

TECHNISCHER BERICHT 02-24

**SMA/WLB:
Bohrlochversiegelung/-verfüllung
SB4a/schräg**

Dezember 2002

TECHNISCHER BERICHT 02-24

**SMA/WLB:
Bohrlochversiegelung/-verfüllung
SB4a/schräg**

Dezember 2002

ISSN 1015-2636

"Copyright © 2002 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht erläutert die Grundlagen und Kenntnisse, die im Verlauf des Projekts Bohrlochversiegelung/-verfüllung der Sondierbohrung SB4a/schräg erarbeitet wurden. Die Sondierbohrung wurde 1994/95 als Bestandteil der Erkundungen zum Wellenberg als möglicher Standort für ein Endlager SMA abgeteuft. Da die Bohrung in den unmittelbaren, geplanten Endlagerbereich vorsties, musste sie nach sicherheitstechnischen Kriterien einer minimalen Nuklidfreisetzung versiegelt werden. Dies stellte in der Schweiz eine zum ersten Mal durchgeführte Massnahme dar, welche dem Projekt einen Pilotcharakter verlieh.

Abgesehen von der Quartärstrecke durchfährt die Bohrung SB4a/s ausschliesslich Wirtgesteinsformationen. Diese bestehen aus der Palfris-Formation, den Vitznau-Mergeln und den interhelvetischen Mélanges an der Basis der Drusberg-Decke sowie den Schimberg-Schiefen und Globigerinenmergeln im Dach der Axen-Decke. Aus hydrogeologischer Sicht wird das Wirtgestein als geklüftetes Medium mit extrem gering durchlässiger Matrix betrachtet, wobei die Wasserführung praktisch ausschliesslich an Strukturen der spröden Deformation (Ausbildung von kataklastischen Scherzonen) und an spröde überprägte (reaktivierte) duktile Strukturen gebunden ist.

Prinzipuntersuchungen lagen bereits vor Projektbeginn vor, welche die grundsätzliche Machbarkeit einer Bohrlochversiegelung aufgezeigt hatten. Die Unterbindung der potentiellen Wegsamkeit entlang der Bohrung und zwischen einer eventuellen Endlagerzone und der Biosphäre war als prinzipiell möglich eingestuft worden. Die entsprechende Ausführung der Anordnung und Zusammensetzung der Versiegelung hatte jedoch die standortspezifischen Verhältnisse des Wirtgesteins und die in-situ angetroffenen Bohrlochbedingungen zu berücksichtigen.

Für die Sondierbohrung SB4a/schräg wurde ein auf einem Mehrkomponentensystem basierendes Versiegelungskonzept umgesetzt, das die Abdichtwirkung durch die serielle Anordnung von Materialien mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften erzeugt. Als Verfüllmaterialien gelten Tiefbohr- und Quellzemente. Zu den Versiegelungsmaterialien zählen Schwerspat (Baryt) und hochverdichtete Ton-Pellets. Die Materialeigenschaften wurden in umfangreichen experimentellen Untersuchungen im Labor getestet.

Auf der Basis des Versiegelungskonzepts wurde ein Versiegelungsprogramm entwickelt, welches die vorgefundenen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten berücksichtigte. Dementsprechend konnte die Versiegelung des Bohrlochs programmgemäss und ohne grössere Schwierigkeiten in zweiwöchiger Geländearbeit ausgeführt werden.

Sicherheitsanalytische Betrachtungen führten zur Identifizierung der massgeblichen Parameter, welche die Barrierenwirkung bezüglich der Nuklidflüsse beeinflussen: Wasserflussrate durch das Bohrlochsystem; Länge des versiegelten/verfüllten Bohrlochabschnitts; Halbwertszeit und Sorptionseigenschaften des betrachteten Nuklids. Langlebige oder nicht sorbierende Nuklide werden im versiegelten Bohrloch nicht oder kaum zurückgehalten. Die Auswirkungen sind jedoch vergleichbar mit Fließpfaden entlang kataklastischer Zonen. Aufgrund der effizienten Rückhaltung im Nahfeld und der geringen Freisetzung dieser Nuklide liegen die entsprechenden Strahlendosen jedoch unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a. Nach umfassenden Modellierungsstudien mit variablen Annahmen zu den Materialeigenschaften und unter Berücksichti-

gung von Kurz- und Langzeitsicherheit, wurde die Barrierenwirkung des versiegelten/verfüllten Bohrlochsystems SB4a/schräg als genügend beurteilt. Somit stellt die verfüllte Bohrung SB4a/schräg ein in seiner Barrierenwirkung für die Nuklide dem Wirtsgestein gleichzustellendes Element dar.

Unter Einsatz einer sorgfältigen Planung, Ausführung und Qualitätssicherung war es möglich, die Verfüllung und Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg so zu realisieren, dass die sicherheitstechnischen Vorgaben hinsichtlich der Nuklidfreisetzung erfüllt werden.

ABSTRACT

This report reviews the information base and understanding gained in the course of the borehole sealing / filling of the reconnaissance borehole SB4a/slanted (SB4a/schräg). This slanted reconnaissance borehole was drilled in 1994/95 as part of the investigations at Wellenberg in view of a potential repository site for low and intermediate level radioactive waste. Because this particular borehole penetrated the immediate vicinity of the rock body considered to house the repository it was necessary to seal the borehole according to safety technical criteria stipulating a minimum release of radionuclides. The project had pilot-study character as it was for the very first time that measures like these were implemented in Switzerland.

The host rock penetrated by the reconnaissance borehole SB4a/schräg encompasses formations at the bottom of the Drusberg-Decke and the top of the Axen-Decke: Palfris Formation, Vitznau Marls, Interhelvetic Mélange and the Tertiary schists of the Globigerina Marl and the Schimberg Shales. From a hydrogeological point of view, the host rock is considered a fractured medium with an extremely low permeability matrix. For practical purposes the formation water is conducted exclusively by the structural features resulting from brittle deformation (such as cataclastic fault zones) and those ductile features which have been re-activated in a brittle manner.

The feasibility of borehole sealing had been proven in principle investigations previous to the project's commencement. The prevention of potential flow paths along the borehole, and between the potential repository and the biosphere was deemed possible in principle. However, the selection and sequential placement of the sealing materials was to be adapted to the site-specific host-rock conditions and the in-situ conditions prevailing in the borehole.

The sealing concept for the reconnaissance borehole SB4a/schräg was based on a multiple component system whereby the sealing effect was achieved by the sequential placement of materials with different chemical and physical properties. Cements used in deep boreholes and swelling cements are considered filling materials. Sealing materials are barite and clay pellets. The materials' properties were tested extensively in preliminary laboratory experiments.

The sealing concept was developed into a sealing programme which took into account the geological and hydrogeological conditions revealed at the site. As a result, it was possible to seal the reconnaissance borehole SB4a/schräg as planned and without notable complications in a two-week field campaign.

An examination of safety considerations resulted in the identification of relevant parameters which affect the performance of the barrier with respect to nuclide migration: formation water flux across the borehole system; length of the sealed/filled borehole section; half life and sorption properties of the nuclide concerned. Long-lived or non-sorbing nuclides are barely or not at all held back in the sealed borehole. The impact of the borehole is comparable to flowpaths along cataclastic zones. It is due to the high retaining capacity of the nearfield and the low release of these nuclides that the corresponding radiation exposure however remains below the protection target of 0.1 mSv/a. Given the results of extensive modelling studies with variable assumptions concerning the material properties and with consideration of the short and long-term safety, the performance of the sealed/filled borehole system SB4a/schräg was concluded to be adequate. Accordingly, the sealed borehole SB4a/schräg may be

regarded as an element which equals the host rock in its performance as a nuclide barrier.

Meticulous planning, implementation and quality assurance made it possible for the sealing and filling of borehole SB4a/schräg to be realised in a manner which allowed to meet the safety relevant requirements concerning the release of radionuclides.

RESUMÉ

Ce rapport présente les connaissances acquises au cours du projet « remblai et scellement du forage SB4a/schräg ». Ce dernier, effectué en 1994/95, fait partie des forages de reconnaissance du Wellenberg, site potentiel de stockage de déchets radioactifs à faible et moyenne activité. Dû au fait que le forage traversait la proximité immédiate de la zone de stockage, son remblai devait être effectué conformément aux critères de sûreté relatifs au transfert de nucléides. Ceci constituait en Suisse une mesure pionnière et conférait donc au projet un caractère pilote.

Si l'on exclut sa partie Quaternaire, le forage SB4a/s ne traverse que des formations hôte: la formation de Palfris, les marnes de Vitznau, le Mélange interhelvétique au mur de la nappe du Drusberg ainsi que les marnes à Globigérines et les schistes de Schimberg au toit de la nappe de l'Axe. Du point de vue hydrogéologique, la formation hôte peut être considérée comme un milieu fracturé à matrice extrêmement peu perméable, les éléments perméables (discontinuités) n'étant presque qu'exclusivement formés que par déformation cassante (zones de cisaillement cataclastiques) ou par des discontinuités ductiles réactivées par phase postérieure de déformation cassante.

Des études qui ont précédées le projet, ont montré la faisabilité de principe du scellement du forage. Le scellement formant barrière à des cheminements préférentiels le long du forage entre une zone de stockage potentielle et la biosphère était considéré en principe comme réalisable. L'agencement des éléments du scellement devait cependant être effectuée en prenant en compte les caractéristiques spécifiques de la roche hôte et des conditions particulières au forage.

Un scellement à plusieurs composants a été conçu pour le forage SB4a/schräg. Il repose sur l'emploi de divers matériaux aux propriétés physico-chimiques distinctes. Pour les matériaux de remblai, le choix a porté sur des ciments de forages profonds et des ciments gonflants. Comme matériaux de scellement, de la barythe et des granulats de bentonite surcompactée ont été retenus. Les propriétés des matériaux ont été testées en laboratoire dans un grand nombre d'essais spécifiques.

Un programme de réalisation du scellement a été mis sur pied suite aux travaux de conception. Il a pris en compte les conditions géologiques et hydrogéologiques. Ainsi, le scellement du forage a pu être mis en œuvre sur le terrain en une durée de deux semaines, en conformité au programme et sans difficulté majeure.

Les considérations d'analyse de sûreté ont permis d'identifier les paramètres les plus importants qui influencent l'efficacité de la barrière en termes de flux de radionucléides: Débit à travers le système « forage rebouché»; Longueur des segments remblayés et des scellements; Période de demi-vie et propriétés de sorption des radionucléides considérés. Les radionucléides à vie longue ou ceux qui ne sont pas retenus par sorption ne sont pas ou peu retenus dans la barrière. L'impact est cependant semblable à celui de cheminements dans des zones cataclastiques. De par leur rétention efficace au champs proche et leur faible transfert, les doses de rayonnement des radionucléides précités sont cependant inférieures à la valeur limite de 0.1 mSv/a. Des modélisations approfondies effectuées sous différentes hypothèses sur propriétés des matériaux et en prenant en compte la sûreté à court et long terme, ont permis de démontrer que l'effet de barrière du système remblai/scellement du forage SB4a/schräg était suffisant. Ainsi, le forage rebouché se comporte, quant à sa capacité de barrière pour les radionucléides, de la même façon que la roche hôte. Grâce à une planification, une

réalisation et une assurance qualité soignées, il a été possible de réaliser avec succès le remblai et le scellement du forage SB4a/schräg dans le respect des prescriptions de sûreté quant au transfert des radionucléides.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	I
ABSTRACT	III
RESUMÉ	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Figurenverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis	XI
1 EINLEITUNG	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Zielsetzung des Berichtes.....	1
1.3 Aufbau des Berichtes.....	2
2 WELLENBERG – STANDORTSPEZIFISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1 Geologie	3
2.2 Hydrogeologie	7
2.3 Sondierbohrung SB4a/schräg.....	8
2.3.1 Situation	8
2.3.2 Bohrung SB4a/schräg.....	9
2.3.3 Hydrogeologie und Potentialverhältnisse	10
3 GRUNDLAGEN DER VERSIEGELUNGSTECHNIK	13
3.1 Einleitung.....	13
3.2 Versiegelungskriterien und Anforderungen an Versiegelungsmaterialien	13
3.3 Prinzip des Mehrkomponentensystems	14
3.3.1 Anforderungen an Schlüsselzonen	17
3.3.2 Anforderungen an Zwischenzonen	17
3.4 Internationale Erfahrungen	18
3.5 Richtlinien und gesetzliche Grundlagen – Beispiele.....	19
3.5.1 Allgemeine Bestimmungen	19
3.5.2 Richtlinien zu besonderen Verfüllungsstrecken.....	21
3.5.3 Beispiele zum Einsatz von Verfüllmaterialien in besonderen Verfüllungsstrecken	21

4	KOMPONENTEN, MATERIALIEN UND EIGENSCHAFTEN DER VERSIEGELUNG VON SB4a/schräg	23
4.1	Einleitung.....	23
4.2	Beschreibung der einzelnen Verfüll- und Versiegelungsmaterialien.....	24
4.2.1	Verfüllmaterialien (in der Regel: Zemente).....	24
4.2.2	Versiegelungsmaterialien.....	25
4.3	Untersuchungen der für Zwischen- und Schlüsselzonen relevanten Eigenschaften.....	27
4.3.1	Quellzemente	27
4.3.1.1	Untersuchungsprogramm	27
4.3.1.2	Auswahl von Quellzementrezepturen	27
4.3.1.3	Verpumpbarkeit	28
4.3.1.4	Quell-/Expandierfähigkeit.....	30
4.3.1.5	Festigkeit.....	32
4.3.1.6	Durchlässigkeit	34
4.3.2	Versiegelungsmaterialien.....	36
4.3.2.1	Sedimentationsverhalten und abgeleitete Durchlässigkeit	36
4.3.2.2	Sedimentationsverhalten und Durchlässigkeit des Schwerspats.....	40
4.3.2.3	Durchlässigkeit und mechanisches Verhalten des Quellons HD	47
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialuntersuchungen	49
5	VERSIEGELUNGSPROGRAMM.....	51
5.1	Einleitung.....	51
5.2	Versiegelungsprogramm.....	51
5.2.1	Systemdurchlässigkeit und Barrierenwirkung	52
5.2.2	Einbringtechnik	53
5.2.3	Ausführungskonzept.....	54
5.2.4	Flexibilität des Versiegelungsprogramms beim möglichen Antreffen von auslegungsbestimmenden Störungszonen (ASZ)	55
6	SICHERHEITSTECHNISCHE BEURTEILUNG	56
6.1	Einleitung.....	56
6.2	Modellierung des Nuklidtransports.....	56
6.2.1	Zielsetzung und benutztes Rechenmodell	56
6.2.2	Konzeptuelles Modell.....	57
6.2.3	Transportmodellfälle	57

6.2.4	Eingangsparameter und Beispiele	61
6.2.5	Vorgehensweise und ausgewählte Beispiele	62
6.2.6	Barriereeffizienz der versiegelten und verfüllten Bohrlochabschnitte: Resultate der Modellrechnungen	67
6.2.7	Schlussfolgerungen	68
6.3	Langzeitstabilität des zu betrachtenden Systems	69
6.3.1	Stabilität der Materialien (ohne Interaktion).....	69
6.3.2	Interaktion zwischen den Materialien	70
7	AUSFÜHRUNG DER VERSIEGELUNG DER BOHRUNG SB4A/SCHRÄG	71
7.1	Versiegelungsstrecken und eingebrachte Materialien	71
7.2	Chronologie der Verfüllungs- und Versiegelungsarbeiten	73
7.3	Einbaubericht.....	73
7.4	Qualitätssicherung bei der Ausführung der Versiegelungsarbeiten	74
7.4.1	Qualitätskontrolle	74
7.4.2	Qualitätsüberwachung	74
8	SICHERHEITSTECHNISCHE NACHWEISE FÜR DAS VERSIEGELUNGSSYSTEM SB4a/schräg	75
8.1	Datenbasis und Annahmen.....	75
8.1.1	Versiegelungs- und Verfülllängen	75
8.1.2	Materialdurchlässigkeiten	75
8.1.3	Hydraulische Gradienten	77
8.1.4	Auflockerungszone	77
8.2	Ermittlung der Wasserflüsse	78
8.3	Radionuklidmigration	79
9	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	81
10	LITERATUR	84
	ANHANG A.....	A-1

FIGURENVERZEICHNIS

Figur 2-1: Geographische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Wellenberg	3
Figur 2-2: Tektonische Übersicht	4
Figur 2-3: Stratigraphische Profile der Drusberg-Decke und der Axen-Decke	5
Figur 2-4: Geologischer Profilschnitt (NW-SE)	6
Figur 2-5: Situationsplan der Bohrung SB4a	8
Figur 2-6: Schematische Darstellung der Bohrung SB4a/schräg	9
Figur 2-7: Längsschnitt des ausgebauten Bohrlochs SB4a/schräg	10
Figur 2-8: Übersichtsprofil der Bohrung SB4a/schräg	12
Figur 3-1: Komponenten einer Versiegelung im Querschnitt (nach BRENNER & JEDELHAUSER 1989)	15
Figur 3-2: Schematische Darstellung eines Mehrkomponentensystems zur Bohrlochversiegelung	16
Figur 4-1: Permeameter	35
Figur 4-2: Zerlegung der Kompaktionskraft in ihre axiale und radiale Komponenten	38
Figur 4-3: Einfüll- und Sedimentbetthöhe im Sedimentationsrohr	39
Figur 4-4: Untersuchungen an Schwerspatsuspensionen (Baryt); Einfluss der Parameter: Dichte der Suspension und Neigung sowie Einfüllhöhe des Sedimentationsrohres auf den zeitlichen Sedimentationsverlauf	41
Figur 4-5: Summenkurven der Korngrößenverteilung des Schwerspats	42
Figur 4-6: Sedimentations-/Permeameteranlage	43
Figur 4-7: Kumulatives Filtratvolumen durch das Sedimentbett aus Schwerspat in Abhängigkeit von der Zeit	44
Figur 4-8: Kompaktionseinrichtung zur Herstellung von Tabletten aus Suspensionen und zur Messung ihrer Durchlässigkeit	46
Figur 4-9: Abhängigkeit der Permeabilität des Sedimentbettes aus Schwerspat vom Kompaktionsdruck P_K ; H' : Einfüllhöhe im Bohrloch, H : Sedimentbettmächtigkeit	47
Figur 5-1: Mehrkomponentenversiegelung für die Bohrung SB4a/schräg mit Teufenangaben gemäss realisierter Versiegelung	52
Figur 6-1a: Schematische Flusslinien (fett gestrichelt) im Bereich des versiegelten Bohrlochabschnitts für die Fälle 1, 2a und 2b; diese Seitenansicht zeigt nur die obere Hälfte des Bohrlochlängsschnitts	58
Figur 6-1b: Schematische Flusslinien (fett gestrichelt) im Bereich des verfüllten Bohrlochabschnitts für die Fälle 3a, 3b und 3c; diese Seitenansicht zeigt nur die obere Hälfte des Bohrlochlängsschnitts	59

Figur 6-2: Barriereneffizienz des versiegelten Bohrlochabschnitts für ^{137}Cs als Funktion der Fliesspfadlänge (Fall 1); der Referenzwert der Wasserflussrate beträgt $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$	63
Figur 6-3: Vergleich der Barriereneffizienzen des versiegelten Bohrlochabschnitts für die Nuklide ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{63}Ni , ^{14}C , ^{241}Am und ^{237}Np und für eine Fliesspfadlänge von $L = 10 \text{ m}$ (Fall 1); der Referenzwert der Wasserflussrate beträgt $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$	65
Figur 6-4: Vergleich der Barriereneffizienzen für die Fälle 1, 2a, 2b	66

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2-1: SB4a/schräg: Durchfahrene geologische Einheiten (NAGRA 1997)	11
Tab. 4-1: Mineralogische Zusammensetzung von Bentonit-Magnetit-Pellets	26
Tab. 4-2: Ergebnisse der Voruntersuchungen an konventionellen Zementschlämmen (A und B) sowie CaO-Quellzementschlämmen (C – F)	28
Tab. 4-3: Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen der Zementrezepturen A, E und F	29
Tab. 4-4: Ausdehnungsverhalten untersuchter Zementschlämme unter atmosphärischem Druck und Raumtemperatur	31
Tab. 4-5: Ausdehnungsverhalten (bei 10 MPa, Raumtemperatur) und Restquellpotential (bei 10 MPa, 90° C) der untersuchten Zementrezepturen	31
Tab. 4-6: Druckfestigkeit der untersuchten Zementrezepturen	33
Tab. 4-7: Haftscherfestigkeiten untersuchter Zementrezepturen	34
Tab. 4-8: Systempermeabilitäten der untersuchten Zementrezepturen	35
Tab. 4-9: Rheologische Eigenschaften untersuchter Schwerspatsuspensionen	40
Tab. 4-10: Permeabilität/hydraulische Durchlässigkeit der aus Schwerspatsuspensionen entstandenen Sedimentbette	45
Tab. 7-1: Realisierte Verfüllung und Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg	71
Tab. 7-2: Chronologie der Verfüllungs- und Versiegelungsarbeiten	73
Tab. 8-1: Streckenlängen der Versiegelungszonen	75
Tab. 8-2: Materialdurchlässigkeiten für den Nachweis der Systemdurchlässigkeit	76
Tab. 8-3: Berechnung der Wasserflüsse für eine Versiegelung über die Strecke zwischen Endlagerniveau und Oberfläche, eine Versiegelung über die gesamte Bohrung sowie für die Auflockerungszone	79

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

Nach der Evaluation des Wellenbergs als möglicher Standort für ein Endlager SMA im Jahre 1986 wurde ein Untersuchungsprogramm begonnen, das zunächst von der Oberfläche aus die hydro- und strukturgeologische Exploration des Gebietes im Hinblick auf die Langzeitsicherheit und die technische Machbarkeit eines zukünftigen Endlagers zum Ziel hatte. Diese in zwei Etappen konzipierte Erkundungsphase fand mit der Vorlage des Ergebnisberichtes *Geosynthese Wellenberg 1996* (NAGRA 1997) ihren vorläufigen Abschluss.

Das realisierte Untersuchungsprogramm umfasste neben zahlreichen geowissenschaftlichen Studien und Messkampagnen insgesamt sieben Sondierbohrungen, die mit Ausnahme von SB4a/schräg ausserhalb der potentiellen Lagerzone abgeteuft wurden. Die in den Bohrungen durchgeführten geologischen, hydrogeologischen, hydrochemischen und geophysikalischen Untersuchungen ermöglichten, den geologischen Aufbau des Standortgebiets abzuklären und den für das Endlager repräsentativen Bereich des Wirtgesteins zu charakterisieren.

Im Rahmen der zweiten Etappe dieser Erkundungsphase wurde 1994/95 auch die Sondierbohrung SB4a/schräg abgeteuft. Diese Bohrung diente vorrangig der Erkundung und Charakterisierung eventuell vorhandener steilstehender Störungen im Wirtgestein und stiess erstmals in den unmittelbaren Endlagerbereich vor. Aufgrund ihrer Lage und ihres Verlaufs kommt der Bohrung als potentielle Wegsamkeit für einen möglichen Schadstofftransport in die Biosphäre eine wesentliche Bedeutung zu. Es musste deshalb erstmals eine Bohrung der Nagra nach Kriterien einer minimalen Nuklidfreisetzung versiegelt werden. Diese Massnahme erwächst aus der Forderung (die sich wiederum aus dem Konzept der Sicherheitsbarrieren ableiten lässt), mit den Sondierungen die Schutzwirkung der natürlichen Barriere – der Geosphäre – nicht wesentlich zu beeinträchtigen.

Es wurde gefordert, vor Erstellung der Bohrung ein Konzept zu ihrer Verfüllung/Versiegelung zu erarbeiten. Dieses Konzept hat einerseits die zeitlichen Aspekte einer langjährigen Bau- und Betriebsphase des Endlagers und eines Einschlusszeitraums der Abfälle über mehrere tausend Jahre, andererseits die geologisch/technischen Randbedingungen der Bohrung sowie die technische Machbarkeit der Verfüllungs-/Versiegelungsmethodik zu berücksichtigen.

Aufbauend auf umfangreiche Vorstudien und materialtechnische Untersuchungen wurde schliesslich ein spezielles, auf die Bohrung SB4a/schräg ausgerichtetes Versiegelungskonzept ausgearbeitet. Das Versiegelungsprogramm wurde im November 1995 erfolgreich umgesetzt.

1.2 Zielsetzung des Berichtes

Die Versiegelung der Sondierbohrung SB4a/schräg war das erste Projekt dieser Art in der Schweiz, das von der Aufsichtsbehörde genehmigt wurde. Ziel des vorliegenden Berichtes ist es, die im Verlauf des Projektes erarbeiteten Grundlagen und Kenntnisse zusammenfassend zu dokumentieren, sowie die Erfahrungen und Abläufe nachvollziehbar darzustellen. Dieser Bericht hebt den Pilotcharakter des Projektes hervor und

kann somit als Referenz für kommende, ähnlich gestellte Aufgaben dienen. Die zahlreichen Teilberichte, Aktennotizen und Briefwechsel wurden im vorliegenden Abschlussbericht zusammengeführt. Die wichtigsten dieser Teilberichte sind nachfolgend aufgeführt:

- Bohrlochversiegelung: Konzept und Machbarkeitsnachweis (BRENNER & JEDELHAUSER 1989),
- ITE TU Clausthal, Studie mit Konzeptvorschlag zur Verfüllung/Versiegelung von SB4a/schräg (GHOFrani et al. 1994),
- Abschätzung der Barrierenwirkung der Versiegelung und Verfüllung für die Sondierbohrung SB4a/schräg (GRIBI 1996),
- Versiegelung der Sondierbohrung SB4a/schräg, Einbaubericht (MACEK & KARSCH 1996),
- Versiegelungsprogramm der Bohrung SB4a/schräg z.H. der HSK.

1.3 Aufbau des Berichtes

Der vorliegende Bericht ist der Abschlussbericht sämtlicher Tätigkeiten, die in Bezug auf die Versiegelung der Sondierbohrung SB4a/schräg durchgeführt wurden. Er beinhaltet die Standortbeschreibung und alle Ergebnisse der relevanten experimentellen Untersuchungen, die Beschreibung des resultierenden Versiegelungskonzeptes, dessen Realisierung am Standort sowie den Nachweis der Systemeigenschaften in Bezug auf die hydraulische Durchlässigkeit und die Transporteigenschaften.

Zunächst gibt Kapitel 2 einen Überblick über die geologische Situation am Standort Wellenberg. Die hydrogeologischen und hydraulischen Bedingungen werden diskutiert, soweit sie für die behandelte Fragestellung relevant sind.

Kapitel 3 befasst sich mit allgemeinen Grundlagen der Versiegelungstechnik. Neben grundlegenden Anforderungen werden gesetzliche Grundlagen und internationale Richtlinien erläutert.

Kapitel 4 beschreibt die Ergebnisse der umfangreichen experimentellen materialtechnischen Voruntersuchungen, die speziell in Hinblick auf ein Versiegelungskonzept für die Sondierbohrung SB4a/schräg durchgeführt wurden.

In Kapitel 5 wird das ausgearbeitete Versiegelungsprogramm vorgestellt.

In Kapitel 6 erfolgt die sicherheitstechnische Beurteilung der Barrierenwirkung der Versiegelungsmaßnahme.

Die Ausführung der Versiegelung an der Sondierbohrung SB4a/schräg wird in Kapitel 7 dargestellt. Insbesondere der Einbaubericht dokumentiert den technischen Ablauf der Versiegelungsarbeiten, welche unter besonders hohen Ansprüchen an eine effiziente Qualitätssicherung ausgeführt wurden.

Abschliessend wird in Kapitel 8 der sicherheitstechnische Nachweis der Versiegelung der Sondierbohrung SB4a/schräg erbracht.

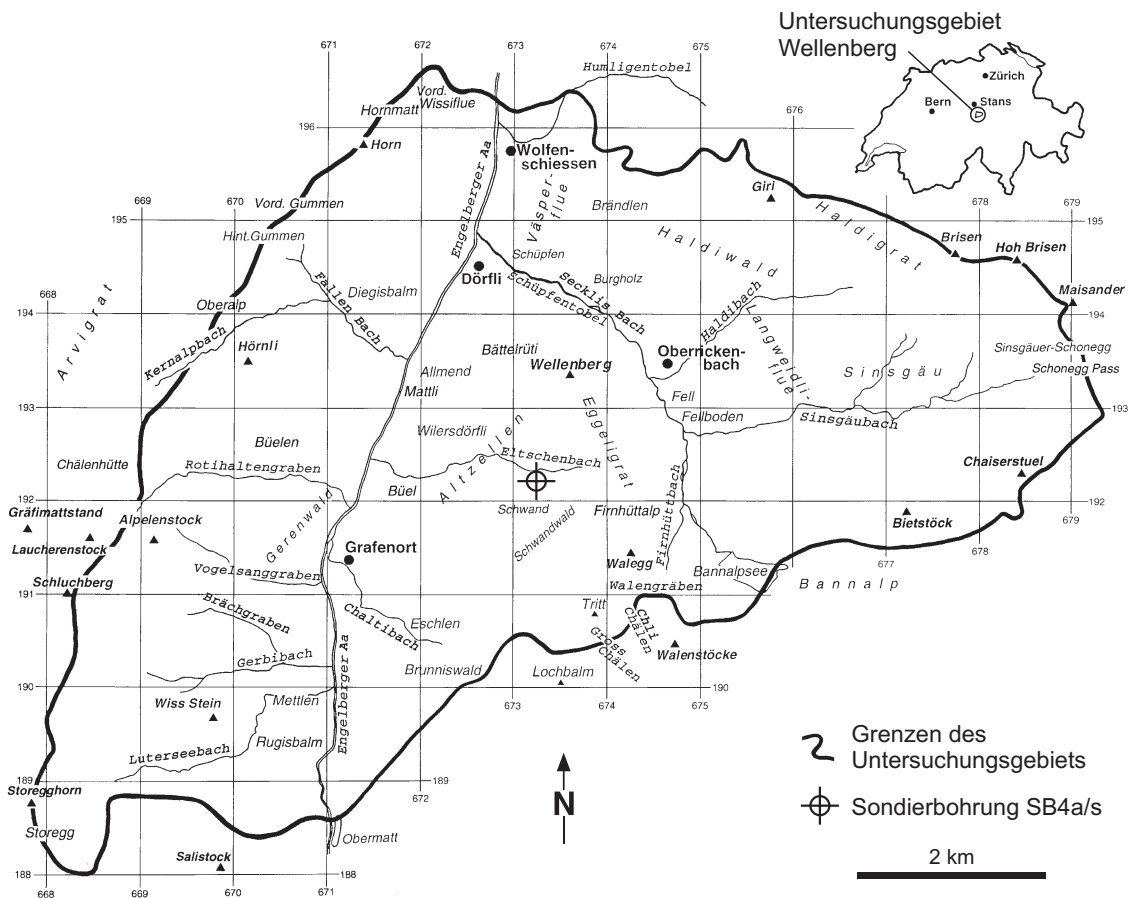
Kapitel 9 enthält die Zusammenfassung sowie die Schlussfolgerungen.

2 WELLENBERG – STANDORTSPEZIFISCHE GRUNDLAGEN

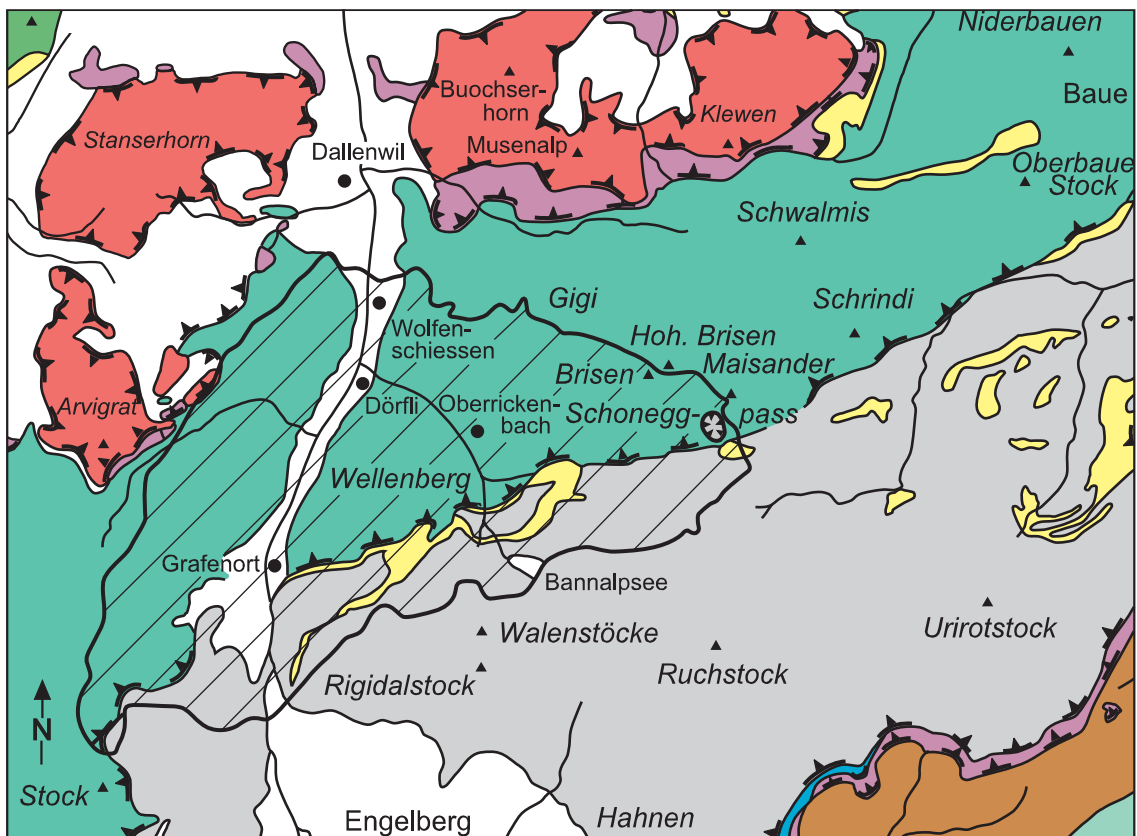
Das vorliegende Kapitel soll einen Überblick geben über die geographische und geologische Situation in der Region des Gebietes Wellenberg. Soweit für die Versiegelung der Sondierbohrung SB4a/schräg relevant, werden die während der Exploration in den Jahren 1986 bis 1995 gewonnen Kenntnisse in Bezug auf die Geologie und Hydrogeologie kurz zusammengefasst. Für ein vertieftes Studium sei auf den Geosynthesebericht Wellenberg (NAGRA 1997) verwiesen.

2.1 Geologie












Das Untersuchungsgebiet Wellenberg liegt auf der Ostseite des Engelbergertals, eines der drei grossen Quertäler des zentralschweizerischen Alpenraums, zwischen Wolfenschiessen, Grafenort und Oberrickenbach (Figur 2-1). Seine Grenzen ergeben sich weitgehend aus der topographischen Situation als Folge der geologischen Grosstrukturen (Figur 2-2). Das Standortgebiet liegt grösstenteils innerhalb der Drusberg-Decke und reicht lediglich in seinem Südrand in den nördlichsten Abschnitt der unmittelbar südlich anschliessenden Axen-Decke.



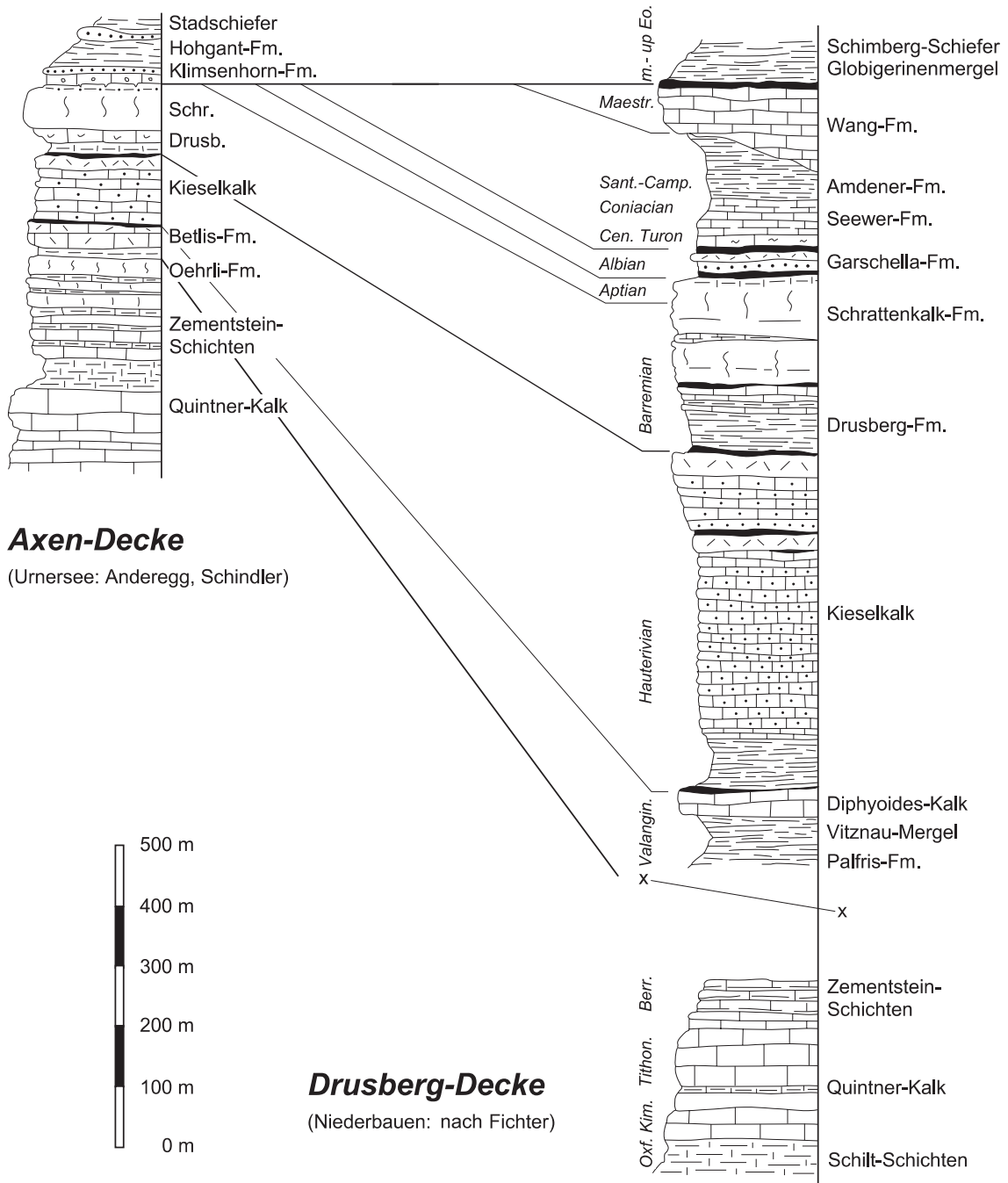
Figur 2-1: Geographische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Wellenberg



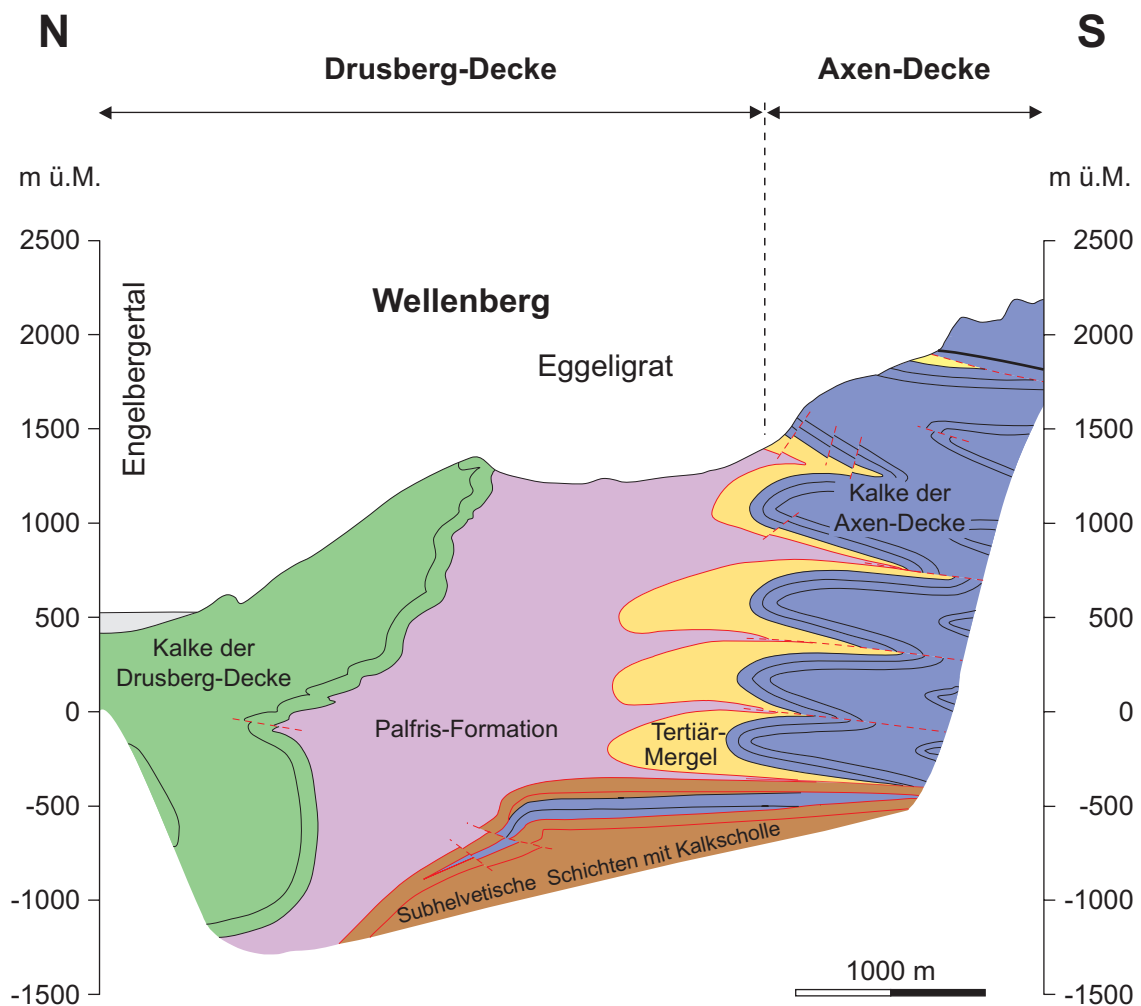
LEGENDE

- | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|  | "Subalpiner Flysch" (Oberkreide-Eozän)
Mélange, Komplexe Klippenunterlage |  | Subhelvetische Elemente
(Gitschen-/Wissberg-Scholle) |
|  | Klippen-Decke |  | Nordhelvetischer Flysch
(Altdorfer-Sandstein) |
|  | Eozän der helvetischen Decken |  | Autochthone Sedimenthülle
des Aar-Massivs |
|  | Helvetische Randkette |  | Hauptüberschiebung |
|  | Drusberg-Decke |  | Untersuchungsgebiet Wellenberg |
|  | Axen-Decke | | |

Figur 2-2: Tektonische Übersicht



Figur 2-3: Stratigraphische Profile der Drusberg-Decke und der Axen-Decke



Figur 2-4: Geologischer Profilschnitt (NW-SE)

Die stratigraphischen Profile in Figur 2-3 vermitteln eine Übersicht über die Schichtreihen der Axen- und der Drusberg-Decke. Figur 2-4 zeigt schematisch den tektonischen Baustil des Standortgebietes.

Zu den Wirtgesteinen am Wellenberg zählen die Palfris-Formation und die Vitznau-Mergel an der Basis der Drusbergdecke sowie die tertiären Schimberg-Schiefer und Globigerinenmergel im obersten Teil der Axendecke. Ebenfalls zum Wirtgestein gehören die interhelvetischen Mélanges, d.h. tektonischen Einschuppungen innerhalb der oben erwähnten Formationen.

Begrenzt wird das Wirtgestein im Norden durch die Kalke der Drusberg-Decke und im Süden durch die Kalke und Sandsteine der Axen-Decke. Seine Basis, die infrahelvetische Mélanges bzw. die Oberfläche des tektonischen Äquivalents der Wissberg-Scholle, liegt etwa 800 m unter der geplanten Lagerebene (ca. 540 m ü.M.). Der Wirtgesteinskörper hat, gemäss der realistischen Interpretationsvariante, auf Endlager-niveau eine N-S-Ausdehnung von über 1700 m, die E-W-Ausdehnung wird durch die

Topographie bestimmt. Die Palfris-Formation nimmt bezogen auf das Gesamtvolumen des Wirtgesteins den weitaus grössten Anteil ein. Die Untersuchungen zeigen, dass sich die verschiedenen, zum Wirtgestein gehörenden geologischen Formationen bezüglich der mineralogischen Zusammensetzung und der hydrogeologischen Eigenschaften nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

Grossräumige Störungszonen oder Fremdgesteinseinschlüsse, die aufgrund ihrer hydraulischen Eigenschaften ($T > 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ bzw. $K > 10^{-9} \text{ m/s}$) und ihrer Ausdehnung eine bevorzugte Verbindung zur Biosphäre oder zu einer höher durchlässigen Nebengesteinseinheit schaffen könnten, wurden bei den bisherigen Untersuchungen keine angetroffen. Dies kann bedeuten, dass solche Inhomogenitäten im Endlagergebiet nicht vorkommen oder aber, dass die meist vertikal abgeteuften Sondierbohrungen entsprechende Störungen und Fremdgesteinseinschlüsse nicht aufgeschlossen haben.

Sämtliche aus dem Untersuchungsprogramm gewonnenen geologischen Erkenntnisse resultieren im geologischen Standortmodell, das aus heutiger Sicht die bevorzugte Hypothese in Bezug auf die Geometrie des Wirtgesteins und den angrenzenden Formationen (Nebengesteinen) darstellt. Benötigt wurde das Standortmodell vor allem als Basis der hydrodynamischen Modellierung, mit deren Hilfe die grossräumigen Grundwasserzirkulationsverhältnisse untersucht wurden.

2.2 Hydrogeologie

Alle bisherigen Beobachtungen haben gezeigt, dass das Wirtgestein als geklüftetes Medium mit extrem gering durchlässiger Matrix zu betrachten ist. Die Wasserführung ist praktisch ausschliesslich an Strukturen der spröden Deformation und an spröd überprägte (reaktivierte) duktile Strukturen gebunden. Rein duktile Strukturen zeigen keine bevorzugte Wasserwegsamkeit. Die hydraulischen Durchlässigkeiten zeigen dagegen eine ausgeprägte Tiefenabhängigkeit mit gemittelten Werten von ca. 10^{-8} m/s im oberen Teil des Wirtgesteins und ca. 10^{-11} m/s im Zentrum des Wirtgesteins auf Endlager-niveau (NAGRA 1997, JAQUET et al. 1997).

Die beobachteten hydraulischen Potentiale im Wirtgestein reichen von hydrostatischen bzw. artesischen Werten im oberen Teil bis zu sehr tiefen Werten unmittelbar unter der Kote des Engelbergertales. Diese tiefen Potentiale liegen deutlich unter dem lokalen bzw. regionalen Vorfluter und erreichen in den Bohrungen SB1 und SB2 fast Meeresniveau. Der ähnliche Verlauf der Potentialprofile in den Bohrungen lässt auf eine zusammenhängende Unterdruckzone (UDZ) im zentralen Bereich des Wirtgesteins schliessen.

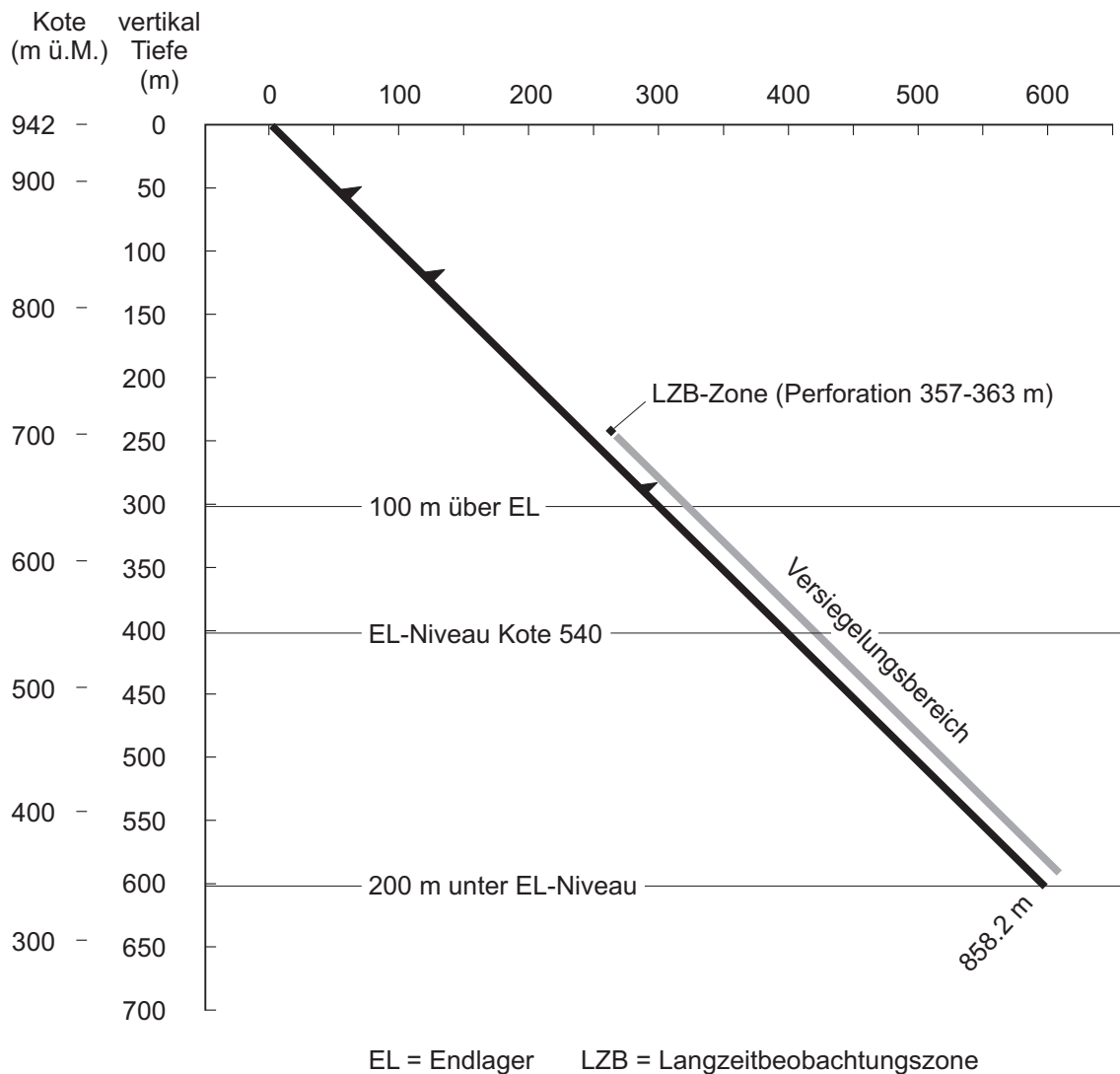
2.3 Sondierbohrung SB4a/schräg

2.3.1 Situation

Bei der Bohrung SB4a wurden vom gleichen Bohrplatz (Figur 2-5 und 2-6) zwei separate Äste abgeteuft, ein vertikaler (SB4a/v) und ein mit 45° nach ENE geneigter Ast (SB4a/schräg). Mit dieser Anordnung sollten erstmals Daten direkt aus der erweiterten Endlagerzone erhoben werden. Eines der vorrangigen Ziele war dabei, die Existenz steilstehender, auslegungsbestimmender Störungszonen (ASZ) abzuklären. Die hydrogeologischen Untersuchungen umfassten Fluid Logging und Doppelpackertests. In vier Bohrlochabschnitten mit höheren Transmissivitäten im oberen Teil der Bohrung konnten Wasserproben entnommen werden. Die Arbeiten an SB4a/schräg wurden am 5. Mai 1995 begonnen und fanden mit der Verfüllung/Versiegelung am 22. November 1995 ihren Abschluss.



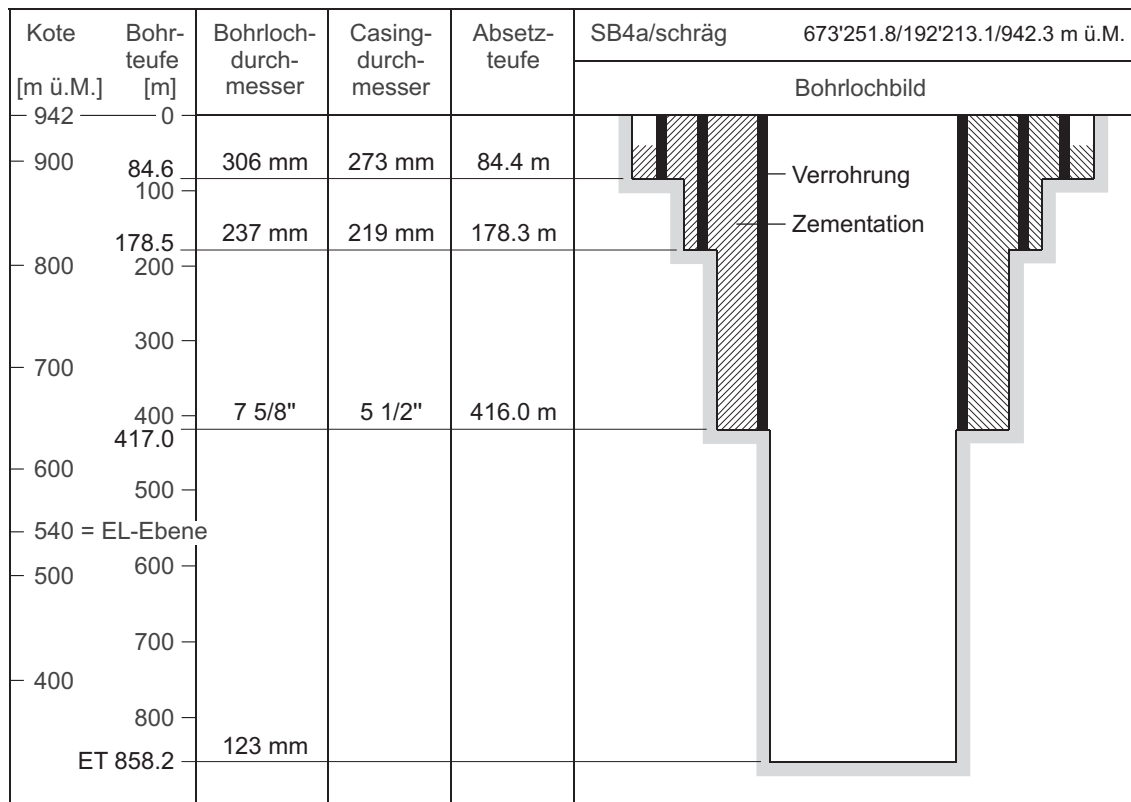
Figur 2-5: Situationsplan der Bohrung SB4a



Figur 2-6: Schematische Darstellung der Bohrung SB4a/schräg

2.3.2 Bohrung SB4a/schräg

Die Bohrung ist bis zu einer Bohrteufe von 416 m verrohrt. Die Rohrtouren sind mit Ausnahme des Standrohres (Tubex-Bohrverfahren) bis zu Tage zementiert. Der Durchmesser der offenen Bohrlochstrecke beträgt nominal 123 mm (siehe Längsschnitt, Figur 2-8). Die Bohrung verläuft praktisch geradlinig unter einer Neigung von 42.3° bis 47° mit einem Azimut von ca. 62.2° bis 65.8° E. Eine am 10. Oktober ausgeführte Kalibermessung zeigt eine punktuelle Ausbruchzone von max. 2" (5 cm) bei 525 m und eine Zone eines um ca. 1" (2.5 cm) vergrößerten Kalibers zwischen 575 m und ca. 670 m (MACEK & KARSCH 1996). Zusammenfassend wurde die SB4a/schräg ohne gravierende Stabilitätsprobleme und ohne grössere Bohrlochrandausbrüche abgeteuft.



Figur 2-7: Längsschnitt des ausgebauten Bohrlochs SB4a/schräg

Mit der Bohrung SB4a/schräg wurden dieselben geologischen Einheiten durchfahren wie mit SB4a/vertikal. Das Profil lässt sich gemäss Tabelle 2-1 gliedern (siehe auch Figur 2-8). Der Teufenabschnitt von ca. 575 m bis ca. 630 m ist tektonisch stärker gestört.

2.3.3 Hydrogeologie und Potentialverhältnisse

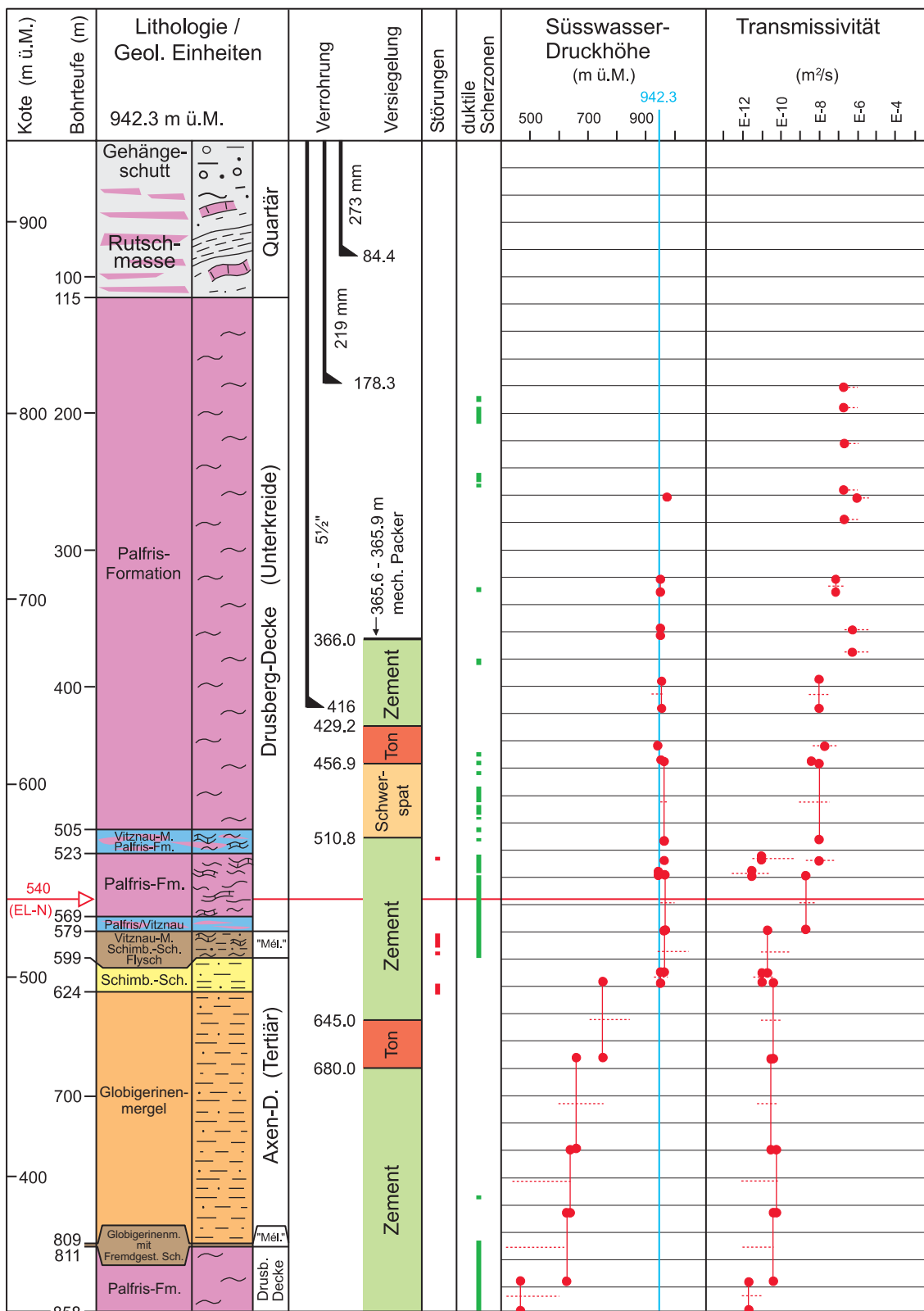
Die ermittelten hydraulischen Transmissivitäten sind zusammen mit den beobachteten Potentialen ebenfalls in Figur 2-8 aufgetragen.

Das aus den hydraulischen Packertests abgeleitete Transmissivitätsprofil zeigt unterhalb von 416 m (Bohrteufe) einen stetigen Übergang von mittleren zu sehr geringen Transmissivitäten. Von 416 bis 532 m liegen die Werte zwischen $4 \cdot 10^{-9}$ bis $4 \cdot 10^{-8}$ m²/s (dies entspricht einer auf 100 m gemittelten Durchlässigkeit von ca. 10^{-11} m/s). Unterhalb von 532 m wurden Transmissivitäten zwischen 10^{-12} und $2 \cdot 10^{-9}$ m²/s bestimmt (auf 100 m gemittelte Durchlässigkeit von 10^{-13} bis 10^{-12} m/s, siehe JAQUET et al. 1997). Die Unterdruckzone beginnt ab ca. 610 m. Im Bohrlochtiefsten werden sehr tiefe Süswasserdruckhöhen bis ca. 500 m ü.M. gemessen. Während des Doppelpackertests VM9 (Intervall 437 bis 443 m) traten in der Absenkphase grössere Mengen Gas auf, die wahrscheinlich auf Ausgasungen des Porenwassers infolge der Druckentlastung zurückzuführen sind.

Mittels Fluid Logging wurden schwach wasserführende Systeme (WFS) bei 444 m, 454 m, 456 m und 527 m identifiziert. Unterhalb von 540 m waren keine Messungen möglich, was die Lokalisierung von weiteren WFS mit Hilfe der Fluid Logging Methode verhinderte.

Tab. 2-1: SB4a/schräg: Durchfahrene geologische Einheiten (NAGRA 1997)

Bohrteufe (m)	Geologische Einheit	Beschreibung
0 m – ca. 115 m	Gehängeschutt und Rutschmasse	Kies, Silt, Ton, Sand mit Schichtpaketen der Palfris-Formation
115 m – 505 m	Palfris-Formation	Siltige bis feinsandige Tonmergel mit Kalkmergel-Bänken
505 m – 523.5 m	Vitznau-Mergel und Palfris-Formation	Sandige Kalkmergel-Mergelkalke und siltige Tonmergel
523.5 – 569.6 m	Palfris-Formation	Tonmergel mit Kalkbänken und kalkig-sandigen Lagen
569.6 m – 579.3 m	Vitznau-Mergel und Palfris-Formation	Sandige Kalkmergel-Mergelkalke und siltige Tonmergel
579.3 m – 599.1 m	Mélanges	Palfris-Formation, Vitznau-Mergel, Schimberg-Schiefer und Wildflysch
599.1 m – 624.1 m	Schimbergschiefer	Sandmergel und sandige Kalkmergel
624.1 m – 809.2 m	Globigerinenmergel	Glimmerführende siltige Tonmergel
809.2 m – 810.9 m	Mélanges	Vitznau-Mergel und Globigerinenmergel
810.9 m – 858.2 m	Palfris-Formation	Siltige Tonmergel



Figur 2-8: Übersichtsprofil der Bohrung SB4a/schräg

3 GRUNDLAGEN DER VERSIEGELUNGSTECHNIK

3.1 Einleitung

Radionuklide migrieren durch die Geosphäre mittels Advektion und Diffusion im verbundenen Porenraum oder in Diskontinuitäten des Gesteins und im Tiefengrundwasser. Darüber hinaus können Mechanismen auftreten (z.B. Sorption der Nuklide auf der Gesteinsmatrix), die zu einer Verzögerung des Nuklidtransports führen. Die Geometrie der Fliesspfade und die Gesteinseigenschaften entlang der Fliesswege bestimmen die dominanten Transportmechanismen und haben Einfluss auf die Fliessgeschwindigkeiten. Eine hoch durchlässige oder gar offene Struktur kann daher eine "schnelle" Verbindung schaffen zwischen der Endlagerzone und der Biosphäre, wenn die entsprechenden hydraulischen Voraussetzungen gegeben sind.

Die Hauptaufgabe einer Bohrlochversiegelung ist daher, die potentielle Wegsamkeit zwischen einer möglichen Endlagerzone und der Biosphäre zu unterbinden. Besondere Sorgfalt ist in geschichtetem und geklüftetem Wirtgestein mit allfälligen wasserführenden Störzonen erforderlich, um z.B. Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Wasserhorizonten durch ein Bohrloch zu verhindern. Die Versiegelung hat also in der Endlagertechnik primär die Funktion einer Durchflussbarriere.

Konzept und Machbarkeit einer Bohrlochversiegelung mit Bezug auf das Standortgebiet Wellenberg wurden bereits frühzeitig durch die Nagra untersucht (BRENNER & JEDELHAUSER 1989). Die dort formulierten Anforderungen sowie der generelle Aufbau und die Anordnung einer Versiegelung werden im Folgenden zusammengefasst. Weiterhin werden die Kenntnisse zum Einbau der Versiegelungsmaterialien zu den internationalen Erfahrungen und zu den gesetzlichen Grundlagen dargestellt (GHOFRANI et al. 1994).

3.2 Versiegelungskriterien und Anforderungen an Versiegelungsmaterialien

Die grundlegenden Anforderungen an eine Bohrlochversiegelung lassen sich wie folgt formulieren:

- (a) Die Versiegelung hat sicherzustellen, dass der Gas- oder Grundwasserfluss durch die Eigenschaften des natürlichen Wirtgesteins kontrolliert wird. Sie soll die Wirkung des Bohrlochs als bevorzugten Fliessweg oder Schwächezone im Sinne stark erhöhter Durchlässigkeit verhindern.
- (b) Die Versiegelung soll bewirken, dass im Bohrloch kein höherer Nuklidtransport stattfinden kann als im umgebenden Wirtgestein.
- (c) Die Funktionstüchtigkeit der Versiegelung soll sich nicht so weit verändern, dass dabei unannehmbar hohe Freisetzungen in die Biosphäre stattfinden.

Folgende Anforderungen an die einzusetzenden Versiegelungsmaterialien werden abgeleitet:

- (1) **Festigkeit:** Kurzzeitig ist diese wichtig für die Einbringphase der Versiegelung, falls das Versiegelungsmaterial nicht in flüssiger Form vorliegt, und langfristig für die strukturelle Integrität des Bohrloches.
- (2) **Deformationsverhalten:** Das Material sollte eine ausreichende Duktilität aufweisen, damit es kleinere Gebirgsverformungen ohne Risse überstehen kann.
- (3) **Durchlässigkeit:** Diese sollte möglichst gering sein, d.h. sie sollte in der Grössenordnung der durchschnittlichen Durchlässigkeit im Wirtgestein einschliesslich der statistisch verteilt angenommenen Störzonen liegen.
- (4) **Langzeitstabilität:**
 - (a) In chemischer Hinsicht sollte sich das Material während der Auslegungszeit nicht wesentlich verändern, insbesondere sollten auch keine, die Gesamtsicherheit des Endlagers gefährdende Reaktionen mit dem Wirtgestein stattfinden.
 - (b) In mechanischer Hinsicht sollte das Material durch Umwelteinflüsse, wie Wasserströmungen im Fels, nicht beeinträchtigt werden; insbesondere müssen Erosionserscheinungen verhindert werden.
- (5) **Quellfähigkeit oder Expandierfähigkeit:** Die Quellfähigkeit ermöglicht das lückenlose Ausfüllen von Hohlräumen zwischen dem Pfropfen und der Bohrlochwand und garantiert damit einen dichten Kontakt. Dies verhindert eine erhöhte Durchlässigkeit in der Kontaktzone zwischen Verfüllmaterial und Bohrlochwand.
- (6) **Verpumpbarkeit:** Das Verfüll-/Versiegelungsmaterial muss in eine für die Versiegelung wünschenswerte Form gebracht werden können, wie z.B. vorgeformte Elemente oder Pasten, die mit den vorhandenen Mitteln eingebaut bzw. eingepumpt werden können.

Es ist offensichtlich, dass kein Material alle Bedingungen optimal erfüllen kann. Daher ist es vorteilhaft, Pfropfen zu konzipieren, die aus mehreren Materialien bestehen. Als Materialkandidaten für solche Multikomponentenpfropfen kommen hauptsächlich verdichtete quellfähige Tone, wie z.B. hochverdichteter Bentonit, sowie Zement, vor allem Quellsemente mit geringer Abbindewärme, in Frage. Die relative Anordnung dieser Materialien im Bohrloch hängt von verschiedenen geologischen und gebirgsmechanischen Faktoren im Bohrloch ab.

3.3 Prinzip des Mehrkomponentensystems

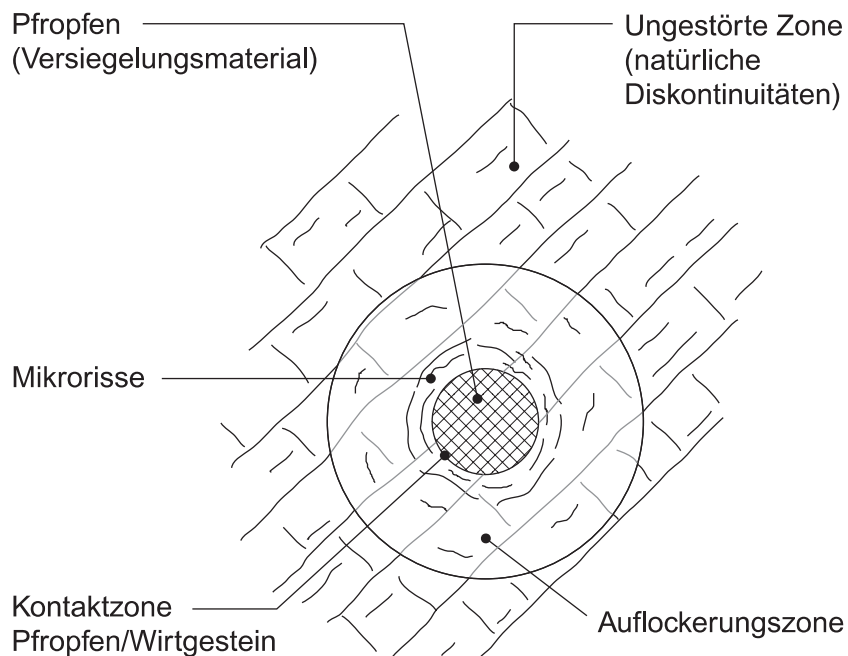
Figur 3-1 skizziert das System Wirtgestein/Verfüllung-Versiegelung einer Bohrlochversiegelung im Querschnitt. Die Anordnung der Materialien in der Bohrung ist in Figur 3-2 dargestellt. Die Versiegelung besteht aus einem Mehrkomponentensystem mit sogenannten Schlüsselzonen und Zwischenzonen:

- **Schlüsselzonen:** Solche Zonen beinhalten Dichtungselemente (Versiegelungselemente), welche die Funktion der Durchflussbarriere übernehmen. Mögliche

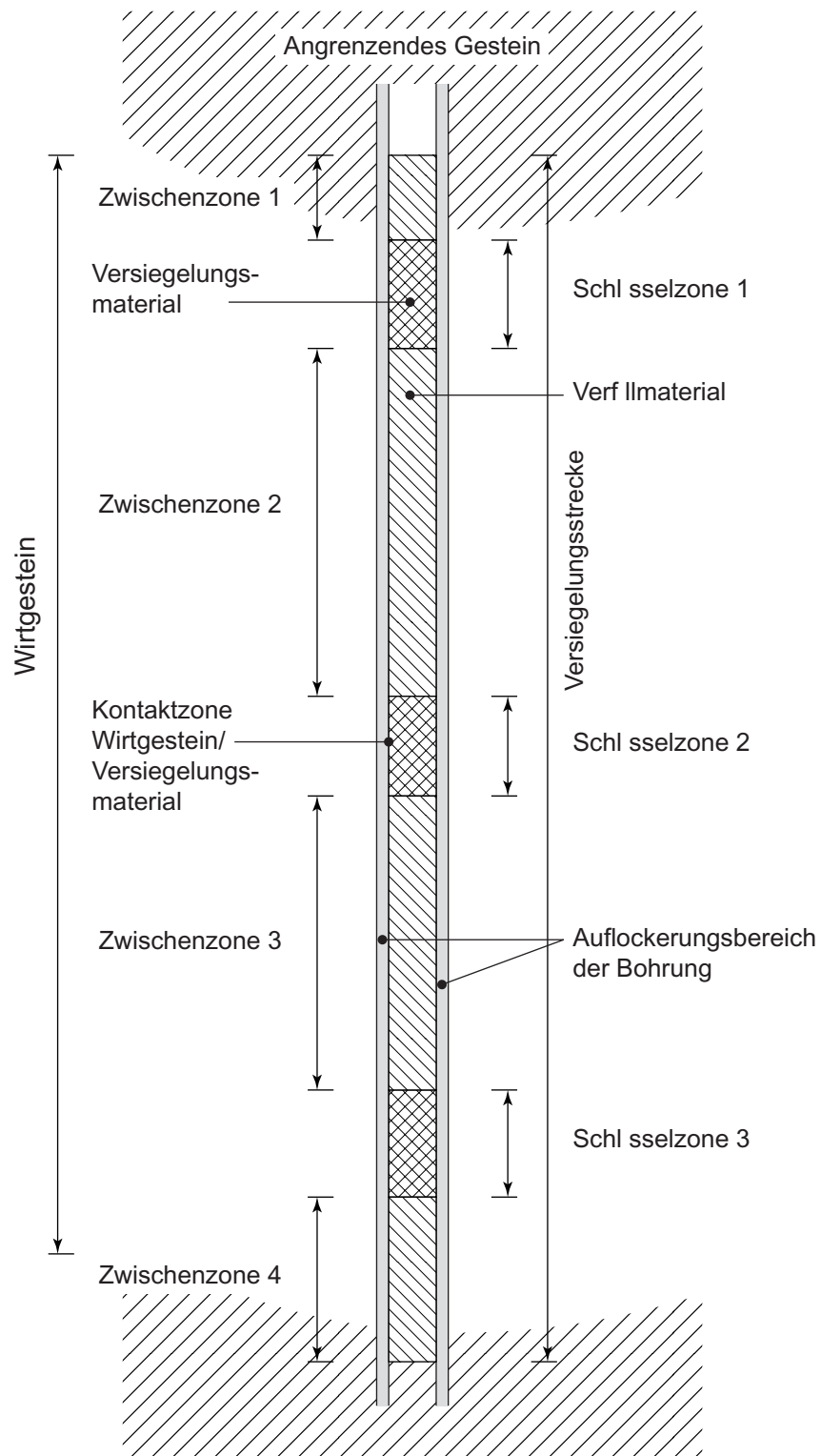
Materialien für die Realisierung solcher Schlüsselzonen sind hochverdichtete Bentonite, expandierfähige Zemente (Quellzemente) oder natürliche Materialien wie Schwerspat (Baryt), Opalit oder Gesteinsmehl.

- **Zwischenzonen:** Solche Zonen beinhalten Stützelemente (mechanische Widerlager, Verfüllelemente), die für die erforderliche Festigkeit sorgen. Für die Realisierung der Zwischenzonen kommen Tiefbohrzemente oder Quellzemente zum Einsatz.

Die definitive Wahl der Materialien wird unter Berücksichtigung der standortspezifischen hydrogeologischen und hydrochemischen Gegebenheiten getroffen.



Figur 3-1: Komponenten einer Versiegelung im Querschnitt (nach BRENNER & JEDELHAUSER 1989)



Figur 3-2: Schematische Darstellung eines Mehrkomponentensystems zur Bohrlochversiegelung

3.3.1 Anforderungen an Schlüsselzonen

Aufgrund der Barrierenfunktion, die der Schlüsselzone zukommt, ergeben sich in Bezug auf ihre Lage, Bemessung und Ausführung folgende Anforderungen:

- (1) Die Schlüsselzonen sind in möglichst gering durchlässige Bereiche des Wirtgesteins zu platzieren. Damit wird die Möglichkeit einer ausgeprägten Umströmung der Versiegelung weitgehend vermieden. Störzonen (z.B. Ruschelzonen in der Palfris-Formation) oder Zonen mit erhöhtem Wassereintritt eignen sich nicht als Barrierestellen. Ferner sollte das Bohrloch im Bereich der Schlüsselzonen möglichst masshaltig sein, d.h. es sollte einen möglichst kreisrunden Querschnitt aufweisen und nicht zu Ausbrüchen neigen.
- (2) Im Allgemeinen ist die Durchlässigkeit das wichtigste Kriterium für die Bemessung von Schlüsselzonen.
- (3) Die erforderliche Länge der Pfropfen wird durch die zu erwartenden Flüsse und Potentialdifferenzen bestimmt. Letztere können erst nach Vorliegen der standortspezifischen Daten ggf. mit Hilfe hydromechanischer Modellrechnungen ermittelt werden.
- (4) Die relative Anordnung und Anzahl der Schlüsselzonen in einem Bohrloch hängt von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen sowie von der Länge des Bohrlochs im Wirtgestein ab. Aus Gründen der Sicherheit sollten jedoch auch bei kürzeren Bohrlöchern mindestens zwei Schlüsselzonen vorgesehen werden (Redundanz).
- (5) Es ist anzustreben, dass der Pfropfen in lückenlosem Kontakt mit dem Wirtgestein steht, um Umläufigkeiten auch bei hoher Druckdifferenz zu vermeiden.

3.3.2 Anforderungen an Zwischenzonen

Die Aufgabe der Zwischenzonen besteht in einer Stabilitäts- und Stützfunktion für die Versiegelungspfropfen. Die Anforderungen an die Durchlässigkeit sind daher geringer. Die wesentlichen Anforderungen können wie folgt formuliert werden:

- (1) Das Verfüllmaterial sollte hauptsächlich anorganischer Natur sein.
- (2) Die Durchlässigkeit der Zwischenzonen sollte nicht grösser sein als diejenige des Wirtgesteins in der Auflockerungszone.
- (3) Die Festigkeit des Verfüllmaterials soll hinreichend sein.
- (4) Das Verfüllmaterial soll langzeitbeständig sein.

3.4 Internationale Erfahrungen

3.4.1 Erdöl- und Erdgasindustrie

In der Erdöl- und Erdgasindustrie ist es üblich, aufgelassene Bohrungen mit Zementpfropfen zu verschliessen. Diese Technik ist heutzutage gut entwickelt, jedoch sind experimentelle Daten über das Verhalten solcher Pfropfen nur spärlich und meist nur qualitativ vorhanden. Für detaillierte Angaben über die konventionellen Methoden der Versiegelung von Ölbohrungen sei hier auf die einschlägige Literatur verwiesen, wie z.B. SMITH (1976 a-c), ALLIQUANDER (1968), AUSTIN (1983), DAVENPORT (1984) und SMITH (1986).

Beispiele zu Verfüllungsarbeiten

Die Firma BEB fordert auch bei Verfüllung von Erdölbohrungen eine gasdichte Zementation. Eine Überwachung nach Verfüllung wird nur bei Problemb Bohrungen, bei denen während der Förderphase ein Druckaufbau im Ringraum beobachtet wurde bzw. Schwierigkeiten bei Verfüllung auftraten, vorgenommen.

Während die Firma BEB zur Verfüllung auflässiger Bohrungen die Gestängezementation bevorzugt, greift Firma Wintershall in der Regel auf 1 1/2" - Coiled Tubing zurück; hier wird die Zementation über den Gestängestrang nur bei komplizierten Verfüllungen angewendet.

In den USA werden im Hinblick auf die Verfüllungsarbeiten von dem Expertenteam der AMOCO Production Co. folgende Empfehlungen gegeben:

- Unmittelbar vor und hinter dem Zementschlamm soll ein Spacer eingebracht werden.
- Im Ringraum sollte der Spacer eine Länge von 150 – 250 m erreichen.
- Die Verträglichkeit des Spacers mit Spülung und Zementschlamm ist in Laboruntersuchungen nachzuweisen.
- Der Spacer sollte möglichst turbulent einzirkuliert werden.
- Zur Einbringung des Schlammes sollte die Balanced- bzw. Two-Plug-Methode zur Anwendung kommen.
- Der Zementschlamm soll in den Ringraum einzirkuliert werden.
- Während der Einbringung von Spacer und Zementschlamm soll der Strang in Rotation versetzt werden.

3.4.2 Nukleartechnik

Die Versiegelung von Bohrungen wurde in den letzten 20 Jahren in einer Reihe von in-situ Versuchen in Schweden (Stripa Forschungsprogramm, FAIRHURST et al. 1993), USA (WIPP Site, FINLEY & TILLERSON 1992) und ebenfalls ab Anfang der neunziger Jahren in Belgien (unterirdisches Labor HADES, VOLCKAERT et al. 1998), Deutsch-

land (Forschungsbergwerk Asse, DROSTE & ROTHFUCHS 1998) und in der Schweiz (Felslabor Grimsel, BLÜMLING 1997) untersucht.

Wichtige spezifische Zielsetzungen dieser Versuche waren u.a.:

- die Prüfung der Einbringtechnologie,
- die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit des versiegelten Bohrlochabschnitts.

Für nähere Details zu den Versuchen wird u.a. auf BRENNER & JEDELHAUSER (1989) verwiesen.

3.5 Richtlinien und gesetzliche Grundlagen – Beispiele

Die Verfüllung auflässiger Bohrungen ist international gesetzlich geregelt und wird von den zuständigen Behörden kontrolliert. Richtungsweisend sind z.B. die gesetzlichen Bestimmungen in der Bundesrepublik Deutschland und in den USA. In der Schweiz gibt es keine speziellen gesetzlichen Anforderungen an die Verfüllung und Versiegelung von Bohrungen.

Die gesetzlichen Bestimmungen sind nicht auf die speziellen Sicherheitsanforderungen eines Endlagers ausgerichtet.

In der Bundesrepublik Deutschland wird die Verfüllung auflässiger Bohrungen durch das Bundesberggesetz (BBergG 1992), die Tiefbohrverordnung (BVOT 1976) und die vom Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld erlassene Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen geregelt.

In den USA ist "Rule 14" der Railroad Commission/Texas für die Verfüllung auflässiger Bohrungen verbindlich, die am 1. Januar 1983 in Kraft getreten ist.

Hinsichtlich der Langzeitstabilität verfüllter Bohrungen beinhalten die gesetzlichen Regelwerke keine Aussagen.

3.5.1 Allgemeine Bestimmungen

Bundesrepublik Deutschland

Die Verfüllung auflässiger Bohrungen unterliegt gemäss §51 BBergG der Betriebsplanpflicht. §53 BBergG sieht für die Einstellung eines bergbaulichen Betriebes die Vorlage eines Abschlussbetriebsplanes vor. Der Abschlussbetriebsplan soll eine detaillierte Darstellung der technischen Durchführung, die genaue Dauer der Betriebseinstellung und die Betriebschronik beinhalten.

Mit Bezug auf §51 BBergG, Abs. 1 und Abs. 3 sowie §35 BVOT wird Folgendes über das Verfüllen auflässiger Bohrungen in der am 01.06.1987 vom Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld erlassenen Richtlinie geregelt: "*Diese Richtlinie gilt für das Verfüllen und das Teilverfüllen von Bohrungen im Geltungsbereich der Tiefbohrverordnung BVOT.*"

Nach §35 BVOT sind auflässige Bohrungen so zu verfüllen, dass Einbrüche an der Erdoberfläche vermieden werden und eine spätere Nutzung des Untergrundes zur Gewinnung von Bodenschätzen und Wasser oder zur Tiefspeicherung nicht beeinträchtigt wird. Die Verfüllung ist so vorzunehmen, dass nach aller Erfahrung ein flüssigkeits- und gasdichter Abschluss erreicht wird und nachteilige Veränderungen des Grundwassers vermieden werden. Die Verfüllungsarbeiten unterliegen der Betriebsplanpflicht nach § 51, Abs. 1, BBergG; eine Befreiung von der Betriebsplanpflicht nach § 51, Abs. 3, BBergG ist nicht möglich."

Über die Überprüfung und den Verfüllungsbericht heisst es in der "Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen" weiter: *"Der Kopf der besonderen Verfüllungsstrecken ist durch geeignete Verfahren zu ermitteln. Der Erfolg der Abdichtung ist nachzuweisen, wenn eine geöffnete Lagerstätte abgedichtet und keine mechanische Abdichtung verwendet wird. Der Nachweis kann z.B. durch Druckprobe, Zuflusstest oder Gewichtprobe erfolgen. Nach Abschluss der Verfüllungsarbeiten ist dem Bergamt innerhalb von 3 Monaten der Verfüllungsbericht zusammen mit dem ergänzten Bohrlochbild vorzulegen."*

Das *Oberbergamt München* verlangt einen Nachweis der Belastbarkeit der gesetzten Zementbrücken; der Zementkopf soll mit 40 kN durch den Strang belastet werden.

Das *Bergamt Celle* verlangt, dass die eingebauten Rohre bis unterhalb des Quartärs ausgebaut und die Strecke vollständig zementiert wird.

USA

In Texas fungiert die *Railroad Commission* als Genehmigungsbehörde. In Anlehnung an ihre richtungsweisende *Rule 14* für die Verfüllung auflässiger Bohrungen haben andere Staaten eigene Gesetze verabschiedet. Die grundlegenden Forderungen der *Rule 14* sind:

- 1) Erdwärme, wasser-, erdöl- und gasführende Formationen sind zu schützen.
- 2) Die unter 1) genannten Horizonte sind mit einem Zementpfropfen zu isolieren.
- 3) Zum Setzen von Pfropfen müssen Zementschlämme durch Liner- bzw. Rohrstrang eingebracht werden.
- 4) Zum Setzen von Pfropfen sollen API¹-Tiefbohrzemente ohne Quellzusatz eingesetzt werden; Ausnahmen können im Einzelfall genehmigt werden.
- 5) Zementierungsarbeiten dürfen nur von zugelassenen Servicefirmen ausgeführt werden.
- 6) Die *Railroad Commission* ist berechtigt, das Setzen zusätzlicher Zementpfropfen anzuordnen, um produktive Horizonte zu schützen oder wasserführende Horizonte stark unterschiedlicher Qualität bzw. hydrostatischen Druckes gegeneinander zu isolieren.

¹ API: American Petroleum Institute.

- 7) Das Bohrloch muss sich zum Zeitpunkt des Setzens des Pfropfens in einem statisch stabilen Zustand befinden.

Innerhalb von 30 Tagen nach Beendigung der Verfüllungsarbeiten muss der *Railroad Commission* ein Verfüllungsbericht vorgelegt werden. Der Bericht soll neben dem Tubing- und Futterrohrprogramm Daten über die Länge und Platzierungsteufe gesetzter Pfropfen enthalten.

3.5.2 Richtlinien zu besonderen Verfüllungsstrecken

In der vom *Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld* erlassenen Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen wird zwischen a) besonderen Verfüllungsstrecken und b) übrigen Strecken unterschieden. Unter "Anforderungen an die Verfüllung" wird u.a. ausgeführt:

"Das Bohrloch ist vollständig zu verfüllen. Dabei sind die Bereiche von Erdöl-, Erdgas- und Salzlagerstätten, von nutzbaren Speicher- und Wasserhorizonten sowie von druckstarken Horizonten mit Zuflüssen (in dieser Richtlinie zusammengefasst Lagerstätte genannt), Liner, Schnittstellen von Rohren und Ringräume sowie der Rohrschuh der tiefsten Rohrtour in einem teilweise unverrohrten Bohrloch und der Bereich unter der Erdoberfläche durch besondere Verfüllungsstrecken abzudichten. In Bereichen, wo beim Bohren oder Fördern Schwierigkeiten aufgetreten sind, können zusätzlich besondere Verfüllungsstrecken erforderlich werden."

Besondere Verfüllungsstrecken sollen von 50 m unterhalb bis 50 m oberhalb der Lagerstätte reichen. Ist das Bohrloch teilweise unverroht, so muss in die tiefste Rohrtour ab Rohrschuh eine besondere Verfüllungsstrecke von mindestens 100 m oder eine mechanische Abdichtung mit einer besonderen Verfüllungsstrecke von mindestens 50 m eingebracht werden. Linerköpfe und Schnittstellen von Rohren sind durch besondere Verfüllungsstrecken von mindestens 100 m Länge, die mindestens je 50 m in beide Rohrtouren hineinreichen, abzudichten.

Das Bohrloch ist ab Erdoberfläche bis zu einer Teufe von 100 m mit einer besonderen Verfüllungsstrecke zu verfüllen. Befinden sich unterhalb dieser Strecke für eine Nutzung vorgesehene Süßwasserhorizonte, so ist die besondere Verfüllungsstrecke entsprechend zu verlängern.

3.5.3 Beispiele zum Einsatz von Verfüllmaterialien in besonderen Verfüllungsstrecken

Die Auswahl der Verfüllmaterialien wird in der Bundesrepublik Deutschland ebenfalls durch die vom *Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld* erlassene Richtlinie geregelt:

"Die besonderen Verfüllungsstrecken sind mit geeignetem Zement oder mit anderen geeigneten Feststoffen, gegebenenfalls in Verbindung mit mechanischen Abdichtungen, zu verfüllen. Durch geeignete Massnahmen ist für eine gute Haftung der Feststoffe an der Rohr- bzw. Bohrlochwand zu sorgen. Die für die Verfüllung der übrigen Strecken verwendeten Stoffe dürfen das anstehende Gebirge, die Verrohrung sowie die Stoffe der besonderen Verfüllungsstrecken nicht angreifen."

Beispiele

Von der Firma BEB Erdgas und Erdöl GmbH wird die Dickspülung (Zyklonunterlauf) zur Verfüllung des Bohrloches höher bewertet als das Setzen einer Zementbrücke. Zur Kickbekämpfung² werden von dieser Firma Schwerspatsuspensionen mit einer Dichte von 2400 – 2450 kg/m³ eingesetzt. Beim Einsatz von Zement zur Verfüllung des Bohrloches wird keine starke Verzögerung des Schlammes vorgenommen. Auch Beton aus der Transport-Zementbranche ist von dieser Firma zur Verfüllung von Bohrungen eingesetzt worden.

Bei der Firma Wintershall AG - Erdölwerke werden tiefe Erdgasbohrungen mit API-Zement, Class G zur Stabilisierung bei hohen Temperaturen mit Quarzmehl verblendet, verfüllt. Zur Verfüllung von druckschwachen Erdölbohrungen kommen Pozmix®-Zemente zum Einsatz; zur Verfüllung entlang druckschwacher Formationen wird Bentonit (Quellzusatz) zugemischt, um niedrigere Dichten bis 1300 kg/m³ zu realisieren. Von der Firma Wintershall werden optional, anstatt Leichtzemente, auch Dickspülungen zur Verfüllung eingesetzt.

Die Firma Bohrgesellschaft Rhein-Ruhr mbH verfüllt die Bohrungen mit Zement; es werden auch Mehrkomponentensysteme, bestehend aus Schwerspat, Tonen und Bridge Plug eingesetzt.

In den USA werden die Versenkbohrungen zur Abfallentsorgung mit Tricalciumaluminat-freien Tiefbohrzementen verfüllt. Schwerspatsuspensionen mit einer Dichte von 2160 – 2880 kg/m³ werden bevorzugt zum Setzen von Pfropfen in Spülungsverlustzonen eingesetzt.

Ein Expertenteam der AMOCO Production Co. empfiehlt, aufgrund der eigenen Labor- und Feldexperimente zur Verfüllung von Bohrungen API-Tiefbohrzemente, Class A, C, G oder H einzusetzen. Der Einsatz von Verflüssigern ist zu minimieren. Bei Temperaturen oberhalb 110° C soll Quarzmehl zugesetzt werden.

² Kick: Gaszuflüsse aus dem Gebirge ins Bohrloch.

4 KOMPONENTEN, MATERIALIEN UND EIGENSCHAFTEN DER VERSIEGELUNG VON SB4A/SCHRÄG

4.1 Einleitung

Das in SB4a/schräg umgesetzte Versiegelungskonzept basiert auf einem Mehrkomponentensystem, das die Abdichtwirkung durch die serielle Anordnung von Materialien mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften erzeugt. Die Anforderungen an die Materialien wurden in Kap. 3.2 definiert. Umfangreiche Laboruntersuchungen mit einem integrierten Konzeptvorschlag für die Versiegelung wurden am *Institut für Bohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung der Technischen Universität Clausthal* (BRD) unter Berücksichtigung der spezifischen Bedingungen der Bohrung SB4a/schräg (Druck, Temperatur, Salzgehalt des Wassers) durchgeführt (GHOFRANI et al. 1994). Diese Untersuchungen wurden teilweise ergänzt und durch Experten begutachtet. Sie liefern somit eine sichere Datenbasis für die eingesetzten Materialien.

Die Anforderungen an die Verfüll-/Versiegelungsmaterialien betreffen die Festigkeit, das Deformationsverhalten, die Durchlässigkeit und die Langzeitstabilität sowie die Quellfähigkeit/Expandierfähigkeit und die Verpumpbarkeit. Über die Langzeitstabilität der Materialien bestand bereits Erfahrung im Rahmen früherer Projekte der Nagra (z.B. NAGRA 1994b). Weiterhin wurden Experten für die Beurteilung von Spezialfragestellungen einbezogen. In Ergänzung zu international vorhandenen Ergebnissen bezüglich der Materialeigenschaften wurden von GHOFRANI et al. (1994) und GHOFRANI (1995) folgende Untersuchungen durchgeführt:

Festigkeit: Druckfestigkeit und Haftscherfestigkeit

- Quellschichtsteine (Zwischenzonen)

Durchlässigkeit:

- Quellschichtsteine (Zwischenzonen)
- Pfropfenmaterialien (Schlüsselzonen): Schwerspat, Gesteinsmehl, Opalit, Quellon HD

Quellfähigkeit/Expandierfähigkeit:

- Quellschicht

Verpumpbarkeit:

- Quellschichtschlamm
- Pfropfenmaterialien (Schlüsselzonen): Schwerspat, Gesteinsmehl, Opalit, Quellon HD

Kap. 4.2 beschreibt zusammenfassend die Grundeigenschaften der potentiellen Verfüllmaterialien.

In Kap. 4.3 werden die neu durchgeführten Untersuchungen (GHOFRANI et al. 1994 und GHOFRANI 1995) der jeweiligen Materialien und der versiegelungsrelevanten Eigenschaften dargestellt. Die Laborversuche wurden in der Regel unter den Bedingungen durchgeführt, die bei der Bohrung SB4a/schräg vorherrschen.

Kap. 4.4 fasst die wesentlichsten Untersuchungsergebnisse zusammen und wertet die Eignung der Materialien hinsichtlich der in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen.

4.2 Beschreibung der einzelnen Verfüll- und Versiegelungsmaterialien

Als Versiegelungsmaterial in Schlüsselzonen kommen expandierfähige Zemente (Quellzemente) oder Ton, Gesteinsmehl, Opalit und Schwerspat in Frage. In Zwischenzonen wurde der Einsatz von Tiefbohr- oder Quellzement erwogen.

4.2.1 Verfüllmaterialien (in der Regel: Zemente)

Zement gehört der Gruppe der "hydraulischen Bindemittel" an und somit zu den Stoffen, die nach dem Anmischen mit Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser aushärten und hart bleiben.

Zur Versiegelung von Bohrungen, sowohl in verrohrten als auch in offenen Abschnitten, können Zementschlämme eingebracht werden. Der angesetzte Zementschlamm enthält neben einem Tiefbohr- bzw. Quellzement Additive, mit deren Hilfe die erforderlichen Schlamm- und Zementsteineigenschaften für die Zementation bestimmter Bohrlochabschnitte eingestellt werden können. Durch die Beschränkung der Schlammbestandteile auf wenige Komponenten kann ein entscheidender Beitrag zur Erhöhung der Langzeitstabilität des Zementsteines geleistet werden.

Die Festigkeitseigenschaften und die Abdichtwirkung des Zementsteines sind durch die Hydratation der Zementklinkerminerale, also durch die "chemische und physikalische Ein- bzw. Anlagerung" von Wasserdipolen beeinflusst. Bei einem Re- bzw. Umkristallisationsprozess der hydratisierten Phasen, in dem bereits gebundenes Wasser freigesetzt werden kann, muss mit abnehmenden Festigkeitswerten und zunehmender Durchlässigkeit des Zementsteines gerechnet werden. Ebenfalls kann es in Zementstein bei der Einwirkung von Elektrolytlösungen oder sauren Gasen zur Auslaugung bzw. zum Basenaustausch kommen, welche die Eigenschaften des Zementsteines beeinträchtigen. Lassen dagegen die Randbedingungen eine Re- bzw. Umkristallisation oder Korrosion ausschliessen, so kann von einer gleichbleibenden Dichtwirkung des Zementsteines ausgegangen werden.

Zur Beurteilung der Eignung von Quellzementen zur Versiegelung von Schlüsselzonen und Zwischenzonen war es notwendig, experimentell Informationen über die Eigenschaften sowohl des Quellzementschlammes als auch des Quellzementsteines zu gewinnen (Kap.4.3).

Tiefbohrzemente

Ausgangsstoffe für die Herstellung von Tiefbohrzementen, die zur Versiegelung von Zwischenzonen berücksichtigt werden, sind Kalkstein und Ton. Diese Rohstoffe werden in Rohrmühlen zu einem Feinmehl oder Feinschlamm vermahlen und innig miteinander vermischt. Die chemisch genau eingestellte und laufend überwachte Rohmischung wird im Drehofen bis zur Sinterung bei 1400 – 1500°C erhitzt; es bilden sich Portlandzementklinker, die nach Verlassen des Ofens fein vermahlen werden. Die Bestimmungen über die Mahlfeinheit deutscher Zemente sind in DIN 1164 festgelegt. Die Tiefbohrzemente, API Class A bis J, können ohne weitere Zusätze bei den Druck- und Temperaturbedingungen verwendet werden, die bis zu einer Teufe von 4880 m angetroffen werden. Mit Verzögerern oder Beschleunigern können diese Zemente jedoch auch ausserhalb des für sie typischen Teufenabschnittes eingesetzt werden.

Angaben zu der Zusammensetzung der Tiefbohrzemente, deren Hydratationsverhalten, Festigkeitsentwicklung sowie Volumenschwund sind in GHOFrani et al. (1994) enthalten.

Quellzemente

Die Quellzemente können zur Versiegelung von Schlüsselzonen und von Zwischenzonen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den Tiefbohrzementen ermöglichen Quellzemente auf der Basis von CaO bzw. MgO unter hydrothermalen Bedingungen eine Matrixausdehnung, die trotz Zementationsfehler zu einem dichten Abschluss des Ringraumes führt. Die Wirkung von CaO- bzw. MgO-Quellzementen basiert auf der Grundlage einer homogenen Einlagerung wachstumsfähiger Fremdkristalle (Ca- bzw. Mg-Hydroxidkristalle) in die Bindemittelmatrix. Die Kristallisationskeime dieser Fremdkristalle nisten sich an den Kristallen der Hauptstrukturphase (Zementkristalle) an, wachsen dort in die existierenden Porenräume hinein und treiben beim Erreichen der gegenüberliegenden Porenwandung die Kristalle der Hauptstrukturphase auseinander. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Fall 1: Es steht freier Raum zur Verfügung, der vom Quellzement eingenommen werden kann (Spülungstaschen im Ringraum, komprimierbarer Filterkuchen an der Bohrlochwandung, Spülungsreste am Strang). Seinem Quellpotential entsprechend dehnt sich der Quellzement in diesem Fall aus und kann somit eine lückenlose Verfüllung des Ringraumes mit Bindemitteln realisieren.
- Fall 2: Bei fehlendem, freiem Raum wird der Quellzement an der Ausdehnung gehindert. In diesem Fall führt das Wachstum der Fremdkristalle zu einer Umverteilung der festen Phasen der Matrix. Es erfolgt eine Verlagerung der Maxima der Porenradienverteilung zu kleineren Werten, so dass der Zementkörper undurchlässiger wird. Daneben wird die Kontaktspannung zu den angrenzenden Flächen (Bohrlochwandung, Futterrohre) erhöht, wobei Randläufigkeiten von Fluiden ausgeschlossen bzw. vermindert werden können.

Angaben zu der Zusammensetzung der Quellbohrzemente, deren Hydratationsverhalten, Festigkeitsentwicklung sowie Ausdehnungsverhalten sind in GHOFrani et al. (1994) enthalten.

4.2.2 Versiegelungsmaterialien

Folgende Versiegelungsmaterialien wurden im Rahmen der Voruntersuchungen zur Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg untersucht (GHOFrani et al. 1994):

- Schwerspat (Baryt)
- Palfris-Formation (Gesteinsmehl)
- Opalit
- Quellon HD (Bentonit-Magnetit-Pellets)

Aufgrund der Laborresultate wurden für das geplante Multikomponentensystem Baryt und Quellon als adäquate Versiegelungsmaterialie ausgewählt.

Schwerspat (Baryt)

Schwerspat (BaSO_4) ist ein in der Natur vorkommendes, inertes Material, das in der Tiefbohrtechnik zur Beschwerung von Bohrspülungen und Zementschlämmen sowie zur Verfüllung auflässiger Bohrungen eingesetzt wird. Die Dichte des Schwerspats variiert zwischen 4200 und 4400 kg/m^3 . An die Mahlfineinheit des in der Bohrtechnik eingesetzten Schwerspats werden besondere Anforderungen gestellt, weil Partikel $< 10 \mu\text{m}$ die Rheologie der Spülungen nachteilig beeinflussen. Partikel grösser als $74 \mu\text{m}$ (US-Mesh 200) neigen in der Bohrspülung zur Sedimentation, so dass ihr Anteil nach der Norm API-SPEC 13A weniger als 3 % betragen soll.

Die abdichtende Wirkung des Schwerspats wird in der Literatur mit der plättchenförmigen Ausbildung der Partikel begründet. Zur Versiegelung von Bohrlöchern eignet sich Schwerspat (inert, wasserunlöslich) aufgrund seiner Langzeitstabilität sehr gut. Auch Gebirgsfluide können in einem solchen Sedimentbett keine Lösungsvorgänge auslösen.

Quellon HD

Quellon HD ist ein Produkt der Fa. SBF Wasser und Umwelt bestehend aus Ton-Pellets auf der Basis von Bentonit und Magnetit, das speziell für die Abdichtung tiefer Bohrlochabschnitte entwickelt wurde. Mineralogische Untersuchungen an Bentonit-Magnetit-Pellets ergaben die in Tabelle 4-1 angegebene Zusammensetzung (Analyse des Mineralogisch-Petrographischen Institutes der Universität Bern, siehe MACEK & KARSCH 1996).

Tab. 4-1: Mineralogische Zusammensetzung von Bentonit-Magnetit-Pellets

Phase	[Gew.-%]	Bestimmungsmethode
Bentonit	85 – 90	gravimetrisch
Magnetit	10 – 12	gravimetrisch
Pyrit	1.2 – 1.3	chemisch
Quarz	1 – 2	optisch
Calcit	1 – 2	optisch

Dabei tritt Pyrit sowohl als freie einzelne Körner im Bentonit auf als auch als Verwachsung und als Einschluss im Magnetit. Neben Pyrit wurde auch Chalcopyrit beobachtet. Die Analyse des Schwefelgehaltes ergab:

- Ionenchromatographie: 1.95 % SO_4 daraus berechnet: 1.2 Gew.-% Pyrit
- Coulomat 0.70 % S_{tot} daraus berechnet: 1.3 Gew.-% Pyrit

Für weitere Details zur Mineralogie vom Quellon HD wird auf MACEK & KARSCH (1996) verwiesen.

4.3 Untersuchungen der für Zwischen- und Schlüsselzonen relevanten Eigenschaften

4.3.1 Quellzemente

4.3.1.1 Untersuchungsprogramm

Von den Eigenschaften des Quellzementschlammes interessieren vor allem die Fragen nach der Verpumpbarkeit und dem Ausdehnungsverhalten. Im Hinblick auf eine Beurteilung der Verpumpbarkeit wurde die Versteifungszeit des Quellzementschlammes nach API-SPEC 10A in einem Konsistometer für Hochdruck und Hochtemperaturbedingungen bestimmt. Zur Beantwortung der Frage nach dem Ausdehnungsverhalten (d.h. der Quell- oder Expandierfähigkeit) der zu untersuchenden Quellzementschlämme wurden die vom Institut für Erdöl- und Erdgastechnik der Technischen Universität Clausthal konzipierten Ausdehnungsmesszellen eingesetzt.

Während mit den Untersuchungen des Zementschlammes die Frage beantwortet wird, ob der Schlamm problemlos vor Ort eingebracht werden kann und ob dieser ein Schrumpfungs- oder Ausdehnungspotential aufweist, kann mit Hilfe der Untersuchungen an Zementsteinproben geklärt werden, wie belastbar (Festigkeit) der Zementkörper unter Bohrlochbedingungen ist und ob dieser im Bohrloch die erforderliche Durchlässigkeit aufbauen kann. Um diese Fragen schlüssig zu beantworten, war es erforderlich, die angesetzten Zementproben für eine entsprechende Zeitdauer unter simulierten Bohrlochbedingungen zu lagern, bevor die Messungen an diesen Proben durchgeführt wurden.

4.3.1.2 Auswahl von Quellzementrezepturen

Neben einer konventionellen wurden auch zwei CaO-Quellzementrezepturen näher untersucht. Der Auswahl dieser Rezepturen waren Voruntersuchungen vorausgegangen, deren Ergebnisse in Tabelle 4-2 wiedergegeben sind. Die geprüften Quellzementrezepturen unterschieden sich sowohl in Bezug auf ihren Quellzusatzgehalt als auch hinsichtlich der Reaktivität der Quellzusätze. Zur Durchführung weiterer Untersuchungen wurden anhand der Ergebnisse der Voruntersuchungen die konventionelle Zementrezeptur A und die Quellzementrezepturen E und F ausgewählt.

Tab. 4-2: Ergebnisse der Voruntersuchungen an konventionellen Zementschlämmen (A und B) sowie CaO-Quellzementschlämmen (C – F)

Rezeptur	Zusammensetzung	Masse [g]	WZF ³ bzw. WHFF ⁴	Versteifungszeit [min]
A	API-TBZ, G ^a Leitungswasser	1000 400	0.4	365
B	API-TBZ, G Leitungswasser	1000 440	0.44	527
C	API-TBZ, G CaO-Fels ^b Leitungswasser	1000 50 472.5	0.45	461 482 ^d
D	API-TBZ, G CaO-Fels ^b Leitungswasser	1000 100 495	0.45	401
E	API-TBZ, G CaO-Fels ^c Leitungswasser	1000 50 472.5	0.45	507
F	API-TBZ, G CaO-DORNAP Leitungswasser	1000 50 472.5	0.45	422 418 ^d
^a API-Tiefbohrzement, Class G ^{b,c} Reaktionszeit des Quellzusatzes (t_{80} , Mass für die Reaktivität) wurde nach DIN-1060 gemessen: FELS ^b = 8.4 min FELS ^c = 16.2 min DORNAP = 20.1 min ^d Ergebnis des Wiederholungsversuches				

4.3.1.3 Verpumpbarkeit

Zur Beurteilung der Verpumpbarkeit des Zementschlammes unter den gegebenen Bohrlochbedingungen können seine rheologischen Parameter und die Versteifungszeit herangezogen werden.

³ WZF: Wasser-Zement-Faktor = Masse des Anmischwassers/Masse des Zementes.

⁴ WHFF: Masse des Anmischwassers/Masse des Zements und des Quellzusatzes.

Zementschlammrheologie

Nach API-SPEC 10 soll zur Untersuchung der Zementschlammrheologie ein Rotationsviskosimeter verwendet werden. Für die hier geprüften Zementschlämme wurde ein Fann-Viskosimeter, Modell 35 eingesetzt. Das Anmischen des Zementschlammes, seine Vorbehandlung und die Untersuchung mit dem Fann-Viskosimeter erfolgten jeweils nach API-Richtlinien. Bei jedem Zementschlamm wurden dann anhand der gemessenen Werte die "plastische Viskosität" und die "Bingham-Fliessgrenze" berechnet.

Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen der ausgewählten Rezepturen A, E und F (Tabelle 4-2) sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst. Anhand dieser Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Verpumpung dieser Zementschlämme unter den Druck- und Temperaturbedingungen der Bohrung SB4a/schräg keine Probleme erwarten lässt.

Tab. 4-3: Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen der Zementrezepturen A, E und F

Rezeptur	Plastische Viskosität [$\times 10^{-3}$ Pa·s]	Bingham-Fliessgrenze [Pa]
A	41	29.8
E	30	12.0
F	30	12.0

Konsistenzentwicklung

Die Messung der Versteifungszeit in einem HPHT⁵-Konsistometer gibt ebenfalls Aufschluss darüber, wie lange ein Zementschlamm unter simulierten Bohrlochbedingungen flüssig und damit verpumpbar bleibt. Das HPHT-Konsistometer stellt eine vom American Petroleum Institute (API) empfohlene Apparatur zur Aufnahme der Konsistenzkurve des zu untersuchenden Zementschlammes unter simulierten Bohrlochbedingungen dar. Für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche wurde ein Gerät der Fa. Halliburton verwendet. Es besteht im Wesentlichen aus einem beheizbaren Autoklaven, in dem Temperaturen bis 180° C und Drücke bis 200 MPa eingestellt werden können.

Der Probenbehälter wird zur Aufnahme der Konsistenzkurve des Zementschlammes mit der angemischten Probe befüllt, vollständig entlüftet und in den Autoklavenraum eingebracht. Der Autoklavenraum wird anschliessend mit Thermoöl gefüllt, entlüftet und druckdicht verschlossen. Durch weiteres Verpressen von Thermoöl in den Autoklavenraum wird der zu simulierende Druck eingestellt.

Entsprechend den Bedingungen in der Bohrung SB4a/schräg wurden die HPHT-Konsistenzuntersuchungen unter einem Druck von 10 MPa bei Raumtemperatur durch-

⁵ HPHT: Hochdruck und -temperatur.

geführt. Die Konsistenzwerte des Zementschlammes wurden in Abhängigkeit von der Zeit mit einem Linienschreiber grafisch festgehalten. Die Zeitmessung erfolgte vom Beginn des Anmischens des Schlammes bis zum Erreichen einer Konsistenz von 100 Bc⁶. Nach API-SPEC 10A wird bei diesem Wert die Grenze der Verpumpbarkeit von Zementschlamm erreicht. In der Zementationspraxis wird für eine problemlose Verpumpung zusätzlich gefordert, dass die Konsistenz des Schlammes nach einer Belastung im Konsistometer von 15 bis 30 Minuten den Wert von 30 Bc nicht überschreitet und die Versteifungszeit (Belastungsdauer im Konsistometer bis eine Konsistenz von 100 Bc erreicht wird) mindestens 90 min beträgt.

Die gemessenen Versteifungszeiten des konventionellen Zementschlammes A und der CaO-Quellzementschlämme E und F sind in Tabelle 4-2 angegeben. Die Konsistenzwerte dieser Zementschlämme lagen nach 30 Minuten Belastung im Konsistometer weit unter 30 Bc (A ~ 18 Bc, E und F ~ 12 Bc). Somit war sichergestellt, dass jeder dieser Zementschlämme problemlos vor Ort eingebracht werden konnte.

4.3.1.4 Quell-/Expandierfähigkeit

Infolge der chemischen und physikalischen Fixierung des Anmischwassers beim Hydratationsprozess der Klinkerminerale kann ein Volumenschwund auftreten, der die äusseren Abmessungen des erhärtenden Zementschlammes reduziert und somit der Dichtigkeit des Zementkörpers im Rohr bzw. im offenen Bohrloch entgegenwirkt. Dieser Entwicklung kann durch Einlagerung quellfähiger Fremdphasen begegnet werden.

Das Schrumpfen bzw. die Ausdehnung des Zementkörpers in Abhängigkeit von der Zeit wurde mit Hilfe der am Institut für Erdöl- und Erdgastechnik der TU Clausthal entwickelten Ausdehnungsmesszellen experimentell ermittelt. Dabei wurde das Ausdehnungsverhalten der Zementschlämme A, E und F (Tabelle 4-2) mit Hilfe von Ausdehnungsmesszellen sowohl bei atmosphärischen als auch bei erhöhtem Druck untersucht (Details der Messapparaturen siehe GHOFrani et al. 1994). Der Einfluss der beim Verpumpen auftretenden Scherbelastung auf das Ausdehnungsverhalten des Zementschlammes wurde dadurch berücksichtigt, dass der Zementschlamm in einem Ultra-Turrax-Gerät 20 Minuten lang bei einer Drehfrequenz von 3000 min⁻¹ geschert wurde.

Ausdehnungsverhalten unter atmosphärischen Bedingungen

Zur Durchführung von Reihenuntersuchungen des Ausdehnungsverhaltens von Zementschlämmen unter atmosphärischen Druckbedingungen und Temperaturen bis 90° C können atmosphärische Ausdehnungsmesszellen eingesetzt werden. Die jeweilige Versuchstemperatur wird dabei durch ein Wasserbad eingestellt, das die Zelle umgibt.

Die Ergebnisse der Versuche für den konventionellen Zementschlamm A und die CaO-Quellzementschlämme E und F (Tabelle 4-2) sind in Tabelle 4-4 wiedergegeben. Es ist ersichtlich, dass der mit einem Wasser-Zement-Faktor von 0.4 angesetzte konventio-

⁶ Bc: Beardon Units of Consistency: Nach API werden 100 Bc als 2080 g·cm definiert.

nelle Zementschlamm A (API-Tiefbohrzement, Class G) ein Schrumpfen von 0.24 Vol.-% aufweist, während die Quellzementschlämme E (CaO-Fels, $t_{80} = 16.2$ min) und F (CaO-DORNAP, $t_{80} = 20.1$ min) Ausdehnungsbeträge von 2.7 bis 3.6 Vol.-% aufweisen.

Tab. 4-4: Ausdehnungsverhalten untersuchter Zementschlämme unter atmosphärischem Druck und Raumtemperatur

Rezeptur	Ausdehnung [Vol.-%]
A	-0.24 (Schrumpfen)
E	2.7 2.8*
F	3.1 3.6*
* Wiederholungsversuch	

Ausdehnungsverhalten unter Druck- und Temperaturbedingungen der Bohrung SB4a/schräg

Das Ausdehnungsverhalten von Zementschlämmen unter Bohrlochbedingungen wurde mit Hilfe einer HPHT-Ausdehnungsmesszelle untersucht. Sowohl für den konventionellen Zementschlamm A als auch für die Quellzementschlämme E und F (vgl. Tabelle 4-5) erfolgten die Messungen entsprechend der Bedingungen in SB4a/schräg unter einem Druck von 10 MPa bei Raumtemperatur.

Um ein nach Ablauf des Quellprozesses evtl. vorhandenes Nachquellpotential nachzuweisen, wurde anschliessend die Versuchstemperatur auf 90°C erhöht. Diese Temperaturerhöhung bewirkt eine Beschleunigung der Hydratation sowohl der Klinkerminerale des Grundzementes als auch des CaO-Quellzusatzes. Durch diese starke Verkürzung der notwendigen Zeit zur Hydratation bzw. Auskristallisation wird der Nachweis eines Nachquellpotentials auch innerhalb einer vertretbaren Versuchsdauer möglich.

Tab. 4-5: Ausdehnungsverhalten (bei 10 MPa, Raumtemperatur) und Restquellpotential (bei 10 MPa, 90° C) der untersuchten Zementrezepturen

Rezeptur	Scherbelastung	Ausdehnung [Vol.-%]	Restquellpotential [Vol.-%]
A	Belastet	-	-
E	Belastet	0.7	7.6
F	Belastet	0	1.1
F	Nicht belastet	0	0.9

Die Ergebnisse der Untersuchungen für die Rezepturen A, E und F (vgl. Tabelle 4-2) in Bezug auf das Ausdehnungsverhalten und das Restquellpotential sind in Tabelle 4-5 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass der konventionelle Zementschlamm A unter einem hydrostatischen Druck von 10 MPa sich weder ausdehnte noch ein Restquellpotential aufwies.

Während beim Quellzementschlamm E (mit CaO-Fels) eine Ausdehnung von 0.7 Vol.-% nachgewiesen wurde, war beim Quellzementschlamm F (CaO-DORNAP) keine messbare Ausdehnung festzustellen. Ein Restquellpotential von 7.6 Vol.-% liess die Rezeptur E für die vorliegende Aufgabenstellung als ungeeignet einstufen (Gefahr der Rissbildung im Verfüllmaterial). Hingegen wiesen sowohl die vorgescherte als auch die nicht gescherte Rezeptur F ein Restquellpotential von ca. 1 Vol.-% auf. Wenn Quellzement für das Verfüllen der Zwischenzonen benutzt wird, bedeutet dies eine mit der Zeit zunehmende Kontaktspannung zwischen Gebirge und Rohr. Durch dieses Restquellpotential, das im Laufe der Zeit zur elastischen Ausdehnung des Zementkörpers führt, besitzt dieser Quellzement die Fähigkeit, eine starke Permeabilitätsbarriere aufzubauen.

4.3.1.5 Festigkeit

Die Würfeldruckfestigkeit und die Haftscherfestigkeit der Quellzementsteine wurden mittels Laborversuchen untersucht.

Um die Würfeldruckfestigkeit zu ermitteln, wurden Versuchskörper verwendet, die mit Hilfe API-genormter, quaderförmiger Versuchsformen mit lichten Weiten von jeweils 50 mm hergestellt wurden.

Die Haftscherfestigkeit wurde an Versuchskörpern ermittelt, die in zylindrischen Versuchsformen mit einem lichten Durchmesser von 50 mm und einer effektiven Einfüllhöhe von 50 mm hergestellt wurden.

Als Einlagerungsmedium wurde zur Simulation des Formationswassers in der Bohrung SB4a/schräg eine synthetisch hergestellte Natriumchloridlösung (26.4 g NaCl, 1000 g Wasser) verwendet. Die Lagerung der Versuchsformen erfolgte in einer Autoklavendruckkammer, die Drücke bis 21 MPa bei Temperaturen bis 150° C ermöglicht. Die Druck- und Temperaturerhöhung zu Beginn der Einlagerung bzw. die Druckentlastung und Kühlung der Proben am Ende der Einlagerungszeit erfolgten API-konform.

Druckfestigkeit

Zur Untersuchung der Druckfestigkeit wurde der API-konform angemischte Zementschlamm nach einer 20-minütigen Scherbelastung in die leicht eingefetteten Versuchsformen eingefüllt. Die Versuchsformen wurden bei Raumtemperatur unter einem Druck von 10 MPa in dem Autoklaven gelagert. Als Einlagerungsmedium wurde die oben beschriebene Salzlösung eingesetzt. Nach einer Lagerungsdauer von 3, 7 und 28 Tagen wurden die entsprechenden Proben mit Hilfe einer hydraulischen Druckpresse auf Druckfestigkeit untersucht.

Die eingesetzte hydraulische Druckpresse besteht im Wesentlichen aus einem Ölbehälter, Druckzylinder und Druckkolben, wobei die Kraftbeaufschlagung der Probe hydraulisch mit einer elektrisch betriebenen Pumpe realisiert wird. Der Versuchskörper

wurde zur Durchführung der Messung seitlich in die Druckpresse eingelegt, um zwischen den Druckplatten der Presse über planparallele Flächen des Versuchskörpers zu verfügen. Zum Ausgleich von Unebenheiten wurde jeweils ein Blatt Papier dazwischen gelegt. Mit einer Rate von 2.5 mm/min wurde die auf den Versuchskörper aufgebrachte Last solange gesteigert, bis ein Bruch eintrat.

Tab. 4-6: Druckfestigkeit der untersuchten Zementrezepturen

Rezeptur	Druckfestigkeit [MPa] nach:		
	3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen
A	13.81	25.35	59.84
E	11.07	18.68	45.42
F	11.18	16.4	41.79

Die ermittelten Druckfestigkeiten der Rezepturen A, E und F (Tabelle 4-2) nach einer Lagerungsdauer von 3, 7 und 28 Tagen sind in Tabelle 4-6 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Druckfestigkeit des konventionellen Zementsteines (Rezeptur A) von 13.8 MPa nach einer 3-tägigen Lagerung bis auf 59.8 MPa nach 28 Tagen Lagerung zunimmt. Die Druckfestigkeiten der Quellszementsteine sowohl mit dem Produkt Fels (Rezeptur E) als auch mit dem Produkt DORNAP (Rezeptur F) liegen in vertretbarem Masse unter denen des konventionellen Zementsteines. Diese niedrigeren Druckfestigkeiten sind einerseits auf den niedrigeren Zementanteil des Quellszementes und andererseits auf die höhere Porosität seiner Matrix zurückzuführen.

Haftscherfestigkeit

Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Vorgehensweise wurde hier die Innenwandung der Versuchsformen mit Hilfe von Bioalkohol von möglichen Fettresten befreit. Die so gereinigten Versuchsformen wurden mit vorgeschertem Zementschlamm gefüllt. Die Versuchsformen wurden für die Dauer von vier Tagen unter atmosphärischen Bedingungen in der Salzlösung gelagert und dann auf Haftscherfestigkeit untersucht.

Zur Ermittlung der Haftscherfestigkeit wurde ebenfalls die oben beschriebene hydraulische Druckpresse eingesetzt. Dafür wurde der Stahlzylinder, der den Zementkörper umschliesst, auf eine innen durchbohrte, zylindrische Auflage gesetzt. Ein zylindrischer Stahlvollkörper übertrug die Kraft auf den Zementkörper. Dabei wurde die aufgebrachte Kraft solange gesteigert, bis im Versuchskörper eine Abscherung an der Grenzfläche Zement/Stahlmantel erfolgte. Die aufgebrachte Last wurde mit Hilfe einer Druckmessdose und eines Linienschreibers in Abhängigkeit von der Zeit grafisch festgehalten.

Tab. 4-7: Haftscherfestigkeiten untersuchter Zementrezepturen

Rezeptur	Haftscherfestigkeit nach 4 Tagen [MPa]
A	1.85
E	2.1
F	4.48

Die nach einer 4-tägigen Lagerung im Salzwasser an den untersuchten Proben gemessenen Haftscherfestigkeiten sind in Tabelle 4-7 wiedergegeben. Die Haftscherfestigkeit beim konventionellen Zementstein (Rezeptur A) beträgt demnach 1.85 MPa, während bei dem Quellzementstein mit dem CaO-DORNAP eine hohe Haftscherfestigkeit von 4.48 MPa erreicht wurde, die einer hohen Kontaktspannung mit den angrenzenden Flächen gleichzusetzen ist. Letzteres ist gleichbedeutend mit einer niedrigen Systempermeabilität.

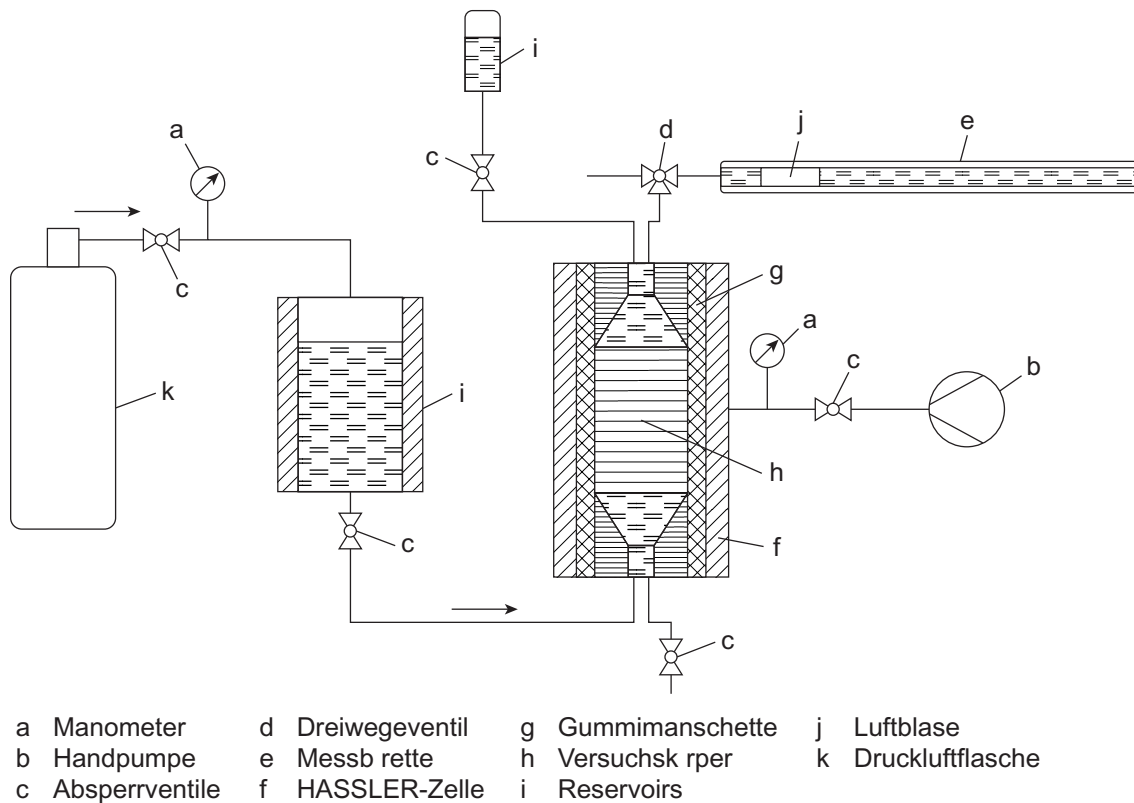
4.3.1.6 Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit des Systems Rohr/Zementstein berücksichtigt sowohl die hydraulischen Eigenschaften an der Phasengrenze Rohr/Zementkörper als auch der Zementmatrix selbst.

Zur Herstellung der Versuchskörper wurden als Versuchsformen Stahlzylinder mit einer Länge von 33 mm, einem Aussendurchmesser von 25.4 mm und einem lichten Durchmesser von 21.2 mm eingesetzt. Die Stahlzylinder wurden nach Befüllung mit Zementschlamm beidseitig mit Stahlscheiben verschlossen, die jeweils vier kleine Bohrungen zur Herstellung einer Verbindung zum Einlagerungsmedium enthielten. Um entsprechend den Bohrlochbedingungen Spülungsreste auf dem Rohr zu simulieren, die eine innige Verbindung zwischen dem Zementkörper und dem Rohr verhindern können, wurden die Versuchsformen vor Befüllung mit dem Zementschlamm zunächst in eine Spülung (Tixoton: 31.4 g, Antisol FL-100: 5.7 g, Wasser: 1000 g) eingetaucht, die der in der Bohrung SB4a/schräg eingesetzten Bohrspülung entspricht. Die befüllten und an beiden Enden mit Stahlscheiben verschlossenen Versuchsformen wurden in einer Probenhalterung vorgespannt, so dass entsprechend den Bohrlochbedingungen eine Ausdehnung des Zementes in axialer Richtung verhindert wurde. Somit führte ein mögliches Ausdehnungspotential des Zementes zur Umverteilung der Hauptstrukturphase in radialer Richtung und folglich zu einer Erhöhung der Kontaktspannung mit den Rohren.

Die auf diese Weise hergestellten Versuchskörper wurden bei Raumtemperatur unter einem Druck von 10 MPa für die Dauer von 3, 7 bzw. 28 Tagen in Autoklaven gelagert; als Einlagerungsmedium kam die oben beschriebene Natriumchloridlösung zum Einsatz (26.4 g NaCl, 1000 g Wasser).

Die Permeabilitätsmessung erfolgte mit Hilfe der o.g. Natriumchloridlösung unter einem Druck von 0.5 MPa. Dabei betrug der eingestellte Manteldruck 1.5 MPa. Das zur Messung der Systempermeabilität eingesetzte Permeameter ist in GHOFRANI et al. (1994) detailliert beschrieben und in Figur 4-1 dargestellt.



Figur 4-1: Permeameter

Die an den Rezepturen A, E und F (Tabelle 4-2) gemessenen Systempermeabilitäten werden in Tabelle 4-8 präsentiert. Es ist ersichtlich, dass die Systempermeabilität des konventionellen Zementkörpers (Rezeptur A) in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer (d.h. vom zunehmenden Hydratationsgrad) keine Änderung erfuhr. Hingegen wurde der mit CaO-DORNAP angesetzte Quellszement (Rezeptur F) mit zunehmendem Reifegrad undurchlässiger, wie dies anhand der Ergebnisse der Untersuchungen der Haftschersfestigkeit (Kap. 4.3.1.5) auch zu erwarten war.

Tab. 4-8: Systempermeabilitäten der untersuchten Zementrezepturen

Rezeptur	Systempermeabilität [μD bzw. $\times 10^{-18} \text{ m}^2$] \approx Durchlässigkeit [$\times 10^{-11} \text{ m/s}$] nach:		
	3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen
A	1.654	1.514	1.552
E	1.45	1.425	0.789
F	1.795	1.433	0.3

4.3.2 Versiegelungsmaterialien

Die Versiegelungsmaterialien werden in der Regel als Suspensionen in das Bohrloch eingebracht. Daher werden unter Kap. 4.3.2.1 zunächst allgemeine Aspekte des Sedimentationsverhaltens, der Filtration durch das entstehende Sedimentbett und dessen Durchlässigkeit diskutiert.

Zur sicheren Beurteilung der Abdichtwirkung eines Pfropfenmaterials sind darüber hinaus gezielte experimentelle Untersuchungen unerlässlich. Es wurden daher Versuche durchgeführt, die neben der Ermittlung charakteristischer Eigenschaften der Pfropfenmaterialien, das Sedimentationsverhalten in einer Suspension sowie die Bestimmung der Durchlässigkeit des entstehenden Sedimentbettes nach Sedimentationsende und nach Kompaktion zum Gegenstand hatten (GHOFRANI et al. 1994). Die Bestimmung der Dichte und der Korngrößenverteilung erfolgten an trockenem Pfropfenmaterial. Die Untersuchung des Sedimentationsverhaltens erfolgte anschliessend mit Hilfe der entsprechend angesetzten Suspension.

4.3.2.1 Sedimentationsverhalten und abgeleitete Durchlässigkeit

Das Sedimentationsverhalten, die Filtration durch das entstehende Sedimentbett und die Durchlässigkeit des Sedimentbettes wurden untersucht.

Sedimentationsverlauf in einer Suspension

In einer mit Versiegelungsmaterialien angesetzten Suspension sedimentieren die schwereren Feststoffpartikel, während die flüssige Phase als Gegenstrom aufsteigt. Bei Suspensionen niedriger Feststoffkonzentration sedimentieren die Feststoffpartikel gemäss dem Gesetz von Stokes. Bei gleicher Dichte ist die Sinkgeschwindigkeit einzelner Körner abhängig vom Quadrat der Partikelgrösse. Damit kommt es im Sedimentbett quasi zu einer Klassierung der Feststoffpartikel von grob (unten) bis fein (oben). Der Sedimentationsvorgang ist abgeschlossen, wenn im Sedimentbett die Feststoffpartikel aufeinander stossen. Beim Sedimentationsvorgang in Suspensionen hoher Feststoffkonzentration ist mit Abweichungen infolge der Sedimentation von Kornkollektiven an Stelle von Einzelkörnern zu rechnen.

Auch die Gegenströmung spielt hinsichtlich der Korngrößenverteilung der Feststoffe im Sedimentbett eine entscheidende Rolle. Durch eine starke Gegenströmung können gröbere Partikel von unten nach oben transportiert werden. Auch eine Erweiterung der Kapillaren im Sedimentbett kann durch diesen Materialtransport auftreten.

Unter Wirkung des bestehenden hydraulischen Gefälles und des Druckes der überlagernden Schichten erfolgt in jedem beliebigen Punkt des Sedimentbettes eine Kompaktion gegen die bestehende Reibungskraft und die Gegenströmung. Der Grad der Kompaktion des Sedimentbettes nimmt daher in Abhängigkeit von der Teufe zu.

Filtrationsverlauf durch das Sedimentbett

Die Filtration durch das unverfestigte Sedimentbett unterscheidet sich grundlegend von der Filtration durch das verfestigte Gestein. Bei Filtration durch verfestigtes Gestein mit konstantem Differenzdruck behält auch die Filtrat-Rate (das pro Zeiteinheit das Filter-

medium passierende Filtrat) einen konstanten Wert. Bei Filtration durch das Sedimentbett bewirkt jedoch der Filtratfluss eine durch Materialtransport bedingte Kompaktion verbunden mit einer gleichzeitigen Abnahme der Sedimentbettdurchlässigkeit. Folglich reduziert sich auch die Filtrat-Rate mit der Zeit und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert.

Um bei den experimentellen Untersuchungen realistische Bedingungen zu realisieren, ist es notwendig, bei Filtration durch das Sedimentbett stets den gleichen hydraulischen Gradient einzustellen:

$$c = h_v / h_e$$

mit:

c: Hydraulischer Gradient

h_v : Vertikale Höhe der Wassersäule über dem Sedimentbettspiegel

h_e : Sedimentbettmächtigkeit nach Sedimentationsende

Für Filtrationsversuche im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde ein hydraulischer Gradient von 2.87 m Wassersäule pro Meter Sedimentbettmächtigkeit gewählt.

Durchlässigkeit des Sedimentbettes

Bei der Filtration durch das unverfestigte Sedimentbett muss von "instationärer Strömung" des Flutmediums ausgegangen werden, da sich die Filtrat-Rate in Abhängigkeit von der Zeit ändert (s.o.). Die Anwendung der Darcy-Gleichung zur Berechnung der Durchlässigkeit führt daher in diesem Fall zu keinen exakten Ergebnissen.

Um dennoch brauchbare Vergleichswerte zur Beurteilung der Durchlässigkeit zu erhalten, wurden folgende Filtrat-Raten zugrunde gelegt:

- a) die mittlere Filtrat-Rate in den ersten 30 Sekunden der Filtration zur Beurteilung der Anfangspermeabilität des Sedimentbettes k_0 ,
- b) die Filtrat-Rate nach Erreichen des statischen Filtrationsgleichgewichtes k_e zur Beurteilung der Permeabilität des Sedimentbettes.

Durchlässigkeit des Sedimentbettes nach Sedimentationsende

Das Sedimentationsende kann dadurch charakterisiert werden, dass keine zeitliche Abnahme der Sedimentbettmächtigkeit mehr festgestellt werden kann. Die zeitliche Entwicklung der Sedimentation ist auch eine Funktion der Durchlässigkeit des umgebenden Gebirges.

Durchlässigkeit des Sedimentbettes nach Kompaktion

Nach dem Ende des Sedimentationsvorganges ist eine weitere Abnahme der Sedimentbettmächtigkeit nur noch durch Kompaktion möglich. In einem geneigten Bohrloch ist für die Kompaktion des Sedimentbettes die Kraftkomponente in der axialen Richtung K_a (Figur 4-2) verantwortlich. Den Kompaktionsdruck P_K erhält man, wenn K_a auf den Querschnitt des Bohrloches bezogen wird:

$$P_K = g * (\rho - \rho_w) * (1 - \varepsilon) * \cos \alpha * H$$

mit:

g : Erdbeschleunigung

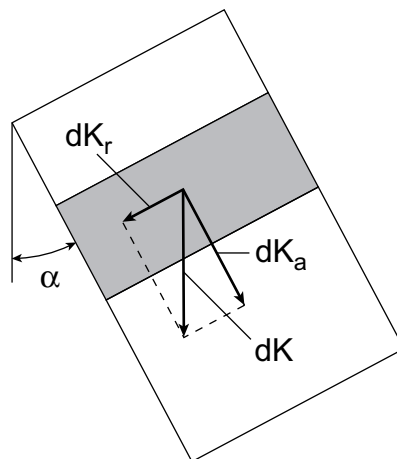
ρ : Dichte des Pfüpfenmaterials

ρ_w : Dichte des Wassers

ε : Gesamtporosität des Sedimentbettes

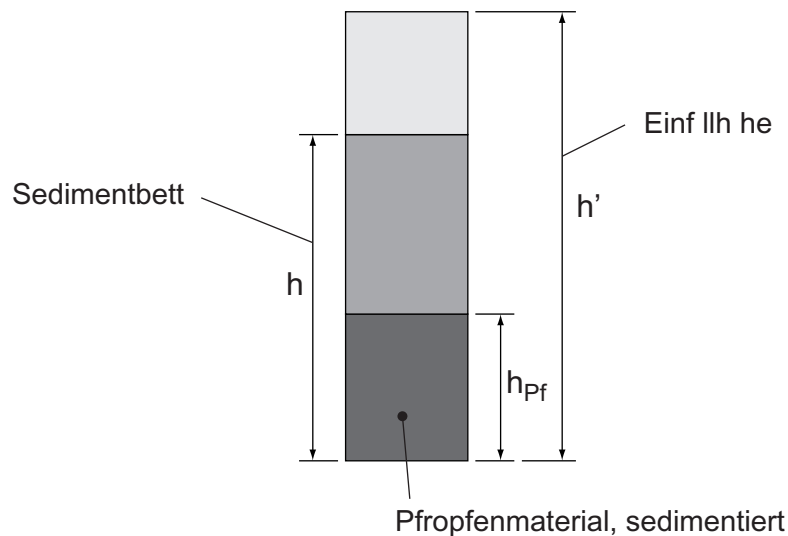
α : Bohrlochneigung

H : Sedimentbettmächtigkeit



Figur 4-2: Zerlegung der Kompaktionskraft in ihre axiale und radiale Komponenten

Um in der Bohrung SB4a/schräg eine Sedimentbettmächtigkeit H zu erreichen, muss eine Strecke mit der axialen Länge H' ($H' > H$) mit entsprechender Suspension befüllt werden. Die notwendige Einfüllhöhe H' lässt sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen im Sedimentationsrohr (Figur 4-3) berechnen.



Figur 4-3: Einfüll- und Sedimentbetthöhe im Sedimentationsrohr

Es gilt:

$$H / H' = h / h'$$

mit:

h : Mächtigkeit des Sedimentbettes im Sedimentationsrohr

h' : Einfüllhöhe im Sedimentationsrohr zu Versuchsbeginn

Bezogen auf die Einfüllhöhe H' lässt sich der Kompaktionsdruck P_K wie folgt berechnen:

$$P_K = g * (\rho_S - \rho_W) * H' * \cos \alpha$$

ρ_S : Dichte der in das Bohrloch eingebrachten Suspension

Dieser Gleichung ist zu entnehmen, dass der am Fusse des Sedimentbettes wirksame Kompaktionsdruck eine Funktion der Bohrlochneigung α , der Dichtedifferenz zwischen der eingebrachten Suspension und dem Anmischwasser sowie der Einfüllhöhe H' ist. Daraus lässt sich ableiten, dass der Grad der Einregelung der Körner des Pfropfenmaterials längs der Sedimentationsstrecke unterschiedlich ist. Entlang dieser Strecke nimmt die Koordinationszahl⁷ der Körner des Pfropfenmaterials zu; folglich muss die Durchlässigkeit des Sedimentbettes in Abhängigkeit von der Teufe abnehmen.

Um die teufenabhängige Durchlässigkeit des Sedimentbettes zu erfassen, ist es notwendig, unter entsprechenden Kompaktionsdrücken aus der einzusetzenden Suspension Tabletten herzustellen, die auf ihre Durchlässigkeit hin zu untersuchen sind.

⁷ Anzahl der Körner, die an einer Pore angrenzen.

4.3.2.2 Sedimentationsverhalten und Durchlässigkeit des Schwerspats

Dichte

Mit Hilfe des Pyknometer-Verfahrens wurde die Dichte des untersuchten Schwerspats zu 4350 kg/m^3 bestimmt.

Korngrössenverteilung

Die Summenkurve der Korngrössenverteilung des Schwerspats wurde mit Hilfe des Laser-Partikel-Sizers bestimmt. Der anhand der Quartilwerte d_{Q3} (75 % des Haufwerks sind kleiner als die Trennkorngrösse) und d_{Q1} (25 % des Haufwerks sind kleiner als die Trennkorngrösse) nach FÜCHTBAUER berechnete Sortierungskoeffizient dieses Pfropfenmaterials beträgt 3.2; der Schwerspat muss daher als sehr schlecht klassiert eingestuft werden, was eine starke Abdichtwirkung des daraus entstehenden Sedimentbettes erwarten lässt.

Rheologie

Zur Ermittlung ihrer rheologischen Eigenschaften wurden Schwerspatsuspensionen mit einer Dichte von 1600, 2000 und 2400 kg/m^3 angesetzt und mit Hilfe des Fann-Viskosimeters, Modell 35 untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-9 wiedergegeben.

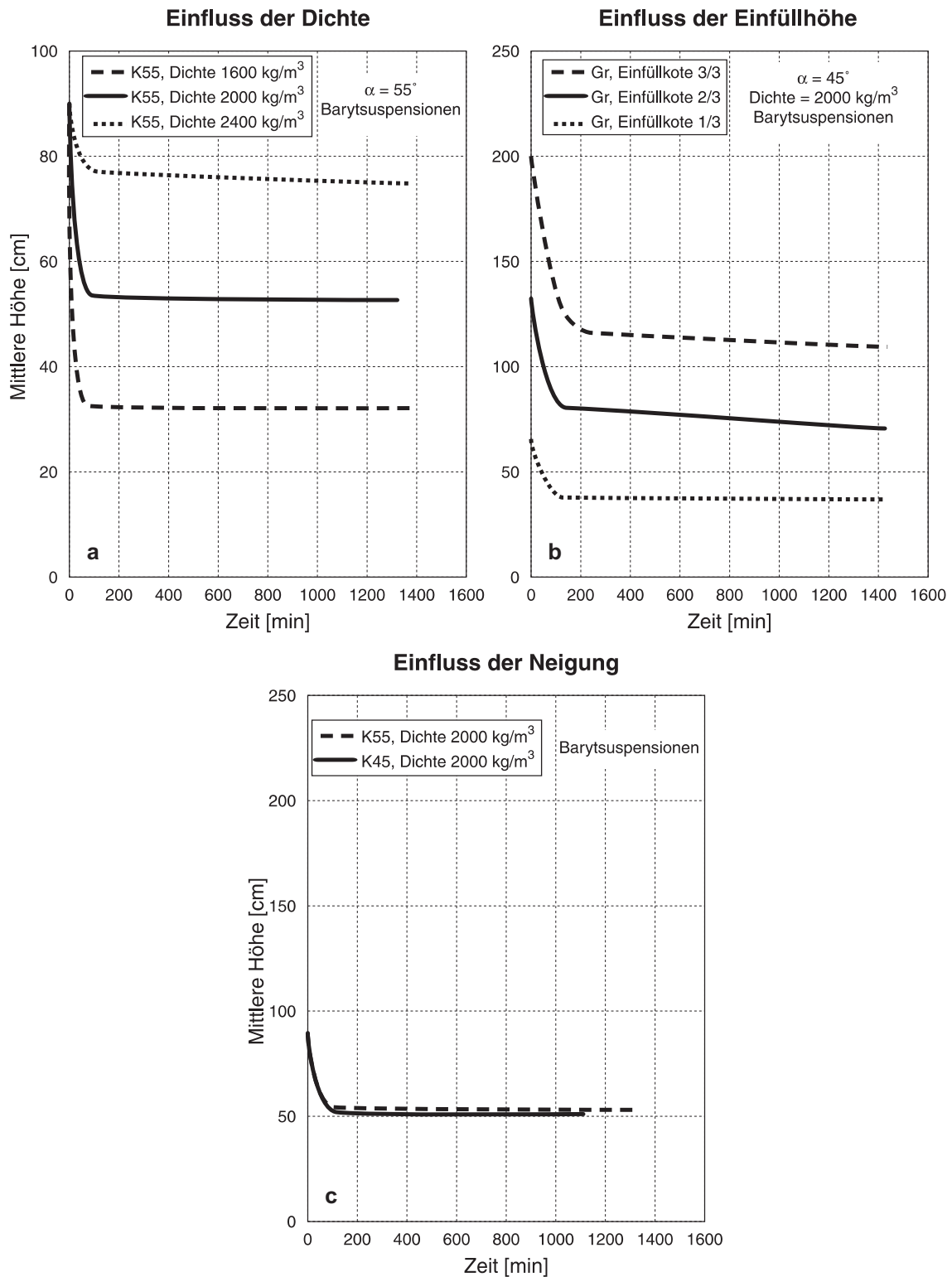
Ein Vergleich dieser Werte mit den rheologischen Eigenschaften untersuchter Zement-schlämme (Tabelle 4-3) lässt erkennen, dass die untersuchten Schwerspatsuspensionen störungsfrei vor Ort verpumpt werden können.

Sedimentationsverhalten

Die in Tabelle 4-9 wiedergegebenen Schwerspatsuspensionen wurden auf ihr Sedimentationsverhalten hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Figur 4-4 grafisch dargestellt.

Tab. 4-9: Rheologische Eigenschaften untersuchter Schwerspatsuspensionen

Rezeptur	Dichte [kg/m^3]	Plastische Viskosität [$10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$]	Bingham- Fließgrenze [Pa]
Schwerspat 389.6 g Wasser 410.5 g	1600	7	0.5
Schwerspat 649.3 g Wasser 350.7 g	2000	13	0.5
Schwerspat 909 g Wasser 291.1 g	2400	27	13.5



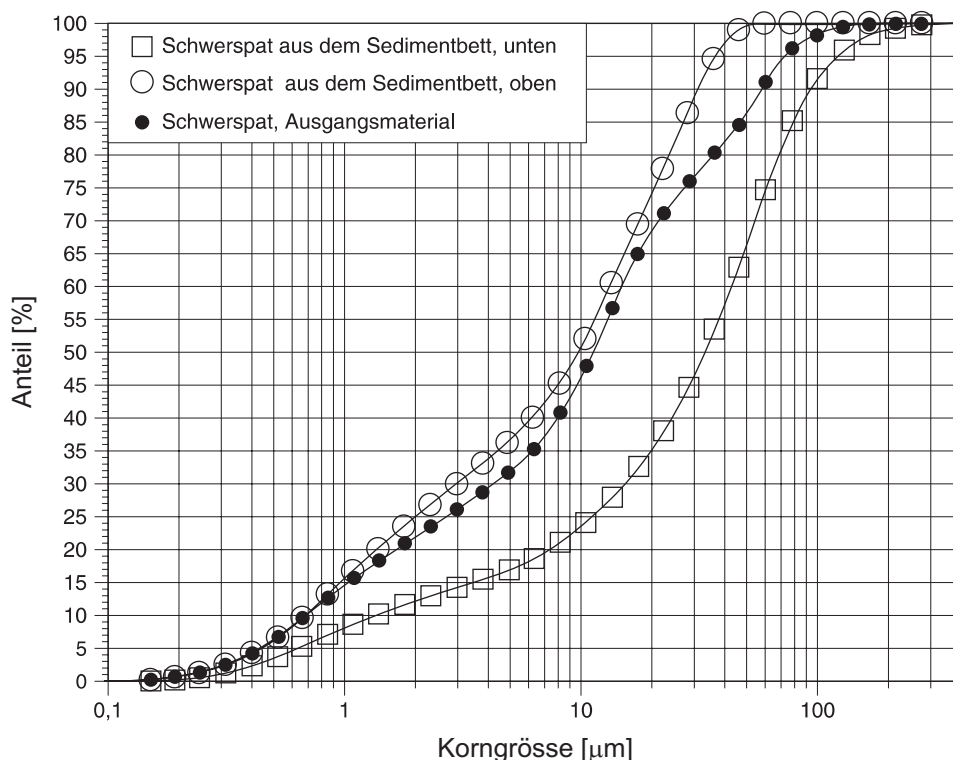
Figur 4-4: Untersuchungen an Schwerspatsuspensionen (Baryt); Einfluss der Parameter: Dichte der Suspension und Neigung sowie Einfüllhöhe des Sedimentationsrohres auf den zeitlichen Sedimentationsverlauf

Figur 4-4a zeigt den Einfluss der Dichte der Schwerspatsuspension auf die Absenkgeschwindigkeit des Sedimentbettspiegels. Es ist ersichtlich, dass der Endzustand der Sedimentation bei der Suspension mit einer Dichte von 1600 kg/m^3 bereits innerhalb der ersten Stunde erreicht ist, während bei der Suspension mit einer Dichte von 2400 kg/m^3 die Sedimentation auch nach Ablauf von 24 h nicht abgeschlossen war.

Aus dem Sedimentationsverhalten der in Figur 4-4b dargestellten Resultate kann abgeleitet werden, dass die Einfüllhöhe des Sedimentationsrohres keinen Einfluss auf den Kompaktionsgrad des Sedimentbettes ausübt. Gleichgültig ob das grosse Sedimentationsrohr (Gr) zu 1/3, 2/3 oder 3/3 mit Suspension gefüllt wurde, blieb das Verhältnis der Sedimentbettmächtigkeit zur Einfüllhöhe des Sedimentationsrohres ungefähr bei 0.58.

Die Figur 4-4c verdeutlicht, dass im untersuchten Bereich die Neigung des Sedimentationsrohres ($K55 = 55^\circ$, $K45 = 45^\circ$) keinen merklichen Einfluss auf das Sedimentationsverhalten der Suspension ausübt.

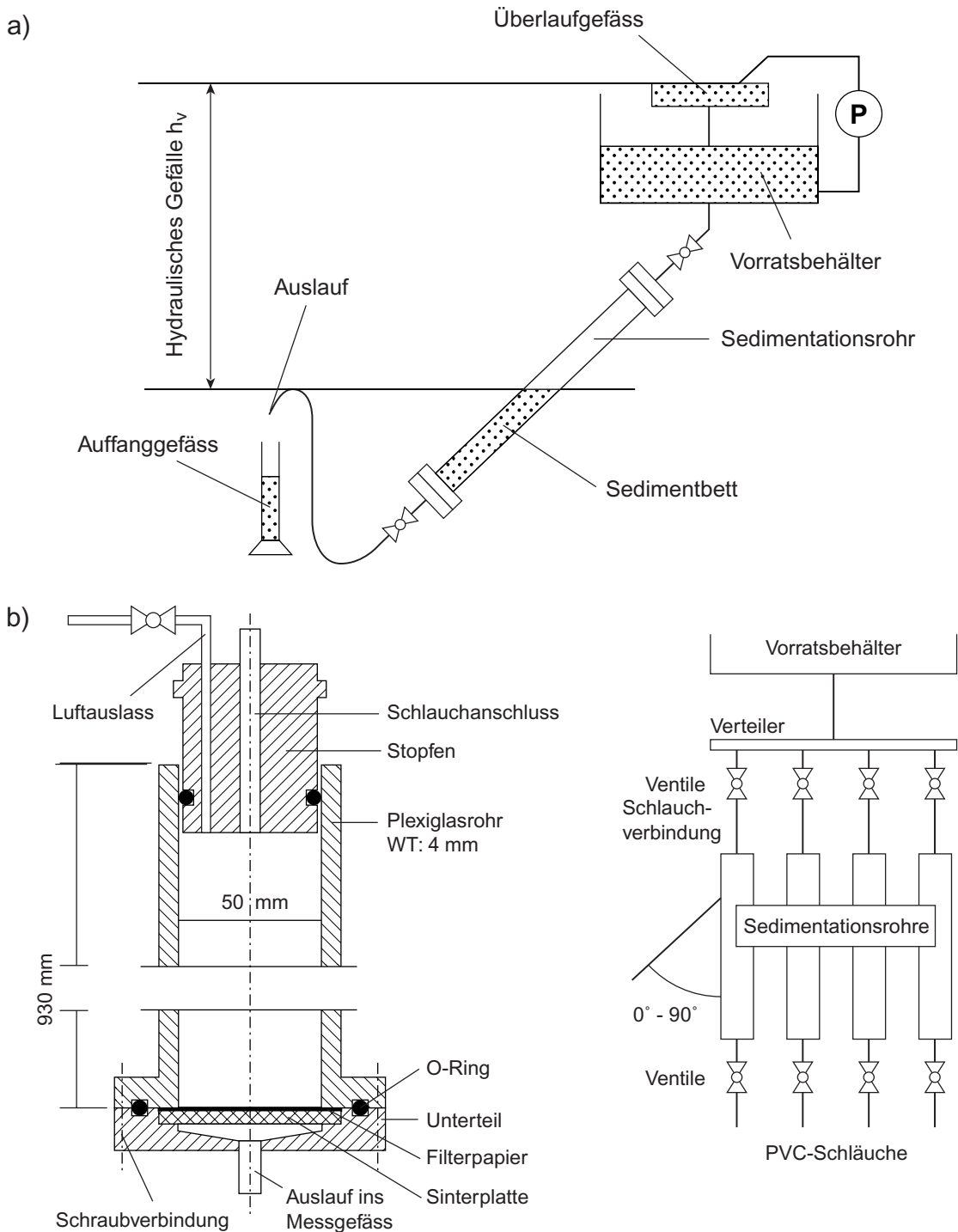
In Figur 4-5 sind die Summenkurven der Korngrössenverteilung der Proben, die dem Schwerspatsedimentbett (oben und unten) und dem Schwerspat in angeliefertem Zustand entnommen worden waren, dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es im Vergleich zum Ausgangsmaterial im unteren Bereich des Sedimentbettes zu einer Feinkornverarmung kommt, während im oberen Bereich eine Feinkornanreicherung nachzuweisen ist.



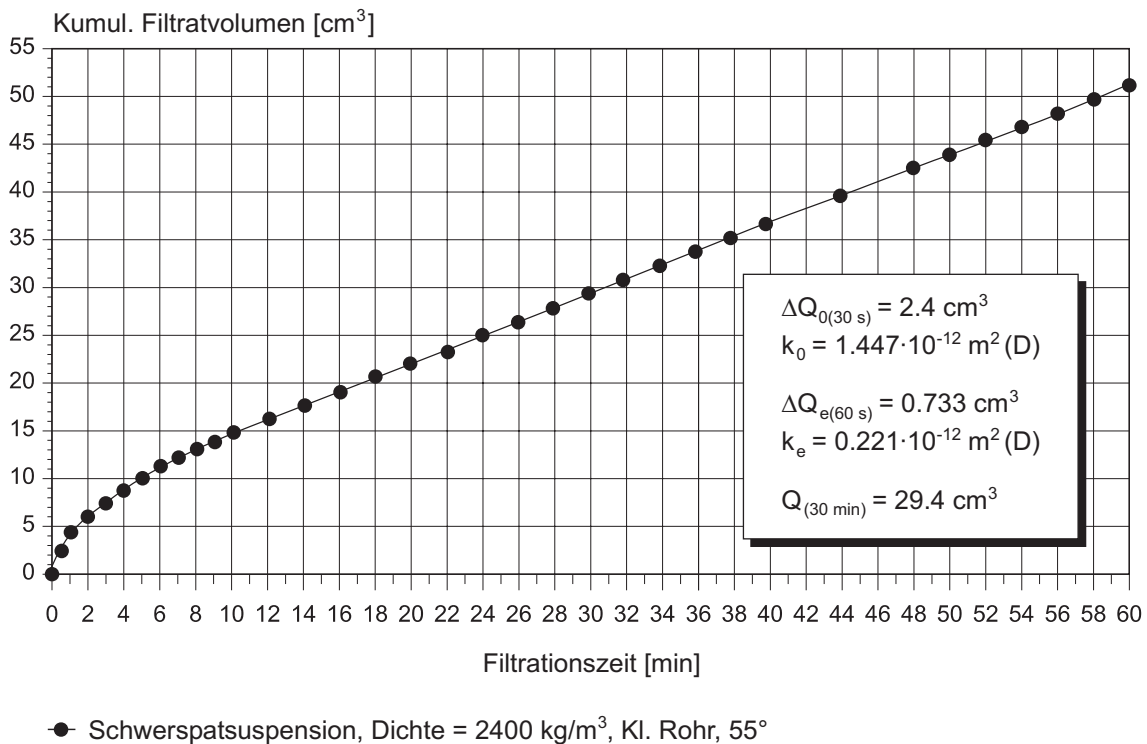
Figur 4-5: Summenkurven der Korngrössenverteilung des Schwerspats

Filtrationsverhalten

Zur Durchführung der Filtrationsuntersuchungen wurden nach Beendigung der Sedimentationsphase die Ventile am unteren Ende der Sedimentationsrohre geöffnet (siehe Figur 4-6). Damit wurden unter dem bestehenden hydraulischen Gefälle die Filtration durch das Sedimentbett eingeleitet und die Zeitmessung gestartet.



Figur 4-6: Sedimentations-/Permeameteranlage



Figur 4-7: Kumulatives Filtratvolumen durch das Sedimentbett aus Schwerspat in Abhängigkeit von der Zeit

In Figur 4-7 ist exemplarisch das kumulative Filtratvolumen durch das Sedimentbett einer Schwerspatsuspension mit einer Dichte von 2400 kg/m³ in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kurve des Filtratvolumens nach einer bestimmten Zeit in eine Gerade übergeht (nach ca. 10 min). Die Filtrat-Rate bleibt somit konstant, so dass ein Filtrationsgleichgewicht erreicht ist. Ohne weitere Kompaktion wird sich die Durchlässigkeit des Sedimentbettes dann nur noch unwesentlich ändern.

Vergleicht man die Ergebnisse der mit Schwerspat durchgeführten Filtrationsuntersuchungen, zeigt sich, dass für eine Suspensionsdichte von 1600 kg/m³ das kumulative Filtratvolumen nach einer Filtrationszeit von 30 Minuten ca. 52.7 cm³ beträgt. Dagegen wird für Suspensionsdichten von 2000 bzw. 2400 kg/m³ deutlich weniger gemessen (27.5 bzw. 29.4 cm³). Daraus kann abgeleitet werden, dass von einer Schwerspatsuspension mit einer Dichte von 2000 kg/m³ bzw. 2400 kg/m³ eine bessere Abdichtwirkung als diejenige mit Dichte 1600 kg/m³ zu erwarten ist, die Suspensionsdichte von 2000 kg/m³ jedoch das Optimum darstellt.

Durchlässigkeit des Schwerspatsedimentbettes nach Sedimentationsende

Tabelle 4-10 gibt die Durchlässigkeitswerte der untersuchten Schwerspatsedimentbetts wieder.

Legt man die Permeabilität k_0 nach 30 Sekunden Filtration durch das Sedimentbett (vgl. Kap. 4.3.2.1) zugrunde, könnte aus Tabelle 4-10 abgeleitet werden, dass Suspen-

sionen niedrigerer Dichte (siehe 55° und 1600 kg/m³) besser abdichten. Wenn jedoch die Permeabilitätswerte nach einer 30-minütigen Filtration durch das Sedimentbett (k_e) herangezogen werden, so ist erwartungsgemäss die Dichtwirkung bei Schwerspatsuspensionen mit einer Dichte von 2000 bzw. 2400 kg/m³ stärker.

Dieser Tabelle ist ferner zu entnehmen, dass erwartungsgemäss die Durchlässigkeit des Sedimentbettes in einer flacheren Bohrung (hier 55°) höher ist, als in einer steileren Bohrung.

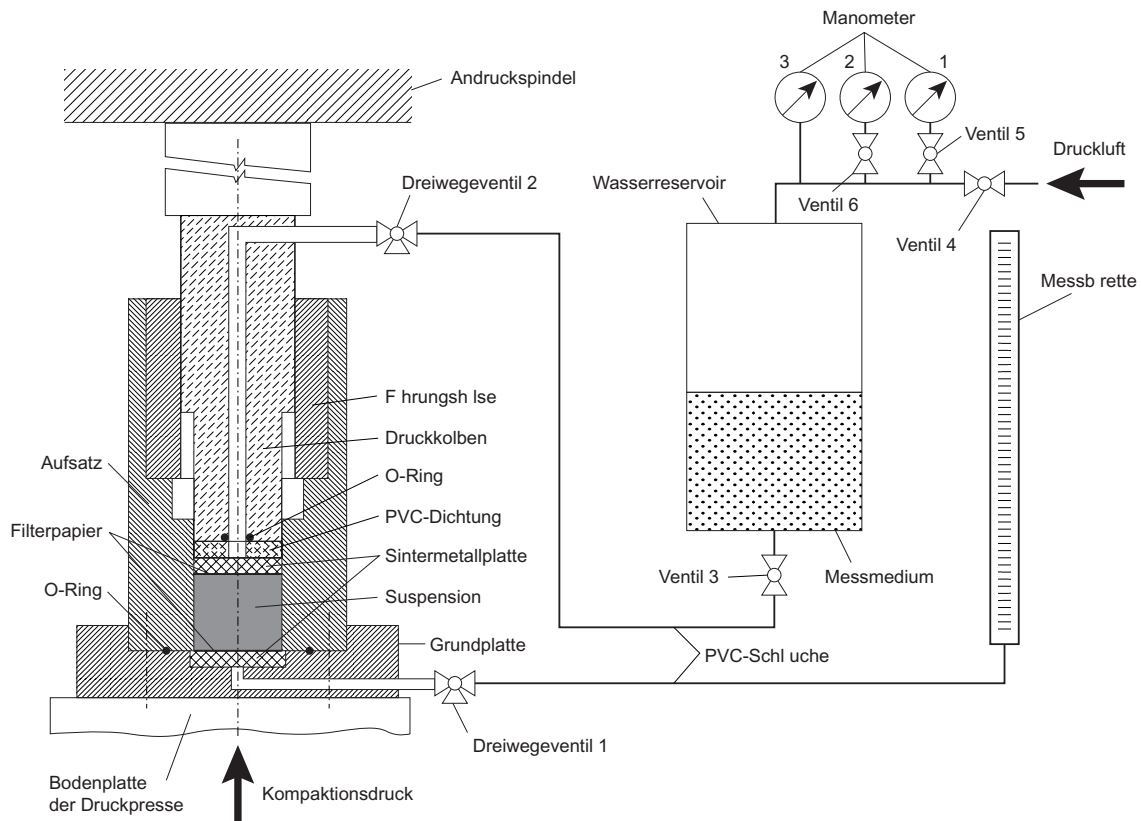
Tab. 4-10: Permeabilität/hydraulische Durchlässigkeit der aus Schwerspatsuspensionen entstandenen Sedimentbette

Sedimentationsrohr	Klein (KI)				Gross (Gr)	
	45°	55°			45°	
Suspensionsdichte, kg/m ³	2000	1600	2000	2400	2000	
Einfüllhöhe	3/3					1/3
Permeabilität nach 30 s k_0 [$\times 10^{-12}$ m ²] \approx K_0 [$\times 10^{-5}$ m/s]	1.207	0.663	2.319	1.447	2.358	1.278
Permeabilität nach 30 min k_e [$\times 10^{-12}$ m ²] \approx K_e , [$\times 10^{-5}$ m/s]	0.095	0.573	0.172	0.221	0.11	0.061

Durchlässigkeit des Sedimentbettes nach Kompaktion

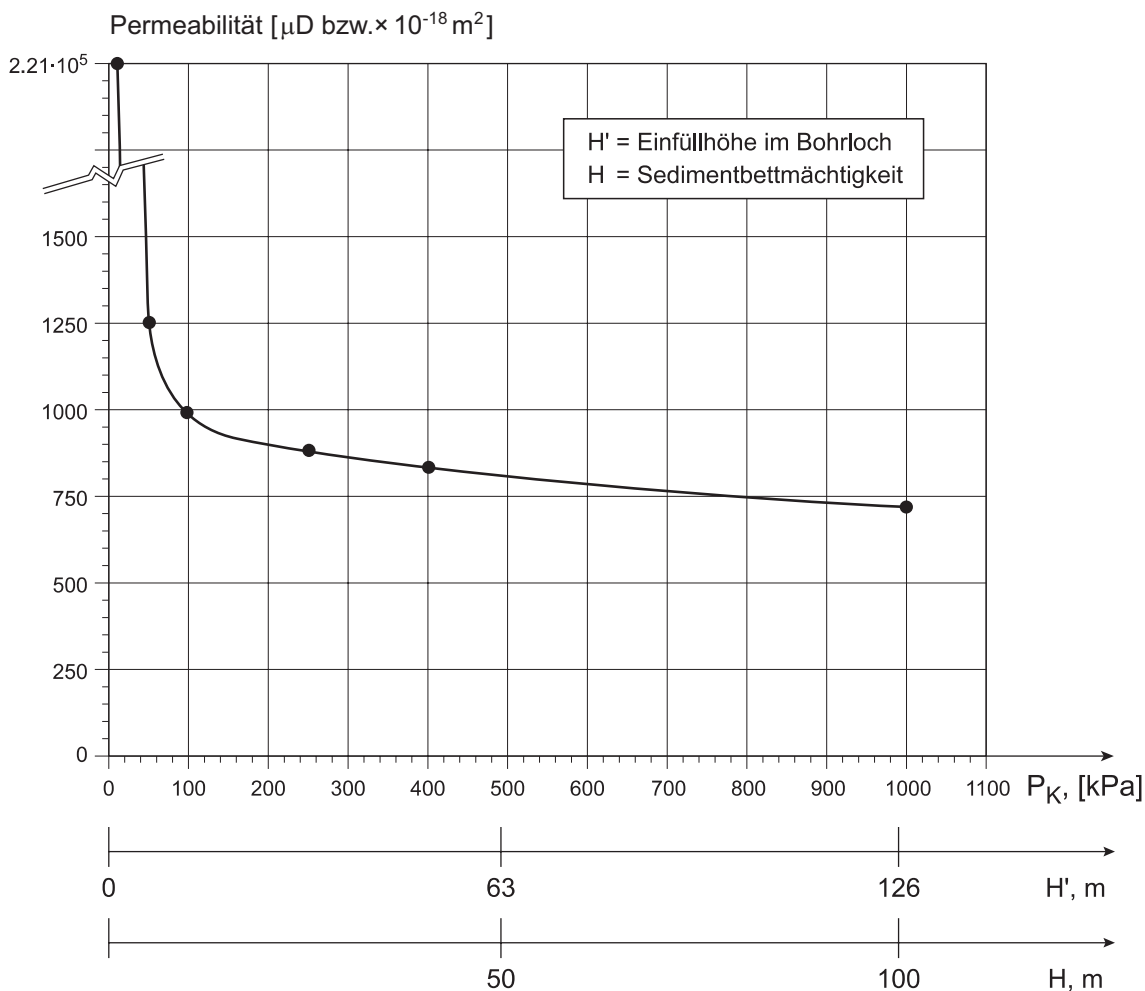
Bei einer angenommenen Versiegelungsstrecke von $H = 100$ m beträgt für eine Schwerspatsuspension mit einer Dichte von 2400 kg/m³ die erforderliche Einfüllhöhe im Bohrloch $H' = 126$ m (siehe Gleichung in Kap. 4.3.2.1). Dabei liegt der Kompaktionsdruck am Fusse des Sedimentbettes bei 993 kPa.

Zur Bestimmung der Permeabilität des Sedimentbettes in verschiedenen Teufenpunkten der mit Schwerspat versiegelten Strecke wurden mit Hilfe der in Figur 4-8 dargestellten Versuchsanlage Untersuchungen unter Kompaktionsdrücken von 50, 100, 250, 400 und 1000 kPa durchgeführt.



Figur 4-8: Kompaktionseinrichtung zur Herstellung von Tabletten aus Suspensionen und zur Messung ihrer Durchlässigkeit

Die gemessenen Permeabilitätswerte sind in Figur 4-9 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Permeabilität des Sedimentbettes von $2.21 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ (entspricht einer hydraulischen Durchlässigkeit $K_e = 2.21 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), gemessen im Sedimentationsrohr unter einem Kompaktionsdruck von 7.3 kPa auf eine Permeabilität von $1.26 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ ($K = 1.26 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) unter einem Kompaktionsdruck von 54 kPa bzw. auf $7.20 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ($K = 7.20 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$) unter einem Kompaktionsdruck von 1000 kPa abnimmt.



Figur 4-9: Abhängigkeit der Permeabilität des Sedimentbettes aus Schwerspat vom Kompaktionsdruck P_K ; H' : Einfüllhöhe im Bohrloch, H : Sedimentbettmächtigkeit

4.3.2.3 Durchlässigkeit und mechanisches Verhalten des Quellons HD

Die Bentonit-Magnetit-Pellets der Fa. SBF Wasser und Umwelt wurden bezüglich ihres Durchlässigkeitsverhaltens (GHOFRANI 1995) und Sinkverhaltens in einer Wassersäule untersucht.

Durchlässigkeit

Mit einer Schüttdichte der Pellets von 1400 kg/m^3 ergibt sich im Bohrloch nach der Hydratation des Tones eine Paste mit einer Dichte von 1881 kg/m^3 . Bei einer Bohrlochneigung von 45° beträgt der Kompaktionsdruck am Fusse des Sedimentbettes 183 kPa.

Zur Durchführung der Untersuchung wurden Ton-Pellets zunächst in einer Achatmühle fein vermahlen, um den anschliessenden Hydratationsprozess des Tones zu be-

schleunigen. Mit Hilfe eines hochoberigen Mixers wurden dann 100 g Quellon HD innerhalb 15 min in 350 g Wasser aufgeschlämmt. Danach wurde die Kompaktionskammer (Figur 4-8) mit 20.59 g Tonschlamm gefüllt. Unter einem Druck von 190 kPa wurde anschliessend der Kompaktionsprozess eingeleitet und nach ca. 90 h zu Ende geführt.

Zur Messung der Permeabilität wurde die nach wie vor unter dem Kompaktionsdruck stehende Tontablette einem Differenzdruck von 100 kPa ausgesetzt. Innerhalb einer Messzeit von 1800 s konnte kein Filtratfluss nachgewiesen werden. Die Ablesegenauigkeit der eingesetzten Messbürette liegt bei 0.02 cm^3 . Mit den Abmessungen der gepressten Tablette (Durchmesser: 3 cm, Durchflutungsstrecke bzw. Dicke: 0.4 cm), der dynamischen Viskosität des Flutmediums (Wasser) von $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ und den o.g. Einstell- und Messgrössen würde sich die Durchlässigkeit der Tablette mit $0,02 \text{ cm}^3$ Filtratanfall (Ablesegenauigkeit der Messbürette) zu $0.63 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ (Durchlässigkeit $K = 6.3 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$) ergeben. Somit kann die aus Quellon HD gepresste Tablette als sehr gering durchlässig angesehen werden.

Mechanisches Verhalten bei Schüttung in wassergefüllten Bohrungen

In Ergänzung zu den von GHOFRANI (1995) durchgeführten Versuchen (s.o.) wurde ein Versuch durchgeführt, der das Verhalten sowie die mechanische Beanspruchung und das resultierende Auflösungsverhalten von Quellon HD beim Einbringen durch Schüttung in Bohrlochtiefen von ca. 650 m bei 45 Grad Neigung untersuchte.

Ein transparentes Plastikrohr (Kernrohrliner, ID 96 mm) von ca. 260 cm Länge wurde auf einem Verstärkungsträger montiert. In der Mitte des Verstärkungsträgers wurden Seilschlaufen befestigt (Waage-Prinzip). Das Rohr wurde beidseitig verschlossen, die Verschlusskappen an ihrer Innenstirnfläche mit 3 mm starkem Schaumstoff-Vlies gepolstert, um die Anschlagbelastung der Pellets zu verringern. Die freie Innenlänge (Fallstrecke) betrug 220 cm. Durch Hochziehen der Einrichtung an ihren Seilschlaufen in die entsprechende Höhe mit einem Portalkran wurde der Winkel beim beidseitigen Kippen der Einrichtung bis zum jeweiligen Bodenanschlag auf 45 Grad eingestellt.

Das Rohr wurde vollständig mit Wasser gefüllt. Nach Beigabe von 70 Stück Quellon HD Pellets wurde das Rohr verschlossen und sofort mit dem Fallversuch begonnen: 295-mal wurde die Einrichtung nach dem Wippenprinzip gekippt, sobald alle Pellets jeweils am Ende der Fallstrecke angelangt waren. Somit legten die Pellets insgesamt einen Fallweg von 650 m unter 45 Grad Neigung zurück. Durch die Versuchsanordnung ergaben sich gegenüber den realen Verhältnissen insofern ungünstigere Bedingungen, als dass die Pellets jeweils nach einer Fallstrecke von 220 cm an den Rohrverschlusskappen aufprallen mussten und somit zusätzlich mechanisch belastet wurden.

Die Sinkgeschwindigkeit zu Beginn betrug ca. 33 m/min. Nach 35 min war eine Wegstrecke von 650 m zurückgelegt mit einer durchschnittlichen Sinkgeschwindigkeit von 18.6 m/min. Dies entspricht den Angaben des Herstellers. Leichte Anquellerscheinungen waren erstmals nach ca. 20 min durch eine leichte Trübung des Wassers bemerkbar. Die anschliessende Reduktion der Sinkgeschwindigkeit lässt sich auf das beginnende Zusammenkleben der Pellets zurückführen (höherer rheologischer Verdrängungswiderstand). Letzteres ist ein Folgeerscheinung der erhöhten mechanischen Beanspruchung beim 295-maligen Aufprall (und erneuter Beschleunigung) an den Rohrenden. Trotz dieser konservativen Versuchsbedingungen konnten jedoch die

beobachteten Lösungs- und Anquellerscheinungen als gering bezeichnet werden. Die Konsistenz der einzelnen Pellets blieb sehr gut erhalten.

Beim Einsatz in der Bohrung (Schüttung durch glattes Bohrgestänge mit anschliessender Gestängerotation und leichter Pumpunterstützung) sind erheblich weniger belastende Bedingungen gegeben. Es sind geringere Sinkzeiten und somit auch geringere Anquellungen zu erwarten. Bei sorgfältigem Schüttvorgang ist keine Brückenbildung im Bohrgestänge zu erwarten.

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialuntersuchungen

Die wichtigsten Parameter von potentiellen Verfüll- bzw. Versiegelungsmaterialien für Zwischenzonen und Schlüsselzonen wurden mittels geeigneter Laborversuche untersucht. Die Untersuchungen betrafen folgende Materialien:

- Verfüllmaterial: Konventionelle Tiefbohrzemente und CaO-Quellzemente,
- Versiegelungsmaterial: Schwerspat (Baryt) und Quellon HD.

Die wesentlichen Ergebnisse der Laboruntersuchungen lassen sich für die bei der Verfüllung und Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg letztlich zum Einsatz kommenden Materialien (CaO-Quellzemente, Schwerspat und Quellon) wie folgt zusammenfassen:

Quellzemente

Verpumpbarkeit

Der mit CaO-DORNAP angesetzte Quellzement weist eine Versteifungszeit von 7 Stunden auf. Im Vergleich dazu zeigt ein API-Tiefbohrzementschlamm der Klasse G mit einem Wasser-Zement-Faktor von 0.4 ohne Verflüssiger-/Verzögererzusatz eine Versteifungszeit von rund 6 Stunden. Somit ist das Einbringen in die Bohrung von mit CaO-DORNAP angesetztem Quellzement problemlos.

Druckfestigkeit und Haftscherfestigkeit

Die Parameter liegen sowohl für den CaO-Quellzement als auch für den konventionellen Tiefbohrzement der Klasse G innerhalb der vom American Petroleum Institute geforderten Grenzen.

Quellfähigkeit/Expandierfähigkeit

Die auf dem Markt als "quellfähige Zemente" erhältlichen Zemente weisen allenfalls ein geringeres Schrumpfen auf als die konventionellen Zemente. Bei CaO-Quellzementen wird im Gegensatz dazu eine reelle Matrixausdehnung nachgewiesen.

Durchlässigkeit

Die Systemdurchlässigkeit ist bei mit CaO-DORNAP angesetztem Zement erheblich geringer als beim konventionellen Zement. Die nach 28 Tagen ermittelten Werte liegen typischerweise unterhalb von 10^{-11} m/s.

Versiegelungsmaterialien

Verpumpbarkeit

Die Verpumpbarkeit stellt beim Schwerspat (Baryt) und beim Quellon HD kein Problem dar.

Sedimentationsverhalten und Abdichtwirkung

Der beobachtete Sedimentationsvorgang bei Schwerspat (Baryt) ist innerhalb einer Sedimentationszeit von 24 Stunden abgeschlossen.

Die Neigung des Sedimentationsrohres hat im untersuchten Bereich keinen wesentlichen Einfluss auf den Sedimentationsvorgang.

Die Sedimentationsgeschwindigkeit in der Anfangsphase der Filtration ist ein Mass für die axiale Durchlässigkeit unmittelbar nach der Versiegelung. Der Grenzwert der Filtrationsgeschwindigkeit durch das Sedimentbett kann als Mass für die axiale Durchlässigkeit der Bohrung nach längerer Lagerungsdauer herangezogen werden. Die Suspensionen höherer Dichte führen tendenziell zu einer besseren Abdichtung.

Die nach Kompaktion ermittelten Durchlässigkeiten stellen diejenigen Werte dar, die für die Bedingungen in der Bohrung repräsentativ sind. Für Schwerspat werden z.B. Werte geringer als 10^{-8} m/s bei einem Kompaktionsdruck von 1000 kPa ermittelt, während für Quellon HD bereits bei einem Kompaktionsdruck von 190 kPa Werte geringer als 10^{-11} m/s erreicht werden.

5 VERSIEGELUNGSPROGRAMM

5.1 Einleitung

Das verwendete Konzept hatte einerseits die zeitlichen Aspekte einer längeren Bau- und Betriebsphase des Endlagers und eines langen Einschlusszeitraums der Abfälle zu berücksichtigen, andererseits auch die geologisch/technischen Randbedingungen der Bohrung sowie die technische Machbarkeit der Verfüllungs-/Versiegelungsmethodik. Ein Versiegelungsprogramm wurde vor der Realisierung der Bohrung ausgearbeitet und beruht daher auf einer modellhaften Anordnung der Versiegelungskomponenten.

Das allgemeine Versiegelungsprogramm, das im folgenden Kap. 5.2 beschrieben wird, war später den in der Bohrung angetroffenen Verhältnissen anzupassen. Die resultierende, definitive Ausführung der Versiegelung, wie sie für SB4a/schräg umgesetzt wurde, wird in Kapitel 7 vorgestellt, zusammen mit einer chronologischen Dokumentation und den Einbaubericht der am Standort durchgeführten Versiegelungsarbeiten (Kap. 7.2 und 7.3).

5.2 Versiegelungsprogramm

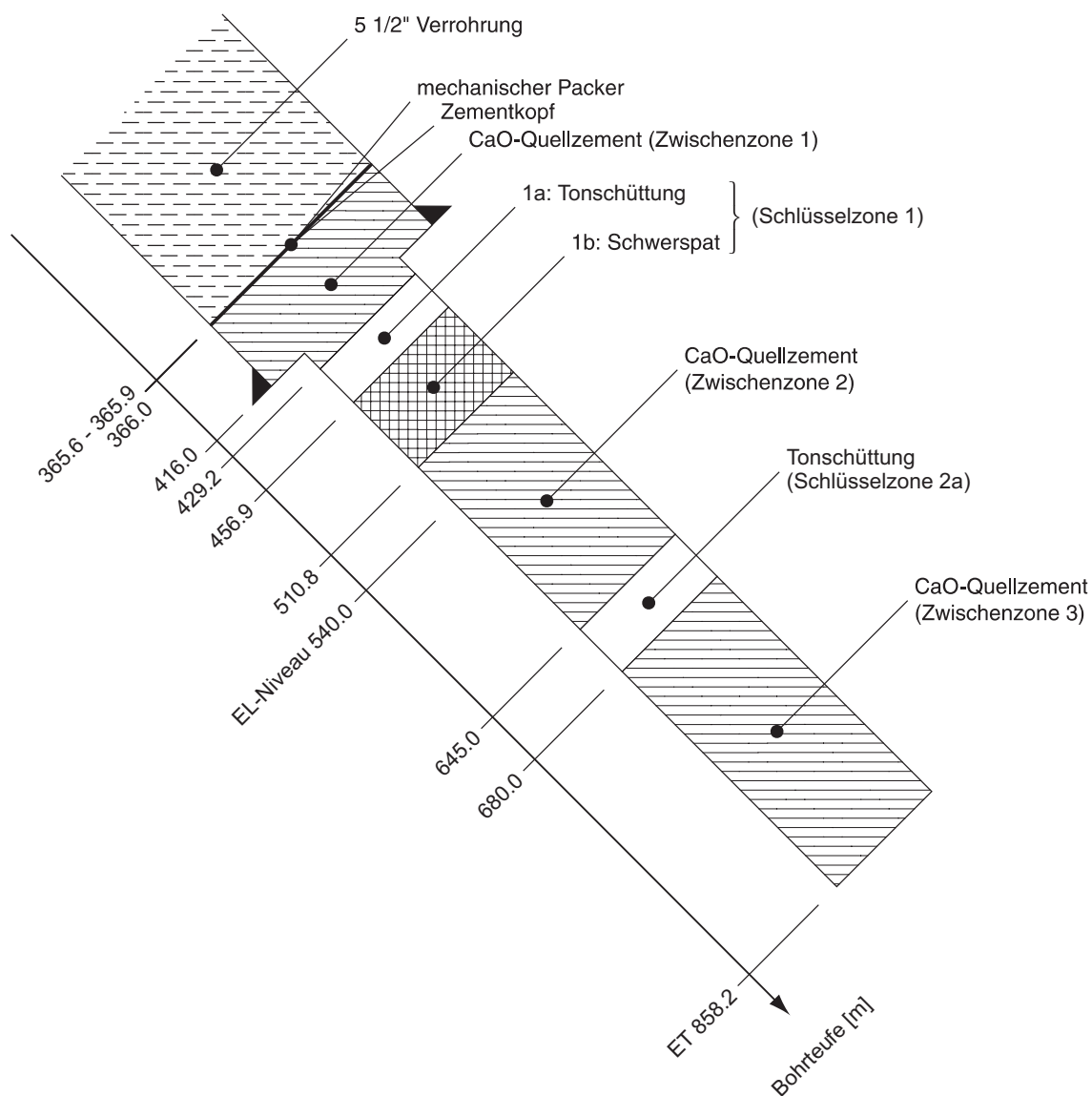
Das erarbeitete Versiegelungsprogramm besteht aus einem Mehrkomponentensystem (Kap. 3.3) mit (Figur 5-1):

- Schlüsselzonen aus Ton oder Ton/Schwerspatsedimentbett und
- Zwischenzonen aus CaO-Quellzement.

Es stützt sich weitgehend auf die Ergebnisse der materialtechnischen Voruntersuchungen und der am Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung (ITE) der Technischen Universität Clausthal durchgeführten Studie mit Konzeptvorschlag (GHOFRANI et al. 1994) und auf verschiedene Expertisen (PUSCH 1994).

Im Zusammenwirken mit der Sedimentstruktur des Schwerspatbettes bzw. den Zementbrücken weist das Mehrkomponentenversiegelungskonzept eine hohe und andauernde Dichtwirkung auf. Das für die Tonschüttungen der Schlüsselzonen ausgewählte Produkt (Quellon HD) wurde eingehend evaluiert (Kap. 4.3.2.3) und wies unter den speziellen Bohrloch- und Einbaubedingungen ein äusserst günstiges Verhalten auf.

Anzahl, Länge und Lokation der einzelnen Komponentenzonen wurden nach Abschluss der Bohr- und Testarbeiten den angetroffenen Bohrlochbedingungen und hydraulischen Gegebenheiten (u.a. Druckentwicklung im Langzeitbereich) angepasst. Gewisse verfahrenstechnische Anpassungen wurden auch durch die gegebene spezifische Bohrausrüstung und die logistischen Möglichkeiten vor Ort vorgenommen.



Figur 5-1: Mehrkomponentenversiegelung für die Bohrung SB4a/schräg mit Teufenangaben gemäss realisierter Versiegelung

5.2.1 Systemdurchlässigkeit und Barrierenwirkung

Die hydraulische Bewertung des vorgeschlagenen Systems erfolgte, wie später bei der realisierten Versiegelung, nach einem einheitlichen Verfahren. Basisdaten und Berechnungsgänge werden ausführlich in Kapitel 8 behandelt, das den sicherheitstechnischen Nachweis des realisierten Systems beschreibt. Der Übersichtlichkeit und Konsistenz halber werden hierunter ausschliesslich die Zahlen zusammengefasst, welche der realisierten Versiegelung entsprechen und in Kapitel 8 detailliert beschrieben werden.

Die wesentlichen Annahmen, die bereits bei der Planung der Versiegelung formuliert wurden, sind:

- Für die effektive hydraulische Durchlässigkeit der Gesamtstrecke wird das harmonische Mittel der einzelnen K-Werte berechnet.
- Für die K-Werte der verschiedenen Materialien (Quellzement, Tonschüttung, Schwerspat) wird unterschieden zwischen einer kurzzeitigen Periode (Betriebsphase) und einer langzeitigen Periode (Nachbetriebsphase) mit jeweils realistischen und konservativen Werten. Für die zahlenmässige Angabe der Werte wird auf Kap. 8.1.2 verwiesen.
- Für die hydraulischen Gradienten werden ebenfalls zwei Fälle gerechnet, d.h. kurzzeitig (Betriebsphase) bzw. langfristig (Nachbetriebsphase). Die Annahme für die Betriebsphase geht davon aus, dass im extremsten Fall die Bohrung eine direkte Verbindung zu einem der Untertage-Bauwerke darstellt. Dabei beträgt die Potentialdifferenz 400 m (940 – 540 m ü.M.) und ist abwärts gerichtet. Für die Nachbetriebsphase wurde die extreme Annahme getroffen, dass das hydraulische Potential auf Endlagerebene bis auf 1200 m ansteigt und so zu einer Differenz von 260 m (1200 – 940 m) führt, die aufwärts gerichtet ist.
- Die für die Gradienten massgebende Länge der Versiegelungsstrecken beträgt entsprechend der geometrischen Vorgaben: (a) 144.9 m, falls nur der Bereich oberhalb der Endlagerzone betrachtet wird, und (b) 492.3 m, falls man das gesamte Bohrloch betrachtet. Dies ergibt Gradienten von 0.5 – 2.8.
- Die Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone wurde als Faktor 100 gegenüber dem intakten Wirtgestein eingesetzt. Diese Annahme wird bestätigt durch die Ergebnisse der Hydrotests in der Palfris-Formation der Bohrungen SB1, SB3 und SB4, die ein Composite-Systemverhalten zeigten – also verschiedene Durchlässigkeiten für eine innere und äussere Zone um das Bohrloch (NAGRA 1993).

Aus diesen Annahmen konnte ermittelt werden, dass die maximal zu erwartenden Flüsse durch die versiegelte Bohrung ohne Auflockerungszone (s. Tabelle 8-3, Fluss zwischen Endlagerniveau und Oberfläche, Nachbetriebsphase) bis 2.5 l/a betragen, während diejenigen durch die Auflockerungszone (s. Tabelle 8-3, Fluss zwischen Endlagerniveau und Oberfläche, Nachbetriebsphase) 2.4 l/a betragen.

5.2.2 Einbringtechnik

Die im Versiegelungskonzept vorgeschlagenen Verfahren zum Einbringen der einzelnen Barrieren stützen sich auf Methoden und technische Geräte, die in der Tiefbohrindustrie vielfach einsatzerprobt sind und dem Stand der Technik entsprechen (Kap. 3.4). Somit kann gewährleistet werden, dass das Einbringen der Materialien unter Einhaltung der üblichen Qualitätskriterien problemlos und störungsfrei erfolgen kann.

Zementschlamm

Die Zementschlämme werden nach vorgehender Bohrlochreinigung mit herkömmlichem Verfahren ("Balanced Method") eingebracht. Wie auch von allen anderen Materialien werden Beistellproben sichergestellt. Die bereits verblendete Zementmischung wurde

sowohl bei Fa. Halliburton, Celle, als auch am ITE TU Clausthal von Prof. Dr. Ghofrani unter Verwendung von Originalwässern des Wellenbergs im Autoklaven geprüft. Sie entspricht in ihren Qualitätsmerkmalen den geforderten Spezifikationen und übertrifft diese sogar hinsichtlich Druckfestigkeit und Dichtigkeit (vgl. Kapitel 4).

Schwerspatsuspension

Das Verhalten der Schwerspatsuspensionen und -sedimentbette wurden bereits ausführlich erprobt (Kap. 4.3.2.2). Die erforderlichen Gerätschaften zum Ansetzen und Einbringen der Suspensionen im Feldeinsatz wurden angefertigt und in einem 1:1-Versuch mit 2 Tonnen Schwerspat geprüft.

Quellon HD

Wie in Kap. 4.3.2.3 beschrieben, wurde das Einbringen der Tonschüttungen (Quellon HD) in einem Versuch unter Simulation der speziellen Bohrlochbedingungen getestet. Durch Einbringen der Tonschüttung durch das Bohrgestänge und Kontrolle der Schütthöhen kann eine unbeabsichtigte Brückenbildung vermieden werden.

5.2.3 Ausführungskonzept

Das Ausführungskonzept sah folgende Teilschritte vor:

- Aufbau des Systems bis in den 5 1/2" - Rohrschuh mit einer Überlappungsstrecke von ca. 50 m
- Einbringen folgender Barrierenelemente:
 - (1) 5 1/2" - Casing: Abschluss mit mechanischem Casing-Packer
 - (2) Zwischenzone 1 (Rohrschuh-Überlappung): CaO-Quellzement
 - (3) Schlüsselzone 1a: Tonschüttung (Pellets)
 - (4) Schlüsselzone 1b: Schwerspatsedimentbett
 - (5) Zwischenzone 2 (Endlagerniveau): CaO-Quellzement
 - (6) Schlüsselzone 2a: Tonschüttung (Pellets)
 - (7) Zwischenzone 3: CaO-Quellzement
- Beprobung der einsatzfertig verblendeten Zementrezeptur mit Originalwasser unmittelbar vor Einsatz, ggf. Anpassung der Rezeptur an Gebirgswasserchemismus (Salinität)
- Vorgängiger Spülsaustausch (Klarwasser) bzw. Konditionierung der Spülung auf Idealwerte vor Zementationen
- Hydraulische Bohrlochwandreinigung
- Einbringen der einzelnen Zementbrücken in einem Arbeitsvorgang
- Spülsaustausch (Klarwasser) vor Einbringen der Sedimentbette
- Sequentielles Einbringen der Sedimentbette in 20 m-Schritten
- Kontrolle der Zement- und Sedimenthöhen nach jedem Arbeitsschritt

- Einbringen der Zement- und Sedimentschlämme mit 1.315"-Tubingstrang
- Einbringen der Tonschüttungen mittels Bohrgestänge und ggf. in-situ Verdichtung mittels Pressschuh.

5.2.4 Flexibilität des Versiegelungsprogramms beim möglichen Antreffen von auslegungsbestimmenden Störungszonen (ASZ)

Das oben vorgestellte Versiegelungsprogramm basiert auf der Annahme, dass mit der Bohrung keine auslegungsbestimmende Störungzone (ASZ) erbohrt wird.

Wir wissen im Nachhinein, dass keine ASZs von der SB4a/schräg angetroffen wurden.

Während der Ausarbeitung des Versiegelungsprogramms war es jedoch erforderlich sich mit der Frage zu beschäftigen, wie bei unerwarteten geologischen Situationen das Programm hätte angepasst werden sollen. Die entsprechend ausgearbeiteten Hinweise sind untenstehend zusammengefasst.

Aufbau der Versiegelungsstrecke beim Antreffen der ASZ

Sollte zwischen geplanter Endlagerebene und der Verrohrungstiefe eine ASZ angefahren werden, so wird wie folgt vorgegangen:

- Die Strecke zwischen Endlagerebene und ASZ wird bis auf die letzten 10 m mit Quellzement verfüllt. Dadurch ist der grösste Teil der Bohrung auf der interessierenden Strecke mit einem sorbierenden Material gefüllt, das in der Betriebsphase eine sehr gute und in der Nachbetriebsphase eine mindestens noch vertretbare Dichtwirkung zeigt.
- Die letzten ca. 10 m werden mit Schwerspat (Baryt) gefüllt. Diese minimale Länge gewährleistet noch eine annehmbare Dichtwirkung durch Eigenkompaktion des Baryts.
- In die ASZ wird Zement injiziert, um in der Umgebung der Bohrung die Durchlässigkeit der ASZ gezielt zu verringern.
- Oberhalb der ASZ wird dann schlussendlich ein Bentonitpfropfen und eine weitere Zementbrücke bis in den Rohrschuh eingebaut.

6 SICHERHEITSTECHNISCHE BEURTEILUNG

6.1 Einleitung

Das vorliegende Kapitel beschreibt die Vorstudien und Berechnungen, die zum Ziel hatten, die Funktionstüchtigkeit der Bohrlochversiegelung/-verfüllung als Transportbarriere zu beurteilen und die Auswirkungen der Sondierbohrung SB4a/schräg auf die Sicherheit eines potentiellen Endlagers am Standort Wellenberg abzuschätzen.

Die durchgeführte sicherheitstechnische Beurteilung der Bohrlochversiegelung setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Abschätzung der Barriereeffizienz der Versiegelung und der Verfüllung einer "Prinzipbohrung" bezüglich des Transports von Nukliden mittels realistischer und konservativer Rechenfälle.
- Abschliessende Beurteilung der Langzeitstabilität der Barriere.

Die Nachweisführung der Sicherheit des realisierten Versiegelungssystems für die Bohrung SB4a/schräg unter Berücksichtigung der genauen Kenngrössen der verfüllten Bohrung – Geometrie, Eigenschaften der Versiegelung, Materialeigenschaften, hydrogeologisches Umfeld, sicherheitsanalytisches Umfeld – wird in Kapitel 8 beschrieben. Dabei werden die konservativ zu erwartenden Wasserflüsse und die Radionuklidmigration durch die Barriere ermittelt.

6.2 Modellierung des Nuklidtransports

6.2.1 Zielsetzung und benutztes Rechenmodell

Bereits vor Abteufen der Sondierbohrung wurden Modellierungsstudien durchgeführt. Ziel dieser Arbeiten war, die Qualität der Bohrlochversiegelung und -verfüllung als Transportbarriere sowie die Konsequenzen der Sondierbohrung SB4a/schräg auf die Sicherheit des Endlagers abzuschätzen. Die Arbeiten sind in GRIBI (1996) detailliert dargestellt und im Folgenden zusammengefasst.

Folgende Definitionen gelten:

- *Bohrlochversiegelung* ist ein mit Versiegelungsmaterial, das vorrangig eine abdichtende Funktion besitzt (vgl. Begriff "Schlüsselzone" in Kapitel 3), gefüllter Bohrlochabschnitt,
- *Bohrlochverfüllung* ist ein Bohrlochabschnitt mit Verfüllmaterial, das vorrangig eine stützende Funktion besitzt (vgl. Begriff "Zwischenzone" in Kapitel 3)

Die Untersuchungen basieren auf einem einfachen Modell für den Nuklidtransport im Bohrlochsystem. Das verwendete Programm VARIATIO (SMITH 1993) simuliert den stationären Nuklidtransport entlang eines modellhaften Bohrlochsystems, das aus der Bohrlochversiegelung/-verfüllung, einer Auflockerungszone und einer intakten, diffusionszugänglichen Gesteinsmatrix besteht. Mit Hilfe der Modellrechnungen kann die Nuklidrückhaltewirkung des Versiegelungssystems und somit seine Barriereeffizienz ermittelt werden. VARIATIO ist für Einzelnuklide konzipiert; der Transport von Zerfalls-

ketten kann nicht direkt modelliert werden. Resultat der Modellrechnungen mit VARIATIO ist die nuklidspezifische Barriereneffizienz, die sich wie folgt berechnen lässt:

$$\eta = 1 - \frac{C(L)}{C(0)}$$

mit:

η : Barriereneffizienz [-]

$C(L)$, $C(0)$: Porenwasserkonzentrationen am Ende bzw. am Anfang des Fliesspfades

Die Barriereneffizienz ist eine dimensionslose Grösse und beträgt 1 im Falle einer perfekten Nuklidrückhaltung und 0 im Falle einer wirkungslosen Transportbarriere.

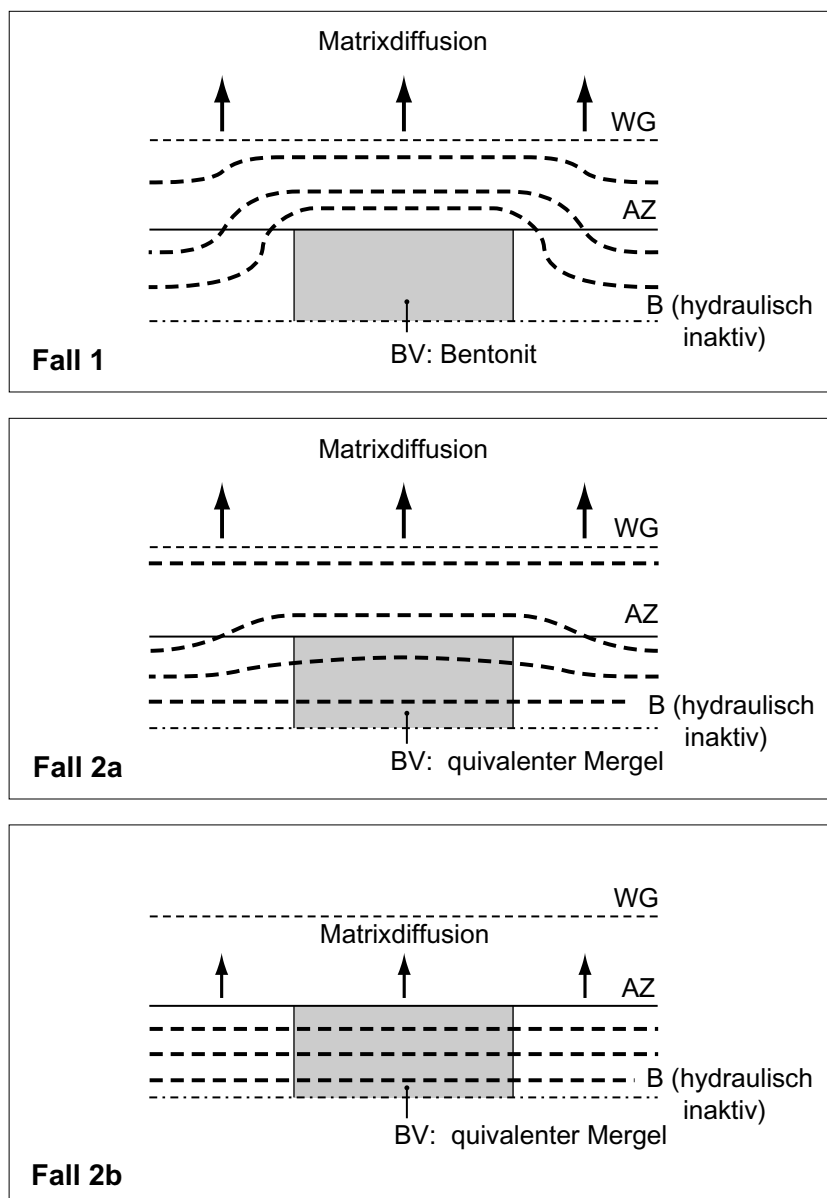
6.2.2 Konzeptuelles Modell

Der vorliegende Abschnitt dient der Erläuterung des Modellkonzepts zur Abschätzung der Barrierenwirkung der versiegelten und verfüllten Bohrlochabschnitte in der Sondierbohrung SB4a/schräg. Das konzeptuelle Modell beruht auf den folgenden Annahmen:

- Im Endlagerbereich herrschen artesische Verhältnisse, d.h. die Druckhöhendifferenz zwischen Endlagerbereich und Bohrlochausgang erzeugt einen Wasserfluss im versiegelten Bohrloch, der zum Bohrlochausgang gerichtet ist.
- Die Nuklidrückhaltung im Bohrlochsystem erfolgt in einem versiegelten und einem verfüllten Bohrlochabschnitt. Das Bohrlochsystem besteht modellhaft aus den folgenden Komponenten:
 - Versiegelungs- bzw. Verfüllmaterial,
 - Auflockerungszone,
 - intakte Gesteinsmatrix.

6.2.3 Transportmodellfälle

In der Versiegelungsstudie werden drei Modellfälle untersucht (vgl. Figur 6-1a und 6-1b): Im Fall 1 wird angenommen, dass das Versiegelungsmaterial des Bohrlochs im Vergleich mit der Auflockerungszone nur in vernachlässigbarem Masse durchströmt wird. Fall 2 basiert auf der Annahme, dass die Durchströmung des Versiegelungsmaterials für den Nuklidtransport im Bohrlochsystem von Bedeutung ist und daher in den Modellrechnungen berücksichtigt werden muss. Hier werden für die Auflockerungszone im Bereich des versiegelten Bohrlochabschnitts zwei verschiedene Modellansätze für die Matrixdiffusion in Betracht gezogen. Die Barrierenwirkung der unversiegelten, aber gleichwohl verfüllten Bohrlochabschnitte bezüglich Hydraulik und Transport bleibt in den Fällen 1 und 2 konservativ unberücksichtigt. Fall 3 dient der Quantifizierung der Nuklidrückhaltungswirkung des verfüllten Bohrlochabschnitts. Hier werden drei Varianten mit unterschiedlichen hydraulischen und geometrischen Modelleigenschaften untersucht.

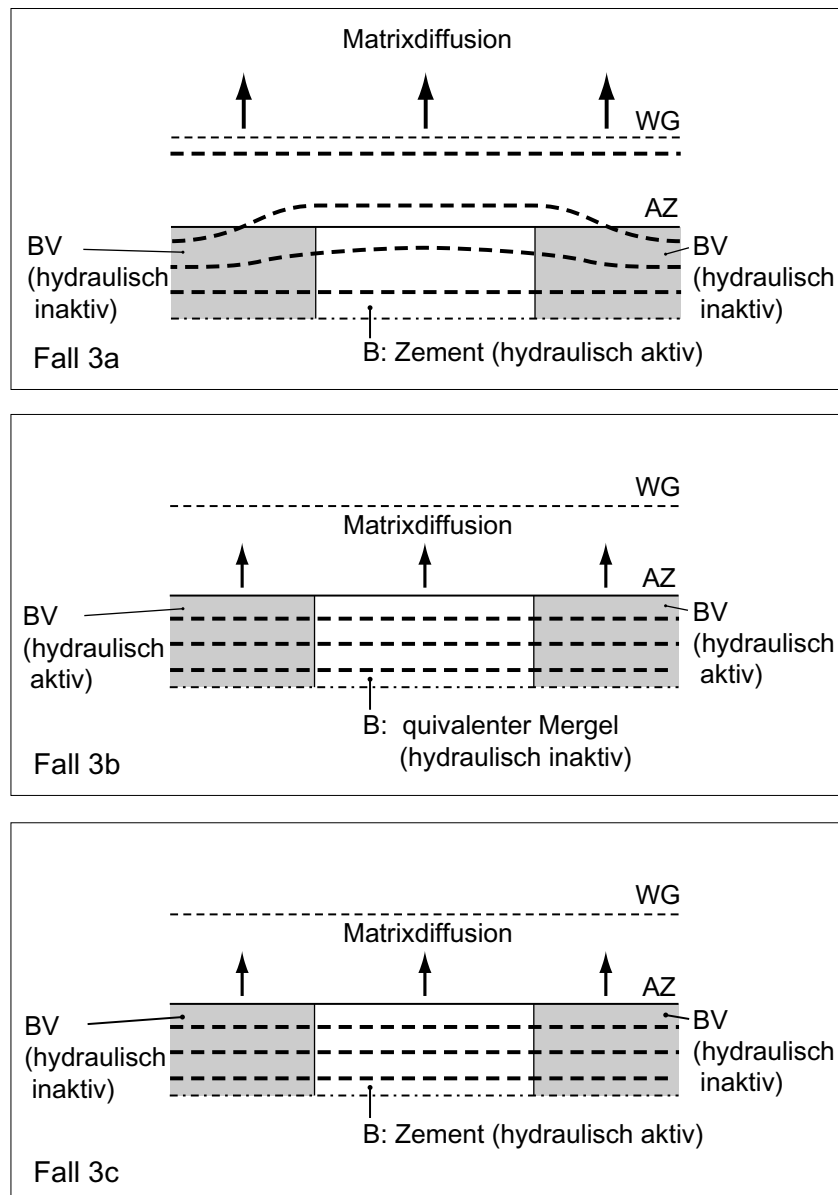


Figur 6-1a: Schematische Flusslinien (fett gestrichelt) im Bereich des versiegelten Bohrlochabschnitts für die Fälle 1, 2a und 2b; diese Seitenansicht zeigt nur die obere Hälfte des Bohrlochlängsschnitts

- Fall 1: BV nicht durchströmt, AZ und BV (infolge Diffusion) instantan mit Nukliden gesättigt
- Fall 2a: BV und AZ durchströmt und instantan mit Nukliden gesättigt
- Fall 2b: BV durchströmt, AZ nicht durchströmt und nicht instantan mit Nukliden gesättigt

WG Intaktes Wirtgestein AZ Auflockerungszone
 B⁸ Bohrlochverfüllung BV Versiegelungsmaterial

⁸ "Hydraulisch inaktiv" bedeutet, dass die Barrierenwirkung der Bohrlochverfüllung vernachlässigt wird.



Figur 6-1b: Schematische Flusslinien (fett gestrichelt) im Bereich des verfüllten Bohrlochabschnitts für die Fälle 3a, 3b und 3c; diese Seitenansicht zeigt nur die obere Hälfte des Bohrlochlängsschnitts

Fall 3a: AZ und B durchströmt und instantan mit Nukliden gesättigt

Fall 3b/c: B durchströmt, AZ nicht durchströmt und nicht instantan mit Nukliden gesättigt

WG Intaktes Wirtgestein

AZ Auflockerungszone

B Bohrlochverfüllung

BV⁹ Versiegelungsmaterial

⁹ "Hydraulisch inaktiv" bedeutet, dass die Barrierenwirkung der Bohrlochverfüllung vernachlässigt wird.

Fall 1: Barrierenwirkung eines versiegelten, nicht durchströmten Bohrlochabschnitts

Ist das Versiegelungsmaterial stark undurchlässig (z.B. im Falle einer Versiegelung mit kompaktierten Bentonit-Zylindern oder Bentonit-Granulat), so erfolgt der Wasserfluss im Bereich des versiegelten Bohrlochabschnitts durch die Auflockerungszone (siehe Figur 6-1a). Dabei wird angenommen, dass das gesamte Gesteinsmaterial der Auflockerungszone und das Versiegelungsmaterial im Vergleich zu den Halbwertszeiten bzw. den Transportzeiten der Nuklide längs dem Fliessweg rasch und vollständig mit Nukliden gesättigt werden. Die Matrixdiffusion der Nuklide erfolgt vom äusseren Rand der Auflockerungszone in das stagnierende Porenwasser des angrenzenden intakten Wirtgesteins.

Fall 2: Barrierenwirkung eines versiegelten, durchströmten Bohrlochabschnitts

Fall 2 basiert auf der Annahme, dass das Versiegelungsmaterial im Vergleich zur Auflockerungszone in einem solchen Masse durchlässig ist, dass diese im Gegensatz zu Fall 1 durchströmt wird (siehe Figur 6-1b). Dabei wird angenommen, dass die Sorptionseigenschaften von Versiegelungsmaterial und Auflockerungszone identisch sind. Hier wird folgende Fallunterscheidung vorgenommen:

Fall 2a: Die Auflockerungszone wird ebenfalls durchströmt und rasch und vollständig mit gelösten Nukliden gesättigt. In diesem Fall erfolgt die Matrixdiffusion vom äusseren Rand der Auflockerungszone in das angrenzende, intakte Wirtgestein.

Fall 2b: Die Auflockerungszone wird im Vergleich mit der Bohrlochversiegelung nur in vernachlässigbarem Masse durchströmt und wird langsam oder nicht vollständig mit gelösten Nukliden gesättigt. Hier erfolgt die Matrixdiffusion vom äusseren Rand der Bohrlochversiegelung in die Auflockerungszone und darüber hinaus in das intakte Wirtgestein.

Fall 3: Barrierenwirkung eines verfüllten Bohrlochabschnitts

Fall 3 dient der Berechnung der Nuklidrückhaltewirkung im verfüllten Bohrlochabschnitt. Die Modellierung des Nuklidtransports im verfüllten Teil des Bohrlochsystems erfolgt in Anlehnung an die Rechenfälle 2a und 2b. Hier werden folgende Fälle unterschieden:

Fall 3a: Die Verfüllung besteht aus Zement. Die Modellierung der Matrixdiffusion wird in Anlehnung an den Fall 2a vorgenommen: Der Wasserfluss findet in den (instantan mit gelösten Radionukliden gesättigten) Bereichen der Verfüllung und Auflockerungszone und die Matrixdiffusion im daran anschliessenden intakten Wirtgestein statt.

Fall 3b: Die Verfüllung besteht wie im Fall 2b aus einem Material mit ähnlichen Sorptionseigenschaften wie Mergel und wird als instantan gesättigt angenommen. Die Matrixdiffusion erfolgt vom äusseren Rand der Bohrlochverfüllung in die Auflockerungszone und darüber hinaus in das intakte Wirtgestein.

Fall 3c: Die Verfüllung besteht aus Zement. Die Matrixdiffusion erfolgt wie im Fall 2b vom äusseren Rand der Bohrlochverfüllung in die Auflockerungszone und darüber hinaus in das intakte Wirtgestein.

In den Fällen 3a und 3c bleibt der Einfluss der Bohrlochversiegelung auf die Hydraulik und den Nuklidtransport konservativ unberücksichtigt. Im Fall 3b wirkt die Bohrlochversiegelung als hydraulische Barriere und die Verfüllung ausschliesslich als Transportbarriere.

6.2.4 Eingangparameter und Beispiele

In GRIBI (1996) wurde für die 6 unterschiedlichen Rechenfälle (vgl. Kap. 6.2.2) jeweils ein Referenzdatensatz gebildet. Darauf aufbauend wurde eine grosse Anzahl von Parametervariationen durchgeführt.

Geometrie

In den Berechnungen mit dem Programm VARIATIO wird von 3 Bereichen ausgegangen:

- Instantan mit Radionukliden gesättigte Zone. Sie besteht aus dem gesamten festen Gesteinsmaterial und dem Porenwasser
 - des Versiegelungsmaterials und der Auflockerungszone (Fälle 1 und 2a),
 - des Versiegelungsmaterials (Fall 2b),
 - des Verfüllmaterials und der Auflockerungszone (Fall 3a),
 - des Verfüllmaterials (Fälle 3b und 3c).
- Instationär aufsättigende, diffusionszugängliche Zone, in der die Matrixdiffusion der Nuklide stattfindet. Sie liegt im Bereich
 - des an die Auflockerungszone angrenzenden, intakten Wirtgesteins (Fälle 1, 2a und 3a),
 - der Auflockerungszone und des an die Auflockerungszone angrenzenden, intakten Wirtgesteins.
- Zone der gesamten Fliessporosität.

Fliesspfadlänge

Die Länge des Fliesspfades für den modellierten Nuklidtransport entspricht der Länge des versiegelten (Fälle 1, 2a und 2b) bzw. des verfüllten Bohrlochabschnitts (Fälle 3a, 3b und 3c). Damit findet die Rückhaltewirkung der unversiegelten, aber gleichwohl verfüllten Bohrlochabschnitte in den Fällen 1, 2a und 2b konservativerweise keine Berücksichtigung.

Aussenradius und hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone

Es wird angenommen, dass der Aussenradius der Auflockerungszone des Bohrlochs doppelt so gross wie der Bohrlochradius ist. Die hydraulische Durchlässigkeit wird in Anlehnung an NAGRA (1994a) hundertmal durchlässiger angenommen als das Wirtgestein. Ein Referenzwert von $K = 10^{-9}$ m/s wird benutzt.

Péclet-Zahl

Der verwendete Referenzwert von $Pe = 10$ für die Péclet-Zahl ist ein Erfahrungswert in der Transportmodellierung.

Materialeigenschaften von Mergel, Bentonit und Zement

Feststoffdichte, Gesamtporosität, Fliessporosität und Diffusionskonstanten wurden in Anlehnung an NAGRA (1994a) und NAGRA (1994b) gewählt.

Nuklidspezifische Inputdaten

Halbwertszeiten, Gleichgewichts-Sorptionskoeffizient, Reduktionsfaktoren der Sorption aufgrund organischer Komplexbildner wurden in Anlehnung an NAGRA (1994a) und NAGRA (1994b) gewählt.

Wasserflussrate durch das Bohrlochsystem

Die Wasserflussrate durch das Bohrlochsystem wurde durch HUGI (1994) für eine Auswahl von realistischen Parametern abgeschätzt. Für jeden untersuchten Modellfall (Fälle 1, 2a, 2b, 3a, 3b, 3c) wird ein entsprechender Referenzwert für den Wasserfluss festgelegt. Dieser ergibt sich aus einer hypothetischen Potentialdifferenz von 100 m zwischen den Enden der verfüllten/versiegelten Bohrlochstrecke. Die Werte liegen zwischen 0.4 und 4.8 l/a. Davon ausgehend wird die Wasserflussrate im Bohrlochsystem in der vorliegenden Versiegelungsstudie in einem relativ grossen Bereich variiert.

Für eine detaillierte Zusammenstellung aller verwendeten Parameter wird auf die Tabellen in GRIBI (1996) verwiesen.

In Kapitel 8 sind die aufgrund der tatsächlich realisierten Versiegelung ermittelten Wasserzuflussraten angegeben.

6.2.5 Vorgehensweise und ausgewählte Beispiele

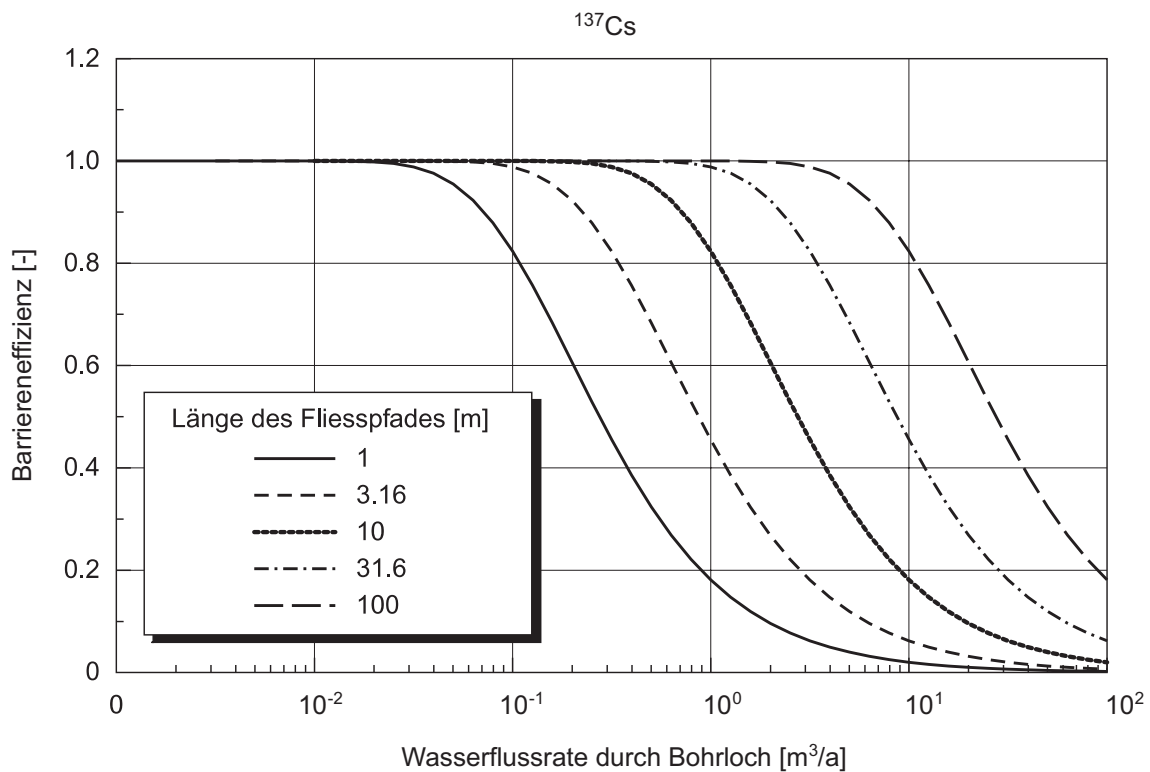
In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Durchführung der Berechnungen zur Barriereneffizienz erläutert. Zudem werden drei Anwendungsbeispiele beschrieben.

Die berechnete Barriereneffizienz wird in allen Modellrechnungen als Funktion der Wasserflussrate (primärer Variationsparameter) dargestellt. Die im Fall 1 von HUGI (1994) für eine Auswahl von realistisch-konservativen Parameterwerten berechnete Wasserflussrate im Bohrlochsystem beträgt $3.6 \cdot 10^{-3}$ m³/a. Die entsprechenden Was-

serflussraten betragen $4.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$ im Fall 2a, $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$ in den Fällen 2b und 3b, $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$ im Fall 3a und $3.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{a}$ im Fall 3c.

Die dargestellte Kurvenschar (Figur 6-2 bis Figur 6-4) wird entweder durch die Eigenschaften des Fließpfades (z.B. die Länge des Fließpfades) oder durch einen Index für eine Gruppe von Inputparametern (z.B. Nuklid: K_d -Werte und Halbwertszeit) charakterisiert.

Die Resultate der Modellrechnungen werden separat für die verschiedenen Rechenfälle präsentiert, diskutiert und anschliessend miteinander verglichen.



Figur 6-2: Barriereeffizienz des versiegelten Bohrlochabschnitts für ^{137}Cs als Funktion der Fließpfadlänge (Fall 1); der Referenzwert der Wasserflussrate beträgt $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$

Beispiel 1: Länge des Fließpfades

Figur 6-2 zeigt die Barriereeffizienz bzgl. des versiegelten Bohrlochabschnitts für ^{137}Cs als Funktion der Fließpfadlänge (Länge des versiegelten Bohrlochabschnitts). Die Bohrlochversiegelung stellt in diesem Rechenfall eine sehr wirksame Transportbarriere dar; sogar bei einer Fließpfadlänge von lediglich 1 m beträgt die Barriereeffizienz für ^{137}Cs bis zu einer Wasserflussrate q von $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{a}$ nahezu 1. Grund für die hervorragende Nuklidrückhaltung im versiegelten Bohrlochabschnitt ist die kurze Halbwertszeit und ein hoher K_d -Wert (keine Reduktion durch Komplexbildner) von ^{137}Cs .

Wie aus Figur 6-2 ersichtlich ist, sind die einzelnen Kurven durch Translation entlang der Abszisse ineinander verschiebbar. Dieser Sachverhalt widerspiegelt sich in einer Symmetrie des analytischen Ausdrucks für die Barriereneffizienz η : Die effektive Fliessgeschwindigkeit u – und damit die Wasserflussrate q – im Bohrlochsystem und die Fliesspfadlänge L gehen nur als Quotient L/u in η ein (siehe SMITH 1993). In VARIATIO werden q und L als unabhängige Variablen behandelt¹⁰, was bedeutet, dass sich bei gleichzeitiger Erhöhung von q und L um einen beliebigen Faktor identische Werte für η ergeben.

Beispiel 2: Nuklide

Figur 6-3 zeigt den Vergleich der Barriereneffizienzen des versiegelten Bohrlochabschnitts für die Nuklide ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{63}Ni , ^{14}C , ^{241}Am und ^{237}Np für eine Fliesspfadlänge von 10 m im Fall 1. Von den in der vorliegenden Versiegelungsstudie ausgewählten Nukliden fällt die Barrierenwirkung für ^{137}Cs am günstigsten aus, wie aufgrund der kurzen Halbwertszeit und der vorteilhaften Sorptionseigenschaften von ^{137}Cs zu erwarten ist. Die Nuklide ^{90}Sr , ^{63}Ni und ^{241}Am weisen eine zwar immer noch günstige, aber deutlich geringere Barriereneffizienz auf als ^{137}Cs .

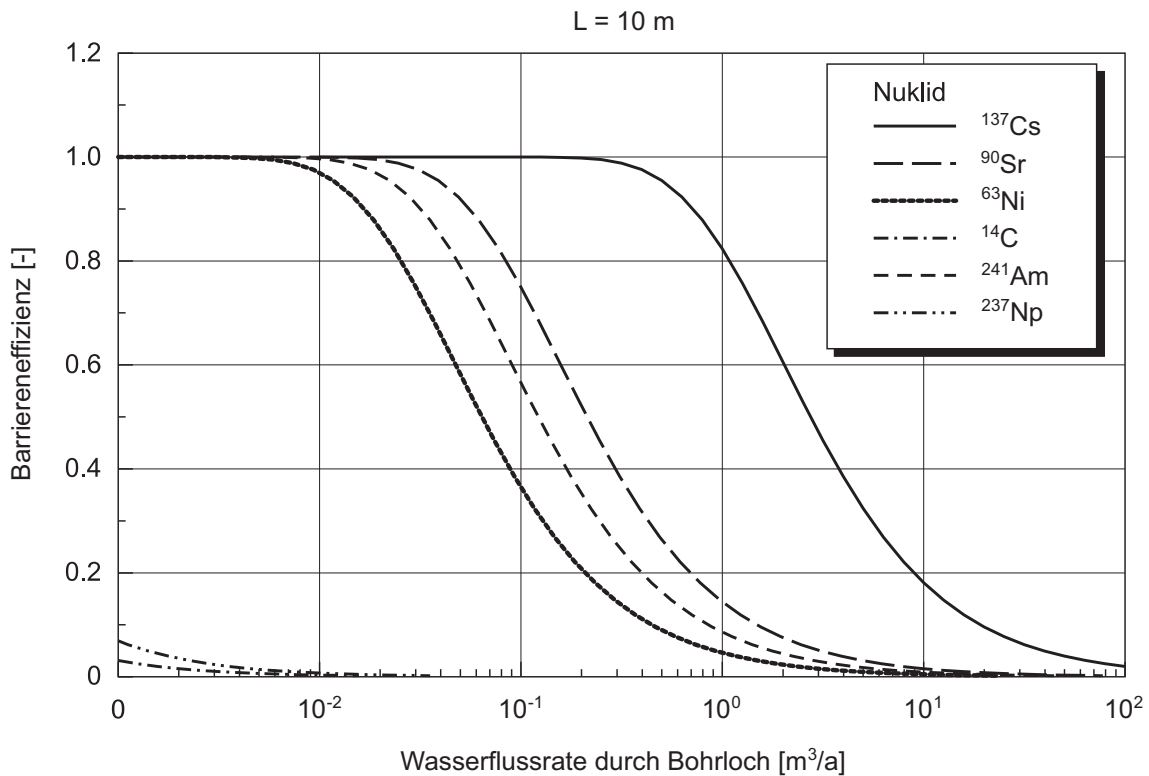
Für das langlebige Nuklid ^{237}Np und das als nicht-sorbierend angenommene Nuklid ^{14}C bleibt die Bohrlochversiegelung auch dann als Transportbarriere wirkungslos, wenn sich der versiegelte Bohrlochabschnitt über eine Länge von 100 m erstreckt. Im Falle von Zerfallsketten bedeutet dies, dass kurzlebige Mutternuklide (z.B. ^{241}Am), die während des Transports durch das Bohrlochversiegelungssystem vollständig zerfallen, durch langlebige Tochternuklide (^{237}Np) trotzdem zur Strahlenbelastung in der Biosphäre beitragen können. Durch die Verdünnung der gelösten Nuklide in Tiefen- und oberflächennahen Grundwässern kann das behördliche Schutzziel trotzdem eingehalten werden. Aus diesen Gründen werden diese Nuklide von der weiteren Diskussion ausgeschlossen.

Beispiel 3: Vergleich der Fälle 1, 2a und 2b

Der Vergleich der Barriereneffizienzen des versiegelten Bohrlochabschnitts für die drei Fälle 1, 2a und 2b ist in Figur 6-4 anhand der Nuklide ^{137}Cs und ^{241}Am für eine Fliesspfadlänge von $L = 10$ m dargestellt. Die Ergebnisse des Vergleichs lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Fälle 1 und 2a ergeben (bei gleicher Wasserflussrate q durch das Bohrlochversiegelungssystem) für alle Rechenfälle sehr ähnliche Resultate.
- Der Fall 2b unterscheidet sich (bei gleicher Wasserflussrate q) von den Fällen 1 und 2a durch eine signifikant geringere Barriereneffizienz.
- Für die Referenzdatensätze mit den jeweiligen, unterschiedlichen Wasserflussraten q ergeben die Fälle 1, 2a und 2b ähnlich gute Resultate.

¹⁰ Tatsächlich ist die Wasserflussrate q indirekt proportional zur Länge des versiegelten Bohrlochabschnitts (HUGI 1994); die Kopplung dieser beiden Parameter wird bei den Modellrechnungen mit VARIATIO nicht berücksichtigt.



Figur 6-3: Vergleich der Barriereeffizienzen des versiegelten Bohrlochabschnitts für die Nuklide ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶³Ni, ¹⁴C, ²⁴¹Am und ²³⁷Np und für eine Fließspfadlänge von L = 10 m (Fall 1); der Referenzwert der Wasserflussrate beträgt $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$

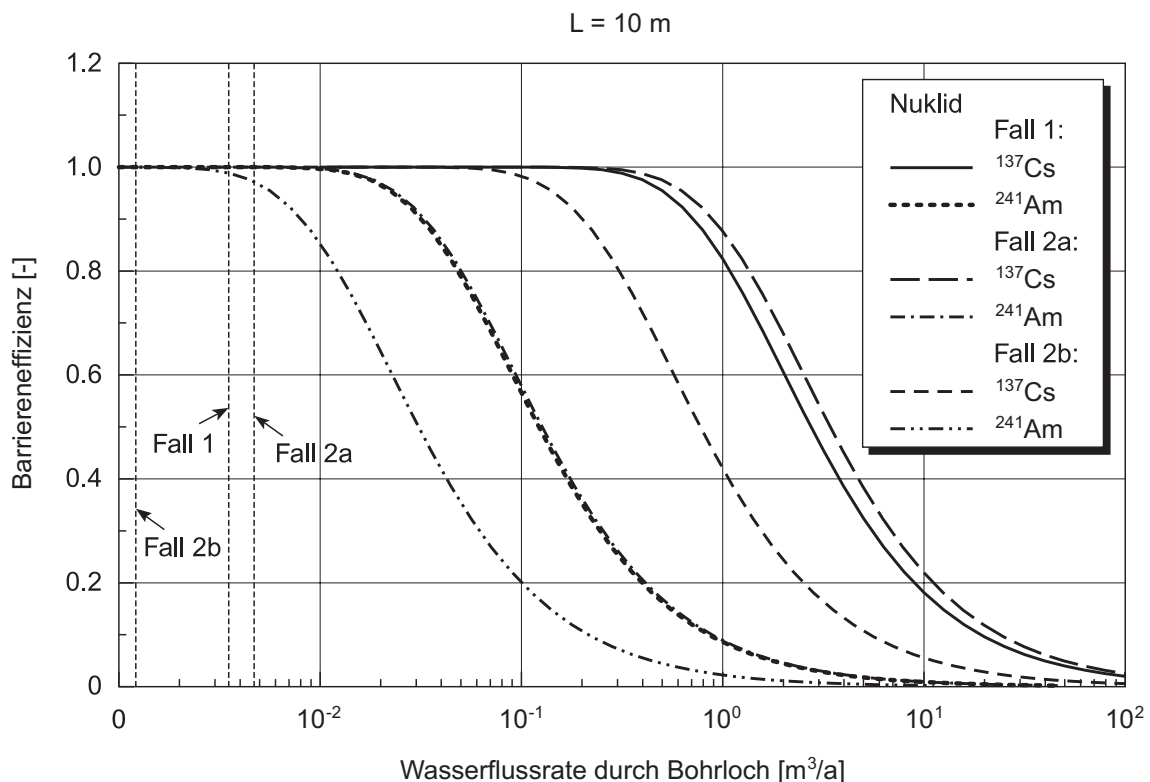
Die Fälle 1 und 2 unterscheiden sich ausschliesslich durch die Eigenschaften des Versiegelungsmaterials, das im Fall 1 aus Bentonit und in den Fällen 2a und 2b aus (äquivalentem) Mergel besteht, sowie durch die Ausdehnung der instantan gesättigten Zone. Die entsprechenden Referenzdatensätze weichen nur in Bezug auf die Grössen r_0 (Radius der äquivalenten offenen Ader: modellhafte Darstellung der Fließporosität) und ε_s (Porosität der instantan gesättigten Zone) wesentlich voneinander ab, wobei letzterer Parameter nur einen geringen Einfluss auf die Barriereeffizienz ausübt. Der um etwa einen Faktor 3 geringere Wert von r_0 im Fall 1 gegenüber dem Fall 2a ist auf die fehlende Fließporosität des Versiegelungsmaterials zurückzuführen. Dadurch erhöht sich die effektive Geschwindigkeit im Bohrlochversiegelungssystem – bei gleicher Wasserflussrate q – um etwa eine Grössenordnung, was die Barrierenwirkung der Bohrlochversiegelung im Fall 1 verringert. Gleichzeitig weist der Fall 1 einen wesentlich höheren Retentionsfaktor in der instantan gesättigten Zone auf, was eine Verbesserung der Barriereeffizienz bewirkt. Der Nettoeffekt dieser beiden konkurrierenden Prozesse ist vergleichsweise klein¹¹, so dass sich die Barriereeffizienzen (bei gleicher Wasserflussrate q) für alle Modellrechnungen der Fälle 1 und 2a nur geringfügig unterscheiden.

¹¹ Dieser Sachverhalt widerspiegelt sich mathematisch in der Tatsache, dass beide konkurrierenden Prozesse für die gewählten Parameterbereiche näherungsweise indirekt proportional zu r_0^2 sind; dieser Term lässt sich in guter Näherung aus dem analytischen Ausdruck für die Barriereeffizienz herauskürzen.

Hingegen weist die Wasserflussrate im Fall 1 einen Referenzwert von $q = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$ auf im Vergleich zu $q = 4.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$ für den Fall 2a (vgl. die mit Pfeilen markierten senkrechten Linien in Figur 6-4). Daraus folgt, dass die Barrierenwirkung des mit Bentonit versiegelten Bohrlochs (Fall 1) für den Referenzdatensatz wie erwartet leicht vorteilhafter ausfällt im Vergleich mit einem hydraulisch weniger dichten Versiegelungsmaterial (Fall 2a).

Fall 2b unterscheidet sich von den Fällen 1 und 2a hauptsächlich dadurch, dass die Auflockerungszone als nicht durchflossen bzw. nicht instantan gesättigt angenommen wird und daher für die Nuklide nur via Matrixdiffusion erreichbar ist. Dies verringert den Retentionsfaktor der instantan gesättigten Zone im Fall 2b um ca. einen Faktor 4 gegenüber Fall 2a bei fast gleichem Radius der äquivalenten offenen Ader (Fließporosität), wodurch die Barriereneffizienz im Fall 2b (bei gleicher Wasserflussrate q) deutlich geringer ausfällt als im Fall 2a.

Der Referenzwert für die Wasserflussrate beträgt im Fall 2b $q = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$ gegenüber $q = 4.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$ im Fall 2a. Figur 6-4 zeigt, dass die Barriereneffizienzen für die Referenzdatensätze der drei Fälle 1, 2a und 2b für ^{241}Am nahezu gleich 1 sind. Diese Aussage gilt für alle untersuchten, kurzlebigen Nuklide gleichermaßen, wie aus Figur 6-2 und 6-3 entnommen werden kann.



Figur 6-4: Vergleich der Barriereneffizienzen für die Fälle 1, 2a, 2b

6.2.6 **Barriereeffizienz der versiegelten und verfüllten Bohrlochabschnitte: Resultate der Modellrechnungen**

Anhand einiger sicherheitsrelevanter Nuklide wurden eine Reihe von Parametervariationen für die folgenden Grössen durchgeführt:

- Wasserflussrate durch das Bohrlochsystem (d.h. Durchlässigkeiten der Versiegelungskomponente)
- Länge des versiegelten Bohrlochabschnitts
- Länge des verfüllten Bohrlochabschnitts
- K_d -Wert und Reduktionsfaktor
- Effektive Diffusionskonstante im intakten Wirtgestein
- Bohrlochgeometrie (Porositäten, Dicke des nur durch Matrixdiffusion zugänglichen Gesteinsbereichs)
- Péclet-Zahl
- Halbwertszeit von fiktiven Nukliden mit $K_d = 0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Aus den Resultaten dieser Modellrechnungen lässt sich folgern, dass nur die folgenden Kenngrössen des Modellsystems einen wesentlichen Einfluss auf die Barriereeffizienz des versiegelten und verfüllten Bohrlochs ausüben:

- Wasserflussrate durch das Bohrlochsystem
- Länge des versiegelten Bohrlochabschnitts
- Länge des verfüllten Bohrlochabschnitts
- Halbwertszeit und Sorptionseigenschaften des betrachteten Nuklids.

Alle anderen Systemparameter (im realistischen Bereich) beeinflussen die Barrierenwirkung des Versiegelungssystems nur in untergeordnetem Masse.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse lassen sich ferner folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei einer für SB4a/schräg zu erwartenden Wasserflussrate durch das Bohrlochversiegelungssystem liefern die drei Fälle 1, 2a und 2b ähnlich gute Resultate.
- Für die betrachteten, kurzlebigen Nuklide ist für die drei Referenzdatensätze der Fälle 1, 2a und 2b eine intakte Versiegelungslänge von 10 m ausreichend, um eine Barriereeffizienz von nahezu 1 zu gewährleisten (Figur 6-4). Diese Schlussfolgerung beruht in wesentlichem Masse auf der Annahme einer Bohrlochversiegelung, deren hydraulische Durchlässigkeit kleiner oder höchstens gleich gross ist wie die Durchlässigkeit der Auflockerungszone. In den Fällen 1 und 2a hat diese Modellannahme zur Folge, dass der Wasserfluss im Bohrlochversiegelungssystem hauptsächlich durch die hydraulischen und geometrischen Eigenschaften der Auflockerungszone geprägt ist.
- Langlebige oder nicht-sorbierende Nuklide werden im versiegelten Bohrlochsystem nicht oder kaum zurückgehalten. Auf diesen Sachverhalt wird auch in NAGRA (1994a) hingewiesen: Selbst eine Fließpfadlänge von 100 m durch die kataklatischen Zonen des intakten Wirtgesteins am Standort Wellenberg führt nicht zu einer

wesentlichen Reduktion der Konzentration von langlebigen und/oder nicht-sorbierenden Nukliden. Die mit diesen Nukliden verbundenen Strahlendosen liegen aber wegen des beschränkten Inventars und dank der effizienten Rückhaltung im Nahfeld und des geringen relativen Anteils der über das versiegelte/verfüllte Bohrloch stattfindenden Nuklidfreisetzung unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a, wie die Resultate des robusten Ansatzes in NAGRA (1994) zeigen.

- Der verfüllte Bohrlochabschnitt (Fall 3) trägt in wesentlichem Masse zur Nuklidrückhaltung im Bohrlochsystem bei, selbst wenn er keine günstigen hydraulischen Eigenschaften aufweist. Entscheidend ist hier die gegenüber den Fällen 1, 2a und 2b sehr viel grössere Fliesspfadlänge.

Aufgrund dieser Überlegungen lässt sich die Sensitivität der Barrierenwirkung der Bohrlochversiegelung wie folgt charakterisieren:

- Die hydraulische Durchlässigkeit der Bohrlochversiegelung ist nur dann wichtig, wenn sie grösser als die Durchlässigkeit der Auflockerungszone ist.
- Die Untersuchungen zeigen, dass bereits eine Länge des intakt versiegelten Bohrlochabschnitts von 10 m für die betrachteten, kurzlebigen Radionuklide eine gute Barrierenwirkung ergibt.
- Gute Sorptionseigenschaften (K_d -Werte, Reduktionsfaktoren) des Versiegelungs- bzw. Verfüllmaterials wirken sich positiv auf die Barrierenwirkung aus.

6.2.7 Schlussfolgerungen

Wird das Bohrloch mit einem gut sorbierenden Material (z.B. Bentonit, Zement o.ä.) verfüllt und der Wasserfluss durch Dichtmaterial reduziert, so wirkt das Versiegelungssystem für kurzlebige Radionuklide als effiziente Transportbarriere. Als grobe Abschätzung kann folgender Vergleich der Barrierenwirkung des Bohrlochsystems mit derjenigen des wasserführenden Systems der Geosphäre angestellt werden:

Für den *Fall 2a* ergibt sich mit dem Referenzwert der Wasserflussrate eine effektive Fliessgeschwindigkeit im Bohrlochsystem von 3.8 m/a. Verbunden mit der Referenz-Fliesspfadlänge von 30 m resultiert daraus eine Barriereneffizienz für das Bohrlochsystem, die grob mit derjenigen von Kalkbankabfolgen mit einer Transmissivität von $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ vergleichbar ist (NAGRA 1994a). Diese Schlussfolgerung gilt ebenso für die *Fälle 1 und 2b*, da diese für die jeweiligen Referenzwerte der Wasserflussrate ähnliche Barriereneffizienzen wie der Fall 2a ergeben. Die im Vergleich mit den Fällen 2a und 2b ungünstigeren hydraulischen Eigenschaften im Fall 1 werden durch günstigere Sorptionseigenschaften kompensiert.

Die in den *Fällen 3a und 3b* mit den Referenzwerten für die Wasserflussrate errechneten effektiven Fliessgeschwindigkeiten betragen etwa 0.5 m/a. Verbunden mit der Referenz-Fliesspfadlänge von 100 m resultiert daraus eine Barriereneffizienz für das Bohrlochsystem, die ungefähr mit derjenigen von kataklastischen Zonen mit einer Transmissivität von $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ vergleichbar ist (NAGRA 1994a).

Die im *Fall 3c* errechnete effektive Fliessgeschwindigkeit von etwa 0.2 m/a führt zu einer günstigeren Barriereneffizienz als in den Fällen 3a und 3b.

6.3 Langzeitstabilität des zu betrachtenden Systems

Zur Beurteilung der Langzeitstabilität der im Versiegelungssystem verwendeten Materialien ist deren Stabilität sowie die Interaktion zwischen den Einzelmaterialien zu betrachten.

6.3.1 Stabilität der Materialien (ohne Interaktion)

Quellzement:

Die Modellrechnungen von NEALL (1994, siehe auch NAGRA 1994a) haben gezeigt, dass die Degradation (Auslaugen) des Zements durch Grundwässer auch unter ungünstigen Bedingungen so langsam verläuft, dass die für die Radionuklid-Sorption relevanten Festphasen im Zement in dem für die Sicherheitsanalyse relevanten Zeitraum erhalten bleiben. Allerdings wird langfristig mit einer gewissen Erhöhung der anfänglich tiefen Durchlässigkeit von $K = 10^{-11}$ m/s auf 10^{-9} m/s bzw. auf 10^{-8} m/s als konservative Annahme gerechnet (NAGRA 1994a, Tab. 4.1-2).

Quellon HD:

Die Ton-Pellets bestehen aus 85 – 90 % Bentonit, 10 – 12 % Magnetit, 1,2 – 1,3 % Pyrit, 1 – 2 % Quarz, 1 – 2 % Calcit (Mineralogische Analyse, siehe Kap. 4.3.1). Über die Langzeitbeständigkeit des Bentonits liegen aus dem HAA-Programm genügend Daten vor (NAGRA 1994b), so dass diese als unproblematisch bezeichnet werden kann (PUSCH 1994).

Geochemisch könnte das tonige Versiegelungsmaterial durch folgende Wässer beeinträchtigt werden:

- a) die bei der Einbringung der Ton-Pellets vorhandene Bohrlochflüssigkeit,
- b) Grundwässer aus dem oder aus der Umgebung des versiegelten Bohrlochabschnitts.

Berechnungen haben gezeigt, dass bei der Einbringung der Ton-Pellets im Bohrloch vorhandenes Wasser bei vollständiger Sauerstoffsättigung höchstens 0,05 % des vorhandenen Pyrits lösen und somit keine Beeinträchtigung der Langzeitstabilität verursachen könnte (McKINLEY & GAUTSCHI 1995).

Das Tiefengrundwasser in der Versiegelungsstrecke oder in deren Umgebung enthält keinen gelösten Sauerstoff. Sein Redoxpotential liegt im Bereich der Stabilitätsfelder von Magnetit und Sulfat bei den wenig tiefen Wässern der Rutschmasse und von Pyrit und H_2S bei den tieferen Grundwässern. Eine Beeinträchtigung der Langzeitstabilität des Magnetits oder des Pyrits kann deshalb ausgeschlossen werden. Aufgrund der hydrogeologischen Situation (Druckverteilung, Durchlässigkeit, Redox-Pufferkapazität der Gesteine) kann ein Eindringen von oberflächennahen, stark oxidierenden Grundwässern bis zur Versiegelungsstrecke ausgeschlossen werden.

Schwerspat

Schwerspat besitzt eine ausgesprochen geringe Löslichkeit. In Anbetracht der geringen Wasserflüsse ist keine Beeinträchtigung der Langzeitstabilität dieser Schlüsselzone zu erwarten. Die Durchlässigkeit (mit dem verwendeten konservativen Wert von $K = 10^{-8}$ m/s) wird ebenfalls nicht beeinflusst.

6.3.2 Interaktion zwischen den Materialien

Gemäss dem realisierten Mehrkomponentensystem sind folgende Kontakte zwischen den Einzelmaterialien möglich:

- (a) Zement – Mergel
- (b) Zement – Ton
- (c) Zement – Schwerspat
- (d) Schwerspat – Mergel
- (e) Schwerspat – Ton
- (f) Ton – Mergel.

Zu (a): Die Problematik der Auswirkung hochalkalischer Zementporenwässer auf den Mergel wurde bereits früher im Zusammenhang mit dem Endlager-nahfeld behandelt (NAGRA 1994a). Es werden zwar Auswirkungen auf das Versiegelungssystem erwartet, die Konsequenzen werden aber nicht als übermässig kritisch beurteilt.

Zu (b): Für die Interaktion zwischen Ton (Bentonit) und Zement gilt ähnliches wie für (a). Diese Problematik wurde experimentell untersucht (z.B. BUCHER et al. 1993) und detaillierter auch in schwedischen und kanadischen Studien behandelt. Die Untersuchungen zeigen, dass eine Verkittung der Montmorillonit-Teilchen durch umgebildete Zementhydrate stattfindet, wodurch die Quelldrücke und Quelldeformationen bei erneuter Wasseraufnahme stark reduziert werden. Hingegen ist nur eine sehr gering mächtige Zone im Bentonit betroffen. Die Interaktion Zement/Bentonit ist deshalb von untergeordneter Bedeutung. Wasser aus einem potentiellen Endlager wird ebenfalls alkalisch und wegen des vorhandenen Stahls reduzierend sein, d.h. eine Beeinträchtigung des Magnetits oder Pyrits kann ebenfalls ausgeschlossen werden.

Zu (c): Es werden keine Auswirkungen der Zementporenwässer auf den Schwerspat erwartet. Eine Gipsbildung kann ausgeschlossen werden, da Gips sowohl gegenüber Portlandit wie auch gegenüber Schwerspat untersättigt ist.

Zu (d): Wegen der sehr geringen Löslichkeit von Schwerspat werden keine Auswirkungen auf den Mergel erwartet (keine Ausfällung von Gips oder anderen leicht löslichen Sulfaten).

Zu (e): Analog zu (b) und (d) werden keine Auswirkungen erwartet.

Zu (f): Aufgrund der mineralogischen Ähnlichkeit der Materialien und ihrer Porenwässer werden keine Auswirkungen erwartet.

7 AUSFÜHRUNG DER VERSIEGELUNG DER BOHRUNG SB4A/SCHRÄG

Die Ausführung der Versiegelung folgte weitgehend dem in Kap. 5.2 beschriebenen Versiegelungsprogramm. Auch seitens der Materialien (Quellzement, Schwerspat und Ton) und der Einbringtechnik wurden keine wesentlichen Änderungen vorgenommen. Lediglich die Anordnung und die Längen der einzelnen Materialzonen wurden den tatsächlichen Bohrlochgegebenheiten angepasst.

7.1 Versiegelungsstrecken und eingebrachte Materialien

Es wurden insgesamt 7 einzelne Abdichtungszone eingebracht (vgl. auch Figur 5-1).

Tab. 7-1: Realisierte Verfüllung und Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg

Realisierte Einbringtiefe [Bohrtiefe]	Material	Planungsteufe
365.6 – 365.9 m	mechanischer Packer	(365 – 366 m)
366.0 – 429.2 m	CaO-Quellzement	(366 – 430 m)
429.2 – 456.9 m	Tonschüttung	(430 – 460 m)
456.9 – 510.8 m	Schwerspatsedimentbett	(460 – 505 m)
510.8 – 645.0 m	CaO-Quellzement	(505 – 650 m)
645.0 – 680.0 m	Tonschüttung	(650 – 680 m)
680.0 – 858.2 m	CaO-Quellzement	(680 – 858 m)

Zone 365.6 – 365.9 m, mechanischer Packer:

Der nicht wiedergewinnbare Packer des Typs "DELTA" Wireline Bridge Plug, Size 2AA, Manschettenhärte 70 Durometer, Fa. Baker Oil Tools (Celle) wurde 50 m oberhalb des Rohrschuhes in der 5 1/2" - Verrohrung gesetzt. Er bildet den obersten Abschluss des Systems und bewirkt eine zusätzliche mechanische Abdichtung im zementierten Rohrschuhbereich.

Zone 366.0 – 429.2 m, CaO-Quellzement:

Diese Zementstrecke bewirkt die homogene Einbindung und den Anschluss des Rohrschuhes der 5 1/2" - Verrohrung bei 416.0 m und deren Futterrohrzementation in das Versiegelungssystem. Im Rahmen der Voruntersuchungen und Zementsteinanalysen an der Technischen Universität Clausthal wurde eine Rezeptur von API-Tiefbohrzement (Normierung nach American Petroleum Institute) Class G (sulfatbeständig), verblendet mit 5 % CaO-Quellzusatz (Dornaper Hartbranntkalk Porokalk B, RWK Kalk AG Hönnetal) mit einem Richtwert des spezifischen Schlammgewichts von 1.9 kg/l entwickelt. Die Zementation der Zone erfolgte mit dieser Rezeptur und einem spezifischen Schlammgewicht von 1.91 kg/l. Kurz vor dem Einsatz wurde der fertig verblendete Zement unter Verwendung von original Wellenberg-Ansetzwasser von Fa. Halliburton

(Celle/BRD) und zusätzlich an der Technischen Universität Clausthal getestet (Spezifikationen siehe MACEK & KARSCH 1996).

Zone 429.2 – 456.9 m, Tonschüttung:

Die Tonschüttung stellt in dem kaliberhaltigen Bohrlochbereich der Palfris-Formation eine Barriere mit Langzeitbeständigkeit her. Als Produkt wurden Tonpellets auf der Basis von Ca-Bentonit und Magnetit (Quellon-HD, Fa. SBF Wasser und Umwelt, Peine) eingebracht, welches vom Hersteller speziell für die Abdichtung tiefer Bohrlochabschnitte entwickelt wurde (Produktspezifikationen sowie mineralogische Analyse siehe MACEK & KARSCH 1996).

Zone 456.9 m – 510.8 m, Schwerspatsedimentbett:

In diese ebenfalls gut kaliberhaltige Zone wurde eine Wasser-Schwerspatsuspension mit einem spezifischen Gewicht von 2.4 kg/l eingebracht (Baryt, Fa. Baroid GmbH, Celle). Zur Verbesserung der Kompaktion des Sedimentbettes wurde die Zone temporär mit einer weiteren Schwerspatschüttung von 1.6 kg/l überdeckt (Produktspezifikationen siehe MACEK & KARSCH 1996).

Zone 510.8 – 645.0 m, CaO-Quellzement:

Auf dem Niveau der vorgesehenen Endlagerebene (555 m along hole) wirkt diese Barrierezonenzone gegen oben und unten gerichtete Fließgradienten. Durch die Fließeigenschaften der Zementschlämme, welche mit einer Dichte von 1.89 kg/l eingebracht wurden, konnte gewährleistet werden, dass kleinere Kaliberunregelmässigkeiten und auch ein grösserer Auskesselungsbereich zwischen 525 und 528 m von ca. 300 mm Durchmesser optimal ausgefüllt wurden. Zudem bietet die Zementstrecke auf Endlagerniveau sowohl Vorteile im Hinblick auf Radionuklid-Sorptionseffekte als auch auf die bautechnische Stabilität.

Zone 645.0 – 680.0 m, Tonschüttung:

Diese Toneinlage stellt eine zusätzliche langzeitrelevante Komponente gegen die Zonen mit tiefem Head der Globigerinenmergel und Palfris-Formation dar. Es wurden auch hier Quellon-HD-Pellets eingesetzt.

Zone 680.0 – 858.2 m, CaO-Quellzement:

Der unterste Abschluss des Systems bis zur Endteufe der Bohrung wurde ebenfalls mit Quellzement mit o.g. Rezeptur (spezifisches Gewicht der Zementschlämme 1.91 kg/l) hergestellt.

7.2 Chronologie der Verfüllungs- und Versiegelungsarbeiten

Der Einbau erfolgte gemäss eines genauen Einbauplanes (siehe Dokumentation in MACEK & KARSCH 1996). Die Hauptschritte sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst.

Tab. 7-2: Chronologie der Verfüllungs- und Versiegelungsarbeiten

Zeitspanne	Ereignis
08.11.95 – 12.11.95	Roundtrip und Zementation von Endteufe (858.2 m) bis 680.0 m mit CaO-Quellzement (Zwischenzone 3)
13.11.95 – 14.11.95	Einbringen der Tonschüttung von 680.0 bis 645.0 m (Schlüsselzone 2)
14.11.95	Zementation von 645.0 m bis 510.8 m mit CaO-Quellzement (Zwischenzone 2)
15.11.95	Einpumpen der Schwerspatsuspension von 510.8 m auf 456.9 m (Schlüsselzone 1b)
16.11.95 – 19.11.95	Wartezeit auf Sedimentation der Schwerspatsuspension, Überprüfung durch wiederholtes Abtasten
19.11.95	Einbringen der Tonschüttung von 456.9 bis 429.2 m (Schlüsselzone 1a)
20.11.95 – 21.11.95	Zementation von 429.2 m bis 354.6 m mit CaO-Quellzement (Zwischenzone 1) Zement aufkernen bis 366.0 m
21.11.95	Setzen des mechanischen Packers (Bridge Plug) zwischen 365.6 m und 365.9 m

7.3 Einbaubericht

Die Versiegelungsarbeiten wurden programmgemäss ausgeführt. Wie erwartet, waren geringe Anpassungen aufgrund des aktuellen Bohrlochzustandes erforderlich. Des Weiteren fehlten im Detailablauf z.T. Erfahrungswerte, so dass einige Arbeitsschritte aus Sicherheits-, Optimierungs- bzw. Qualitätsüberlegungen besonders aufwendig ausgeführt wurden.

Ein Einbaubericht wurde verfasst (MACEK & KARSCH 1996), der die tabellarische Übersicht der Versiegelungsarbeiten (Tabelle 7-2) mit Kommentaren und Berechnungen erläutert und ergänzt (Anhang A). Der Einbau erfolgte programmgemäss und ohne grössere Schwierigkeiten.

7.4 Qualitätssicherung bei der Ausführung der Versiegelungsarbeiten

7.4.1 Qualitätskontrolle

Die Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg war nach dem durch die HSK genehmigten Versiegelungsprogramm auszuführen.

Als Nachweis für die ordnungsgemässe Versiegelung musste nachvollziehbar dokumentiert werden, dass die dazu erforderlichen Arbeitsschritte und -abläufe gemäss Vorgaben und nach dem Stand der Technik einwandfrei ausgeführt wurden. Detailschritte der Qualitätskontrolle wurden festgelegt:

- Rückstellproben der Materialien waren zu nehmen.
- Die Dokumentation der Arbeiten erforderte ein Einbauprotokoll, das alle Arbeitsschritte mit relevanten Daten enthält. Dabei wurden die Grössen festgelegt, die es einzuhalten galt und diejenigen, für die es lediglich Richtwerte gab:
 - Vorgabewerte waren:
 - Teufengrenzen der Intervalle
 - Spezifisches Gewicht der Zementschlämme bzw. der Schwerspatsuspension
 - Einschüttvolumen der Tonpellets
 - Nachpumpvolumina beim Vorort-Pumpen von Zementbrühe und Schwerspatsuspension
 - Richtwerte waren z. B. Pumpraten, Zementbrühevolumina. Sie sind so gewählt, dass das jeweilige Arbeitsziel sicher erreicht wurde bzw. genügend Überschuss enthalten war.

7.4.2 Qualitätsüberwachung

Als Werkzeug zur Einhaltung der Vorgaben wurde ein Qualitätsüberwachungsplan (Q-Plan) eingesetzt. Der Q-Plan ist integraler Bestandteil des Einbauberichtes (MACEK & KARSCH 1996). Es wurde keine grösseren Schwierigkeiten beim Einbau angetroffen.

8 SICHERHEITSTECHNISCHE NACHWEISE FÜR DAS VERSIEGELUNGSSYSTEM SB4A/SCHRÄG

Im Folgenden werden die Nachweise der Systemdurchlässigkeit und der Barrierenwirkung für das in SB4a/schräg realisierte Versiegelungssystem geführt. Hierzu wurden verschiedene Rechenfälle untersucht, die sowohl auf realistischen als auch auf konservativen Annahmen hinsichtlich der Materialeigenschaften beruhen. Zusätzlich wurde zwischen Betriebsphase und Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit) unterschieden.

8.1 Datenbasis und Annahmen

8.1.1 Versiegelungs- und Verfülllängen

Die für die Berechnung massgebenden Streckenlängen der einzelnen Zonen (Tab. 8-1) ergeben sich gemäss dem Einbauprotokoll aus Anhang A.

Tab. 8-1: Streckenlängen der Versiegelungszonen

Zone	Einbautiefe (Bohrtiefe) [m]	Material	Strecke [m]
Zwischenzone 1	366.0 – 429.2	CaO-Quellzement	63.2
Schlüsselzone 1a	429.2 – 456.9	Tonschüttung	27.7
Schlüsselzone 1b	456.9 – 510.8	Schwerspatsedimentbett	53.9
Zwischenzone 2	510.8 – 645.0	CaO-Quellzement	134.2
Schlüsselzone 2	645.0 – 680.0	Tonschüttung	35.0
Zwischenzone 3	680.0 – 858.2	CaO-Quellzement	178.2

8.1.2 Materialdurchlässigkeiten

Für die eingebrachten Versiegelungsmaterialien werden die Materialdurchlässigkeiten für die realistischen und konservativen Betrachtungen für Kurzzeit- bzw. Langzeitsicherheit verwendet. Technisch mögliche, optimistische Annahmen werden aus naheliegenden Gründen hier nicht verwendet. Die Annahmen für die einzelnen Materialien basieren auf folgenden Betrachtungen:

Schwerspat (Baryt)

Die verwendete Durchlässigkeit ergibt sich aus den Messungen der experimentellen Studien (GHOFRANI et al. 1994), welche die Eigenkompaktion des Sedimentbettes einschliessen. Aus Figur 4-9 ist ersichtlich, dass sich für eine Schwerspatstrecke von

100 m eine hydraulische Leitfähigkeit von ca. $7 \cdot 10^{-9}$ m/s (Permeabilität $700 \cdot 10^{-18}$ m²) ergibt. Für eine Versiegelungsstrecke mit einer Mächtigkeiten von 10 m kann immer noch ein Wert von $K = 10^{-8}$ m/s angesetzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass im Vergleich zu den langzeitigen in-situ Bedingungen die Sedimentation im Experiment als noch unvollständig anzusehen ist. Inwiefern sich die fortschreitende Mikrokomaktion der Sedimente über längere Zeiträume auf die Permeabilität auswirkt, kann im Experiment nicht ermittelt werden. Hinzu kommt, dass die Randläufigkeit entlang der glatten Innenwandung der Versuchsanordnung (Plexiglasrohre) verglichen mit der versiegelten Strecke im Bohrloch erheblich grösser ist. Es ist daher festzuhalten, dass *"unter in-situ Bedingungen die untersuchten Systeme erheblich niedrigere Durchlässigkeiten besitzen, als zahlenmässig durch Laborexperimente ausgewiesen wurde"* (GHOFRANI et al. 1994). Der nachstehend für beide Rechenfälle (realistisch/konservativ) verwendete Wert (10^{-8} m/s) ist somit als konservativ anzusehen.

Quellzement

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass die Zementstein-Durchlässigkeit vom eingesetzten CaO-DORNAP-Quellzement ca. $3 \cdot 10^{-12}$ m/s (Permeabilität $0.3 \cdot 10^{-18}$ m²) beträgt. Die Lösungs- und Zersetzungsvorgänge des Zementsteines durch Fremdfluide sind daher in realistische Relation zu den theoretischen Fließraten und den betrachteten Zeiträumen zu setzen. Da die bei der Degradation des Zementes zu berücksichtigenden Flüsse sehr gering sind, ist die Annahme, der Zement sei aus hydraulischer Sicht für die Langzeitbetrachtung vollkommen zu vernachlässigen, unrealistisch. Die für die Langzeitbetrachtung realistischen und konservativen Werte (10^{-9} und 10^{-8} m/s) wurden in Einklang mit den Annahmen der Langzeitsicherheit (NAGRA 1994a) gewählt (siehe Tabelle 8-2).

Tab. 8-2: Materialdurchlässigkeiten für den Nachweis der Systemdurchlässigkeit

K-Werte [m/s]	Betriebsphase (Kurzeitsicherheit)		Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit)	
	Realistisch	Konservativ	Realistisch	Konservativ
CaO-Quellzement	10^{-11}	10^{-11}	10^{-9b}	10^{-8b}
Tonschüttung	10^{-11}	10^{-9a}	10^{-11}	10^{-9a}
Schwerspat	10^{-8c}	10^{-8}	10^{-8c}	10^{-8}
^a Reduktion wegen Einbringtechnologie ^b Reduktion wegen Degradation ^c $L_{\min} = 10$ m				

Quellon HD

Für eine Schüttung aus Quellon HD wird vom Hersteller ein Wert von $K = 2 \cdot 10^{-11}$ m/s angegeben (Produktkatalog der Fa. SBF). Den materialtechnischen Untersuchungen (Kap. 4.3.2.3) zufolge ist die Durchlässigkeit einer aus Quellon HD gepressten Tablette

auf jeden Fall geringer als 10^{-11} m/s (Permeabilität $0.6 \cdot 10^{-18}$ m²). Letzterer Wert wird daher dem realistischen Rechenfall zugrunde gelegt. Für den konservativen Fall wurde angenommen, dass aufgrund der Neigung der Bohrung Probleme (z.B. Brückenbildung) auftreten können und dass dadurch die hydraulische Durchlässigkeit um 2 Größenordnungen vergrössert wird (10^{-9} m/s).

Tabelle 8-2 fasst die für den Nachweis der Systemdurchlässigkeit verwendeten Durchlässigkeiten zusammen.

8.1.3 Hydraulische Gradienten

Die Annahme der hydraulischen Gradienten für die Betriebsphase geht davon aus, dass im ungünstigsten Fall die Bohrung eine direkte Verbindung zu einem der Untertage-Bauwerke darstellt. Aus den Beobachtungen lässt sich für diesen Fall eine Potentialdifferenz von 400 m (940 - 540 m) mit abwärts gerichtetem Gefälle ansetzen (NAGRA 1997).

Für die Nachbetriebsphase wurde die extreme Annahme getroffen, dass das Potential auf Endlagerebene bis auf 1200 m ansteigt und so zu einer Differenz von 260 m (1200 - 940 m) führt, die aufwärts gerichtet ist. Es ist zu beachten, dass im Endlagerbereich derart hohe Potentialwerte niemals beobachtet wurden. Trotzdem können unter extrem konservativen Annahmen solche Werte simuliert werden (NAGRA 1997).

Die massgebenden Gesamtlängen der Versiegelungsstrecken errechnen sich dann entsprechend der geometrischen Vorgaben wie folgt: (a) 144.9 m, falls nur der Bereich oberhalb der Endlagerzone (> 510.8 m) betrachtet wird, und (b) 492.3 m für das gesamte Bohrloch. Dies ergibt aufwärts bzw. abwärts gerichtete Gradienten zwischen 0.5 und 2.8.

8.1.4 Auflockerungszone

Ist die hydraulische Durchlässigkeit der Versiegelung kleiner oder etwa gleich gross wie diejenige der Auflockerungszone des Bohrlochs, so wird der Wasserfluss durch das Bohrlochsystem entscheidend durch die geometrischen und hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone beeinflusst. Für die vorliegenden Berechnungen wird die Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone als Faktor 100 gegenüber dem intakten Wirtgestein im ersten Radius um die Bohrung angenommen. Diese Annahme basiert auf den Ergebnissen von 20 Hydrotests in der Palfris-Formation der Bohrungen SB1, SB3 und SB4, die ein Composite-Systemverhalten zeigten – also verschiedene Durchlässigkeiten für eine innere und äussere Zone um das Bohrloch (NAGRA 1993) aufwiesen. Die Testergebnisse belegen, dass die getroffenen Annahmen für die Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeiten der Auflockerungszone vertretbar sind. Betrachtet man die Ergebnisse der hydraulischen Tests in ihrer Gesamtheit, so ist der Wert von $K = 10^{-9}$ m/s als konservativ anzusehen. In Bezug auf die Ausdehnung der Auflockerungszone um die Bohrung wurde gemäss der konservativen Vorgehensweise, die in NAGRA (1997) beschrieben ist, eine Fläche mit einem Bohrlochradius um die Bohrung mit der Durchlässigkeit $K = 10^{-9}$ m/s und eine weitere Fläche (zwischen einem und 2 Bohrlochradii) mit der Durchlässigkeit $K = 10^{-10}$ m/s unterstellt.

8.2 Ermittlung der Wasserflüsse

Der Volumenstrom durch die versiegelte Bohrung wird gemäss Darcy's Gesetz ermittelt:

$$Q = \frac{K * A * \Delta h}{L} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

wobei:

- K: Äquivalente Durchlässigkeit der versiegelten / verfüllten Strecke [m/s]
- A: Durchflossener Querschnitt [m²]
- Δh: Potentialdifferenz über die versiegelte / verfüllte Strecke [m]
- L: Länge der versiegelten / verfüllten Strecke [m]

Dabei wird der äquivalente K-Wert einer Gesamtstrecke (Versiegelung und Verfüllung) berechnet nach (harmonisches Mittel):

$$K = \frac{L}{\frac{L_1}{K_1} + \dots + \frac{L_n}{K_n}}$$

wobei:

- K₁ ... K_n: hydraulische Durchlässigkeiten der verschiedenen Materialien
- L₁ ... L_n: die entsprechenden Längen und
- L = L₁ + ... + L_n

Eine entsprechende Rechnung erfolgt für die Wasserflüsse durch die Auflockerungszone.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-3 dargestellt. Für den Fall "Wasserfluss zwischen Endlagerniveau und Oberfläche" gilt: Die Wasserflüsse durch die versiegelte Bohrung ohne Auflockerungszone liegen zwischen 0.003 l/a (Kurzzeit/Betriebsphase) und 2.47 l/a (Langzeit/Nachbetriebsphase). Die Wasserflüsse durch die Bohrung und die Auflockerungszone liegen deutlich höher und betragen bis zu 3.64 l/a (Kurzzeit/Betriebsphase), und 4.83 l/a (Langzeit/Nachbetriebsphase).

Tab. 8-3: Berechnung der Wasserflüsse für eine Versiegelung über die Strecke zwischen Endlagerniveau und Oberfläche, eine Versiegelung über die gesamte Bohrung sowie für die Auflockerungszone

Bohrlochdurchmesser = 0.123 m			Betriebsphase/	Nachbetriebs-
Annahme: Ausdehnung der Auflockerungszone = Bereich von 0 bis 1 Radius mit $K = 10^{-9}$ m/s, Bereich von 1 bis 2 Radii mit $K = 10^{-10}$ m/s			Kurzzeit-	Langzeit-
			sicherheit	sicherheit
			Realistisch	Konservativ
Zone	Typ	L [m]	K [m/s]	K [m/s]
Zwischenzone 1	CaO-Quellzement	63.3	10^{-11}	10^{-8}
Schlüsselzone 1a	Tonschüttung	27.7	10^{-11}	10^{-9}
Schlüsselzone 1b	Schwerspat	53.9	10^{-8}	10^{-8}
Zwischenzone 2	CaO-Quellzement	134.2	10^{-11}	10^{-8}
Schlüsselzone 2	Tonschüttung	35	10^{-11}	10^{-9}
Zwischenzone 3	CaO-Quellzement	178.2	10^{-11}	10^{-8}
			Durchfluss [l/a]	Durchfluss [l/a]
Wasserfluss durch die versiegelte Bohrung (ohne Auflockerungszone)				
Fall: Fluss über die gesamte Bohrung			0.003	0.923
Fall: Fluss zwischen EL-Niveau und Oberfläche			0.016	2.473
Wasserfluss durch die Auflockerungszone [l/a]				
Fall: Fluss über die gesamte Bohrung			1.067	0.693
Fall: Fluss zwischen EL-Niveau und Oberfläche			3.623	2.355
Gesamtwasserfluss durch die versiegelte Bohrung und die Auflockerungszone [l/a]				
Fall: Fluss über die gesamte Bohrung			1.070	1.616
Fall: Fluss zwischen EL-Niveau und Oberfläche			3.639	4.828

8.3 Radionuklidmigration

Das realisierte Versiegelungssystem für SB4a/schräg wird charakterisiert durch:

- Strecken mit CaO-Quellzement mit Längen von 63.2, 134.2 und 178.2 m mit folgenden Eigenschaften:
 - sorbierendes Material mit geringer Durchlässigkeit ($K = 10^{-11}$ m/s) zumindest in einer Anfangsphase,
 - sorbierendes Material mit erhöhter Durchlässigkeit ($K = 10^{-9}$ m/s bzw. 10^{-8} m/s als konservative Annahme) als Folge einer Degradation nach langer Zeit.

- Strecken aus Bentonit mit Längen von 27.7 m und 35.0 m mit folgenden Eigenschaften: sorbierendes Material, geringe Durchlässigkeit ($K = 10^{-11}$ m/s bzw. 10^{-9} m/s als konservative Annahme).
- Eine Strecke mit Schwerspat mit der Länge von 53.9 m, für welche in der Abschätzung der Barrierenwirkung folgende Annahmen getroffen werden: keine Sorption, erhöhte Durchlässigkeit ($K = 10^{-8}$ m/s).

Wie Tabelle 8-3 entnommen werden kann, ergeben sich für dieses System (Gesamtwasserfluss durch die versiegelte Bohrung und die Auflockerungszone, Fall: Fluss zwischen Endlagerniveau und Oberfläche) Wasserflüsse im Bereich von 1.07 – 4.83 l/a.

Die in Kap. 6.2 dokumentierten Berechnungen zeigen für ein entsprechendes System, dass das vorgeschlagene Mehrkomponentensystem eine genügende Barrierenwirkung aufweist, d.h. dass die Barriereneffizienz (s. Kap. 6.2) nahe bei 1 liegt:

- Eine Versiegelungsstrecke (Bentonit) mit einer Länge von 10 m (Fall 1 bzw. Fall 2a und 2b) alleine ergibt für kurzlebige Radionuklide eine genügende Barrierenwirkung.
- Auch eine Verfüllstrecke (Zement) von 100 m (Fall 3a bzw. 3b) ergibt für sich alleine eine genügende Barrierenwirkung.

Es ist daher keine neue sicherheitstechnische Beurteilung der Versiegelung erforderlich, da die Bedingungen der Versiegelung durch die in Kap. 6.2 dokumentierten Fälle abgedeckt sind.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Im Rahmen der zweiten Etappe des Untersuchungsprogramms für das Standortgebiet Wellenberg wurde 1994/95 die Sondierbohrung SB4a/schräg abgeteuft. Diese Bohrung diente vorrangig der Erkundung und Charakterisierung eventuell vorhandener steilstehender Störungen im Wirtgestein und stiess erstmals in den unmittelbaren Endlagerbereich vor. Aufgrund ihrer Lage und ihres Verlaufs kommt der Bohrung SB4a/schräg als potentielle Wegsamkeit für einen möglichen Schadstofftransport in die Biosphäre eine wesentliche Bedeutung zu. Es musste deshalb erstmals eine Bohrung der Nagra nach Kriterien einer minimalen Nuklidfreisetzung versiegelt werden.

Von behördlicher Seite (HSK) wurde gefordert, vor Erstellung der Bohrung ein *Verfüllungs-/Versiegelungskonzept* zu erarbeiten. Dieses Konzept hatte einerseits die zeitlichen Aspekte einer ca. 50-jährigen Bau- und Betriebsphase des Endlagers und eines Einschlusszeitraums der Abfälle über mehrere tausend Jahre (Nachbetriebsphase) zu berücksichtigen, andererseits auch die geologisch/technischen Randbedingungen der Bohrung sowie die technische Machbarkeit der Verfüllungs-/Versiegelungsmethodik. Nach Beendigung der Bohrarbeiten und der hydrogeologischen Untersuchungen war der Behörde ein auszuführendes *Versiegelungsprogramm* vorzustellen, das die konkreten hydrogeologischen Gegebenheiten berücksichtigte und die Ausführung der Verfüllung- und Versiegelungsarbeiten festlegte. Parallel dazu und nach abgeschlossener Versiegelung war die *sicherheitstechnische Beurteilung* der Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg durchzuführen.

Die grundsätzliche Machbarkeit einer Bohrlochversiegelung wurde unter Einbezug des internationalen Technikstandes bereits 1989 demonstriert (BRENNER & JEDEL-HAUSER 1989). Zudem zeigte es sich, dass sowohl Anordnung und Zusammensetzung der Versiegelung als auch die Methode der Einbringung nur in Zusammenhang mit den standortspezifischen Verhältnissen des Wirtgesteins und den in-situ angetroffenen Bohrlochbedingungen betrachtet werden kann.

Im Verlauf der Realisierung der Bohrung SB4a/schräg wurden Abschätzungen der Barrierenwirkung der Versiegelung und Verfüllung für die Sondierbohrung SB4a/schräg hinsichtlich der Nuklidfreisetzung durchgeführt (GRIBI 1996). Sie zeigten die hohe Barrierenwirkung einer Verfüllung und Versiegelung für ein breites Spektrum an hydraulischen und geometrischen Gegebenheiten.

Das *Versiegelungskonzept* basierte auf einer am Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung der Technischen Universität Clausthal (BRD) in Auftrag gegebene Studie mit integriertem Konzeptvorschlag. Die Studie befasste sich insbesondere mit der technischen Beurteilung und Prüfung der Verfüllmaterialien. So wurden in umfangreichen Laborversuchen unter Simulation der spezifischen Bohrlochbedingungen der Bohrung SB4a/schräg die Eigenschaften verschiedener Quellzemente, Sedimentbette und Tonprodukte insbesondere in Bezug auf ihre Festigkeit, Verpumpbarkeit, Quell-/Expandierfähigkeit und hydraulische Dichtigkeit untersucht. Auch während der späteren Ausarbeitung des *Versiegelungsprogramms* wurden weitere Materialien evaluiert und im Labor zum Teil mit eigens dafür entwickelten Gerätschaften getestet. Weitere Gutachten zu Spezialfragestellungen wurden ebenfalls von Experten eingeholt.

Nach Abschluss der Bohrarbeiten wurde ein *Versiegelungsprogramm* vorgelegt, das speziell die in SB4a/schräg vorgefundenen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten berücksichtigte. Neben dem geometrischen und materialtechnischen Auf-

bau der Versiegelung schreibt das Programm auch die Vorgehensweise beim Einbringen der Materialien sowie Massnahmen zur Qualitätssicherung vor. Das hierbei umgesetzte Versiegelungskonzept basiert auf einem redundanten Multikomponentensystem, das die Abdichtwirkung und Standsicherheit durch die serielle Anordnung von Materialien mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften erzeugt.

Die schliesslich *realisierte Versiegelung* besteht aus sieben hintereinander geschalteten Einzelbarrierezonen. Ihre Gesamtlänge beträgt 492.1 m und überdeckt den offenen Bohrlochbereich ab Sohle (858.2 m Bohrtiefe) bis in den verrohrten Bereich (365.6 m Bohrtiefe). Als Materialien kamen CaO-Quellzement, eine Schüttung aus Ton-Pellets (Quellon HD), Schwerspat sowie ein mechanischer Packer zum Einsatz. Die in einem ausführlichen Bericht (MACEK & KARSCH 1996) dokumentierten Ausführungsarbeiten nahmen insgesamt 14 Tage in Anspruch und konnten programmgemäss ohne grössere Schwierigkeiten durchgeführt werden.

Für die sicherheitsanalytische Beurteilung des realisierten Versiegelungssystems wurde eine Reihe von Studien und Nachweisen durchgeführt. Gemäss der Modellierungsstudie des Nuklidtransports durch das Versiegelungssystem beeinflussen folgende Parameter die Nuklidrückhaltewirkung wesentlich:

- Die Wasserflussrate durch das Bohrlochsystem (in Abhängigkeit von der Permeabilität und dem hydraulischen Gradienten)
- Die Länge des versiegelten/verfüllten Bohrlochabschnitts
- Die Halbwertszeit und Sorptionseigenschaften des betrachteten Nuklids.

Alle anderen Systemparameter beeinflussen die Barrierenwirkung des Versiegelungssystems nur in untergeordnetem Masse.

Die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse zeigen, dass bereits eine Länge von 10 m des intakt versiegelten Bohrlochabschnitts für die betrachteten, kurzlebigen Radionuklide eine gute Barrierenwirkung ergibt.

Langlebige oder nicht sorbierende Nuklide werden im versiegelten Bohrlochsystem nicht oder kaum zurückgehalten. Die Auswirkungen sind jedoch vergleichbar mit Fliesspfaden entlang kataklastischen Zonen. Selbst eine Fliesspfadlänge von 100 m durch die kataklastischen Zonen des intakten Wirtgesteins am Standort Wellenberg führt nicht zu einer wesentlichen Reduktion der Konzentration von langlebigen und/oder nichtsorbierenden Nukliden. Die mit diesen Nukliden verbundenen Strahlendosen liegen aber dank der effizienten Rückhaltung im Nahfeld und dank des geringen relativen Anteils der über das versiegelte/verfüllte Bohrloch stattfindenden Nuklidfreisetzung unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a.

Der sicherheitsanalytischen Beurteilung für das in SB4a/schräg realisierte Versiegelungssystem wurden verschiedene Rechenfälle für die Berechnung der Wasserflussraten durch das versiegelte/verfüllte Bohrlochsystem zugrunde gelegt. Hierbei wurde zwischen realistischen und konservativen Annahmen hinsichtlich der Materialeigenschaften unterschieden. Zudem berücksichtigen die Rechenfälle die Verhältnisse für eine Betriebsphase (Kurzzeitsicherheit) und eine Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit). Der Maximalwert für die Wasserflussraten durch das versiegelte Bohrlochsystem beträgt 4.83 l/a zwischen Endlagerniveau und Oberfläche. Unter diesen extrem konservativen Voraussetzungen und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Modellie-

rungsstudie zum Nuklidtransport kann die Barrierenwirkung des versiegelten/verfüllten Bohrlochsystems SB4a/schräg als genügend bezeichnet werden.

In Bezug auf die Langzeitstabilität der Einzelmaterialien wird nur hinsichtlich der Zementdegradation mit einer zeitlichen Erhöhung der anfänglich geringen Durchlässigkeit von $K = 10^{-11}$ m/s auf $K = 10^{-9}$ m/s und, bei konservativen Rechenfällen, auf $K = 10^{-8}$ m/s gerechnet. Bei den übrigen Materialien wird keine langzeitige Beeinträchtigung der Dichtungseigenschaften erwartet.

Ferner musste die langzeitige, interaktive Wirkung der einzelnen Barrierelemente im Hinblick auf das gesamte Durchlässigkeitsvermögen der Verfüllungs-/Versiegelungsstrecke zusammen mit dem Eigenverhalten des Gebirges im Bohrlochbereich beachtet werden. In diesem Zusammenhang wird allenfalls eine Interaktion hochalkalischer Zementporenwässer mit dem Mergel erwartet. Basierend auf früheren Arbeiten der Nagra in Zusammenhang mit dem Endlagernahfeld (NAGRA 1994a) werden die Konsequenzen auf das Versiegelungssystem jedoch nicht als übermässig kritisch beurteilt.

Unter Einsatz einer sorgfältigen Planung, Ausführung und Qualitätssicherung war es möglich, die Verfüllung und Versiegelung der Bohrung SB4a/schräg so zu realisieren, dass die sicherheitstechnischen Vorgaben hinsichtlich der Nuklidfreisetzung erfüllt werden.

10 LITERATUR

- ALLIQUANDER, O.E. (1968): Das moderne Rotarybohren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 437 p.
- API-SPEC 10A (1995): Specification for Well Cements, 22nd Edition, American Petroleum Institute.
- API-SPEC 13A (1984): Oil Well Drilling Fluid Materials, 10th Edition, American Petroleum Institute.
- AUSTIN, E.H. (1983): Drilling Engineering Handbook. Int. Human Resources Development Corporation, Boston, Massachusetts.
- BergG (1980): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGB1. I S 1310). 5. überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1992.
- BLÜMLING, P. (1997): Borehole Sealing Project at the Grimsel Test Site, 3rd European Engineering Geology Conference, 33rd Annual Conference of the Engineered Group of Geological Society, p. 19-35.
- BRENNER, R.P. & JEDELHAUSER, P. (1989): Bohrlochversiegelung: Konzept und Machbarkeitsnachweis. Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Zürich. Nagra Techn. Ber. NTB 89-26, Nagra, Wettingen.
- BUCHER, F., KAHR, G., MADSEN, F.T. & MAYOR, P.A. (1993): Wechselwirkung von abgebundenem Zement mit verdichteten Bentoniten: Quelldruckversuche mit anschließenden mineralogischen Untersuchungen. Nagra Techn. Ber. NTB 93-25, Nagra, Wettingen.
- BUNDESBERGGESETZ (BBergG) (1992): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGB1. I S 1310). 5. überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Glückauf GmbH, Essen.
- BVOT (1976): Tiefbohrverordnung: Bergverordnung zur Änderung der Bergverordnung über Tiefbohrungen sowie über die Gewinnung von Erdöl und Erdgas durch Bohrlöcher im Bezirk des Oberbergamtes Clausthal-Zellerfeld (Tiefbohrverordnung).
- DAVENPORT, B. (1984): Handbook of Drilling Practices. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- DIN 1060 (1995): Baukalk – Teil 1: Definitionen, Anforderungen, Überwachung.
- DIN 1164 (2000): Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis.
- DROSTE, J. & ROTHFUCHS, T. (1998): In-situ testing of crushed salt backfill behaviour in a salt repository. *In*: Proceedings of a Cluster seminar held in Alden Biesen, Belgium, 10 and 11 December 1997. EUR 18323 EN, Commission of the European communities, Luxembourg.

- FAIRHURST, C., GERA, F., GNIRK, P., GRAY, M. & STILLBORG, B. (1993): STRIPA: Overview Volume I. Executive Summary. OECD/NEA International Stripa Project 1980-1992.
- FINLEY, R.E. & TILLERSON, J.R. (1992): WIPP Small Scale Seal Performance Tests — Status and Impacts. SAND91-2247 UC-721.
- GHOFRANI, R., PLACK, H., HÜSECKEN, T., KLEE, O., NEUFELD, A. & MIEHE, H. (1994): Studie mit Konzeptvorschlag zur Verfüllung/Versiegelung von SB4a/schräg. ITE TU Clausthal, Dezember 1994.
- GHOFRANI, R. (1995): Durchlässigkeit von Quillon HD, ITE TU Clausthal, November 1995.
- GRIBI, P. (1996): SMA/WLB: Abschätzung der Barrierenwirkung der Versiegelung und Verfüllung für die Sondierbohrung SB4a/schräg. Unpubl. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen.
- HUGI, M. (1994): Bohrlochversiegelung SMA/WLB – Überlegungen zur Hydraulik. Unpubl. Colenco Internes Memorandum, Colenco Power Consulting AG, Baden-Dättwil.
- JAUQUET, O., LANYON, P., MARSCHALL, P. & TAUZIN, E. (1997): WLB: The K-model Wellenberg – A geostatistical model of the host rock hydraulic conductivity. Unpubl. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen.
- LAVANCHY, J.M. & MARSCHALL, P. (1997): WLB: Hydrogeological interpretation of the Wellenberg borehole data (SB1, SB2, SB3, SB4, SB6, SB4a/v and SB4a/s). Unpubl. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen.
- MACEK, A. & KARSCH, H. (1996): WLB: Versiegelung der Sondierbohrung SB4a/schräg, Einbaubericht. Unpubl. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen.
- McKINLEY, I. & GAUTSCHI, A. (1995): On the use of bentonite/magnetite pellets for borehole sealing. Unpubl. Nagra Internes Memorandum, Nagra, Wettingen.
- NAGRA (1993): Untersuchungen zur Standorteignung im Hinblick auf die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle. Geologische Grundlagen und Datensatz zur Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg. Nagra Techn. Ber. NTB 93-28, Nagra, Wettingen.
- NAGRA (1994a): Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW). Nagra Techn. Ber. NTB 94-06, Nagra, Wettingen.
- NAGRA (1994b): Kristallin I – Safety Assessment Report. Nagra Techn. Ber. NTB 93-22, Nagra, Wettingen.
- NAGRA (1997): Geosynthese Wellenberg 1996. Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. Nagra Techn. Ber. NTB 96-01, Nagra, Wettingen.

- NAGRA (1999): SMA/WLB – Sicherheitstechnische Bewertung des Geodatensatzes (Phase II). Unpubl. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen.
- NEALL, F. (1994): Modelling of the near-field chemistry of the Wellenberg site: Application of the extended cement degradation model. Nagra Techn. Ber. NTB 94-03, Nagra, Wettingen.
- OBERBERGAMT CLAUSTHAL-ZELLERFELD ERLASSENE RICHTLINIE (1987): Richtlinien des Oberbergamtes Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen auflässiger Bohrungen. Clausthal-Zellerfeld.
- PUSCH, R. (1994): Note on stability of bentonite. Personal communication.
- RULE 14, (1983): §3.14 RULE 14. PLUGGING, Railroad Commission/Texas.
- SMITH, D.K. (1986): Primary cementing. In: Drilling Practices Manual, 2nd ed., P.L. Moore ed., Pennwell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, p. 400-460.
- SMITH, D.K. (1976a): Special Cementing Applications. SPE of AIME, USA-Millet the Printer. Dallas, Texas, Chapter 14, p. 129-137.
- SMITH, D.K. (1976b): Open-Hole Cement Plugs. SPE of AIME, Cementing. Dallas, Texas, p. 97-103.
- SMITH, D.K. (1976c): Cementing. Society of Petroleum Engineers of AIME, 184 p.
- SMITH, P.A. (1993): Quantifying the performance of the geosphere as a barrier to the migration of radionuclides. Unpubl. Nagra Interner Bericht, Nagra, Wettingen.
- VOLCKAERT, G., HOLVOET, F.X., GENS, A., VAUNAT, J., LASSABATERE, Th., IMBERT, Ch., VILLAR, M., MOUCHE, E., GENTY, A., LEPOTIER, C., CANY, F. & MILLARD, A. (1998): RESEAL: A large scale in situ demonstration for REpository SEALing in an argillaceous host rock. *In*: In situ testing in underground research laboratories for radioactive waste disposal. Proceedings of a Cluster seminar held in Alden Biesen, Belgium, 10-11 December 1997, EUR 18323 EN, Commission of the European communities, Luxembourg, p. 39-57.

ANHANG A

Einbaubericht

Kaliberlog

Nach einem problemlosen Roundtrip bis Bohrlochsohle konnte das Kaliberlog jedoch nur ab 545 m bis Rohrschuh gemessen werden. Im verrohrten Bereich von 400 bis 416 m weist das Kaliberlog ein um ca. 5 % kleineres Volumen als den tatsächlichen Rohrinhalt aus, d.h. die Kalibermessung ist um ca. 5 % zu klein kalibriert. Über den Openhole-Bereich wurde das Bohrlochvolumen um ca. 8 % grösser als der theoretische Wert gemessen, sodass ein effektiver Gesamtwert von ca. 13 % für den Zuschlag auf das theoretische Bohrlochvolumen durch das Kaliberlog ermittelt wurde. Der für die Volumensberechnungen der Zementations- und Schwerspatsedimentbettstrecken angesetzte Zuschlag von 30 % zum theoretischen Bohrlochinhalt ist daher reichlich bemessen.

Roundtrip und Klarspülen

Der Roundtrip bis Sohle zeigte keinen Widerstand. Probleme bei der Wasserversorgung aus dem Reservoir machten den Antransport von Wasser für den Austausch erforderlich und führten zu geringen Zeitverzögerungen. Das Klarspülen selbst verlief einwandfrei.

I. Zementation

Mit dem Tubingstrang konnte die Sohle problemlos angefahren werden, die letzten 5 m wurden spülend eingebaut. Der Versuch, nach Schliessen des Preventers links zu zirkulieren, war erfolglos: Nach einem kurzen Schwall (ca. 20 l) trat kein Rücklauf durch den Tubing auf, mit 5 bar Pumpendruck konnten insgesamt ca. 1 m³ Wasser bei einer Rate von 200 l/min verpresst werden.

Da anschliessend auch mit 40 bar keine Rechts-Zirkulation mehr hergestellt werden konnte, wurde versuchsweise bis 300 m geschwappt. Durch die Druckdifferenz konnte der Stopper in der Bullnose des Tubingstranges beseitigt werden, und ein Bohrlochinhalt wurde rechts durchzirkuliert. Das vorgesehene Abspülen nach der Zementation mit Links-Zirkulation war somit aufgrund der gemachten Erfahrung nicht mehr durchführbar.

Begleitet von permanenten Kontrollmessungen mit der Druckwaage wurde die Zementbrühe auf ein Gewicht von 1.91 kg/l angemischt. Das Verpumpen und Nachpumpen erfolgte einwandfrei. Nach Abschlagen des Zirkulationsschlauchs am Tubingkopf saugte die Säule noch leicht, womit das volumenmässig korrekte Nachpumpen bestätigt wurde.

Von der Zementbrühe wurden 4 Proben in 3 Stk. 1 l PE-Flaschen und eine Glasflasche abgefüllt. Die Glasflasche ist wie erwartet durch den Quellvorgang beim Abbinden geplatzt.

Beim Abspülen trat eine Mischzone zutage. Die Abspülteufe wurde mit 665.8 m bewusst höher als der geplante Zementkopf gewählt um ggf. auftretende Setzungen oder Verluste zu kompensieren. Da das Einbringen des Tons durch das Bohrgestänge erfolgen sollte, war ein Aufkernen des Zements bis zur Solltiefe ohne weiteren Gestängewechsel möglich.

Nach 28-stündiger Zementerhärtungszeit wurde der Zementkopf mit dem Bohrgestänge passend angetroffen und der Zement bis 680.0 m aufgekernt. Die visuell feststellbare Qualität des Zementkerns war gut und entsprach den Erwartungen.

<i>Volumenberechnung 1. Zementation, Bohrloch 123 mm</i>					
von Teufe [m]	bis Teufe [m]	Inhalt [l/m]	Zuschlag [%]	Inhalt ges. [l/m]	Volumen [l]
858.2	680.0	11.8	30	15.3	2726

<i>Zementberechnung</i>			
	Rezept	angemischt	Einheit
Mischzement	105	4100	[kg]
Wasser	47.25	1845	[l]
Brühe	79.85	3117	[l]
spez. Gewicht	1.9	1.91	[kg/l]

<i>Zementstrecke gem. Anmischvolumen, Bohrloch 123 mm</i>				
Brühe [l]	Inhalt ges. [l/m]	Strecke [m]	von Teufe [m]	bis Teufe [m]
3117	15.3	203.7	858.2	654.5

<i>Nachpumpvolumen, 2 3/8" Tubing</i>						
Verdrängung	Strecke	Verdrängung	Inhalt	Füllhöhe	NP-Teufe	NP-Volumen
[l/m]	[m]	[l]	[l/m]	[m]	[m]	[l]
0.84	203.7	171	2.02	85	569.5	1150

I. Tonschüttung

Das Einbringen des Tons konnte nach anfänglichen Schwierigkeiten erfolgreich ausgeführt werden. Die Schwierigkeiten entstanden vorwiegend dadurch, dass nach jedem Einbringen von Teilmengen des Tons anfänglich das Abtasten der jeweiligen Ton-Tops nur mit der Kernbohrkrone versucht wurde. Dabei liessen sich Teile der Tonschüttung in das Gestänge verdrängen, ohne ausreichend signifikanten Widerstand zu erzeugen. Zudem verhinderten die Breite der Kronenlippe zusammen mit den Spülkanälen durch die Lippe, dass ein im Gestänge abdichtender Pfropfen entstand, der durch einen Druckanstieg bemerkbar gewesen wäre. Ein an der Stirnfläche verschlossenes Innenrohr als "Kronenverschluss" zum verbesserten Abtasten einzusetzen, erwies sich anfangs als ebenso problematisch, da sich das Aussenkernrohr nach den o.g. ersten Abtastversuchen innen und besonders im Kronen- und Arretierungsbereich durch Tonreste verschmiert hatte und das Innenrohr nicht sicher in seiner vorgesehenen Position verriegeln konnte. Nach einem Wechsel zu einer innen und aussen glatten Rohrschuhkrone wurde jedoch zusammen mit dem unten verschlossenen Innenrohr ein erfolgreiches Abtasten möglich.

Die erste Teilmenge Ton, 7 Sack à 25 kg, rechnerisch für 10 m Strecke ausreichend, wurde in das Bohrgestänge eingeschüttet. Mit langsamer Gestängedrehung und leichtem Pumpen wurde das Einbringen der Ton-Pellets unterstützt. Nach ca. 25 min Pumpzeit versuchte man, den Kopf der Tonschüttung mit dem Gestänge abzutasten.

Bei 673.5 m war Widerstand von 1.5 t vorhanden. Das Gestänge wurde wieder hochgefahren und anschliessend kurz zirkuliert, um sicherzustellen, dass der Strang frei war.

Das Einschütten der 2. Teilmenge Ton erfolgte mit 12 Sack (300 kg) aufgrund der "zu tief" abgetasteten Oberkante. Nach dem Pumpen und Einwerfen des mit inzwischen hergestellter verschlossener Hülse versehenen Innenrohrs trat beim Landen des Innenrohrs ein hoher Pumpendruck auf, der erst durch Hochfahren und Drehen des Gestänges abgebaut werden konnte. Ein Abtastversuch zeigte erst bei 672 m deutlichen Widerstand (2 t). Das Drehen und Fahren musste die Ton-Pellets soweit zerrieben haben, dass in eine homogene Tonmasse gefahren werden konnte und das nicht verriegelte Innenrohr hochgeschoben wurde. Dass das Rohr nicht verriegelt war, konnte erst anhand von Tonresten auf den Arretierungsklinken nach dem Ziehen definitiv festgestellt werden.

Nach dem Hochfahren des Gestänges und Spülen wurde das Innenrohr gezogen.

Als dritte Teilmenge wurden weitere 12 Sack (300 kg) Ton eingeschüttet. Nach dem Zirkulieren warf man das Innenrohr ein und kontrollierte durch Nachfahren mit dem Kernrohrfänger das Verriegeln. Es konnte bei 667 m Widerstand festgestellt werden.

Um für das weitere Einfüllen sicherzustellen, dass kein Ton mehr im Gestänge und im Kernrohr klebte und um gleichzeitig mit einer innen glatten Krone das Herausgleiten der Pellets zu verbessern, erfolgte ein Gestängeausbau. Nach dem Kronenwechsel konnte man den Kopf der bereits eingebrachten Tonschüttung bei 666 m mit 3 t Widerstand und 10 bar Pumpendruck feststellen, das Innenrohr wurde gezogen. Dies bestätigte zuverlässig die Teufe vom vorhergehenden Abtasten.

Anschliessend erfolgte das etappenweise Einschütten (10 Sack = 250 kg Ton-Pellets) und Hochziehen des Bohrgestänges. Nach Zirkulieren und Einwerfen des Innenrohrs trat beim Landen des Innenrohrs ein Druckanstieg auf, der durch Hochfahren des Gestänges abgebaut wurde. Durch Nachfahren mit dem Fänger wurde das ordnungsgemässe Verriegeln des Innenrohrs kontrolliert und anschliessend der Ton abgetastet. Von 645 - 658 m stieg der Widerstand stetig bis auf max. 3 t an. D.h. in diesem Bereich wurde die Tonschüttung z.T. durchfahren und verdichtet. Das Gestänge wurde bis 645.6 m ausgebaut und das Innenrohr gezogen. Am Innenrohr wurden stark verdichtete Pellets zutage gebracht.

Als letzte Tonschüttung wurden 10 Sack (250 kg) eingeschüttet, zur Sohle zirkuliert und das Kernrohr eingeworfen. Mit 2.5 t Widerstand und 7 bar Pumpendruck wurde bei 645.0 m eindeutig aufgestanden und damit der Kopf der Schüttung festgestellt.

Als Vorbereitung für die nächste Zementation wurde das Bohrloch erneut mit der vollmassigen Kernbohrkrone drehend und spülend bis 645.0 m befahren, um vor der Zementation ggf. vorhandene Tonreste von der Bohrlochwand zu entfernen.

<i>Volumenberechnung 1. Tonstrecke, Bohrloch 123 mm</i>				
von Teufe [m]	bis Teufe [m]	Strecke [m]	Inhalt [l/m]	Volumen [l]
680	645	35	11.8	413

<i>Schüttvolumen</i>			
Inhalt [l]	Schüttgewicht [kg/l]	Schüttgewicht [kg]	Säcke à 25 kg [Stk.]
413	1.4	578	23.1

II. Zementation

Mit dem für die Zementation eingebauten Tubing wurde auf ein nochmaliges Abtasten verzichtet, da grosse Gefahr bestand, mit der geringen Stirnfläche der "Tubingbullnose" zu weit in den Ton zu fahren und ein Verstopfen der "Bullnose" zu bewirken (die "Bullnose" ist im Innendurchgang geringfügig kleiner als der Tubing).

Die Zementbrühe wurde auf ein Gewicht von 1.89 kg/l angemischt, verpumpt und durch die entsprechende Nachpumpmenge vor Ort plaziert. Auch hier saugte der Tubing als positives Indiz nach Lösen der Schlauchverschraubung leicht nach. Nach Rückzug des Tubings bis zur Abspülteufe wurde eine Mischzone rechts auszirkuliert.

Das Abtasten des Zementkopfs (1 t, 8 bar) bei geringer Zirkulationsrate zeigte den Kopf bei 510.8 m ca. 5 m tiefer als abgespült. Aufgrund der starken Auskesselung im Zementationsabschnitt war dies als normal zu werten, da sich der Zement in diesen Zonen stärker setzen konnte.

<i>Volumenberechnung 2. Zementation, Bohrloch 123 mm</i>					
von Teufe [m]	bis Teufe [m]	Inhalt [l/m]	Zuschlag [%]	Inhalt ges. [l/m]	Volumen [l]
645.0	505.0	11.8	30	15.3	2142

<i>Zementberechnung</i>			
	Rezept	angemischt	Einheit
Mischzement	105	3300	[kg]
Wasser	47.25	1520	[l]
Brühe	79.85	2545	[l]
spez. Gewicht	1.90	1.89	[kg/l]

<i>Zementstrecke gem. Anmischvolumen, Bohrloch 123 mm</i>				
Brühe [l]	Inhalt ges. [l/m]	Strecke [m]	von Teufe [m]	bis Teufe [m]
2545	15.3	166.3	645.0	478.7

<i>Nachpumpvolumen, 2 3/8" Tubing</i>						
Verdrängung [l/m]	Strecke [m]	Verdrängung [l]	Inhalt [l/m]	Füllhöhe [m]	NP-Teufe [m]	NP-Volumen [l]
0.84	166.3	140	2.02	69.3	409.4	827

Schwerspatsedimentbett

Das Anmischen der Schwerspatsuspension erfolgte mit 2.5 t Schwespat auf ein Gewicht von 2.4 kg/l. Das Verpumpen und Nachpumpen konnte einwandfrei ausgeführt werden, der Tubing saugte auch nach Lösen der Schlauchverschraubung. Der Ausbau des Tubings erfolgte bis 379 m. Rückstellproben wurden genommen.

Nach einer Wartezeit von ca. 18 h bzw. 36 h zeigten zwei Abtastversuche mit dem Tubingstrang keinen merklichen Widerstand. Bei einem dritten Versuch mit dem Bohrgestänge und dem geschlossenen Innenrohr nach ca. 70 h konnte ab 459.6 bis 473.6 m ein Widerstand von 0.5 bis 1 t gemessen werden.

Die Rückstellproben zeigten eindeutig, dass ein Absetzen des Schwerspats erfolgt war. Ein geringfügiger Widerstand gegen das Eindringen eines Prüfstabes war feststellbar, mit diesem Widerstand konnte jedoch die ganze Probe durchfahren werden. Ein Sedimentbett mit einer "festen" und mit den zur Verfügung stehenden Mitteln deutlich abtastbaren Oberkante war also nicht zu erwarten. Der Prüfstabdurchmesser betrug bei einem Probendurchmesser von ca. 10 cm lediglich ca. 6 mm. Dies entspricht in keiner Weise der Relation im Bohrloch, sodass im Bohrloch ein höherer Widerstand durch die starke Kolbenwirkung des unten fast geschlossenen Gestänges im nur geringfügig grösseren Bohrloch zu erwarten war.

Nach den Laborversuchen der TU Clausthal sedimentiert eine Suspension mit einer Dichte 1.6 kg/l erheblich schneller aus. Um das bereits eingebrachte Sedimentbett und seinen durch die vorhergehenden Abtastversuche ggf. erneut aufgelockerten Top-Bereich durch eine zusätzliche Auflast mechanisch zu verdichten, wurden zusätzlich 1.3 m³ Schwerspatsuspension mit einer Dichte von 1.6 kg/l angesetzt. Diese wurde bis 455 m im Gestänge eingepumpt und anschliessend das Gestänge bis 403 m ausgebaut.

Die Rückstellproben der 1.6 kg/l-Suspension zeigten nach 12 h ein klar abgesetztes Sedimentbett, welches aber ebenfalls nur minimalen Widerstand gegen ein Eindringen aufwies.

Beim darauffolgenden Abtastversuch im Bohrloch mit Kerngestänge und geschlossenem Innenrohr konnte ab 450 m bis 453 m ein eindeutiger und schnell zunehmender Widerstand von über 1 t festgestellt werden. Daraufhin wurde bis 456.9 m spülend tiefer gefahren und der überschüssige Schwerspat bis auf diese Teufe ausgespült.

<i>Volumenberechnung Schwerspatstrecke, Bohrloch 123 mm</i>					
von Teufe [m]	bis Teufe [m]	Inhalt [l/m]	Zuschlag [%]	Inhalt ges. [l/m]	Volumen [l]
510.8	460.0	11.8	30	15.3	777

<i>Suspensionsberechnung</i>			
	Rezept	angemischt	Einheit
Schwerspat	100	2500	[kg]
Wasser	32	800	[l]
Brühe	55.0	1375	[l]
spez. Gewicht	2.40	2.40	[kg/l]

<i>Sedimentbett, Bohrloch 123 mm</i>						
	Suspension [l]	Inhalt ges. [l/m]	Setzfaktor	Füllhöhe [m]	von Teufe [m]	bis Teufe [m]
verpumpen	1375	15.3		89.9	510.8	420.9
sedimentiert	1375	15.3	1.26	71.3	510.8	439.5

<i>Nachpumpvolumen, 2 3/8" Tubing</i>						
Verdrän- gung [l/m]	Strecke [m]	Verdrän- gung [l]	Inhalt [l/m]	Füllhöhe [m]	NP-Teufe [m]	NP-Volumen [l]
0.84	89.9	76	2.02	37.6	420.9	850

<i>Suspensionsberechnung</i>			
	Rezept	angemischt	Einheit
Schwerspat	100	1000	[kg]
Wasser	105	1050	[l]
Brühe	128	1280	[l]
spez. Gewicht	1.6	1.60	[kg/l]

<i>Sedimentbett, Bohrloch 123 mm</i>						
	Suspension [l]	Inhalt ges. [l/m]	Setzfaktor	Füllhöhe [m]	von Teufe [m]	bis Teufe [m]
verpumpen	1280	15.3		83.7	459.6	375.3
sedimentiert	1280	15.3	2.81	29.8	459.6	429.2

<i>Nachpumpvolumen, 2 3/8" Tubing</i>						
Verdrän- gung [l/m]	Strecke [m]	Verdrän- gung [l]	Inhalt [l/m]	Füllhöhe [m]	NP-Teufe [m]	NP-Volumen [l]
0.84	83.7	70	2.02	34.7	340.6	688

II. Tonschüttung

Die zweite Tonstrecke wurde in drei Etappen mit Ton-Pellets aufgefüllt. Nach den ersten 7 Sack (175 kg) wurde der Gestängeinhalt einmal verdrängt und das geschlossene Innenrohr eingeworfen. Nach dem Landen und kontrollierten Verriegeln des Innenrohrs konnte beim Abtasten eindeutiger Widerstand von 0.5 t bei 445.0 m festgestellt werden.

Eine zweite Schüttung mit Gestängestand bei 430.8 m und mit 7 Sack Ton-Pellets wurde in gleicher Weise ausgeführt und bei 432.2 m abgetastet.

Die dritte Schüttung mit 4 Sack Ton-Pellets erfolgte nach Ausbau des Strangs bis 421.5 m. Sie konnte bei 429.2 m mit 2 t belastet werden.

Das Bohrloch wurde anschliessend drehend und spülend mehrfach zwischen 350 m und 428.5 m befahren, um evtl. vorhandene Tonreste zu entfernen und für die Zementation eine saubere Bohrlochwand herzustellen. Aufgrund der praktischen Erfahrungen aus der ersten Strecke, der um 30 % verringerten Teufe und dem kurzem Open-Hole Bereich war diese Tonstrecke gesamthaft besser handzuhaben.

<i>Volumenberechnung 2. Tonstrecke, Bohrloch 123 mm</i>				
von Teufe [m]	bis Teufe [m]	Strecke [m]	Inhalt [l/m]	Volumen [l]
456.9	429.2	27.7	11.8	327

<i>Schüttvolumen</i>			
Inhalt [l]	Schüttgewicht [kg/l]	Schüttgewicht [kg]	Säcke à 25 kg [Stk.]
327	1.4	458	18.3

III. Zementation

Die dritte Zementation wurde praktisch genauso wie die zweite Zementation ausgeführt, auf ein nochmaliges Abtasten des Tons mit dem Tubingstrang wurde verzichtet. Die Zementbrühe wurde mit 1.91 kg/l angemischt, eingepumpt und durch Nachpumpen vor Sohle zirkuliert. Nach Rückzug des Tubings bis 353.2 m spülte man die Mischzone und den Überschuss ab.

Nach 24 h wurde der Zementkopf mit dem Kerngestänge bei 354.6 m angetroffen und der Zement bis 366.0 m aufgekernt. Die visuell feststellbare Qualität der Zementkerne war gut und entsprach den Erwartungen. Das Klarspülen und Einzirkulieren von Tracerwasser ins Bohrloch erfolgte als letzte Tätigkeit mit dem Bohrgestänge.

<i>Volumenberechnung 3. Zementation, Bohrloch 123 mm, 5 1/2" - Rohre</i>					
von Teufe [m]	bis Teufe [m]	Inhalt [l/m]	Zuschlag [%]	Inhalt ges. [l/m]	Volumen [l]
429.2	416	11.8	30	15.3	201
416	366	12.4	0	12.4	620
					821

<i>Zementberechnung</i>			
	Rezept	angemischt	Einheit
Mischzement	105	1800	[kg]
Wasser	47.25	800	[l]
Brühe	79.85	1359	[l]
spez. Gewicht	1.90	1.91	[kg/l]

<i>Zementstrecke gem. Anmischvolumen, Bohrloch und 5 1/2" - Rohre</i>				
Brühe [l]	Inhalt ges. [l/m]	Strecke [m]	von Teufe [m]	bis Teufe [m]
202	15.3	13.2	429.2	416.0
1157	12.4	93.3	416.0	322.7

<i>Nachpumpvolumen, 2 3/8" Tubing</i>						
Verdrängung [l/m]	Strecke [m]	Verdrängung [l]	Inhalt [l/m]	Füllhöhe [m]	NP-Teufe [m]	NP-Volumen [l]
0.84	106.5	89	2.02	44.1	278.6	563

Bridge Plug

Der Bridge Plug (Baker, Delta 2AA, Prod. Nr. 401-93) wurde am Wireline-Setzgerät eingefahren und bei 365.9 - 365.6 m gesetzt. Die Teufe konnte durch CCL-Korrelationsmessung und Aufstehen auf dem Zementkopf bestätigt werden.

Die Bruchfläche des geborgenen Abreissbolzens und der Zustand des Setzgerätes bestätigten, dass einen ordnungsgemässer Setzvorgang abgelaufen war.

Chronologie

- 08.11.95 - 09.11.95** Roundtrip bis Sohle ohne Probleme
- 09.11.95** Kaliberlog kann nur ab 545 m gefahren werden, 2 Runs werden versucht
- 09.11.95-10.11.95** Einbau Gestänge bis Sohle, Wasserreservoir leer, Wasserantransport beim Klarspülen durch Saugwagen, im Gegenzug Altspülungsabfuhr
Klarspülen Bohrloch 3 h
Ausbau Gestänge
- 10.11.95 - 11.11.95** Einbau Tubing bis Sohle, die letzten 5 m spülend, Zirkulation hergestellt
Versuch links zu zirkulieren ohne Erfolg, kurzer Schwall, dann Stopper, bei 5 bar Verpressen von insgesamt ca. 1 m³ Wasser, Leitungssystemkontrolle
BOP öffnen, rechts 40 bar Druck, keine Zirkulation, eine Stange ablegen, schwappen bis ca. 300 m, Zirkulation wieder hergestellt, ca. 12 m³ rechts spülen
Zement anmischen mit 4.1 t, SG gemessen 1.91 kg/l, Probennahme
Zement einpumpen, Nachpumpen, Ausbau Tubing bis 665.8 m
Abspülen mit 225 l/min, 4 bar, nach 7 m³ Überschusszement zutage, Auszirkulieren
- 10.11.95 - 11.11.95** Zementerhärtung, Ausbau Tubing
- 11.11.95 - 12.11.95** Einbau Kernrohr mit Krone bis Rohrschuh, Zementkopf angefahren bei 667 m,

Aufkernen des Zements bis 680.0 m, Bohrloch spülen
- 12.11.95 - 13.11.95** Rückzug Gestänge bis 672.1 m, Ausbau Kernrohr
Einschütten (I.) von 175 kg Ton-Pellets (7 Sack), Rückzug Gestänge bis 670 m
Drehen mit ca. 10 U/min, Zirkulieren mit 15 l/min für 30 min
Tonschüttung abtasten, Widerstand bei 673.5 m mit 1.5 t
Rückzug Gestänge, spülen mit 250 l/min, 2 bar
Einschütten (II.) von 300 kg Ton-Pellets (12 Sack), Maschinenreparatur, Rückzug Gestänge bis 660 m
Drehen mit ca. 10 U/min, zirkulieren mit 15 l/min für 20 min
Abtastversuch bis 667 m mit undeutlicher Auflast 0.5 t
Schüttversuch o.E., Stopper im Gestänge obertage, Beseitigung Stopper
Einpumpen Innenkernrohr mit Blindkappe, Druckanstieg, Gestänge hochziehen
Abtasten mit Kernrohr, Widerstand 2 t und Pumpendruck bei 672 m
Rückzug Gestänge, spülen, Innenrohr ziehen (Innenrohr nicht verriegelt)
Einschütten (III.) von 300 kg Ton-Pellets (12 Sack), einzirkulieren mit 20 l/min und geringer Rotation
Einpumpen Innenrohr, Kontrolle Verriegelung mit Kernrohrfänger (nicht eindeutig)

- Abtastversuch mit Kernrohr, Widerstand bei 667 m mit 0.5 t
 Roundtrip für Kronenwechsel und Systemkontrolle
 Abtasten mit Kernrohr, Widerstand 3 t und Pumpendruck 10 bar bei 666 m
 Gestängerückzug auf 663 m
 Einschütten (IV.) von 100 kg Ton-Pellets (4 Sack) und 150 kg (6 Sack) unter etappenweisem Hochziehen in 2-m-Schritten bis 654.3 m, mit Pumpunterstützung 20 - 50 l/min ohne Rotation
 Gestängerückzug bis 645.6 m, Zirkulation 300 l/min
 Einpumpen Innenrohr mit Druckanstieg, Kontrolle Verriegelung mit Kernrohrfänger
 Abtasten mit Kernrohr, Widerstand 3 t ab 645.6 m, bei Weiterfahren sinkend auf 1 t und wieder konstant ansteigend auf 3 t bei 658 m
 Gestängerückzug bis 645.6 m
 Einschütten (V.) von 250 kg Ton-Pellets (10 Sack) ohne Rotation
 Nachpumpen 100 l/min, 3.8 m³, Druckanstieg nach Nachpumpvolumen, Gestängerückzug mit Pumpunterstützung, Auszirkulieren bei 627 m
 Einpumpen Innenrohr
 Abtasten mit Innenrohr bei 645 m mit 2.5 t Widerstand und 7 bar
 Roundtrip, Kronenwechsel, Bohrloch befahren und reinigen bis 645 m
- 14.11.95** Einbau Tubing für 2. Zementation bis 641 m
 Zement anmischen mit 3.3 to, SG gemessen 1.89 kg/l, Probennahme
 Zement einpumpen, Nachpumpen, Ausbau Tubing bis 501.0 m
 Zement abspülen mit 150 l/min, 3 bar, Überschuss-/Mischzone zutage
 Auszirkulieren, Rückzug Tubing
- 15.11.95** Abtasten des Zementkopfes mit Tubing bei 510.8 m, 8 bar, 1 t
 Rückzug bis 504.8 m, Bohrloch spülen
 Schwerspatsuspension ansetzen mit 2.5 t Schwerspat, SG 2.4 kg/l, Probennahme, Suspension einpumpen, Nachpumpen
 Ausbau 15 Stk. Tubinge, Wartezeit auf Sedimentation
- 16.11.95** Wartezeit auf Sedimentation, Abtasten bis 490 m ohne signifikanten Widerstand
- 17.11.95** Wartezeit auf Sedimentation, Abtasten bis 495 m ohne signifikanten Widerstand
 Ausbau Tubing, Einbau Kerngestänge mit geschlossenem Innenrohr
- 18.11.95** Abtasten mit Kernrohr, ab 459.6 bis 473.6 m Widerstand 0.5 - 1 t, Rückzug Gestänge
 Kontrollfahrt bis 465 m ohne signifikanten Widerstand
 Schwerspatsuspension ansetzen mit SG 1.6 kg/l, 1.3 m³, Probennahme
 Einbau Gestänge bis 455 m, Schwerspat einzirkulieren, Ausbau bis 403.6 m
- 19.11.95** Wartezeit auf Sedimentation
 Abtasten mit Kernrohr, Aufstand bei 453.0 m mit 1 t, aufspülen Schwerspat bis 456.9 m
 Rückzug Gestänge bis 448.7 m, Innenrohr ziehen
 Einschütten (I.) von 175 kg Ton-Pellets (7 Sack) ohne Rotation, Pumpunterstützung 30 l/min
 Druckanstieg nach Nachpumpvolumen, Gestängerückzug mit Pumpunterstützung

Innenrohr einpumpen, Kontrolle Verriegelung mit Kernrohrfänger
Abtasten mit Kernrohr, 0.5 t Widerstand bei 445.0 m
Rückzug Gestänge bis 430.8 m, Innenrohr ziehen
Einschütten (II.) von 175 kg Ton-Pellets (7 Sack) ohne Rotation,
Pumpunterstützung
Einpumpen Innenrohr, Kontrolle Verriegelung mit Kernrohrfänger
Abtasten mit Kernrohr, 2 t Widerstand bei 430.7 m, Aufstand mit 3 t
bei 432.2 m
Rückzug Gestänge bis 421.5 m, Innenrohr ziehen
Einschütten (III.) von 100 kg Ton-Pellets (4 Sack), Pumpunterstützung,
Druckanstieg nach Nachpumpvolumen
Rückzug Gestänge, zirkulieren, Innenrohr einwerfen, Kontrolle Verriegelung
mit Kernrohrfänger
Abtasten mit Kernrohr, Aufstand mit 2 t bei 429.2 m
Gestänge drehend und spülend ausbauen, Bohrloch reinigen

20.11.95 Einbau Tubing bis 427.6 m für 3. Zementation, Zirkulation hergestellt
Zement anmischen mit 1.8 t, SG gemessen 1.91 kg/l, Probennahme
Zement einpumpen, nachpumpen, Ausbau Tubing bis 353.2 m
Abspülen mit 150 l/min, 3 bar, Überschusszement zutage, Auszirkulieren
Ausbau Tubing
Zementerhärtung

21.11.95 Zementerhärtung, Einbau Kerngestänge
Zementkopf angetroffen bei 354.6 m, Zement aufkernen bis 366.0 m
Tracerwasser einzirkulieren, Ausbau Gestänge
Bridge Plug am Setzgerät einfahren, gesetzt von 365.6 - 365.9 m
Setzgerät ausfahren, Abreissbolzen i.O.
Abschliessende Arbeiten für die Langzeitbeobachtung:
1. Perforation von 363.0 - 360.0 m mit 61 Schuss
2. Perforation von 360.0 - 357.0 m mit 61 Schuss
Ausfahren des Schussgerätes
Aufräumarbeiten und Freigabe der Bohranlage