden wird, obwohl die Wahrscheinlichkeit, einen radiologisch bedingten Gesundheitsschaden wegen eines Endlagers zu erleiden, sehr gering ist und auch die potenzielle Zahl (Rechenwert) von Todesfällen gegenüber der in Folge üblicher Lebensrisiken sehr klein ist. Mögliche Gründe dafür sind aufgeführt.

Zur Vervollständigung der im Rahmen dieses FuE-Vorhabens exemplarisch durchgeführten Nachweisführungen auf vereinheitlichter Grundlage sollten folgende offene Fragestellungen vordringlich bearbeitet werden:

Aus praktischer Sicht sollte geprüft werden, ob eine Nachweisführung gemäß Stand der Technik für einzelne Barrieren, wie hier beispielhaft vorgenommen, durchgehend möglich ist. So können wichtige nachweisrelevante Daten, die fehlen, einfach festgestellt werden. Diese sind dann zwingend zu ermitteln, da ohne ihre Kenntnis die Nachweisführung schon nach dem Stand der Technik nicht gelingt. Dies betrifft insbesondere Daten zu Kontakt- bzw. Konturzonen. Dabei ist zu beachten, dass nach Stand der Technik Anforderungen an die Güte der Datenermittlung bestehen.

Aus methodischer Sicht ist die Herstellung einer Basis für eine vereinheitlichte Betrachtung von endlagerelevanten Nachweiszeiträumen/Bezugszeiträumen und Bezugszeiträumen nach Eurocode von hoher Bedeutung. Während für die Umrechnung von Bezugszeiträumen „wenige Jahre“ auf „mehrere Dekaden“ in den Eurocodes bereits Regelungen existieren, liegen für endlagerelevante Bezugszeiträume mangels allgemeinen Interesses keine Ansätze vor. Das Fehlen bedeutet nicht, dass solche Ansätze nicht möglich sind, sondern dass einfach eine entsprechende Übertragung bisher nicht vorgenommen wurde.

Weiterhin steht eine systematische Übertragung des zuverlässigkeitsorientierten Ansatzes auf Endlagerfragestellungen aus. Während ein möglicher Funktionsverlust von Bauwerken (Barrieren) auf Basis risikobasierter Ansätze europaweit vereinheitlicht ist, wird in Bezug auf Endlager durch die Verwendung von Dosisraten ein, auch für die technisch interessierte

Fachöffentlichkeit, der bekannt ist, dass keine absolute sondern nur relative Sicherheit möglich ist, wenig transparenter Maßstab zur Sicherheitsbewertung verwendet.

Die Bearbeitung dieser Fragestellungen in Verbindung mit der Anwendung des zuverlässigkeitsorientierten Sicherheitsnachweiskonzeptes nach Eurocodes und Nutzung der Dosis-Wirkungsbeziehung nach ICRP zur Integration der Ergebnisse der Radionuklidtransportmodellierungen der Langzeitsicherheitsanalyse würde zu einer systematischen, vereinheitlichten Grundlage für die

- Behandung von Ungewissheiten (Unsicherheiten)
- Klassifikation von Szenarien (Bemessungsituationen mit relevanten Einwirkungskombinationen)

für ein HAW/SF-Endlager und das seine Sicherheit garantierende Mehrbarrierensystem führen. Eine konsistente Behandlung der Sicherheitsanforderungen durch die im Entwurf der Sicherheitskriterien [GRS-A-3110, 2003] angesprochenen verschiedenen Ebenen von der technischen bis zur regulativen Ebene wäre möglich. Bei dieser Vorgehensweise ließen sich Widersprüche zwischen den nationalen, regulativen Vorgaben und dem europäischen technischen Regelwerk weitgehend vermeiden, ein Sachverhalt, der bei der praktischen Umsetzung, d.h. dem Bau eines Endlagers, genehmigungsrechtlich von hoher Bedeutung ist [DBETEC, PAMINA, 2007].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau eines Schachtverschlusses eines Endlagers im Tongestein /6/	18
Abbildung 2:	Aufbau eines Streckenverschlusses eines Endlagers im Tongestein /6/	20
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des skandinavischen Behälter- und Einlagerungskonzepts /12/	22
Abbildung 4:	Belgisches Behälterkonzept für hochradioaktive Abfälle, Querschnitt /20/	26
Abbildung 5:	Belgisches Behälterkonzept für hochradioaktive Abfälle, Längsschnitt /20/	27
Abbildung 6:	Französische ILW Behälter zusammengefasst in einem Container (links) und einheitliche HAW-Behälter (rechts) /21/	27
Abbildung 7:	Streckenlagerung von Abfallgebinden im schweizerischen Konzept /22/	29
Abbildung 8:	Schritte der Szenarienanalyse (rechts) und Bewertung durch die Konsequenzenanalyse (links) im schweizerischen Nachweiskonzept /5/	32
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Basisszenarien für die ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Granit (Schweden) /25/	34
Abbildung 10:	Darstellung des Einfluss(bereich)es möglicher Abweichungen vom Basisszenario bezogen auf das Endlagersystem /32/	52
Abbildung 11:	Zeitmaßstab der Wirksamkeit von Barrieren im Endlagerkonzept der NAGRA /32/	64
Abbildung 12:	Wirksamkeit der Barrieren im KBS-3-Konzept im Granit bei ungestörten Barrierefunktionen (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)	66
Abbildung 13:	Wirksamkeit der Barrieren im KBS-3-Konzept im Granit bei gestörter Barrierefunktion des Behälters (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)	66
Abbildung 14:	Wirksamkeit der Barrieren im Opalinuston-Projekt im Tongestein bei ungestörten Barrierefunktionen (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)	67
Abbildung 15:	Wirksamkeit der Barrieren im Opalinuston-Projekt im Ton bei der gestörten Barrierefunktion „vorzeitiges Behälterversagen“ (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)	68
Abbildung 16:	Gegenüberstellung des Zeitpunktes des Behälterversagens mit der maximalen Dosis (oben) und dem Zeitpunkt ihres Auftretens (unten) /32/	69
Abbildung 17:	Wirksamkeit der Barrieren im Opalinuston-Projekt im Tongestein bei gestörten Barrierefunktionen „Puffer und Versatz“ (Zeitbereiche mit aktiver Barrierefunktion sind farbig hinterlegt)	70

Abbildung 18: Beziehung zwischen den einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten /39/ 76

Abbildung 19: Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden /39/ 77

Abbildung 20: Bemessungspunkt und Zuverlässigkeitsindex β nach Methode 1. Ordnung (FORM) /41/ 78

Abbildung 21: Vergleich der Vorgehensweisen bei der Langzeitsicherheitsanalyse im schweizerischen Nachweiskonzept und den Sicherheitsnachweisen im Bauwesen 80

Abbildung 22: Flussdiagramm gestörte/ungestörte Barrierenfunktionen in einem Endlager im Granit 85

Abbildung 23: Flussdiagramm gestörte/ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Tongestein 87

Abbildung 24: Zeitliche Gliederung der Endlagerentwicklung in Zeitphasen am Beispiel (nach ANDRA /46/) des französischen Konzepts im Tongestein 90

Abbildung 25: Aus Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgeleitete Parametervariationen für das Basisszenario (Referenzfall) im schweizerischen Sicherheitsnachweis /32/ 95

Abbildung 26: Prognostizierte Dosisrate für die Lokation „Aberg“ in Schweden (Sv/a) aufgetragen über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre 97

Abbildung 27: Probabilistische Ergebnisse der Dosisraten für das Expositionsmodell Torfmoor für 3 Standorte. Die vertikalen Linien zeigen jeweils den mittleren Wert. 99

Abbildung 28: Probabilistische Ergebnisse der Dosisraten für das Expositionsmodell „Brunnen und Quellen“ für 3 Standorte. Die vertikalen Linien zeigen jeweils den mittleren Wert. 99

Abbildung 29: What-if-Analysen: Wahrscheinlichkeitsverteilung der abgeleiteten Parametervariationen im Vergleich zur Parameterwahl bei What-if-Analysen im schweizerischen Sicherheitsnachweis (schematisch) /32/ 103

Abbildung 30: Basisszenario: Referenzfall mit Parametervariationen und ergänzende Szenarien/ Berechnungsvarianten (der dicke Strich zeigt das jeweilige Szenario ohne Parametervariationen an) 107

Abbildung 31: What-if-Analyseergebnisse im Vergleich zum Referenzfall (der dicke Strich zeigt das jeweilige Szenario ohne Parametervariationen an) 109

Abbildung 32: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für das schweizerische Endlagerkonzept im Opalinuston 112

Abbildung 33: Aufbau des kupfernen Endlagerbehälters mit Gusseiseneinsatz im KBS-3-Konzept 118

Abbildung 34: Schweißnaht mit dem Friction Stir Welding-Verfahren erstellt /52/ 120

Abbildung 35: Funktionsprinzip und Werkzeug für das Friction Stir Welding-Verfahren /52/ 121

Abbildung 36: Makroskopischer Schnitt durch das Schweißnahtgefüge einer Friction Stir-Schweißnaht /52/ 121

Abbildung 37: Ultraschallprüfung der Behälter im KBS-3-Konzept 123

Abbildung 38: Erkennungswahrscheinlichkeit durch zerstörungsfreie Prüfmethoden (grün) und Auftretenswahrscheinlichkeit eines Defekts (rot), dargestellt jeweils über die Größe des Defekts /61/ 126

Abbildung 39: Verknüpfung zwischen den Radionuklidtransportmodellierungen im Langzeitsicherheitsnachweis und den funktionsbezogenen Einzelnachweisen für den Schachtverschluss im Tongestein 131

Abbildung 40: Messwerte der Permeabilität in Abhängigkeit von der Entfernung von der Streckenkontur, Standort Bure, Teufe z = 445 m /64/. 132

Abbildung 41: Schachtverfüllung Salzdetfurth Schacht I /65/ 136

Abbildung 42: Binäres Bentonitgemisch Schachtverfüllung Salzdetfurth Schacht I /65/ 137

Abbildung 43: Generischer Schachtverschluss für ein Endlager im Tongestein 138

Abbildung 44: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Bentonittrockendichte- Zusammenstellung von Literaturdaten nach Dixon in /66/ 147

Abbildung 45: Qualitative Darstellung von Erosions- und Suffosionsvorgängen nach /34/ 149

Abbildung 46: Quelldruck in Abhängigkeit von der Bentonittrockendichte - Zusammenstellung von Literaturdaten nach Dixon in /66/ 150

Abbildung 47: Sättigung im aufgewältigten Dichtelement des Bohrschachtes Salzdetfurth /63/ 154

Abbildung 48: Prinzipskizze eines horizontalen Streckenverschlusses im Steinsalz mit Abmessungen (nach /73/) 158

Abbildung 49: Schematische Darstellung eines Abdichtungssegmentes im Salzgestein (Stilllegung ERAM /73/) 159

Abbildung 50: Verknüpfung zwischen den Radionuklidtransportmodellierungen im Langzeitsicherheitsnachweis und den funktionsbezogenen Einzelnachweisen für den Streckenverschluss im Salzgestein 160

Abbildung 51: Fertiggestellte Teile des Versuchdammbauwerkes in der Asse 162

Abbildung 52: Betonage des ASSE-Vordamms 163

Abbildung 53: Handverstopfen des Firstspaltes, im Vordergrund Injektionsleitungen 163

Abbildung 54: Seitenansicht des ASSE-Vordamms mit Bohrungen von der Ortsbrust aus in den Damm, in die Kontaktzone und in die ehemalige Auflockerungszone; Richtungen der Bohrungen mit den gemessenen Permeabilitäten [m²] /76/, /78/, /79/ 166

Abbildung 55: Blockkarten der räumlichen Verteilung der Permeabilität in der

Kontaktzone (links Sohle und Stöße, rechts Firste und Stöße) des ASSE-Vordamms als Projektion (s. a. Anhang 2) 170

Abbildung 56: Zunahme der Permeabilität bei Durchströmung mit korrodierender IP21-Lösung /75/ 172

Abbildung 57: Temperaturverteilung im Streckenverschluss (Abdichtung) und maximale Temperaturdifferenzen /73/ 174

Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf des Druckaufbaus und effektive Länge des Streckenverschlusses (Abdichtung) /73/ 178

Abbildung 59: Risiko-Diagramm mit Angabe der Bereiche des akzeptierten und nicht akzeptierten Risikos /88/ 195

Abbildung 60: Auswertung von Stormont gemessenen Permeabilitäten aus der WIPP /94/ 240

Abbildung 61: Auswertung gemessener Permeabilitäten verschiedener Lokationen in Glückauf Sondershausen in Deutschland /94/ 240

Abbildung 62: Gemessene Permeabilitäten über den Konturabstand nach dem Nachschnitt und nach längerer Standzeit nach Voigt et al. in /66/ 241

Abbildung 63: Ergebnisse von in situ Permeabilitätsmessungen am Dammtor und in vergleichbarer offener Strecke /85/ 243

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abfallform und angesetzte Zeitdauern für die Mobilisierung von Radionukliden in den Endlagerkonzepten verschiedener Länder /1/ 16

Tabelle 2: EBS-Komponenten und FEP im schweizerischen Opalinuston-Projekt /32/ 47

Tabelle 3: Pessimistische Parametersätze und What-if-Analysen im schweizerischen Opalinuston-Projekt /32/ 51

Tabelle 4: Tabellarischer Vergleich und Zusammenfassung der barrierenspezifischen Entwicklungen für den gestörten und den ungestörten Fall bei Endlagerkonzepten im Granit und im Ton 53

Tabelle 5: Wirkungsmechanismen der einzelnen Barrieren in den Endlagerkonzepten und ihre Funktion 59

Tabelle 6: Tabellarischer Vergleich von die Barrieren betreffenden Szenarien für eine gestörte und ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Granitgestein. Das X bedeutet „ohne Bemerkung zutreffend“, (X) bedeutet „keine Barrierefunktion“ 61

Tabelle 7: Tabellarischer Vergleich von die Barrieren betreffenden Szenarien für eine gestörte und ungestörte Entwicklung eines Endlagers im Tongestein. Das X bedeutet „ohne Bemerkung zutreffend“, (X) bedeutet „keine Barrierefunktion“ 62

Tabelle 8: Beziehung zwischen β und p_f /39/ 78

Tabelle 9: Nachweisrelevante Barriereeigenschaften und ihre Ermittlung 82

Tabelle 10: Barriere und Einzelnachweise für verschiedene Grenzzustände 91

Tabelle 11: Zusammenstellung der vorhandenen Analyseergebnisse für das schwedische Endlagerkonzept im Granit 111

Tabelle 12: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für das individuelle Risiko für das schwedische Endlagerkonzept im Granit und das schweizerische Konzept im Opalinuston 112

Tabelle 13: Einaxiale Druckfestigkeit (Dilatanzfestigkeit) und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit von der Normalspannung (Mittelwerte) bei beginnender Auflockerung für die geomechanischen Klassen A bis E /64/ 134

Tabelle 14: Versuchswerte zur hydraulischen Leitfähigkeit von Bentonit bei einer Trockendichte im Intervall 1,60 g/cm³ < ρ_{tr} < 1,75 g/cm³ (Abbildung 44) 147

Tabelle 15: Ergebnisse aus 8 Messungen zur Bestimmung der Permeabilität im moderat geschädigten Konturbereich zwischen 0,6 m < $r_{Alz,m}$ < 1,10 m vom ehemaligen Stoß entfernt 152

Tabelle 16: Charakteristische bzw. Bemessungswerte der Durchlässigkeiten und Permeabilitäten für die hoch aufgelockerte Zone 153

Tabelle 17: Gemessene Gaspermeabilitäten von Pulse-Tests bei i. d. R. 1,2 MPa Prüfdruck. Abweichende Versuchsrandbedingungen sind in Abbildung 54 angegeben 167

Tabelle 18: Charakteristische und Bemessungwerte der Permeabilität für den Baukörper, die Kontaktzone und die (ehemalige) Auflockerungszone 168

Tabelle 19: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für die integrale Permeabilität 169

Tabelle 20: Charakteristische und Bemessungswerte der Spaltzugfestigkeit von Steinsalz 176

Tabelle 21: Charakteristische und Bemessungswerte der einaxialen Zugfestigkeit von Salzbeton 177

Tabelle 22: Ergebnisse der Hydrofracmessungen in der Kontaktzone am ASSE-Vordamm. Die Hydrofracmessungen wurden in den gleichen Bohrungen wie die Permeabilitätstests durchgeführt /76/. 178

Tabelle 23: Überwachungsmaßnahmen bei der Planung (DSL) 181

Tabelle 24: Überwachungsmaßnahmen bei der Herstellung (IL) 181

Tabelle 25: Mittleres Todesfallrisiko in Abhängigkeit des Lebensalters 190

Tabelle 26: Verschiedene Berufsrisiken 192

Tabelle 27: Individuell beeinflussbare Risiken in Folge Lebensgewohnheiten, dem gesellschaftlichen Leben und Mobilität 192

Tabelle 28: Nicht beeinflussbare Risiken aus dem Lebensumfeld und durch Katastrophen 193

Tabelle 29: Werte k_n für charakteristische Werte (5 %-Fraktile), entspricht Tabelle D.1 nach /39/ 226

Tabelle 30: Werte $k_{d,n}$ für den Bemessungswert für Tragfähigkeitsnachweise, entspricht Tabelle D.2 nach /39/ 227

Literaturverzeichnis

/1/ OECD/NEA: Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories, State-of-the-Art-Report, in Co-Operation with the European Commission, EUR 19964 EN, 2003

/2/ Posiva Oy: The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel – Environmental Impact Assessment Report, Helsinki, 1999

/3/ NAGRA: Nukleare Entsorgung Schweiz – Konzept und Realisierungsplan, NAGRA – Technischer Bericht 92-02, Wettingen, Schweiz, 1992

/4/ NAGRA: Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz. Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlandes. OECD/NEA No. 559, 2004, ISBN 92-64-02064-0

/5/ HSK: Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Bericht HSK 23/73, Würenlingen, 2004

/6/ NAGRA: Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Bericht NTB 02-02, Wettingen, Schweiz, 2002

/7/ Sitz, P.: Langzeitstabile Verschlussbauwerke in Strecken und Schächten, Bergbaukolloqium Freiberg, Bergbau 11, 2001

/8/ Rauche et al.: Closure of the Morsleben Repository - Conceptual Design and Safety Proof of Shaft Sealing System, Poster, DisTec 2004 Conference, 26.-28. April 2004

/9/ SKB: SR 97, Post-Closure Safety, Main Report Vol. I, Stockholm, Technical Report 99-06, 1999

/10/ SKB: KBS, Final Storage of Spent Nuclear Fuel, Stockholm, 1983

/11/ Vieno, T.; Nordman, H: Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, Posiva Oy, Bericht-99-07, 1999

/12/ Hedin, A.; Sellin, P.: SR-Can: Preliminary Feedback to Canister Fabrication, Repository Design and Future R&D, Vortrag, NEA EBS Workshop, La Coruna, 2005

/13/ Goodwin, B.W.; Hajas, W.C.; Leneveu, D.M.: Effect of Long-Lived Containers on the Postclosure Performance of a Reference Disposal System, AECL-11461, COG-95-497, Pinawa, Manitoba, 1996

/14/ Allan, C.J.; Goodwin, B.W.: The Disposal of Canadas Nuclear Fuel Waste: Comments on the Postclosure Assessment of a Reference System, AECL-11600, Pinawa, Manitoba, 1996

/15/ Wikjord, A.G.; et al.: The Disposal of Canadas Nuclear Fuel Waste: A Study of Postclosure Safety of In-Room Emplacement of Used CANDU Fuel in Copper Containers in Permeable Plutonic Rock, Volume I: Summary. AECL-11494-4, COG-95-522-1, Pinawa, Manitoba, 1996

/16/ DBE: Statusbericht - Zulässige Wärmeleistung von Endlagerbehältern in nichtsalinarem Wirtsgestein - Teil 1: Literaturauswertung und Abschätzung der Konsequenzen beim Wechsel von Salz auf nichtsalinare Wirtsgesteine, Peine, 2000

/17/ NAGRA: Kristallin-I Safety Assessment Report, NAGRA Technischer Bericht 93-22, Wettingen, Schweiz, 1994

/18/ Svemar, C.: The EC Prototype Repository Project: Implication of Assessments for Refining Repository Design, NEA EBS Workshop, Turku, Finland, 2003

/19/ Johnson, L. H. et al.: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Vault Model for Postclosure Assessment, 1994

/20/ De Preter, P.; Bel, J. ; Gens, R. ; Lalieux, P.; Wickham, S. : Safety Functions, Scoping Calculations and Process Models Supporting the Reference Design for Belgian HAW and Spent Fuel Disposal, ONDRAF/NIRAS and Galson Sciences, SBS-Systems in the Safety Case, the Role of Modeling, NEA EBS Workshop, La Coruna, 2005

/21/ Mayer, S.; Chapuis, C.; Plas, F. : Managing Design Requirements of French Waste Disposal Packages, ANDRA, NEA EBS Workshop, Turku, Finland, 2003

/22/ Johnson, L. H.; Schneider, J. W.: The Impact of Alternative SF Dissolution Models on Release from the EBS – some Insights from the Opalinus Clay Safety Case, NEA EBS Workshop, La Coruna, 2005

/23/ NAGRA: Safety Disposal of Spent Fuel, HLW and Long-Lived ILW in Switzerland, An international Peer Review of the Post-Closure Radiological Safety Assessment for Disposal in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland, OECD, 2004, ISBN 92-64-02063-2

/24/ Detilleux, E.; Decamps, F.; Biesemans, E.: Radioactive Waste Disposal in Belgium, Kerntechnik, 59, No. 1-2, pp. 14-17, München, 1994

/25/ Hedin, A.; Kautsky, U.; Morén, L.; Selross, J.-O.; Sellin, P.; Ström, A.; Papp, T.: SR97: Post-Closure Safety for a KBS 3 Deep Repository for Spent Fuel – Overview, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Mat. Res. Soc. Proc. Vol. 663, 2001

/26/ SKB: Deep Repository for Spent Fuel SR97 – Post-closure Safety, TR-99-06 Main Report, Summary, November 1999

/27/ SKB: Planning Report for the Safety Assessment SR-Can, TR-03-08, 2003

/28/ Rasilainen, K.: Localisation of the SR97 Process Report for Posiva's Spent Fuel Repository at Olkiluoto, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland, 2004

/29/ NEA: SR97: Post-Closure Safety of a Deep Repository for Nuclear Spent Fuel in Sweden, an International Peer Review, 2000

/30/ Svemar, C.; Olsson, O.: KBS-3 System Design – Then, Now and in the Future, ICEM 1999, Nagoya, Japan, 1999

/31/ Goodwin, B.W.; et al.: Scenario Analysis for the Postclosure Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal, AECL-10969 COG-94-247, Pinawa, Manitoba, 1994

/32/ NAGRA: Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of Disposal Feasability for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Longlived Intermediate-level Waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report 02-05, Wettingen, Schweiz, 2002

/33/ http://de.wikipedia.org/wiki/permeation

/34/ DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., GDA-Empfehlungen Geotechnik, Deponien und Altlasten, Verlag Ernst und Sohn, 1997

/35/ http://de.wikipedia.org/wiki/sorption

/36/ SKI: International Peer Review of Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company's SR-Can Interim Report, SKI Report 2005:02, 2004, ISSN 1104-1374

/37/ AD 2000 Regelwerk, Carl Heymannns Verlag, Köln

/38/ KTA, Kerntechnischer Ausschuss, Regeltexte

/39/ DIN EN 1990, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002, Oktober 2002

/40/ Müller-Hoeppe, N.; Krone, J.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager, Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben 02 E 9087, DBE, Peine, 1999

/41/ DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, März 2001

/42/ EC1 (Deutsche Fassung): ENV 1991-1, Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1: Grundlagen der Tragwerksplanung, CEN (Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 1994

/43/ Kiefer, D.: Sicherheitskonzept für Bauten des Umweltschutzes, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DafStb), Beuth Verlag, Berlin, 1997

/44/ DAfStB: Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, Beuth Verlag, 2004

/45/ US EPA: Title 40 – Protection of Environment, Chapter I –Environmental Protection Agency, Part 191 – Einvironmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-level and Transuranic Wastes (40 CFR Ch. I (7-1-01 Edition), 2001

/46/ OECD/NEA: The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, Paris, France, 16-18 April, 2002

/47/ Preuss, J.; Müller-Hoeppe, N.; Schrimpf, C.: The Interaction of the Evidence of Post Closure Safety and Requirements to BAckfill Materials for the Morsleben Repository, Proc. DISTEC 2000, September 4-6, 2000

/48/ ICRP: The 2007 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, Publication 103, 2007

/49/ ICRP, Recommendations of the International Commission of Radiological Protection, Publication 60, 1991

/50/ ICRP: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, Publication 81, 2000

/51/ IAEA: The Management System for the Disposal of Radioactive Waste, Safety Guide No. GS-G-3.4, IAEA Safety Standards, Wien, 2008

/52/ Fud-Program: Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnafall, inklusive samhälllsforskning, SKB, 2004

/53/ http://de.wikipedia.org/wiki/Schwei%C3%9Fen

/54/ http://www.skb.se/default2____17198.aspx, 19.12.2006

/55/ http://www.skb.se/default2____17197.aspx, 19.12.2006

/56/ http://www.skb.se/default2____16853.aspx, 19.12.2006

/57/ Claesson, S.; Ronnetag, U.: Electron Beam Welding of Copper Lids, Status Report up to 31.12.2001, SKB Report R-03-25, SKB, 2003

/58/ Stepinski, T.; Lingvall, F.; Wennerström, E; Wu, P.: Inspection of Copper Canisters for Spent nuclear Fuel by Means of Ultrasound, NDE of Friction Stir Welds, Nonlinear Acoustics, Ultrasonic Imaging; Uppsala University, Signals and Systems; Department of Materials Science, Sweden, TR-04-03, SKB, 2004

/59/ Stepinksi, T.: Deep penetrating Eddy Current for Copper Canister Inspection, Main Results, SKB-Report R-04-28, SKB, 2004

/60/ Wu, P.; Lingvall, F.; Stepinski, T.: Inspection of Copper Canisters for Spent nuclear Fuel by Means of Ultrasound, Electron beam Evaluation, harmonic Imaging, materials Characterization and ultrasonic Modeling, Uppsala University, Signals and Systems; Department of Materials Science, Sweden; TR-00-23, SKB, 2000

/61/ SKB: Planning Report for the Safety Assessment SR-Can, TR-03-08 Technical Report, June 2003

/62/ http://www.skb.se/default2____16855.aspx, 19.12.2006

/63/ Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II, BMBF-Forschungsvorhaben 02C0516, K+S AG, Kassel, 2002

/64/ ANDRA: Dossier 2005 Referentiel du Site Meuse/Haute Marne, Tome 2, Frankreich, 2005

/65/ Wilsnack, T.; Sitz, P.; Heinemann, K.-H.; Rumphorst, K.; Hunstock, F.: Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten, Kali und Steinsalz, Heft 3, 2008

/66/ Wagner, K. : Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge, Dissertation an der TU-Bergakademie Freiberg, 2005

/67/ Eckart, D.; Hüls, W.; Klemm, T.: Geomechanische Untersuchung der Stabilität von Schotterschichten und –böschungen zur Sicherung von Versatzsäulen in Schächten, Neue Bergbautechnik, 6. Jg., Heft 8, August 1976

/68/ DIN 1055-6: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, März 2005

/69/ EC7 (Deutsche Fassung), EN 1997-1:2004, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, CEN (Europäisches Komitee für Normung), Normenausschuss Bauwesen, (NABau) im DIN, Verlag Beuth, Berlin

/70/ Sitz, P; Gruner, M; Rumphorst, K.: Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar, Kali und Steinsalz, 03/2003

/71/ Brinkmann, C.; Smoltczyk, U.: Ermittlung des kritischen Gradienten an Einbauten in undräniertem, bindigen Boden, Bautechnik 75, Heft 9, 1998

/72/ Sadgorski, W.; Smoltczyk, U.: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Kommentar u. a. zu DIN V ENV 1997-1; Eurocode 7, Beuth Verlag, 1. Auflage 1996

/73/ Mauke, R.; Müller-Hoeppe, N.; Wollrath, J.: Planning, Assessment and Construction of a Drift Seal in a Spalt Repository – Overview of Investigations, Engineered Barrier Systems (EBS) in the Safety Case: Design Confirmation and Demonstration, Workshop Proceedings, Tokyo, Japan, 12-15 September 2006, OECD/NEA, 2007

/74/ Müller-Hoeppe, N.; Mauke, R.; Wollrath, J.: Closure Concept for the Morsleben LLW Repository for Radioactive Waste, Design of the Drift Seals in a former Salt Mine; Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case; Workshop Proceedings, Oxford, UK, 2002

/75/ Herbert, H.-J.; Becker, D.; Hagemann, S.; Meyer, Th.; Woseck, U.; Rubel, A.; Mauke, R.; Wollrath, J.: Alteration of Non-metallic Barriers and Evolution of Solution Chemistry in Salt Formations in Germany, Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case, Process Issues, Workshop Proceedings, Las Vegas, USA, 14-17 September 2004, OECD/NEA 2005

/76/ Gläß, F.; Mauke, R.; Eilers, G.; Preuss, J.; Schmidt, H.; Lerch, C.; Müller-Hoeppe, N.: Investigation of a salt concrete seal in the Asse salt mine, WM ,05 Conf., February 27 – March 3, Tucson, Az, USA, 2005

/77/ BGR, DBE, GSF: Dammbau im Salzgebirge – Ausführungsplanung – Gesamtbauwerk – Versuchsdamm, KZL: PD/7434100/FB/RL/0001/06, 1990 (unveröffentlicht)

/78/ Gläß, F.; Mauke, R.; Müller-Hoeppe, N.: Investigations on the ´Asse-Vordamm´ to prove tightness of the contact zone of the sealing constructions for the Morsleben Repository for Radioactive Waste (Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, ERAM), European Commision CLUSTER Conference ´Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories´, Luvemburg, 3-5. November 2003

/79/ Mauke, R; Schmidt, H.: Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm, Darstellung und Bewertung der Ergebnisse, BfS/DBE, Vortrag beim 32. Geomechanik-Kolloquium Leipzig, 2003

/80/ Engelhardt, H.-J.; Kreienmeyer, M.; Lerch, C.; Müller-Hoeppe, N.; Köster, R.; Eilers, G.; Preuss, J.: A Constitutive Law of Salt Concrete Used for Closure of an LILW-Repository, The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, September 21-25, Oxford, UK, 2003

/81/ Lancaster, F., H.: Report on Research into Underground Plougs, Transvaal and Orange Fee State Chamber of Mines, Research Organisation, Research Report No. 27, Johannesburg, 1964

/82/ Mohr, F.: Schachtbautechnik, Hermann Hübener Verlag, Goslar, 1964

/83/ Georgi, F.; Menzel, W.; Schreiner, W.: Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR, Teil I: Das Festigkeitsverhalten, Neue Bergbautechnik, 5. Jg., Heft 9, September 1973

/84/ DAfStb: Wirksame Betonzugfestigkeiten im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang, Heft 449, Beuth Verlag, Berlin, 1995

/85/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchungen zu hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand (ALOHA II), GRS-Abschlussbericht (FKZ 02 E 9118), April 2004

/86/ Knoll, P.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) für UTD/UTV (Projekt „CARLA“), Teil 2: Erprobung von Funktionselementen, Bericht zum 1. Meilenstein, 31.07.2006, (FKZ02C1204), Oktober 2006

/87/ DNV Consulting, RDF Begleitkurs, Risikomanagement, Zeppelinheim, 2004

/88/ Zapf, B; Klein, G.; Weidl, T.: Risikomanagement, Verfahren zum Fliegen im Flughafennahbereich, DGLR-Symposium „Nachbar Flughafen“, TÜV Industrie Service GmbH; TÜV Süd Gruppe, München, 2004

/89/ Schneider, J.: „Sicher genug?“, Professor em. für Baustatik und Konstruktion , ETH Zürich, http://www.dfld.de/PFV_Landebahn/Sicherheit/Schneider_(ETH).pdf

/90/ Bergbau-Berufsgenossenschaft, Jahresbericht 2003, Bochum 2004

/91/ „Die sieben Zahlen der Woche“: Hannoversche Allgemeine Zeitung, Wochenendbeilage, 18.9.2004, Verlag Madsack, Hannover, 2004

/92/ Ellingwood, B. R.: Probability-based codified design: past accomplishments and future challenges, Structural Safety, 13, pp 159 – 176, Elsevier 1994

/93/ Brejora, S.: Risikoakzeptanz und Kernenergie – eine Betrachtung; atw, 46. Jahrgang, Heft 4, April, 2001

/94/ Häfner et al.: In-situ-Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge, TUBAF, Abschlussbericht des Forschungsvorhabens, 2001

/95/ Kühnicke, H.; Schubert, F.; Reuter, O.; Fuhrmann, G.; Schulze, E.: Entwicklung und In-situ Test akustischer Verfahren zur zerstörungsfreien Beurteilung von Auflockerungszonen im Salinar, IZFP-Abschlussbericht (FKZ 02 C 0637), April 2002

Abkürzungsverzeichnis

AECL	Atomic Energy of Canada Ltd.
ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (Frankreich)
BNFL	British Nuclear Fuels (Wiederaufarbeitungsanlage in Großbritannien)
CC1 – CC3	Consequence class
COGEMA	Companie Générale de Matières Nucléaires (Wiederaufarbeitungsanlage in Frankreich)
DSL1 – DSL3	Design supervision level
EBS	Engineered barrier system
EBW	Electron beam welding
FEP	Features, events, processes
FSW	Friction stir welding
HAW	High active waste
HLW	High level waste
IL1 – IL3	Inspection level
ILW	Intermediate level waste
IRF	Instant release fraction
KBS-3	Kärnbränslesäkerhet-3 (3 steht für die 3 Barrieren Behälter, Bentonitpuffer, kristallines Wirtsgestein)
LLW	Low level waste
MOX	Mischoxid
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
RC1 – RC3	Reliability class
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SF	Spent fuel
UO_2	Urandioxid
URL	Underground research laboratory
WAA	Wiederaufarbeitungsanlage
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (Endlager für radioaktive Abfälle in den USA)

Glossar

Allgemeine Begriffe

Bauausführung
Tätigkeiten, die für die Errichtung eines Bauwerks (Tragwerks) erforderlich sind

*Nutzungsdaue*r
vorgesehener Zeitraum, in dem ein Bauwerk ohne nennenswerte Instandsetzung genutzt werden kann

Tragwerk
Planmäßige Anordnung miteinander verbundener tragender und aussteifender Bauteile, die so entworfen sind, dass sie ein bestimmtes Maß an Tragwiderstand aufweisen

Begriffe für Einwirkungen

Einwirkung
Auf das Tragwerk einwirkende Größen, z. B. Kraft und Verformungsgrößen

repräsentativer Wert
Wert einer Einwirkung, der der Nachweisführung in den Grenzzuständen zu Grunde liegt

charakteristischer Wert
wichtigster repräsentativer Wert einer Einwirkung, von dem angenommen wird, dass er mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer und der entsprechenden Bemessungssituation nicht überschritten oder unterschritten wird

Einwirkungskombination
Festlegung der Bemessungswerte der gleichzeitig auftretenden Einwirkungen, die für den betrachteten Nachweis entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens zu berücksichtigen sind

Beanspruchung
Folge der gleichzeitig zu betrachtenden Einwirkungen bzw. einer Einwirkungskombination auf das Tragwerk oder seine Teile oder an einem betrachteten Ort (Querschnitt) des Tragwerkes

Begriffe für Widerstände

Tragwiderstand
Durch die Baustoffe einschließlich ihrer räumlichen Anordnung und den Verbindungen festgelegte mechanische Eigenschaft des Tragwerks, des Bauteils oder des Bauteilquerschnitts, bestimmten Beanspruchungen zu widerstehen, auch als Beanspruchbarkeit bezeichnet

charakteristischer Wert
durch die charakteristischen Werte der maßgebenden Baustoffeigenschaften, z. B. Festigkeit, und die Nennwerte der Querschnittsgrößen festgelegter Tragwiderstand

Bemessungswert
Für die Nachweise von Grenzzuständen, z. B. der Tragfähigkeit zu Grunde zu legender Wert des Tragwiderstands

Begriffe zum Sicherheitskonzept

Zuverlässigkeit
Wahrscheinlichkeit der Sicherstellung von Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit während der vorgesehenen Lebensdauer (qualitativ)

Zuverlässigkeitsniveau (früher auch als Sicherheitsniveau oder Konfidenzniveau bezeichnet)
Wahrscheinlichkeit, mit der ein definierter Grenzzustand für den vorgegebenen Bezugszeitraum nicht überschritten wird (quantitativ)

Sicherheit
Fähigkeit des Tragwerks zur Sicherstellung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit (Funktionsfähigkeit), die eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung verhindern

Tragfähigkeit
Fähigkeit des Tragwerks und seiner tragenden Teile, allen auftretenden Einwirkungen zu widerstehen, denen es während der Errichtungs- und Nutzungsdauer planmäßig standhalten soll

Gebrauchstauglichkeit
Fähigkeit des Tragwerks und seiner Teile, die planmäßige Nutzung entsprechend festgelegter Bedingungen zu ermöglichen

Dauerhaftigkeit
Fähigkeit des Tragwerks und seiner Teile, Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit während der gesamten Nutzungsdauer sicherzustellen

Bemessungskriterien
Beschreibung der für die Einhaltung der Grenzzustände zu erfüllenden Bedingungen

Bemessungssituation
Dem Nachweis der Einhaltung eines Grenzzustandes zu Grunde liegende, im betrachteten Zeitraum konstante Bedingungen des Tragwerks einschließlich der maßgebenden Einwirkungen, Umweltbedingungen usw., für die der Tragwerksplaner die Einhaltung der maßgebenden Grenzzustände nachweist. Es wird zwischen vorübergehenden, ständigen und außergewöhnlichen Bemessungssituationen unterschieden

Grenzzustand
Zustand des Tragwerks, bei dessen Überschreitung die der Tragwerkplanung zu Grunde gelegten Anforderungen (Funktionsanforderungen) nicht mehr erfüllt sind

Grenzzustand der Tragfähigkeit
Zustand des Tragwerks, dessen Überschreitung unmittelbar zu einem rechnerischen Einsturz oder anderen Formen des Versagens führt; der Grenzzustand ergibt sich im Allgemeinen aus dem größten rechnerischen Tragwiderstand

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
Zustand des Tragwerks, bei dessen Überschreitung die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt sind

Teilsicherheitsbeiwert
Beiwert zur Bestimmung des Bemessungswertes von Einwirkungen, von Beanspruchungen oder von Tragwiderständen aus den repräsentativen bzw. charakteristischen Werten

Anhang 1: Statistische Bestimmung einer einzelnen Eigenschaft

Dieser Anhang enthält Angaben zur statistischen Bestimmung einer einzelnen Eigenschaft gemäß /39/ und /69/. Dabei wird sowohl die Bestimmung des Bemessungswertes des Widerstandes über den charakteristischen Wert als auch die direkte Bestimmung des Bemessungswertes für Tragfähigkeit (= sicherheitsrelevante Eigenschaft) angegeben.

Die im Folgenden zuerst aufgeführten beiden Vorgehensweisen und die zugehörigen Tabellen 29 und 30 beruhen dabei auf folgenden Annahmen:

- die zugrunde liegende Verteilung ist die Normalverteilung oder log-Normalverteilung
- es gibt keine Vorinformation über den Mittelwert
- bei dem Fall „V_x unbekannt“ gibt es keine Vorinformation über den Variationskoeffizienten
- bei dem Fall „V_x bekannt“ gibt es volle Vorinformation über den Variationskoeffizienten

Nach /39/ ist es in der Praxis ratsam, den Fall „V_x bekannt“ in Verbindung mit einem oberen Schätzwert von V_x anstelle des Falles „V_x unbekannt“ zu benutzen. Zudem sollte V_x, wenn unbekannt, mindestens mit 0,10 angenommen werden.

Bei sehr massigen und ausgedehnten Bauwerken bzw. Bauteilen, wie sie vorzugsweise in der Geotechnik vorkommen, lässt der Eurocode 7 /69/ es zu, vorsichtig geschätzte Mittelwerte anzuwenden, weil bei dieser Art von Bauwerken nicht mehr eine einzelne Stelle für ein potenzielles Versagen maßgebend ist, sondern zunehmend der Mittelwert. Als vorsichtig geschätzter Mittelwert kann nach /69/ das 95-%-Konfidenzintervall gelten. Bei unbekannter Varianz kann in diesem Fall die t-Verteilung nach Student zur Konfidenzschätzung für den unbekannten Erwartungswert verwendet werden. Auch dieses Vorgehen kam hier zur Anwendung und ist deshalb nachfolgend beschrieben.

Bestimmung des Bemessungswertes über den charakteristischen Wert

Die Bemessungswerte X_d einer Größe X sollten wie folgt festgelegt werden:

$$X_d = \frac{\eta_d \cdot X_k}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} m_x \left[1 - k_n V_x\right]$$

mit

X_d Bemessungswert

X_k charakteristischer Wert

η_d Bemessungswert des Umrechnungsfaktors, mit dem Laborversuche auf in-situ-Verhältnisse skaliert werden, soweit die Umrechnung nicht in γ_m enthalten ist. Häufig gilt η_d =1,0.

γ_m Teilsicherheitsbeiwert für Probeneigenschaften (Baustoffeigenschaften)

m_x Mittelwert der Eigenschaften von n Proben, $m_x = \frac{1}{n}\sum(X_i)$

$s_x = \sqrt{s_x^2}$ mit der Varianz $s_x^2 = \frac{1}{n-1}\sum(X_i - m_x)^2$

s_x Standardabweichung

V_x Variationskoeffizient für X, $V_x = s_x / m_x$

k_n Tabellenwert aus Tabelle D.1 /39/, siehe Tabelle 29

Tabelle 29: Werte k_n für charakteristische Werte (5 %-Fraktile), entspricht Tabelle D.1 nach /39/

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_x unbekannt	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Anmerkung: Tabelle 29 beruht auf der Normalverteilung. Bei Anwendung der log-normalen Verteilung gilt:

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m}\exp\left[m_y - k_n s_y\right]$$

wobei

$$m_y = \frac{1}{n}\sum \ln(X_i)\,.$$

Falls V_x aus Vorinformationen bekannt ist,

$$s_y = \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \approx V_x$$

Falls V_x nicht aus Vorinformationen bekannt ist,

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(\ln X_i - m_y)^2}$$

Direkte Bestimmung des Bemessungswertes für Tragfähigkeitsnachweise

Der Bemessungswert X_d einer Größe X sollten wie folgt bestimmt werden, wobei der Wert η_d alle Unsicherheiten abdecken sollte, die durch die Versuche selbst nicht erfasst werden. Der Wert $k_{d,n}$ sollte mit Tabelle 30 bestimmt werden.

$$X_d = \eta_d \cdot m_x \left[1 - k_{d,n} V_x\right]$$

Tabelle 30: Werte $k_{d,n}$ für den Bemessungswert für Tragfähigkeitsnachweise, entspricht Tabelle D.2 nach /39/

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x bekannt	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
V_x unbekannt	-	-	-	11,4	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04

Anmerkung: Tabelle 30 beruht auf der Normalverteilung sowie weiteren Annahmen /39/. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit beträgt etwa 0,1 %. Für eine log-normale Verteilung gilt

$$X_d = \eta_d \exp\left[m_y - k_{d,n} s_y\right].$$

Bestimmung eines vorsichtig geschätzten Mittelwertes

Wie bereits ausgeführt, lässt der für geotechnische Fragestellungen geltende Eurocode 7 /69/ die Verwendung von vorsichtig geschätzten Mittelwerten zu. Als vorsichtig geschätzter Mittelwert gilt das 95-%-Konfidenzintervall bezogen auf den Mittelwert. Es wird wie folgt bestimmt /72/

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m}\left[m_x - k_n \, s_x / \sqrt{n}\right]$$

Bei unbekanntem Variationskoeffizienten kann in diesem Fall die t-Verteilung nach Student für (n-1) Freiheitsgrade verwendet werden.

Anhang 2: Ermittlung der räumlichen Permeabilitätsverteilung unter Anwendung eines Blockmodells

Die nachstehende Arbeit wurde als Projektarbeit im Rahmen des Programms Mentoring in Wissenschaft und Wirtschaft der Universität Hannover durchgeführt und bei der Abschlussveranstaltung am 28.01.2006 vorgestellt. Grundlage der Projektarbeit sind die in der Tabelle 1 dieses Anhanges angegebenen Permeabilitätswerte der Kontaktzone des ASSE-Vordamms. Es erfolgte eine probeweise Anwendung geostatistischer Verfahren, die üblicherweise im Rahmen der Lagerstättenkunde Verwendung finden, auf die Fragestellung, die flächenhafte Verteilung der Permeabilitätswerte in der Kontaktzone eines Streckenverschlusses zu ermitteln. Die probeweise Anwendung verlief erfolgreich. Da die Projektarbeit im Rahmen der Abschlussveranstaltung nur einem vergleichsweise kleinen Teilnehmerkreis zugänglich wurde, ist sie hier abgedruckt.

Es ist sowohl der Text der Veröffentlichung wiedergegeben als auch in verkleinerter Form das auf der Abschlussveranstaltung präsentierte Poster, da nur das Poster das den Isolinienkarten zu Grunde liegende Blockmodell zeigt.

Anwendung geostatistischer Verfahren auf Dammbauwerke für Untertagedeponien

Marleen Kästner[1] & Dr.-Ing. Nina Müller-Hoeppe[2]

[1] Institut für Geologie, Universität Hannover, Appelstraße 11A, 30167 Hannover
[2] DBE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine

Einführung

In dem ehemaligen Salzbergwerk Asse in Remlingen wurden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen durchgeführt. Vor 10 Jahren wurde auf der 945-m-Sohle ein Vordamm aus Salzbeton als Teil eines Dammbauwerkes errichtet (Abb. 1), um die Wirksamkeit einer technischen Barriere für ein späteres Endlager für radioaktive Abfälle zu untersuchen. Die Dauerhaftigkeit von Salzbeton wird bestimmt durch seinen Widerstand gegen das Eindringen aggressiver Substanzen, insbesondere Lösungen. In diesem Zusammenhang sind die Eigenschaften der Kontaktzone des Betons zum Salzgebirge von großer Bedeutung (GLÄß et al., 2005), da Untersuchungen zeigen, dass diese Randbereiche häufig eine höhere Porosität und Permeabilität aufweisen als der Betonkörper.

Ziel des Projektes ist es, zu klären, ob geostatistische Verfahren auf technische Fragestellungen übertragbar sind. Als Beispiel ist hier die Permeabilitätsverteilung in der Kontaktzone gewählt.

Abb. 1 Konstruktionsphase des Asse-Vordamms

Datenbasis

Für die Modellierung der Permeabilität in der Kontaktzone des Asse-Vordamms standen 12 Bohrungen (Tab.1) zur Verfügung. Aus Darstellungsgründen wurden zwei Bereiche ausgehalten: (A) Sohle/Stöße mit insgesamt 8 Bohrungen, (B) Firste/Stöße mit 10 Bohrungen.

Bohrung	HW	RW	k [m²]	LOG
2	5778213,4	449216,4	1,00E-24	-24,00
3	5778212,3	449216,2	1,40E-14	-13,85
6	5778216,2	449217,3	4,00E-23	-22,40
7	5778215,1	449220,0	6,00E-23	-22,22
8	5778209,8	449218,7	2,50E-23	-22,60
9	5778210,0	449216,0	7,00E-24	-23,15
11	5778211,3	449219,6	6,50E-19	-18,19
36	5778209,6	449219,5	1,60E-19	-18,80
37	5778214,9	449221,1	9,00E-23	-22,05
38	5778213,0	449220,3	1,00E-24	-24,00
54	5778213,7	449218,3	2,10E-13	-12,68
55	5778213,0	449221,3	3,30E-14	-13,48

Tab. 1 Permeabilitätswerte in der Kontaktzone des Vordamms

Variographie

Die Variographie ist ein geostatistisches Verfahren, welches aus punkthaft gemessenen Daten eine Schätzung bzgl. ihres räumlichen Zusammenhanges vornimmt. Für das Merkmalsfeld der Permeabilitätswerte wurden empirische Variogramme berechnet. Aufgrund der geringen Stützpunktanzahl konnten nur omnidirektionale Variogramme berechnet werden. Anschließend erfolgte die Anpassung eines mathematischen Modells, durch die Wahl einer standardisierten Variogrammfunktion, die der Beschreibung der räumlichen Variabilität einer Messgröße dient (SCHAFMEISTER, 1999). Dem angepassten Modell wurden die geostatistischen Parameter Nugget-Varianz, Sill, Reichweite, sowie das mathematische Funktional entnommen (Abb. 2) und für die Wichtungsprozeduren der Kriging-Gleichungssysteme weiterverwendet, um für die Stützpunkte eines regelmäßigen Gitters den besten (Kriging-) Schätzer als Durchschnittswert zu berechnen (KÄSTNER, 2004).

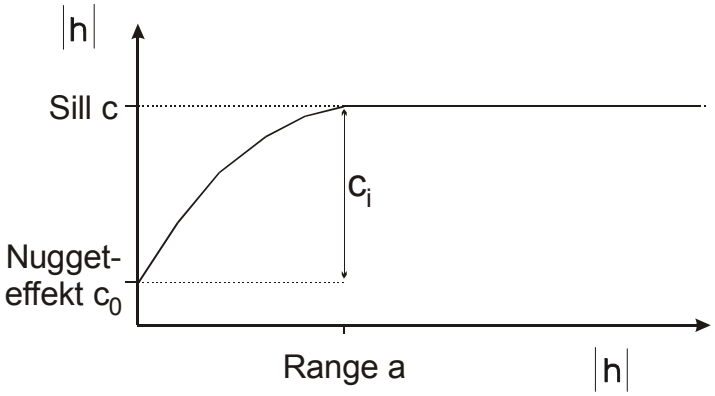


Abb. 2 Parameter zur Anpassung der Modellfunktion im Variogramm

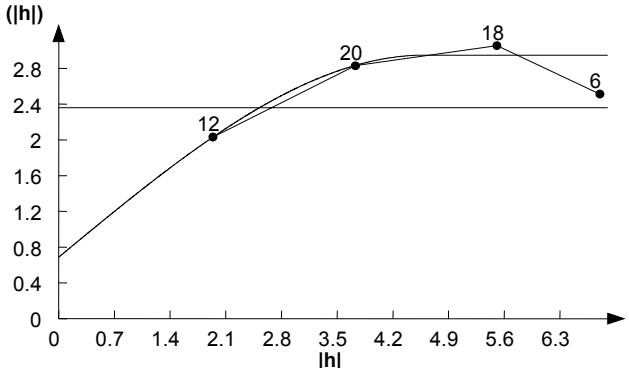


Abb. 3 Variogramm der Sohle/Stöße

Das Variogramm der Sohle/Stöße (Abb. 3) wurde mit einer sehr guten Anpassungsgüte (0,0045) mit einem sphärischen Modell genähert. Deren Parameter sind: Nuggetvarianz 0,69 %, Sill 2,26 % und Reichweite 4,6 m.

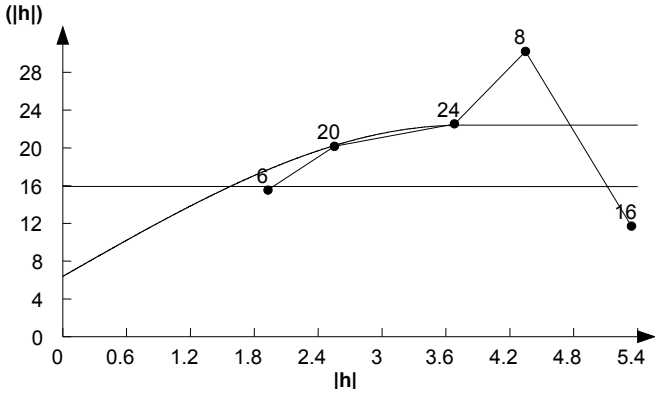


Abb. 4 Variogramm der Firste/Stöße

Das Variogramm der Firste/Stöße (Abb. 4) wurde mit einer guten Anpassungsgüte (0,13) mit einem sphärischen Modell genähert. Deren Parameter sind: Nuggetvarianz 6,40 %, Sill 16 % und Reichweite 3,72 m.

Isolinienkarten

Grundlage für die Berechnung dieser Isolinienbilder nach der Methode des Kriging waren die in den Variogrammen angepassten Modellfunktionen. Das Interpolations-Verfahren Kriging ist ein lineares Schätzverfahren, das erwartungstreu und mit Effizienz die Werte an den unbeprobten Orten schätzt. Für die Berechnung dieser Karten wurde die Software SURFER verwendet.

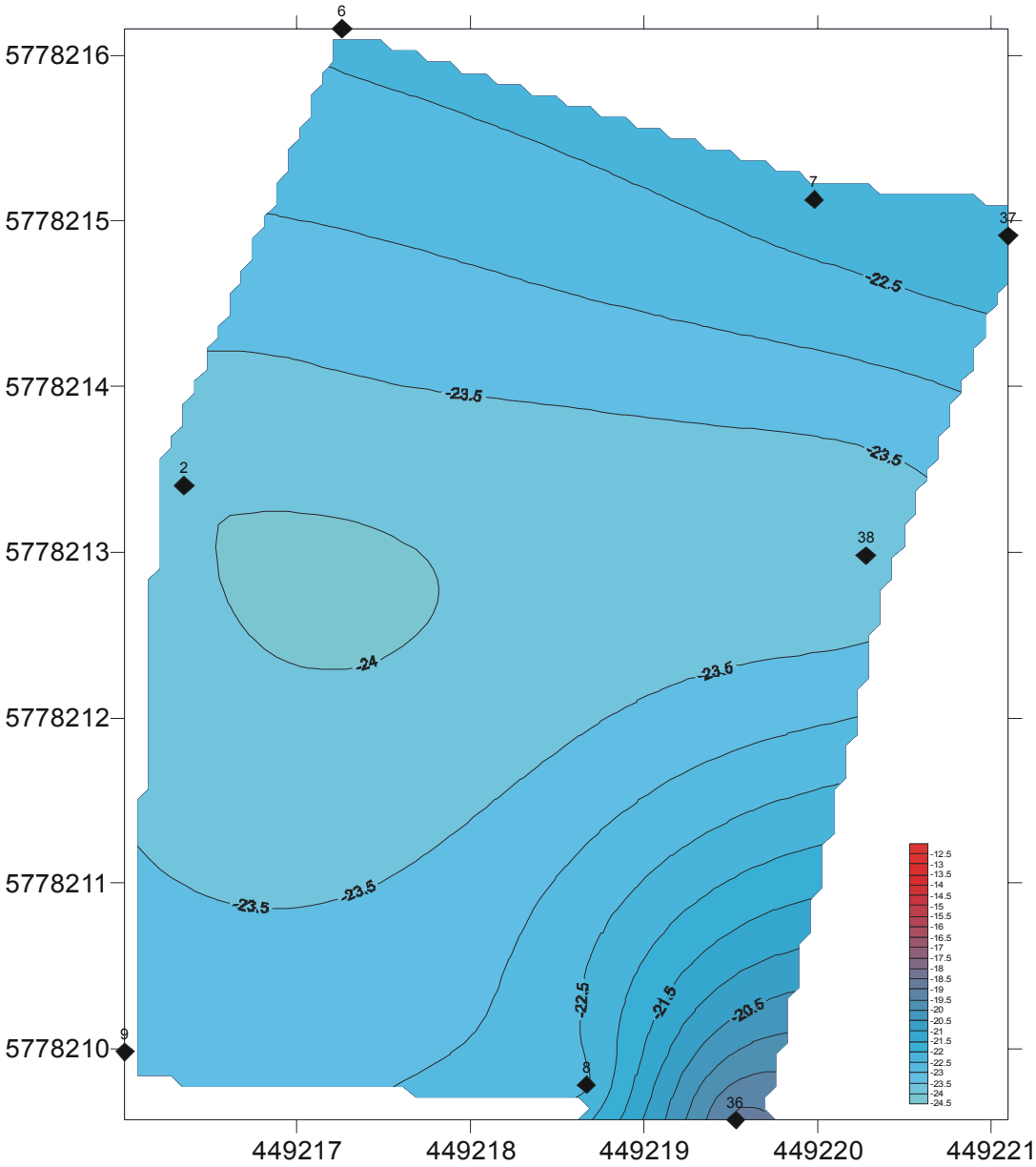


Abb. 5 Isolinienkarte der Sohle/Stöße

Die Isolinienkarte der Sohle/Stöße (Abb. 5) ist geprägt durch geringe Permeabilitätsunterschiede. Die Exponenten der Permeabilitätswerte liegen zwischen –24,5 im Bereich der Sohle und –18 im Bereich des rechten Stoßes.

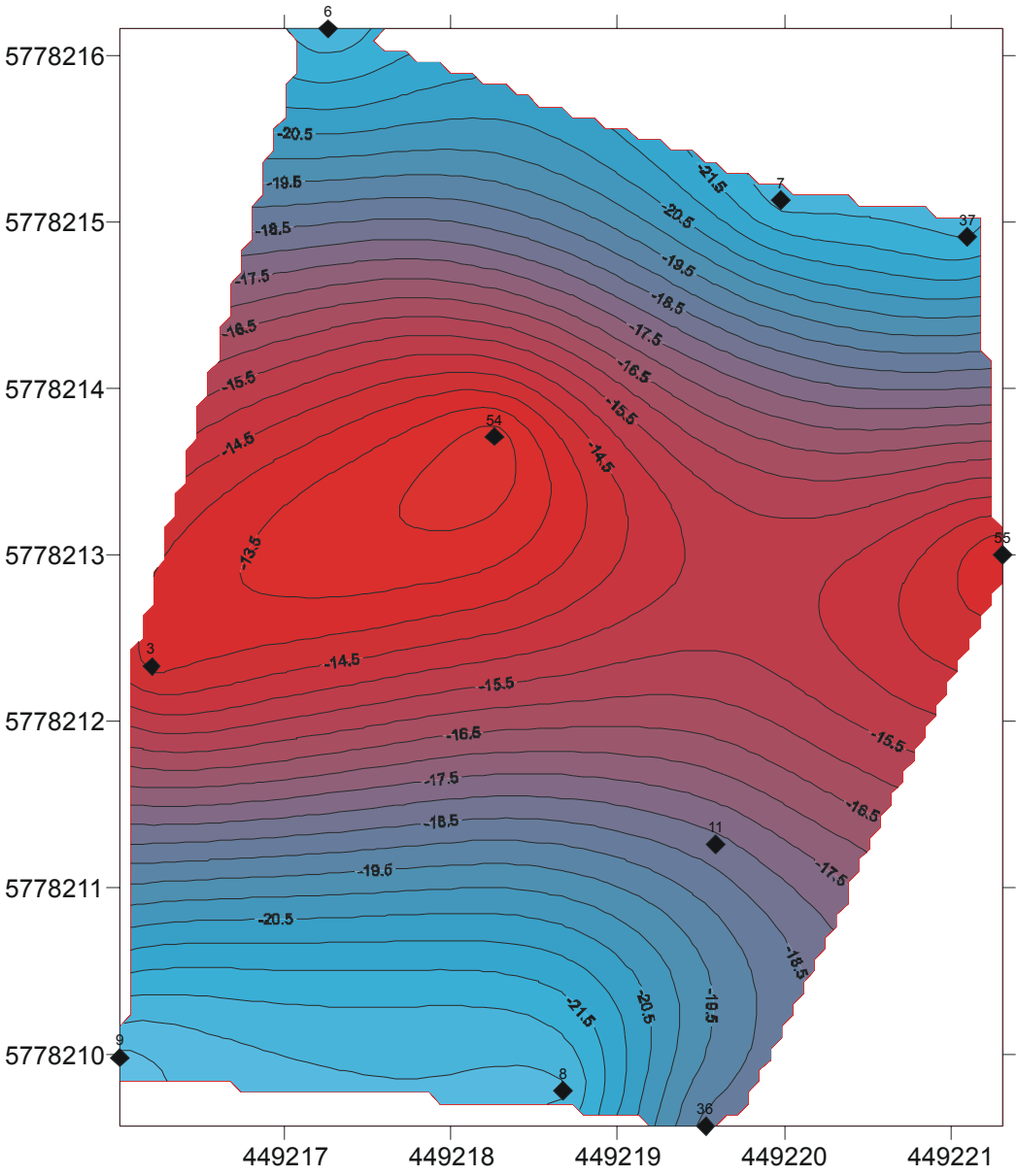


Abb. 6 Isolinienkarte der Firste/Stöße

Die Isolinienkarte der Firste/Stöße (Abb.6) ist geprägt durch zwei größere Komplexe mit extremen Permeabilitätsunterschieden. Beide befinden sich im Firstbereich und besitzen Permeabilitätsexponenten von bis zu –12,7 (entsprechend $k = 2{,}1*10^{-13}\ m^2$).

Ergebnisse

Trotz der geringen Anzahl von Bohrungen (12) konnten die geostatistischen Verfahren auf die Kontaktzone des Asse-Vordamms angewendet werden.

Die geostatistische Auswertung der Permeabilitätseigenschaften, mittels Variographie und Kriging-Interpolationsmethode, steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Ultraschallmessungen (GLÄß et al., 2005), die gemäß Abb. 7 starke Heterogenitäten in der Firste belegen.

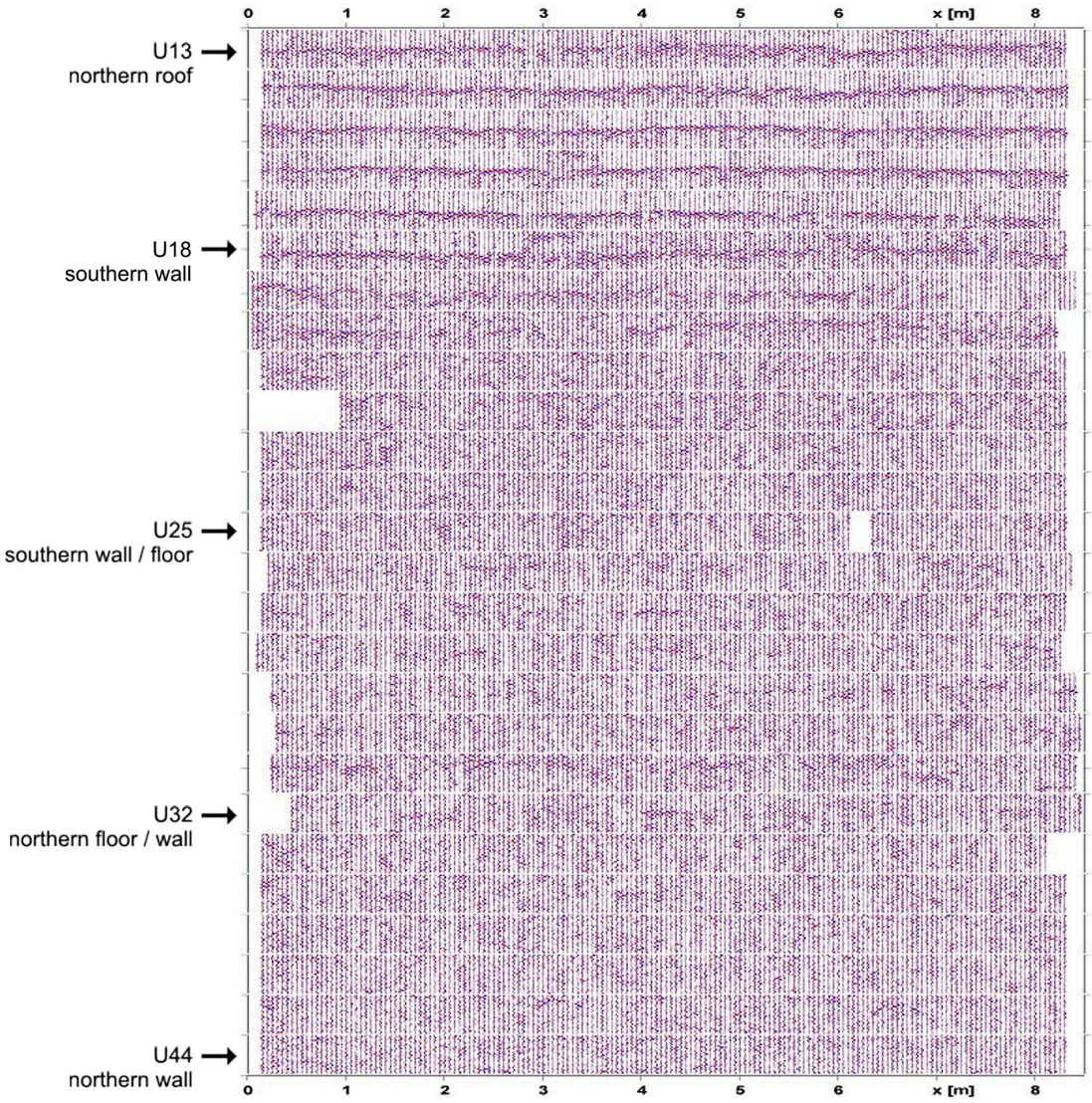


Abb. 7 Ultraschallmessung der Kontaktzone (Gläß et al. 2005)

Literatur

GLÄß, F., MAUKE, R., EILERS, G., PREUSS, J., SCHMIDT, H., LERCH, C., MÜLLER-HOEPPE, N. (2005): Investigation of a salt-concrete seal in the Asse salt mine. – WM´05 Conference, Tucson

KÄSTNER, M. (2004): Qualitätsmodell Kalkstein Bernburg-Nordfeld. – Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg, 202 S., Freiberg [unveröff.]

SCHAFMEISTER, T.-Th. (1999): Geostatistik für die hydrogeologische Praxis. – Springer-Verlag

Danksagung

Wir danken Herrn Holger Schmidt für seine freundliche Hilfe bei der Durchführung der Arbeiten.

Anwendung geostatistischer Verfahren auf Dammbauwerke für Untertagedeponien

Marleen Kästner[1] & Dr.-Ing. Nina Müller-Hoeppe[2]

[1]Institut für Geologie, Universität Hannover, Appelstraße 1.1A, 30167 Hannover
[2]DBE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine

Anwendung geostatistischer Verfahren auf Dammbauwerke für Untertagedeponien

Marleen Kästner[1] & Dr.-Ing. Nina Müller-Hoeppe[2]

[1] Institut für Geologie, Universität Hannover, Appelstraße 11A, 30167 Hannover
[2] DBE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine

Einführung

In dem ehemaligen Salzbergwerk Asse in Remlingen wurden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen durchgeführt. Vor 10 Jahren wurde auf der 945-m-Sohle ein Vordamm als Teil eines Dammbauwerkes errichtet, um die Wirksamkeit einer technischen Barriere für ein späteres Endlager für radioaktive Abfälle zu untersuchen. Die Dauerhaftigkeit von Salzbeton wird bestimmt durch seinen Widerstand gegen das Eindringen aggressiver Substanzen, insbesondere Lösungen. In diesem Zusammenhang sind die Eigenschaften der Kontaktzone des Betons zum Salzgebirge von großer Bedeutung, da Untersuchungen zeigen, dass diese Randbereiche häufig eine höhere Porosität und Permeabilität aufweisen als der Betonkörper.

Ziel des Projektes:

- **Fragestellung: Lassen sich geostatistische Verfahren auf technische Fragestellungen übertragen?**
  Eingangsgrößen: Einzelmessungen von Permeabilitätswerten in der Kontaktzone
  Verwendetes Verfahren: Variographie und Kriging-Interpolation

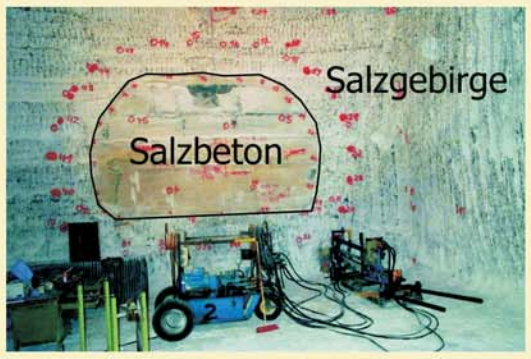
Asse-Vordamm vor der Verfüllung mit Salzbeton

Konstruktionsphase, Einbringen des Salzbetons

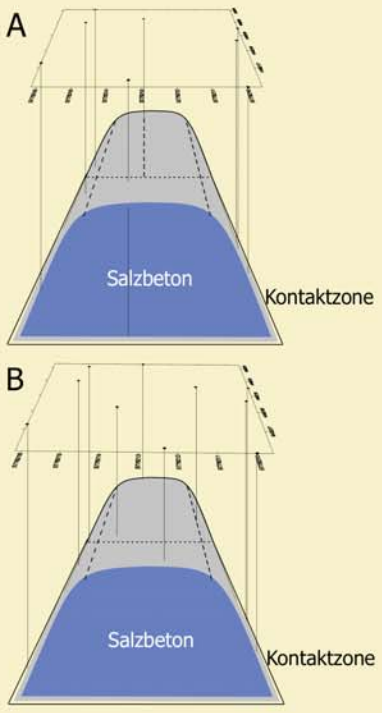
Datenbasis

Für die Modellierung der Kontaktzone des Asse-Vordamms wurden logarithmierte Permeabilitätswerte aus 12 Bohrungen verwendet. Aus Darstellungsgründen wurden zwei Bereiche ausgehalten:

- Sohle / Stöße mit insgesamt 8 Messwerten (A)
- Firste / Stöße mit Insgesamt 10 Messwerten (B)



Salzgebirge und Salzbeton des Asse-Vordamms

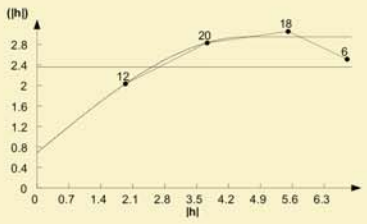


Schematische Darstellung des Asse-Vordamms mit den jeweiligen Bohrungen, A: Sohle / Stöße, B: Firste / Stöße

Variographie

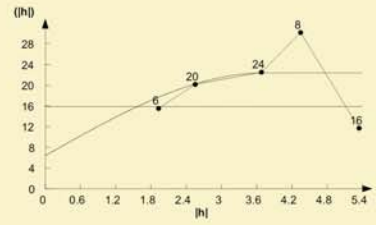
Die Variographie ist ein geostatistisches Verfahren, welches aus punkthaft gemessenen Daten eine Schätzung bzgl. ihres räumlichen Zusammenhanges vornimmt.
Für das Merkmalsfeld der Permeabilitätswerte wurden empirische Variogramme berechnet. Aufgrund der geringen Stützpunktanzahl konnten nur omnidirektionale Variogramme berechnet werden. Anschließend erfolgte die Anpassung eines mathematischen Modells durch die Wahl einer standardisierten Variogrammfunktion, die die beste Approximationsgüte aufweist. Dem angepassten Modell wurden die geostatistischen Parameter Nuggetvarianz, Sill, Reichweite sowie das zugehörige mathematische Funktional für die Wichtungsprozeduren der Kriging Gleichungssyteme entnommen, um für die Stützpunkte eines regelmäßigen Gitters den besten (Kriging-) Schätzer als Durchschnittswert zu berechnen.

Sohle / Stöße



Das Variogramm wurde mit einer sehr guten Anpassungsgüte (0,0045) mit einem sphärischen Modell genähert. Deren Parameter sind: Nuggetvarianz 0,69%, Sill 2,26% und Reichweite 4,6m.

Firste / Stöße

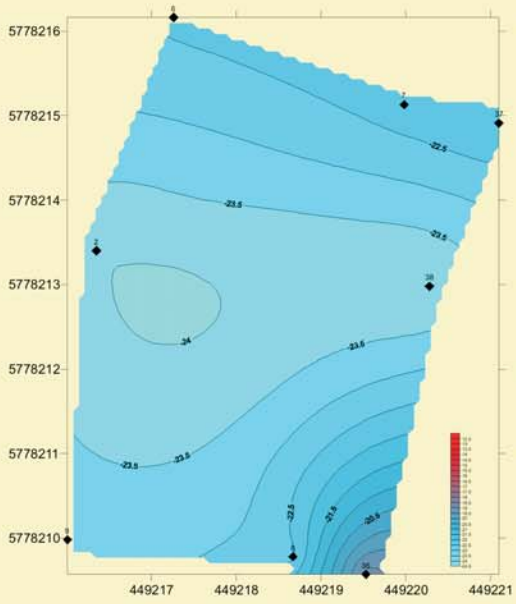


Sphärisches Modell mit einer guten Anpassungsgüte (0,13), Nuggetvarianz 6,40%, Sill 16% und Reichweite 3,72m.

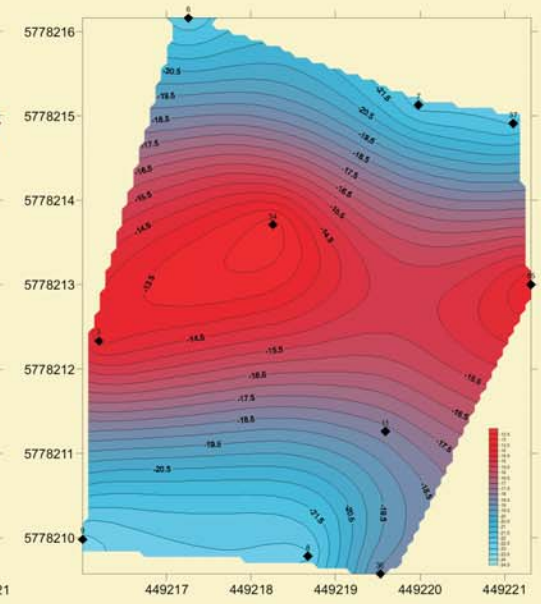
Isolinien- und Blockkarten

Interpolationsverfahren Kriging: Dieses geostatistische Verfahren schätzt auf Grundlage der im Variogramm beschriebenen räumlichen Zusammenhänge die räumliche Verteilung der betrachteten Daten. Kriging ist ein lineares Schätzverfahren, das erwartungstreu und mit Effizienz die Werte an den unbeprobten Orten schätzt.

Isolinienkarten

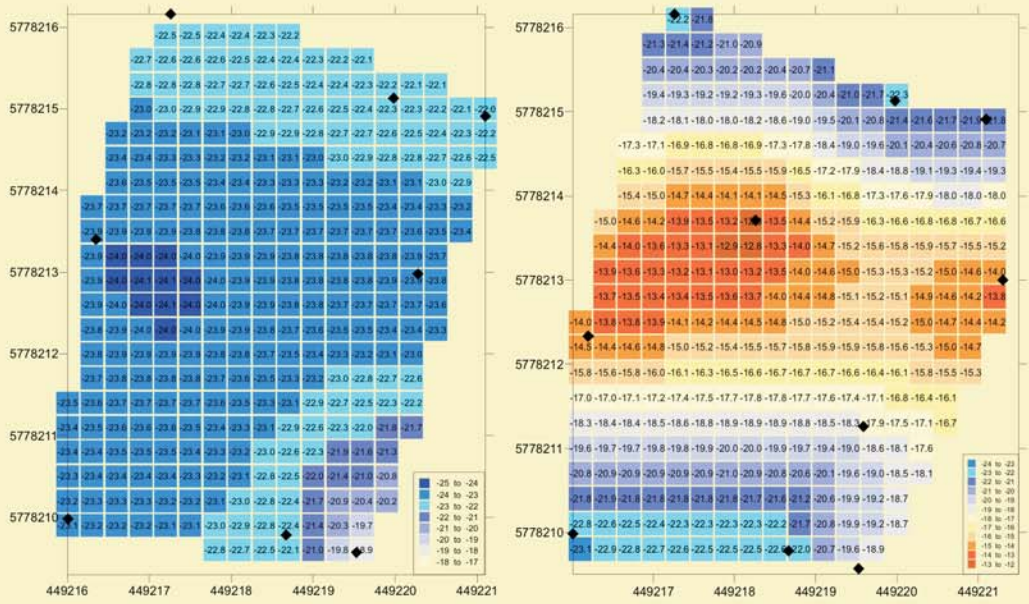


Die Isolinienkarte der **Sohle / Stöße** ist geprägt durch geringe Permeabilitäts-unterschiede. Die Exponenten der Permeabilitätswerte liegen zwischen -24,5 im Bereich der Sohle und -18 im Bereich des rechten Stoßes.



Die Isolinienkarte der **Firste / Stöße** ist geprägt durch zwei größere Komplexe mit extremen Permeabilitätsunterschieden. Beide befinden sich in der Firste und besitzen Permeabilitätsexponenten von bis zu -12,7 (entsprechend $k = 2{,}1 * 10^{-13} m^2$).

Blockkarten



Die Größe der einzelnen Blöcke wurde auf ein einheitliches Äquidistanzmaß von 30 x 30 cm in der Fläche festgelegt.

Anzahl der Blöcke: 303
Mittelwert: -23,10
Minimum: -24,06
Maximum: -18,89
Standardabweichung: 0,79

Anzahl der Blöcke: 312
Mittelwert: -17,85
Minimum: -23,06
Maximum: -12,76
Standardabweichung: 2,83

Ergebnisse

- **Geostatistische Methoden sind auf technische Fragestellungen übertragbar**
  Resultat: hochaufgelöste Isolinien- und Blockkarten der Permeabilitätswerte in der Kontaktzone

Mentoring in Wissenschaft und Wirtschaft

Anhang 3: Zusammenstellung von Ergebnissen zur Auflockerungszone im Salzgestein

Im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbewertung des hydraulischen Widerstandes der (ehemaligen) Auflockerungszone im Steinsalz werden in diesem Anhang die relevanten verfügbaren Informationen zusammengefasst.

Da in Deutschland Salzbergwerke seit langem zur Ablagerung konventioneller chemotoxischer Abfälle dienen, liegen umfangreiche Untersuchungen zur Ausdehnung und Permeabilität von Auflockerungszonen verschiedener Lokationen, vorzugsweise im Steinsalz, vor /94/.

In /94/ ist eine Literaturrecherche enthalten, die den Stand der Forschung bezüglich der Permeabilität zu Auflockerungszonen um Hohlräume im Steinsalz darstellt. Die Größe einer Auflockerungszone im Steinsalz hängt wesentlich von

- der Hohlraumgröße bzw. der Größe des Hohlraumquerschnittes,
- der Hohlraumgeometrie (z. B. sind Rechtecke ungünstiger als Kreise oder Ellipsen),
- dem Auffahrverfahren (Sprengvortrieb oder Schneiden mittels Teilschnittmaschine),
- der Standzeit des offenen Hohlraums und
- der Teufenlage

ab. Ein Ergebnis dieser Recherche ist der Befund, dass die Ausdehnung der Auflockerungszonen im Bereich von wenigen Dezimetern bis hin zu wenigen Metern reicht, wobei lediglich bei großen Abbaukammern und bei solchen, die vornehmlich durch Bohren und Sprengen aufgefahren worden sind, mit Auflockerungszonen zu rechnen ist, die die Größe von maximal 1 - 2 m überschreiten. Die Ausdehnung der Auflockerungszone ist u. a. zeitabhängig. Nach mehreren Monaten Standzeit einer offenen Strecke vergrößert sich die Auflockerungszone im Vergleich zu Standzeiten von Jahrzehnten allerdings nicht mehr wesentlich /94/.

Messwerte der Permeabilität sind beispielhaft in Abbildung 60 und Abbildung 61 in Abhängigkeit ihrer Entfernung von der Kontur bezogen auf einen äquivalenten Radius dargestellt, der sich wie folgt errechnet, wobei anzumerken ist, dass mit gutem Ergebnis für Einzelfälle auch Anpassungen an äquivalente Ellipsen erfolgen /94/:

$$R_{äqu} = \sqrt{\frac{A_{Streckenquerschnitt}}{\pi}} \qquad \text{(A 3-1)}$$

Die Permeabilitätswerte in Abbildung 60 beziehen sich auf die WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) in den USA. Die Daten sind bereits etwas älter und stammen aus einer Zeit, als die Messung von Permeabilitätswerten kleiner 10^{-20} m² bis 10^{-21} m² noch nicht möglich war. Die Messwerte in Abbildung 61 stammen von verschiedenen Steinsalzlokationen in der Grube Glückauf Sondershausen und wurden zu Zeitpunkten ermittelt, als die Messung sehr geringer Permeabilitätswerte technisch bereits möglich war. Trotzdem zeigt der Vergleich von Abbildung 60 und Abbildung 61 das typische Permeabilitätsverhalten, das sich praktisch gleicht und auch für andere Steinsalzlokationen gilt, die hier nicht dargestellt sind.

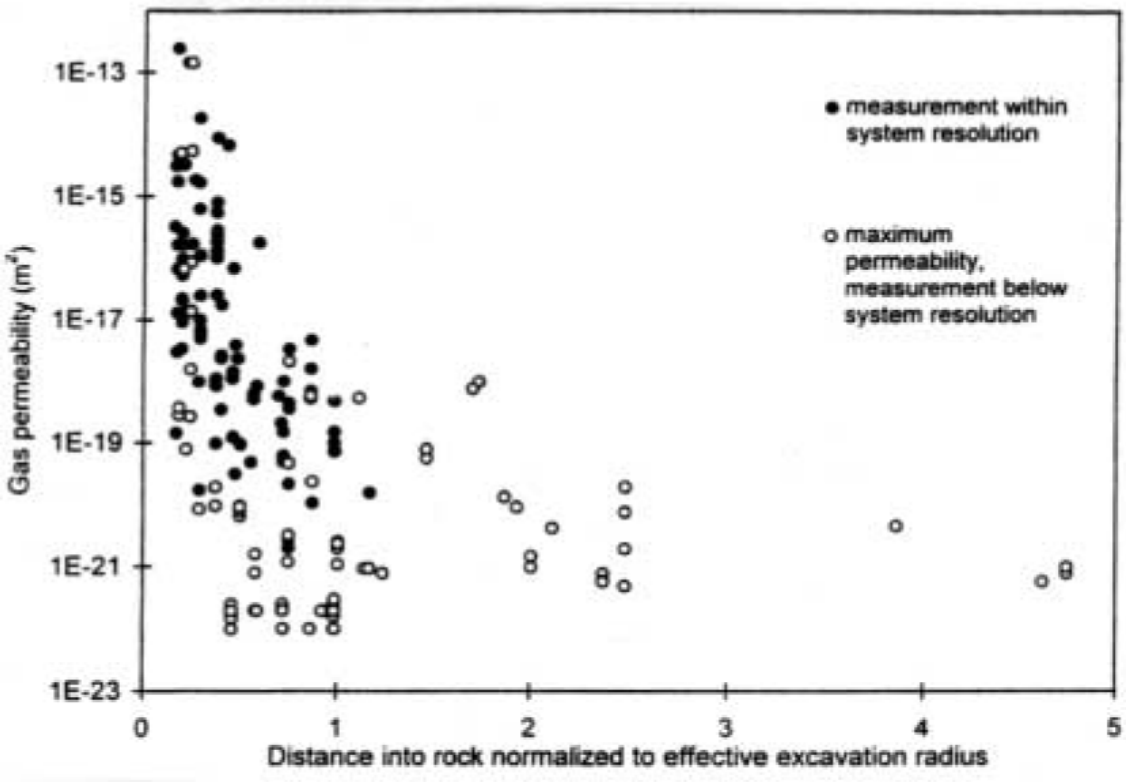


Abbildung 60: Auswertung von Stormont gemessenen Permeabilitäten aus der WIPP /94/

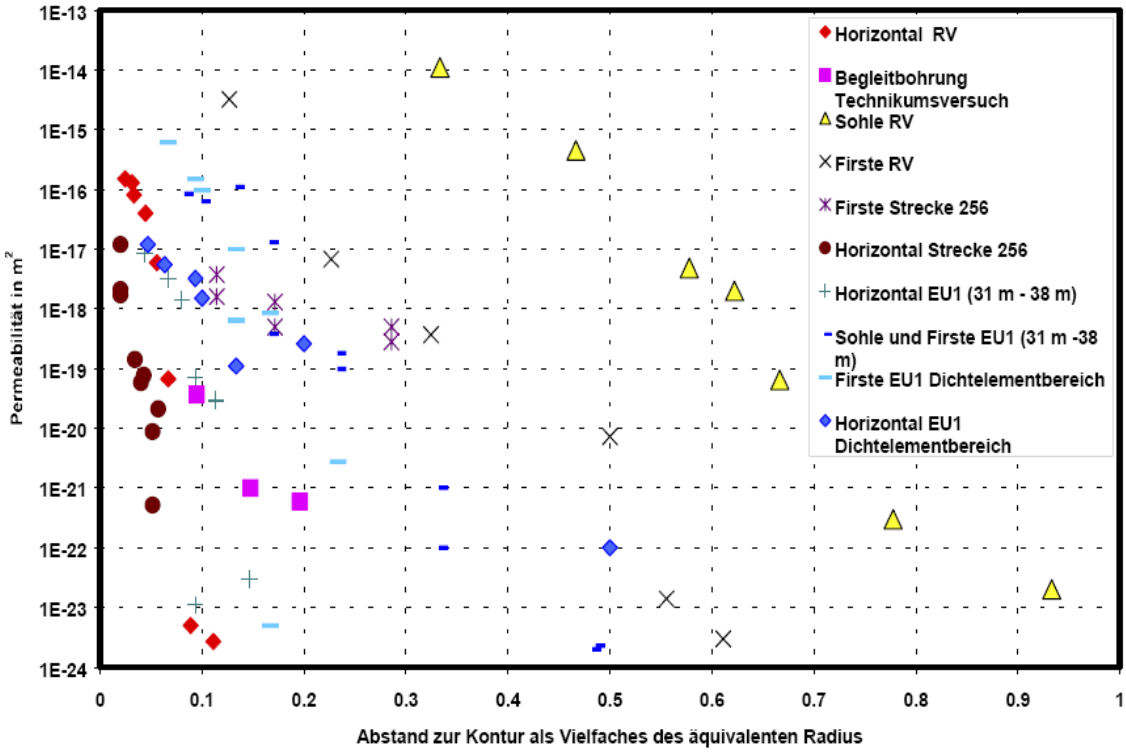


Abbildung 61: Auswertung gemessener Permeabilitäten verschiedener Lokationen in Glückauf Sondershausen in Deutschland /94/

Wie in /66/ beschrieben, kann die Permeabilität der Auflockerungszone durch einen Exponentialansatz beschrieben werden. Der Ansatz mit den Parametern a [1/m] und b[-] ermöglicht eine Extrapolation auf die Permeabilität k [m²] an der Kontur, wobei anzumerken ist, dass für den Konturbereich kleiner ~5 cm keine Messwerte vorhanden sind. Auf Grund des logarithmischen Zusammenhangs wird zur Normierung eine Einheitspermeabilität k* = 1,0 m² eingeführt, so dass gilt

$$k/k^* = e^{ar+b} \qquad \text{(A 3-2)}$$

Die Entwicklung der Auflockerungszone erfolgt zeitabhängig, vgl. Abbildung 62. Bei dem Beispiel in Abbildung 62 handelt es sich um eine kreisrunde Strecke in der Grube Glückauf Sondershausen, die im Vollschnitt erstellt war und deren freie Standzeit 27 Jahre betrug. Nach gebirgsschonendem Nachschnitt wurden zunächst geringere Permeabilitäten ermittelt, die jedoch bereits nach zwei Jahren Standzeit (Zustand nach Rückbau des Versuchsbauwerks) wieder das alte Niveau vor dem Konturschnitt erreichten. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die mit dem Konturnachschnitt einhergehende Veränderung des Spannungs- und Verformungszustandes relativ schnell die Wiederherstellung der ursprünglichen Permeabilität bewirkt. Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass zwischen einer Standzeit von 2 und 27 Jahren keine wesentlichen Veränderungen mehr auftreten.

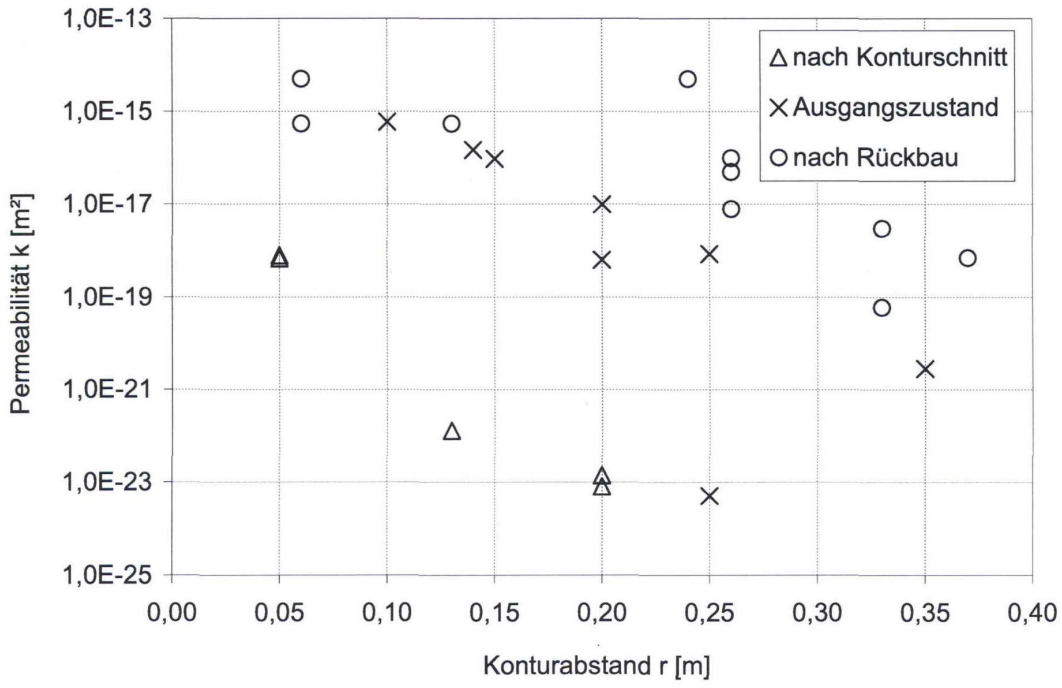


Abbildung 62: Gemessene Permeabilitäten über den Konturabstand nach dem Nachschnitt und nach längerer Standzeit nach Voigt et al. in /66/

Im Hinblick auf die Erstellung von Streckenverschlüssen ist nunmehr von Interesse, in welchem Zeitraum sich die Auflockerungszone ausbildet und ob es möglich ist, durch den zeitnahen Einbau stützender Elemente die Ausbildung einer Auflockerungszone zu verhindern oder sie zumindest möglichst gering zu halten. Dazu wurden exemplarisch Untersuchungen durchgeführt, die Entwicklung einer Auflockerungszone mit Hilfe von akusti-

schen Verfahren über die Rissbildungsrate zu erfassen. Am Beispiel einer neu mit Sprengvortrieb aufgefahrenen Strecke in 760 m Teufe (Sonderhausen, Messort Strecke 256), deren Höhe ca. 5 m und deren Breite ca. 8 m betrug, wurde der Einsatz akustischer Messverfahren erprobt. Das Ergebnis des Einsatzes akustischer Messverfahren lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die akustische Emission reagierte sehr empfindlich auf die Bildung und das Wachstum von kleinsten Rissen, die noch zu keinen Permeabilitätsveränderungen führten, wie begleitende Permeabilitätsmessungen zeigten.
- Bei den Rissen handelt es sich nicht nur um Scherbrüche.
- Die Ausdehnung der Auflockerungszone am Stoß betrug nach 1 Tag 39 cm, nach 3 Tagen 59 cm und nach 7 Tagen 78 cm, ein Wert, der auch nach einem Monat, dem Zeitpunkt am Ende der akustischen Emissionsmessungen, noch gültig war.
- Es wird auf eine gute Übereinstimmung mit direkten Permeabilitätsmessungen, die nach 7, 25 und 95 Tagen durchgeführt wurden, in Bezug auf die räumliche und zeitliche Entwicklung der Auflockerungszone verwiesen, ohne dass diese Werte allerdings in /95/ angegeben sind.

Auf Grundlage der akustischen Emissionsmessungen wird vorgeschlagen /95/, das räumliche und zeitliche Verhalten der Auflockerungszone mit folgendem Ausdruck zu beschreiben:

$$\textit{Auflockerungsgrad} \propto e^{-ax}\left[1-e^{-bt}\right] \qquad \text{(A 3-3)}$$

Die Konstanten a und b hängen in erster Linie von der Geometrie des Hohlraums und der Auffahrungstechnologie ab. Für den westlichen Stoß der Strecke 256 ergaben sich aus den Parametern der akustischen Emission folgende Werte

$a = 1{,}5\ m^{-1}$ und $b = 35\ h^{-1}$

Die Beziehung A 3-3 gilt für bisher realisierte Beobachtungszeiträume von wenigen Monaten, d. h. für Zeiträume, in denen Streckenverschlüsse eingebaut werden. Langzeitvorhersagen erlaubt Gl. A 3-3 nicht /95/.

Die o. a. Ergebnisse zeigen, dass sich die Entstehung einer Auflockerungszone nicht vermeiden lässt. Durch eine günstige Formgebung, ein schonendes Nachschneideverfahren und kurze freie Standzeit kann die Ausdehnung einer Auflockerungszone und ihre Permeabilität jedoch günstig beeinflusst, d. h. verringert werden.

Wie bereits in Kapitel 4.4.7.3 ausgeführt, zeigt eine (ehemalige) Auflockerungszone sehr geringe Permeabilitätswerte, wenn ausreichend lange das Fluidkriterium erfüllt war. Diese Ergebnisse werden durch das FuE-Vorhaben ALOHA II bestätigt /85/. Im Rahmen des Projektes ALOHA II wurden Auflockerungszonen um Strecken im Steinsalz untersucht. In Abbildung 63 sind Ergebnisse von Permeabilitätsmessungen dargestellt, die an einer offenen Strecke und einer Strecke erzielt wurden, in die bereits 1911 ein stählernes Dammjoch eingesetzt und mit Beton hinterfüllt wurde. Abbildung 63 zeigt deutlich die sehr niedrigen

Permeabilitätswerte in der mit dem Dammjoch ausgebauten Strecke, die, auch wenn sie noch nicht die Werte von intaktem Steinsalz erreicht haben, sehr niedrige Permeabilitätsanforderungen erfüllen und somit die Messergebnisse am ASSE-Vordamm bestätigen.

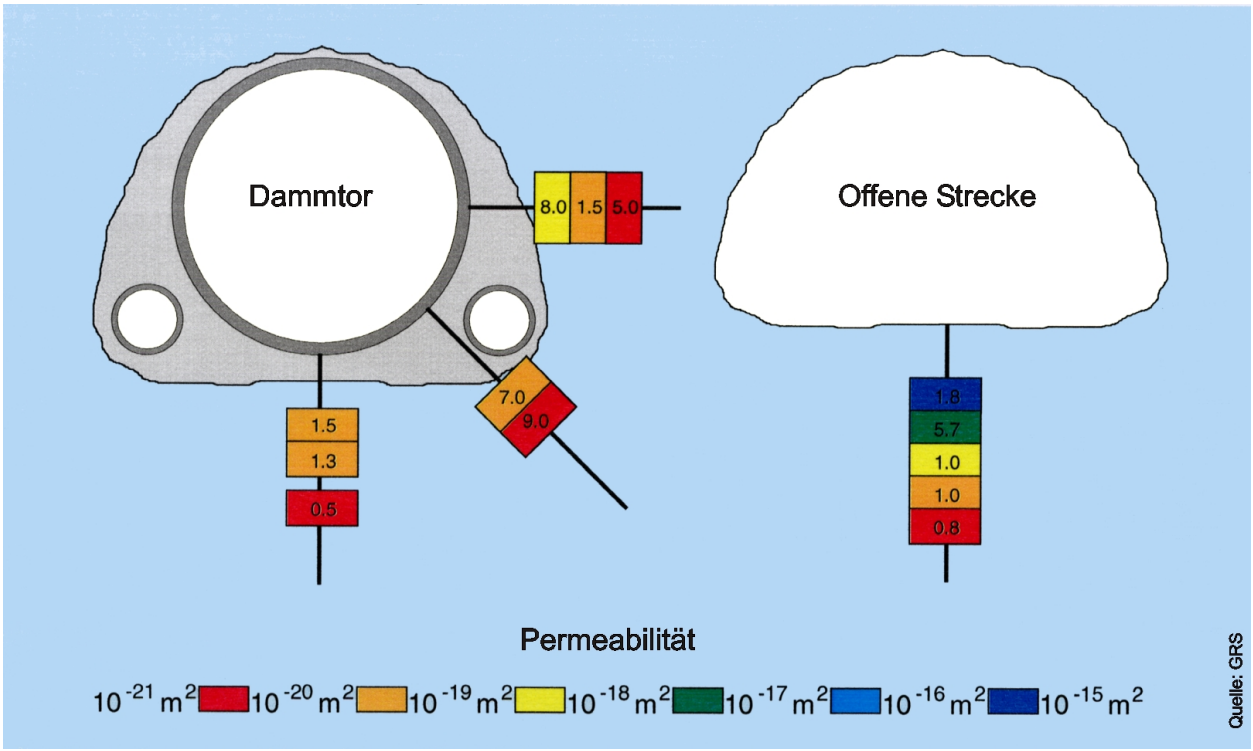


Abbildung 63: Ergebnisse von in situ Permeabilitätsmessungen am Dammtor und in vergleichbarer offener Strecke /85/

Allerdings zeigen Untersuchungen an Steinsalzbohrkernen, die aus dem Bereich des Dammjochs gewonnen wurden, dass die geringe Permeabilität auf das Zudrücken von Rissen zurückzuführen ist und nicht auf eine Verheilung im Sinne einer Rekristallisation. D. h. das zum Zeitpunkt der Bohrkerngewinnung mehr als 90 Jahre dauernde Aufkriechen des Salzes hat zwar zu einem Zudrücken, d. h. einer Rissschließung geführt, jedoch nicht zu einer Verheilung. Das Ergebnis, dass bereits eine Rissschließung zu sehr geringen Permeabilitäten führen kann, ist durch Laborversuche bestätigt.

Ob und unter welchen Bedingungen dieser Prozess reversibel ist, ist der derzeit offen und Gegenstand von FuE. Bis das Gegenteil bewiesen ist, muss von der Reversibilität der Rissschließung der Auflockerungszone ausgegangen werden. Somit muss das Fluidkriterium zuverlässig erfüllt sein, d. h. der Zuverlässigkeitsnachweis für die ehemalige Auflockerungszone kann nur standortspezifisch (im Hinblick auf die zu berücksichtigenden Zuflussszenarien) und lokationsspezifisch (im Hinblick auf das Aufkriechen des Salzes und den Spannungsaufbau in der ehemaligen Auflockerungszone) erfolgen, ein Sachverhalt der unter ingenieurtechnischer Sicht unbefriedigend ist.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis des FuE-Vorhabens ALOHA II, das an dieser Stelle genannt werden soll, ist, dass die Ausdehnung der Auflockerungszone rechnerisch auf Grundlage der spannungsbasierten Dilatanzbedingung gut prognostizierbar ist.