

Projekt VerSi

Endlagerung im Tonstein

Abschlussbericht zum
Vorhaben 3607R02538
„Untersuchung aktueller
planerischer Grundsatzfragen
zur Endlagerung radioaktiver
Abfälle in tiefen geologischen
Formationen“

Entwicklung eines
synthetischen
Tonsteinstandortes

Teil 2:
Standortcharakterisierung

Projekt VerSi

Endlagerung im
Tonstein

Abschlussbericht zum
Vorhaben 3607R02538
„Untersuchung aktueller
planerischer Grundsatzfragen
zur Endlagerung radioaktiver
Abfälle in tiefen geologischen
Formationen“

Entwicklung eines
synthetischen
Tonsteinstandortes

Teil 2:
Standortcharakterisierung



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Projekt VerSi

Endlagerung im Tonstein

Abschlussbericht zum Vorhaben
3607R02538 „Untersuchung aktuel-
ler planerischer Grundsatzfragen
zur Endlagerung radioaktiver Abfälle
in tiefen geologischen Formationen“

Entwicklung eines synthetischen
Tonsteinstandortes

Teil 2:
Standortcharakterisierung

J. Larue

Dezember 2010

Auftrags-Nr.: 835650

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde lie-
gende FE-Vorhaben 3607R02538
wurde im Auftrag des Bundesmini-
steriums für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit durchgeführt.
Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt beim
Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und
Meinung des Auftragnehmers wie-
der und muss nicht mit der Meinung
des Auftraggebers übereinstimmen

GRS - A - 3535/2

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht beinhaltet den Teil 2 der Ergebnisse des Vorhabens 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ in Bezug auf die Charakterisierung eines alternativen Tonsteinstandortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle.

In Zusammenarbeit mit dem BfS erfolgte in diesem Bericht eine Zusammenstellung von Geodaten für einen generischen Tonsteinstandort. Hierzu wurden, soweit wie möglich, reale Standortdaten eines Tonsteinstandortes aus bestehenden Datensätzen herangezogen. Für den synthetischen Tonsteinstandort wurde darüber hinaus auf Basis nationaler und internationaler Erfahrungen und Analogieschlüsse ein Entwurf einer hydrogeologischen Modellvorstellung entwickelt, die als Grundlage der Arbeiten in den anderen Vorhaben im Projekt VerSi Verwendung diene.

Abstract

This report contains the results of work performed in project 3607R02538 in relation to the characterization of an alternative repository for heat generating nuclear waste in a clay formation.

In this Report a collection of geo-data for a generic site in a clay formation was generated in cooperation with BFS. Real data from existing sites in clay formations were used when available. A hydrogeological model was developed for the generic repository site based on national and international experiences. These results were used as a foundation for the work in other work packages of the VerSi project.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Synthetischer Tonsteinstandort	3
2.1	Grundlagen	3
2.2	Geologie	6
2.2.1	Geologische Übersicht	6
2.2.1.1	Fazies und Schichtenfolge des Niedersächsischen Beckens	8
2.2.1.2	Tektonik	11
2.2.2	Geologische Standortbeschreibung	13
2.3	Geologische Langzeitprognose	19
2.3.1	Klimaentwicklung	19
2.4	Hydrogeologie	24
2.4.1	Hydrogeologischer Überblick zum Norddeutschen Tiefland	24
2.4.1.1	Grundwasservorkommen	24
2.4.1.2	Heutiges Klima, Grundwasserneubildung und Grundwasserabstrom	26
2.4.1.3	Hydraulische Durchlässigkeit der Tonsteine	27
2.4.2	Hydrogeologie der Standortregion	29
2.4.3	Porenwasserüberdrücke in Tonsteinen	31
2.5	Hydrochemie	32
2.5.1	Tiefenwässer des Norddeutschen Tieflands	32
2.5.2	Hydrochemie der Standortregion	35
2.5.2.1	Sorption	36
2.6	Hydrogeologische Modellbildung	39
2.6.1	Bemessung des Modellgebietes	41
2.6.2	Abstraktion und Schematisierung des Systems	44
2.6.3	Hydraulische Parameter	46
2.6.4	Erstellung eines mathematischen (numerischen) Modells	51
2.6.4.1	Modellränder und Randbedingungen	51
2.6.5	Modellparameter für das Programm Spring	52
2.6.6	Hydrogeologische Modellrechnung zur Definition der Randbedingung	53

3	Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)	60
3.1	Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	60
3.2	Berechnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs am synthetischen Tonsteinstandort	73
3.3	Zusammenstellung weiterer relevanter Prozesse zur Bewertung der Wirksamkeit des ewG	79
3.3.1	Permeabilität der Auflockerungszone	79
3.3.2	Selbstabdichtung der Klüfte in den Auflockerungszonen (EDZ)	79
3.3.3	Verschlusssysteme	80
3.3.4	Unentdeckte hydraulisch wirksame Diskontinuität in wenigen Metern Entfernung parallel zu Umfahungsstrecken im ewG	84
4	Zusammenfassung	94
5	Literatur/Unterlagen	95
	Abbildungsverzeichnis	102
	Tabellenverzeichnis	106
	Abkürzungsverzeichnis	107

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Verbundprojekt VerSi wird eine Methodik zum Vergleich von Endlagerstandorten für wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall entwickelt. Die Vorgehensweise baut für das Projekt VerSi auf der Arbeitsthese auf, dass die zu vergleichenden Endlagerstandorte für sich genommen unter Berücksichtigung aller Anforderungen genehmigungsfähig sind.

Die Vergleichsmethodik soll am Beispiel des Vergleichs von zwei Standorten mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Salz und Tonstein) getestet werden. Als einer der zu vergleichenden Standorte wurde zunächst der Standort Gorleben gesetzt, da dieser dem politischen Willen nach mit alternativen Standorten zu vergleichen ist¹. Die Annahme für das Projekt VerSi, dass der Standort Gorleben genehmigungsfähig sei, ist eine Arbeitsthese wie sie auch für den alternativen Standort im Tonstein gilt. Für die Entwicklung einer Vergleichsmethodik sollen somit für die Endlagersysteme (Standorte) vergleichbare Ausgangsbedingungen angenommen werden.

Die Auswahl des alternativen Standorts engt sich aufgrund bergtechnischer Erfordernisse zur Errichtung und Betrieb eines Endlagers auf Tonsteine ein. Entsprechende Tonstein-Formationen sind sowohl in Nord- als auch in Süd-Deutschland bekannt /BGR 07/. Allerdings wurden die entsprechenden Standorte bisher nicht unter dem Aspekt der Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht. Insofern liegen für einen Tonsteinstandort keine bzw. kaum geologische und hydrogeologische Daten vor, die einen Vergleich mit Gorleben auf Augenhöhe zulassen. Aufgrund der im Vergleich zum Standort Gorleben schlechteren Datengrundlage für Standorte im Tonstein, wird deshalb in diesem Bericht (Teil 2: Standortcharakterisierung) für das Vorhaben 3607R02538 ein so genannter synthetischer Tonsteinstandort für den angestrebten Vergleich entwickelt.

¹ Ein Standortvergleich war zu Beginn des Projektes erklärtes Ziel des Umweltministeriums. Mit Beginn der 17. Legislaturperiode erfolgte ein Paradigmenwechsel, demzufolge zunächst die Erkundung des Standortes Gorleben abzuschließen ist.

Der AkEnd /AKE02/ hat in seinen geowissenschaftlichen Kriterien Anforderungen und Abwägungskriterien an einen geeigneten Endlagerstandort in Tonstein formuliert. Um einen Tonsteinstandort für das Verbundprojekt „VerSi“ sinnvoll zu charakterisieren, wurden von der GRS auf Basis dieser Anforderungen des AkEnd und eines GRS-Entwurfs von Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen /GRS 07/ (s. hierzu auch Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 09/) eine Liste der erforderlichen Parameter beschrieben, die für eine sicherheitsanalytische Modellierung notwendig sind.

In Teil 1 „Randbedingungen und Anforderungen an einen Tonsteinstandort“ des Berichts „Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ /GRS 10b/ formuliert die GRS darüber hinaus notwendige Informationen über den Standort (z. B. bezüglich Temperaturverträglichkeit, hydrochemische Verhältnisse), die bei der weiteren Differenzierung des Standortes zu berücksichtigen sind. Es werden Methoden der übertägigen Erkundung beschrieben und ihre Anwendbarkeit auf die aufgestellten Kriterien überprüft und bewertet. Dabei wird für die vergleichende Methodik des Projekts VerSi insbesondere der Vertrauensgrad zu den Daten, über die Messgenauigkeit der Erkundungsmethode als auch hinsichtlich des Upscaling der Messdaten in Raum und Zeit, eruiert und bewertet. Sie sind Grundlage einer Bewertungsmatrix zur Abwägung, die im Vorhaben 3607R02589 (Evaluierung der Vorgehensweise) /GRS 10c/ entwickelt wird.

In dem hier vorliegenden Teil 2 „Standortcharakterisierung“ des Berichts „Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ /GRS 10b/ erfolgt in Zusammenarbeit mit dem BfS eine Charakterisierung eines Tonsteinstandorts über eine Zusammenstellung von Geodaten für einen Standort auf generischer Basis. Hierzu wurden, soweit wie möglich, reale Standortdaten aus bestehenden Datensätzen herangezogen. Basis der Arbeiten sind ein Entwurf zum synthetischen Tonsteinstandort und die vom BfS bereitgestellten Daten /BFS 07/. Sie wurden von der GRS auf Plausibilität des geologisch sinnvollen Zusammenhangs geprüft. Eine weitere Differenzierung der Daten und ein Auffüllen eventuell identifizierter Datenlücken wurde durch die GRS, soweit möglich, vorgenommen. Die Zusammenstellung der verfügbaren Daten und geologische Informationen dient der Erarbeitung einer geologischen Modellvorstellung für den generischen Tonsteinstandort, die in eine Standortcharakterisierung übertragen wurde. Sie findet u. a. Verwendung in der in /GRS 10a/ beschriebenen Szenarienermittlung. Für den generischen Tonsteinstandort wird darüber hinaus nachfolgend auf Basis nationaler und internationaler Erfahrungen eine hydrogeologische Mo-

dellvorstellung entwickelt, die als Grundlage der Arbeiten im Vorhaben WS 2044 Verwendung findet.

Weiterhin wird aufbauend auf dem synthetischen Standort im Teil 3 „Endlagerkonzept im Tonstein“ des Berichts „Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ /GRS 10b/ ein Endlagerkonzept auf Basis des Konzepts der Schweiz /NAG 02a/ entwickelt, das für die Entwicklung der Vergleichsmethodik hinsichtlich der Beschreibung der Sicherheitsfunktionen eines Endlagers im Tonstein eine Grundlage für die weiteren Vorhaben 3607R02580 (Entwicklung von Szenarien), 3607R02589 (Evaluierung der Vorgehensweise) und WS 2044 (Langzeitsicherheitsanalysen für den Vergleich von Endlagersystemen) darstellt. Im Teil 4 „Modellkonzept für ein Endlager im Salz“ werden das Endlagerkonzept für ein Endlager im Salz und die sich daraus ergebenden Eingangsdaten der Endlagergeometrie für die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen im WS 2044 beschrieben

2 Synthetischer Tonsteinstandort

2.1 Grundlagen

Aufgrund der im Vergleich zum Wirtsgestein „Salz“ schlechteren Datengrundlage für Standorte im Wirtsgestein Tonstein in Deutschland (für keinen Tonsteinstandort in Deutschland ist bisher eine ausreichende Datengrundlage für die Durchführung einer Sicherheitsanalyse vorhanden) wird im Rahmen des Verbundvorhabens VerSi ein sogenannter „synthetischer“ Standort entwickelt. Dieser synthetische Tonsteinstandort wird im weiteren Verlauf des Projekts beispielhaft für die Methodenentwicklung dem Standort Gorleben gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung von vorliegenden Studien, u.a. der BGR /BGR 07/, sowie der vom AkEnd vorgeschlagenen Kriterien zur Standortauswahl /AKE 02/ wurde festgelegt, den Tonsteinstandort auf Basis der verfügbaren Datengrundlage zu Unterkreidetonsteinen in Norddeutschland zu synthetisieren. Der synthetische Tonsteinstandort in Norddeutschland gewährleistet, dass er hinsichtlich seiner zukünftigen geologischen Entwicklung vergleichbaren äußeren Prozessen ausgesetzt sein wird, wie sie auch für den Standort Gorleben angenommen werden können.

Auf Basis der Untersuchungen der Tonstudie der BGR /BGR 07/, die Tonsteinverbreitungen in der Bundesrepublik ausweist, welche den endogenen und geometrischen Anforderungen des AkEnd-Verfahrens /AKE 02/ sowie weiteren internationalen und von der BGR vorgegebenen Kriterien genügen, wurde nach einer internen Projektdiskussion eine regionale Standortvorauswahl in Norddeutschland durchgeführt. Die Verbreitung von Tonsteininformationen, die nach Anwendung der in /BGR 07/ beschriebenen Kriterien verbleiben und als untersuchungswürdig bewertet werden, liegen u. a. in Norddeutschland in einem Ost-West gerichteten lückenhaften Streifen vom Raum Enschede bis in die Region von Braunschweig / Wolfsburg (s. Abb. 2.1).

Zur weiteren Einengung auf eine Region, für die ein Tonsteinstandort festgelegt werden soll, wurde in /BFS 07/ eine Studie von GOLDER /GOL 06/ herangezogen. Das Ziel der Studie war es, zuverlässige Datengrundlagen für ein Standortauswahlverfahren entsprechend des AkEnd-Verfahrens zu identifizieren und zu bewerten. Auf Basis der in /GOL 06/ definierten Studienräume und den dazu jeweils identifizierten Datengrundlagen wurde die mögliche Standortregion eingegrenzt.

Bei der Entwicklung des Standortes wurde des Weiteren die Tonstudie der BGR für eine regionale Vorauswahl zur Platzierung des Standortes herangezogen /BGR 07/. Darüber hinaus muss der synthetische Standort auch den geometrischen Anforderungen u. a. nach dem vom AkEnd /AKE 02/ vorgeschlagenen Verfahren und den darin zu berücksichtigenden Kriterien, bzw. den Anforderungen aus dem vorgeschlagenen Endlagerkonzept /PEI 09/ genügen.

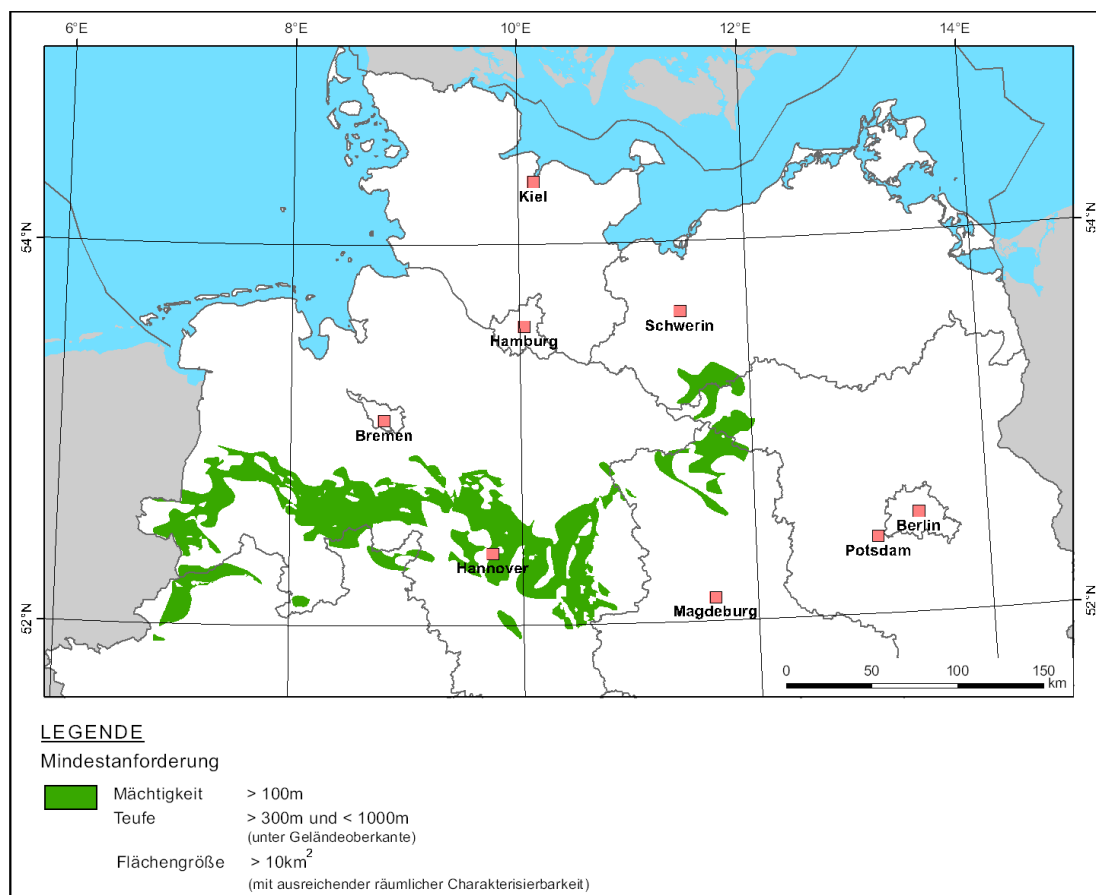


Abb. 2.1: Unterkreide Tonsteinvorkommen (grün) in Norddeutschland, die die Auswahlkriterien der BGR Mächtigkeit und Teufenlage erfüllen (aus /BGR 07/).

Vom BfS wurde unter Berücksichtigung der oben genannten Ergebnisse der Studien /GOL 06/ und /BGR 07/ sowie der vom /AKE 02/ vorgeschlagenen Kriterien zur Standortauswahl festgelegt, den Tonstandort auf Basis der verfügbaren Datengrundlage zu Unterkreidetonsteinen in Norddeutschland (s. Abb. 2.1, aus /BGR 07/) zu synthetisieren.

Dabei wird vom BfS betont, dass es sich bei dem im Folgenden charakterisierten synthetischen Standort nicht um einen realen Standort, sondern um eine geowissenschaftlich möglichst sinnvoll und plausibel konstruierte geologische Situation handelt, die sich an den geologischen Gegebenheiten der Unterkreideformationen Norddeutschlands ausrichtet. Eine genaue Lokalisierung der beschriebenen Situation ist nicht möglich und im Rahmen des Projektes auch nicht notwendig, da die beiden

Standorte (Gorleben und synthetischer Tonsteinstandort) einer Methodenentwicklung und nicht dem realen Vergleich der Standorte selbst dienen.

2.2 Geologie

2.2.1 Geologische Übersicht

Der synthetische Tonsteinstandort befindet sich im zentralen Niedersächsischen Becken, einem Sedimentationsbecken, welches im Süden von Norddeutschland gelegen ist (s. Abb. 2.1). Das Ost-West-ausgerichtete Niedersächsische Becken hat eine Länge von ca. 280 km und eine durchschnittliche Breite von ca. 100 km. Infolge starker Subsidenz (Absenkung) wurden in der Unterkreide des Niedersächsischen Beckens Sedimente mit bis über 2000 m Mächtigkeit abgelagert /LBE 07/.

Die (marinen) Ablagerungen der Kreide im Niedersächsischen Becken werden aufgrund unterschiedlicher Sedimentmächtigkeiten und lithologischer Wechsel in einen Westteil (± Emsland), einen westlichen Zentralteil (± nördliches Wiehengebirgsvorland), einen östlichen Zentralteil (± Raum Hannover – Braunschweig) und einen Ostteil (± Teile von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern) gegliedert.

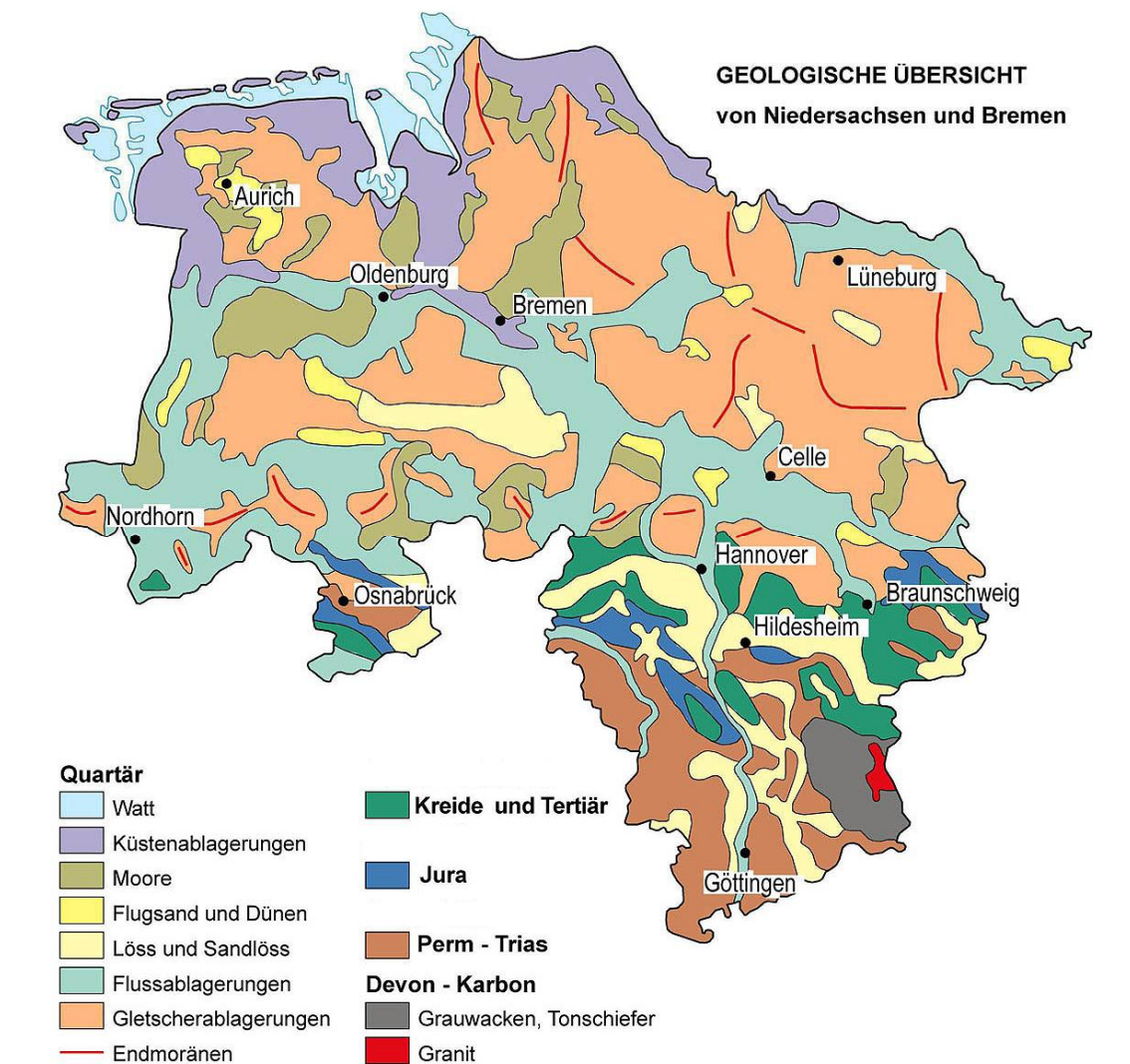


Abb. 2.2: Geologische Übersicht von Niedersachsen und Bremen (aus /LBE 07/)

Den Zentralteil des Niedersächsischen Beckens nördlich Hannovers stellt in einer abgedeckten geologischen Karte die Abb. 2.3 dar.

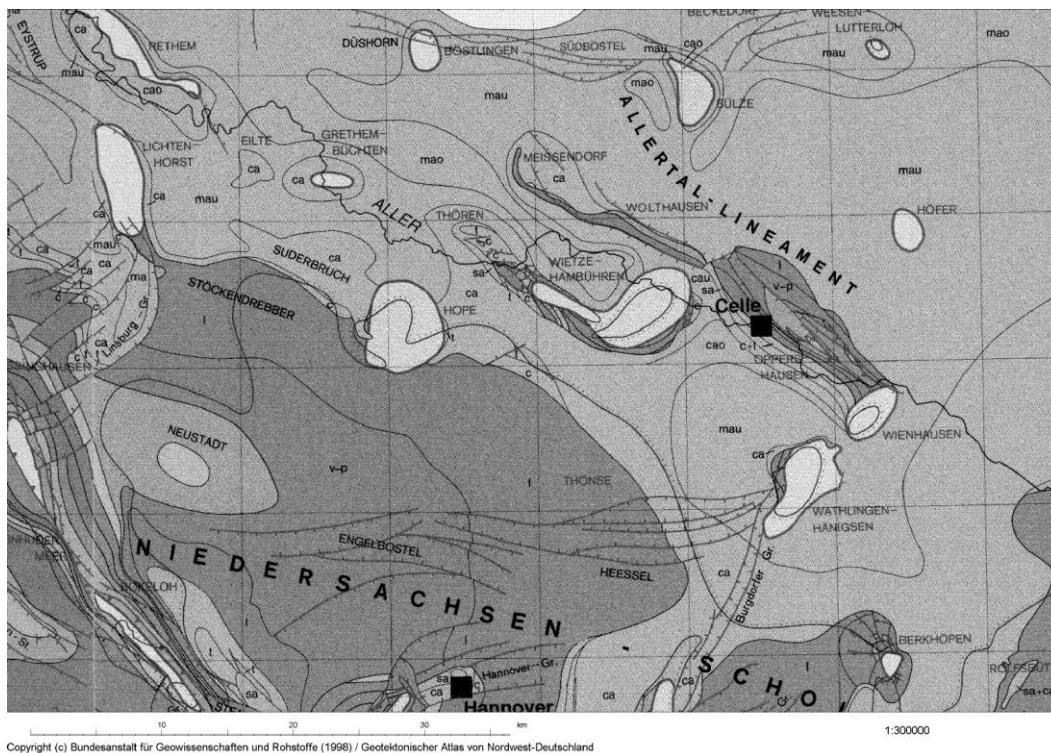


Abb. 2.3: Abgedeckte geologische Karte (Tertiär und jünger) nördlich von Hannover /KEL 79/.

Die Sedimente der Unterkreide weisen im niedersächsischen Becken deutliche Faziesdifferenzierungen auf (s. Abb. 2.4 aus /LBE 07/).

2.2.1.1 Fazies und Schichtenfolge des Niedersächsischen Beckens

Im Osten des Niedersächsischen Beckens stehen die marinen Sedimente der Unterkreide oberflächennah an. Es handelt sich in der Beckenfazies um dunkle carbonatarme Tonsteine mit Toneisensteinlagen. Gebildet wurden diese Sedimente bei starker Subsidenz mit hohen Sedimentationsraten und z. T. unter euxinischen Bedingungen im bodennahen Bereich.

System	Seite	Nurmeschicht Name Maastricht	Stufe Unterstufe	Lithostratigraphische Gliederung der Unterkreide in Niedersachsen					
				Müritzerkies (WE)	W Niederrhein (Emsland) (W/ NSB)	W' Niederrhein (Friesland-Brauner-Harz) und zentrale Niedersächsisches Becken (NSB)		SE Niederrhein (Glabbeke) (E/ NSB)	
KREIDE UNTERKREIDE	1442	Kf	Abium	500-200 m	Benecke-Schichten	Benecke-Schichten		Schiffliche	
					Ober-	Flammmergel	Flammmergel	gypsifizierte-Schichten	Flammmergel (60-120 m)
								silicatus-Schichten	
			Mitel-	Tonsteine	intraus-Schichten	Oering-Gründ	nirius-Schichten (0-50 m)		
						concordia-Mergel			
			Unter-	Rohrberg-Sandstein	Dunkle Tonstein-Folge (Schweichel-Kr)	regal- sandstein- schummer-Tone	Hilz-Gründstein	Hilz-Sandstein (10-60 m)	
						Göhrthe- Sandstein (Oering- Sandstein)			
			Apilium	200-300 m	Hiebgerle- Mergel	Hiebgerle- Mergel	jacobiolen-Tone	Roke Lager (0-6,5 m)	
							intraus-Mergel		
							dunkelmergel		
			Barrême	400-200 m	Tonsteine	Fischdiele		Fischdiele	
						bock-Tone (inkl. Bärentr)			
						diprose-Tone (inkl. Bärentr)			
			Hauterive	500-300-400 m	Tonsteine	Ogeln-Schichten (inkl. Bärentr)		Graue Lager (60 m)	
Hauptkalkstein (Aulendorf-Schichten)									
Chondria-Schichten									
Hauterive	500-300-400 m	Tonsteine	Gimbler-Schichten		Braune und schwarze Lager (15-30 m)				
			Göhrthe- Sandstein						
			Aegonoceras-Schichten						
Albingium	350-100-300 m	Tonsteine	Friedens-Schichten		Kalklager (5-20 m)				
			Arlstein-Schichten						
			Amöller-Schichten						
Barrême	400-700 m	Tonsteine	Folger-Schichten		Schiffliche				
			Plattentone-Schichten						
			Plattentone-Schichten						
Barrême	400-700 m	Deutscher Wealden	Barrême- Formation	Oberwald-Folge	Ob. Wealden- Schiefer				
				Obermünchen-Folge					
				Unt. Wealden- Schiefer					
Barrême	400-700 m	Serpüt	Münster- Formation	Serpüt-Formation	Serpüt				
				Hilzberg-Formation					
				Ob. Münster-Mergel					

Quelle: ADV Geologie (1978), OPS 226 (2006), in zitiert

Stand 05.2008



Abb. 2.4: Fazies der Unterkreide im Niedersächsischen Becken (aus /LBE 07/).

Im Hauterive, Unter-Barrême und Abt – Alb wurden stärker rhythmisch geprägte Sedimente, bestehend aus Tonstein / Mergelstein-Wechsellagen im Dezimeter- bis Meter-

bereich abgelagert. Die tonigen Sedimente gehen in den Randbereichen in zunehmend klastische (sandige) Sedimente über. Im Westen des Niedersächsischen Beckens, im Raum Bentheim, sind in der Unterkreide mehrere Sandsteinschüttungen ausgebildet. Die südliche Randfazies wird durch den Osning-Sandstein im Teutoburger Wald und im Egge-Gebirge markiert. Im Südosten schließen sich Flachwassercarbonate, Mergel und Sandsteine in der Randfazies an. Weiter östlich dominieren flachmarine Siliziklastika im Randbereich des Beckens. Nach Norden schließt sich der Südrand der Pompeckj-Scholle mit stark sandig beeinflussten Sedimenten vom Berrias bis Barrême an. Die Sedimentation der Oberkreide im Niedersächsischen Becken ist durch die Ablagerung von Mergel- und Kalksteinen charakterisiert.

An der Grenze Coniac / Santon setzte eine tektonische Inversion ein, in deren Folge frühere Hochgebiete zu Beckenrandtrögen und das ehemalige Depotzentrum Niedersächsisches Becken zu Hochgebieten mit Abtragung invertierte.

Die quartären Deckschichten in Norddeutschland gehören überwiegend in das Pleistozän. Holozäne (nacheiszeitliche) Bildungen sind nur an der Oberfläche in meist geringer Mächtigkeit vorhanden. Deswegen wird die unterschiedliche Ausbildung, zeitliche Gliederung und regionale Verteilung der quartären Deckschichten in Norddeutschland wesentlich durch die wiederholten Vorstöße des Inlandeises bestimmt.

Die quartäre Schichtenfolge beginnt mit Quarzsanden, die an der Grenze Pliozän / Pleistozän von vorwiegend aus Südschweden nach SW verlaufenden Flüssen abgelagert wurden. In der Elster-Kaltzeit drangen in mindestens zwei Vorstößen erstmalig Gletscher aus nördlicher Richtung bis an den Rand der Mittelgebirge vor. Wesentlich größere Verbreitung als die von den Gletschern abgelagerten Moränen haben Elsterzeitliche Schmelzwasserbildungen, vor allem im Untergrund Norddeutschlands als Füllung tiefer Rinnen. Diese treten nach /KEL 09/ nördlich einer Linie (vereinfachte 0 m - Linie der Quartärbasis) mit nach Norden zunehmender Häufigkeit auf (s. Abb. 2.8. und Abb. 2.9) Nördlich dieser Linie können die Rinnen, je nach geographischer Lage, bis zu 500 m tief, 1 - 8 km breit und mehr als 100 km lang sein. Sie sind teilweise sehr steil in darunter liegende tertiäre Schichten eingeschnitten und können auf Tiefenerosion von Gletscherzungen, insbesondere aber auf Schmelzwasserströme unter dem Elsterzeitlichen Inlandeis zurückgeführt werden. Heute spielen diese Rinnen als Grundwasserträger eine wichtige Rolle (s. auch Abschnitt 2.3).

Während des auf die Elster-Vereisung folgenden Holstein-Interglazials wurden vornehmlich Tone und Sande in einem Vorläufer der heutigen Nordsee abgelagert. Weiter südwärts treten verbreitet limnische und fluviatile Tone und Sande auf.

Die nächste jüngere Saale-Vereisung (mit dem älteren Drenthe-Stadium und dem jüngeren Warthe-Stadium) bestand aus drei, evtl. sogar fünf verschiedenen Vorstoßphasen. Geschiebemergel und -lehme der jeweiligen Vorstöße werden durch zwischengelagerte Schmelzwassersande (mit großer Verbreitung in Niedersachsen) getrennt. Die Mittelgebirge erreichte das Inlandeis nur in der älteren Drenthe-Zeit.

Die jüngste Vereisungsphase, die Weichsel-Eiszeit, hat die Elbe nach Süden nicht überschritten und bestand ebenfalls aus einer Reihe von Einzelvorstößen mit zwischenliegenden wärmeren Intervallen.

Nähere und ergänzende Beschreibungen zur geologischen Situation und paläogeographischen Entwicklung des Niedersächsischen Beckens sind bei /DBE 07/ ausgeführt. Die darin für den Modellstandort Nord-1 des Vorhabens GENESIS dargestellte tektonische Entwicklung wird im Weiteren als übertragbar auf den synthetischen Tonsteinstandort angesehen.

2.2.1.2 Tektonik

An der Wende Unter-/Oberkreide wurden wegen der andauernden Einengung des permo-mesozoischen Schichtstapels die Zentralbereiche des Niedersächsischen Beckens herausgehoben (Inversion des Niedersächsischen Beckens zum Niedersächsischen Tektogen). Hierdurch entstanden eine Reihe von Auf- und Überschiebungen sowie Flexuren (s. Abb. 2.5).

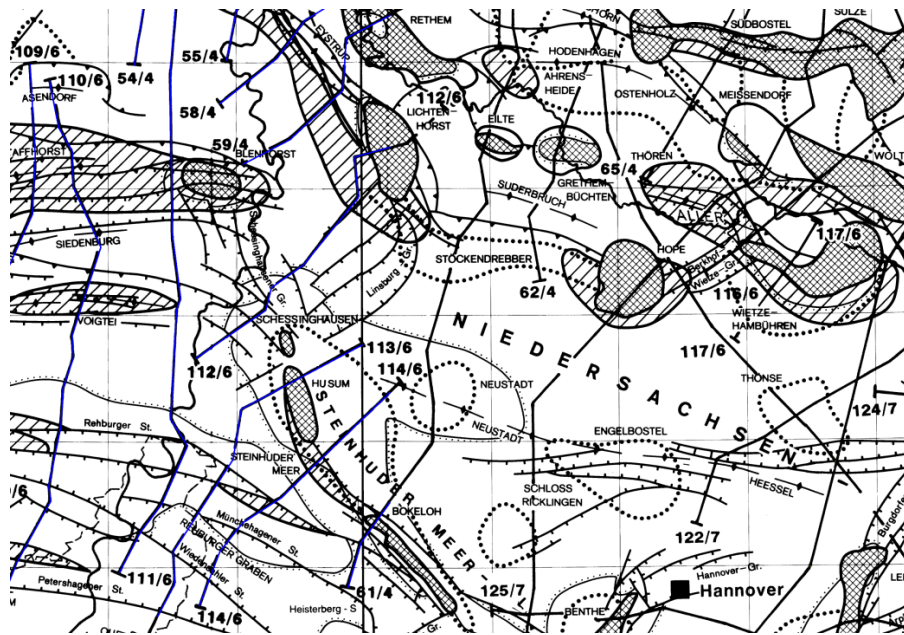


Abb. 2.5: Tektonische Elemente im Zentralteil des Niedersächsischen Beckens nördlich von Hannover (aus /BAL 01/)

Die tektonische Beanspruchung des Gebietes ist im Wesentlichen durch Abschiebungen gekennzeichnet, die NW-SE streichen (Abb. 2.5). Die Sprunghöhen liegen im Bereich von Zehner Metern.

Die derzeitigen Lagerungsverhältnisse der präquartären Schichten zeigt Abb. 2.6 in Form von typischen geologischen Profilen durch den Zentralteil des Niedersächsischen Beckens nördlich von Hannover (aus /BAL 01/).

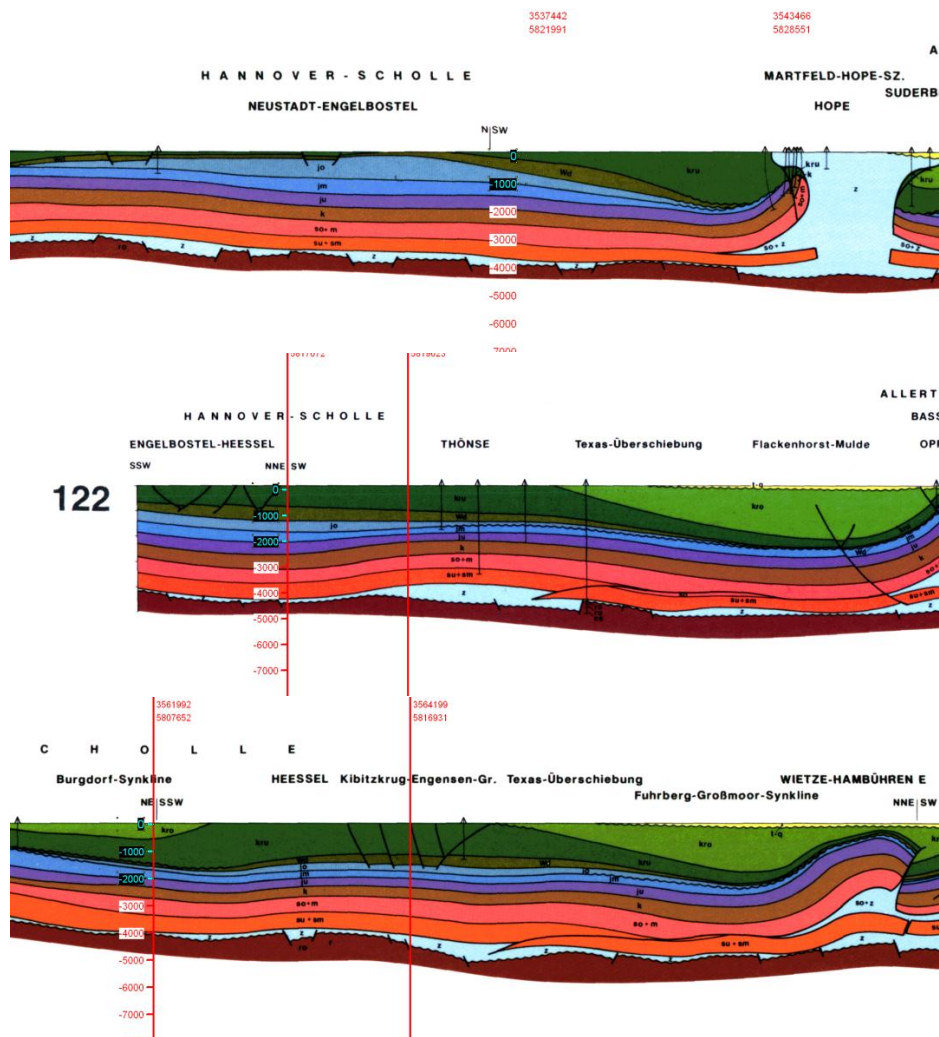


Abb. 2.6: Typische S-N-Profile durch das Niedersächsische Becken (aus /BAL 01/)

2.2.2 Geologische Standortbeschreibung

Aufgrund der geologischen Gegebenheiten im Niedersächsischen Becken wird der synthetische Standort im westlichen Zentralteil bzw. im Übergangsbereich zwischen dem westlichen und dem östlichen Zentralteil des Beckens positioniert. In diesem Gebiet ist die für den Tonstandort zusammengestellte Schichtenfolge in vergleichbarer Weise, d. h. in ähnlicher Ausbildung, u. a. bezüglich Lithologie, Mächtigkeit und Teufelage, vorzufinden. Die relevante und hier beschriebene Schichtenabfolge des synthetischen Tonsteinstandortes deckt die Unterkreide mit Beginn im Berrias bis zum Apt ab. Nach einer Schichtlücke in der obersten Unterkreide ist die Oberkreide durch Se-

dimente des Cenoman und Turon vertreten. Darüber lagern geringmächtige känozoische Sedimente.

In den Formationen von Rhät bis Tertiär sind keine Kohlenwasserstoffvorkommen in der Standortregion zu erwarten. Lediglich in Schichten des Paläozoikum und des Buntsandsteins befinden sich Gasfelder nördlich und westlich der Standortregion.

Strukturgeologisch befindet sich die Standortregion in einer großräumigen Synklinalen. Das Schichteinfallen beträgt max. 10° mit einem Azimut von 300° . Im Nordosten wird in ca. 25 km Entfernung die Standortregion durch eine ausgedehnte Salzstruktur (Salzstock) abgegrenzt. Damit ist ein hinreichender Abstand des Standortes zur Salzstruktur gegeben, der komplizierte Lagerungsbedingungen und die damit verbundene geringe Prognostizierbarkeit bzw. geringe Homogenität des Standortes, ausschließt. Der Salzstock reicht aus einer Teufe von ca. 3000 m bis in eine Teufenlage von ca. 150 m unter Geländeoberkante. An seinen Flanken sind mesozoische Gesteine aufgeschleppt und streichen bis einschließlich Obertrias aus.

Geringmächtige Reste tertiärer tonig-schluffiger Ablagerungen sind in der Standortregion vorhanden. Diese sind z. T. vollständig durch eine eiszeitliche Erosion abgetragen worden. Diese rinnenförmige Abtragungsform in der Standortregion streicht Nord-Süd und erreicht bei einem Böschungswinkel von ca. 1:10 bis 1:20. eine Breite von ca. 3 km. Die quartäre Sedimentation setzt an der Quartärbasis mit elsterzeitlichen Sanden und Kiesen ein. Überlagert werden diese glazifluviatilen Sedimente durch eine bindige (glazilimnische) Abfolge, die örtlich einen unteren von einem oberen Grundwasserleiter trennt. In den hangenden, vorwiegend sandigen Schichten sind Lagen von Geschiebemergel ausgebildet.

Abb. 2.7 zeigt das Typprofil des synthetischen Tonsteinstandortes in /BFS 07/. Nachfolgend werden die Schichtglieder vom Liegenden zum Hangenden beschrieben. Hierbei wurden in /BFS 07/ einzelne Schichtglieder zu Einheiten gleicher Eigenschaften zusammengefasst.

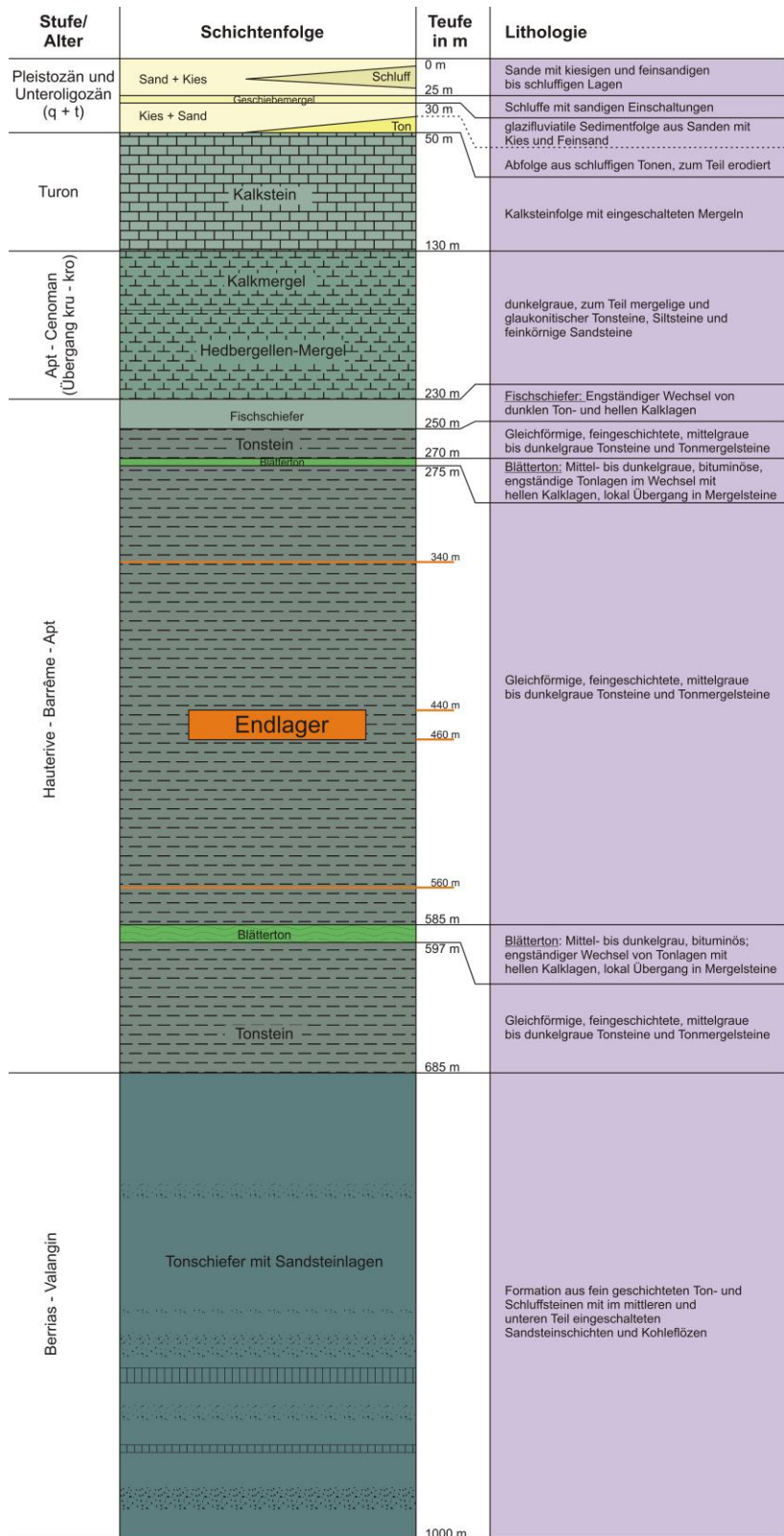


Abb. 2.7: Die Schichtenfolge des synthetischen Tonsteinstandortes /BFS 07/

Schichtenfolge

Kreide:

kru: Berrias – Valangin:

- 315 m mächtige Formation aus fein geschichteten Ton- und Schluffsteinen mit im mittleren und unteren Teil eingeschalteten Sandsteinschichten und Kohleflözen.
- Die Ton-, Tonmergel- und Schluffsteine bilden eine Folge von gleichförmigen dunkelgrauen und braunen Lagen, die überwiegend zum Liegenden schwach kalkig und zum Hangenden kalkhaltiger, glimmerig und pyritisch mit wenigen, unregelmäßig eingeschalteten Lagen von Toneisenstein ausgebildet sind.
- Die Toneisensteine sind Siderit-reich und weisen C_{Org} -Werte von 2 – 5 % auf, wobei ihr Pyritanteil < 1 % ist.
- Die mineralogische Zusammensetzung besteht zu ~ 25 % aus Quarz, bis je max. 5 % Feldspat und Calcit, 2 – 5 % Pyrit; 1 – 5 % Dolomit; ~25 % Glimmer, ~20 % Kaolinit und zu ~ 10 % Chlorit.
- Bei den Tonmineralen dominieren Illit mit bis zu 60 % und Kaolinit mit bis zu 35 % des Tonmineralanteils.
- In Pyrit-reichen Abschnitten der Ton-, Tonmergel- und Schluffsteine (5 % Pyrit), die vorwiegend in den unteren Bereichen der Formation auftreten, ist ein hoher anorganischer Kohlenstoffanteil (C_{Org} Anteil) von 8 – 10 % vorhanden, der zu den oberen Bereichen deutlich abnimmt, wo der C_{Org} Anteil bis max. 2 % vorliegt.

kru: Hauterive - Barreme - Apt (Wirtsformation):

- Gleichförmige, feingeschichtete, mittelgraue bis dunkelgraue Tonsteine und Tonmergelsteine; uniforme Tonmatrix, wechselnde Schichtungsintensität und Bioturbation; meist niedriger Calcitgehalt; wechselnder Pyritgehalt; lokal wechselnde Beimengungen an Silt und Sand (Quarz, Feldspäte, abgebaute Biotite, Muskovite, Chlorit); untergeordnet: Spurenminerale
- Mächtigkeit: 435 m (250 – 685 m Teufe)
- Endlagerhorizont 20 m mächtig in einer Teufenlage von 440 m bis 460 m u GOK

- Mineralogische Zusammensetzung: 60 % Tonminerale (40-50 % Illit, 25-30 % Montmorillonit, 10-20 % Kaolinit, max. 1 % Chlorit); 10-15 % SiO₂, 5-10 % CaCO₃, 0,5-1,5 % C_{org}
- Carbonatanteil, C_{org} und Kaolinit zum Hangenden abnehmend; Montmorillonit zum Hangenden zunehmend; Illitanteil +/- konstant
- Pyritanteil im Hangenden (kurz unterhalb des Fischeschiefers) mit ca. 10 % am höchsten
- Gelegentlich Horizonte von Toneisensteinkonkretionen (unterer Abschnitt / Barreme) und Phosphoritkonkretionen (oberer Abschnitt / Apt+Alb)
- Einschaltungen von carbonatreichen, pyritreichen und C_{org}-reichen laminierten Tonsteinen (5-20 m mächtige Blättertone; Fischeschiefer als Abschluss); charakteristische Lamination und fehlende Bioturbation
- Blättertone:
 - Mittel- bis dunkelgrau; bituminös; anoxisches Ablagerungsmilieu; engständiger Wechsel von dunklen Tonlagen (höherer Tongehalt, reichlich Rogenpyrit) und hellen Kalklagen (carbonatreich, mit Coccolithen); Lamination und fehlende Bioturbation; Zurücktreten oder Fehlen von Benthosfossilien; hoher C_{org}-Gehalt (> 1,5 %); höhere Pyritgehalte als im Tonstein und dadurch bedingt dunklere Farben; lokaler Übergang in Mergelsteine
 - Carbonatgehalt 10-30 %; pyritreich; C_{org} 1,5-5 % (max. 18 %, durchschnittlich 2 %); Mineralbestand: Quarz, Calcit, Kaolinit, Illit/Muskovit, Pyrit, Dolomit; Silt-/Sand-Beimengungen (Quarz, Quarzaggregate, Feldspäte, Sanidin, Glimmer, Glaukonit, Pyrit);
 - Mächtigkeit: 6-12 m (Sarstedt), 5-15 m (Unterbarreme im Ostteil des Beckens)
 - Gips, Halit
- Fischeschiefer:
 - mittelgrau; anoxisches Ablagerungsmilieu; engständiger Wechsel von dunklen Ton- und hellen Kalklagen; Mineralbestand: Calcit, Tonminerale (Smektit, Illit, Kaolinit), Quarz, Pyrit, C_{org}, Siderit

- Calcit 23 % (20-60 %); Smektit 31 %, Illit 18 %, Kaolinit 18 %, Quarz 7 %; Pyrit 3 % (<10 %); C_{org} 5 % (2-10 %); geringe Silt-/Sand-Beimengungen (Sanidin, Feldspat, Quarz, Glaukonit, Pyrit, biogenes Phosphat)
- höhere Carbonat- und C_{org}-Gehalte als die Blättertone
- Mächtigkeit: 5-10 m (Rethmar), 1m (Helgoland)

kru – kro: Apt – Cenoman:

- 100 m mächtige Folge von dunkelgrauen, zum Teil mergeligen und glaukonitischen Tonsteinen, Siltsteinen und feinkörnigen Sandsteinen.
- Die im unteren Bereich auftretenden 60 m mächtigen *Herbergellen-Mergel* bestehen aus einer Wechselfolge von dunklen, tonigeren und helleren, carbonatreicheren Bänken. Die C_{org}-, und Pyrit-Gehalte liegen durchgehend unter 1 %. Die Mineralogische Gesamtzusammensetzung des Hedbergellen-Mergels im Niedersächsischen Becken lautet: 34 % Illit; 19 % Kaolinit; 11% Smektit; 19 % Quarz; 12 % Kalzit; 5 % Sonstige Minerale
- Im oberen Bereich der Formation handelt es sich um 40 m mächtige Mergel der *Plänerkalk-Gruppe*, die an der Basis dunkelgraue, mergelige Tonsteine und darüber schluffige Ton- und Kalkmergelsteine aufweist. Der Bereich zu den liegenden Herbergellen-Mergeln ist toniger ausgebildet, zum Hangenden wird die Formation Calcit-reicher.
- Generell ist ein Trend zunehmenden Calcit-Anteils bei gleichzeitiger Abnahme der Tonmineral- und der Quarzgehalte vom Liegenden zum Hangenden zu beobachten. Der Tonmineral-Anteil senkt sich von ~65 % im Apt bis auf 15 – 25 % im Cenoman.
- Vom Liegenden zum Hangenden nimmt jeweils der Gehalt an Glimmer, Kaolinit und Chlorit deutlich ab.
- Die Plänerkalke sind teilweise stärker geklüftet und verkarstet und bilden gute Kluft- und Karstgrundwasserleiter.

kro: Turon:

- 80 m mächtige Kalksteinfohle mit eingeschalteten Mergeln.
- Die Calcitgehalte liegen hier zwischen 50 – 90 %. Quarz kommt bis zu 10 % und Tonminerale bis zu 40 % vor. Bei den Tonmineralen handelt es sich um Smektit und Illit, wobei Illit dominiert. Weiterhin treten in geringen Mengen Feldspat und Apatit auf.

t: Unteroligozän

Die Mächtigkeit der Tertiärsedimente beträgt 0 – 10 m. Es handelt sich um flachlagernde monotone Abfolge aus schluffigen Tonen. Infolge quartärzeitlicher Erosion ist die Bedeckung der Oberkreide mit tertiären Ablagerungen im Bereich des Standortes unvollständig. Die petrophysikalischen Eigenschaften der Tone entsprechen dem unteroligozänen Rupelton.

q: Pleistozän:

Die Gesamtmächtigkeit der quartären Abfolge beträgt 40 – 50 m. Die unteren 10 bis 20 m werden durch eine glazifluviale Sedimentfolge aufgebaut, bestehend im Wesentlichen aus Sanden mit Einschaltungen aus Kies und Feinsand. Gekennzeichnet wird die Schichtenfolge durch Kreuzschichtung.

Darüber lagern 5 m mächtige Schluffe mit sandigen Einschaltungen. Die Sequenz wird durch eine 25 m mächtige Abfolge abgeschlossen, die hauptsächlich aus Sanden mit kiesigen und feinsandigen bis schluffigen Lagen besteht.

Innerhalb dieser Wechsellagerung wird Geschiebemergel mit Mächtigkeiten von 0 bis 10 m angetroffen.

2.3 Geologische Langzeitprognose

2.3.1 Klimaentwicklung

Im Quartär wechselten sich Kaltzeiten (Glaziale), die zwischen 80 000 – 100 000 Jahre andauerten, mit 10 000 – 25 000 Jahre langen Warmzeiten (Interglaziale) ab. Für die Zukunft wird aus geowissenschaftlichen Erkenntnissen erwartet, dass die heutige Warmzeit, in gleichartigen Zeiträumen von einer Kaltzeit abgelöst wird. Diese zukünftige Klimaentwicklung steht im Zusammenhang mit Variationen der Erdbahn um die Sonne sowie der Neigung und der Schwankung der Rotationsachse der Erde (Milankovitsch-Zyklen). Diese bewirken Änderungen in der regionalen Verteilung der Sonneneinstrahlung. Im Quartär (2,6 Mio. Jahre bis heute) entstanden und verschwanden auf der Nordhalbkugel riesige Kontinentalgletscher.

Im Rahmen des Projekts VerSi wurde u.a. mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die Identifikation und Definition klimabedingter Szenarien (z. B. Eiszeiten), provisorische Festlegung der Szenarienabläufe, Identifikation sensitiver Prozesse und Eigenschaften, Überlegungen zu weniger wahrscheinlichen Szenarien diskutiert.

Ableitend aus der historischen Entwicklung werden von der BGR zukünftige Kaltzeiten bezogen auf den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren für den Norddeutschen Raum für wahrscheinlich angenommen. Innerhalb des im Projekt VerSi vorgegebenen Nachweiszeitraumes von 1 Mio. Jahren werden deshalb, ausgehend von der Annahme, dass die Klimaentwicklung von 400.000 Jahren der Vergangenheit repräsentativ für die zukünftige Zeitperiode ist, erneut mehrere Vereisungen des Norddeutschen Raums erwartet. Es lassen sich jedoch keine sicheren Angaben über den Typ, Dauer, Auswirkungen und den genauen Verlauf bzw. Ausmaße möglicher zukünftiger Vereisungen machen. Nach /KEL 09/ ergeben sich für das hypothetische Klimabild im Zeitrahmen der nächsten Million Jahre zehn weitere Eiszeiten, von denen einige auch das Ausmaß der Elster- oder der Saale-Eiszeit erreichen könnten. Für eine zukünftige Klimaentwicklung sind unterschiedliche Vereisungstypen zu betrachten und die damit verbundenen Szenarien in den Langzeitsicherheitsbetrachtungen zu berücksichtigen.

Ein wichtiges Thema in der Diskussion der Auswirkungen möglicher zukünftiger Vereisungen ist die Entstehung neuer eiszeitlicher Rinnen. Ihre Entstehung und Teufenerstreckung am Ort eines Endlagerstandortes in Norddeutschland sind nicht durch Gesetzmäßigkeiten geologischer Prozesse prognostizierbar.

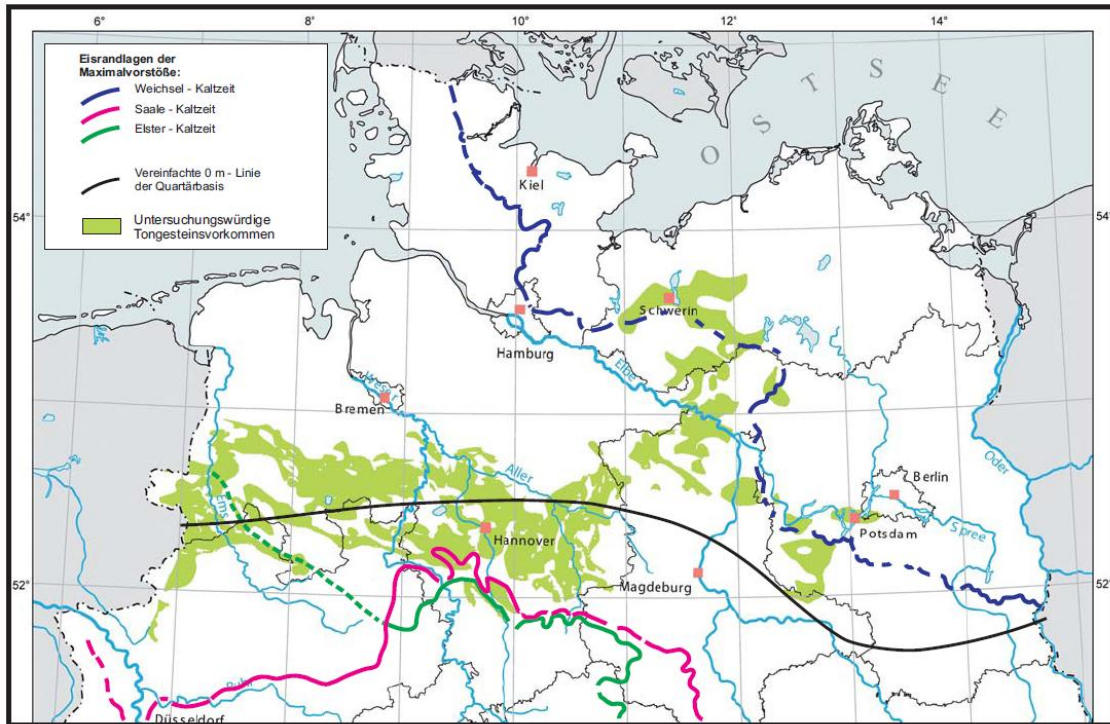


Abb. 2.8: Verbreitung von untersuchungswürdigen Tongesteinsvorkommen, Eisrandlagen der Maximalvorstöße und vereinfachte 0 m-Linie der Quartärbasis (aus /KEL 09/)

Nach /KEL 09/ kann für das zukünftige Klima im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre die Perspektive von zehn möglichen Eiszeiten abgeleitet werden, die einmal oder mehrfach das Ausmaß der Elster-Eiszeit erreichen können. Bei gleichem Ausmaß ist zu unterstellen, dass es erneut zu Rinnenbildungen mit maximalen Erosionstiefen bis etwa 500 m in unkonsolidierten tertiären und quartären Lockermaterialien kommt. „Die Lage möglicher zukünftiger Rinnen kann allerdings nicht vorhergesagt werden. Prinzipiell sind daher an jedem Ort in Norddeutschland Rinnenbildungen möglich. [...] Die Existenz einer eiszeitlichen Rinne im Deckgebirge eines möglichen Endlagerstandortes in Norddeutschland stellt somit keine Besonderheit dar, sondern muss im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen zur Deckgebirgsentwicklung aufgrund der angenommenen zukünftigen klimatischen Entwicklung als gegeben unterstellt werden“ /KEL 09/.

Nach /KEL 09/ ist für die Teufenerstreckung der Rinnen neben eiszeitlichen Bedingungen vor Ort auch die petrographischen Eigenschaften des Deckgebirges am Standort

von Bedeutung. „Sofern die Deckgebirge der Vorkommen nur aus unkonsolidierten Schichten der Tertiär- und Quartärzeit bestehen, ist eine erosive Beeinträchtigung nicht nur der Deckgebirgsschichten bis in eine Tiefe von 500 m infolge von zukünftigen eiszeitlichen Rinnenbildungen, sondern auch eine Erosion des stratigraphisch älteren tonigen Wirtsgesteins möglich. Dies gilt prinzipiell für Gebiete nördlich der 0 m-Quartärbasislinie (s. Abb. 2.8), in denen elsterzeitliche Rinnen ausgebildet sind und aufgrund der unterstellten klimatischen Zukunft auch wieder entstehen können. Südlich der Linie mag eine Rinnenentstehung nur von der Existenz sich rasch entleerer Eisstauseen abhängen, was nur geringere Erosionstiefen in den Deckgebirgsschichten erwarten lässt“ /KEL 09/.

Basis der Festlegungen im Projekt VerSi zur Teufenlage einer möglichen eiszeitlichen Rinnenbildung in einer Szenarienbetrachtung ist die in Abb. 2.9 dargestellte heutige Lage, Verlauf und Teufe pleistozäner Rinnenstrukturen. Der auslösende Prozess für die Rinnenbildung ist mit der Phase einer Eisüberdeckung verbunden, wobei unter hohem Druck stehende Schmelzwässer an der Sohle des Gletschers abfließen und dabei rinnenartige Strukturen im Untergrund entstehen lassen. Die Ausmaße der in Norddeutschland nachweislich in der Elstereiszeit entstandenen Rinnen schwanken in ihrer Breite von wenigen Metern bis einigen Kilometern und in ihrer Tiefe ebenfalls von einigen Metern bis einigen hundert Metern. Die maximalen Tiefenauswirkungen werden mit über 500 m angeführt.

Analog zu den Kaltzeiten lassen sich auch keine sicheren Angaben über den genauen Verlauf und Teufe möglicher zukünftiger Rinnen machen. Ebenfalls lässt sich eine Ausweitung bereits vorhandener Rinnen nicht ausschließen.

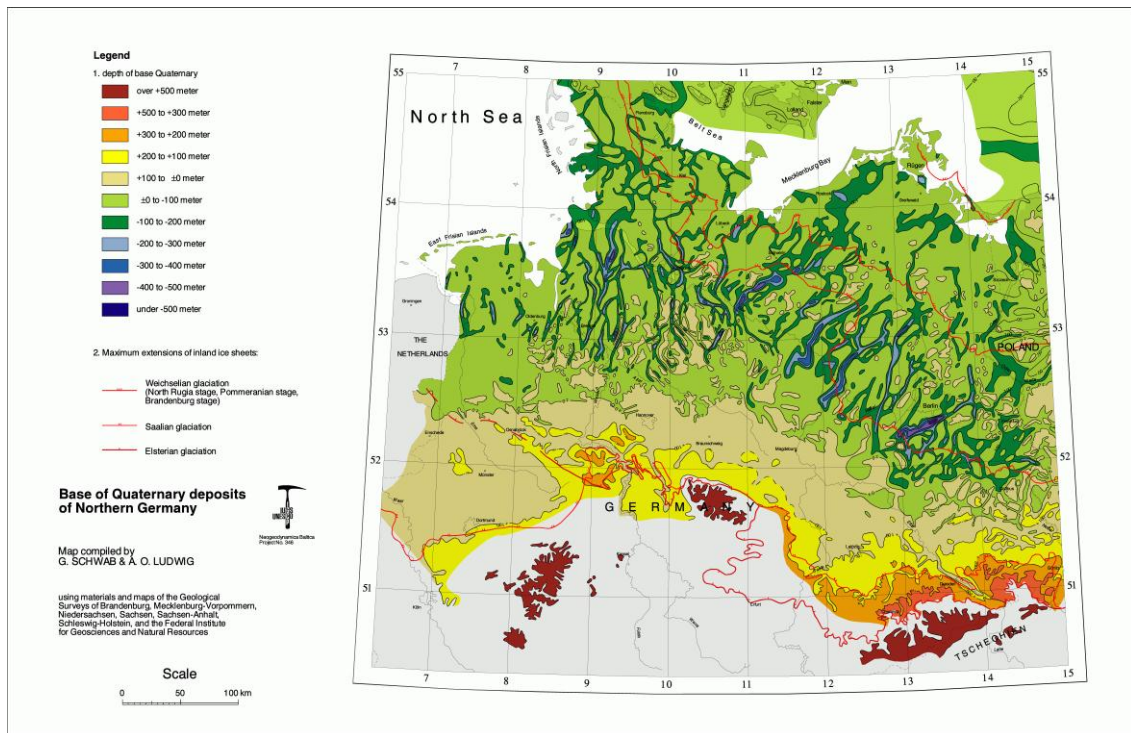


Abb. 2.9: Lage, Verlauf und Tiefe pleistozäner Rinnenstrukturen. Karte aus /STA 01/

Abb. 2.9 stellt im Ergebnis die Untersuchungen zu Rinnenstrukturen in Norddeutschland dar. Anhand der Verteilung der Rinnen in der tiefenspezifischen Flächenkartierung in Abb. 2.9 wurde versucht eine Wahrscheinlichkeit zum Auftreten einer Rinnenstruktur, deren Ort und Teufenentwicklung der Entstehung rein zufällig abläuft, zu ermitteln. Hierzu wurde eine Flächenplanimetrierung der Strukturen durchgeführt und die Flächenverhältnisse von eiszeitlichen Rinnen mit einer Erosionstiefe > 250 m unter GOK (für Norddeutschland etwa 200 m unter NN) zur Gesamtfläche des durch Rinnen geprägten Gebietes im norddeutschen Raum ermittelt. Im Ergebnis beträgt bei einer betrachteten Gesamtfläche von 90.000 m² die Fläche der Rinnen, die tiefer als > 250 m unter GOK liegen, ungefähr 4 %. Ausgehend von der Annahme, dass die Rinnenbildung repräsentativ für die Zeitperiode von 400.000 Jahren ist, wurde daraus abgeleitet, dass eine Rinnenbildung mit Erosionstiefen bis 250 m unter GOK im Nachweiszeitraum als wahrscheinlich anzunehmen ist. Rinnen mit Erosionstiefen von 250 bis 350 m unter GOK werden als weniger wahrscheinlich betrachtet. Für den Verlauf der Rinne wird festgelegt, dass diese sich nach den Ausrichtungen des gebildeten Rinnensystems der Elster-Kaltzeit orientiert. Zusätzlich wurde für das Vergleichsverfahren in VerSi festgelegt, dass tiefer reichende Erosionen nicht betrachtet werden, da durch die definierte

Teufenlage des hier beschriebenen Tonsteinstandorts, dieser in diesen Fällen einen Teil seines EWG einbüßen würde. Mit der im VerSi festgelegten Endlagerteufe am generischen Standort und dem Prozess einer tieferen Rinnenbildung wäre der Standort selbst für die Vergleichsmethodik unbrauchbar. Da aber im Projekt davon ausgegangen wird, dass der generische Tonstandort genehmigungsfähig ist und das Endlagerkonzept (Teufe, Ausbau etc.) im Standortvergleich nicht kontinuierlich verändert werden kann /APP 09/, wurde diese Einschränkung auf eine bestimmte Teufenlage erforderlich. Es handelt sich dabei um eine Festlegung speziell für die Methodenentwicklung zum Vergleich beider Standorte, die kein Präjudiz für einen möglichen anderen Tonsteinstandort darstellt.

2.4 Hydrogeologie

2.4.1 Hydrogeologischer Überblick zum Norddeutschen Tiefland

Das den Mittelgebirgen vorgelagerte Norddeutsche Tiefland beginnt etwa an der Linie Rheine - Hannover - Magdeburg - Leipzig - Görlitz und ist im allgemeinen durch geringe Reliefunterschiede gekennzeichnet (besonders im westlichen Teil), die durch eine Decke von quartären Lockersedimenten verursacht wird. Mit Annäherung an die Mittelgebirge nimmt die Mächtigkeit der Quartärschichten meist ab.

2.4.1.1 Grundwasservorkommen

Pleistozäne Bedeckung

Das Tiefland ist durch quartäre Ablagerungen geprägt. Die Mächtigkeit pleistozäner (eiszeitlicher) Lockerablagerungen nimmt insgesamt von Süd nach Nord zu. Die pleistozäne Bedeckung besteht im Norddeutschen Tiefland zwischen Ostsee und Weser/Aller aus Moränen, Sanden und geringdurchlässigen Sedimenten. Infolge der mehrfachen Vereisung des Raumes ist die flächenhafte und räumliche Verteilung dieser Ablagerung sehr wechselhaft. Nutzbare Grundwasserleiter sind glazifluviale Sande und zum Teil auch Kiese der Saale-Vereisung und der Elster-Vereisung. Ein Grundwasservorkommen ist wegen der geringen Ausdehnung der Speicherstätten meist eher gering und nur regional von Bedeutung.

Rinnen

Den pleistozänen, elstereiszeitlich entstandenen Schmelzwasserrinnen kommt eine besondere Bedeutung für eine Grundwassererschließung im Gebiet zwischen Ostsee und Weser/Aller zu. Diese Rinnen sind mit elsterzeitlichen Schmelzwasserablagerungen gefüllt. Die ehemals bis zu 500 m tief eingeschnittenen, ca. 1 bis 8 km breiten und z.T. 100 km langen Rinnensysteme verlaufen in Norddeutschland bevorzugt in Nord-Süd- oder Nordwest-Südost-Richtung. Ihre Füllungen bestehen aus Beckenablagerungen aus Ton und Schluff bzw. Sand und Kies. Eine Abbildung der derzeit bekannten Rinnenstrukturen zeigt Abb. 2.9. Ein typischer Geologischer Schnitt durch eine Pleistozäne Rinne wird in Abb. 2.10 dargestellt. Die Rinnen sind zwischen wenigen hundert Metern und einigen Kilometern breit.

Die Grundwassernutzung wird örtlich, zum Teil regional, durch das Auftreten versalzter Wässer in Teilen der Aquifere behindert. Ursache dafür sind z.T. Subrosionsvorgänge an hochreichenden Salzstöcken sowie das Aufsteigen versalzter Tiefenwässer in den tiefen Teilen der pleistozänen Rinnen in Grundwasserentlastungsgebieten (z. B. Flussniederungen).

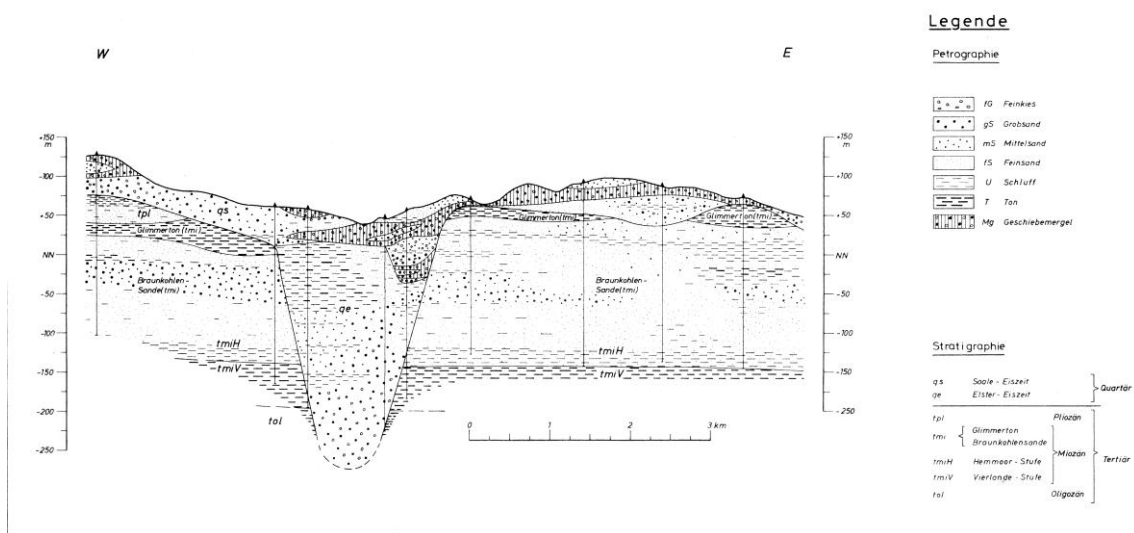


Abb. 2.10: Geologischer Schnitt durch eine Pleistozäne Rinne. Abbildung aus /KEL 79/

Mesozoische Bedeckung

Das mesozoische Gebirge des Niedersächsischen Beckens ist von Grundwassergeingleitern geprägt. Die Grundwasserleiter sind meist als Kluftgesteine ausgebildet. Die Durchlässigkeit der Festgesteine ist dabei stark variabel und die Grundwasserführung nur durch die Kluftdurchlässigkeit, die Ausstrichbreite der Schichten und deren Höhenlage zu den Vorflutern bestimmt. Ein hohes Porengrundwasserleitvermögen besitzen nur die sandigen Schichten der Unterkreide (Hilssandstein). Die anderen oberflächennah anstehenden Schichten besitzen nur ein geringes Grundwasserleitvermögen, ebenso wie die tiefer liegenden Schichten der Trias.

Das Gebiet des Leinetalgrabens ist tektonisch als Senkungszone zu qualifizieren und durch Bruchlinien stark zergliedert. Die intensive tektonische Beanspruchung des gesamten Teilraums führt dazu, dass die verschiedenen Grundwasserleiter, besonders die Kluftgrundwasserleiter, durch Störungszonen und Klüfte hydraulisch miteinander verbunden sein können. Ihre Wasserwegsamkeit hängt somit entscheidend von der Art der Klüftung und deren Zustand ab.

2.4.1.2 Heutiges Klima, Grundwasserneubildung und Grundwasserabstrom

Das heutige Klima ist durch den Übergang von maritimen zu kontinentalen Verhältnissen gekennzeichnet. Unter Bezugnahme einer mittleren jährlichen Lufttemperatur von 8,8°C liegt die mittlere jährliche Niederschlagssumme im Norddeutschen Tiefland überwiegend zwischen 700 und 800 mm/a (maritim beeinflusste Gebiete) bzw. zwischen 500 und 700 mm/a (kontinental beeinflusste Gebiete) /KEL 79/. Der Anteil des Niederschlags, der zur Versickerung kommt, ist vom Bewuchs und von der Durchlässigkeit der an der Oberfläche anstehenden Sedimente abhängig. In welchem Umfang diese Versickerung zur Grundwasserneubildung beiträgt, wird überwiegend durch die Aufnahmefähigkeit und Durchlässigkeit der liegenden Schichten bestimmt.

Nach den wasserwirtschaftlichen Karten des Regierungsbezirkes Detmold liegt die reelle Evapotranspiration z. B. im Wesergebirgsbereich zwischen 550-600 mm. Im unbewaldeten Flachland werden Werte von 450 bis 500 mm für die Summe aus Verdunstung, Transpiration und Interzeption angegeben. Am Beispiel dieser Region zeigt Tab. 2.1 eine Zusammenstellung der Grundwasserneubildungsraten für verschiedene morphologische Bereiche.

Tab. 2.1: Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsraten für das Wesergebirge und sein nördliches Vorland nach verschiedenen Literaturquellen, aus /FAP 00/.

Teilgebiet	mittl. Grundwasserneubildungsrate	Literaturquelle
Weser-Niederungen	150-200 mm/a	/ROH 85/
Hangfuß der Bückeberge und nördlich vorgelagertes Gebiet	100-150 mm/a	/ROH 85/
Tonstein-Aufragungen (Schaumburger Wald)	0-50 mm/a	/ROH 85/
Wesergebirge, nördliches Vorland	125-225 mm/a	/LUA 92/
Westliches Wesergebirge	90-120 mm/a	/MIC 92/
Wesergebirge	120 mm/a	/LAN 98/

Der Grundwasserabstrom erfolgt in den oberflächennahen Grundwasserleiter in Richtung der größeren Flüsse. Auch in den tiefliegenden, weiträumig mit Grundwassergeringleitern überlagerten Grundwasserleitern ist eine hydraulische Abhängigkeit von den Flusssystemen meist nachweisbar.

2.4.1.3 Hydraulische Durchlässigkeit der Tonsteine

Nach den oben beschriebenen hydraulischen Merkmalen der Sedimente des Quartärs/Tertiärs spielen für die Isolation des Endlagersystems insbesondere die im Niedersächsischen Tiefland im Liegenden folgenden mächtigen Tonsteinsfolgen der marinen Unterkreide eine entscheidende Rolle. Für die Standortregion existieren noch keine endlagerspezifischen Untersuchungen zur Hydraulik dieser Schichtenfolge, so dass auf allgemeine Analysen der Hydraulik von Ton/Tonsteinen zurückgegriffen werden muss.

Nach Untersuchungen von Appel & Habler /APP 02/, die im Rahmen der Arbeiten für den AkEnd eine Auswertung von Durchlässigkeitsbeiwerten von Tonsteinen durchgeführt haben (Die Datenbasis der „Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit“ enthält zu Ton/Tonsteinen 676 Durchlässigkeitsbeiwerte, meist aus Untersuchungen zu oberflächennahen Sonderabfalldeponien. Entsprechend der hier betrachteten Endlagerteufen liegen nur 36 Werte vor) unterscheidet sich der Hauptgesteinstyp Ton/Tonstein von

den anderen Gesteinstypen durch lithologische Besonderheiten mit erheblichem Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit. Einschaltungen von Gesteinslagen oder -bänken mit von der „Normalfazies“ abweichender Zusammensetzung können andere hydraulische Eigenschaften (z. T. um Größenordnungen höhere Durchlässigkeitsbeiwerte) aufweisen. Weiterhin wird die Gebirgsdurchlässigkeit durch regional wirksame geologische Prozesse erhöht (z.B. Ausbildung eines ausgeprägten Kluftsystems). Von besonderer Bedeutung für die Gebirgsdurchlässigkeit ist bei Ton/Tonstein jedoch die entsprechende Teufenlage. So lassen sich nach /APP 02/ zwei Teufenbereiche unterscheiden.

Bis in Teufen von knapp 200 m u GOK werden im Mittel Durchlässigkeitsbeiwerte um 10^{-6} m/s angetroffen (Bandbreite: 10^{-14} - 10^{-4} m/s). In größeren Teufen wurden bisher sehr niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte kleiner 10^{-9} m/s, im Mittel etwa 10^{-12} m/s festgestellt.

Die Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein wird nach /APP 02/ generell von der Teufe bestimmt. Sie nimmt bis auf eine Teufe von rund 800 m unter Geländeoberfläche deutlich ab. Die Durchlässigkeitsbeiwerte aus dem Teufenbereich bis 300 m unter Geländeoberfläche liegen im Mittel mit 10^{-8} m/s um etwa drei Größenordnungen über denjenigen aus dem Bereich 300 bis 1.500 m unter Geländeoberfläche. In allen Tiefenabschnitten treten jedoch wie schon beschrieben regionalspezifische hohe Durchlässigkeitsbeiwerte auf, wobei u. a. folgende Einflussfaktoren wirksam sein können:

- Gesteinszusammensetzung, insbesondere der Carbonatgehalt und die Verteilung des Carbonats im Gestein. Erhöhte Kalkgehalte führen zur Entwicklung wassergängiger Trennfugen mit Durchlässigkeitserhöhung in den kalkreicheren Partien.
- Einschaltungen von Kalksteinlagen und -linsen. Die mittlere Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein mit Kalksteinlagen ist vielfach um ca. zwei Größenordnungen höher.
- Gebirgsabschnitte mit "gestörtem" Gefüge weisen um etwa zwei Größenordnungen höhere Durchlässigkeitsbeiwerte auf als solche, die als weitgehend ungestört angesehen werden.

2.4.2 Hydrogeologie der Standortregion

In der Standortregion sind örtlich ergiebige Grundwasservorkommen im quartären Grundwasserleiter zu erwarten. Eine Grundwasserentnahme durch Wasserwerke erfolgt nicht. Die Topographie des Standortgebiets ist weitgehend flach bis wellig. Die mittlere Höhe der leicht welligen Standortregion liegt bei 50 m NN. Der nächstgelegene Höhenzug befindet sich in einer Entfernung von ca. 30 km südlich des Standortes und hat eine Höhe von bis zu ca. 320 m über NN.

Der Grundwasserflurabstand beträgt ca. 3,50 m. Der nächste Vorfluter 1. Ordnung liegt in ca. 15 km Entfernung im Westen, kleinere Vorfluter in der Mitte des Modellgebiets.

Folgende hydrogeologische Einheiten lassen sich beschreiben.

Der oberflächennahe Grundwasserleiter wird durch quartäre Sedimente gebildet. Die Gesamtmächtigkeit der quartären Abfolge beträgt 40 – 50 m, an der Basis aus Sanden mit Kies und Feinsandeinschaltungen (10 - 20 m mächtig). Der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert beträgt ca. $5 \cdot 10^{-4}$ m/s horizontal und 10^{-5} m/s vertikal. Die darüber lagern den Schluffe mit sandigen Einschaltungen besitzen Durchlässigkeitsbeiwerte von $5 \cdot 10^{-6}$ m/s horizontal und 10^{-7} m/s vertikal. Darüber folgt eine 25 m mächtige Abfolge aus Sanden mit kiesigen und feinsandigen bis schluffigen Lagen, mit einem mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von ca. $5 \cdot 10^{-4}$ m/s horizontal und 10^{-5} m/s vertikal in Wechselagerung mit Geschiebemergel mit einem isotropen Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-6} m/s.

Die nur unvollständigen Ablagerungen von tertiären schluffigen Tonen die einen Durchlässigkeitsbeiwert von ca. 10^{-7} m/s besitzen trennen diesen Grundwasserleiter hydraulisch nicht flächendeckend von der darunter folgenden 80 m mächtigen Kalksteinfolge mit eingeschalteten Mergeln des **Turons**, die einen geklüfteten Grundwasserleiter bilden, der eine Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-5} m/s und eine Porosität von 5 % besitzt.

Schwankungsbreiten der hydraulischen Merkmale dieser Schichtenfolge sind nach /BFS 07/:

- Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s]: $>10^{-5} - 10^{-4}$ /GEO 05/
- Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s]: $10^{-5} - 10^{-7}$ [Daten aus Konrad]
- Diffusionskoeffizient [m^2/s]: 10^{-11}
- Porosität [%]: 5

Im Liegenden folgt eine 100 m mächtige Folge von Tonsteinen, Siltsteinen und feinkörnigen Sandsteinen des Apt – Cenomans. Im oberen Bereich der Formation handelt es sich um 40 m mächtige Mergel der *Plänerkalk-Gruppe*, die an der Basis mergelige Tonsteine und darüber schluffige Ton- und Kalkmergelsteine aufweist. Diese Plänerkalke sind teilweise stärker geklüftet bzw. verkarstet und bilden gute Kluft- und Karstgrundwasserleiter.

Im Liegenden folgt mit den 60 m mächtigen *Herbergellen-Mergel* ein Grundwasserge-
ringleiter mit einem mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-8} m/s.

Schwankungsbreiten der hydraulischen Merkmale sind nach /BFS 07/:

- Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]:
von $> 10^{-9} - 10^{-7}$ in tonigen Abschnitten
bis $> 10^{-5} - 10^{-3}$ in mergeligen Bereichen. /GEO 05/
- Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s]:
⊥ zur Schichtung: 10^{-13} ,
// zur Schichtung: 10^{-11} /AND 05/.
- Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]: 10^{-10} /BFS 03/

Darunter folgt die im niedersächsischen Becken weit verbreitete Formation des Fischschiefers mit Mächtigkeiten zwischen 5 und 10 m und einer Porosität von ca. 32 %. Der Durchlässigkeitsbeiwert beträgt in dieser Folge 10^{-7} m/s.

Die im Liegenden folgende Endlagerformation (Wirtsformation) des **Hauterive - Barrême - Apt** stellt einen ausgeprägten Grundwasserstauer dar, der aus einer Folge von gleichförmigen Tonsteinen und Tonmergelsteinen in einer Gesamtmächtigkeit von 435 m in einer Teufenlage zwischen 250 – 685 m u GOK besteht. Der Durchlässigkeitsbeiwert beträgt in dieser Folge $2 \cdot 10^{-14}$ m/s (⊥ zur Schichtung) / 10^{-13} m/s (// zur Schichtung), die effektive Gebirgsporosität liegt bei 10 %.

Schwankungsbreiten und weitere hydraulische Merkmale der Tonsteine und Tonmergelsteine sind nach /BFS 07/:

- Spezifischer Speicherkoeffizient: $10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5} m^{-1}$
- Effektiver Diffusionskoeff. (Anionen): $10^{-12} m^2/s$ (⊥ zur Schichtung) / $5 \cdot 10^{-12} m^2/s$ (// zur Schichtung)
- Effektiver Diffusionskoeff. (Kationen): $10^{-11} m^2/s$ (⊥ zur Schichtung) / $5 \cdot 10^{-11} m^2/s$ (// zur Schichtung)
- Gesamtporosität: 0,07 – 0,18

- Diffusionsporosität Anionen: 0,06 -0,07 (pessim. Wert 0,03 /NAG 02c/, /NAG 02b/)
- Diffusionsporosität Kationen: 0,12 - 0,15 /NAG 02b/,

Die in dem Tonstein/Tonmergelsteinpaket eingeschalteten Blättertone in den Teufenlagen von 270 m und 585 m u GOK haben eine Mächtigkeit von 5 bzw. 12 m. Die Porosität liegt bei ca. 32 %. Die Permeabilitätswerte betragen parallel zur Schichtung 3,4 mD ($3,36 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$) und senkrecht zur Schichtung 0,08 mD ($7,9 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$) (Frage: sollte man die Permeabilitäten einheitlich als Durchlässigkeitsbeiwert in m/s darstellen?)

Die Basis des Profils bis in einer Teufe von 1000 m u GOK bildet die 315 m mächtige Formation des **Berrias – Valangins** aus Ton- und Schluffsteinen mit eingeschalteten Sandsteinschichten und Kohleflözen, die geringmächtig grundwasserleitend sind.

Die hydraulischen Merkmale der Ton und Schluffsteine sind nach /BFS 07/:

- Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]: $>10^{-9}$ - 10^{-7} /GEO 05/
- Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]: 10^{-8} /BFS 03/
- Porosität effektiv [%]: 10

Die eingeschalteten Sandsteine haben die Merkmale nach /BFS 07/:

- Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]: $> 10^{-5}$ – 10^{-3} /GEO 05/
- Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]: 10^{-4} /BFS 03/
- Porosität effektiv [%]: 25

2.4.3 Porenwasserüberdrücke in Tonsteinen

Nach /NAG 02c/ werden anomal erhöhte Porenwasserdrücke häufig in Ablagerungsbecken mit mächtigen, tonreichen Formationen unterschiedlichen Alters beobachtet. Im Wirtsgestein „Opalinuston“ sowie in den gering durchlässigen, tonigen Rahmengesteinen des Oberen Doggers/ Unteren Malms und des Lias wurden mit hydraulischen Packertests in der Bohrung Benken Porenwasser-Überdrücke festgestellt /NAG 02c/. Derzeit herrscht noch keine Klarheit darüber, ob ggf. überhydrostatische Druckhöhen in den Porenräumen der Unterkreide-Tonsteine anzunehmen sind. Diese resultieren möglicherweise aus vergangenen höheren Überlagerungsmächtigkeiten (Memory-

Effekt). Welche Einflüsse sie auf vertikale hydraulische Gradienten ausüben können, ist z. Zt. nicht bekannt. Die Genese der Unterkreidetone im Niedersächsischen Becken zeigt, dass ähnliche Effekte aufgrund der Absenkung und Hebung entstanden sein können. Ein direkter Nachweis fehlt bisher. Informationen hierzu sind evtl. aus Ergebnissen der Erdölexploration zu finden.

2.5 Hydrochemie

2.5.1 Tiefenwässer des Norddeutschen Tieflands

Die Tiefenwässer des Norddeutschen Tieflands sind hinsichtlich ihres hydrochemischen Charakters heterogen. Ein Zusammenhang zwischen Lithologie und Hydrochemie, wie er für Formationswässer typisch ist, findet sich nur in den wenigsten Fällen. Charakteristisch sind Vermischungen von Wässern verschiedener Teufen. Dies hat im Wesentlichen zwei Ursachen:

- Infolge der intensiven jungkimmerischen Bruchtektonik bestehen vielerorts vertikale und laterale Wasserwegsamkeiten. Dies betrifft zumindest lokal auch auf die mächtigen Tonsteinserien der Unterkreide zu.
- Aufgrund des häufigen Auftretens von Beckenstrukturen und einer Wechsellagerung von Aquiferen (Sandsteine und Karbonate) sowie Grundwasserstauern (Tonsteine) liegen häufig gespannte Grundwasserverhältnisse vor.

Hierdurch bestehen in vielen Regionen sowohl Wegsamkeiten (Störungen) als auch Antriebe (gespannte Grundwasserverhältnisse) für einen intensiven Wasseraustausch zwischen den verschiedenen Stockwerken.

In weiten Teilen des Norddeutschen Tieflands lässt sich eine im Wesentlichen dreigeteilte vertikale Grundwasser-Stockwerksgliederung beobachten. Die oberflächennahen meteorischen Grundwässer in den quartären/tertiären Schichten weisen (bei Anwesenheit carbonathaltiger Gesteine) deutliche Hydrogencarbonat-Gehalte auf. Sie sind sauerstoffhaltig und gering mineralisiert. Die Fließgeschwindigkeit ist z. T. hoch, die Zirkulationstiefe liegt oberhalb des Vorflutniveaus.

Im darunter liegenden grundwasserführenden Stockwerk (oft in 50 bis 100 m Tiefe) folgen sauerstoffärmere bis –freie Sulfat-Wässer. Ihre Herkunft ist in der Regel an die Salinare des Zechsteins und des Mesozoikums geknüpft und rührt von der Auflösung der dortigen Gips und Anhydrit-Vorkommen.

Die Sulfatwässer gehen in die Tiefe (häufig ab ca. 200 m) in Natriumchlorid-Wässer mit NaCl-Gehalt über 14 g/kg (Solen) über. Als potentielle Salzlieferanten kommen insbesondere die mächtigen Steinsalzvorkommen des Zechsteins (in Norddeutschland auch Rotliegendes) aber auch sämtliche Vollsalinare (Gesteinsserien, die aus einer vollständigen Eindampfung abflussloser Becken bis zur Salzabscheidung stammen) des Mesozoikums in Frage. Bei letzteren handelt es sich um die Evaporite des Oberen Buntsandsteins (Röt), des Mittleren Muschelkalks, des Gipskeupers sowie des obersten Juras (Salinare Horizonte des Münders Mergels). Weitere Herkunftsmöglichkeiten von NaCl-Wässern bestehen in der Lösung autochthoner Porensalze in nicht-salinaren Schichten der Trias und des Juras (z. B. Buntsandstein) oder originär connatem Wasser dieser Schichten.

Der Grund für diese weit verbreitete Veränderung des hydrochemischen Charakters bzw. der Zunahme der Salinität mit der Tiefe liegt u. a. in gravitativen Differentiationsprozessen des Wassers, wobei leichtere Ionen, wie Hydrogencarbonat- oder Sulfat- (Ionendichten: 0,77 bzw. 0,91) Wässer mit schwereren Chlorid-Ionen (Ionendichte: 1,45) überschichten. Hinzu kommt, dass wegen der Zunahme von Lösungsinhalt und Temperatur die Hydrogencarbonatlöslichkeit zurückgeht und Sulfate im tieferen anaeroben Milieu mikrobiell zersetzt werden.

Die in der Literatur beschriebene zunehmende Mineralisation mit der Tiefe (z.B. für die Unterkreide s. Abb. 2.11) ist weit verbreitet, aber meist nur rein qualitativ beschrieben. Lediglich für einzelne Standorte bzw. Regionen sind quantifizierte lineare Gradienten ausgewiesen bzw. abgeleitet. Es existieren meist nur generelle Aussagen über geringere Durchlässigkeiten im tiefen Untergrund, auch über eine generelle Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit zunehmender Teufe. Eine quantifizierbare direkte Kopplung zwischen zunehmender Grundwassermineralisation einerseits und abnehmender Grundwasserbewegung andererseits konnte - mit Ausnahme der Untersuchungen im Bereich der Schachanlage Konrad - bislang nicht recherchiert werden /AKE 02/.

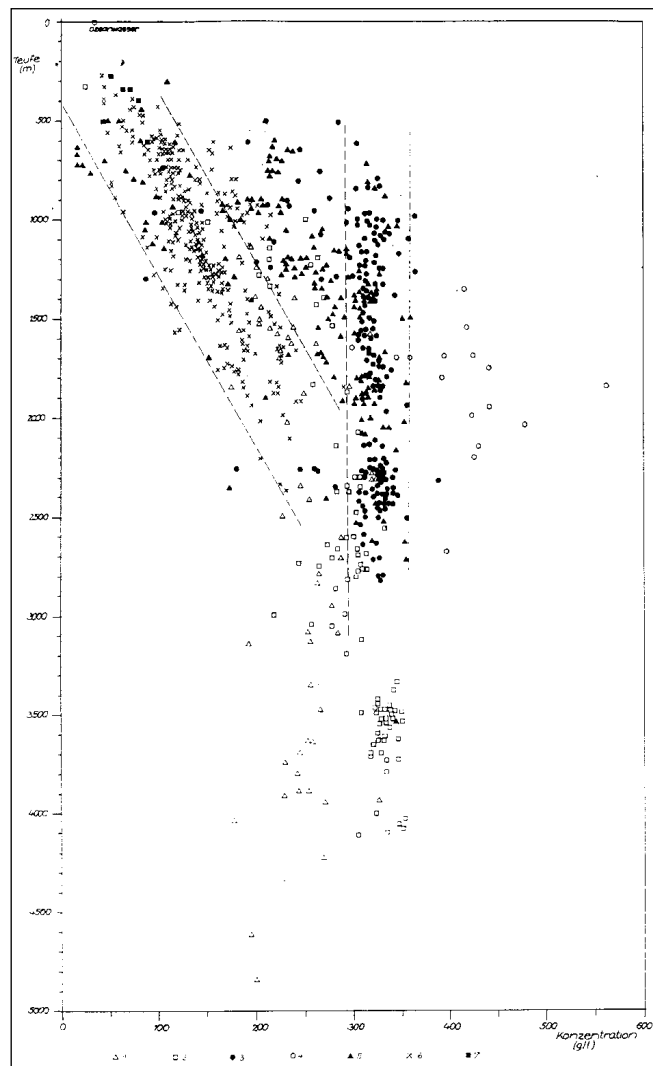


Abb. 2.11: Gesamtkonzentration der Schichtwässer des Nordteils der ehemaligen DDR und des Thüringer Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage /MUE 75/ (1-Präperm, 2-Rotliegendes, 3-Staßfurtcarbonat, 4-Plattendolomit, 5-Trias, 6-Rät-Unterkreide (Kreuze), 7-Tertiär).

Die oben beschriebene Gliederung der hydrochemischen Stockwerksabfolge ist für das Niedersächsische Becken nicht flächendeckend anwendbar. Eine wichtige Voraussetzung für die Ausbildung des beschriebenen teufenspezifischen hydrochemischen Charakters ist das Vorhandensein entsprechender löslicher Minerale im Untergrund.

2.5.2 Hydrochemie der Standortregion

Für den synthetisierten Standort im Tonstein werden folgende Bedingungen festgelegt:

Im oberen quartären Grundwasserleiter befinden sich junge holozäne Wässer mit einer warmzeitlichen Isotopensignatur. Die Salz-/Süßwassergrenze, definiert als Fläche mit einem TDS von 1 g/l, liegt bei ca. 100 m unter GOK. Der tiefere Grundwasserleiter wird durch Mischwässer aus jungen holozänen, warmzeitlichen und pleistozänen kaltzeitlichen Wässern gekennzeichnet. Darunter folgt eine lineare Zunahme der Salinität und damit der Dichte.

Nach /MUE 75/ besteht im Schichtenkomplex Tertiär bis Rät „zwischen Konzentration und Teufenlage der Wässer eine direkte Abhängigkeit“ Die Salzgehalte der Wässer schwanken bei Entnahmeteufen zwischen 250 bis 2400 m zwischen 30 g/l und 250 g/l. Aus den Begrenzungslinien in Abb. 2.11 lässt sich ein vertikaler Salinitätsgradient von 110 mg/l m ableiten. „Der entsprechende Wert im Bereich der Grube Konrad liegt bei 85 mg/l nur geringfügig unter diesem Wert“ /KLI 91/.

Für den synthetischen Tonsteinstandort wurde modellbedingt als Randbedingung (Startwert der Salzrechnung) ein linearer Salinitätsgradient von 263 mg/kg m (Modellierungsbedingt wird an der Basis des Modells eine gesättigte Salzlösung von 0,263 kg/kg mit einer Dichte von 1200 kg/m³ angenommen). In Endlagerteufe wird Tiefenwasser auf Basis der vorgenommenen Salzrechnungen (3 Million Jahre Rechenzeit) mit einem Lösungsinhalt von ca. 0,138 kg/kg = 153 kg/m³ bei einer Dichte von 1112 kg/m³ ermittelt.

Dieses Ergebnis (s. Abb. 2.12) liegt innerhalb der Bandbreiten von Untersuchungen nach /MUE 75/ und /KLI 91/.

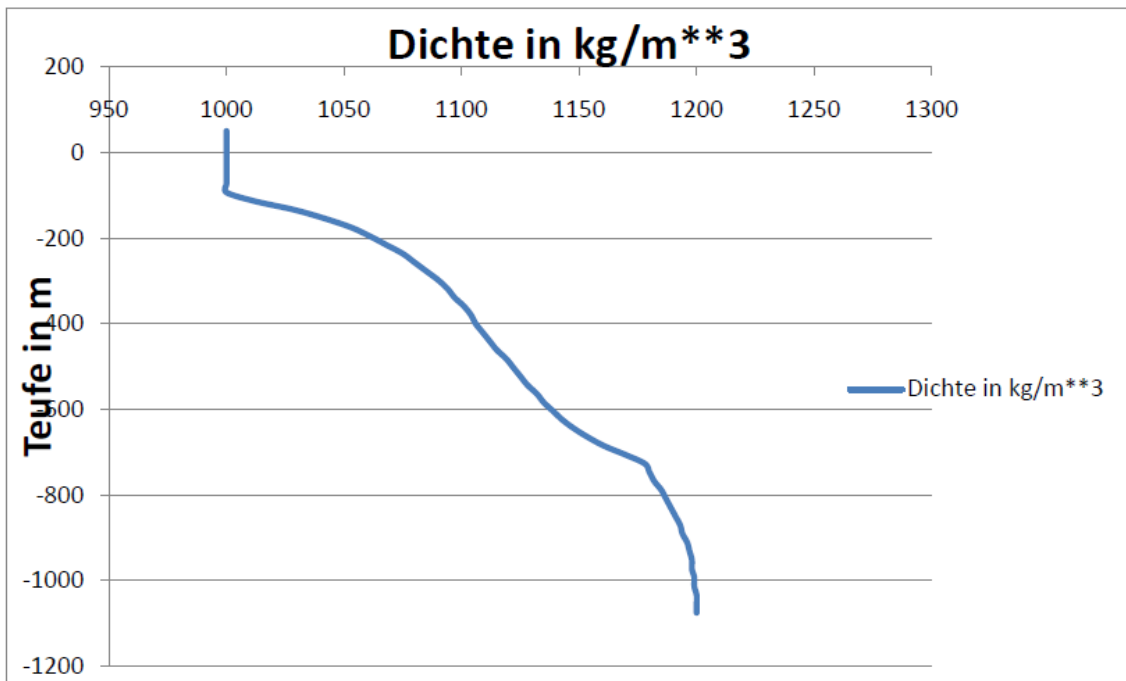


Abb. 2.12: Teufenabhängige Dichteverteilung als Ergebnis der Salzwasserrechnung nach 3 Millionen Jahren mit dem Programm SPRING

2.5.2.1 Sorption

Für die Gesteine einschließlich der Schichtengruppe Plänerkalke, die das grundwasserleitende Deckgebirge des Standorts charakterisieren wird kein Kredit von einer möglichen Sorption genommen. Diesem Bereich eines höheren Grundwasserumsatzes wird lediglich ein mögliches Verdünnungspotential zugeordnet, welches wenn notwendig standortspezifisch zu ermitteln ist.

Da im Verbundvorhaben VerSi insbesondere das Isolationsvermögen ewG bzw. des Wirtsgesteins betrachtet wird und das Deckgebirge nur als mögliches Verdünnungsreservoir mit einbezogen wird, werden auch die Herdbergellen-Mergel nicht mit konkreten Sorptionswerten belegt.

Die Tonsteine und Tonmergelsteine des **Hauterive - Barrême - Apt** (Wirtsgesteinsformation) weisen folgende in Tab. 2.2 dargestellten Sorptionswerte (Kd-Werte) /BFS 07/ auf:

Tab. 2.2: Sorptionswerte (Kd-Werte) für Tonsteine und Tonmergelsteine des Hauterive - Barrême – Apt aus /BFS 07/

Element	Kd [m ³ /kg]	Element	Kd [m ³ /kg]
H, C _{org} , Cl, Se Ag	0	Pd, Pa	5
Be, Ni	0,9	Sn	100
C _{inorg} , Ca, Sr	0,001	I	0,00003
Co	0,4	Cs	0,5
Zr, Ac, Am, Cm	10	Pb	2
Nb	4	Po	0,1
Mo	0,01	Ra	0,0007
Tc, Sm, Eu, Th, Np	50	U, Pu	20

Aufgrund der langen Halbwertszeiten stellen I-129 und Se-79 in Sicherheitsanalysen über 1 Million Jahre Zerfallsprodukte dar, die wesentlich in die Dosisbestimmung eingehen können. Das Transportverhalten und die Rückhaltung von Iod im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind daher von hoher Bedeutung. Eine Rückhaltung von Iod durch Sorption im Tonstein des ewG wird in der o. a. Tabelle mit einem Kd-Wert beschrieben, Selen dagegen nicht (s. Tab. 2.2).

Zur Absicherung dieser Werte wurden aktuelle Arbeiten zur Rückhaltung von Iod und Selen in der Literatur recherchiert und nachfolgend zusammengefasst.

In /HAG 05/ wurde die Sorption von Iod am Ton MX-80 und Bure-Ton experimentell untersucht. Die Rückhaltung von Iodid und Iodat wird unter hochsalinaren Bedingungen nicht als wirklich gut bezeichnet. Kd-Werte werden nicht angegeben. Nahid /NAH 07/ gibt an, dass Iodid besser als Iodat von Organotonen sorbiert wird. Kd-Werte werden aber nicht angegeben.

Nach einem Review /ROU 05/ wurde von der IAEA 1994 eine Variation von 0,082 - 33 l/kg für einen Kd-Wert von Iod beschrieben. Der vom DOE verwendete Wert von 1 l/kg für Iod lässt sich auf ältere Literatur zurückführen. Eine deutliche Korrelation der Sorption von Iod mit Bodenbestandteilen oder geochemischen Parametern ist nicht erkennbar, außer bei hohen Anteilen an organischen Bestandteilen. Die Auswertung

der Literatur nach /ROU 05/ erweitert den Wertebereich auf 0,04 – 120 l/kg, kommt aber zum Schluss, dass das Kd-Konzept wegen der Flüchtigkeit von elementarem Iod streng genommen nicht anwendbar ist.

Neuere Arbeiten /OCH 06/, /BAZ 06/, /DES 08/ weisen auf Anionausschlusseffekte hin, die die Verfügbarkeit von Porenräumen für eine Diffusion und Sorption einschränken. In /BAZ 06/ und /DES 08/ wird eine geringe Rückhaltung von Iodid in Tonproben (Callovo-Oxfordian) angegeben. Diese Rückhaltung könnte auf eine Oxidation des Iodids zu Iod oder eine Bindung an organische Bestandteile zurückzuführen sein. Glaus et al. /GLA 08/ schließen aufgrund des Diffusionsverhaltens von I-125 im Opalinuston, dass keine Sorption von Iodid oder Iodat stattfindet. Iodat wird in den Experimenten weitgehend vollständig und rasch zu Iodid reduziert. Es werden auch unbekannte Iod-Spezies detektiert.

Eine Rückhaltung bei geringen Iod-Konzentrationen nach /BAZ 06/ und /DES 08/, die möglicherweise durch Oxidation, Bindung an organische Bestandteile oder Sorption an andere Bestandteile des Tons erfolgt, führt zu einem Kd-Wert (bzw. Rd relativ zu Cl), der in der Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden kann. Die gegenteilige Schlussfolgerung in /DES 08/ erscheint aufgrund von experimentellen Unsicherheiten und Unklarheiten und deren Darstellung noch nicht überzeugend.

Die quantitative Berücksichtigung einer Iod-Rückhaltung mittels eines fiktiven, geringen Kd-Wertes im Projekt VerSi erscheint daher auf dem gegenwärtigen Kenntnisstand als realitätsnah angebracht.

Darüber hinaus gaben neue Veröffentlichungen in den letzten Jahren zu Selen (/SCH 08a, b/, /LOY 08/, /CHA 07/) Anlass die Sorption von Se-79 neu zu bewerten. Die Mobilität und Verfügbarkeit von Selen wird wesentlich vom Ablauf der Oxidation und Reduktion bestimmt. Die Sorption von Selenaten und Seleniten an Eisenoxiden ist beträchtlich. Sie nimmt aber rasch mit steigendem pH ab. Aufgrund der Annahme von oxidierenden Bedingungen bei der Endlagerung im Tonstein erwartet man, dass radioaktive Selen in Form von Selenit bzw. Selenat mit hohen Löslichkeiten vorliegt. Die Konzentration von Selen im Endlager kann daher höher als unter natürlichen Bedingungen sein. Da die Sorption von Selen mit steigenden pH abnimmt, erwartet man unter alkalischen Bedingungen bei Vorhandensein von Zementanteilen keine nennenswerte Rückhaltung. Eine Bildung von Mischkristallen wird nicht als wahrscheinlich angesehen /CHE 99/.

Mit Hilfe der Röntgenabsorptionsspektrometrie und Röntgen-Photoelektronenspektrometrie wurde in /SCH 08a, b/, /LOY 08/, /CHA 07/ eine außerordentlich rasche Reduktion von Selen in Gegenwart von Eisenmineralien nachgewiesen, die durch die Bildung von elementarem Selen und Eisenseleniden zur Verringerung der Löslichkeit von Selen führt. Die leicht voneinander abweichenden Detailergebnisse in den Arbeiten werden durch unterschiedliche experimentelle Bedingungen, verbesserter Auswertung und der Reaktionskinetik gedeutet. Die „Sorptions“ von Selen an die Eisenmineralpartikel findet nachweislich unter Reduktion zu elementarem Selen bzw. Selenid statt. Eine neuere Arbeit /BEH 07/ zeigt, dass die Sorption von Se-Anionen an Organotone sogar geringer ist als die Sorption von Chlorid.

Obwohl die Möglichkeit zur Reduktion von Se(IV, VI)-Verbindungen und die geringen Löslichkeiten von Se(0, -II) bekannt sind, wird die Ausfällung bzw. die Sorption von Se(0) oder Se(-II) bisher international in Langzeitsicherheitsanalysen nicht über einen Kd-Wert beschrieben. Echte Sorptionsprozesse sind nach wie vor als unbedeutend für Selenat und Selenit anzunehmen, wobei die Unterscheidung von „Sorptions“ zu „Reduktion mit anschließender Ausfällung“ als elementares Selen bzw. Selenid nur schwer zu treffen ist. Da Fe (0 oder II) unter reduzierenden Bedingungen in den entsprechenden geologischen Schichten vorkommen kann, erscheint dort eine Reduktion von Selen mit anschließender Fällung plausibel. Jedoch sind gesicherte Erkenntnisse im geologischen Umfeld eines Endlagers noch anzustreben.

Die quantitative Berücksichtigung einer Rückhaltung von Selen mittels eines fiktiven Kd-Wertes in den Langzeitsicherheitsanalysen des Projekts VerSi erscheint daher auf dem gegenwärtigen Kenntnisstand noch nicht als angebracht.

2.6 Hydrogeologische Modellbildung

Ein hydrogeologisches Modell ist eine schematisierte (vereinfachende) Abbildung der natürlichen Bedingungen, die aus der geologischen, hydrogeologischen und hydraulischen Interpretation der Ergebnisse der Standortuntersuchungen (Daten) resultiert. Das hydrogeologische Modell umfasst die Abgrenzung des Modellgebietes (Berechnungsgebiet) mit seinen hydraulischen Randbedingungen, die Abfolge, die Mächtigkeit und die Verbreitung der Ablagerung bzw. der geologischen Schichten. Diese werden meist in sogenannte hydraulisch wirksame Bereiche zusammengefasst und als hydrogeologische (hydrostratigraphische) Einheiten bezeichnet.

Nach dem Aufbau des hydrogeologischen Modells erfolgt seine Umsetzung in ein numerisches Modell um es der Langzeitsicherheitsanalyse zugänglich zu machen. Für numerische oder analytische Modellrechnungen werden zur Beschreibung der ablaufenden Prozesse im System zusätzliche Vereinfachungen und Annahmen getroffen. Die Genauigkeitsanforderungen an die Modellparameter richten sich nach der abzustimmenden erforderlichen Aussagegenauigkeit. Die Erstellung eines hydrogeologischen und eines darauf aufbauenden mathematischen Modells des Standortes erfolgt dabei in den folgenden Schritten:

1. Bemessung des Modellgebietes
2. Datenermittlung
3. Datenakquisition
4. Modelldatensammlung
5. Berücksichtigung der Datenunsicherheiten
6. Datenergänzung
7. Abstraktion und Schematisierung des Systems
8. Erstellung eines mathematischen (numerischen) Modells
9. Auswahl des Berechnungsverfahrens
10. Programmanwendung
11. Prüfen und Anwenden des Standortmodells
12. Istzustandsberechnung
13. Prognoserechnungen
14. Parametervariationen
15. Grenzfallbetrachtungen
16. Prozeduren zur Qualitätssicherung bei der Modellanwendung

Für den synthetischen Standort wurde auf Basis von Literaturrecherchen folgende hydrogeologische Modellvorstellung zu einem synthetischen Tonsteinstandort in Norddeutschland entwickelt.

2.6.1 Bemessung des Modellgebietes

Der erste Schritt beim Aufbau eines großräumigen Regionalmodells ist die Festlegung seiner Begrenzungen. Bei der Wahl der Umrandungen können im Hinblick auf die Definition von Randbedingungen für spätere Grundwasserströmungsberechnungen zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Eine Möglichkeit besteht in der Orientierung von Modellrändern entlang geologischer Strukturen (z.B. Störungen) oder hydrologischer Elemente (z.B. Vorfluter), aus deren hydraulischen Eigenschaften sich geeignete Druck- oder Flussrandbedingungen ableiten lassen. Einen vorzuziehenden Spezialfall bilden Strukturen, die als technisch undurchlässig angesehen und damit als abflusslose Modellränder (sog. *no flow boundaries*) definiert werden können. Fehlen diese Strukturen oder bestehen unzureichende Informationen hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften, so müssen die Modellränder so weit von dem problemwirksamen Betrachtungsgebiet entfernt liegen, dass sich die Unsicherheit bei der Definition ihrer Randbedingungen nicht auf das Strömungsgeschehen im Betrachtungsgebiet auswirkt. In diesem Fall ist durch Grundwasserströmungsrechnungen nachzuweisen, dass eine Variation der Randbedingungen an diesen Modellrändern keine merkliche Veränderung des Strömungsfeldes im zentralen Teil des Modells hervorruft.

Bei der Festlegung der Grenzen des Regionalmodellgebietes für die Fernfeldrechnungen zum synthetischen Tonsteinstandort wurde von beiden oben genannten Möglichkeiten Gebrauch gemacht. Die Lage der Modellränder ist in einem Ausschnitt einer geologischen Karte in Abb. 2.13 sowie in dem zugehörigen geologischen Schnitt in Abb. 2.14 dargestellt.

Die Standortregion befindet sich in einer großräumigen Syncline. Das Schichteinfallen beträgt max. 10° mit einem Azimut von 300° . Der südliche Modellrand (Rand der Syncline) orientiert sich an der z. T. unter einer geringfügigen quartären Bedeckung gelegenen Ausbisslinie der Kalkmergel-Tonsteine des Valangins, die südlich des Gebirgskammes topographisch niedriger liegt, als der Ausstrich der hangenden Endlagerformation des Unter - Apt bis Hauterive. Die mehr als 400 m mächtigen Ablagerungen werden fast ausschließlich aus Tonstein-Tonmergelserien aufgebaut. Infolge der gro-

ßen Mächtigkeit und der geringen Permeabilität dieser Schichtenfolge wird davon ausgegangen, dass ein nennenswerter Grundwasseraustausch über die Basis des Apt auch über lange Betrachtungszeiträume auszuschließen ist. Aufgrund des in Abb. 2.14 dargestellten Verlaufs der regionalgeologischen Struktur der Synkline bilden die Tonstein-Schluffserien des Berrias - Valangin somit sowohl den gering permeablen Südrand als auch die untere Modellbasis des Regionalmodells.

Der nördliche Modellrand wurde entlang einer WNW-ESE verlaufenden Linie etwas nördlich einer Störung (vgl. Abb. 2.14) gelegt. Bei dieser konstruierten jungen (oberkretazisch wirksamen) Abschiebung handelt es sich um eine tiefreichende steil nach Süden einfallende Abschiebung, die sich in West-Ost-Richtung erstreckt. Ihre Bewegungsaktivität war spätestens im Santon (mittl. Oberkreide) abgeschlossen. Die Störung kann mit hoher Wahrscheinlichkeit als gering durchlässige geologische Struktur angesehen werden. Diese Annahme stützt sich auf Überlegungen, dass die Abschiebung am Ende ihrer tektonischen Aktivität im Zuge einer Inversion in der Oberkreide einer N-S-gerichteten Kompression unterlag. Demzufolge ist anzunehmen, dass die Störungsflächen durch die zum damaligen Zeitpunkt noch plastisch reagierenden tonigmergeligen Ablagerungen der Kreide und des Juras verschmiert und damit weitgehend abgedichtet wurde.

Da es auf der anderen Seite jedoch auch Gründe für eine höhere Wasserwegsamkeit der Störung gibt, wurde der Modellnordrand parallel zur Störung nach Norden verschoben. Hierdurch wird es möglich, eine Permeabilitätsvariation der Störungszone durchzuführen und damit den hydraulischen Einfluss auf die Umgebung zu untersuchen.

Die westliche Modellgrenze wurde dem Verlauf eines Vorfluters 1. Ordnung angepasst. Auch dieser Modellrand wurde in erster Näherung als eine Grenze angesehen, über die kein Grundwasserabstrom oder -zustrom erfolgt. So bildet der Fluss die Hauptvorflut für (oberflächennahe) Grundwasservorkommen im Modellgebiet.

Von den Höhenlagen des südlichen Gebirgskammes, der eine topographische Höhe von max. 320 m NN einnimmt, wurde die östliche Modellbegrenzung bis in Höhe der nördlichen Störung verlängert. Als Ostgrenze des Modells wurde eine Linie gewählt, die den Azimut des Einfallens der Synkline (300°) berücksichtigt, d. h. dass aus südöstlicher Richtung, wenn überhaupt, nur von einem untergeordneten Zufluss von Tiefenwässern in der Unterkreide auszugehen ist. In ihrer weiteren Fortsetzung verläuft die Grenze bis zu einer Salzstruktur, die eine topographische Höhe von ca. 70 m NN ein-

nimmt und in der Karte an der Oberfläche durch ausstreichende präkretazische Gesteine erkenntlich ist.

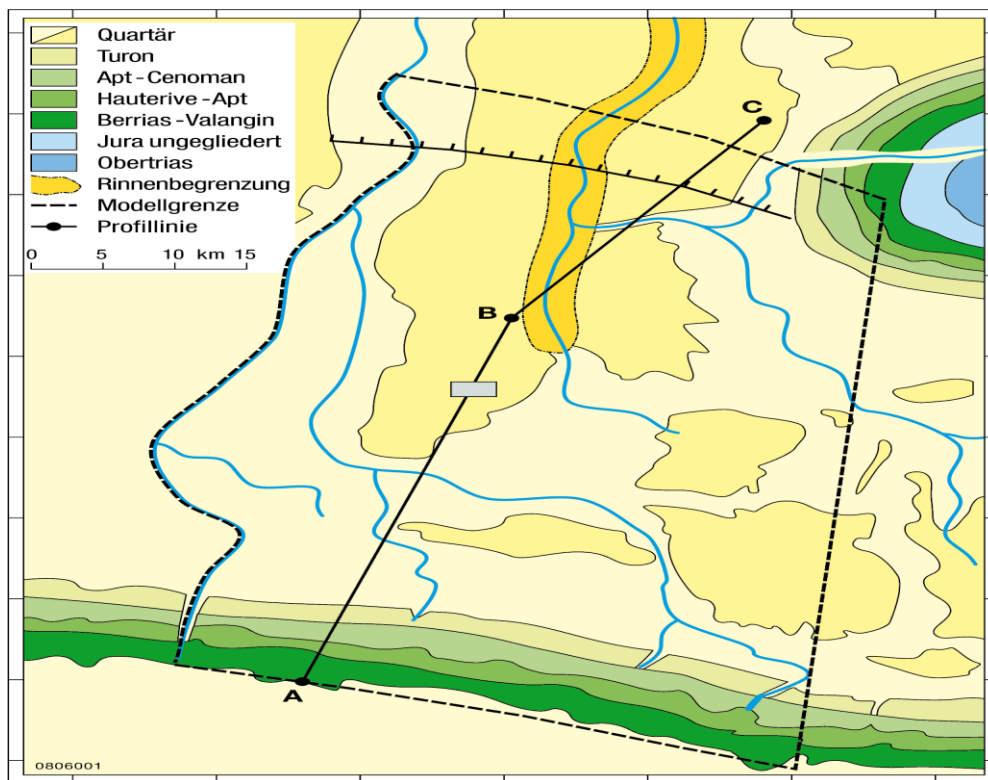


Abb. 2.13: Lage und Umgrenzungen des Regionalmodells

Der Salzstock reicht aus einer Teufe von ca. 3000 m bis in eine Teufenlage von ca. 150 m unter GOK. An seinen Flanken sind mesozoische Gesteine aufgeschleppt und streichen bis einschließlich Obertrias aus. Mit dem Aufschleppen der Schichtenfolge der die Modellbasis bildenden Tonstein-Schluffserien des Berrias-Valangin wird auch hier die Grenze des Modells gezogen.

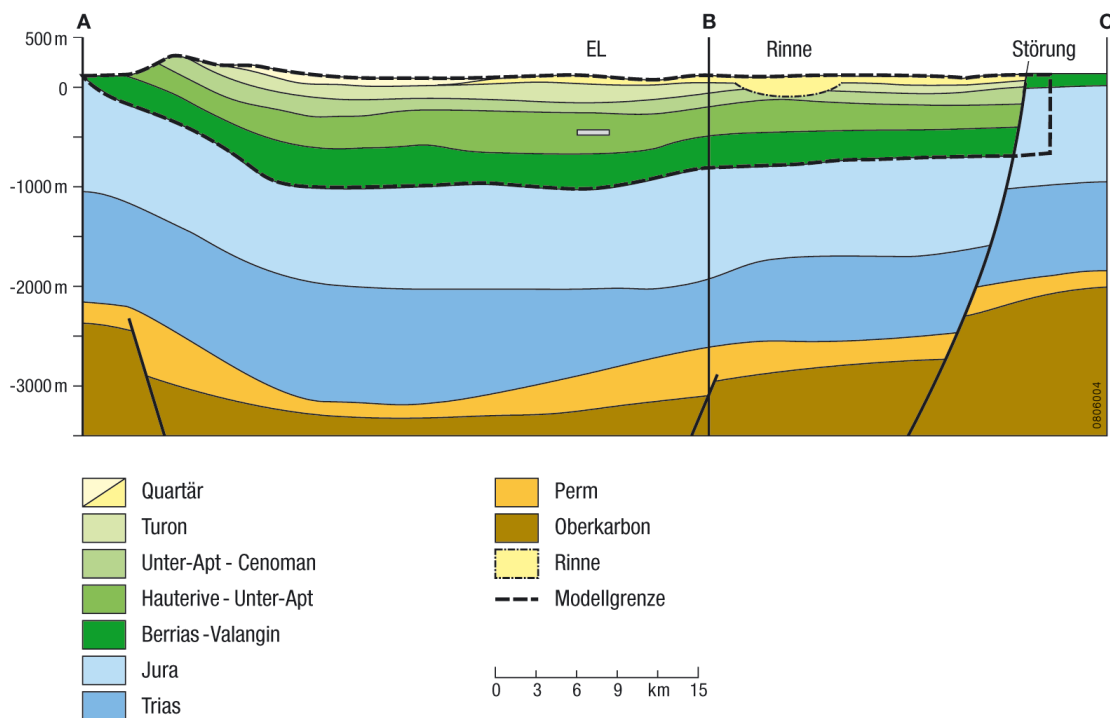


Abb. 2.14: SSW-NNE/SW-NE-Schnitt durch das Regionalmodellgebiet

Während aus hydrogeologischer Sicht die Vorgabe von *no-flow*-Randbedingungen für die Modellbasis und den südlichen Modellrand aufgrund der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit der die Basis bildenden tonreichen Schichten des Berrias - Valangins durchaus zutreffend erscheint, ist diese Annahme für den Ostrand sowie für nördliche Teile der Westrandes (Abtauchen der Syncline in nordwestlicher Richtung) nicht ohne weiteres möglich. So fehlen in diesen Bereichen geologische Strukturen, die diese Modellannahmen belegen. Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, ist nachzuweisen, dass diese Ränder so weit vom Betrachtungsgebiet entfernt liegen, dass eine Variation ihrer hydraulischen Bedingungen keinen Einfluss auf den relevanten Bereich, d. h. auf das Strömungsfeld in der Umgebung des Endlagerstandorts ausübt.

2.6.2 Abstraktion und Schematisierung des Systems

Durch die oben genannten Begrenzungen wurde ein Regionalmodellgebiet abgesteckt, welches einen Lithosphärenausschnitt mit einer Oberfläche von ca. 45x30 km und einer maximalen Tiefe von 1000 m nachbildet. Die enthaltene präquartäre Schichtenfolge reicht von den Tonsteinserien der marinen Unterkreide (Berrias und Valangin) bis zur Oberkreide (Turon). Das geologische Modellinventar, in Abschnitt 3.1 zusammen-

gefasst, wird in hydrogeologische Haupteinheiten ähnlicher hydraulischer Eigenschaften in Tab. 2.3 aufgelistet.

Tab. 2.3: Hydrogeologische Einheiten des Regionalmodells.

Hydrogeologische Haupteinheit	Fazies (Untereinheit)	Mächtigkeit [m]	Lithologische Ausbildung
Quartär/ Unteroligozän	Sand/Kies	40-50	Glazifluviale Sedimentfolge, Terrassenschotter und -sande
Quartär/ Unteroligozän	Ton/ Schluff	0-10	Schmelzwasserablagerungen, Geschiebelehme, Tallehme, Lößlehm, marine Schluffe und Tone
Turon	Kalkstein	80	Geklüftete Kalksteinfolge mit eingeschalteten Mergeln
Cenoman-Ober Apt	Plänerkalk-Gruppe	40	mergelige Tonsteine und darüber schluffige Ton- und Kalkmergelsteine.
Mittel bis Unter-Apt	Herbergellen-Mergel	60	Wechselfolge von dunklen, tonigeren und helleren, carbonatreicheren Bänken
Unter-Apt - Barreme - Hauterive		455	Gleichförmige, feingeschichtete Tonsteine und Ton-/Mergelsteine; uniforme Tonmatrix
Valangin - Berrias -		315	Folge aus fein geschichteten Ton- und Schluffsteinen, u.a. Tonschiefer mit Sandsteinlagen und Kohleflözen

Farben: Blau= GWL, Gelb = Grundwassergeringleiter, hell gelb = Grundwassernichtleiter

Die bedeutendste Störung im Modellgebiet ist eine W-E verlaufende Störung im Norden des Modellgebietes. Der Versatzbetrag liegt bei etwa 500 m, wobei aufgrund der z.T. synsedimentären Tektonik nördlich und südlich der Störung Mächtigkeitsunterschiede auftreten können. Weitere Störungen sind unbekannt.

Zur Überprüfung der Einwirkung auf das hydraulische Regime sollte diese Störung als dreidimensionale Diskontinuität behandelt werden. Dieser Darstellung liegt die Modellvorstellung zugrunde, dass es sich bei Störungen nicht um zweidimensionale Flächenelemente handelt, sondern dass Störungen dreidimensionale Zonen darstellen, die gegenüber ihrer Umgebung infolge Materialwechsels einen Durchlässigkeitskontrast aufweisen (Abb. 2.15).

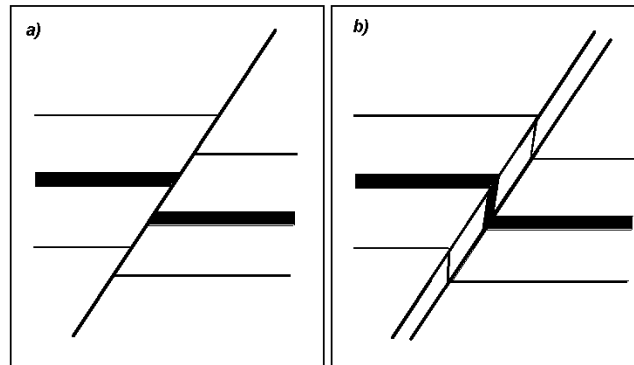


Abb. 2.15: Möglichkeiten bei der Diskretisierung von Störungen: a) als Flächenelement, b) als dreidimensionale Störungszone.

Der Vorteil bei der Wahl dieser Geometrie liegt in einer höheren Flexibilität bei der Variation der hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen. So muss im Fall einer flächenhaften Diskretisierung die gesamte Störungsbahn mit einer einheitlichen Transmissivität belegt werden. Bei einer dreidimensionalen Behandlung können hingegen hydraulische Leitfähigkeit und Porosität schichtweise in der Störungszone verändert werden. Hierdurch ist es beispielsweise möglich, den hydraulischen Kontrast gegenüber der Umgebung aufzuheben, wobei allerdings der geometrische Versatz nach wie vor bestehen bleibt.

2.6.3 Hydraulische Parameter

Hydraulische Modellparameter sind Werte für die Gebirgsdurchlässigkeit und effektive Porosität, die jeder hydrogeologischen Einheit zugeordnet werden. Die Parameterbelegung und die Bandbreiten der Werte für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten werden in Tab. 2.2 zusammengestellt.

Bei der Aufstellung der hydraulischen Parameter für das tonige Wirtsgestein (Unter - Apt bis Hauterive) kann nicht auf Ergebnisse einer diskreten untertägigen Erkundung zurückgegriffen werden. Für diese und den überwiegenden Teil der im Regionalmodell enthaltenen hydrogeologischen Einheiten stützt sich die Parameterbelegung aufgrund fehlender Geländedaten auf die Ergebnisse umfangreicher Studien des BfS, die u. a. im Zusammenhang mit der Planung des Endlagers Konrad und den Arbeiten zum AkEnd erstellt wurden. Weiterhin wurden Literaturdaten und Untersuchungsergebnisse aus dem norddeutschen Raum zusammengestellt und ausgewertet. Auf dieser Basis

wurden für die dortigen hydrogeologischen Einheiten Wertebereiche für die hydraulischen Parameter abgeleitet. Die im Modellgebiet auftretenden Gesteinsschichten der Unterkreide sind zwar von der Stratigraphie her mit dem geologischen Inventar des Standortes Konrad vergleichbar, eine direkte Übertragung der Parameterspannen ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da teilweise Unterschiede hinsichtlich der Faziesausbildung und der Teufenlage bestehen. Aus diesem Grunde wurden die hydraulischen Parameterspannen nach einem detaillierten Vergleich der lithologischen Beschaffenheit und des Teufenniveaus der einzelnen stratigraphischen Horizonte beider Standorte entsprechend abgewandelt auf die hydrogeologischen Einheiten des Regionalmodells übertragen.

Für die quartären Ablagerungen wurde eine Untergliederung in sandig-kiesige Terrassensedimente und in schluffigtonige Ablagerungen (pleistozäne Geschiebemergel, Löß- oder Tallehme) vorgenommen. Bei den meisten Schichten der Unterkreide wurden Anisotropiefaktoren vorgegeben, um eine Reduktion der Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung infolge der Einschaltung von tonigen Horizonten simulieren zu können. Anhaltspunkte zur Durchlässigkeitsanisotropie stammten aus einer Abschätzung der Durchlässigkeit der einzelnen Horizonte dieser hydrogeologischen Einheiten und der Berechnung der resultierenden vertikalen Permeabilität. Darüber hinaus erfolgt die Definition eines ersten Parametersatzes, der mit den hydraulischen Parametern belegt werden soll, die als wahrscheinlichste Größen (*best-estimate*-Werte) angesehen werden. Zur Einordnung des vorgeschlagenen ersten Parametersatzes werden die abgeschätzten unteren bzw. oberen Grenzen für die Durchlässigkeitsbeiwerte und Porositäten dargestellt (Tab. 2). Auch bei den im Modellgebiet enthaltenen Störungen sollte eine Variation der hydraulischen Eigenschaften erfolgen.

Für den synthetischen Standort werden folgende hydrogeologische Einheiten und Bedingungen vorgeschlagen: In einer ersten Modellbildung wird von einer Prinzipgliederung der Schichtenfolgen des Standorts in sechs hydrogeologische Einheiten ausgegangen. Die oberste hydrogeologische Einheit wird durch einen Grundwasserleiter gebildet, der aus den quartären Schichten des Pleistozäns gebildet wird. Hydrogeologisch nur durch nicht flächenhaftverbreitete Geschiebelehme (zweite hydrogeologische Einheit) getrennt, folgen die **grundwasserführenden Schichten der Kreide, die aus Kalk- und Mergelsteine des Turons und Kalkmergel des Apt-Cenomans** bestehen. Aufgrund der lückenhaften Verbreitung der eiszeitlichen Geschiebelehme werden in erster Näherung die Einheiten eins und drei zu einem Grundwasserleiter zusammenge-

fasst und ungegliedert mit einem mittleren Durchlässigkeitsbeiwert 10^{-4} m/s horizontal und 10^{-5} m/s vertikal und einer effektiven Porosität von 10 % belegt.

Im Liegenden des Grundwasserleiters folgt mit 60 m und mit einem mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-8} m/s als vierte hydrogeologische Einheit ein **Grundwasserleiter (Herdbergellen Mergel)**. Dem folgt als **Wirtsformation** als fünfte hydrogeologische Einheit ein ca. 450 m mächtiger Grundwassernichtleiter, gebildet aus den **Tonsteinen der Unterkreide (Hauterive-Barreme-Apt)**. Die Durchlässigkeitsbeiwerte, liegen im Mittel bei $2 \cdot 10^{-14}$ m/s (\perp zur Schichtung) / 10^{-13} m/s (\parallel zur Schichtung), die effektive Gebirgsporosität liegt bei 10 %.

Die Basis des Modells bildet bis in einer Teufe von 1000 m u GOK die 315 m mächtige hydrogeologische Einheit des **Berrias – Valangins, die aus Ton- und Schluffsteinen** mit eingeschalteten geringmächtig **grundwasserleitenden Sandsteinschichten und Kohleflözen** besteht. Die Ton und Schluffsteine besitzen einen Durchlässigkeitsbeiwert 10^{-8} m/s und eine effektive Porosität von 10 %. Die eingeschalteten Sandsteine haben einen Durchlässigkeitsbeiwert 10^{-6} m/s und eine Porosität effektiv 25 %.

In wieweit diese geringmächtigen Sandsteine als eigene hydrogeologische Einheit ausgewiesen werden müssen, bedarf einer weiteren Diskussion bzw. vereinfachter Modellrechnungen (s. Abschnitt 3.7.5.). Die in der Teufe eingeschalteten grundwasserführenden Sandsteine erhalten ihr hydraulisches Potential von dem nächstgelegenen Höhenzug, wo die Unterkreideschichten an der Tagesoberfläche austreichen. Im Modellschnitt liegen diese möglichen Infiltrationsgebiete topographisch niedriger als die hangenden Formationen. Wie stark sich das Gefälle in den tieferen Bereichen auswirkt (die Höhenlage der austreichenden Schichten des Berrias – Valangin liegen um ca. 150 m niedriger als die der Oberkreidekalke), hängt von den hydraulischen Eigenschaften der Sandsteine, ihrem räumlichen Bau (Mächtigkeit) und dem Salzgehalt im Porenwasser ab. Mit der Annahme einer linearen Zunahme der Dichte mit der Teufe ist jedoch davon auszugehen, dass am Endlagerstandort in den Tonsteinen in Endlagerteufe nur diffusive Prozesse eine Rolle spielen. Das Austreichen derselben Schichten am Salzstock im Südosten hat aufgrund der geringen Potentialhöhe (Höhenlage ca. 70 m NN) nur eine geringe Bedeutung. Insgesamt ist in größeren Teufen nur mit einer sehr geringen Tiefenwasserströmung dem Azimut und dem Einfallen der Syncline folgend nach Nordwesten zu rechnen. 2D-Modellrechnungen die diesen möglichen Einfluss der Kohleflöze/Sandsteine bewerten, erfolgen im Abschnitt 2.6.4.

Zu den Auswirkungen der im Modellgebiet möglicherweise vorhandenen aber nicht detektierten Störungen wurden folgende Überlegungen gemacht. Bei diesen Störungen ist davon auszugehen, dass die Inversionsbewegungen keine Durchlässigkeitsverminderung auf die parallel zur Kompressionsrichtung verlaufende, N-S gerichtete Struktur ausgeübt haben. Insofern sollte ihre Permeabilität im Referenzfall um den Faktor 10 und die Porosität um den Faktor 2 gegenüber der ungestörten Umgebung erhöht werden. Bei der Definition des Minimalfalls kann dagegen auch die Möglichkeit betrachtet werden, dass die Störung keinen Durchlässigkeitskontrast gegenüber ihrer Umgebung aufweist. In den ersten Testrechnungen wurde eine Veränderung der Durchlässigkeit der Schichten im Bereich der Störung nicht berücksichtigt (s. Abschnitt 2.6.4).

Im Gegensatz zu den kleinräumigen Modellen zum Grubengebäude erfolgte für das Regionalmodell keine Differenzierung des Grubengebäudes in versetzte Untertagebereiche. Bei der Parameterwahl für den Referenzrechenfall wurde in einer ersten Arbeitshypothese angenommen, dass auch nach Beendigung der Bergbautätigkeit keine Resthohlräume bestehen bleiben, so dass für das Grubengebäude keine deutlich höheren Werte für Permeabilität (Faktor 10) und effektive Porosität angesetzt wurden, als für bergbaulich unbeeinflusste Bereiche im Wirtsgestein.

Dichteeffekte aufgrund von Grundwasserversalzung sind zu berücksichtigen, da die Unterkreidetone in Norddeutschland in der angenommenen Tiefe des Endlagers Salzgehalte im Bereich von 150 g/l aufweisen.

Im oberen quartären GWL befinden sich junge holozäne Wässer mit einer warmzeitlichen Isotopensignatur. Der tiefere GWL wird durch Mischwässer aus jungen holozänen, warmzeitlichen und pleistozänen kaltzeitlichen Wässern gekennzeichnet.

Die Salz-/Süßwassergrenze, definiert als Fläche mit einem TDS von 1 g/l, liegt bei ca. 100 m unter GOK im oberen Aquifer. Darunter erfolgt eine lineare Zunahme der Salinität und Dichte bis 1000 m u. GOK bis zur Sättigung an NaCl (311 g/l) bei einer maximalen Dichte von 1200 kg/m³.

Für den synthetischen Tonsteinstandort wurde modellbedingt als Randbedingung (Startwert der Salzrechnung) ein linearer Salinitätsgradient von 263 mg/kg m (Modellierungsbedingt wird an der Basis des Modells eine gesättigte Salzlösung von 0,263 kg/kg mit einer Dichte von 1200 kg/m³ angenommen). In Endlagerteufe wird Tiefenwasser auf Basis der vorgenommenen Salzrechnungen (3 Million Jahre Rechenzeit) mit einem

Lösungsinhalt von ca. 0,138 kg/kg = 153 kg/m³ bei einer Dichte von 1112 kg/m³ ermittelt.

Tab. 2.4: Parameter der hydrogeologischen Einheiten im Hydrogeologischen Modell.

Hydrogeologische Einheit	Fazies Untereinheit	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]				effektive Porosität		
		Min. ²⁾	Ref. ³⁾	Max. ⁴⁾	AF ⁵⁾	Min.	Ref.	Max.
Quartär/ Unteroligozän	Sand/Kies		5 · 10 ⁻⁴		1/50-	0,20	0,25	0,30
	Ton/ Schluff	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	5 · 10 ⁻⁴	1/50	0,05	0,10	0,15
Turon	Kalkstein	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	-	0,1	0,05	0,01
Apt – Cenoman	Mergel der Plänerkalk-Gruppe	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	-	0,10	0,14	0,20
	mergelige Tonsteine der Herbergellen-Mergel	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	1/100	0,10	0,14	0,20
Hauterive Barreme - Apt	-	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	1/5	0,07	0,1	0,12
	Fischschiefer						0,32	
	Blättertone		3 · 10 ⁻⁸		1/40		0,32	
Berrias – Valangin	Ton und Schluffsteine	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷			0,10	
	Kohleflöze/ Sandsteinschichten	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³		0,20	0,25	0,30
Grubengebäude	Bentonitversatz/ EDZ	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	-	0,10	0,12	0,39**
Störungen	Nord				1/10			
	sonstige				10			

²⁾ Minimalfall, ³⁾ Referenzfall, ⁴⁾Maximalfall ⁵⁾ Anisotropiefaktor der vertikalen Permeabilität. ** trocken

Dieses Ergebnis (s. Abb. 2.14) liegt innerhalb der Bandbreiten von Untersuchungen nach /MUE 75/ und /KLI 91/.

Hinsichtlich der anderen physikalischen Eigenschaften des Fluids wird in Endlagerteufe von einer Temperatur von etwa 23,5°C und bei einer Dichte von ca. $1,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ von einer dynamischen Viskosität von $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$ ausgegangen.

2.6.4 Erstellung eines mathematischen (numerischen) Modells

2.6.4.1 Modellränder und Randbedingungen

Für die Modelloberfläche entsprechend der topographischen Höhe wurde als Randbedingungen eine Grundwasserneubildung von 150 mm/a über das gesamte Gebiet angenommen. Die aus Grundwassergleichenplänen ermittelten Grundwasserflurabstände liegen in der Ebene im allgemeinen unter 3,5 m, im Bereich der Niederterrasse des Vorfluters 1. Ordnung bei maximal 5 m. Aufgrund dieser geringen Höhendifferenzen zwischen Topographie und Grundwasseroberfläche, die verglichen mit den großen Abmessungen des Regionalmodells unterhalb der Konstruktionsgenauigkeit liegen, könnte in diesem Bereich auch die Morphologie der Erdoberfläche als Druckhöhe angesetzt werden. Eine Abweichung hiervon liegt im Süden des Modellgebiets vor.

Aus der Gebirgsregion im Süden liegen keine Daten aus Grundwassermessstellen vor. Da in den präquartären Aufragungen Festgestein mit mäßiger bis geringer Durchlässigkeit anstehen, wird angenommen, dass dort ein Bereich von oberflächennaher Verwitterung vorliegt. Diese modelltechnisch durchgehende Verwitterungsschicht bewirkt, dass die angenommene Grundwasserwiederergänzung sich gleichmäßig über den Gebirgsbereich verteilt und nicht oberflächlich abfließen kann bzw. sich kein schwebender Grundwasserhorizont bilden kann. Insofern wird eine Verwitterungsschicht von ca. 25 m über diesen Modellbereich mit einer Durchlässigkeitsbeiwert von $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ modelliert. Die topographische Hochlage liegt im Modell bei 305 m NN im Südwesten im Bereich des Ausstreichens der Herdbergellen Mergel an Tagesoberfläche, die Grundwasseroberfläche bei ca. 110 m NN (Ergebnis der Modellberechnung über Neubildung). Die topographische Hochlage der Oberkreidekalke liegen bei max. 280 m NN, die Grundwasseroberfläche bei ca. 195 m unter GOK (Ergebnis der Modellberechnung über Neubildung). Die topographische Tieflage im Modell im Bereich der Vorflut liegt bei ca. 40 m NN (im vertikalen Modellschnitt bei ca. 45 m NN im Bereich einen kleinen

Vorflut) Bei einer Distanz zwischen Hochlage und Standort (GOK bei 50 m NN, GW-Flurabstand von 3,50 m u. GOK) von 20 km, wird in diesem oberen Grundwasserleiter von einem mittleren hydraulischen Gradienten von ca. $40 \text{ m}/20.000\text{m} = 0,002$ ausgegangen.

Die vertikalen Modellränder und die Modellbasis werden für die Standard-Rechenläufe als abflusslose Ränder definiert (*no-flow boundaries*), über die kein Grundwasserein- oder -ausstrom stattfindet. In diesem Fall findet ein Wasseraustausch im Modellgebiet nur über die Modelloberfläche statt und demzufolge existieren keine Verdünnungspotentiale durch Ein- oder Ausstrom über die vertikalen Modellränder.

Aufgrund der dargestellten Unsicherheiten bei der Definition geeigneter Randbedingungen für die West-, Ost- und Nordgrenze des Modellgebietes ist der Einfluss auf das Strömungsfeld im Modellinneren zu untersuchen, den eine Variation der Randbedingungen dieser Modellgrenzen ausübt.

2.6.5 Modellparameter für das Programm Spring

Modelllänge: 36 km; Höhen: zwischen 306m NN und -1125m NN Elementgröße: 15m*50m, Mächtigkeit: 1m Anzahl Elemente und Knoten: 60000

Für die Durchlässigkeiten und Referenzporositäten (s. Tab. 2.2) wurde kein Anisotropiefaktor für vertikale Permeabilität in den ungesättigten Modellrechnungen verwendet:

- Quartär über die gesamte Oberfläche: $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
- Turon: 10^{-5} m/s
- Apt-Cenoman: 10^{-10} m/s
- Hauterive-Barreme-Apt: 10^{-13} m/s
- Berrias-Valangin: 10^{-8} m/s
- Kohleflöze: 10^{-4} m/s
- Endlager: 10^{-12} m/s

Keine Berücksichtigung erhöhter Durchlässigkeit in Störung. Diffusion Salz: $D_p = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ Randbedingungen:

- Grundwasserneubildung: 150 mm/a über die gesamte Strecke
- Rand unten und rechter Rand geschlossen
- Für die Salzrechnung wurde eine Anfangsschichtung entsprechend einem mit der Tiefe zunehmendem Salzgehalt (Salinitätsgradient) angenommen (s. Abb. 2.16)

Gerechnet wurden 6000 Zeitschritte mit einer Länge von 1 Monat.

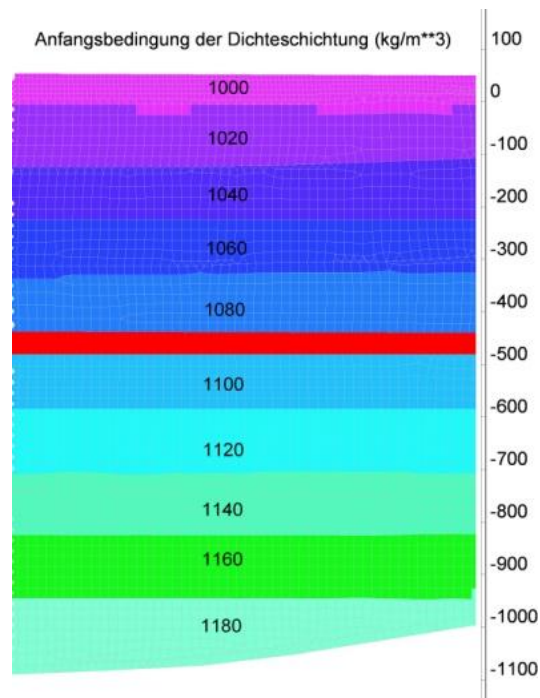


Abb. 2.16: Anfangsrandbedingung eines linearen Dichtegradienten im 2D-Modell für das Programm SPRING

2.6.6 Hydrogeologische Modellrechnung zur Definition der Randbedingung

Zur Definition der hydraulischen Randbedingungen an der Grenze des ewG wurden auf Basis des Schnitts in Abb. 2.14 zweidimensionale Modellrechnungen mit dem Programmsystem SPRING durchgeführt. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt (Abb. 2.17ff) und diskutiert.

In einem ersten Schritt wurde mit der angenommenen Grundwasserwiederergänzung die Druckverteilung im Modellgebiet berechnet (Abb. 2.17).

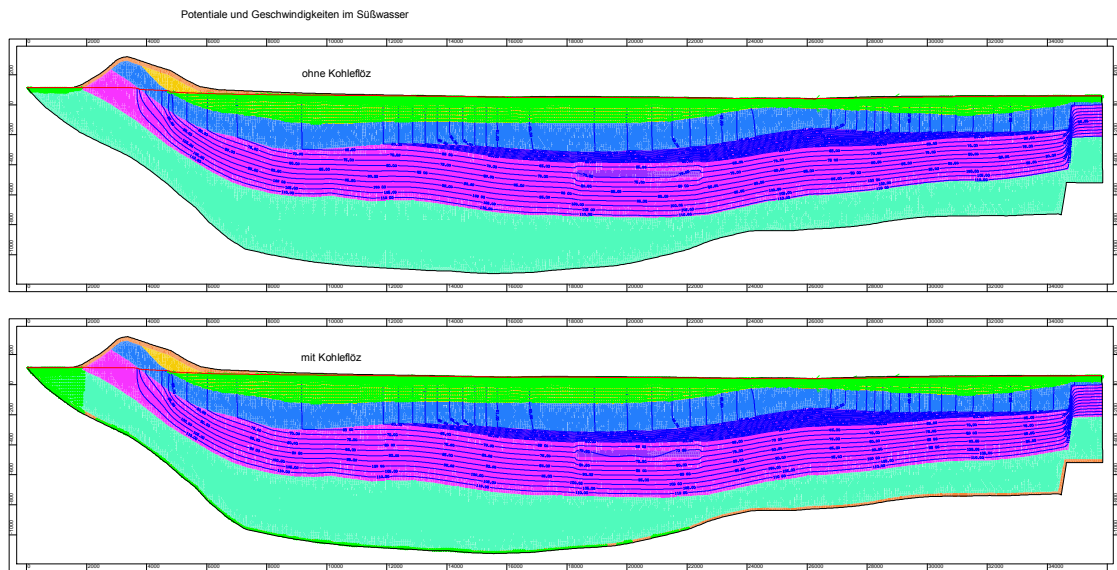


Abb. 2.17: 2D-Modell des SSW-NNE/SW-NE-Schnitts durch das Regionalmodellgebiet (Durchlässigkeitsbeiwertverteilung, Süßwasserdruckverteilung ohne und mit Kohleflöz)

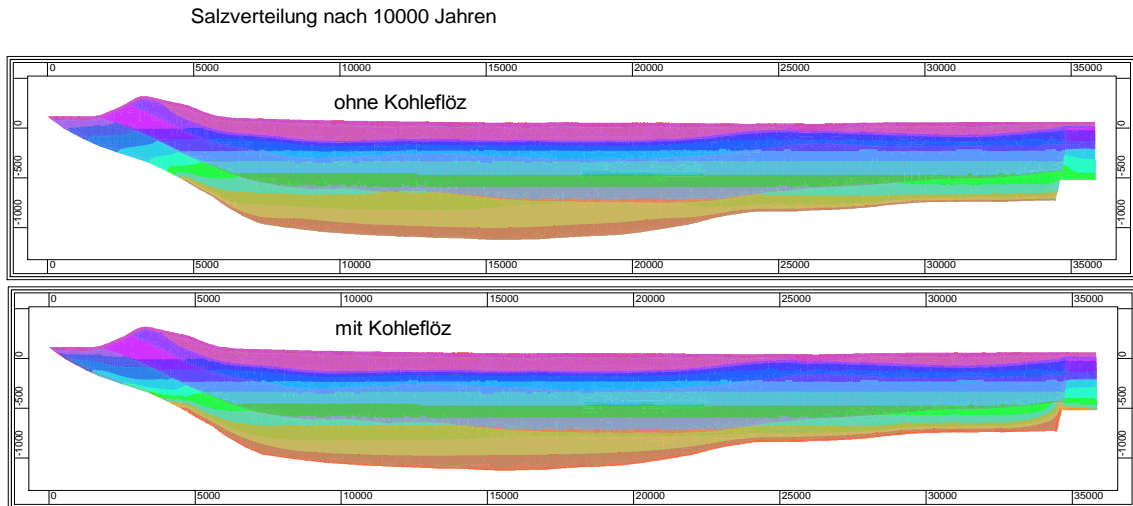


Abb. 2.18: 2D-Modell des SSW-NNE/SW-NE-Schnitts durch das Regionalmodellgebiet (oben, Salzverteilung ohne Kohleflöz nach 10.000 a; unten, Salzverteilung mit Kohleflöz nach 10.000 a)

In einem nächsten Schritt wurde für beide Rechenmodelle (mit/ ohne Kohleflöze) in einer transienten Rechnung über einen Zeitraum von 10.000 a die Salzverteilung in den Modellen berechnet (Abb. 2.18). Als Anfangsbedingung der Rechnung wurde ein

mit der Tiefe zunehmender Salzgehalt (linearer Dichtegradient) vorgegeben (Abb. 2.16). Im Ergebnis zeigt sich, dass die beiden Dichteverteilungen mit und ohne Kohleflöz keine großen Unterschiede aufweisen.

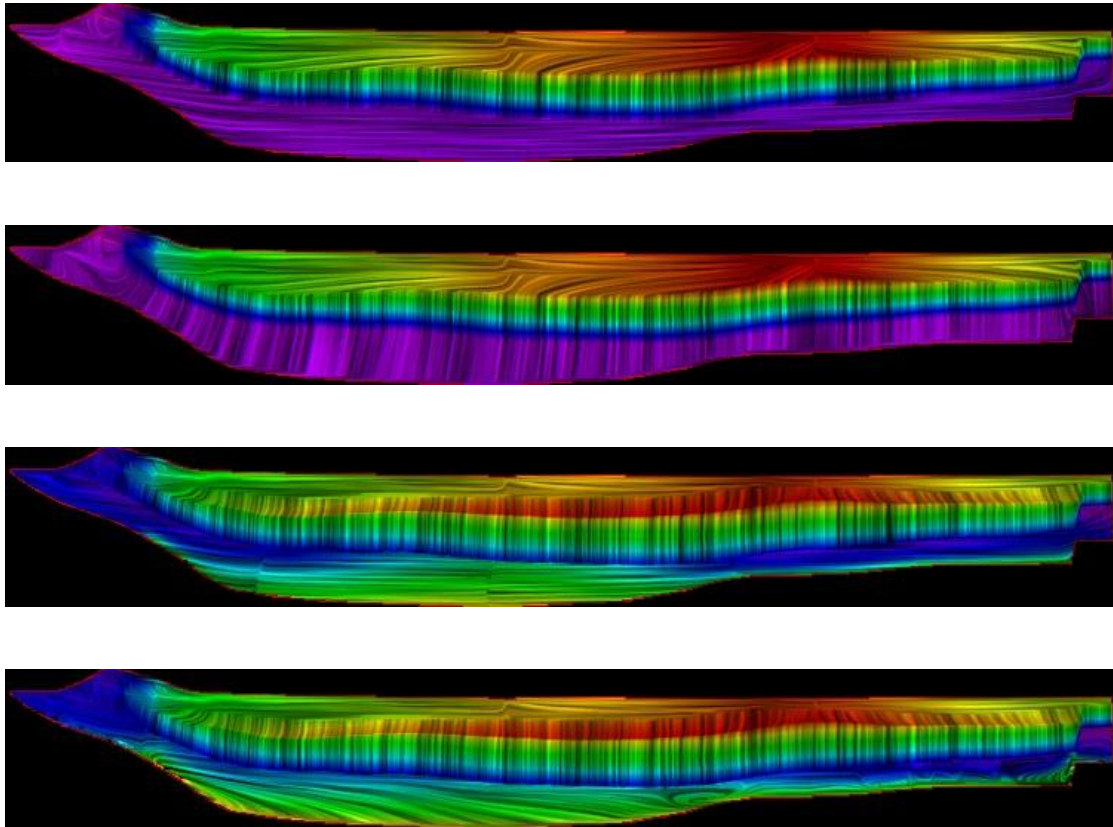


Abb. 2.19: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Rechenzeitraum 10.000 a, Stromliniendarstellung (oben Süßwasserrechnung ohne Kohleflöz, darunter Süßwasserrechnung mit Kohleflözäquifer, darunter Salzrechnung ohne, darunter mit Kohleflözäquifer $k_f=10^{-4}$ m/s)

Das Ergebnis der Süßwasser-Rechnungen zeigt, dass sich in den Fällen der Modelle ohne und mit hydraulisch wirksamen Kohle/Sandflözen über dem Endlager ein vergleichbarer vertikaler hydraulischer Gradient zur Oberfläche ausbildet (s. Abb. 2.20). Dieser Gradient über der Wirtsgesteinsformation liegt zwischen 0,16 m/m und 0,20 m/m. Grund für die in beiden Rechnungen vergleichbaren Gradienten ist, dass am Südrand aufgrund des höheren Grundwasserstands im Ausstrich der Tonsteine des Hauterive – Barreme - Apt oberflächennah ein Grundwasserzirkulationssystem entsteht. Innerhalb des Kohleflözes strömt in diesem System Süßwasser zur Oberfläche und es bildet sich in beiden Fällen ein vergleichbares homogenes Druckfeld im Liegenden des Wirtsgesteins aus (s. Abb. 2.19).

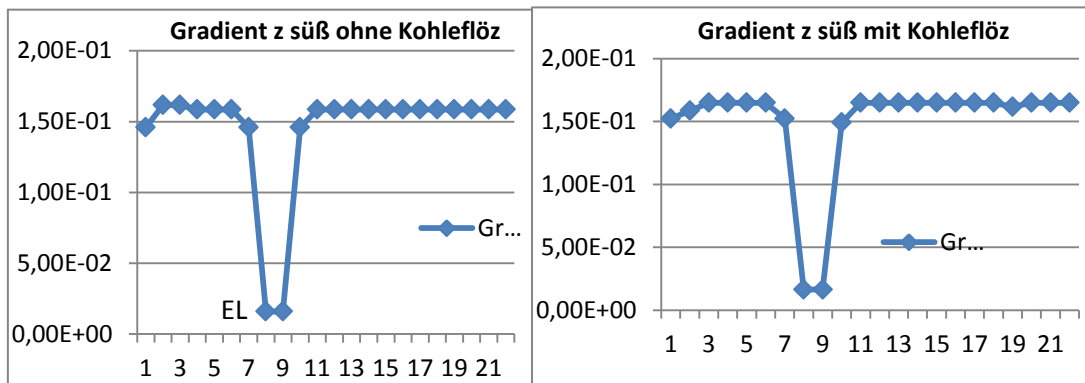


Abb. 2.20: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, hydraulische Gradienten errechnet aus den Abstandsgeschwindigkeiten (links Süßwasserrechnung ohne Kohleflöz, rechts Süßwasserrechnung mit Kohleflöz aquifer), EL = Endlagertiefenniveau

Mit einem in der **Anforderung für die Abmessung des ewG** (s. Abschnitt 2.1) definierten Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f=10^{-12}$ m/s für das Wirtsgestein ergäbe sich aus einem Gradienten von 0,14 ein normierter Durchfluss von ca. $1,4 \cdot 10^{-13}$ m/s, bei einer effektiven Porosität von $n= 0,1$ eine Strömungsgeschwindigkeit von $1,4 \cdot 10^{-12}$ m/s bzw. $4,4 \cdot 10^{-5}$ m/a. Dies entspricht einer Wegstrecke eines Wasserpartikels von ca. 44 m in 1 Million Jahren a. Der advective Transport ist somit gegenüber dem diffusiven Transport von untergeordneter Bedeutung.

Für den im synthetischen Tonsteinstandort für das Wirtsgestein senkrecht zur Schichtung anzusetzenden Durchlässigkeitsbeiwert (Modellparameter) von $5 \cdot 10^{-14}$ m/s ergibt sich in einer Million Jahren eine vertikal nach oben zurückgelegte Wegstrecke von 1,58 m. Hieraus folgt:

Der advective Transport am synthetischen Tonsteinstandort ist gegenüber dem diffusiven Transport von untergeordneter Bedeutung.

Im Fall der Berücksichtigung eines linearen Dichtegradienten zeigen die Stromlinien unterhalb des Wirtsgesteins im Berrias - Valangin einen zum Liegenden gerichteten Grundwasserstrom (s. Abb. 2.19). Ein Vergleich der Abstandsgeschwindigkeiten der Salz- und Süßwasserrechnungen mit und ohne Kohleflöz in einer Elementreihe über dem Endlager zeigt zum Zeitpunkt 10.000 a die Abb. 2.21.

ohne Kohleflöz				mit Kohleflöz			
suess		salz		suess		salz	
Geschwindigkeit in m/a				Geschwindigkeit in m/a			
x	y	x	y	x	y	x	y
1.6e-8	4.6e-6	-5.e-7	3.e-5	1.6e-8	4.8e-6	-5.e-7	3.e-5
3.8e-9	5.1e-6	-3.4e-7	1.8e-5	3.e-9	5.e-6	-3.4e-7	1.8e-5
2.9e-9	5.1e-6	-1.7e-8	6.5e-6	2.e-9	5.2e-6	-1.7e-8	6.6e-6
3.7e-9	5.e-6	3.4e-9	5.6e-6	2.6e-9	5.2e-6	2.3e-9	5.8e-6
5.e-9	5.e-6	5.4e-9	5.6e-6	3.9e-9	5.2e-6	4.3e-9	5.7e-6
6.5e-9	5.e-6	7.2e-9	5.6e-6	5.4e-9	5.2e-6	5.9e-9	5.8e-6
7.4e-9	4.6e-6	8.5e-9	6.6e-6	6.2e-9	4.8e-6	7.3e-9	6.7e-6
4.4e-8	4.2e-6	5.2e-8	2.9e-5	3.3e-8	4.3e-6	4.e-8	3.e-5
4.4e-8	4.2e-6	5.9e-8	5.7e-5	3.3e-8	4.3e-6	4.7e-8	5.7e-5
5.6e-9	4.6e-6	7.e-9	1.e-5	4.3e-9	4.7e-6	5.6e-9	1.e-5
7.6e-9	5.e-6	8.6e-9	5.8e-6	6.2e-9	5.2e-6	6.9e-9	6.e-6
9.2e-9	5.e-6	1.e-8	5.6e-6	7.7e-9	5.2e-6	8.6e-9	5.8e-6
1.1e-8	5.e-6	1.2e-8	5.7e-6	9.2e-9	5.2e-6	1.e-8	5.8e-6
1.2e-8	5.e-6	1.4e-8	7.e-6	1.1e-8	5.2e-6	1.2e-8	7.e-6
1.4e-8	5.e-6	1.5e-8	2.4e-5	1.2e-8	5.2e-6	1.3e-8	2.5e-5
1.6e-8	5.e-6	1.8e-8	7.e-6	1.4e-8	5.2e-6	1.5e-8	7.2e-6
1.7e-8	5.e-6	2.e-8	5.8e-6	1.5e-8	5.2e-6	1.7e-8	5.9e-6
1.9e-8	5.e-6	2.2e-8	5.7e-6	1.7e-8	5.2e-6	1.9e-8	5.9e-6
2.1e-8	5.e-6	2.4e-8	5.8e-6	2.0e-8	5.1e-6	2.2e-8	5.9e-6
2.5e-8	5.e-6	1.2e-8	6.9e-6	2.3e-8	5.2e-6	1.e-8	6.9e-6
3.e-8	5.e-6	-4.2e-7	2.3e-5	2.8e-8	5.2e-6	-4.e-7	2.3e-5
3.6e-8	5.e-6	5.7e-7	-2.6e-5	3.4e-8	5.2e-6	7.8e-7	-3.2e-5

Abb. 2.21: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Abstandsgeschwindigkeiten in der Wirtsgesteinsformation (links Süß-/Salzwasserrechnung ohne Kohleflöz rechts Süß-/Salzwasserrechnung mit Kohleflözaquifer zum Zeitpunkt 10.000 a, rot begrenzt Endlagerhorizont)

Die Ergebnisse der Abstandsgeschwindigkeiten lassen vermuten, dass hinsichtlich des dichtegetriebenen Salztransports die Rechnung noch nicht einen quasi stationären Zustand erreicht hat. Deshalb wurden die Rechnungen über längere Zeiträume weitergeführt. Die nachfolgenden Ergebnisse (siehe Abb. 2.22 und 2.23) zeigen den hydraulischen Zustand des Systems zu den Zeitpunkten von 1 Million bis 5 Millionen Jahren bei unveränderten Randbedingungen.

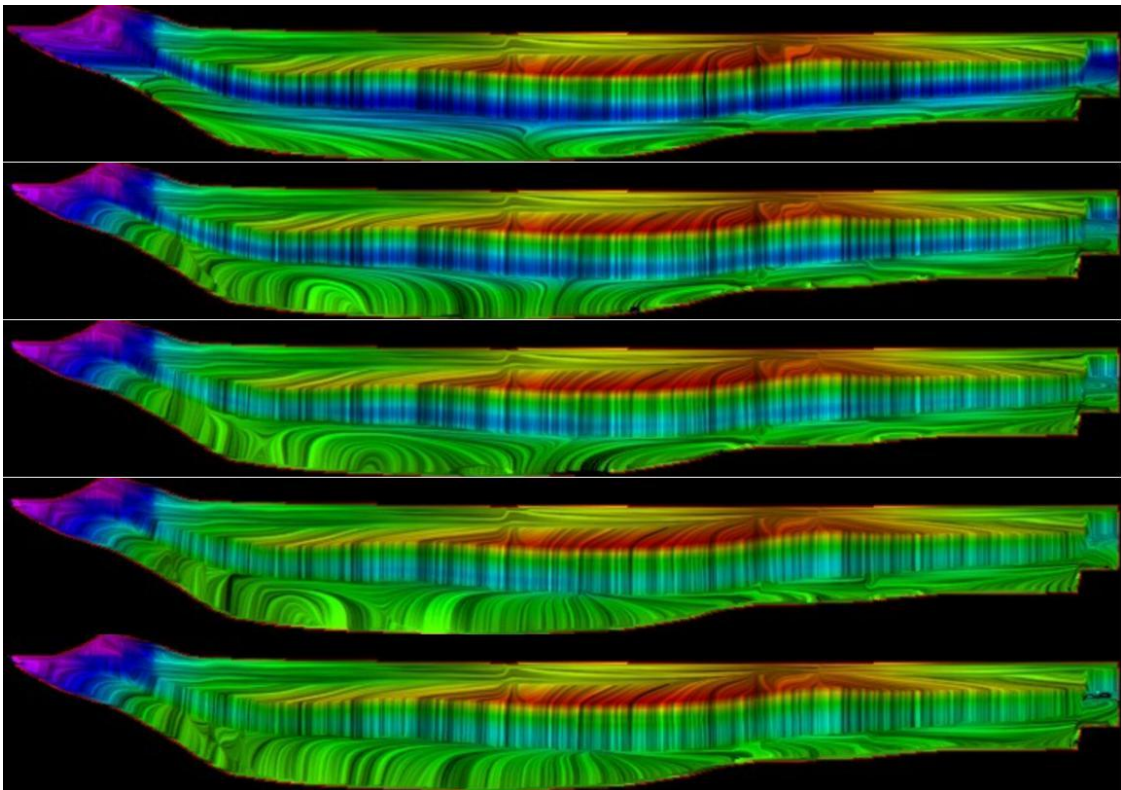


Abb. 2.22: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Stromliniendarstellung der Salzrechnungen mit Kohleflözaquifer $\Rightarrow k_f=10^{-4}$ m/s, (Rechenzeitraum von 1.000.000 a, oben, bis 5.000.000 a, unten)

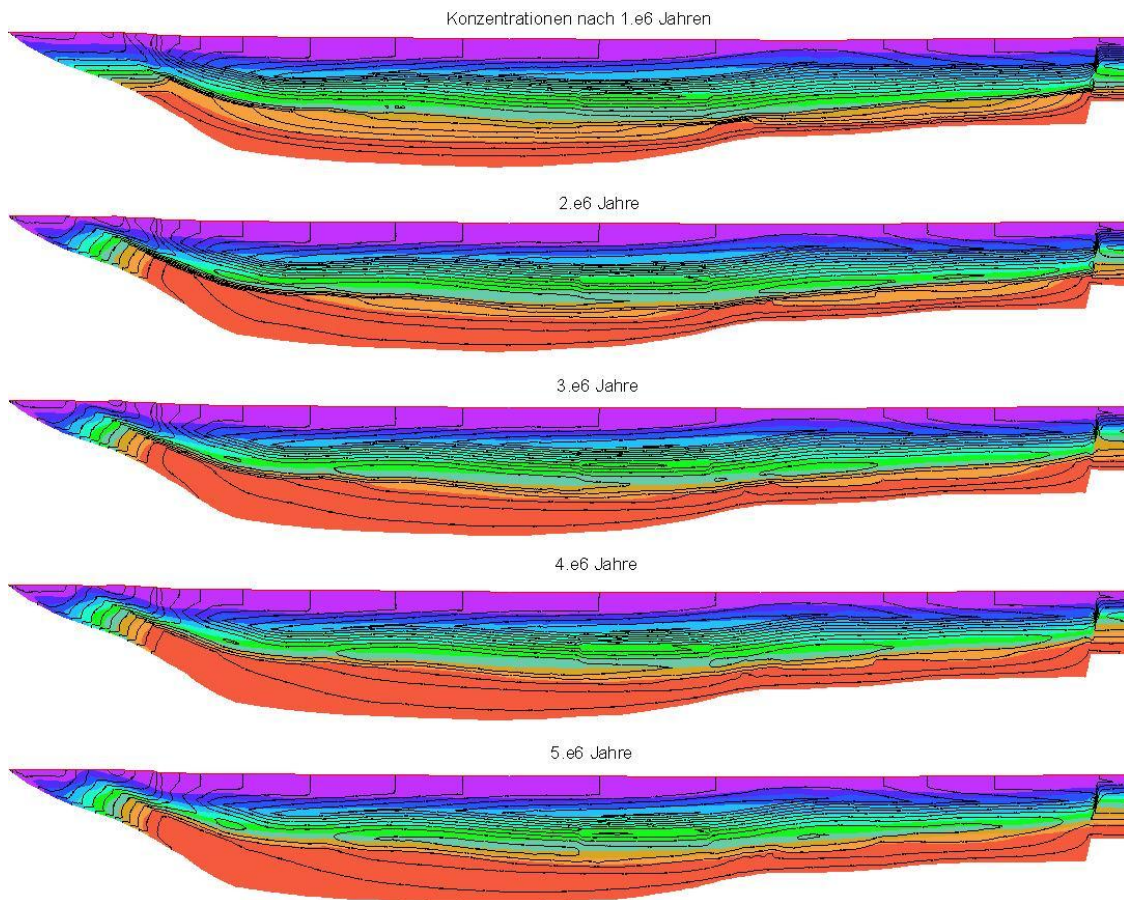


Abb. 2.23: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Konzentration- und Potentialverteilung der Salzrechnungen mit Kohleflözaquifer $k_f=10^{-4}$ m/s (Rechenzeitraum von 1.000.000 a, oben, bis 5.000.000 a, unten)

Die Ergebnisse zeigen, dass auch nach fünf Millionen Jahren weiter vermehrt Süßwasser im Wiederergänzungsgebiet in die Tiefe dringt und eine Versüßung der tiefen Schichtglieder des Berrias - Valangins stattfindet. Gleichzeitig bauen sich die Druckpotentiale im Liegenden des Endlagers langsam ab und es bauen sich Konvektionswalzen in den Schichten des Berrias - Valangin auf. Aufgrund der geringen Transportgeschwindigkeiten ist ein quasi stationärer Zustand auch nach 5 Millionen Jahren noch nicht erreicht.

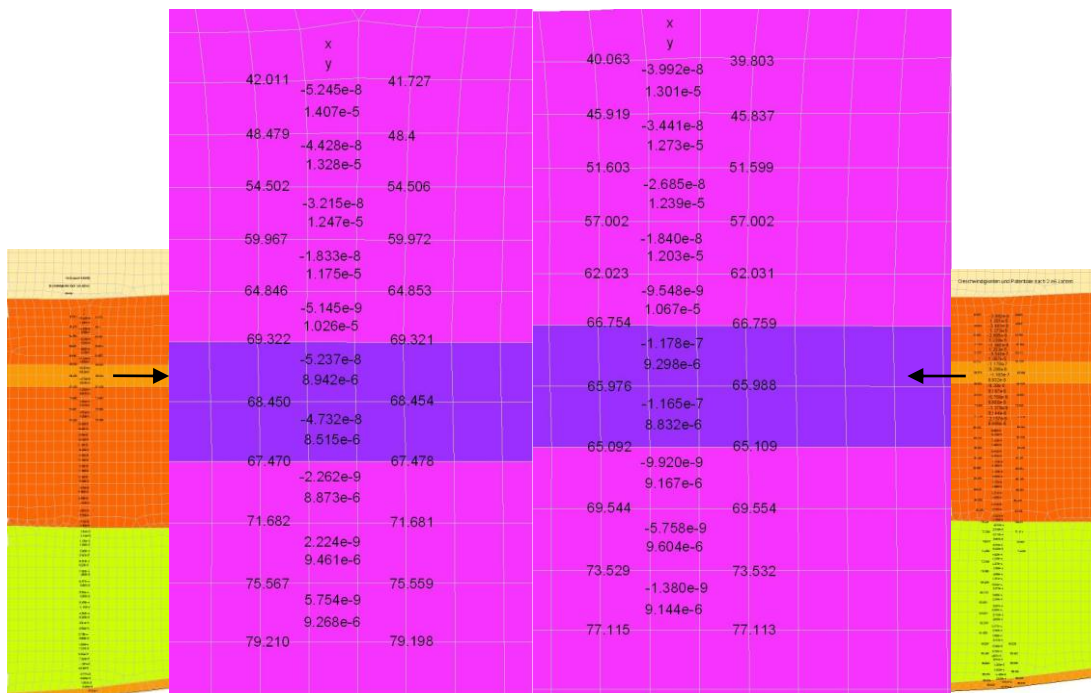


Abb. 2.24: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Abstandsgeschwindigkeiten in der Wirtsgesteinsformation, Druckhöhen (Salzwasserrechnung mit Kohleflöz, links zum Zeitpunkt 1.000.000 a, rechts 2.000.000 a, Vergrößerung des Modellausschnitts des Wirtsgesteins im Bereich des Endlagers (dunkle Farbe))

Innerhalb eines in Abb. 2.24 betrachteten Modellausschnitts in der Umgebung des Endlagers variieren die Salinität und damit die Dichte der Tiefenwässer nur gering. Die berechneten vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten liegen etwas höher als in der Süßwasserrechnung. Aus den berechneten Strömungsgeschwindigkeiten lässt sich in den Salzrechnungen ein auf das Darcy-Gesetz abgeleiteter vertikaler hydraulischer Gradient von ca. 0,25 m/m errechnen.

3 Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)

3.1 Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (Abb. 3.1) ist eine rechnerisch definierte Einheit innerhalb des Wirtsgesteins (Tonstein). Nach den in Kapitel 2.4.2 beschriebenen

Daten wird aufgrund der anisotropen Diffusivität (horizontal etwa 5mal höher als vertikal) der ewG in horizontaler Richtung größer sein als seine vertikale Ausdehnung. In den nachfolgenden Rechnungen wird, da insbesondere die vertikale Abmessung des ewG von Bedeutung ist, die Diffusivität als isotrop angenommen und der vertikale Wert verwendet.

Als **Arbeitshypothese** werden für die nachfolgenden Berechnungen zur Begrenzung des ewG im Projekt VerSi folgende Annahmen getroffen:

- Die allseitigen Abstände der Umschließungsfläche des ewG werden gebildet von den Weglängen, die ein idealer Tracer vom Endlagerbergwerk aus startend im geologischen System des ewG im Nachweiszeitraum (hier 1 Mio Jahre) migriert.
- Weiterhin wird für die Konzentration C des idealen Tracers am Rande des ewG (nach einer Transportzeit von 1 Million Jahren) eine Geringfügigkeitsschwelle als Arbeitshypothese definiert. Sie wird definiert als Stoffgehalt, der gegenüber den regionalen Hintergrundwerten keine relevante toxische Wirkung zeigt.
- Für die nachfolgenden vereinfachten Rechnungen wird u. a. aufgrund des noch fehlenden Freisetzungsverlaufs des Radionuklidinventars als Arbeitshypothese eine Konzentrationsabnahme auf 1 Millionstel der Ausgangskonzentration C_0 in der Auflockerungszone der Einlagerungsstrecke ($C/C_0 = 10^{-6}$) als geringfügig angenommen.

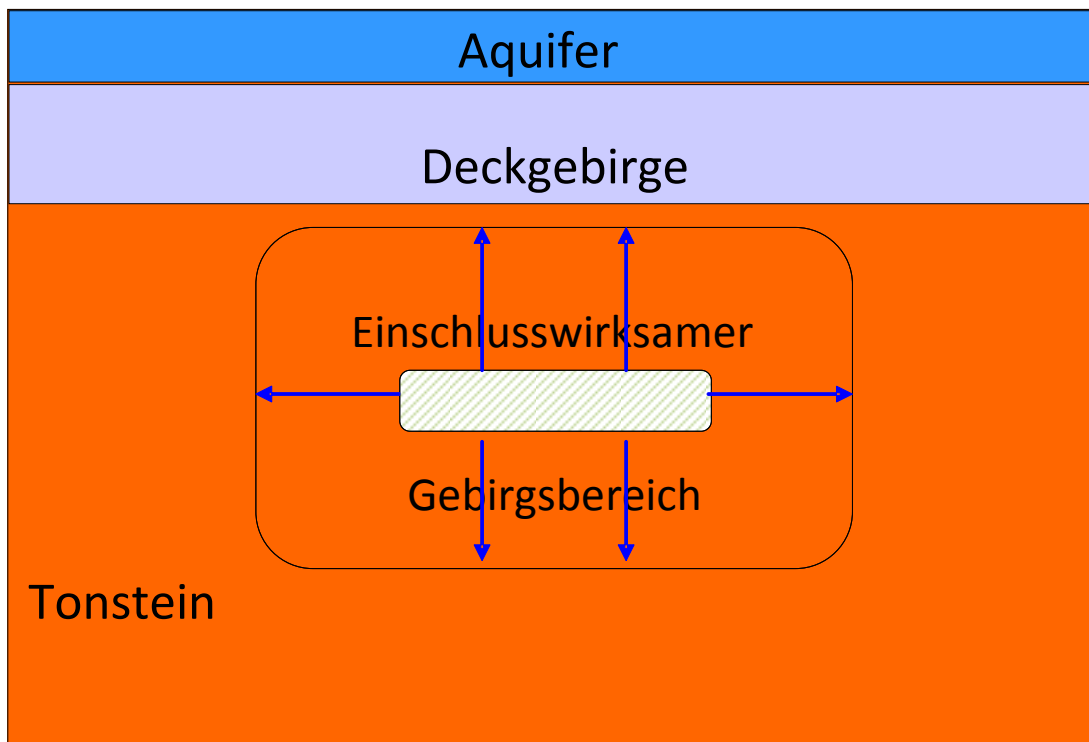


Abb. 3.1: Schema der Lage des ewG im Wirtsgestein

Der ersten Ableitung der Abmessungen und Begrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs am synthetischen Tonsteinstandort in Norddeutschland liegen folgende Annahmen und Parameter zugrunde.

Für die Modellrechnungen zur Definition des ewG wurde schematisch aus dem Profil in Abb. 2.7 die Lage des Endlagers im Tonstein des Standortes konstruiert (Abb. 3.2) und ein Rechenmodell erstellt. Die Teufenlage des angenommenen Endlagers im Modell beträgt 450 m. Für das Endlager wird eine „Bauhöhe“ von 20 m angenommen. Im Liegenden und im Hangenden folgen jeweils 100 m mächtige homogene Tonsteinfolgen. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich des konstruierten Standortes liegt in den Tonabfolgen des Barrême-Apt.

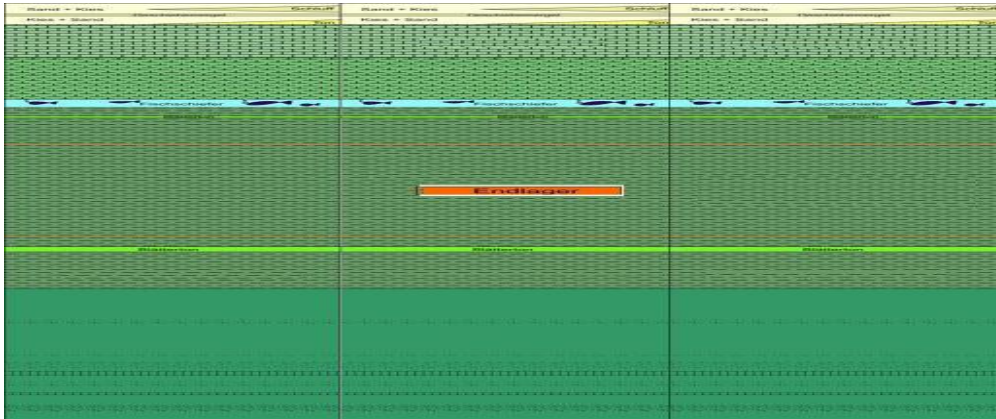


Abb. 3.2: Lage des Endlagers am synthetischen Standort (schematisiert nach Abb. 2.7)

Im Standortgebiet wird von einem für das Niedersächsische Becken relativ gleichbleibenden Temperaturgradienten von $0,038 \text{ Km}^{-1}$ ausgegangen. In der Teufenlage des Endlagers liegt damit eine initiale Gebirgstemperatur von ca. 25 °C vor.

Auf Basis der Daten zum "Opalinuston" der Schweiz /BFS 07/ wurden für den Tonstein des ewG folgende Daten generiert.

- Trockendichte: $2,35 - 2,45 \text{ g/cm}^3$
- Bodendichte: $2,52 - 2,62 \text{ g/cm}^3$
- Korndichte: $2,69 - 2,74 \text{ g/cm}^3$
- Gesamt-Wassergehalt: 14,6 Gew.-%
- K_f -Wert: $2 \cdot 10^{-14} \text{ m/s}$ (\perp zur Schichtung) / $1 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$ (\parallel zur Schichtung)
- Spezifischer Speicherkoeffizient: $1 \cdot 10^{-06} - 3 \cdot 10^{-05} \text{ m}^{-1}$
- Effektiver Diffusionskoeffizient (Anionen): $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (\perp zur Schichtung) / $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (\parallel zur Schichtung)
- Poren- Diffusionskoeffizient. (Kationen): $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (\perp zur Schichtung) / $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (\parallel zur Schichtung)
- Gesamtporosität: 0,07 – 0,18
- Diffusionsporosität: 0,07 – 0,12
- Gaspermeabilität: $3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$
- Wärmeleitfähigkeit: $1,3 - 1,8 \text{ W/mK}$ (\perp zur Schichtung) / $2,0 - 3,2 \text{ W/mK}$ (\parallel zur Schichtung)
- Kationenaustauschkapazität: 106 meq/kg
- Kd-Wert (H, C_{org}, Cl, Se, Ag): $0 \text{ m}^3/\text{kg}$
- Kd-Wert (Be, Ni): $0,9 \text{ m}^3/\text{kg}$

- Kd-Wert (C_{inorg} , Ca, Sr): 0,001 m³/kg
- Kd-Wert (Co): 0,4 m³/kg
- Kd-Wert (Zr, Ac, Am, Cm): 10 m³/kg
- Kd-Wert (Nb): 4 m³/kg
- Kd-Wert (Mo): 0,01 m³/kg
- Kd-Wert (Tc, Sm, Eu, Ho, Th, Np): 50 m³/kg
- Kd-Wert (Pd, Pa): 5 m³/kg
- Kd-Wert (Sn): 100 m³/kg
- Kd-Wert (I): 0,00003 m³/kg
- Kd-Wert (Cs): 0,5 m³/kg
- Kd-Wert (Pb): 2 m³/kg
- Kd-Wert (Po): 0,1 m³/kg
- Kd-Wert (Ra): 0,0007 m³/kg
- Kd-Wert (U, Pu): 20 m³/kg
- Elastizitätsmodul: 18,9 – 33,0 GPa
- Poissonzahl: 0,27 – 0,31
- Quelldruck: 0,1 – 1,4 MPa
- Einaxiale Druckfestigkeit (// zur Schichtung): 22,3 – 33,7 MPa

In /BAL 08/ wurde die Isolationswirkung des ewG an Hand vereinfachter Analysen, z. B. eindimensionale Diffusionsrechnungen, abgeschätzt, wobei folgende Annahmen für die Eigenschaften des idealisierten homogenen Tonsteinkörpers getroffen wurden:

- Die gesteins- und speziesspezifischen Poren-Diffusionskonstante D_p variiert zwischen 10^{-11} m²/s bis $5 \cdot 10^{-12}$ m²/s. Diese Konstante steht mit der nachfolgenden Diffusions-Porosität und der effektiven Diffusionskonstanten D_e wie folgt in Beziehung: $D_p = D_e/n \rightarrow D_e = D_p \cdot n$.
- Die Diffusions-Porosität beträgt 10 % für Kationen bzw. 6 % für Anionen.
- Für die effektive Diffusionskonstante D_e ergibt sich für I¹²⁹ als Anion ($n = 0,06$) eine Variationsbreite von D_e zwischen $6 \cdot 10^{-13}$ m²/s bis $3 \cdot 10^{-13}$ m²/s.
- Der Durchlässigkeitsbeiwert des Tonsteins ist $< 10^{-12}$ m/s.
- In Verbindung mit den niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten und dem geringen hydraulischen Gradienten folgt, dass der advective Transport deutlich kleiner ist als der diffusive Transport.
- Basis des Endlagermodells bildet eine Streckenlagerung mit parallelen Strecken.

Ergebnisse einer rein diffusiven Modellbetrachtung (analytische Lösung)

In einer ersten Analyse wurden mittels analytischer Lösungen der Diffusionsgleichung eindimensionale Transportrechnungen für nicht sorbierende Radionuklide, wie I-129, durchgeführt. Als Ergebnis weisen die Rechnungen in Abhängigkeit der Distanz von der Quelle Konzentrationen C aus, die um Größenordnungen kleiner sind als die konstante Ausgangskonzentration C_0 der Quelle.

Die in bestimmten Abständen von der Quelle zu erwartende auf C_0 bezogene Konzentrationabnahme C/C_0 ist im Wesentlichen abhängig von den Diffusionskonstanten, der Transportweglänge und der Retardation sorbierender Radionuklide. Für die nicht sorbierenden Radionuklide I-129, Cl-36 (Anionen) variiert das anhand der Diffusionsgleichung ermittelte Konzentrationsverhältnis C/C_0 in einer Entfernung von 70 m bis 100 m, zwischen etwa $5 \cdot 10^{-3}$ bis $2 \cdot 10^{-9}$. D. h. die im Porenraum des Tonsteins vorliegende Konzentration C ist um 2 bis 9 Größenordnungen kleiner als die Ausgangskonzentration im homogenisierten Einlagerungsbereich, wenn die Porendiffusionskonstante D_p nur um den Faktor 2 variiert. Die Analysen zeigen einerseits den extrem starken Einfluss der Diffusionskonstanten und andererseits die Retardationswirkung am Beispiel Cs-135 (s. Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Ergebnisse der analytischen Lösung der Diffusionsgleichung /BAL 08/

Radionuklid	Kd – Wert [ml/g]	D_p [m ² /s]	C/C_0 70 m	C/C_0 100 m
I-129	0	5×10^{-12}	8×10^{-5}	2×10^{-9}
I-129	0	1×10^{-11}	5×10^{-3}	$6,5 \times 10^{-5}$
Cl-36	0	5×10^{-12}	8×10^{-6}	2×10^{-9}
Cl-36	0	1×10^{-11}	5×10^{-4}	6×10^{-6}
Se-79	0	5×10^{-12}	5×10^{-5}	1×10^{-8}
Cs-135	100	2×10^{-10}	0	0
Cs-135	10	2×10^{-10}	1×10^{-10}	1×10^{-20}

Die Abmessungen des ewG werden bestimmt durch das Transportverhalten der Radionuklide, bei diffusionsgesteuertem Transport insbesondere durch nicht sorbierende anionische Nuklide (z.B. I-129). Bei Unsicherheiten in der Höhe der Werte der Diffusi-

onskonstanten (und damit auch der Diffusionsporosität) dieser Nuklide zeigt das Ergebnis eine hohe Variabilität (auch bei geringen Schwankungsbreiten der Werte).

Im Ergebnis zeigen die Abmessungen damit eine hohe Sensitivität gegenüber Veränderungen der Diffusionskonstanten dieser Nuklide.

Für eine weitere Abschätzung wurde auf Basis eines Endlagermodells in /DBE 07/ gemäß Abbildung 3.3 in ein- und zweidimensionalen Rechnungen mit den Programmsystemen MARNIE und SPRING durchgeführt.

Modellbeschreibung (MARNIE, SPRING) für reine Diffusionsrechnungen im Tonstein:

Den nachfolgenden ein- und zweidimensionalen Transportrechnungen für das nicht sorbierende und langlebige Radionuklid I-129 (Tracer, Anion) liegen auf Basis eines Modells in /DBE 07/ folgende Annahmen zugrunde:

- Der Einlagerungsbehälter enthält 3 Brennelemente; er ist von Bentonit umgeben.
- Behälter, Bentonit und Auflockerungszone der Einlagerungsstrecke bilden insgesamt einen Durchmesser von 4,5 m und besitzen eine Porosität von 30 %.
- Der Einlagerungsbehälter versagt instantan.
- Das Inventar des I-129 in einem Einlagerungsbehälter beträgt $1,95 \cdot 10^9$ Bq.
- 10 % des im Einlagerungsbehälter enthaltenen Inventars an I-129 wird instantan in den Porenraum des Bentonit und der Auflockerungszone (homogener Einlagerungsbereich) freigesetzt.
- das restliche Inventar wird über einen Zeitraum von 10^4 Jahren kontinuierlich in diesen Porenraum freigesetzt.

Aus Symmetriegründen reicht es aus, nur einen Behälter zu betrachten, der in der Mitte des Einlagerungsfeldes liegt und allseitig von gleichen Behältern umgeben ist.

Der Durchmesser des Behälters wird mit 2,5 m angenommen. Er ist umgeben von je 1 m Auflockerungszone, d. h. der gesamte Durchmesser beträgt 4,5 m, dies ergibt eine Querschnittsfläche von $15,9 \text{ m}^2$. Da eine runde Fläche in Spring und Marnie nicht modellierbar ist, wird ein quadratischer Querschnitt von 4 m x 4 m angenommen.

Wegen der Symmetrie des Modells wird nur der halbe Behälter und der halbe Behälterabstand modelliert, aber der gesamte Streckenabstand zum nächsten Behälter, da der Behälter in der Mitte der Strecke eingelagert wird. Die Länge des Behälters entspricht 5,517 m, $\frac{1}{2}$ Behälter somit 2,7585 m. Für die Tiefe des Modells ergibt sich somit eine Mächtigkeit von $2,7585 \text{ m} + 9 \text{ m} = 11,7585 \text{ m}$. Bei einer Porosität des homogenen Einlagerungsbereichs von 0,3 ergibt sich ein Freisetzungsvolumen von ca. 56 m^3 .

Bei der instantanen Freisetzung von 10 % des Inventars ($1,95 \cdot 10^8 \text{ Bq}$) bezogen auf die Hälfte des Behälters ($9,75 \cdot 10^7 \text{ Bq}$) ergibt sich eine Aktivitätskonzentration von $9,75 \cdot 10^7 \text{ Bq} / 56 \text{ m}^3 = 1,7 \cdot 10^6 \text{ Bq/m}^3 = 1700 \text{ Bq/l}$ (s. in Abb. 3.4 bis 200 a).

Die Unterkante des Behälters mit der Auflockerungszone befindet sich 150 m über dem Boden des Modells, die Oberkante 154 m darüber. Über dem Behälter befindet sich im Modell eine 250 m mächtige Tonschicht. Der linke bzw. rechte Rand des Behälters mit der Auflockerungszone befindet sich in der Mitte des Modells in horizontaler Richtung und hat einen Abstand von jeweils 14,5 m zum linken bzw. rechten Rand des Modells.

Abb. 3.4 zeigt die instantane Freisetzung von 10% des Inventars des idealen Tracers in den gesamten Porenraum der Auflockerungszone sowie die nachfolgende kontinuierliche Freisetzung der restlichen 90%. Da mehr Radionuklide freigesetzt werden als wegdiffundieren, steigt die Konzentration an. Anschließend wirkt sich die Diffusion aus.

Die eindimensionalen Transportrechnungen liefern, die in den Abbildungen 3.5 und 3.6 dargestellten, zeitlichen Konzentrationsverläufe in Abhängigkeit der angenommenen isotropen Diffusionskonstanten (s. Abb. 3.5) und der Transportstrecke im Tonstein (s. Abb. 3.6).

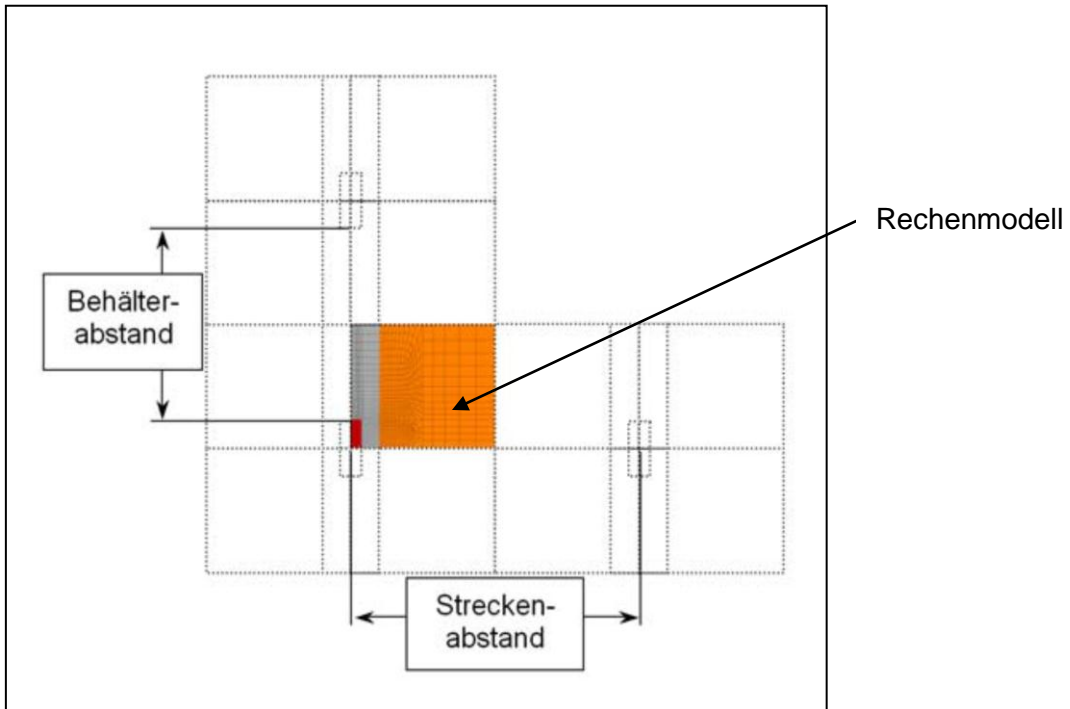


Abb. 3.3: Rechenmodell nach einem Ausschnitt im Endlagermodell /DBE 07/

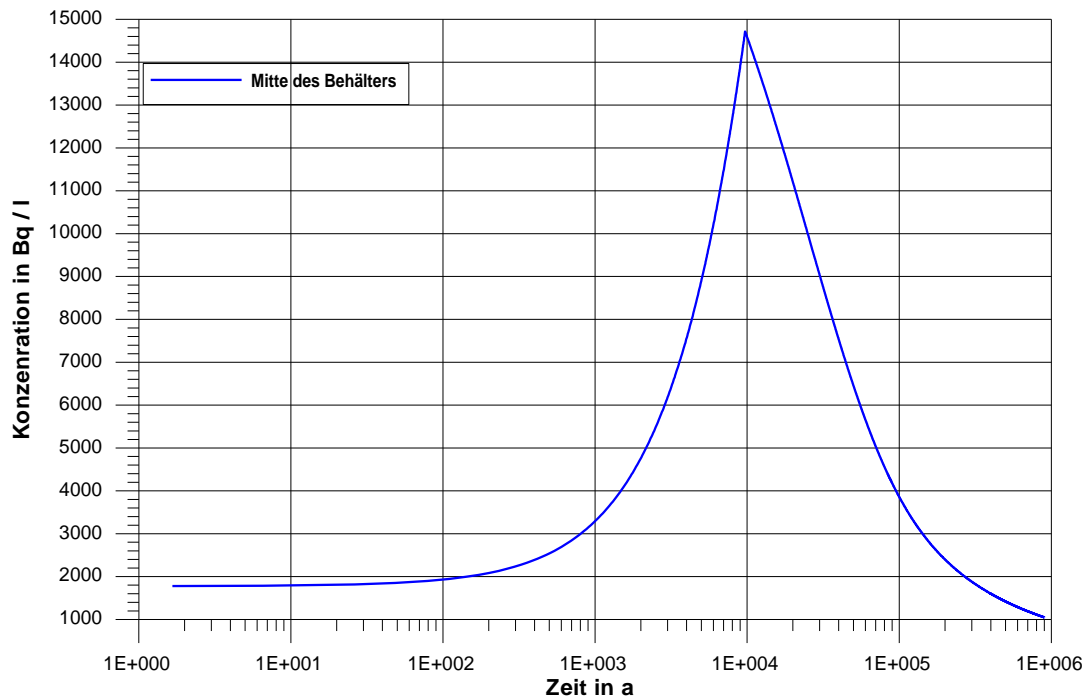


Abb. 3.4: Freisetzungverlauf des idealen Tracers, Konzentrationsverlauf in der homogenisierten Endlagerstrecke /BAL 08/

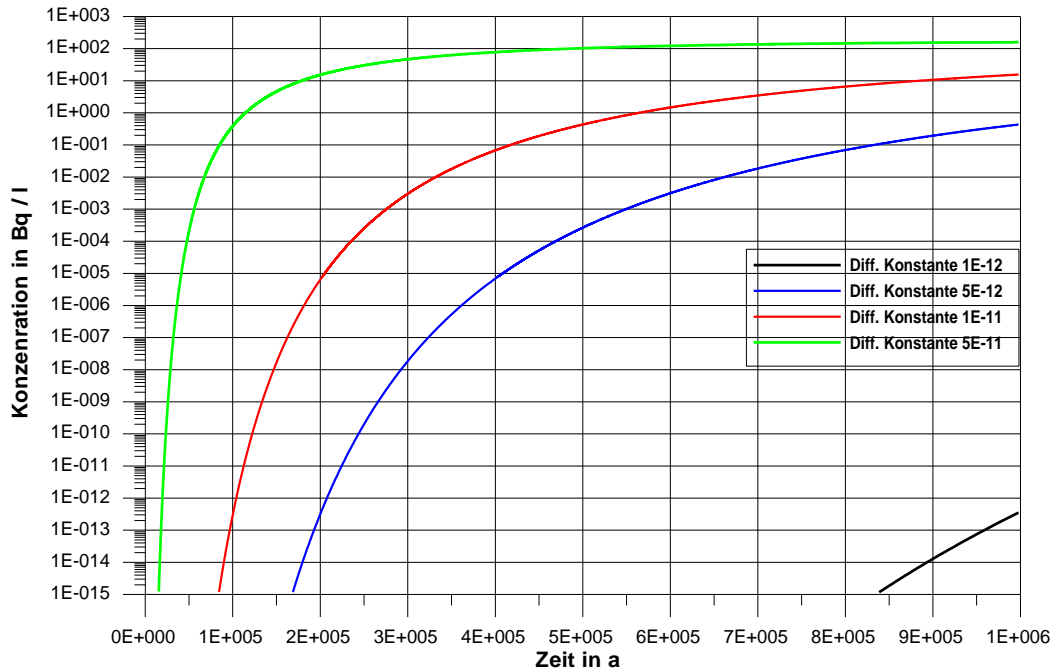


Abb. 3.5: Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit und der Diffusionskonstanten D_p im Abstand 70 m vom Behälter /BAL 08/.

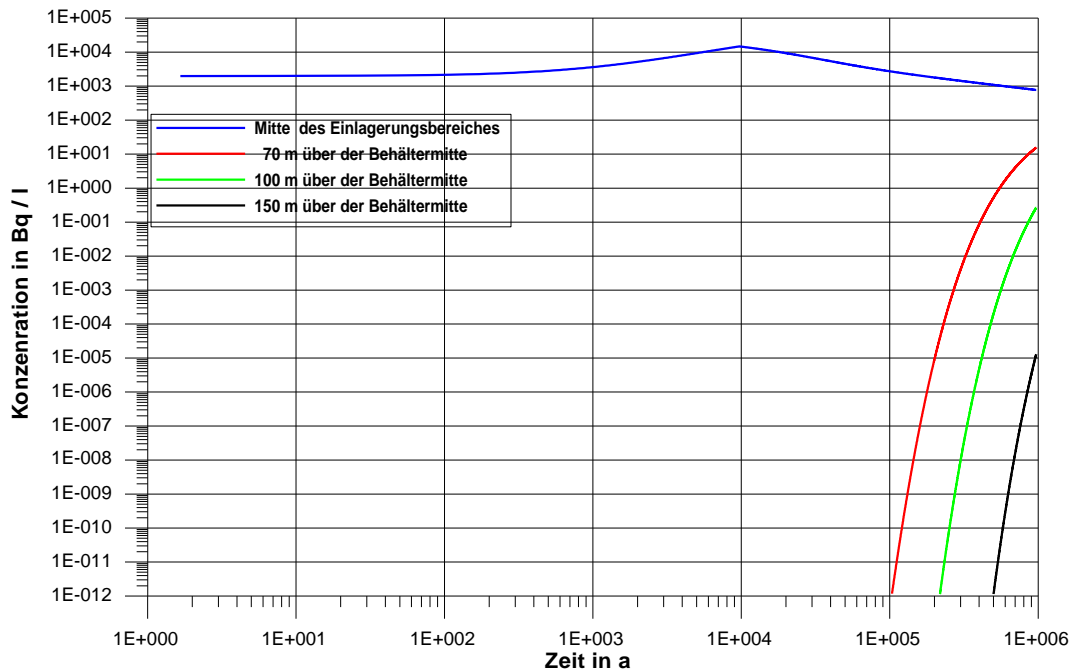


Abb. 3.6: Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand vom Behälter bei einer Diffusionskonstanten D_p von $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ und $n=0,08$ /BAL 08/.

Mit den durchgeführten Rechnungen konnten die Ergebnisse der analytischen Lösung verifiziert werden.

Im 2D-Modell (Gitternetz s. Abb. 3.7) wird das Tonsteingebirge in einem Modellausschnitt von 404 m * 33 m mit einer Streckenlagerung in einer Strecke von 2,5 m Durchmesser simuliert. Die Behälter sind von Bentonit umgeben. Jenseits der Auflockerungszone mit einer Teufenerstreckung von 1 m schließen sich Tonsteine mit der Qualität an, wie sie unten beschrieben sind. Wie im 1D-Modell befindet sich die Unterkante des Behälters mit der Auflockerungszone 150 m über dem Boden des Modells, die Oberkante 154 m darüber. Über dem Behälter befindet sich im Modell eine 250 m mächtige Tonschicht. Der linke bzw. rechte Rand des Behälters mit der Auflockerungszone befindet sich in der Mitte des Modells in horizontaler Richtung und hat einen Abstand von jeweils 14,5 m zum linken bzw. rechten Rand des Modells. Der Behälter mit dem umgebenden Bentonit und der Auflockerungszone hat einen Durchmesser von 4,5 m, das bedeutet eine Querschnittsfläche von ca. 16 m², dies wird im Modell durch eine quadratische Querschnittsfläche von 4 * 4 m² abgebildet, dieser homogenisierte Einlagerungsbereich erstreckt sich von 150 m - 154 m vertikal und 14,5 m bis 18,5 m horizontal.

Als Parameterwerte wurden dieselben Werte wie oben gewählt:

- Diffusionskonstante $D_p=10^{-11}$ m²/s
- K_f -Werte im gesamten Modell: 10^{-12} m/s
- Porosität des Tonsteins $n = 0,06$ für Anionen
- Porosität des homogenisierten Einlagerungsbereiches: 0,3

Das Inventar von I-129 wird in einem Raum von 56 m³ freigesetzt. Für die Modellrechnung wurde weiterhin angenommen, dass Behälter, Bentonit und Auflockerungszone die gleiche Porosität von 30 % besitzen und einen homogenisierten Freisetzungsbereich definieren. Für die Rechnung der Diffusion wird eine Porosität von 0,06 für I-129 als Anion (Abb. 3.8) verwendet.

Im Ergebnis der Rechnung zeigt die Abbildung, dass bei den gegebenen Parameterwerten die als Arbeitshypothese definierte Geringfügigkeitsschwelle ($C/C_0= 10^{-6}$) in einer Entfernung von 120 m erreicht wird. Der ewG definiert sich in diesem Fall als räumlicher Körper um die Einlagerungsfelder des Endlagers.

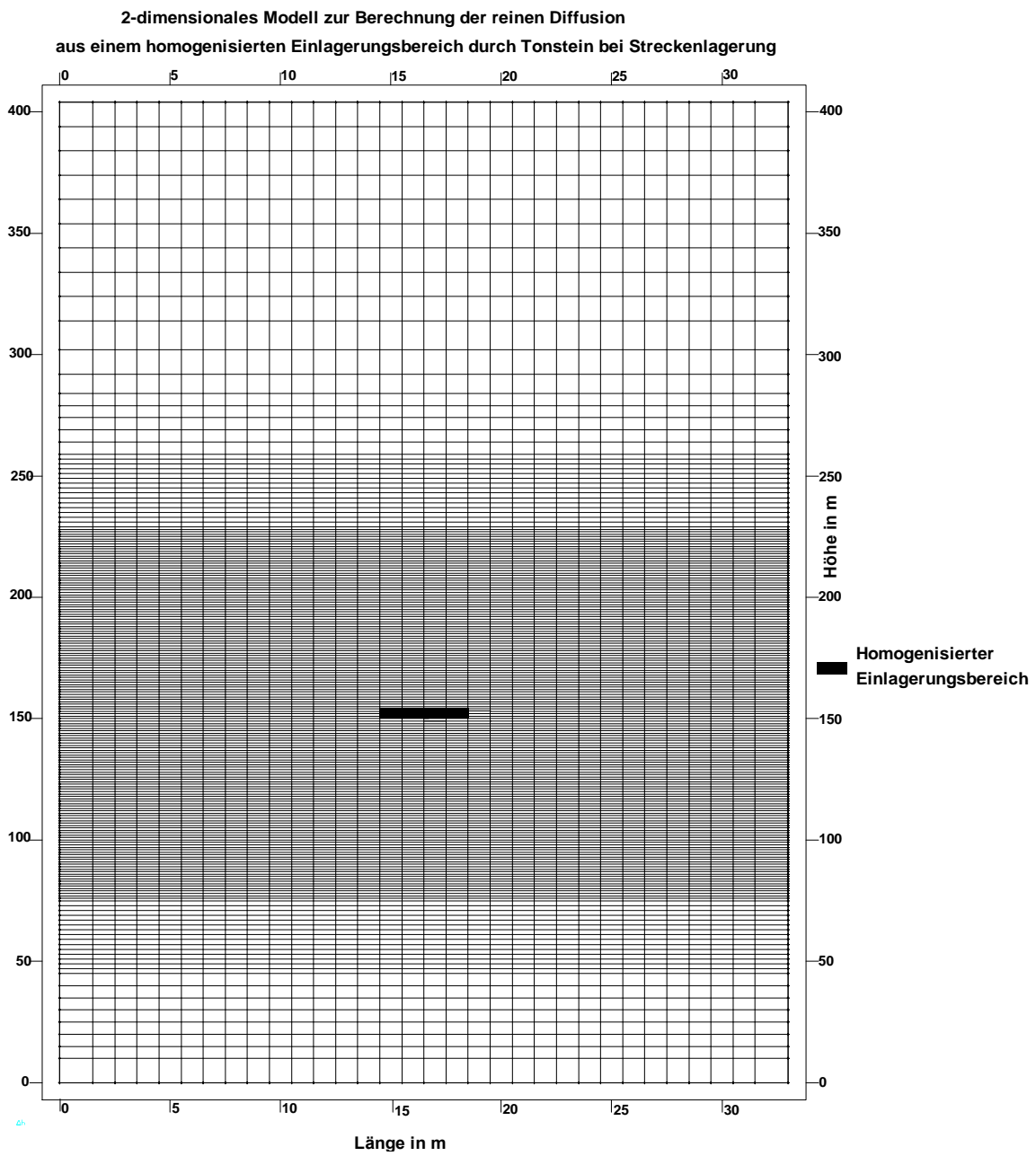


Abb. 3.7: Modellgitter des 2D- Modells für die reine Diffusionsrechnung in SPRING

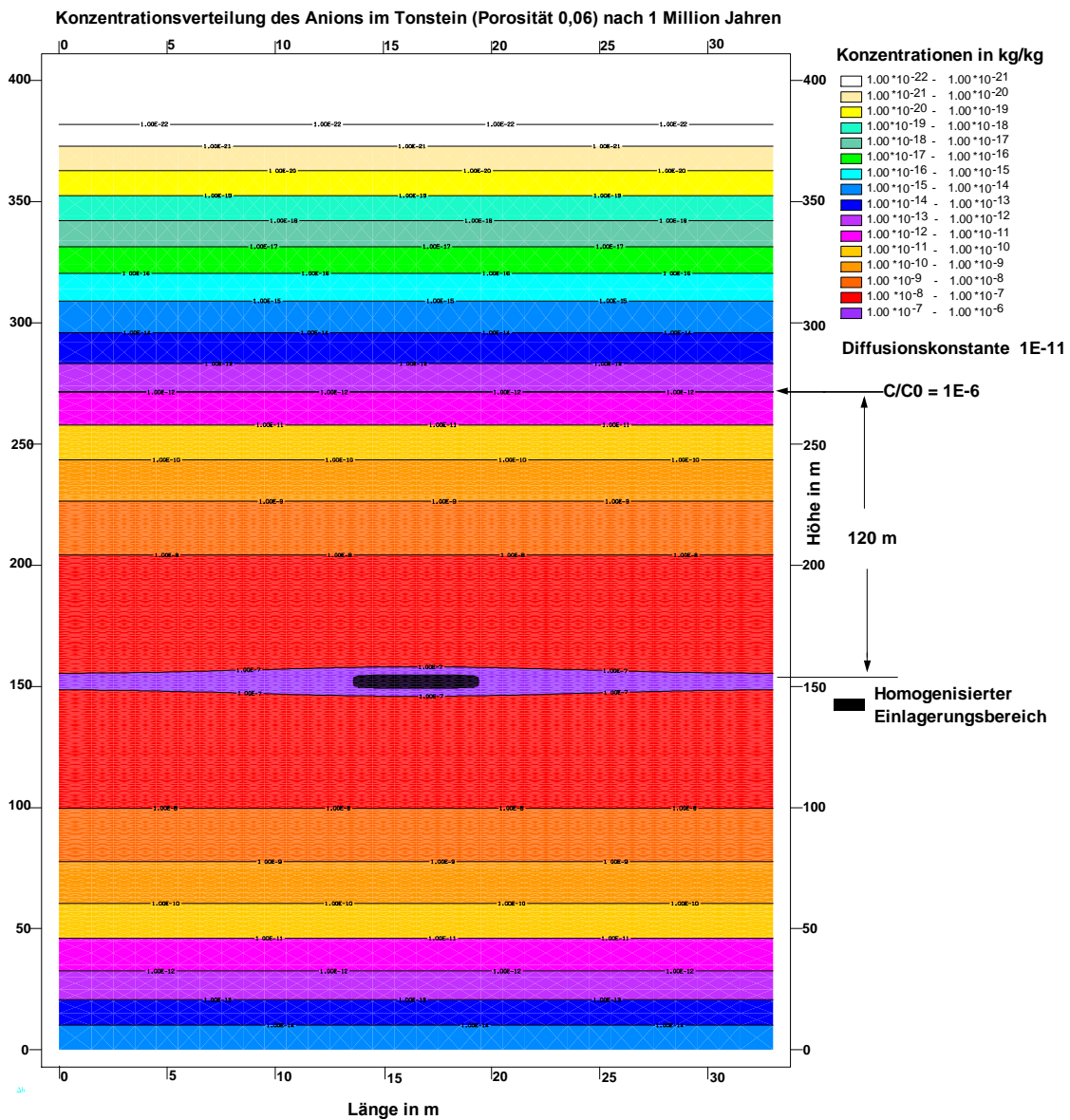


Abb. 3.8: Ergebnis der Diffusionsrechnung: Konzentrationsverteilung eines idealen Tracers (Anion) ($D_p = 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,06$, entspricht einem $D_e = 6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$) zum Zeitpunkt 10^6 Jahre.

3.2 Berechnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs am synthetischen Tonsteinstandort

Nachdem im vorherigen Kapitel die Begrenzung des ewG auf Basis vergleichbarer Rechnungen durchgeführt wurde, erfolgt in diesem Kapitel eine Berechnung auf Basis der festgelegten Daten des Tonsteinstandortes. Ein Grund für die neuerlichen Rechnungen ist die Tatsache, dass das Radionuklid I-129 als Tracer verwendet wurde, aber nach den Daten der NAGRA einer geringen aber dennoch sich stark auswirkenden Sorption in den Tonsteinen des Wirtsgesteins unterliegt. Deshalb wurden auf Basis der standortspezifischen Daten des Tonsteinstandortes die Diffusionsrechnungen mit den Radionukliden Se-79, Cl-35 und I-129 unter Berücksichtigung der Standortdaten wiederholt.

Gleichzeitig wurde zur Diskussion einer nicht erkannten Diskontinuität außerhalb der Umfahrungsstrecke auch die horizontale Diffusion in die Betrachtungen einbezogen.

Um die Auswirkungen der Randbedingungen zu testen wurde weiterhin ein nach oben erweitertes Modell verwendet, wobei nachfolgende Aussagen zu den Randbedingungen zu treffen sind.

Einfluss der Randbedingung auf die Höhe des Diffusionsstromes:

Die Diffusion durch den Tonstein wurde mit den Programmen SPRING und MARNIE, die die Randbedingungen für die Konzentrationen unterschiedlich behandeln, berechnet.

Programmsystem SPRING

Der obere Rand des Modells ist in Spring geschlossen, d. h. eine Diffusion über den Rand findet nicht statt. Damit diese Randbedingung keine Rückwirkung auf die Höhe der Diffusionsströme hat, wird

1. das Modell so groß gewählt, dass der obere Rand innerhalb der Problemzeit von den Nukliden nicht mit einer über Spuren hinausgehenden Konzentration erreicht wird, und

2. die oberste Elementreihe des Modells mit einer großen Mächtigkeit belegt, so dass das Volumen dort sehr groß ist. Dies hat zur Folge, dass in dieser Elementreihe die Konzentrationen sehr klein werden, so dass von der vorletzten zur letzten obersten Elementreihe der Konzentrationsgradient und damit der Diffusionsstrom erhöht ist, was einer erhöhten Diffusion über den Rand entsprechen würde. Dies verhindert zusätzlich eine Rückwirkung der Randbedingung auf die Rechnung.

MARNIE

In MARNIE dagegen sind die Ränder immer für die Konzentrationen offen, d. h. jenseits des Randes sind die Konzentrationen 0, so dass über den Rand eine erhöhte Diffusion erfolgt. Auch hier wurde das Modell ähnlich groß gewählt wie in SPRING, damit diese Randbedingung nicht zu einer zu großen Diffusion führt.

In MARNIE gibt es außerdem die Möglichkeit, einen quasi geschlossenen Rand zu simulieren. Eine Rechnung mit dieser Randbedingung ergab für die Diffusionskonstante $1,5E-11 \text{ m}^2/\text{s}$ identische Ergebnisse, was wiederum heißt, dass die Randbedingung keinen Einfluss hat.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen in MARNIE und SPRING waren nahezu identisch (siehe Abb. 3.9 bis 3.11). Da beide Programme die Randbedingung für die Konzentrationen wie oben beschrieben unterschiedlich behandeln, kann daraus geschlossen werden, dass diese Randbedingung keinen Einfluss auf das Ergebnis der Rechnung hat.

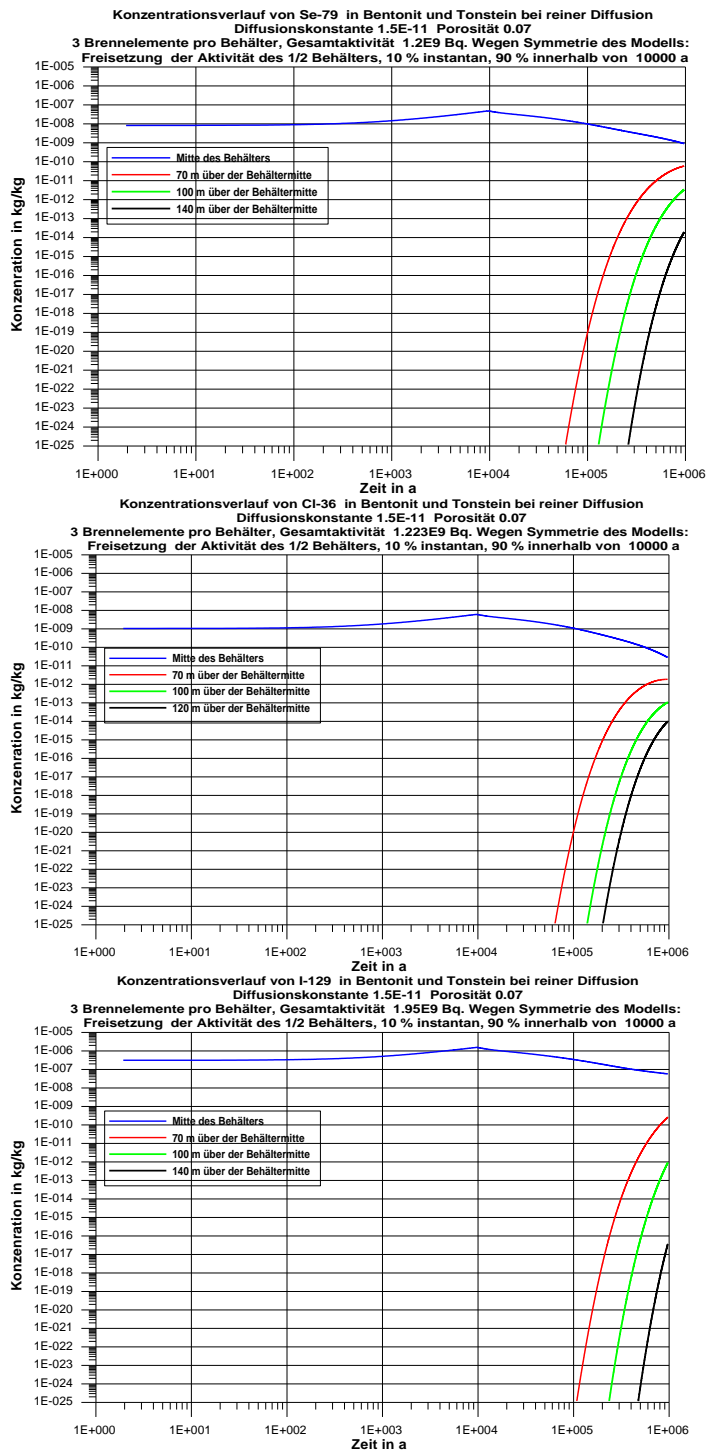


Abb. 3.9: Konzentrationsverläufe der Radionuklide Se-79, Cl-36 und I-129 ($D_p = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,07$, $k_d(\text{I-129}) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$) in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand vom Behälter (Berechnung MARNIE)

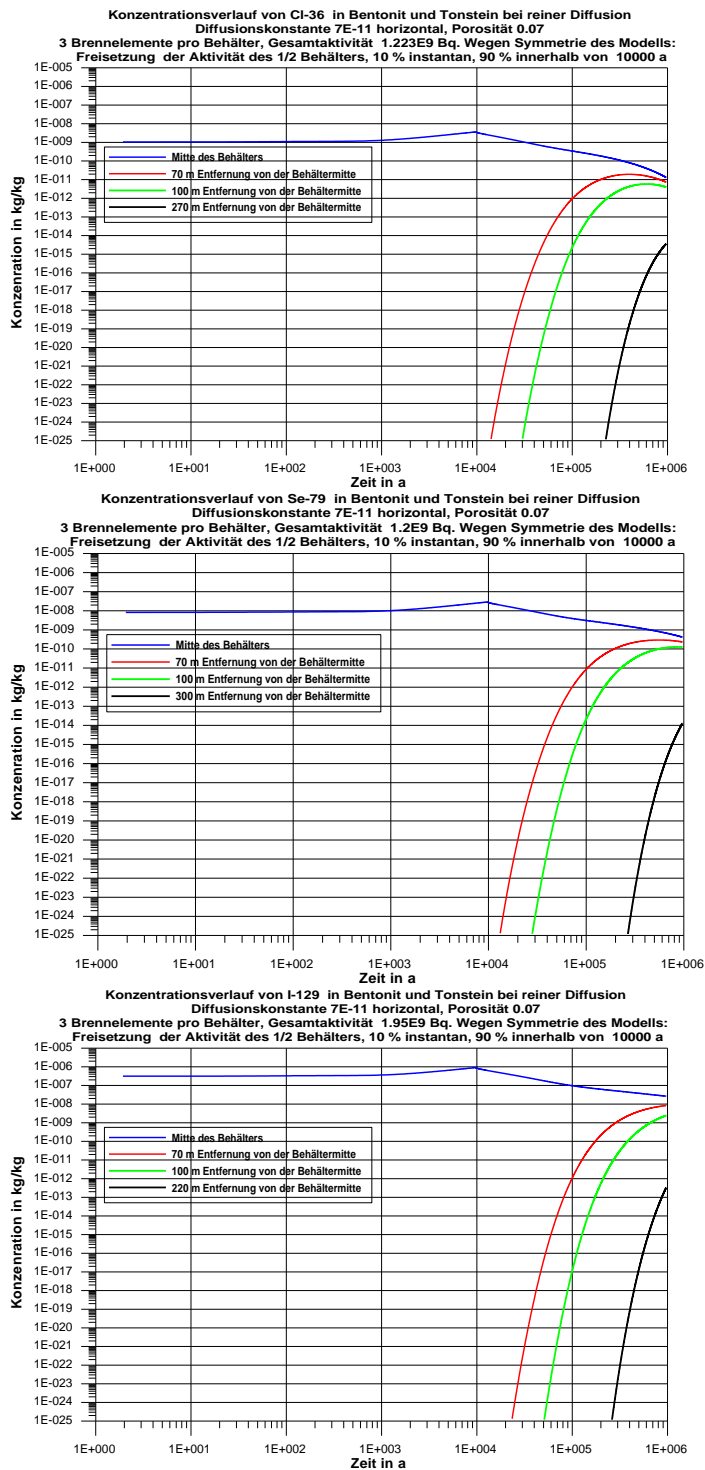


Abb. 3.10: Konzentrationsverläufe der Radionuklide Se-79, Cl-36 und I-129 ($D_p = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,07$, $k_d(\text{I-129}) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$) in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand vom Behälter (Berechnung MARNIE)

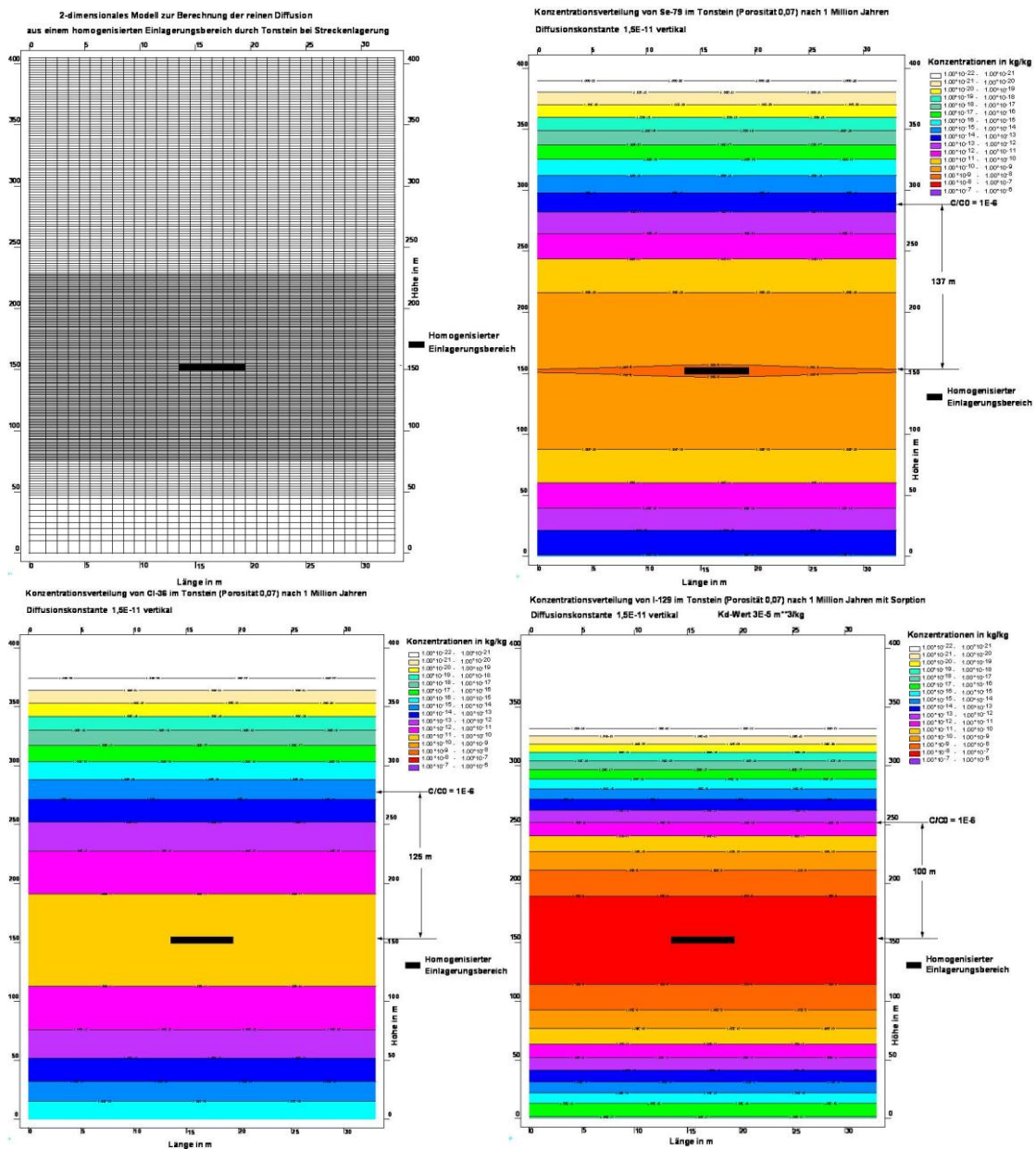


Abb. 3.11: Ergebnisse der 2D-Diffusionsrechnungen (SPRING): Konzentrationsverteilungen der Radionuklide Se-79, Cl-36 und I-129 ($D_p = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,07$, $k_d(\text{I-129}) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$) zum Zeitpunkt 10^6 Jahre.

Die Parameter und Ergebnisse der Rechnungen werden in der nachfolgenden Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tab. 3.2: Daten und Ergebnisse der Diffusionsrechnungen

Nuklid	Molgewicht	Halbwertszeit in a	Halbwertszeit in s	Kd-Wert	Aktivitätskoeff.		
Cl-36	3,60000E+01	3,00000E+05	9,46080E+12	0,00000E+00	1,22577E+12		
Se-79	7,90000E+01	1,10000E+06	3,46896E+13	0,00000E+00	1,52339E+11		
J -129	1,29000E+02	1,57000E+07	4,95115E+14	3,00000E-05	6,53646E+09		
Nuklid	Aktivität Behälter in Bq	Aktivität 1/2 Behälter in Bq	Masse in kg				
Cl-36	1,22300E+09	6,11500E+08	4,98871E-04				
Se-79	1,20000E+09	6,00000E+08	3,93858E-03				
J -129	1,95000E+09	9,75000E+08	1,49163E-01				

Ergebnisse: Diffusionskonstante 1,5E-11 vertikal (1E-12/0,07)

Nuklid	Maximale Konzentration im Behälter nach 10000 a in kg/kg	Verdünnung um den Faktor 1E6 in kg/kg	Benötigter Abstand vom Mittelpunkt des Behälters, um diese Verdünnung zu erreichen in m (Spring)	Maximale Konzentration im Behälter nach 10000 a in Bq/l	Verdünnung um den Faktor 1E6 in Bq/l	Benötigter Abstand vom Mittelpunkt des Behälters, um diese Verdünnung zu erreichen in m (MARNIE)
Cl-36	5,00000E-09	5,00000E-15	125,00	6,12884E+03	6,12884E-03	127,00
Se-79*	4,00000E-08	4,00000E-14	137,00	6,09357E+03	6,09357E-03	138,00
J -129	1,00000E-06	1,00000E-12	99,00	6,53646E+03	6,53646E-03	100,00

Ergebnisse: Diffusionskonstante 7E-11 horizontal (5E-12/0,07)

Nuklid	Maximale Konzentration im Behälter nach 10000 a in kg/kg	Verdünnung um den Faktor 1E6	Benötigter Abstand vom Mittelpunkt des Behälters, um diese Verdünnung zu erreichen in m (Spring)	Maximale Konzentration im Behälter nach 10000 a in Bq/l	Verdünnung um den Faktor 1E6 in Bq/l	Benötigter Abstand vom Mittelpunkt des Behälters, um diese Verdünnung zu erreichen in m (MARNIE)
Cl-36	3,00000E-09	3,00000E-15	267,00	3,67730E+03	3,67730E-03	271,00
Se-79	2,40000E-08	2,00000E-14	297,00	3,65614E+03	3,04679E-03	297,00
J -129	7,60000E-07	7,00000E-13	213,00	4,96771E+03	4,57552E-03	213,00

*Neueste Ergebnisse zum Mobilitätsverhalten von Se in Rossendorf /ROS 09/ zeigen, dass Se-79 weniger mobil ist als bisher angenommen. Bei einem Ansatz eines vergleichsweise niedrigen Sorptionswertes (kd-Wert = $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ entsprechend I-129) ergibt sich eine diffusive vertikale Transportdistanz von 95 m.

Im Ergebnis der Rechnung zeigen die Abbildungen und die Tabelle, dass bei den gegebenen Parameterwerten der einzelnen Radionuklide die als Arbeitshypothese definierte Geringfügigkeitsschwelle ($C/C_0 = 10^{-6}$) in einer vertikalen Entfernung zwischen 99 m bis 137 m und in einer horizontalen Entfernung zwischen 213 m bis 297 m er-

reicht wird. Der ewG definiert sich in diesem Fall als räumlicher Körper mit den entsprechenden Kantenlängen um die Einlagerungsfelder des Endlagers.

3.3 Zusammenstellung weiterer relevanter Prozesse zur Bewertung der Wirksamkeit des ewG

Weitere wesentliche Barriereigenschaften des ewG sind neben der geringen Diffusivität beispielsweise die Mächtigkeit, die Transportlänge für Radionuklide, die Abstandsgeschwindigkeit bei advektivem Transport, ein gleichmäßiger Radionuklidstrom über die Grenze des ewG, die Permeabilität der Auflockerungszone, die Klüftigkeit des Tonsteins und seine repräsentative Permeabilität sowie das Sorptionsverhalten.

3.3.1 Permeabilität der Auflockerungszone

Bei der Ankopplung der Verschlüsse an das Gebirge ist von einer Auflockerungszone (EDZ) auszugehen, die in Abhängigkeit der Offenhaltung der Strecken und der Ausbildung ihrer Ausbauten eine unterschiedliche Eindringtiefe besitzt.

Die Entstehung der Auflockerungszonen (EDZ) erfolgt durch mechanische Effekte der anisotropen Gebirgsspannung und zusätzlich durch eine Entsättigung des Gebirges durch Ventilation der Strecken während der Betriebsphase. Die Eigenschaften der EDZ sind:

- Porendruckerniedrigung
- Potentielle Schrumpfung
- Spannungsrisse
- Erhöhte Gaspermeabilität
- Eventuelle Tonmineralumbildung

3.3.2 Selbstabdichtung der Klüfte in den Auflockerungszonen (EDZ)

Durch die Wiederaufsättigung bis zur Anfangssättigung erfolgt eine Rekompaktion durch Quellung der Tonminerale infolge einer Wasseraufnahme.

3.3.3 Verschlussysteme

Mit den Verschlussystemen werden, in Verbindung mit der streckenweisen Verfüllung im Endlager, die Barrierewirkung des durch Bergbauaktivitäten verletzten einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und damit sein Isolationsvermögen wieder hergestellt. Um eine ausreichende transportverzögernde als auch eine gebirgsstützende Wirkung dieser Verschlussysteme zu erzielen, sind diese qualitativ hochwertig auszuführen. Nach dem derzeit entwickelten Endlagerkonzept werden an ausgewählten Stellen hochwertige Verschlüsse, als hydraulische Barrieren konzipiert, eingebaut /PEI 09/. Die Zwischenstrecken und Schächte werden zusätzlich verfüllt, um primär Bruch-, Auflockerungs- und Verformungserscheinungen des ausbruchnahen Gebirgsbereiches entgegen zu wirken. Der Schachtverschluss im Bereich des Abdichtbauwerks wird im Verbund mit den Verschlüssen der Einlagerungsbereiche die gleiche Qualität der Transportverzögerung aufweisen wie das Tonsteingebirge im ewG.

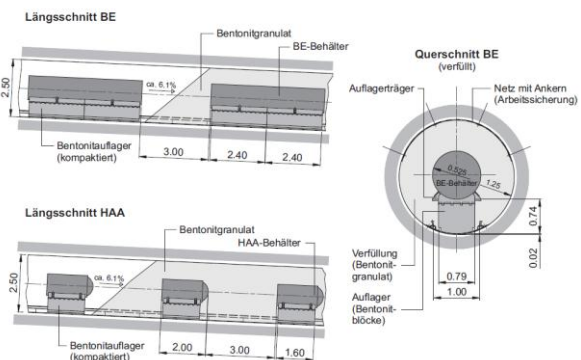
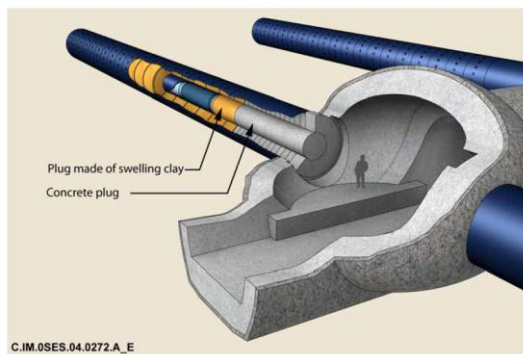
Der Bau der Verschlussysteme erfolgt aus folgenden Gründen:

- Schutz des Betriebspersonals vor direkter ionisierender Strahlung (Betriebsphase)
- Vermeidung von Wasser- bzw. Laugenzutritten in die Einlagerungsbereiche
- Beherrschung bzw. Vermeidung hoher Gasdrücke in Einlagerungsbereichen
- Rückhaltung kontaminierter Fluide bzw. aerosolförmiger Radionuklide in den Einlagerungsbereichen
- Stabilisierung des Grubengebäudes
- Wärmeabfuhr in die Wirtsgesteinsformation

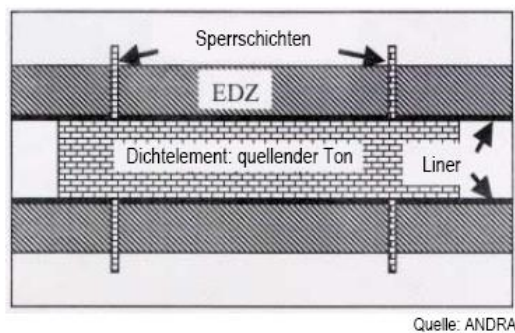
Aufgrund der Funktionsweisen der Verschlussysteme im Einzelnen, dem Zeitpunkt ihres Baus und ihrer standortspezifischen Gegebenheit und in Abhängigkeit der Grubenbaue und Hohlräume (horizontal/vertikal, groß/klein) wird in /PEI 09/ zwischen Versiegelungen und Betonpfropfen unterschieden. Dieses auf Basis des Endlagerkonzepts der NAGRA /NAG 02a/ entwickelte Konzept sieht vor, an ausgewählten Stellen Versiegelungen einzuführen, die bestehend aus einem Dichtsystem, die geforderte Dichtheit gewährleisten und deren statische Widerlager zur Aufnahme bzw. Ableitung der durch den Flüssigkeitsdruck bzw. den Quelldruck hervorgerufenen Kräfte in das Gebirge dienen.

Zu einer detaillierten Beschreibung der Konstruktion und Bemessung in einem realen Endlager sind detaillierte geotechnisch/felsmechanische Angaben notwendig, die im Rahmen des Verbundvorhabens VerSi nicht vorgesehen sind. Desweiteren sind im Rahmen eines Sicherheitsnachweises für die Angabe von spezifischen Anforderungen an ortsspezifische Dichtsysteme standortspezifische Rechnungen, z. B. hydrodynamische Modellrechnungen im Endlager über lange Zeiträume notwendig. Durch diese können u. a. über einen noch festzulegenden tolerierbaren Volumenstrom die spezifischen Bemessungskriterien der Dichtsysteme bestimmt werden. Hierdurch wird es möglich, die kombinierte Wirkung der Durchlässigkeit des Dichtsystems einschließlich des aufgelockerten Gebirgsbereiches und des hydraulischen Gradienten zu berücksichtigen. Für eine generelle Vergleichbarkeit ist die Notwendigkeit ohne spezielle Ortskenntnis nicht gegeben.

Aufgrund der geringen Durchlässigkeitsbeiwerte, des Quellvermögens, der Langzeit- und Erosionsbeständigkeit bieten sich als Material für diese Dichtsysteme Bentonite und Bentonit- Sandgemische an, wobei die hydraulischen Eigenschaften durch die Bentonittrockenrohddichte und den Bentonitanteil gesteuert werden. Nach /NAG 02a/ bieten sich für die notwendigen Widerlager für kürzere bis mittlere Zeiträume die Verwendung von Beton und für längere Einsätze Trockenmauerwerke aus Natursteinen oder das Einbringen von Schotterkies mit entsprechenden Übergangsschichten an (Abb. 3.12).



Engineered Barrier Experiment EB Mont Terri



Quelle: ANDRA

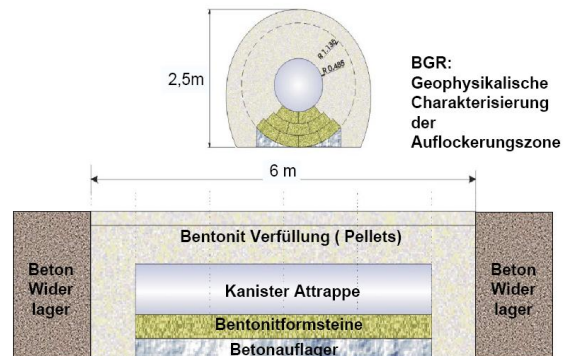


Abb. 3.12: Schematische Darstellung von Verschlussystemen in Tonendlager Konzepten der ANDRA (links) /AND 05/ und der NAGRA (rechts) /NAG 02a/.

Nach /NAG 02a/ sollen die Verschlüsse der Lagerstollen BE/HAA langfristig die Dichtfunktion und den Lastabtrag gegenüber einem aus dem Lagerstollen oder dem Betriebs- bzw. Bautunnel auftretenden Flüssigkeitsdruck übernehmen. Kurzfristig haben die Verschlüsse die Aufgabe bis zum Verschluss des Hauptlagers eine Verhinderung eines Wasserzuflusses aus dem Bau- und/oder Betriebstunnel zu gewährleisten. Im Endlagerkonzept der NAGRA bestehen diese Dichtelemente aus Bentonitgranulat und einer Mischung aus Bentonit / Sand und der Lastabtrag erfolgt durch eine Schotterkiespackung, welche mit je einer Übergangsschicht an das Dichtelement anschließt. Ton/Sand Gemische haben sich als geeignete Versatz- und Verschlussmaterialien erwiesen, um Gas kontrolliert aus dem Endlager abzuführen, da sie im trockenen Zustand hohe Gaspermeabilität und im wassergesättigten Zustand infolge Quellens der Tone niedrige Wasserpermeabilität zeigen. Gelöste Radionuklide können durch den Versatz und Verschluss nicht entweichen. Im wassergesättigten Zustand zeigen Versatz und Verschlüsse niedrige Gaseintritts- bzw. Gasdurchbruchdrücke.

Als Abschluss gegen den Betriebs- bzw. Bautunnel wird eine Betonwand erstellt, welche eine temporäre Funktion bis zur Verfüllung des Hauptlagers hat (s. Abb. 3.13 links).

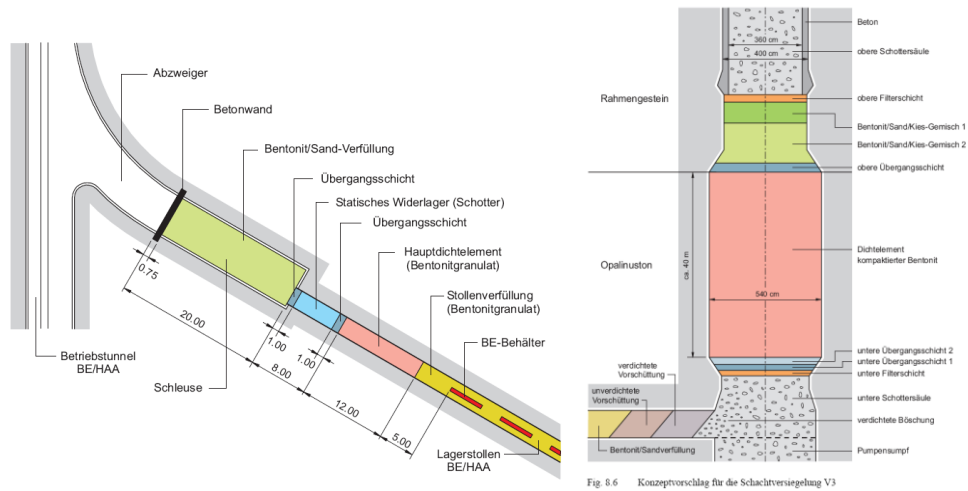


Abb. 3.13: Schematische Darstellungen der Konzeptvorschläge der NAGRA für den Streckenverschluss und für die Versiegelung am Schachtfuß, Abmessungen in m (nach /NAG 02a/)

Folgende Prozesse zur Bewertung der Wirksamkeit von Verschlussystemen werden vorsorglich einer Sensitivitätsanalyse als möglicherweise relevant eingestuft:

- **Laugen- bzw. Tiefengrundwasserzutritt:**
Im Tonstein ist im Normalfall von einer Wassersättigung des Gebirges auszugehen. Diese führt in der Nachbetriebsphase zur Aufsättigung der geotechnischen Barrieren. Eine langsame Aufsättigung des Versatzes um die Behälter führt zu einer geringen Korrosion der Behälter und damit zu einer geringeren Gasbildung.
- **Korrosion der Behälter:**
Die Behälterkorrosion beginnt nach Aufsättigung der Bentonitbarriere. Nach /NAG 02a/ entspricht die Behälterkorrosion ca. $1\mu\text{m/a}$.
- **Gasbildungsrate**
Die Gasbildungsrate wird von /NAG 02a/ mit bis zu 4 Mol H_2 pro Behälter und Jahr abgeschätzt. Bei sehr hohem Quelldruck mit geringer Gaspermeabilität des Buffers können hohe Gasdrücke entstehen. Die Bildung eines hohen Gasdruckes wird nach /NAG 02a/ für den Opalinuston als unwahrscheinlich bzw.

bei Verwendung von nicht hochkompaktierten Ton/Sand-Buffer als vermeidbar angesehen.

- Permeabilität vs. Diffusivität

Die Eigenschaften des Tonbuffers als Verschlusssystem können wie folgt abgeschätzt werden (u.a. aus Tab. A3.3-4c in /NAG 02d/):

- Wärmeleitfähigkeit
Bentonit Buffer: 0,4 W/(m°K)
Ton/Sandgemisch: 1,6 W/(m°K)
- Porosität: 0,3
- Durchlässigkeitsbeiwerte/ Porendiffusivität
Bentonit: $k_f = 10^{-13}$ m/s
Backfill: $k_f = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s
EDZ: $k_f = 10^{-12}$ m/s
Backfill: Porendiffusionskonstante: $D_p = 5 \cdot 10^{-10}$ m²/s
EDZ: Porendiffusionskonstante: $D_p = 2 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-11}$ m²/s
- Quelldruck 4 MPa
- Langzeitbeständigkeit (im Temperaturbereich von 10° bis ca. 95°C) gegeben

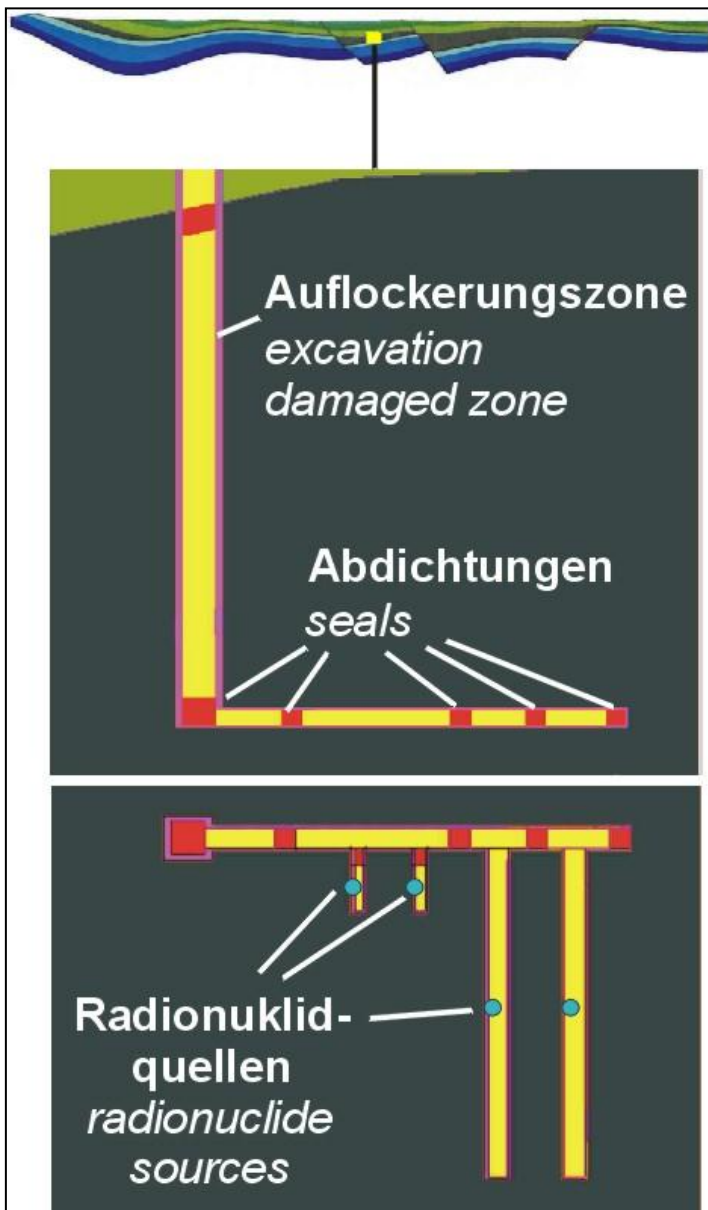
3.3.4 Unentdeckte hydraulisch wirksame Diskontinuität in wenigen Metern Entfernung parallel zu Umfahrungsstrecken im ewG

Hydraulisch wirksame Diskontinuitäten, wie Störungen oder offene Klüfte; können die Barrierenwirksamkeit der Tongesteine erheblich herabsetzen oder sie gänzlich überwinden. Aufgrund der Standorterkundung und der Standortbewertung wird für den generischen Tonsteinstandort im VerSi davon ausgegangen, dass Gebiete mit regionalen Störungen und Störungen, die von der Geländeoberfläche detektiert werden können, bei der Standortauswahl vermieden wurden. Nach der untertägigen Erkundung würden bei Standortauswahl auch die Standorte vermieden, bei denen die Existenz hydraulisch wirksamer Diskontinuitäten innerhalb des ewG nachgewiesen werden kann. Nach diesen Untersuchungen bleiben nur Diskontinuitäten möglicherweise unentdeckt, die bei der Erkundung außerhalb der Endlagerumfahrung nicht erfasst werden können.

Im Rahmen des bilateralen REGIME-Projektes (Repository Evaluation performed by GRS and IRSN through a Modelling Exercise) /FAP 08/ wurden an Hand eines generischen Tonsteinstandortes numerische Studien an einem 3D-Modell, die u. a. den Einfluss einer unentdeckten, wasserwegsamem Störung, welche in 1 m Entfernung vom Ende der kurzen HAW-Einlagerungsstrecken verläuft, untersucht.

Das generische Endlagermodell am REGIME-Standort besteht aus einem Schacht und einer Zugangsstrecke, von welcher vier Einlagerungsstrecken abzweigen (s. Abb. 3.14) Einlagerungstunnel, Schacht und Zugangsstrecke sind durch Abdichtungen aus geringpermeablem Material (z. B. Bentonit) voneinander abgedichtet. Zusätzlich ist der Schacht mit einer weiteren technischen Barriere an der oberen Begrenzung des Wirtsgesteins gegen die überlagernden Schichten abgedichtet. Zugrunde gelegt wurden im Referenzfall „Reference Case“ eine vollständige Entfernung der Auflockerungszone und damit eine integrale Durchlässigkeit der Abdichtungen entsprechend der des Tonsteines.

Der Endlagerstandort liegt in einer für Norddeutschland typischen weiträumigen Muldenstruktur (s. Abb. 3.12, oben), die aus mesozoischen Schichten aufgebaut ist. Gegenüber den Angaben des im VerSi generierten Tonsteinendlagers wurde in /FAP 08/ eine isotrope Porendiffusionskonstante für den Tonstein auf einen Wert von $5 \cdot 10^{-12}$ m²/s festgelegt. Das Endlager befindet sich in einer Teufe von ca. 800 m u. GOK in einem ca. 250 m mächtigen Tonsteinpaket mit einem Gebirgsdurchlässigkeitsbeiwert von 10^{-12} m/s (s. Abb. 3.15). Im Liegenden und Hangenden befinden sich mäÙige Grundwasserleiter mit Durchlässigkeitsbeiwerten zwischen 10^{-7} und 10^{-8} m/s. Überlagert wird die Schichtenfolge von einem 300 m mächtigen Geringleiter mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-10} m/s.



Vertikalschnitt des Modellgebiets.

Detailausschnitt Endlager, Vertikalschnitt mit Schacht und Zugangsstrecke.

Detailausschnitt Endlager, Horizontalschnitt mit kurzen und langen Einlagerungsstrecken.

Abb. 3.14: Aufbau des Endlagermodells: Detailausschnitte, Vertikalschnitt (oben), Horizontalschnitt unten), aus /FAP 08/.

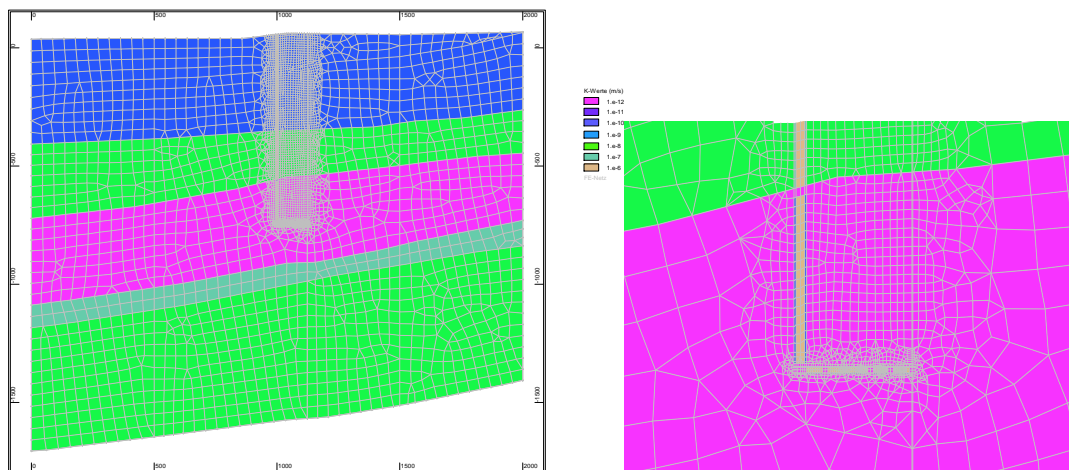


Abb. 3.15: Aufbau des numerischen Endlagermodells (Gitternetz SPRING) im Vertikalschnitt, rechts: Detailausschnitt des Endlagers im Vertikalschnitt

Im Basisfall wird ein nicht sorbierendes Radionuklid im Bereich der Einlagerungsstrecken über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant freigesetzt (Randbedingung $c=1$). Bei den vorgegebenen Parametern ist die Diffusion der dominierende Transportprozess. Die Porendiffusionskonstante wurde mit $D_p = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, die Diffusionsporosität mit $n=0,05$ angenommen. Das Ergebnis für den *Basisfall* ohne Störung wird in Abb. 3.16 in Form der Verteilung der Radionuklidkonzentrationen (bezogen auf eine Anfangskonzentration von 1) in einem Horizontalschnitt im Tonstein oberhalb der Einlagerungstrecke (links) und entlang eines Vertikalschnittes in Endlagerlängserstreckung (rechts) dargestellt.

Über den gesamten Rechenzeitraum wird der Übertritt gelöster Radionuklide in einen überlagernden Grundwasserleiter (Farbe Grün) aufgrund des hohen Isolationspotentials des Wirtsgesteins und der Funktionstüchtigkeit der technischen Barrieren wirksam unterbunden. Die nahezu konzentrische Gestalt der Konzentrationsverteilung zeigt, dass keine bevorzugte Freisetzung entlang technischer Barrieren, wie dem verfüllten und abgedichteten Schacht, erfolgt. Die Ausdehnung der Konzentrationsfahne (Basis Geringfügigkeitsschwelle $C/C_0 = 10^{-6}$) entspricht im Fall der Diffusionskonstanten von $D_p = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und einer Diffusionsporosität von $n = 0,05$ nach 1 Million Jahren ca. 120 m.

Basisfall ohne Störung in /FAP 08/: $D_p = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

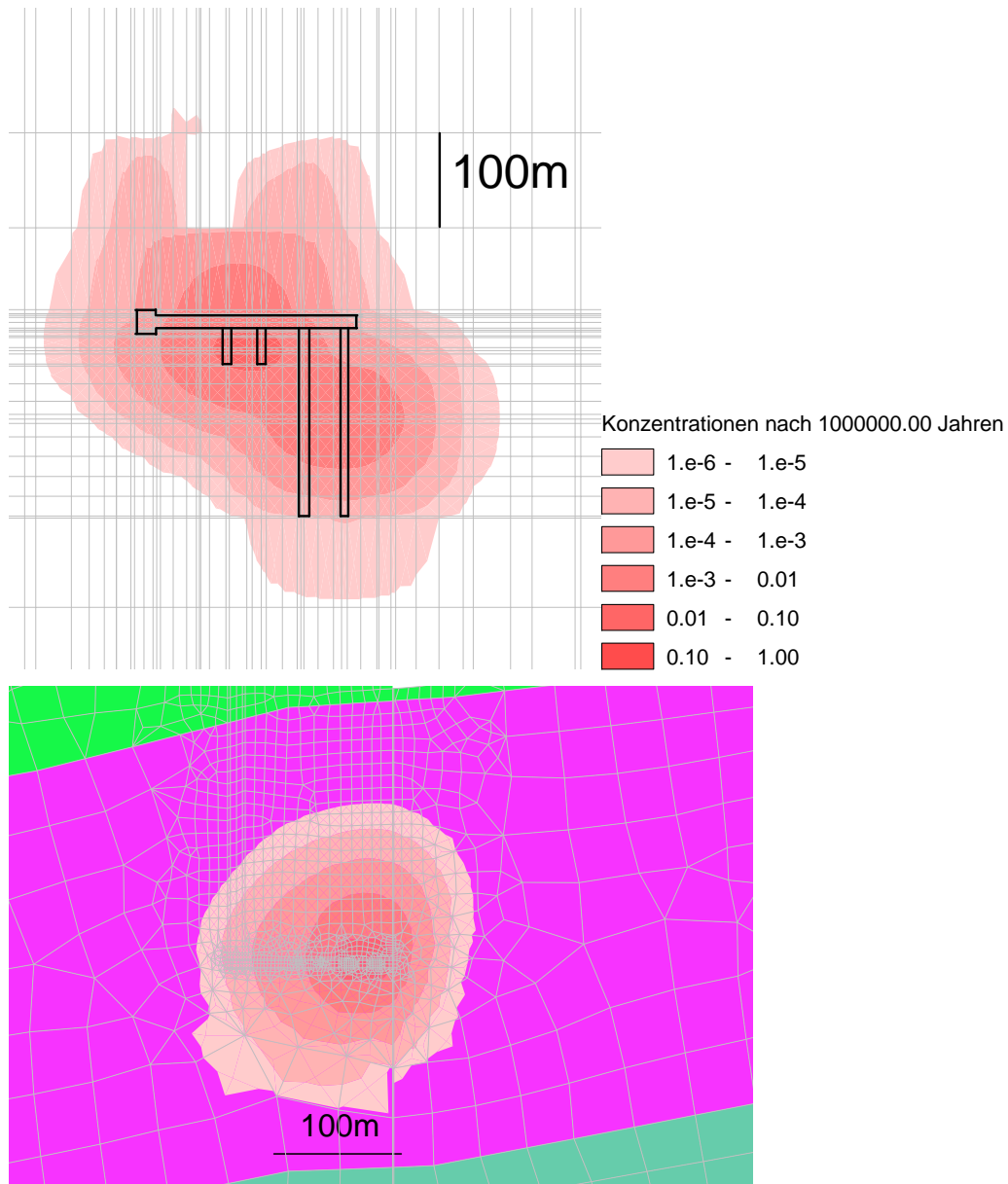


Abb. 3.16: Konzentrationsverteilung in der Umgebung eines Endlagers ohne Störung nach 1 Mio. Jahren, oben: horizontaler Ausschnitt aus dem Modell, unten: vertikaler Ausschnitt aus dem Modell (Konzentrationswerte bezogen auf Anfangskonzentration $C_i = 1$).

Aufgrund der Tatsache, dass sich die hydrogeologische Region, in der das Endlager eingebettet ist, durch äußerst geringe lokale hydraulische Gradienten und folglich geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten auszeichnet, kommt der Diffusion die entscheidende Rolle beim Radionuklidtransport zu.

Der Einfluss einer unentdeckten parallel zur Endlagererstreckung verlaufenden Störung zeigen die nachfolgenden Ergebnisse. Dabei wird im Endlagermodell eine senkrecht stehende, wasserwegsame Störung, die in kurzer Entfernung parallel zur Endlagerlängserstreckung streicht und damit durch die bergmännische Auffahrung des Endlagers unentdeckt bleibt, konstruiert. Die senkrecht stehende Störung verläuft in kurzer Entfernung zu den HAW-Streckenenden (geringerer Abstand der Konzentrationsquellen zu der Störung), die bis zur Modelloberfläche reichen. Hierzu mussten die in Abb. 3.14 dargestellten HAW-Einlagerungsstrecken auf der gegenüberliegenden Seite der Zugangsstrecke positioniert werden, da anderenfalls eine in kurzer Entfernung von den Enden der kurzen Strecken verlaufende Trennfläche während der Auffahrung der langen LAW/MAW-Strecken hätte bemerkt werden müssen. Die Permeabilität der 1 m mächtigen Störung wurde mit $1 \cdot 10^{-7}$ m/s angesetzt bei einer Störungsbreite von 1 m.

Da die kurzen HAW-Strecken an ihrem Blindende keine Abdichtungen aufweisen, reicht zur Untersuchung des Einflusses der unentdeckten Störung die alleinige Betrachtung des Referenzfalles aus.

Die ermittelte Konzentrationsverteilung ist in Abb. 3.17 dargestellt. Die vergrößerte und im Hinblick auf die Konzentrationsabstufung feiner aufgelöste Detaildarstellung zeigt, dass Konzentrationen $< 10^{-4}$ durch die Störung bis in den überlagernden Grundwasserleiter (Abb. 3.18, links) gelangen. Der transportwirksame Einfluss der Störung zeigt sich auch in der Asymmetrie der Konzentrationsverteilung beiderseits der Störung in Abb. 3.18 (rechts).

In diesem Fall überschreitet die Konzentration die Geringfügigkeitsschwelle. Die Mächtigkeit des Tonsteins von 1 m zwischen HAW-Strecke und Störung ist dabei zu gering, um eine Barriere mit so hoher Wirksamkeit zu bilden, dass die Störung über den Rechenzeitraum von 1 Mio. Jahren keinerlei Auswirkungen auf den Stofftransport in der Endlagerumgebung hat.

Basisfall mit Störung in /FAP 08/ /: $D_p = 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

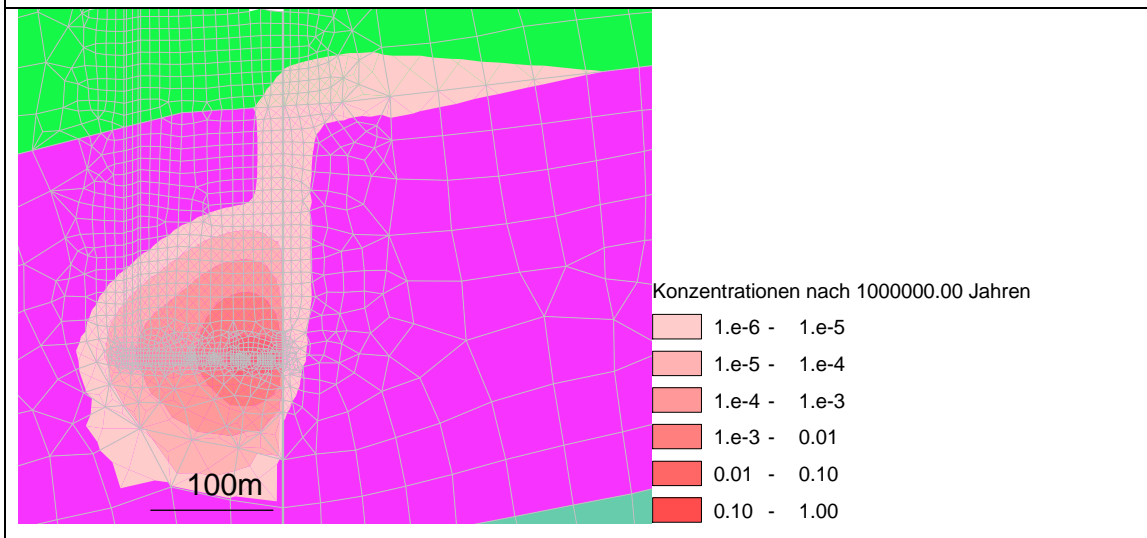


Abb. 3.17: Konzentrationsverteilung in der Umgebung des Endlagers nach 1 Mio. Jahren (Störung: $k_f = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, parallel der Störung).

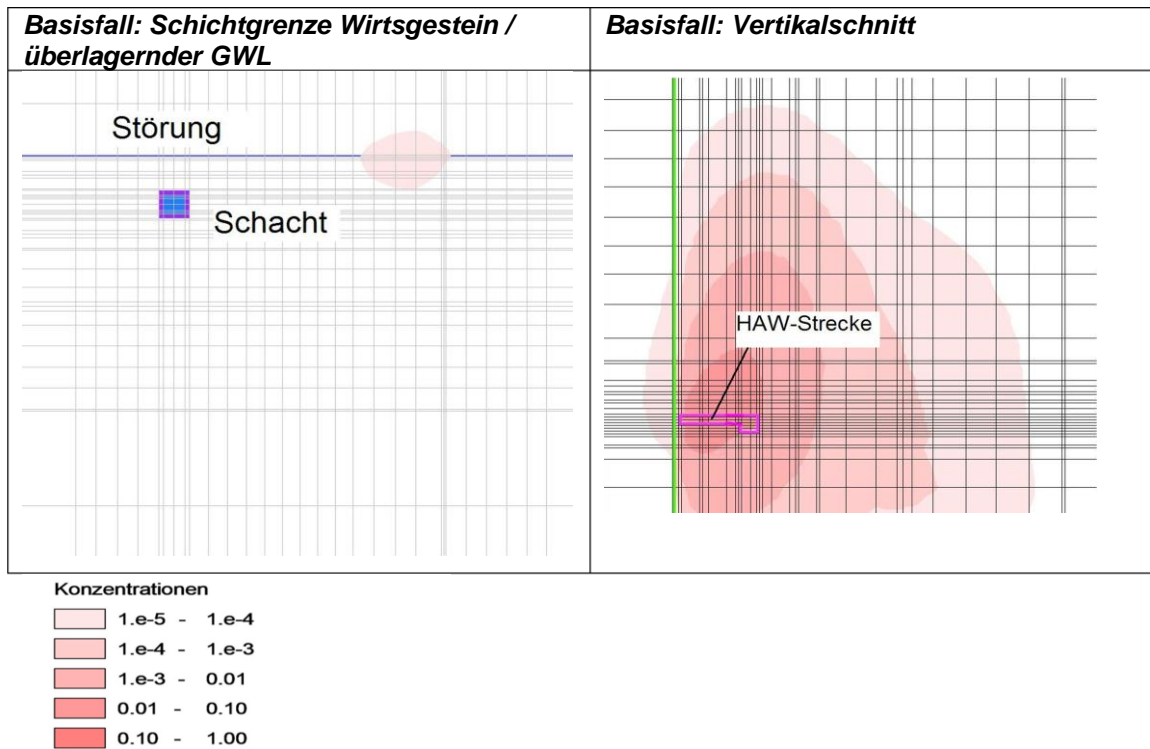


Abb. 3.18: Konzentrationsverteilung auf der Schichtgrenze Wirtsgestein/ überlagernder GWL (links) bzw. entlang eines Vertikalschnittes (rechts) nach 1 Mio. Jahren (Störung: $k_f = 5 \cdot 10^{-7}$ m/s, parallel). – Konzentrationswerte bezogen auf Anfangskonzentration $C_i = 1$.

Die nur sehr geringen ausgetragenen Radionuklidmengen des in /FAP 08/ untersuchten Endlagersystems gegenüber wasserwegsamem Störungen sind maßgeblich auf die vergleichsweise niedrigen Gradienten durch das Wirtsgestein zurückzuführen (10 m vertikale Druckdifferenz über 350 m Wirtsgestein), wodurch nur ein eher geringer advektiver Transport durch die Störungen erfolgt. Im Fall höherer hydraulischer Gradienten wäre aufgrund des verstärkten advektiven Transports mit wesentlich höheren Freisetzungen gelöster Radionuklide in das Deckgebirge zu rechnen gewesen. Eine Diskussion der hydraulischen Gradienten am generischen VerSi-Tonsteinstandort erfolgte im Abschnitt 3. Nach den dort dargestellten Ergebnissen einer 2D-Modellbetrachtung des generischen Tonsteinstandorts liegen auch hier über dem ewG geringe hydraulische Gradienten vor, die zusammen mit dem niedrigen Durchlässigkeitsbeiwert des Tonsteingebirges diffusionsgesteuerte Transportprozesse als dominant einstufen.

Aufgrund des geringen Anteils advektiver Transportkomponenten stellt sich der Diffusionskoeffizient im Wirtsgestein als eine der sensitivsten Größen in dem betrachteten

hydraulischen Regime dar. Diese Größe wirkt sehr sensitiv auf das Transportgeschehen im Tonstein und auf die Größe des ewG.

Basis der Betrachtungen im REGIME – Vorhaben /FAP 08/ waren Überlegungen zu eventuell unentdeckten Klüften bei einer Standortauswahl eines Endlagers in Frankreich. Im Dossier 2005 wurde durch ANDRA die Existenz von hydraulisch wirksamen Störungen am Standort Bure ausgeschlossen. Auf Basis ihrer Erkenntnisse in Tourneiere schließt IRSN jedoch mögliche Störungen nicht aus. Zur Diskussion über unentdeckte Diskontinuitäten wird im NAGRA Bericht zum Opalinus-Standort dargestellt, dass in den Tonsteinen unterhalb einer Schichtüberlagerung von 200 m keine hydraulisch wirksamen Störungen vorgefunden wurden bzw. die Störungen gleiches Verhalten wie das Gebirge aufweisen.

Im Gegensatz zum Endlagerkonzept der ANDRA wird für VerSi eine Erkundungsumfahrung des Endlagerbergwerks im Tonstein vorausgesetzt /PEI 09/, die eine unentdeckte hydraulisch wirksame Diskontinuität innerhalb der Umfahrung ausschließt. Außerhalb der Umfahrung kann diese in einem bestimmten Abstand durch Untersuchungen vor Ort ebenfalls ausgeschlossen werden. Dies setzt voraus, dass wegen der hohen Detektionswahrscheinlichkeit und der tektonischen Situation die Strukturen praktisch entdeckt werden. Eine mögliche Untersuchung beinhaltet Horizontalbohrungen aus der Umfahrungsstrecke in das Gebirge hinein. Hier können durch sogenannte Fächerbohrungen und begleitende Packertests entsprechende Diskontinuitäten festgestellt werden. Um die Anzahl der Fächerbohrungen zur Erkundung möglicher hydraulisch wirksamer Diskontinuitäten zu minimieren, soll das Endlager im Tonstein des Niedersächsischen Beckens 45° zum rheinischen und herzynischen Streichen angelegt werden, soweit gebirgsmechanische Überlegungen dem nicht entgegen stehen.

Bohrungen wären somit nur in den Ecken der Umfahrung notwendig. Aus der Umfahrungsstrecke wird nach außen mit anschließenden Untersuchungsverfahren wie Porositätslogs und Packertests das Gebirge untersucht. Die notwendige Erkundungstiefe liegt bei ca. 100 m aus der Umfahrungsstrecke in das umliegende Gestein.

Für die Methodenentwicklung in VerSi wird davon ausgegangen, dass im Normalfall im Rahmen der untertägigen Erkundung alle erkennbaren hydraulisch wirksamen Trennflächen durch Fächerbohrungen aus der Umfahrungsstrecke heraus erkannt werden (z.B. durch Packertest und anderen Sondierungsverfahren). Störungen mit minimalem

Versatz von 10 m und mindestens 150 m Länge können durch Oberflächenseismik detektiert werden.

Nach Aussagen des BfS wird mindestens eine 100 m seismische Erkundungstiefe im Festgestein durch das Integrated Seismic Imaging System (ISIS) erreicht. Es wird im Tunnelbau parallel zur Auffahrung in Richtung der Ortsbrust verwendet, um grundwasserleitende Schichten zu erkennen (Lockergestein, Festgestein). Über die Empfindlichkeit hinsichtlich entsprechender schwacher Reflektoren, wie sie im Tonstein vorhanden sind, ist nichts bekannt.

Die Voraussetzungen für eine genehmigungsfähige Standortauswahl schließt bekannte großräumige Störungen aus. Das Wirtsgestein des VerSi-Tonsteinstandortes wird

- aus geologisch-genetischer Sicht und aufgrund der Standortauswahl,
- durch Endlagerauslegung (Endlager 45° zum rheinischen und herzynischen Streichen und 4 Fächerbohrungen den Ecken) und ausreichenden geophysikalischen Detektionsmethoden

als frei von Störungzonen angesehen. Eine unentdeckte hydraulisch wirksame Diskontinuität im ewG eines Tonsteinstandortes wird als nicht wahrscheinlich angesehen.

4 Zusammenfassung

In Zusammenarbeit mit dem BfS erfolgte eine Zusammenstellung von Geodaten für einen generischen Tonsteinstandort. Hierzu wurden, soweit wie möglich, reale Standortdaten eines Tonsteinstandortes aus bestehenden Datensätzen herangezogen. Die Zusammenstellung der verfügbaren Daten und geologische Informationen dient der Erarbeitung einer geologischen Modellvorstellung zum synthetischen Tonsteinstandort.

Für den synthetischen Tonsteinstandort wurde darüber hinaus auf Basis nationaler und internationaler Erfahrungen und Analogieschlüssen ein Entwurf einer hydrogeologischen Modellvorstellung entwickelt, die als Grundlage der Arbeiten in den anderen Vorhaben im Projekt VerSi Verwendung finden soll. Zur Definition der hydraulischen Randbedingungen an der Grenze des ewG wurden auf Basis eines Modellschnitts zweidimensionale Modellrechnungen mit dem Programmsystem SPRING durchgeführt.

Die Isolationswirkung des ewG wurde an Hand vereinfachter Analysen, z. B. eindimensionale Diffusionsrechnungen, abgeschätzt und die Abmessungen des ewG unter Annahme einer Geringfügigkeitsschwelle als Arbeitshypothese bestimmt.

Aufgrund des geringen Anteils advektiver Transportkomponenten stellt sich der Diffusionskoeffizient im Wirtsgestein als eine der sensitivsten Größen in dem betrachteten hydraulischen Regime dar. Diese Größe wirkt sehr sensitiv auf das Transportgeschehen im Tonstein und auf die Größe des ewG. Der ewG bestimmt sich durch das Transportverhalten der Radionuklide, bei diffusionsgesteuertem Transport, insbesondere durch nicht sorbierende anionische Nuklide (z.B. I-129). Die Ergebnisse zeigen, dass Unsicherheiten der Werte der Diffusionskonstanten (und damit auch der Diffusionsporosität) dieser Nuklide eine hohe Variabilität (auch bei geringen Schwankungsbreiten der Werte) in den Transportlängen erzeugen. Die Abmessungen des ewG besitzen damit eine hohe Sensitivität gegenüber Veränderungen der Diffusionskonstanten dieser Nuklide.

5 Literatur/Unterlagen

- /AKE 02/ Arbeitskreis Endlagerung (AkEnd)
Auswahlverfahren für Endlagerstandorte
Empfehlungen des AkEnd, Dezember 2002
- /AND 05/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA):
Dossier Argile– Report Series: Architecture and management of a geological disposal system / Phenomenological Evolution of the geological repository / Safety Evaluation of a geological repository, 2005.
- /APP 02/ Appel, D.; Habler, W.:
Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung, Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung, Bericht zum AkEnd, Hannover 2002
- /APP 09/ Appel, D. & Kreusch, J. :
Grundlagen der Methodik und Anforderungen bei der vergleichenden Bewertung von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen. Abschlussbericht zum VerSi-Vorhaben 3607R02589 : Durchführung vergleichender Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene geologische Situationen zur Evaluierung der Methodik und der Instrumentarien. Hannover, August 2009.
- /BAL 01/ Baldschuhn, R., et al:
Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor, Geologisches Jahrbuch, Hrsg.: BGR und Staatliche Geologische Dienste der BRD, Reihe A, Heft 153, ISBN 3-510-95881-0, Hannover 2001
- /BAL 08/ Baltés, B.; Becker, A.; Kindt, A.:
Strategie zum Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers, GRS-A-Bericht, GRS-A-3405, Köln Januar 2008

- /BAZ 06/ Bazer-Bachi F. et al:
 Characterization of iodide retention on Callovo-Oxfordian argillites and its influence on iodide migration; *Physics and Chemistry of the Earth*; 31; 517-522; 2006.
- /BEH 07/ Behnsen, J.G.:
 "Anionenkonkurrenz und Anionenselektivität bei der Sorption von Radionukliden durch Organotone", Dissertation, Universität Hannover, (2007).
- /BFS 03/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
 Daten zu Konrad aus Parameterdatenbank des BFS, Stand November 2003
- /BFS 07/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
 Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes
 Salzgitter, Dezember 2007
- /BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:
 Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands, Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.-
 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin/Hannover,
 April 2007
- /CHA 07/ Charlet L. et al:
 "Electron transfer at the mineral/water interface: Selenium reduction by ferrous iron sorbed on clay", in: *Geochim Cosmochim Acta* 71(23), S. 5731-5749 (2007).
- /CHE 99/ Chen F.; Burns P.C.; Ewing R.C.:
 „⁷⁹Se: geochemical and crystallo-chemical retardation mechanisms“, *Journal of Nuclear Materials*, 276, S. 81-94, (1999).
- /DBE 07/ DBEtec:
 Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – Genesis – Anlagenband; *Geologie der Referenzregion im Tonstein*, Peine 2007.

- /DES 08/ Descostes M. et al.:
Diffusion of anionic species in Callovo-Oxfordian argillites and Oxfordian limestones (Meuse/Haute-Marne, France); Applied Geochemistry; 23; 655-677; 2008.
- /FAP 00/ Fischer-Appelt, K.:
Hydrogeologische Modellentwicklung und Simulationsrechnungen zur Untersuchung des Schadstoffaustrages aus einem Eisenerzbergwerk mit schwermetallhaltigem Versatz, GRS-165, 225 S.; 2000 (Doctoral Thesis D82, RWTH Aachen).
- /FAP 08/* Fischer-Appelt, K.; Beuvelot, M.; McStocker, B.:
Repository Evaluation performed by GRS and IRSN through a Modelling Exercise (REGIME), Abschlussbericht Phase II. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS-A-3446, November 2008.
- /GEO 05/ Geofakten, Autor: Reutter, E.:
Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsens; Geofakten 21, NLFB, Hannover 2005:
- /GLA 08/ Glaus, M.A.; Müller, W.; van Loon L.R.:
Diffusion of iodide and iodate through Opalinus Clay: Monitoring of the redox state using an anion chromatographic technique; Applied Geochemistry; 23; 3612-3619; 2008.
- /GOL 06/ Golder:
Entwicklung zuverlässiger Datengrundlagen und Auswertemethoden für die Endlagerstandortsuche - Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben SE 2487 (unveröff. Bericht im Auftrag des BfS), Salzgitter 2006.
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, GRS-A-3358, Januar 2007

- /GRS 10a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Beuth, T.; Bracke, G.
Darstellung der Arbeiten zur Ableitung von Szenarien - Abschlussbericht
Vorhaben VerSi - 3607R02580 „Szenariientwicklung“, Köln, Februar 2010
- /GRS 10b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Larue, P. J.; Kock, I.; Seher, H.; Peiffer, F.
Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes, Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einen Tonsteinstandort, Teil 2: Standortcharakterisierung, Teil 3: Endlagerkonzept im Tonstein, Teil 4: Modellkonzept für ein Endlager im Salz - Abschlussberichte zum Vorhaben 3607R02538 „Planerische Grundsatzfragen“, GRS-A-3535, Köln, Dezember 2010
- /GRS 10c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Fischer-Appelt, K.; Baltus B.
Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen, Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, GRS-A-3536, Köln, Dezember 2010
- /GRS 10d/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: André Rübel, Jörg Mönig
Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz, WS2044, GRS-A-3521, Braunschweig, Oktober 2010
- /HAG 05/ Hagemann S., Moog H.C., Herbert J., Erich A.:
Rückhaltung und Thermodynamische Modellierung von Iod und Selen in hochsalinaren Lösungen; GRS-245; ISBN 978-3-939355-20-5; Braunschweig; 2005.
- /KEL 79/ Keller, R.:
Hydrogeologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Textband im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Harald Boldt Verlag, Boppard 1979, ISBN 37646 17144

- /KEL 09/ Keller, S.:
Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2009, ISBN 978-3-9813373-3-4
- /KLI 91/ Klinge, H.:
Zur Salinität der Tiefenwässer Norddeutschlands.- BGR, Archiv-Nr. 106340, Tagebuch-Nr. 10659/91, Band 1 (Text) 52 S., Band 2 (Anlagen) 81 S.; Hannover, 1991.
- /LAN 98/ Landesoberbergamt NW (1998):
Langzeitsicherheitsnachweis für den Untertageversatz mit Abfällen im Bergwerk Wohlverwahrt-Nammen. Gutachten der Arbeitsgruppe Langzeitsicherheit, 23 S., 10 Anh. mit 19 Abb. u. 8 Tab.; Dortmund.
- /LBE 07/ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie:
Erdgeschichte von Niedersachsen, GeoBerichte 6, Hannover 2007
- /LOY 08/ Loyo, R.L.d.A.; Nikitenko, S.I.; Scheinost, A.C.; Simonoff, M.:
"Immobilization of selenite on Fe₃O₄ and Fe/FeC₃ ultrasmall particles", in: Environmental Science & Technology, 42(7), S. 2451-2456 (2008).
- /LUA 92/ Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA-NW) (1992):
Wasserwirtschaftliche Grundlagen des Regierungsbezirks Detmold, Grundwasserneubildungskarten, Blatt L 3720 Stadthagen.
Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen; Düsseldorf.
- /MIC 92/ Michel, G. (1992):
Versatzbergbau in der Eisenerzgrube Wohlverwahrt-Nammen in Porta Westfalica Stellungnahme des Geologischen Landesamtes Nordrhein-Westfalen zu Auswirkungen des Einbringens von Reststoffen als Versatz in die Grube Wohlverwahrt-Nammen.
19 S., 5 Abb., 3 Tab.; Krefeld.

- /MUE 75/ Müller, E.P.; Papendieck, G.:
Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins.- Z. geol. Wiss., 3 (2), 167-196, Berlin, 1975.
- /NAG 02a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Technischer Bericht 02-02, Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Dezember 2002
- /NAG 02b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Project Opalinus Clay, Safety Report, Technical Report 02-05,
Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), 2002
- /NAG 02c/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Project Opalinus, Technical Report 02-03, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Dezember 2002
- /NAG 02d/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Project Opalinus Clay, Models, Codes and Data For Safety Assessment, Technical Report 02-06,
Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), 2002.
- /NAH 07/ Nahid, K.:
Iodisorption an Organotonen unter aeroben und anaeroben Bedingungen, Masterarbeit, Fachbereich analytische Chemie, Universität Hannover, 2007.
- /OCH 06/ Ochs, M.; Talerico, C.; Sellin, P.; Hedin, A.:
Derivation of consistent sorption and diffusion parameters and their uncertainties for compacted MX-80 bentonite. Physics and Chemistry of the Earth, 31, S. 600-609 (2006).

- /PEI 09/ Peiffer, F.:
Endlagerkonzept im Tonstein, VerSi, GRS – Zwischenbericht im Vorhaben
3607R02538, Köln, Dezember 2009
- /ROH 85/ Rohde, P. (1985):
Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25.000.
Erläuterungen zu Blatt Nr. 3620 Niedernwöhren.-
145 S., 38 Abb., 15 Tab.; Hannover.
- /ROS 09/ Forschungszentrum Dresden – Rossendorf e.V.:
Wie sich radioaktives Selen im Endlager verhält.
<http://www.uni-protokolle.de/nachrichten/id/173195/>
Rossendorf, März 2009
- /ROU 05/ Roussel-Debet, S.; Colle, C.:
Comportement de radionucléides (CS, I, SR, Se, Tec) dans le sol : proposition de valeurs de Kd par défaut; Radioprotection, 40, 2, 203-229, 2005.
- /SCH 08a/ Scheinost, A.C.; Charlet, L.:
"Selenite reduction by mackinawite, magnetite and siderite: XAS characterization of nanosized redox products", in: Environmental Science & Technology, 42, S. 1984-1989 (2008).
- /SCH 08b/ Scheinost, A. C. et al:
"X-ray absorption and photoelectron spectroscopy investigation of selenite reduction by Fe-bearing minerals", in: Journal of Contaminant Hydrology 102, S. 228-245 (2008).
- /STA 01/ Stackebrandt, W.; Ludwig, A.O.; Osiaficzuk, S.:
„Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent area (map 2)“ aus Amtszeitschrift Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Heft 1, Beitr. 8, 1 S. 13-19, Kleinmachnov 2001

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Unterkreide Tonsteinvorkommen (grün) in Norddeutschland /BGR 07/.....	5
Abb. 2.2:	Geologische Übersicht von Niedersachsen und Bremen (aus /LBE 07/)	7
Abb. 2.3:	Abgedeckte geologische Karte (Tertiär und jünger) nördlich von Hannover /KEL 79/.....	8
Abb. 2.4:	Fazies der Unterkreide im Niedersächsischen Becken (aus /LBE 07/)	9
Abb. 2.5:	Tektonische Elemente im Zentralteil des Niedersächsischen Beckens nördlich von Hannover (aus /BAL 01/)	12
Abb. 2.6:	Typische S-N-Profile durch das Niedersächsische Becken (aus /BAL 01/)	13
Abb. 2.7:	Die Schichtenfolge des synthetischen Tonsteinstandortes /BFS 07/	15
Abb. 2.8:	Verbreitung von untersuchungswürdigen Tongesteinsvorkommen, Eisrandlagen der Maximalvorstöße und vereinfachte 0 m-Linie der Quartärbasis (aus /KEL 09/)	21
Abb. 2.9:	Lage, Verlauf und Teufe pleistozäner Rinnenstrukturen. Karte aus /STA 01/	23
Abb. 2.10:	Geologischer Schnitt durch eine Pleistozäne Rinne. Abbildung aus /KEL 79/	25
Abb. 2.11:	Gesamtkonzentration der Schichtwässer des Nordteils der ehemaligen DDR und des Thüringer Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage /MUE 75/ (1-Präperm, 2-Rotliegendes, 3-Staßfurtcarbonat, 4-Platten dolomit, 5-Trias, 6-Rät-Unterkreide (Kreuze), 7-Tertiär)	34
Abb. 2.12:	Teufenabhängige Dichteverteilung als Ergebnis der Salzwasserrechnung nach 3 Millionen Jahren mit dem Programm SPRING	36
Abb. 2.13:	Lage und Umgrenzungen des Regionalmodells	43

Abb. 2.14: SSW-NNE/SW-NE-Schnitt durch das Regionalmodellgebiet	44
Abb. 2.15: Möglichkeiten bei der Diskretisierung von Störungen: a) als Flächenelement, b) als dreidimensionale Störungszone.	46
Abb. 2.16: Anfangsrandbedingung eines linearen Dichtegradienten im 2D-Modell für das Programm SPRING	53
Abb. 2.17: 2D-Modell des SSW-NNE/SW-NE-Schnitts durch das Regionalmodellgebiet (Durchlässigkeitsbeiwertverteilung, Süßwasserdruckverteilung ohne und mit Kohleflöz).....	54
Abb. 2.18: 2D-Modell des SSW-NNE/SW-NE-Schnitts durch das Regionalmodellgebiet (oben, Salzverteilung ohne Kohleflöz nach 10.000 a; unten, Salzverteilung mit Kohleflöz nach 10.000 a).....	54
Abb. 2.19: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Rechenzeitraum 10.000 a, Stromliniendarstellung (oben Süßwasserrechnung ohne Kohleflöz, darunter Süßwasserrechnung mit Kohleflöz aquifer, darunter Salzrechnung ohne, darunter mit Kohleflöz aquifer $k_f=10^{-4}$ m/s).....	55
Abb. 2.20: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, hydraulische Gradienten errechnet aus den Abstandsgeschwindigkeiten (links Süßwasserrechnung ohne Kohleflöz rechts Süßwasserrechnung mit Kohleflöz aquifer).....	56
Abb. 2.21: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Abstandsgeschwindigkeiten in der Wirtsgesteinsformation (links Süß-/Salzwasserrechnung ohne Kohleflöz rechts Süß-/Salzwasserrechnung mit Kohleflöz aquifer zum Zeitpunkt 10.000 a, rot begrenzt Endlagerhorizont).....	57
Abb. 2.22: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Stromliniendarstellung der Salzrechnungen mit Kohleflöz aquifer $\Rightarrow k_f=10^{-4}$ m/s, (Rechenzeitraum von 1.000.000 a, oben, bis 5.000.000 a, unten).....	58
Abb. 2.23: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Konzentration- und Potentialverteilung der Salzrechnungen mit Kohleflöz aquifer $k_f=10^{-4}$ m/s (Rechenzeitraum von 1.000.000 a, oben, bis 5.000.000 a, unten)	59

Abb. 2.24: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen, Abstandsgeschwindigkeiten in der Wirtsgesteinsformation, Druckhöhen (Salzwasserrechnung mit Kohleflöz, links zum Zeitpunkt 1.000.000 a, rechts 2.000.000 a, Vergrößerung des Modellausschnitts des Wirtsgesteins im Bereich des Endlagers (blau))	60
Abb. 3.1: Schema der Lage des ewG im Wirtsgestein	62
Abb. 3.2: Lage des Endlagers am synthetischen Standort (schematisiert nach Abb. 2-7).....	63
Abb. 3-3: Rechenmodell nach einem Ausschnitt im Endlagermodell /DBE 07/	68
Abb. 3.4: Freisetzungverlauf des idealen Tracers, Konzentrationsverlauf in der homogenisierten Endlagerstrecke /BAL 08/	68
Abb. 3.5: Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit und der Diffusionskonstanten D_p im Abstand 70 m vom Behälter /BAL 08/	69
Abb. 3.6: Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand vom Behälter bei einer Diffusionskonstanten D_p von $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ und $n=0,08$ /BAL 08/.....	69
Abb. 3.7: Modellgitter des 2D- Modells für die reine Diffusionsrechnung in SPRING	71
Abb. 3.8: Ergebnis der Diffusionsrechnung: Konzentrationsverteilung eines idealen Tracers (Anion) ($D_p = 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,06$, entspricht einem $D_e = 6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$) zum Zeitpunkt 10^6 Jahre.....	72
Abb. 3.9: Konzentrationsverläufe der Radionuklide Se-79, Cl-36 und I-129 ($D_p = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,07$, $k_d(\text{I-129}) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$) in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand vom Behälter.....	75
Abb. 3.10: Konzentrationsverläufe der Radionuklide Se-79, Cl-36 und I-129 ($D_p = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,07$, $k_d(\text{I-129}) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$) in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand vom Behälter	76

Abb. 3.11: Ergebnisse der 2D-Diffusionsrechnungen (SPRING): Konzentrationsverteilungen der Radionuklide Se-79, Cl-36 und I-129 ($D_p = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $n = 0,07$, $k_d(\text{I-129}) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$) zum Zeitpunkt 10^6 Jahre.	77
Abb. 3.12: Schematische Darstellung von Verschlussystemen in Tonendlager Konzepten der ANDRA (links) /AND 05/ und der NAGRA (rechts) /NAG 02a/	82
Abb. 3.13: Schematische Darstellungen der Konzeptvorschläge der NAGRA für den Streckenverschluss und für die Versiegelung am Schachtfuß, Abmessungen in m (nach /NAG 02a/)	83
Abb. 3.14: Aufbau des Endlagermodells: Vertikalschnitt (oben), Horizontalschnitt unten), aus /FAP 08/.....	86
Abb. 3.15: Aufbau des numerischen Endlagermodells (Gitternetz SPRING) im Vertikalschnitt, rechts: Detailausschnitt des Endlagers im Vertikalschnitt.....	87
Abb. 3.16: Konzentrationsverteilung in der Umgebung eines Endlagers ohne Störung nach 1 Mio. Jahren, links: horizontaler Ausschnitt aus dem Modell, rechts: vertikaler Ausschnitt aus dem Modell (Konzentrationswerte bezogen auf Anfangskonzentration $C_i = 1$).....	88
Abb. 3.17: Konzentrationsverteilung in der Umgebung des Endlagers nach 1 Mio. Jahren (Störung: $k_f = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, parallel der Störung).....	90
Abb. 3.18: Konzentrationsverteilung auf der Schichtgrenze Wirtsgestein / überlagernder GWL (links) bzw. entlang eines Vertikalschnittes (rechts) nach 1 Mio. Jahren (Störung: $k_f = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, parallel) . – Konzentrationswerte bezogen auf Anfangskonzentration $C_i = 1$	91

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Mittlere jährliche Grundwasserneubildungshöhen für das Wesergebirge und sein nördliches Vorland nach verschiedenen Literaturquellen, aus /FAP 00/	27
Tab. 2.2:	Sorptionswerte (Kd-Werte) für Tonsteine und Tonmergelsteine des Hauterive - Barrême – Apt aus /BFS 07/	37
Tab. 2.3:	Hydrogeologische Einheiten des Regionalmodells.....	45
Tab. 2.4:	Parameter der hydrogeologischen Einheiten im Hydrogeologischen Modell.....	50
Tab. 3.1:	Ergebnisse der analytischen Lösung der Diffusionsgleichung /BAL 08/	65
Tab. 3.2:	Daten und Ergebnisse der Diffusionsrechnungen	78

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandort
ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DOE	Department of Energy
EDZ	Excavation Damaged Zone
EWG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
GENESIS	Repository Evaluation performed by GRS and IRSN through a Modelling Exercise
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
HAW	Hochradioaktiver Abfall
IAEA	International Atomic Energy Agency
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
LAW	Leichtradioaktiver Abfall
MAW	Mittelradioaktiver Abfall
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
REGIME	<u>R</u> epository <u>E</u> valuation performed by <u>G</u> RS and <u>I</u> RSN through a <u>M</u> odelling <u>E</u> xercise

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

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

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

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

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

www.grs.de