



Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



## Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle

### – ELSA Teil 1 –

Laufzeit 01.04.2011 – 31.01.2013

Zuwendungsgeber / Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
Förderkennzeichen: 02E10921 / 02E10931



Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. W. Kudla  
Bearbeiter: Dipl.-Geol. F. Schreiter  
Dr.-Ing. M. Gruner

Institut für Bergbau und  
Spezialtiefbau



Projektleiter: Dipl.-Geophys. M. Jobmann  
Bearbeiter: Dipl.-Ing. W. Bollingerfehr  
Frau Dr.-Ing. N. Müller-Hoeppe  
Dipl.-Ing. Ph. Herold

Unter Mitarbeit von:

TU Bergakademie  
Freiberg, Institut für  
Anorganische Chemie  
Frau Dr. rer. nat. D. Freyer

IBeWa Freiberg  
Dr.-Ing. T. Wilsnack  
Dr. rer. nat. F. Grafe

Freiberg, Peine, den 30.04.2013



## Einleitung

Das vorliegende Forschungsvorhaben Teil 1 wurde unter dem Projektnummern 02E10921 und 02E10931 aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF gefördert und durch den Projektträger Karlsruhe im Karlsruher Institut für Technologie, Wasser-technologie und Entsorgung (PTKE-WTE) koordiniert.

Die Projektleitung erfolgte durch das Institut für Bergbau und Spezialtiefbau an der TU Bergakademie Freiberg. Das Vorhaben wurde im Verlaufe der Bearbeitung unter der Kurzbezeichnung ELSA I (Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle Teil 1) geführt.

Am Vorhaben waren die folgenden wissenschaftlichen Einrichtungen und Unternehmen maßgeblich und direkt beteiligt:

- TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (IfBuS): Prof. Dr. W. Kudla, Dr. M. Gruner, Dipl.-Geol. F. Schreiter
- TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie (IfAC): Fr. Dr. D. Freyer,
- Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik Wilsnack & Partner Freiberg (IBeWa): Dr. Th. Wilsnack, Dr. F. Grafe,
- DBE TECHNOLOGY GmbH Peine: Dipl.-Geophys. M. Jobmann, Dipl.-Ing. W. Bollingerfer, Fr. Dr.-Ing. N. Müller-Hoeppe, Dipl.-Ing. Philipp Herold

Für die im nachfolgenden Text wiedergegebenen Inhalte sind ausschließlich die oben genannten Autoren verantwortlich.

---

## Zusammenfassung

### Stand von Wissenschaft und Technik zu langzeitstabilen Schachtverschlüssen

Es wurden die seit 1994 geplanten und realisierten Schachtverschlüsse im Salinar bezüglich ihrer Übertragbarkeit auf ein HAW Endlager ausgewertet. Weiterhin wurden die internationalen Aktivitäten zur Entwicklung und Konzeption von Schachtverschlüssen recherchiert und sowohl deren technischer Stand, als auch die mögliche Übertragbarkeit für ein HAW Endlager in Deutschland ausgewertet. Ein Teil der gebauten Schachtverschlüsse sind "klassische" Verschlüsse mit Betonwiderlagern und kombinierten Dichtungen aus Ton und Bitumen bzw. Gussasphalt. Im Salinar sind die Betonwiderlager aus Solebeton (CEM III + gesättigte NaCl-Lösung + Hartgesteinskörnung) errichtet worden. Schachtverschlüsse, in denen aus Gründen der Langzeitstabilität auf das Betonwiderlager verzichtet werden sollte, sind nach dem Schachtverschlusskonzept "Salzdetfurth" errichtet worden. Weiterhin wurden die Konzepte bzw. Entwürfe für die Schachtverschlüsse ERAM, Asse, Konrad, WIPP, NAGRA, RESEAL sowie das Projekt LASA (GRS & TUC) diskutiert. Die größte technische Reife hat das Schachtverschlusskonzept "Salzdetfurth" mit den Hauptelementen Bentonitdichtelement und setzungsstabile Schottersäule als Widerlager. Nach diesem Konzept sind bereits drei Schächte langzeitsicher und flüssigkeitsdicht verwahrt worden.

Für Standorte im Tonstein schlägt die NAGRA ein Verschlusskonzept vor, welches im Grundaufbau viele Gemeinsamkeiten mit dem Schachtverschluss Salzdetfurth hat. Neben dem Verschlusskonzept der NAGRA wurde noch ein Versuchsaufbau im belgischen Untertagelabor HADES beschrieben. Zu Dichtelementen aus Bitumen/Asphalt existieren umfangreiche Erfahrungen aus dem klassischen Bergbau. Zu dem für die Schachtverschlüsse des ERAM neu konzipierten Element eines bitumenverfüllten Schotterelements laufen aktuelle Untersuchungen.

Es zeigt sich derzeit vor allem für Schachtverschlüsse im Salinar die Tendenz, arteigenes Material zum Bau von Widerlagern und der Füllsäule zu etablieren. Dazu wurde die Verwendung von Salzgrus in Betracht gezogen. Die technische Realisierung, insbesondere die zugehörigen Einbautechnologien, befinden sich jedoch noch im Entwicklungsstadium. Es ist derzeit noch nicht möglich, den Salzgrus mit einer Restporosität < 10% einzubauen und eine ausreichende Setzungsstabilität zu garantieren.

### Sicherheitsnachweis - Konzept der Nachweisführung

Im diesem Arbeitspaket wurde die Methodik zur Anwendung des Nachweiskonzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte zusammengefasst. Die Anwendung des Konzeptes an einem geotechnischen Verschlussbauwerk ist grundsätzlich möglich. Konstruktions- und funktionsbedingte Besonderheiten eines Strecken- oder Schachtverschlusses erfordern jedoch spezifische Anpassungen im Rahmen des Nachweiskonzeptes.

Schachtverschlüsse sind ingenieurtechnische Bauwerke, für die, wie für alle anderen Bauwerke auch, vor ihrer Errichtung die Zuverlässigkeit während der geplanten Funktionsdauer und die Einhaltung der geforderten Sicherheitsfunktionen nachzuweisen ist. Dazu werden die bestehenden Regelwerke des Eurocodes genutzt. Herzstück der Normen ist die Anwendung des Konzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte. Dabei handelt es sich um ein semi-probabilistisches, zuverlässigkeitsorientiertes Sicherheitsnachweiskonzept. Die Nachweise der Einhaltung der Sicherheitsfunktionen und Zuverlässigkeit setzen sich dabei für das Gesamtsystem Schachtverschluss und auch für die einzelnen Komponenten aus einer Vielzahl von Einzelnachweisen für verschiedene Eigenschaften bzw. Grenzzustände zusammen. Dabei werden die Einwirkungen auf das Bauwerk jeweils mit den Widerständen der Konstruktion durch Grenzkriterien, die den Einwirkungskombinationen zugeordnet sind, verglichen.

Anschließend an die allgemeine Einführung in das Nachweiskonzept wurden die für einen Schachtverschluss notwendigen Einzelnachweise betrachtet und systembedingte Besonderheiten aufgezeigt. Anhand des beispielhaft gewählten Schachtverschlusskonzeptes der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) wurden zwei Einzelnachweise zur Erläuterung der Methodik geführt. Damit ist eine Einführung geschaffen, die eine spätere Nachweisführung der noch zu planenden Großversuche auf der Basis anerkannter Verfahren ermöglicht.

### **Randbedingungen für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein**

Die geomechanischen Randbedingungen umfassen die Beschreibung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens der im Schacht anstehenden Gebirgsbereiche unter Beachtung zeitabhängiger und strukturmechanischer Prozesse. Dabei müssen der Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit sowie die erwarteten Wechselwirkungen mit den Verschlusskomponenten berücksichtigt werden. Als wesentliche Einflussfaktoren werden der In-situ-Spannungszustand und das Konvergenzverhalten von Steinsalz und Tonstein sowie der Quelldruck der Bentonitdichtelemente betrachtet. Von besonderer Bedeutung ist das geomechanische Verhalten des Gebirges im Bereich durchteufter Inhomogenitäten, wie im Referenzfall Gorleben die sogenannte "Gorleben-Bank". Prinzipiell muss zwischen dem Verhalten im Ausgangszustand bzw. nach dem Konturnachschnitt und dem Verhalten nach Einbau der Schachtverschlusselemente unterschieden werden.

Für die Charakterisierung der EDZ wurde die Größe der Auflockerungszone anhand indikativer numerischer Berechnungen für den Schacht in Gorleben sowie für zwei potenzielle Schächte in den zwei eignungshöffigen Tonsteinregionen in Deutschland abgeschätzt. Für den Schacht in Gorleben ergaben sich zwei interessante Aspekte. In der Anfangsphase der Schachterstellung wurde eine Auflockerungszone errechnet, deren horizontale Ausdehnung erwartungsgemäß mit der Teufe zunimmt. Nach Erreichen der durchschlägigen Bewetterung im Grubengebäude von Schacht zu Schacht kehrte sich dieses Verhalten um. Durch den bewetterungsbedingten Temperatureinfluss, der eine Absenkung der mittleren Temperatur von 20°C ausmacht, wurde die Auflockerungszone im oberen, nicht ausgebauten Schachtbereich mit einer Größe von bis zu 7 m berechnet, wohingegen sie im unteren Bereich deutlich weniger in das Gebirge hineinreicht. Diese zunächst überraschenden Ergebnisse sind aller-

dings plausibel, da Risse in der Schachtkontur detektiert wurden, die mehrere Meter (4-5m) in das Gebirge hineinreichten. Diese Risse sind durch den oben beschriebenen Temperatureinfluss erzeugt worden. Das Problem wurde seinerzeit durch die Schachtheizung technisch gelöst. Die Risse haben sich wieder geschlossen. Für die beiden Modellstandorte im Tonstein wurde die zu erwartende Auflockerungszone je nach Standort und Teufe mit einer Ausdehnung von 0,3 bis 1,9 m rechnerisch ermittelt.

Die Erläuterungen zu den bestimmenden Strömungsprozessen in einem Schachtverschlusssystem konzentrieren sich auf die Wirtsgesteine Ton und Steinsalz sowie die Dichtmaterialien Bentonit und Bitumen. Ausgehend von einer prinzipiellen Erläuterung zur Ausgangssituation in einem Dichtsystem und den Szenarien der Druckbeaufschlagung erfolgt die Darstellung der Strömungsprozesse, untergliedert in Ein- und Zweiphasenströmung. Grundlage der Erläuterung bildet eine Auswertung ausgewählter Literaturstellen aus der umfangreichen Fachliteratur zu den strömungstechnischen Eigenschaften und Prozessen sowie den vorliegenden Kenntnissen.

Die bisherige Bearbeitung weist eine breite Palette an Materialien/Gesteinen sowie der strömungstechnisch relevanten Parameter und Informationen nach. Darüber hinaus zeigt sich, dass gerade für die Parametrisierung der strömungstechnischen Ausgangssituation sowohl im Wirtsgestein als auch im Dichtsystem bisher zum Teil nur sehr beschränkt Kenntnisse vorliegen.

Zu den geochemischen Randbedingungen wurden bisher Daten zum Phasenbestand von Salzgestein, beispielhaft für den Salzstock Gorleben, die Zusammensetzungen der Zechsteinabfolgen, speziell für die Leine- und Staßfurt-Sequenzen erfasst. Entsprechend der Salzmineralbestände wurden die Zusammensetzungen der Gleichgewichtslösungen berechnet und mit den in Gorleben vorgefundenen Lösungen verglichen. Die Wechselwirkungen der Lösungen mit ausgewählten Verschlussmaterialien wurden bewertet/abgeleitet. Für Tonstein wurden Daten am Beispiel des Opalinustons erfasst.

### **Anforderungen an Schachtverschlüsse**

Es wird beschrieben, welche allgemeinen und speziellen Anforderungen an die Konzeption von Schachtverschlussbauwerken speziell an Salz- und Tonsteinstandorten derzeit bestehen. Die Anforderungen leiten sich ab aus den übergeordneten Sicherheitsanforderungen (BMU 2010), den Anforderungen gemäß bereits vorliegender Sicherheits- und Nachweiskonzepte aus den Vorhaben ISIBEL, VSG und AnSichT, gemäß den technischen Funktionsnachweisen, aus standortspezifischen Randbedingungen sowie aus Anforderungen gemäß sonstiger Vorgaben.

Im Unterschied zur Wirtsgesteinsoption Steinsalz sind im Tonstein noch die Unterbindung einer advektiven Lösungsbewegung aus dem Endlager bzw. aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) heraus zu beachten, die Erhaltung eines stabilen geochemischen Milieus, die Anpassung an die fazielle Variabilität von Tonformationen, die materialtechnischen und technologischen Anforderungen an den Schachtausbau sowie die Verwendung von Ma-

aterialien mit hoher Sorptionskapazität. Alle Anforderungen wurden überblickhaft zusammengefasst.

### **Wesentliche Kenntnisdefizite**

Kenntnisdefizite bestehen vor Allem hinsichtlich der Wirtsgesteinsoption Tonstein, da noch kein erkundeter Standort im Tongestein vorliegt. Weiterhin wurden folgende generelle Kenntnisdefizite identifiziert:

- Konkrete Prozess- und Materialparameter für die Konzipierung und Dimensionierung zukünftiger Schachtverschlüsse stehen nur eingeschränkt zur Verfügung Dies gilt insbesondere für die Kontaktzone zwischen Dichtmaterial und Schachtkontur, für den Zeitraum der ungesättigten Strömung, der Gasdruckbelastung aus dem Grubengebäude und zum Einfluss der gebirgsmechanischen Einspannung der Dichtelemente.
- Methodische Ansätze für die Qualitätsüberwachung bei der Herstellung der Dichtmaterialien und beim Einbau der Dichtelemente in Schachtverschlüssen für HAW-Endlager sind noch nicht entwickelt. Es fehlt eine einheitliche Methodik der Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Parameter.
- In Ergänzung zu den rechnerisch zu führenden Integritätsnachweisen sollte ein In-situ-Funktionsnachweis für den Test einzelner Komponenten eines zukünftigen Verschlussystems entwickelt werden.
- Die Anforderungen an die Qualitätssicherung bezüglich der Lage der Dichtelemente, der Eignungsbeurteilung der Materialien, der Einbautechnologie und der Überwachung während des Einbaus müssen definiert werden.

---

## Executive Summary

### State of the art in science and technology regarding shaft seals with long-term stability

Within the scope of the project, the shaft seals in salt formations that have been planned or constructed since 1994 were analysed regarding their applicability in an HLW repository. Furthermore, international developments and designs of shaft seals were studied and analysed regarding their technical status and their applicability in an HLW repository in Germany. Some of the shaft sealing systems already constructed are “classic” systems with concrete abutments and seals made of clay combined with bitumen or melted asphalt. The concrete abutments in salt formations were constructed of “brine concrete” (CEM III + saturated NaCl solution + hard rock aggregate). Shaft sealing systems that for reasons of long-term stability were not to incorporate a concrete abutment were constructed in accordance with the shaft sealing system “Salzdetfurth”. In addition to this, the concepts and drafts for the shaft sealing systems ERAM, Asse, Konrad, the WIPP site, and the RESEAL concept as well as the concept developed by NAGRA and the project LASA (GRS mbH & Technical University Clausthal) were reviewed. The concept that is technically most advanced is the shaft sealing concept “Salzdetfurth” whose main components are a bentonite sealing element and a gravel column with a low tendency to settling as abutment. Three shafts have already been sealed based on this concept to make them impermeable and safe in the long term.

For repositories in clay formations, NAGRA proposes a sealing concept that has many characteristics in common with the shaft sealing system Salzdetfurth. In addition to NAGRA’s sealing concept, an experimental set-up in the Belgium underground laboratory HADES was described.

From experience from conventional mining activities, there is comprehensive knowledge about sealing elements made of asphalt/bitumen. For the shaft sealing systems of the ERAM repository, a new gravel sealing element filled with bitumen has been designed. Corresponding studies are in progress.

Especially for shaft sealing systems in salt formations, the tendency is to construct abutments and filling columns using material with characteristics similar to those of the host rock. In this context, the use of crushed salt was considered. However, the technology, especially for the installation of components, is still in a developmental stage. Currently, it is not possible to install crushed salt with a residual porosity of < 10% and to ensure adequate stability to settling.

### Safety analysis – assessment concept

The methodology of applying partial factors in a safety analysis was summarized and the possibility to apply this method in a safety analysis for a geotechnical sealing structure was

confirmed. Due to particularities based in the design, construction, and function of drift and shaft seals, however, it is necessary to make specific adjustments when demonstrating their safety.

Prior to the construction of shaft seals, it has to be demonstrated that they are reliable during their intended functional life and that they meet the required safety functions. These demonstrations are based on the rules and standards of the EUROCODE. A key point of the EUROCODE is the application of the partial factor method, which is a semi-probabilistic, reliability oriented safety assessment concept. The assessments to demonstrate compliance with the safety functions and reliability of the system as a whole and of the individual components consist of a number of individual safety assessments for various properties or limit states.

The impacts on the structure are compared with the resistances of the structure using limit state criteria that are allocated to the combinations of impacts.

Following the general introduction to the safety assessment concept, the individual assessments required for a shaft seal were considered, and system-specific particularities were described. Based on a draft shaft sealing concept designed within the scope of the preliminary safety analysis of the Gorleben site, two individual assessments were carried out to illustrate the methodology. In due time, this will allow a safety assessment within the scope of – as yet unplanned – large-scale experiments that is based on established methods.

### **Boundary conditions for the host rocks rock salt and claystone**

To establish geomechanical boundary conditions, it is necessary to identify the stress-strain-behaviour of the rock mass adjoining the shaft, taking into account time-dependent processes and mechanical processes related to the structure. This also has to take into account the impact of temperature and moisture as well as the expected interactions with the sealing components. Key factors are the in-situ stress state and the convergence behaviour of the rock salt and claystone as well as the swelling pressure of the bentonite sealing elements. Of major importance is the geomechanical behaviour of the rock mass in areas where inhomogeneities have been penetrated, e.g. the so-called “Gorleben-Bank” in the reference case Gorleben. Generally, a distinction has to be made between the initial behaviour of the intact rock mass or the initial behaviour after the profile of a drift has been trimmed and the behaviour of the rock mass after the shaft sealing elements have been installed.

Based on indicative numerical calculations, the extension of the excavation damaged zone (EDZ) was estimated for the shaft in Gorleben and for two fictitious shafts in the two potentially suitable claystone formations in Germany. For the shaft in Gorleben, the calculations showed two interesting aspects. As expected, the excavation damaged zone calculated for the initial shaft sinking phase increased with increasing depth. After continuous ventilation between the two shafts had been established by means of a crosscut, this development reversed. The ventilation causes the mean temperature to drop by 20°C which leads to additional damage induced by thermal contraction, mainly in the upper part of the unlined shaft.

In this area, the EDZ was calculated to extend into the rock mass for up to 7 m whereas in the lower part the EDZ was calculated to be significantly less extensive. Although initially surprising, these results became plausible when fissures were detected in the shaft contour that extend into the rock for several metres (4-5 m). These fissures were caused by the temperature impact mentioned above. At the time, this issue was solved by heating the shaft which caused the fissures to close again. For the two sites in claystone, the expected excavation damaged zones were calculated to be between 0.3 and 1.9 m, depending on the site and depth.

The explanations to the significant flow processes in a shaft sealing system focus on the host rocks clay and rock salt and the sealing materials bentonite and bitumen. Following a general explanation about the initial situation in a sealing system and the pressure scenarios, the flow processes, divided into single- and two-phase-flow, are illustrated. The illustrations are based on an analysis of selected contributions from specific literature on flow properties and processes and on the existing knowledge.

The work so far shows that there is a broad range of materials/rock types as well as of parameters and information relevant to flow processes. However, the work also shows that the knowledge, especially on the parameter identification of the initial flow situation in the host rock and in the sealing system, is limited.

Regarding the geochemical boundary conditions: So far, data have been gathered on the phase distribution in rock salt (exemplarily for the Gorleben salt dome) and the composition of the Zechstein (Upper Permian) sequences, especially for the Leine and Staßfurt sequences. Based on the salt mineral inventories, the compositions of the equilibrium solutions were calculated and compared with the solutions found in Gorleben. The interactions between the solutions and selected sealing materials were assessed. The data on claystone are based on Opalinus clay.

### **Requirements for shaft sealing systems**

The general and special requirements pertaining to the design of shaft sealing constructions, especially in salt and clay formations, are described. The requirements are derived from the safety requirements (BMU 2010), the requirements resulting from existing safety assessment concepts developed in the R&D projects ISIBEL, VSG, and AnSichT, from functional demonstrations, from site-specific boundary conditions, and from requirements stipulated in other specifications.

In claystone, the following additional requirements need to be taken into account: Prevention of advective fluid flow from the repository or from the isolating rock mass, stable geochemical environment, adjustment to the variability in facies, material and technological requirements for the shaft liners, use of materials with a high sorption capacity. All requirements are summarized.

---

## Information needs

As of today, there is no exploration site in a clay formation in Germany so that not much is known about the host rock option clay. Furthermore, the following general information needs have been identified:

- Precise process and material parameters, especially for the contact zone between sealing material and shaft contour, for the period of unsaturated flow, for the gas pressure load from the mine, and regarding the impact of the rock mechanic load on the sealing elements, which are needed for the design and dimensioning of shaft sealing systems, are only available to a limited extent.
- Quality control methods regarding the production of sealing materials and installation of the sealing elements in shaft sealing systems for HLW repositories have not yet been developed. There is no standardized method to identify parameters relevant to dimensioning.
- In addition to demonstrating integrity by means of calculations, a method to demonstrate the effectiveness of individual components of a sealing system in situ should be developed.
- The requirements for assuring the quality regarding the positioning of the sealing elements, the suitability assessment of materials, the installation technology, and regarding installation monitoring need to be defined.

## Inhaltsverzeichnis

1	AP1 – Stand von Wissenschaft und Technik zu langzeitstabilen Schachtverschlüssen	15
1.1	Einleitung	15
1.1.1	Zusammenstellung der Schachtverschlüsse im Salinar (in Deutschland)	15
1.1.2	Konzept Schachtverschluss Salzdetfurth	17
1.1.3	Stand der Technik bei langzeitstabilen flüssigkeitsdichten Schachtverschlüssen für die trockene Verwahrung von Salzbergwerken der K+S AG	19
1.2	Geplante Schachtverschlüsse	19
1.2.1	Geplante Schachtverschlüsse im Salinar	19
1.2.2	Geplante Schachtverschlüsse im Tonstein	24
1.2.3	Geplante Schachtverschlüsse im Kristallin	31
1.3	Fazit	32
2	AP2 – Sicherheitsnachweiskonzept – Technischer Entwurf	34
2.1	Einleitung und Zielsetzung	34
2.2	Einführung und Beschreibung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte	34
2.3	Anpassungen zur Nachweisführung an einem Schachtverschluss	39
2.4	Beispiel für die Anwendung des Nachweiskonzeptes an Elementen eines Schachtverschlusses	42
2.4.1	Schachtverschlusskonzept gemäß VSG	43
2.4.2	Nachweis der Verformungssicherheit am Beispiel des Hartgesteinsschotterwiderlagers 460 bis 650 m	46
2.4.3	Nachweiskonzept am Beispiel des Salzbetondichteelementes	52
2.5	Zusammenfassung	62
3	AP3 – Randbedingungen für die Wirtsgesteine Salz und Tonstein	64
3.1	Geomechanische Randbedingungen	64
3.1.1	Vorüberlegungen und Allgemeines	64
3.1.2	Definition einzelner, auf ein Verschlussbauwerk einwirkender Randbedingungen der Gesteine	66
3.1.3	Definition einzelner, auf ein Verschlussbauwerk einwirkender Randbedingungen des Gebirges	67

---

3.1.4	Definition einzelner, von außen auf ein Verschlussbauwerk einwirkender Randbedingungen	71
3.1.5	Endlagerspezifische petrophysikalische Parametern der Wirtsgesteine	73
3.1.6	Spezifische Parameter im Steinsalz mit Bezug auf den Referenzstandort Gorleben	82
3.1.7	Standortspezifische Parameter im Tonstein an den identifizierten potenziellen Modellregionen	88
3.1.8	Resümee	95
3.2	Bedingungen in der Auflockerungszone	96
3.2.1	Auflockerungszone im Steinsalz am Beispiel Gorleben Schacht 1	96
3.2.2	Auflockerungszone im Tonstein am Beispiel zweier Referenzgebiete	101
3.2.3	Permeabilität	112
3.2.4	Zusammenfassung	115
3.3	Charakterisierung bestimmender Strömungs- und Transportprozesse	116
3.3.1	Prämissen	116
3.3.2	Vorbetrachtungen	117
3.3.3	Szenarien Fluidbeaufschlagung und Druckbedingungen in einem Verschlussystem	120
3.3.4	Strömung in Wirtsgesteinen	123
3.3.5	Strömung in Bentonitdichtelementen	127
3.3.6	Strömung in Bitumen	135
3.3.7	Parametrisierung	137
3.3.8	Defizite	139
3.4	Geochemische Randbedingungen	142
3.4.1	Salzgestein	142
3.4.2	Ton/Tonstein	155
3.5	Ableitung von Kenntnisdefiziten	159
4	AP4 – Anforderungen an Schachtverschlüsse	162
4.1	Einleitung und Zielsetzung	162
4.2	Übergeordnete Sicherheitsanforderungen	162
4.3	Anforderungen gemäß der Sicherheits- und Nachweiskonzepte	165
4.4	Anforderungen gemäß technischen Funktionsnachweisen	170

---

4.5	Anforderungen aus standortspezifischen Randbedingungen	172
4.5.1	Geologische Randbedingungen	172
4.5.2	Hydrogeologische Randbedingungen	173
4.6	Anforderungen gemäß sonstiger Vorgaben	174
4.7	Zusammenfassender Überblick	175



## **1 AP1 – Stand von Wissenschaft und Technik zu langzeitstabilen Schachtverschlüssen**

### **1.1 Einleitung**

Innerhalb des Barriersystems sind Schachtverschlüsse die wichtigste geotechnische Barriere für Untertagedeponien (UTD) und Endlager (EL), da sie den vom Menschen geschaffenen Zugang von der Biosphäre zu den Grubenhohlräumen und damit potentiellen Zu- bzw. Austrittspfad von Lösungen nach Abschluss der Betriebsphase wieder dauerhaft verschließen. Dadurch soll ein Zustand geschaffen werden, der dem natürlichen Isolationspotential der geologischen Barriere bzw. der hangenden Schutzschichten entspricht.

Im klassischen Salzbergbau sind eine Vielzahl nachweislich flüssigkeitsdichter Schachtverschlüsse errichtet worden. Für Untertagedeponien für chemisch-toxische Abfälle (UTD) und für die trockene Verwahrung von Salzbergwerken ist im "Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht SA II" (Breidung, 2002) ein neues Konzept für langzeitstabile und flüssigkeitsdichte Schachtverschlüsse entwickelt worden. Dieses Konzept ist auch die Grundlage für den zukünftigen Verschluss der Schächte von Salzbergwerken in denen eine untertägige Verwertung bergbaufremder Abfälle (UTV) praktiziert wird. Bisher wurden drei Schächte in Salzdetfurth nach diesem Konzept verschlossen. Weitere Verschlussmaßnahmen nach diesem Konzept sind geplant.

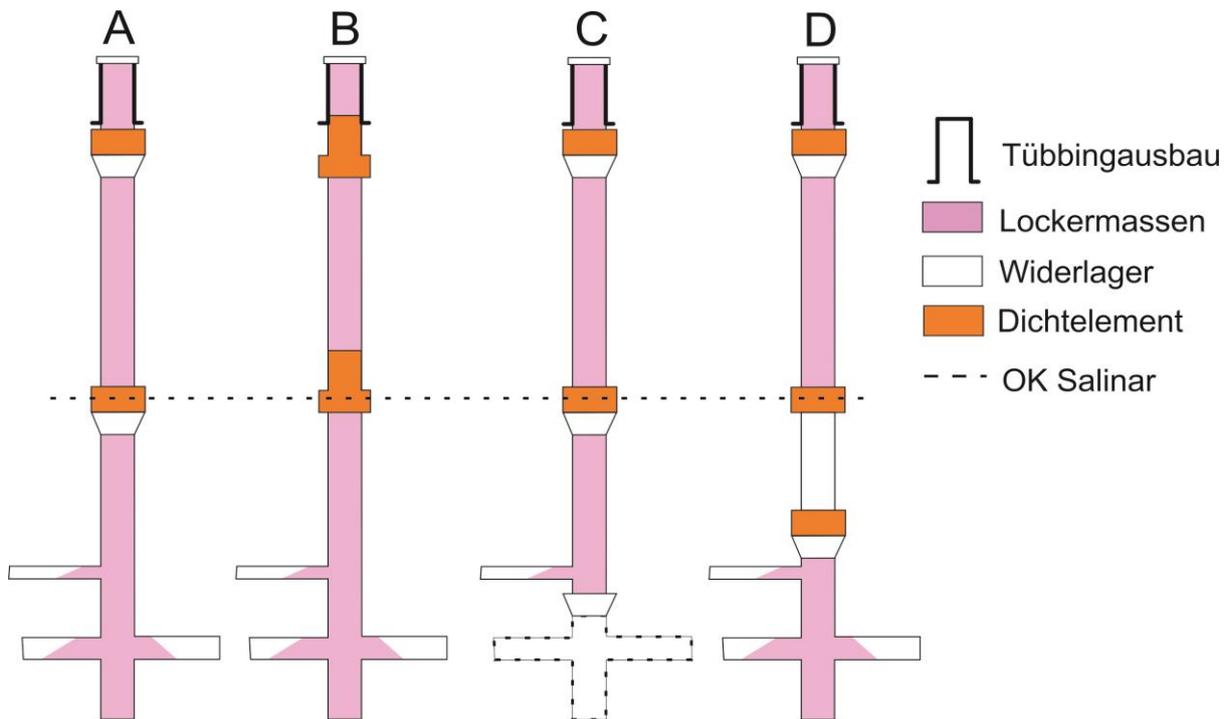
Für die zukünftigen Schachtverschlüsse für Endlager für Wärme entwickelnde hochradioaktive Abfälle existiert bisher kein allgemeingültiges Konzept. Deshalb sollen zukünftig Konzepte für Schachtverschlüsse im Salinar und Tonstein entwickelt werden, welche die Anforderungen an ein Endlager für hochradioaktive Abfälle erfüllen. Hierzu bildet u. a. das bisherige Konzept für Schachtverschlüsse für UTD die Basis.

#### **1.1.1 Zusammenstellung der Schachtverschlüsse im Salinar (in Deutschland)**

In Deutschland wurden seit dem 19. Jahrhundert insgesamt 243 Schächte zur Kali- und Salzgewinnung abgeteuft. Weitere 41 Schächte wurden bereits vor dem Erreichen der geplanten Endteufe aufgegeben [(Schmidt et al., 1994b), Tabelle 1.1 und Tabelle 1.2].

Von diesen wurden bis 1960 30 Schächte verschlossen und mit einem „Pfropfen“ versehen. [(Schmidt et al., 1994b), Tabelle 1.3] Nach 1960 wurden weitere 35 Schächte verschlossen und ebenfalls mit „Pfropfen“ verwahrt.

Im klassischen Salzbergbau kann zwischen vier gebräuchlichen Varianten der Schachtverwahrung im Salinar unterschieden werden. (Abbildung 1-1:)



**Abbildung 1-1: Übliche technische Varianten der Schachtverwahrung im Salinar in Deutschland (nach (Bartl et al., 2005))**

Die Darstellungen aus Abbildung 1-1: können folgendermaßen näher erläutert und beschrieben werden (Herold, 2011):

- Typ A: Totalverfüllung mittels einer geschichteten Verfüllsäule. Die Dichtungen befinden sich im Topbereich des Salinars und unterhalb des wasserdichten Ausbaus. Die Lagesicherung der Dichtungen erfolgt durch Widerlager.
- Typ B: Totalverfüllung mittels einer geschichteten Verfüllsäule mit integrierten Dichtungen und Reservevolumen.
- Typ C: Teilverfüllung mittels einer geschichteten Verfüllsäule, welche auf einem Widerlager aufsitzt. Die Dichtungen befinden sich im Salinartop sowie unterhalb des wasserdichten Ausbaus.
- Typ D: Totalverfüllung mittels einer geschichteten Verfüllsäule. Widerlagergestützte Dichtelemente befinden sich im Salinartop und unterhalb des wasserdichten Ausbaus. Es kommen zusätzliche Dichtungen gegen aufsteigende Medien zum Einsatz.

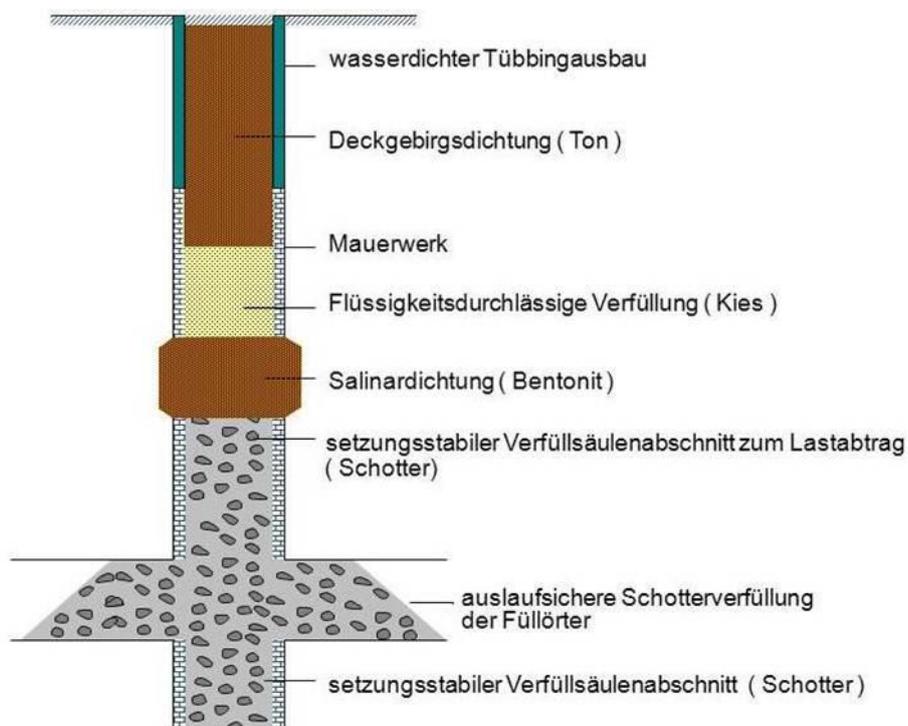
In Tabelle 1-1 sind die seit 1994 in den deutschen Kali und Salzrevieren nach Abbildung 1-1 verwahrten Schächte mit dem genauen Verwahrkonzept aufgeführt. Die vor 1994 verwahrten Schächte wurden in diesem Bericht nicht berücksichtigt, da diese in (Schmidt et al., 1994a) und (Schmidt et al., 1994b) ausführlich beschrieben sind.

**Tabelle 1-1: Auflistung verwahrter Schächte mit zur Anwendung gekommenem Verschlusskonzept (Herold, 2011)**

Schacht	Verwahrungstyp	Schacht	Verwahrungstyp
Gebra	D	Lohra	B
Georg	D	Neusollnstedt	D
Glückauf 3	D	Petersensschacht	D
Glückauf 4	D	Pöthen 1	A
Glückauf 6	D	Pöthen 2	D
Hain 1	C	Roßleben 1	C
Hain 2	C	Roßleben 2	A
Kleinbodungen 2	D	Unstrut	D
Kraja 1	D	Volkenroda	D
Kraja 2	B		

### 1.1.2 Konzept Schachtverschluss Salzdetfurth

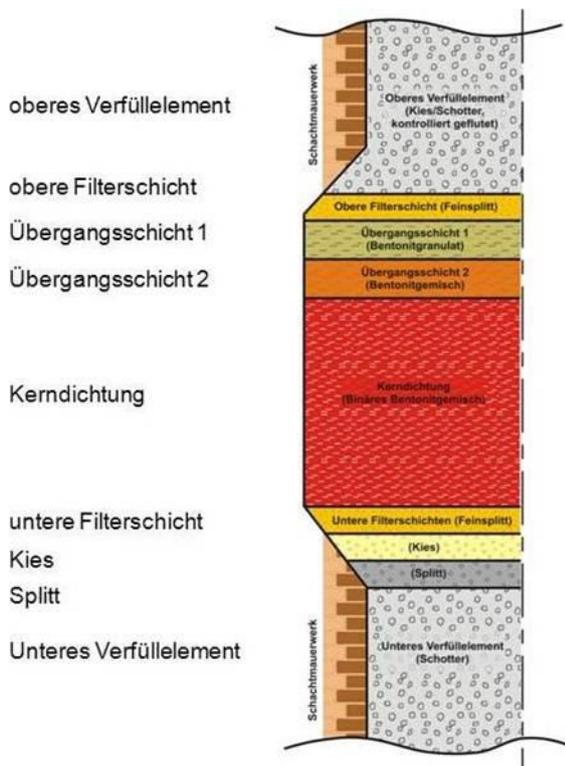
Im Forschungsprojekt "Schachtverschluss Salzdetfurth" wurde das Ziel verfolgt, mit Hilfe von in situ Großversuchen zur Schottersäule und zum Bentonitdichtelement die Realisierbarkeit und Funktionalität von langzeitstabilen, flüssigkeitsdichten Schachtverschlüssen, welche den Anforderungen „TA Abfall für Untertagedeponien im Salinar“ gerecht wird, nachzuweisen. Die Neuerung in diesem Verschlusskonzept ist der völlige Verzicht auf zementbasierte Materialien, wie Beton, die keine nachgewiesene Langzeitstabilität aufweisen.



**Abbildung 1-2: Schachtverschlusskonzept Typ Salzdetfurth (Schmidt et al., 1994a)**

Im Schachtverschlusskonzept Salzdetfurth sind quasi nur zwei Hauptelemente zu finden. Eine setzungsstabile Füllsäule im möglichst beraubten Schachtquerschnitt, welche neben der Verfüllung des Hohlraumes auch stützende Funktion übernimmt. Somit kann auf den Einbau zusätzlicher Betonwiderlager verzichtet werden. Das zweite Funktionselement ist ein geschichtet eingebautes Bentonitdichtelement. Das Dichtelement besteht dabei aus einem binären Bentonitgemisch. Das Gemisch setzt sich aus Bentonitpresslingen und einem Bentonitgranulat mit 0 – 3 mm Körnung zusammen, wobei das Granulat in die bereits verdichtete Schüttung aus den Presslingen eingerüttelt wird. Mit dieser Zusammensetzung kann für das Dichtelement eine Einbaudichte von 1,6 t/m<sup>3</sup> erreicht werden (Bredung, 2002). Der Aufbau eines solchen Dichtelementes ist in Abbildung 1-3 detailliert dargestellt.

Bei dem in Abbildung 1-3 dargestellten Dichtelement handelt es sich um einen Aufbau nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik für den Abschluss von Untertagedeponien sowie für die trockene Verwahrung ehemaliger Salzabbau mit großräumigen, nicht versetzten, Carnalitischen Bereichen.



**Abbildung 1-3: Detaillierter Aufbau eines Bentonitdichtelementes (Wilsnack et al., 2008)**

Die Bentonitdichtung wird trocken eingebaut. Bei einem möglichen Zutritt von Fluiden beginnt der Bentonit zu quellen und baut bei stabilen Widerlagern Quelldruck auf, was wiederum zu einer höheren Kompaktion im Dichtelement und damit zur flüssigkeitsdichten Abdichtung führt. Durch den entstehenden Quelldruck erfolgt weiterhin eine zusätzliche Verspannung im Gebirge (siehe auch: (Studer et al., 1984), (Schmidt et al., 1992b)).

### 1.1.3 Stand der Technik bei langzeitstabilen flüssigkeitsdichten Schachtverschlüssen für die trockene Verwahrung von Salzbergwerken der K+S AG

Sowohl das Vorhandensein großräumiger, nicht versetzter carnalitischer Grubenbereiche als auch eine Nutzung von Teilen des Grubengebäudes für UTD/UTV führen zum Ausschluss einer flüssigkeitserfüllten Verwahrung nach §7 Abs. 3 der ABVO. Weiterhin kann eine termingerechte Verfügbarkeit gesättigter  $MgCl_2$ -Lösungen, welche für eine lösungserfüllte Verwahrung notwendig ist, oft nicht sichergestellt werden (Wilsnack et al., 2008).

Die genannten Punkte veranlassten die K+S AG zu der Entwicklung und Optimierung langzeitstabiler, flüssigkeitsdichter Schachtverschlüsse, welche in den Großversuchen in Salzdetfurth getestet wurden. Das dabei entwickelte Grundkonzept der Verschlussbauwerke (siehe 1.1.2) findet auch in aktuellen Projekten unter Leitung der K+S AG Verwendung und stellt somit den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik dar. Das unter 1.1.2 erläuterte Konzept benötigt in diesem Fall natürlich gewisse Anpassungen an die örtlichen geologischen und technischen Bedingungen. Somit sind räumlich unterschiedliche Positionierungen, oder der Einbau zusätzlicher Verschlusselemente (gleicher Bauart) notwendig.

Die K+S AG hat damit die Möglichkeit auch auf einzelne, geprüfte Elemente des Verschlusskonzeptes Salzdetfurth zurückzugreifen. Mit diesen Elementen kann ein, auf die jeweiligen standortspezifischen Bedingungen angepasstes, Verschlusskonzept erarbeitet werden.

## 1.2 Geplante Schachtverschlüsse

Für das deutsche Endlager für schwach radioaktive Stoffe Morsleben, das ehemalige Forschungsbergwerk Asse, welches derzeit den Status eines Endlagers hat, sowie für das Endlager Konrad (Tonstein) existieren bereits genehmigte oder in einem Genehmigungsprozess befindliche Verschlusskonzepte. Diese Verschlusskonzepte sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Ferner werden geplante Schachtverschlüsse für Endlager für radioaktive Abfälle anderer Staaten sowie durchgeführte Großversuche auf diesem Gebiet analysiert und kurz beschrieben.

### 1.2.1 Geplante Schachtverschlüsse im Salinar

#### 1.2.1.1 Schächte der Asse

Das Konzept für die Verwahrung der beiden Schächte der Anlage Asse sieht eine komplette Verfüllung der Schachtsäule vor (siehe Abschnitt 4). Für die Schächte ist in den tieferen Bereichen eine Füllsäule aus Sorelbeton vorgesehen, die eine hohe Setzungsstabilität aufweist. Diese Ausführung weist zumindest in Teilbereichen gleichzeitig eine abdichtende Funktion als Strömungsbarriere auf.

Die Verfüllung der Schächte erfolgt von der Tagesoberfläche aus zum Schachtsumpf betrachtet mit einer Füllsäule aus Hartgesteinsschotter, welche mit gesättigter Salzlösung geflutet werden soll. Darauf folgt ein weiterer mit Hartgesteinsschotter verfüllter Abschnitt. Hierbei soll es sich um mit Schutzfluid ( $MgCl_2$ -haltige Lösung) gefluteten Magnesitschotter handeln. Im Topbereich der Salinarfolge ist ein zweischichtiges Dichtelement aus Salzion<sup>1</sup> und Bentonit vorgesehen. Direkt darunter folgen ein Langzeitdichtelement aus Sorelbeton sowie eine sofort wirksame Dichtung aus Bitumen. Nach einem Teilabschnitt, welcher als setzungsstabile Füllsäule aus Sorelbeton ausgeführt werden soll, schließen sich eine Füllsäule mit Kapsel-funktion<sup>2</sup>, eine Strömungsbarriere<sup>3</sup> sowie ein weiterer Bereich einer setzungsstabilen Füllsäule an, welche ebenfalls aus Sorelbeton bestehen. Damit ist die Endteufe im Schacht 2 erreicht. Im Schacht 4 folgt ein weiterer Bereich aus Sorelbeton, welcher als Füllsäule mit Kapsel-funktion sowie als setzungsstabile Füllsäule beschrieben wird. Im Tiefsten des Schachtes befindet sich eine bereits mit Diabasschotter verfüllte Kaverne (Kappei & Eikmeier, 2006).

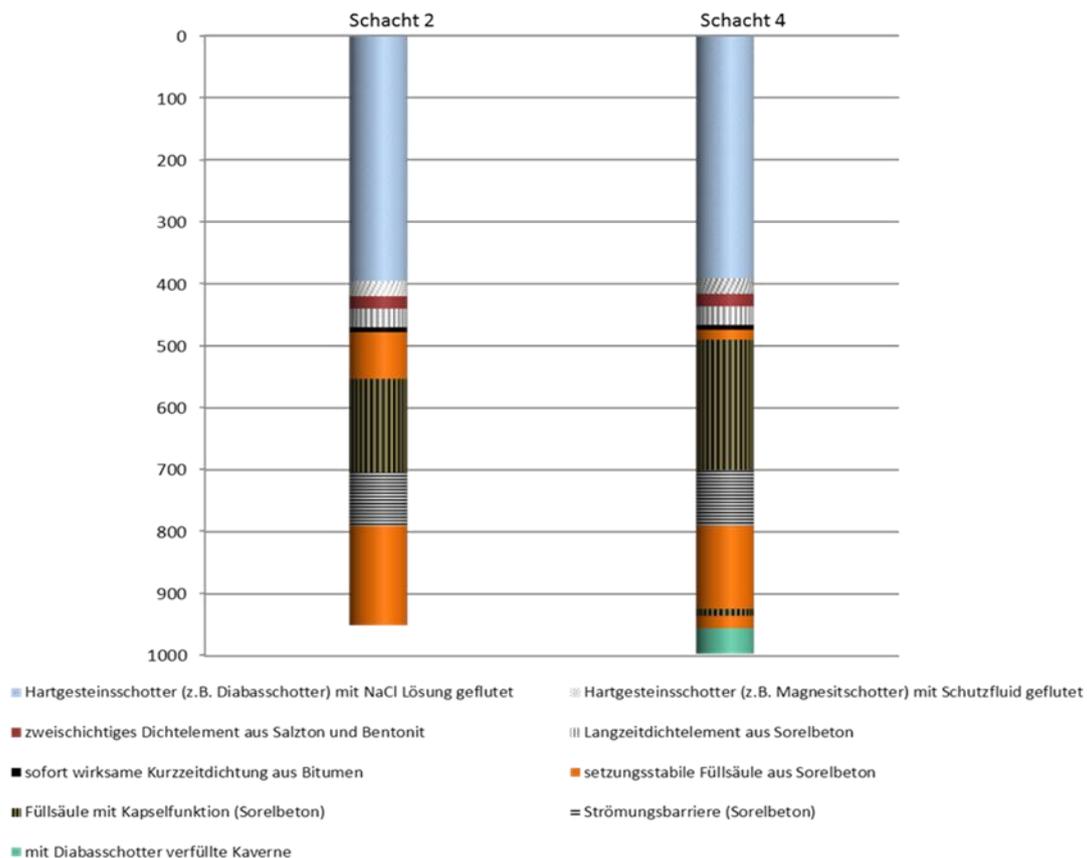


Abbildung 1-4: Verfüllkonzept der Tagesschächte des Endlagers Asse (nach (Kappei & Eikmeier, 2006))

<sup>1</sup> Ein natürlicher ausgeprägt plastischer Ton, welcher mit  $MgCl_2$  – reicher Salzlösung befeuchtet wird. (siehe Kappei und Eikmeier 2006)

<sup>2</sup> Element aus Sorelbeton, welches Fluidströmung und damit Radionuklidmigration verhindert.

<sup>3</sup> Füllsäule, welche auch eine begrenzt abdichtende Funktion übernimmt.

Die Besonderheit bei dem Verfüllkonzept für die Schächte Asse 2 und Asse 4 besteht in der weiträumigen Verwendung von Sorelbeton, sowohl für die Füllsäulen als auch für Strömungsbarrieren. Weiterhin kommen ein Bitumenelement mit der Funktion eines Kurzzeitdichtelementes sowie ein Langzeitdichtelement aus Salzion und Bentonit zum Einsatz.

### 1.2.1.2 Schacht Marie (Morsleben)

Das ursprüngliche Verfüllkonzept für das Endlager Morsleben basiert auf dem, in Abbildung 1-5 dargestellten Technischen Grundkonzept, welches 2001 (Sitz, 2001) publiziert wurde.

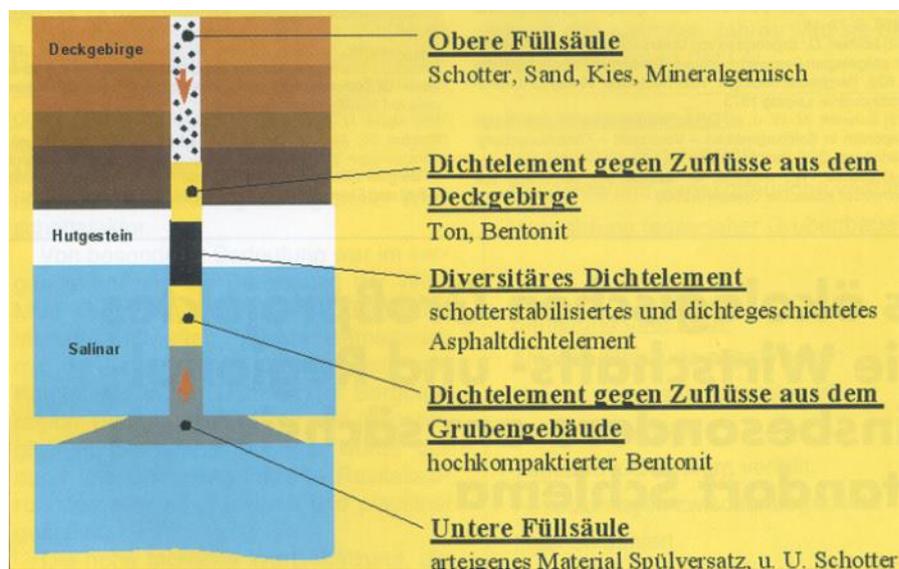


Abbildung 1-5: Technisches Grundkonzept eines Schachtverschlusses für Endlager im Salinar (Sitz, 2001)

Dieses Grundkonzept zeigt deutliche Ähnlichkeiten mit dem Konzept der Verwahrung der Schächte Salzdetfurth. Der Unterschied besteht in der Erweiterung des Konzeptes um ein schotterstabilisiertes Asphaltelement zur Sicherstellung der Diversität des Gesamtverschlusskonzeptes.

Eine Darstellung und Beschreibung eines überarbeiteten Verschlusskonzeptes (Rauche et al., 2003) ist in Abbildung 1-6 dargestellt.

Unterhalb der oberen Verfüllsäule wird ein Bentonit Dichtelement (DE1) eingebaut, auf das ein Schotter / Asphalt dichtelement (DE2) folgt. Dieses Dichtelement befindet sich im Übergangsbereich zwischen Salinar und Hutgestein. Der Hauptanteil dieses Dichtelementes ist im Bereich Salinar zu finden. Nach einem geringmächtigen Übergangsbereich folgt das untere Schotter / Asphalt Dichtelement (DE3), welches von der unteren Verfüllsäule, die aus Schotter / Solezement besteht und bis in den Schachtumpf reicht, gestützt wird.

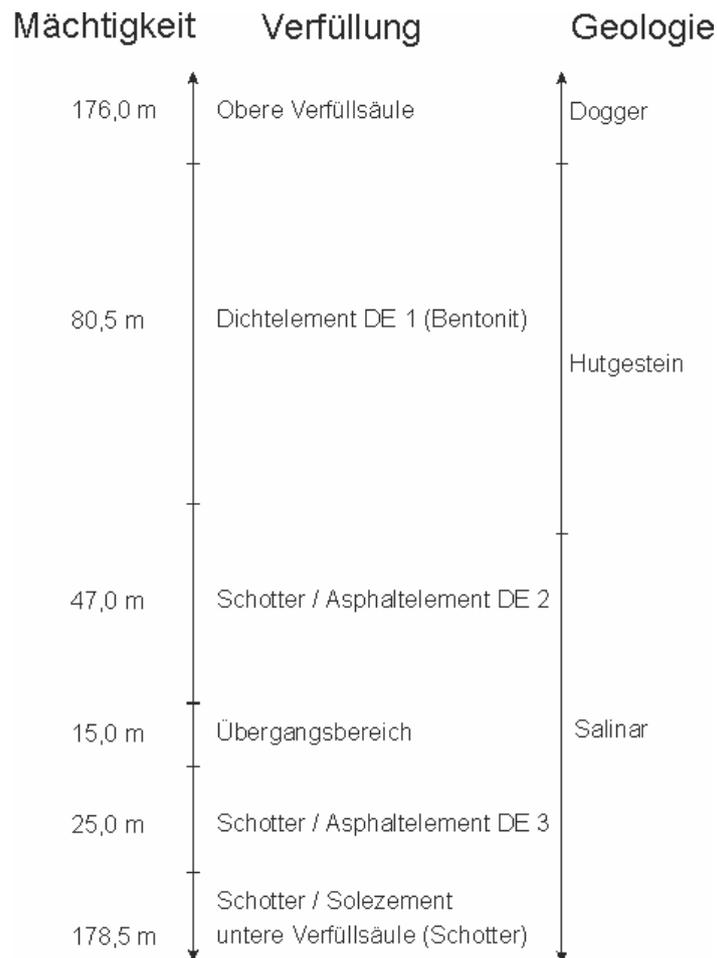


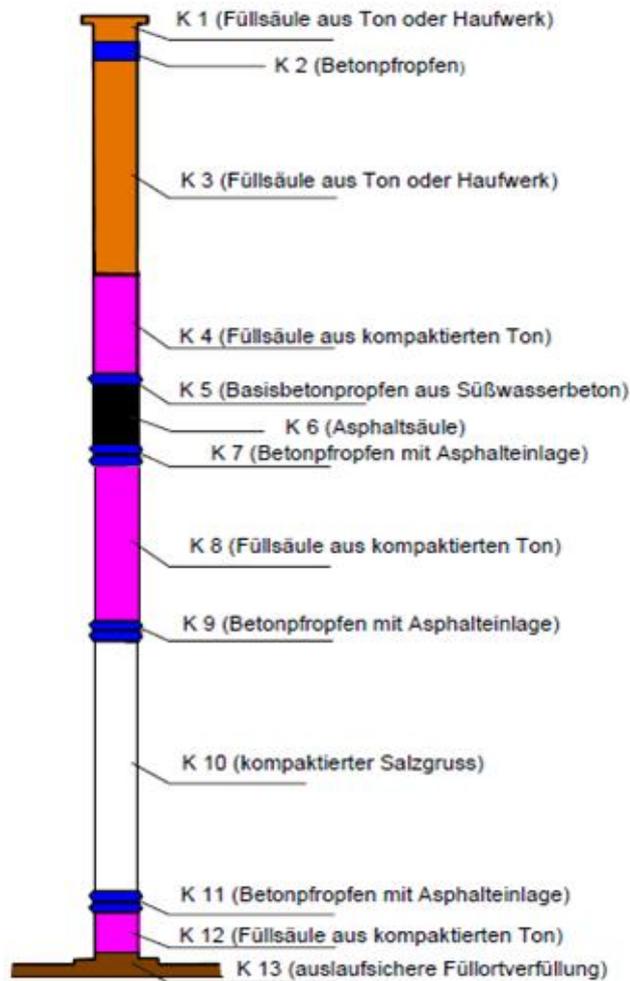
Abbildung 1-6: Verfüllplan für das Endlager Morsleben (Schacht Marie) (Rauche et al., 2003)

Bei genauer Betrachtung sind die Unterschiede im Verfüllkonzept zwischen dem Grundkonzept (Abbildung 1-5) und dem überarbeiteten Konzept (Abbildung 1-6) nur sehr gering. Die Schotter / Asphalt Dichtelemente (DE2 und DE3) sind nur von einem geringmächtigen asphaltichten Übergangsbereich getrennt, so dass diese beiden Dichtelemente mit dem dichtgeschichteten Asphalt-dichtelement des Grundkonzeptes (Abbildung 1-5) gleichgesetzt werden kann. Im überarbeiteten Schachtverschlusskonzept (Abbildung 1-6) wurde demnach lediglich auf das im Grundkonzept (Abbildung 1-5) vorhandene untere Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit gegen Zuflüsse aus dem Grubengebäude verzichtet.

### 1.2.1.3 WIPP Site Carlsbad New Mexico

Die WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) Site ist das weltweit dritte (nach Asse und ERAM) in Betrieb genommene Endlager für atomare Abfälle allgemein, und das erste Endlager für hochradioaktive, aus langlebigen Radionukliden bestehende Abfälle. Bei dem Großteil der eingelagerten Stoffe handelt es sich um Transurane, einem Abfallprodukt der Kernwaffenproduktion. Bei der WIPP Site handelt es sich nicht um ein ehemals zur Salzgewinnung an-

gelegtes Bergwerk. Das Grubengebäude wurde zum Zweck der Einlagerung radioaktiver Abfälle neu aufgeföhren (Francke & Saeb, 1996), (Wikipedia, 2011a), (Wikipedia, 2011b).



**Abbildung 1-7: Schachtverschlusskonzept der WIPP Site (nach: (US Department of Commerce, 1995) und (Kudla et al., 2009))**

In Abbildung 1-7 ist das geplante Verschlusschema der zwischen 1980 und 1984 geteufte, Schächte dargestellt. Als Besonderheit bei diesem Konzept ist der geplante Einsatz von art-eigenem Verfüllmaterial zu sehen. In Abbildung 1-7 ist im mit K10 bezeichneten Bereich eine Verfüllung mit kompaktiertem Salzgruss vorgesehen. Diese Methode bietet den Vorteil, dass durch die Konvergenz der Schachtwände der eingebrachte Salzgruss weiter kompaktiert und verfestigt wird und somit mit dem anstehenden Salinar „verwächst“. Es muss jedoch erwähnt werden, dass nach dem derzeitigen Stand der Technik der Salzgruss nur mit einer minimalen Porosität von  $\geq 10\%$  eingebaut werden kann. Mit einer solchen Porosität sind Aussagen über das Einhalten der erforderlichen Setzungsstabilität nur sehr schwer möglich. Weitere Bereiche der Füllsäule wurden bis oberhalb des geplanten, aus Asphalt bestehenden Hauptdichtelementes, aus kompaktiertem Ton geplant. Oberhalb der Hauptdichtung kommt neben dem kompaktierten Ton auch unkompaktierter Ton sowie Haufwerk zum Einsatz. Eine weitere Besonderheit ist der Einsatz mehrerer Betonpfropfen, die in drei Fällen als Doppelpfropfen

mit zwischengeschalteten Asphaltlagen ausgelegt sind. Die Füllsäulen aus kompaktiertem Ton bzw. Salzgrus weisen ebenfalls eine Dichtwirkung auf. (nach: (US Department of Commerce, 1995) und (Kudla et al., 2009))

#### **1.2.1.4 Erkundungsbergwerk Gorleben**

Im Rahmen der VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben) wurde für den bereits existierenden Schacht Gorleben 1 ein geeignetes Verschlusskonzept erstellt (Müller-Hoeppe et al., 2013a). Dieses Konzept dient als Grundlage für das in Kapitel 2 beschriebene Sicherheitsnachweiskonzept und wird dort beschrieben, so dass an dieser Stelle nur darauf verwiesen wird.

### **1.2.2 Geplante Schachtverschlüsse im Tonstein**

#### **1.2.2.1 Schacht Konrad**

Das Verschlusskonzept für den im Tonstein aufgefahrenen Schacht Konrad (Abbildung 1-8 und Abbildung 1-9) unterscheidet sich erheblich von den bereits beschriebenen Dichtkonzepten für Schächte im Salinar. Hier ist jedoch auch hinzuzufügen, dass das Grundkonzept, auf dem dieses Verschlusskonzept beruht, bereits 1986 (Sitz et al., 1989) entwickelt wurde.

Im vorliegenden Konzept für den Schachtverschluss des Endlagers Konrad ist für die tiefsten 400 m der Schachtsäule der Einbau einer Stützsäule aus verformungsarmem, gemischt körnigem, nicht bindigem, gebrochenem Material, ohne vorheriges Berauben des Schachtausbaues vorgesehen. Dieses Verfüllmaterial soll ebenfalls in die angrenzenden Strecken und Füllörter eingebracht werden. Der Teufenbereich zwischen 280 m und 820 m wird nach der Entfernung des Ausbaues mit Hilfe einer mineralischen Abdichtung (DYWIDAG Gemisch mit bis ca. 12% Bentonit (siehe (Greinacher & Piepenbreier, 1992)) verfüllt. Dieses Element stellt die Hauptbarriere zur Ausbreitungsverhinderung von Radionukliden dar. Der Einbau ist in einer sehr gering wasserdurchlässigen Trockenmischung aus Kies (8 / 16 mm), Quarzmehl-Füller (0 / 2 mm) und Bentonit im Kernbereich vorgesehen.



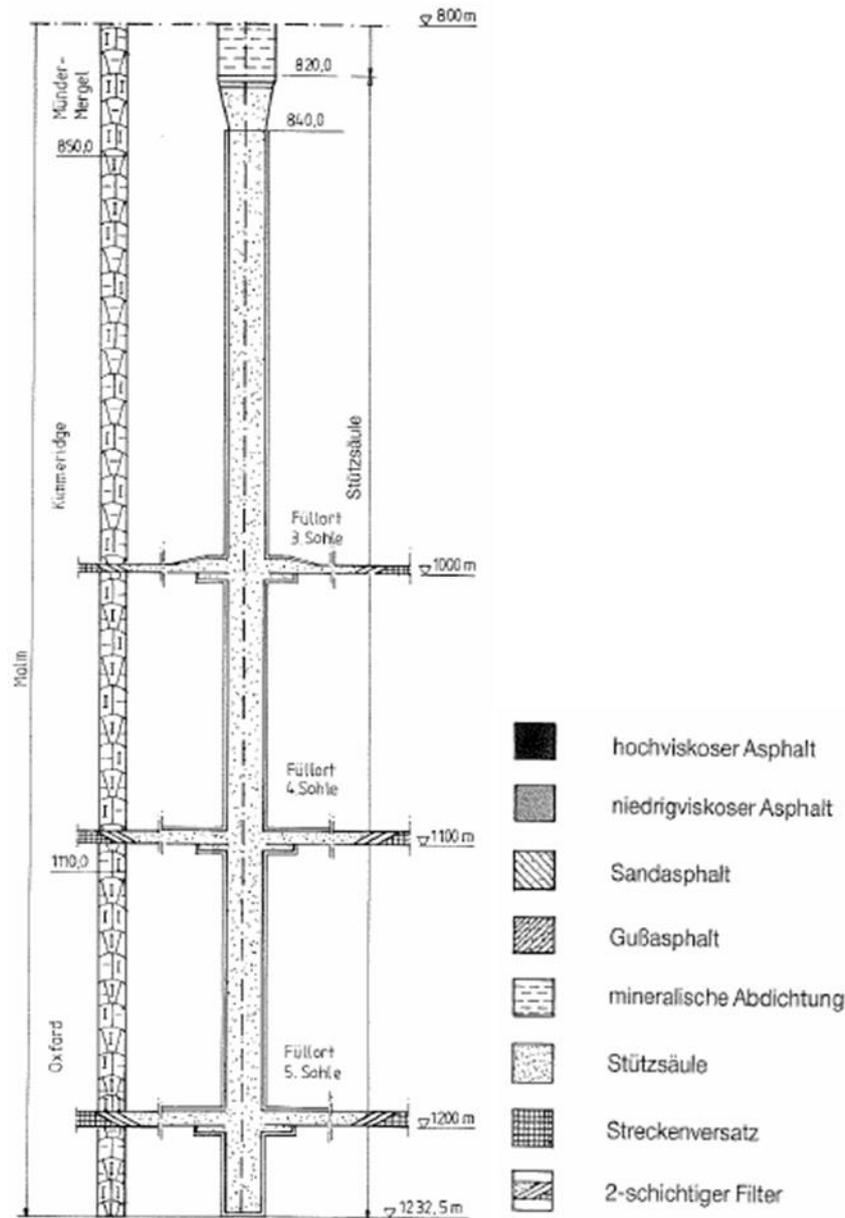


Abbildung 1-9: Schachtverschlusskonzept des Schachtes Konrad Teil 2 (Köster, 2009)

In Variante A wird der Einbau einer wassergesättigten Tonschicht zwischen dem Kernbereich der Füllsäule und der Schachtwand vorgesehen. Die Trennung zwischen der Tonschicht und dem im Kernbereich verfüllten Mineralgemisch erfolgt mit Hilfe eines zylindrischen Ziehbleches, welches mit dem Einbaufortschritt kontinuierlich nach oben hin mitgeführt wird (siehe Abbildung 1-10).

Bei dieser Variante ist der Wassergehalt des Tonmantels kritisch zu betrachten. Durch den Kontakt zur Schachtwand einerseits, bzw. zum im Kernbereich verfüllten Mineralgemisch, ist nach dem „Ziehen“ des Ziehbleches mit einer Verminderung des Wassergehaltes im eingebauten Tonmantel zu rechnen. Bei einer Verminderung des Wassergehaltes ist ein Schrumpfen

fen dieses Tonmantels zu erwarten, was zu einer deutlichen Verminderung der Dichtwirkung führen wird.

In Variante B wird der Einbau eines mauerwerksartigen Ringes aus Bentonitformsteinen vorgesehen. Nach dem Einbau der Formsteine kann die Trockenmischung im inneren eingebracht werden. Bei dieser Einbaumethode wird eine vollständige Dichtwirkung infolge eines Fluidzutrittes und des dadurch bedingten Quellens der Formsteine erreicht.

Im bestehenden Konzept wird eine mögliche gezielte Bewässerung der Formsteine erwähnt. Um den für die Abdichtung notwendigen Quelldruck zu erreichen, muss der Bentonit jedoch allseitig eingespannt sein. In diesem eingespannten Zustand kann eine gezielte und vor allem gleichmäßige Bewässerung jedoch nicht mehr sichergestellt werden. Ein Einbau nach Variante B ist auch ohne Bewässerung möglich, dann ist jedoch damit zu rechnen, dass die trockenen Bentonitformsteine Feuchtigkeit aus dem bergfeuchten Tonstein aufsaugen, was zu einer Schrumpfung des anstehenden Tonsteines führt.

Nach Ansicht der Autoren bedarf dieser Teil des Verschlusskonzeptes aufgrund der oben aufgeführten Sachverhalte dringend einer Überarbeitung.

Das Verschlusskonzept sieht für den oberflächennahen Bereich, in welchem die Bitumenabdichtung eingebracht werden soll, weder eine Beraubung des Schachtausbaues noch einen Nachschnitt der EDZ vor. Vielmehr ist geplant, diese Bereiche mit einem dichten Netz von Bohrungen zu perforieren und diesen Bereich durch die Injektion von Tonsuspension hydraulisch abzudichten.

Es ist vorgesehen eine hydrostatisch wirkende Asphaltabdichtung mit einer mehrschichtigen Asphaltssäule unterschiedlicher Viskositäten einzubauen. Im Kontaktbereich zur mineralischen Abdichtung ist die Verwendung eines niedrigviskosen Asphaltes auf Basis von Bitumen B160/220 vorgesehen, um ein Eindringen des Asphaltes in die mineralische Füllsäule zu beschleunigen und den Übergangsbereich somit schnellstmöglich abzudichten. In den weiter im Hangenden befindlichen Verfüllabschnitten soll ein höherviskoser Asphalt auf Basis von Bitumen B20/30 zum Einsatz kommen. Da die Asphaltfüllsäule bis nach Übertage reicht, kann im Bedarfsfall, bei Abwanderung des Bitumens in das Gebirge problemlos eine Nachverfüllung erfolgen (Köster, 2009).

#### Variante A:

- Einbau einer wassergesättigten Tonschicht zwischen Kernbereich und Schachtwand lagenweise parallel zum Einbau der Trockenmischung,
- Einsatz eines zylindrischen Ziehblechs

#### Variante B:

- Einbau eines mauerwerksartigen Rings aus hochverdichteten Bentonitformsteinen vor Einbringen der Trockenmischung im Kernbereich;
- volle Dichtwirkung erst nach Aufquellen der Formsteine (*gezielte Bewässerung erforderlich*)

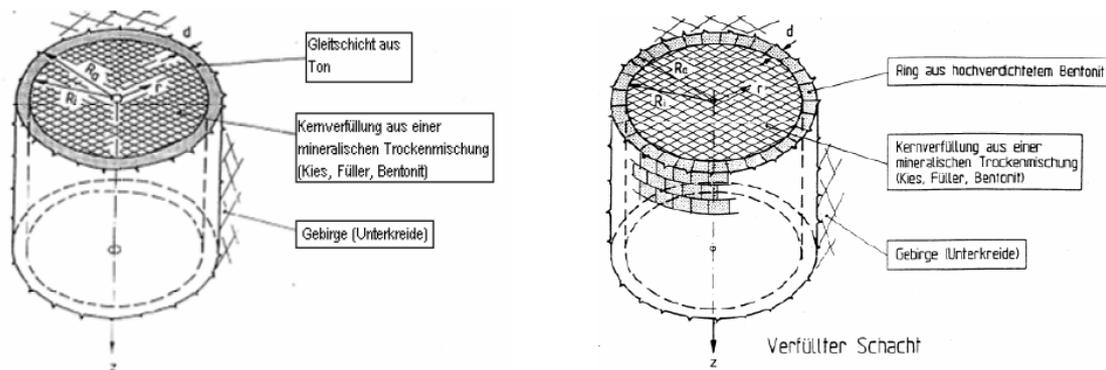


Abbildung 1-10: Einbauvarianten der mineralischen Abdichtung im Schacht Konrad (Köster, 2009)

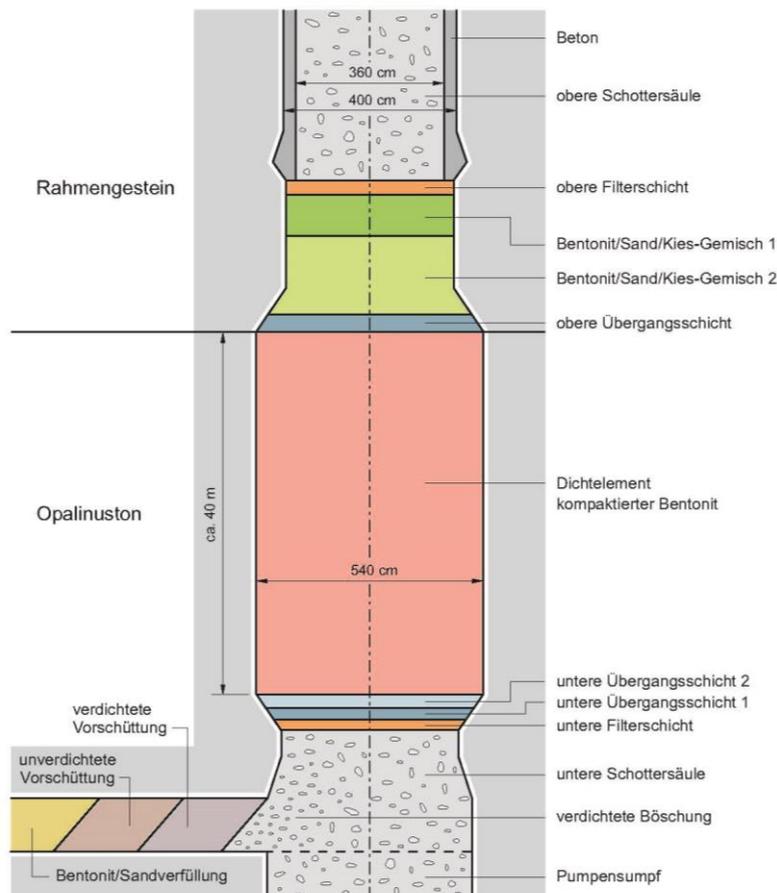
#### 1.2.2.2 Konzept NAGRA

Die NAGRA führt in dem Projekt „Opalinuston“ Forschungen zur Errichtung und Betrieb eines Endlagers im gleichnamigen Tonstein durch. Teil der Forschungen ist die Konzeption eines flüssigkeitsdichten, langzeitstabilen Barriersystems, mit dem das Endlager nach Ende des Einlagerungszeitraumes sicher verschlossen werden soll.

Im Gegensatz zum Schacht Konrad handelt es sich bei dem geplanten Endlagerstandort der NAGRA im Opalinuston nicht um ein ausgeerztes Bergwerk, sondern um eine eigens zum Zweck der Endlagerforschung aufzufahrende Grube. Dies besitzt den Vorteil, dass auch bereits bei der Auffahrung der Zugangsbauwerke (Tagesschächte und Rampe) auf eine gebirgsschonende Vortriebsweise geachtet werden kann und die Schachtein- und Ausbauten besonders auf den späteren Rückbau ausgelegt werden können.

Das Konzept der NAGRA sieht im Füllortbereich eine Streckenverfüllung mit Dichtfunktion vor. Diese besteht zur Streckenseite hin aus einer Bentonit- Sandverfüllung und geht in Richtung Schachtröhre über eine unverdichtete Vorböschung und eine verdichtete Vorböschung in die verdichtete Böschung der unteren Schotterssäule der Schachtverfüllung über. Das Hauptdichtelement der Schachtverfüllung besteht analog zur Schachtverfüllung in Salzdetfurth aus einem kompaktierten Bentonitelement, welches durch zwei Übergangsschichten und einer Filterschicht von der unteren Schotterfüllsäule getrennt ist. Im Bereich der Filterschichten und des ca. 40 m langen Dichtelementes erfolgt ein Nachschnitt der Schachtkon-

tur, um Einflüsse der EDZ und dadurch entstehende neue Wegsamkeiten weitestgehend eliminieren zu können. Im Top des Bentonitelementes folgt eine obere Übergangsschicht sowie zwei Bereiche aus Bentonit / Sand / Kies-Gemischen. Eine obere Filterschicht stellt den Übergang zur oberen Schottersäule dar. Im Bereich der oberen Schottersäule wird der ursprüngliche Schachtausbau beibehalten (Vergleiche Abbildung 1-11).



Das oben beschriebene und in Abbildung 1-11 dargestellte Verschlusssystem wird zweimal in Reihe eingebaut. Zum einen im Füllortbereich der Einlageungssohle, zum anderen soll im Übergangsbereich zwischen dem Opalinuston und dem Wedelsandstein ein zweites Dichtsystem nach dem gleichen Prinzip eingebaut werden.

**Abbildung 1-11:**  
**Konzeptvorschlag für**  
**Schachtversiegelung -NAGRA-**  
**(Nold et al., 2002)**

### 1.2.2.3 Großversuch UTL Belgien

In Belgien wird ein Endlagerstandort im „BOOM-clay“, einer Tonformation mit plastischen Eigenschaften, in einem sich in 220m Teufe befindlichen Forschungslabor untersucht. Teil der Untersuchungen ist ein Großversuch zur Erstellung eines Schachtverschlusses im Tonstein (Abbildung 1-12). Das Dichtelement des untersuchten Verschlusskonzeptes ist ebenfalls ein aus einem Korngemisch bestehender Bentonitkern, welcher aus einem hochkompaktierten und einem unkompaktierten Teilbereich besteht.

Ziel der Versuche war der Test des Bentonitgemisches und von Einbautechniken sowie die Messung der dabei erzielbaren Trockendichten und die Ermittlung der zugehörigen Quelldrücke.

Das Dichtelement sitzt auf einer mit Beton verpfropften Schachtsäule auf. Im Bereich des Dichtelementes wurde der aus Beton bestehende Schachtausbau entfernt. Die weitere Schachtsäule wurde ebenfalls mit Beton verfüllt. Im Topbereich wurde die Füllsäule im Gebirge verankert. Im Ankerbereich wurde der Schachtausbau ebenfalls vor Ort belassen und von den Ankerbauwerken durchdrungen. Da es sich hier um einen Versuchsaufbau handelt, ist im Bereich von Übertage bis zur Sohle des Bentonitelementes ein Rohr für Messungen und Fluide eingebaut. Bei diesem Aufbau kann das im Versuch hergestellte Dichtelement keinen großen Flüssigkeitsdrücken weder von oben noch von unten standhalten. Wie erwähnt handelt es sich hierbei um einen Versuchsaufbau, bei dem die Sammlung von Messwerten im Vordergrund steht.

In einem darauf beruhenden Konzept eines „realen“ Verschlussbauwerkes müssen derartige Details verändert werden (Imbert et al., 2005).

Ferner wurde mit Hilfe dieses Versuchsaufbaues ein Tracereperiment zur Gasdichtheit des Verschlusses durchgeführt. Eine Gasdichtheit des Schachtverschlusses konnte nachgewiesen werden (Van Geet et al., 2007).

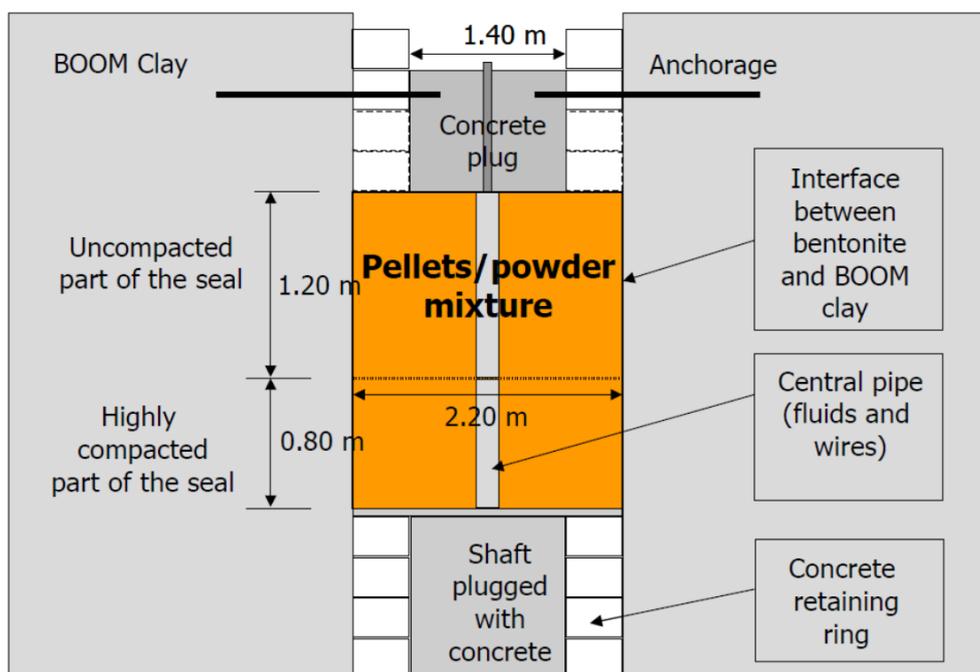


Abbildung 1-12: Prinzipskizze des Großversuches für eine Schachtversiegelung in Tonigen Gesteinen - Phase II (Imbert et al., 2005)

### 1.2.3 Geplante Schachtverschlüsse im Kristallin

Verschiedene Länder planen den Einschluss hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle nicht in Salinar- und Tongesteinen, sondern in kristallinen Gesteinen. Derartige Bestrebungen können beispielsweise in Finnland, Schweden und Kanada beobachtet werden. Auch in Frankreich wird neben der Forschung für ein Endlager in einer Tonformation die Möglichkeit der Einlagerung in kristalline Gesteine nicht außer Acht gelassen. In den Einlagerungskonzepten der SKB (Schweden) und Posiva (Finnland) stellen die Einlagerungsbehälter und die Puffermaterialien, in die die Behälter eingebettet werden, eine weit bedeutendere Rolle dar als die geologische Barriere, und somit auch als der Verschluss von Zugangsbauwerken. Auf Seiten von SKB und Posiva existieren bislang lediglich rudimentäre Konzepte zum Verschluss der Zugangsbauwerke. Im Stripa Projekt (Fairhurst et al., 1993) und (Gray, 1993) wurden im Auftrag der NAGRA Untersuchungen zu natürlichen und zu technischen Barrieren für einen Endlagerstandort im Kristallin durchgeführt.

#### 1.2.3.1 UTL Kanada

Im Folgenden sind die für das Kanadische Untertagelabor geplanten Schachtverschlüsse beschrieben.

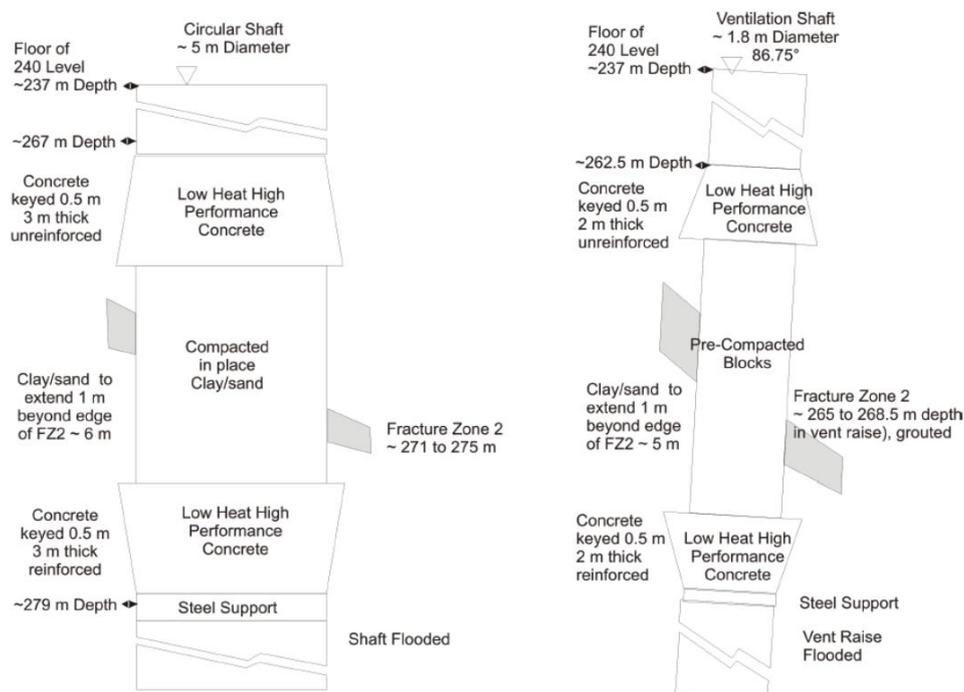


Abbildung 1-13: Vorgesehener Schachtverschluss für das Kanadische Untertagelabor (Dixon et al., 2010)

Das Konzept sieht weder für den Haupt- noch für den Wetterschacht eine Vollverfüllung vor. Es ist vielmehr geplant sowohl die Gruben als auch die Schachtröhre zu fluten. Es ist vorge-

sehen die Schächte mit einem Ton / Sand Gemisch abzudichten. Dieses wird im Hauptschacht vor Ort eingebaut und verdichtet. Im Wetterschacht ist der Einbau vorkompaktierter Blöcke vorgesehen, da aufgrund des geringen Durchmessers eine in-situ Verdichtung als nicht realisierbar erscheint. Diese Dichtelemente werden in jeweils zwei Widerlager aus Niedrigtemperatur-Hochleistungsbeton eingespannt, von denen das jeweils untere verstärkt (bewehrt) wird. Der Einbau der unteren Widerlager erfolgt auf einer fest im Schacht eingebrachten Stahlbühne. Wie in Abbildung 1-13 ersichtlich, besitzen die beiden Verschlussbauwerke nur sehr geringe Längen von jeweils ca. 12 m inkl. der Widerlager. Der Fokus der Verschlüsse liegt offenbar in der Abdichtung der eingezeichneten Bruchzonen, die sich jeweils im Bereich der Dichtelemente befinden.

### 1.3 Fazit

Schachtverschlüsse werden nach dem Stand der Technik aus mehreren Funktionslementen zusammengesetzt. Diese können in folgende Hauptgruppen:

- Widerlager
- Dichtelemente
- Füllsäule

unterteilt werden.

Widerlager werden üblicherweise entweder in Form von Betonpfropfen mit unterschiedlicher Formgebung, als setzungsstabile Schottersäule oder als Säule arteigenen Materials bis in den Schachtsumpf oder als, den Schacht und Füllortbereich vollständig ausfüllende, Säule aus Schotter, Salzbeton oder Sorelbeton gebaut. Die Frage der Langzeitstabilität von Beton hat zur Entwicklung der setzungsstabilen Schottersäule als kombiniertes Widerlager-Füllsäulenelement geführt.

Der Nachweis der Langzeitstabilität von Materialien für Dichtelemente wird allgemein üblich über den Nachweis natürlicher Analoga geführt. Für den Bau von Dichtelementen zur hydraulischen Abdichtung von Schachtbauwerken haben sich Bentonit, sowie Bitumen / Asphalt, als wirksame Dichtmaterialien durchgesetzt. Bentonit quillt bei Fluidzutritt und baut bei entsprechender Einspannung einen Quelldruck auf. Asphalt eignet sich als Kurzzeitdichtung (sofort wirkendes Dichtelement) mit den Eigenschaften einer sofortigen und völligen Flüssigkeitsdichtheit und der Fähigkeit unter ausreichendem Druck in mürbe Gebirgsbereiche (Klüfte und sonstige Risse) einzudringen und diese abzudichten. Für „Nebendichtungen“ im Deckgebirgsbereich kommen ferner natürliche Tone und Soletone zum Einsatz.

Einen Sonderfall nehmen die Strömungsbarrieren ein, die im Endlager Asse nicht nur für die geplanten Schachtverschlüsse, sondern auch für Streckenverschlüsse geplant sind. Es handelt sich dabei nicht um ein Dichtelement im eigentlichen Sinne, sondern um ein Bauwerk, welches die Strömungsgeschwindigkeit der Fluide extrem reduzieren soll, um die Wahr-

---

scheinlichkeit des Austretens von Radionukliden aus dem Endlager weiter zu reduzieren (Helmholtz Zentrum München 2010).

Gegebenenfalls werden Funktionen einzelner Elemente miteinander kombiniert und in einem Element vereint. So sind die oftmals geplanten setzungsstabilen Schottersäulen gleichzeitig Widerlager und Füllsäule. Im Verschlusskonzept für den Schacht Konrad kann dem oberen Bitumenelement ebenfalls eine Teilfunktion als Füllsäule zugewiesen werden. Es ist mittlerweile üblich, eine vollständige Verfüllung der Schachtsäule anzustreben (siehe Abschnitt 1.1). Verbleibende Hohlräume (Teilverfüllung) beispielsweise unter als Betonpfropfen ausgelegten Widerlagern, werden heute nur noch in Sonderfällen (z. B. Schachtsumpf oder Füllörter nicht erreichbar) belassen.

Es zeigt sich derzeit vor allem für Schachtverschlüsse von Endlagern und Untertagedepotien im Salinar die Tendenz, arteigenes Material zum Bau von Widerlagern und der Füllsäule zu etablieren. Dazu wurde z. B. die Verwendung von Salzgrus untersucht. Derzeit befinden derartige Materialien und die zugehörigen Einbautechnologien jedoch noch im Entwicklungsstadium. Es ist derzeit noch nicht möglich, den Salzgrus mit einer geringeren als 10% betragenden Porosität einzubauen und somit eine ausreichende Setzungsstabilität zu garantieren.

## **2 AP2 – Sicherheitsnachweiskonzept – Technischer Entwurf**

### **2.1 Einleitung und Zielsetzung**

Die Endlagerforschung hat die vorrangige Aufgabe, eine wissenschaftlich-technische Grundlage für eine sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zu schaffen. Eine maßgebliche Zielsetzung ist, neben der technischen Realisierbarkeit, die Durchführbarkeit geeigneter Sicherheitsnachweise. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Sicherheitsnachweise des Mehrbarrierensystems, bestehend aus der geologischen Barriere und den notwendigen geotechnischen Barrieren wie beispielsweise Strecken- und Schachtverschlüssen. Diese teilweise hintereinander angeordneten Teilsysteme des Verschlusskonzeptes sollen den langfristig sicheren Einschluss der eingelagerten Abfälle sicherstellen.

Für die Auslegung und Nachweisführung wird für alle Barrieren ein einheitliches Konzept als zielführend angesehen. In Anlehnung an den international anerkannten Stand der Technik, soll dies über die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte realisiert werden. Eine Übertragung der Methode der Grenzzustände und der Teilsicherheitsbeiwerte auf die Sicherheitsnachweisführung an einer geotechnischen Barriere erfolgte im ersten Schritt in (Müller-Hoeppe & Krone, 1999) am Beispiel eines Streckenverschlusses und wurde in (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009) erstmals auf Elemente eines generischen Schachtverschlusses angewendet.

Die folgenden Abschnitte geben zusammenfassend eine Einführung in die Nachweismethode der Teilsicherheitsbeiwerte und beschreiben das Verfahren. Zur Verdeutlichung der Anwendbarkeit wird in Kapitel 2.4 – Beispiel für die Anwendung des Nachweiskonzeptes auf Elemente eines Schachtverschlusses - das Vorgehen bei der Nachweisführung anhand der Beispiele eines Dichtelementes und eines Widerlagers in dem kürzlich entwickelten Schachtverschlusskonzept für die vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (kurz VSG) quantitativ beschrieben.

### **2.2 Einführung und Beschreibung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte**

Das semiprobabilistische, zuverlässigkeitsorientierte Sicherheitsnachweiskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte beruht auf dem international anerkannten Regelwerk der Eurocodes (DIN EN 1990) und kann somit im Bauwesen für den Nachweis der Tragfähigkeit als Stand der Technik angesehen werden.

Der eigentliche Nachweis der Langzeitsicherheit setzt sich dabei für das Gesamtsystem und auch für die einzelnen Barrieren aus einer Vielzahl von Einzelnachweisen für verschiedene Grenzzustände zusammen, in die z. B. die mechanischen Baustoffeigenschaften eingehen. Zur Durchführung der Nachweise müssen zunächst aus den übergeordneten Schutzziele Anforderungen für das Gesamtsystem des Mehrbarrierenkonzeptes und der Teilsysteme abgeleitet werden. Der Nachweis, dass die konkreten Anforderungen erfüllt sind, erfolgt mit Hilfe von Rechenfällen, wobei die Bezeichnungsweise Rechenfälle (Lastfälle) in Analogie zur

Bezeichnungsweise bei Langzeitsicherheitsanalysen gewählt wurde, da nicht nur Lasten zu betrachten sind. Die Rechenfälle werden aus den Einwirkungskombinationen und den jeweiligen Systemeigenschaften abgeleitet. Die jeweiligen Zustände, z. B. die vorhandenen Spannungen, des Bauwerks sind durch eine Gleichgewichtsbetrachtung zu ermitteln. Der eigentliche Nachweis erfolgt anschließend durch eine Grenzwertbetrachtung der sich gegenüber stehenden Einwirkungen und Widerstände, z. B. werden die sich aus der Gleichgewichtsbetrachtung ergebenden (vorhandenen) Spannungen den zulässigen Spannungen, die sich z. B. aus den Materialfestigkeiten ergeben, gegenübergestellt. Die Einwirkungen auf das Bauwerk werden mit den Widerständen der Konstruktion durch Grenzkriterien, die den Einwirkungskombinationen zugeordnet sind, verglichen. Die Nachweise sind für alle zu betrachtenden Einwirkungskombinationen und deren Grenzzustände mit Hilfe der Rechenfälle zu führen.

Der Bezug auf einen Grenzzustand ist insofern sinnvoll, da sich sowohl Einwirkungen, als auch Widerstände aus typischen Verteilungsfunktionen ergeben. Durch die sich aus den Verteilungen ergebende Streuung der beiden Größen treten eine Vielzahl möglicher Zustände auf. Mit dem Grenzzustand wird der Zustand im Bauwerk beschrieben, bei dem die Konstruktion gerade noch die Anforderungen erfüllt und nach dessen Überschreiten eine Einhaltung der Entwurfsanforderungen nicht mehr gegeben ist. Dem entsprechend muss zur Erfüllung der Anforderungsbedingung formal gelten, dass die Widerstände größer gleich den Einwirkungen sind.

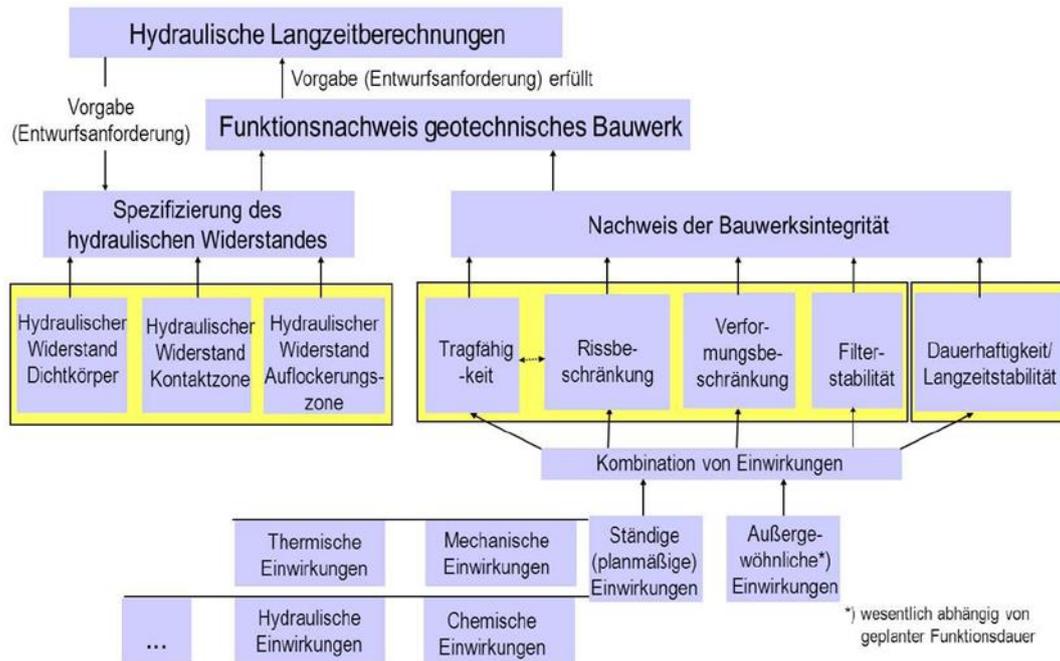
Als wesentliche Elemente der Sicherheitsnachweisführung für technische Barrieren, entsprechend dem Stand der Technik, lassen sich nach (Kreienmeyer et al., 2008) und (Müller-Hoeppe et al., 2007) folgende Einzelnachweise beschreiben:

- Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes (Dichtheitsnachweis)
- Nachweis der Tragfähigkeit
- Nachweis der Verformungsbeschränkung
- Nachweis der Rissbeschränkung
- Nachweis der Dauerhaftigkeit

Diese zu führenden Nachweise sind für den Funktionsnachweis eines Schachtverschlusses entscheidend. Weiterhin ist der

- Nachweis der Herstellbarkeit

zu führen. Die Abbildung 2-1 stellt die einzelnen Teilnachweise und deren Verknüpfung zum vollständigen Funktionsnachweis dar. Neben der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte muss auch eine Zuverlässigkeitsaussage auf empirischer Basis zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit mit probabilistischen Methoden durchgeführt werden. Die möglichen Verfahren zur Bewertung der Zuverlässigkeit werden beispielsweise auch bei Risikoanalysen genutzt (Müller-Hoeppe & Krone, 1999).



**Abbildung 2-1: Verknüpfung der hydraulischen Langzeitberechnungen im Langzeitsicherheitsnachweis und den funktionsbezogenen Einzelnachweisen am Beispiel eines Schachtverschlusses (Müller-Hoeppe et al., 2013a)**

Für die Einzelnachweise ergeben sich die Bemessungswerte aus den charakteristischen Werten der Einwirkungen und Eigenschaften der Barriere in Kombination mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten. Durch die Anwendung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte werden Einwirkungen und Widerstände bzw. die enthaltenen Parameter der Zielbeziehung mit Teilsicherheitsbeiwerten versehen. Einwirkungen ( $E_d$ ) werden mit den Teilsicherheiten multipliziert und somit erhöht. Wohingegen Widerstände ( $R_d$ ) durch die Teilsicherheiten dividiert werden und somit eine Minderung erfahren. Dieses Vorgehen und die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte decken generell Unsicherheiten der repräsentativen Werte der Einwirkungen und Unsicherheiten der Eigenschaften der Konstruktion ab. Modellunsicherheiten bei Einwirkungen und Widerständen werden soweit erforderlich in Abhängigkeit der Modellbildung über Modellfaktoren erfasst. Bei einer hohen Genauigkeit der Modelle werden in der Regel keine Modellfaktoren berücksichtigt (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009).

Die Ausgangsforderung

$$E_d \leq R_d \tag{2-1}$$

gliedert sich somit in konkrete Berechnungen für beide Terme.

Auf der Einwirkungsseite gilt für  $E_d$ :

$$E_d = \gamma_{Ed} * E(F_{di}; a_{di}; X_{di}) \quad (2-2)$$

Mit:

- $\gamma_{Ed}$  Teilsicherheitsbeiwert für Modellunsicherheit Einwirkungsmodell
- $F_{di}$  Bemessungswerte Einwirkung
- $a_{di}$  Bemessungswerte der geometrischen Größen
- $X_{di}$  Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften

Die Bemessungswerte der Einwirkung  $F_d$  werden durch die Multiplikation des charakteristischen Einzelwertes ( $F_k$ ) mit dem Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung ( $\gamma_f$ ) ermittelt:

$$F_d = \gamma_f * F_k \quad (2-3)$$

Für die Bemessungswerte der Baustoffeigenschaften  $X_d$  gilt, entsprechend den vorherigen Ausführungen:

$$X_d = \frac{\eta * X_k}{\gamma_m} \quad (2-4)$$

Mit:

- $\eta$  Umrechnungsfaktor für Lastdauer, Feuchte, etc.
- $X_k$  charakteristischer Wert der Baustoffeigenschaften
- $\gamma_m$  Teilsicherheitsbeiwert der Baustoffeigenschaft

Anders als bei den bereits genannten Einwirkungen werden geometrische Größen nicht mit einem Teilsicherheitsbeiwert versehen. Der Bemessungswert einer geometrischen Größe ( $a_d$ ) summiert sich aus dem Nennwert ( $a_{nom}$ ) und der berücksichtigten Abweichung ( $\Delta a$ ) vom Nennwert. Die Berücksichtigung der Abweichung ( $\Delta a$ ) ist besonders für sensitiv reagierende geometrische Größen wichtig und wird über die zu erwartenden Änderungen der jeweiligen Größe bestimmt. Als Beispiel soll an dieser Stelle die Knicklänge einer steilstehenden Gebirgsschicht dienen. Die Längenänderungen wirken sich unmittelbar auf das Knickverhalten aus und eine zusätzliche Berücksichtigung einer Abweichung  $\Delta a$  ist notwendig.

$$a_d = a_{nom} + \Delta a \quad (2-5)$$

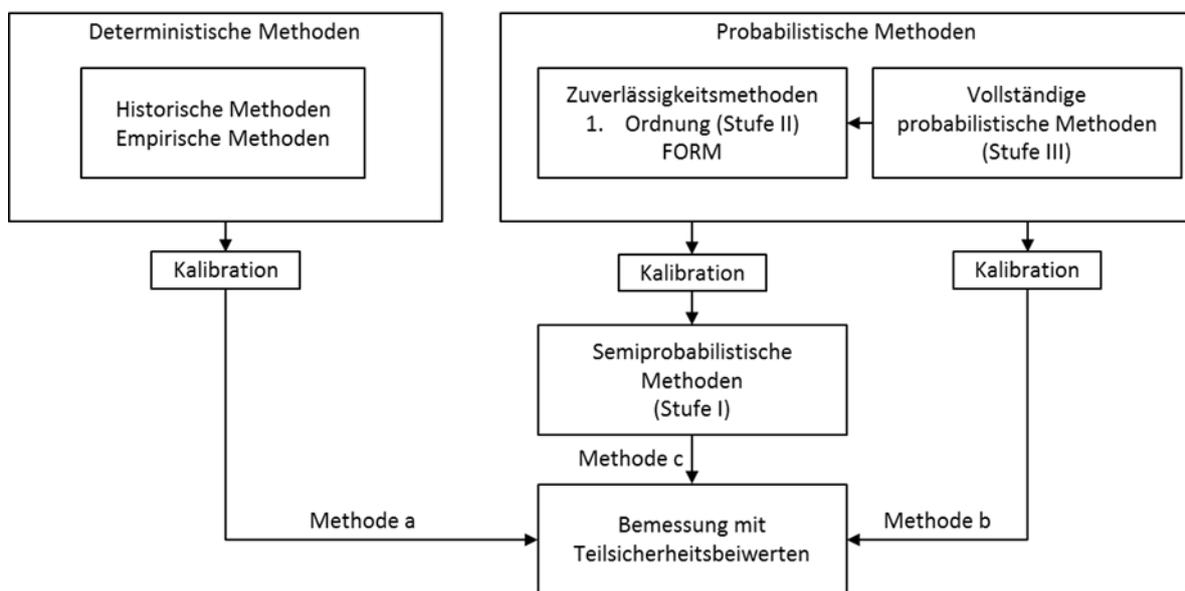
Auf der Widerstandsseite ergibt sich der Bemessungswiderstand aus:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} * R(a_{di}; X_{di}) \quad (2-6)$$

Mit:  $\gamma_{Rd}$  Teilsicherheitsbeiwert für Modellunsicherheit Widerstandsmodell

Die unterschiedlichen Einflussgrößen können sowohl über deterministische, als auch über probabilistische Verfahren ermittelt werden. So resultiert beispielsweise die Geometrie der Konstruktion aus dem Entwurf und dem Beanspruchungsmodell. Einwirkungen lassen sich auf statistischer Basis und auf Basis von Grenzwertabschätzungen ermitteln. Baustoffeigenschaften sind ebenfalls aus einer statistischen Grundlager heraus ermittelbar (Müller-Hoeppe & Krone, 1999).

Sofern im geltenden Regelwerk keine geeigneten Teilsicherheitsbeiwerte beschrieben sind, können diese ebenfalls über probabilistische Methoden oder eine Kalibrierung ermittelt werden (Kreienmeyer et al., 2008). Abbildung 2-2 verdeutlicht schematisch die Methoden zur Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte.



**Abbildung 2-2: Zuverlässigkeitsmethoden zur Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten (DIN EN 1990)**

Die durchzuführenden Einzelnachweise der zu betrachtenden Grenzzustände sind "im Range von Tragsicherheitsnachweisen" durchzuführen, was bedeutet, dass das Zuverlässigkeitsniveau eines Tragfähigkeitsnachweises erreicht wird. Dieses Sicherheitskonzept ist notwendig, um eine anforderungsgerechte Bemessung zu gewährleisten. So ist bei den betrachteten Bauwerken der Dichtheitsnachweis im Range eines Tragsicherheitsnachweises zu sehen, da es bei dem Verlust der Dichtigkeit zu einer "Gefahr für Leib und Leben" kommen kann." (DAfStb 1997). Abweichend von den Definitionen des Eurocodes wird unter dem Begriff Tragfähigkeit nicht allein die mechanische Stabilität verstanden. Der Begriff dient als Synonym für die Vermeidung einer Gefahr für Leib und Leben und kann beispielsweise auch auf den hydraulischen Widerstand angewendet werden. Die Einhaltung des Zuverlässigkeitsniveaus für Tragfähigkeit im entsprechenden Nachweis gewährleistet die Funktionsfähigkeit der Konstruktion.

Die Nachweise beinhalten wie bereits erwähnt eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Bauwerkes. Für den Zuverlässigkeitsnachweis ist ein entsprechendes Konfidenzniveau bzw. geforderte Versagenswahrscheinlichkeit auszuweisen. Diese Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  ist für einen Tragfähigkeitsnachweis mit  $10^{-4}$  über die vorgesehene Nutzungsdauer hinreichend beschrieben (Müller-Hoeppe & Krone, 1999).

Somit beinhaltet der Funktionsnachweis der Sicherheitsfunktion, dass die Barriere bezogen auf die Lebensdauer mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von  $p_f = 10^{-4}$  nicht vorzeitig versagt bzw. die Überlebenswahrscheinlichkeit  $p_s$  der Barriere  $p_s = 1 - p_f$  beträgt (Müller-Hoeppe & Krone, 1999).

### 2.3 Anpassungen zur Nachweisführung an einem Schachtverschluss

Wie bereits in der allgemeinen Beschreibung der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte erläutert, müssen diese Nachweise für alle betrachteten Einwirkungskombinationen sowie für alle Teilsysteme und den Schachtverschluss als Gesamtsystem erbracht werden. In den weiteren Ausführungen steht die Nachweisführung zur Funktionsfähigkeit eines Schachtverschlusses im Vordergrund.

Schachtverschlüsse müssen nach (Sitz, 2001) zumindest folgende grundlegende Anforderungen erfüllen:

- Verhinderung von Fluidaustritten aus dem Grubengebäude
- Verhinderung von Fluidzutritten in das Grubengebäude
- Vollverfüllung von Schächten im Salinar
- Setzungen in der Verfüllsäule müssen so gering wie möglich sein
- ein Auslaufen der Verfüllsäule ist zu verhindern
- alte Einbauten sind, soweit möglich, zu rauben
- alle eingebauten Konstruktionen müssen langzeitstabil<sup>4</sup> und wartungsfrei sein

Zur anforderungsgerechten Gestaltung des Schachtverschlusses werden den einzelnen Elementen verschiedene Funktionen zugeordnet. Vereinfacht ausgedrückt übernehmen die im Schachtverschluss enthaltenen Dichtelemente die Dichtfunktion und die Widerlager gewährleisten die Verformungsbeschränkung (Lagestabilität) der Dichtungen. Art und Anzahl der Dichtelemente und Widerlager sind von den an den Schachtverschluss gestellten Anforderungen und vorliegenden Randbedingungen abhängig. Innerhalb des Schachtverschlusses können Dichtelemente redundant und diversitär ausgeführt sein. Gleiches gilt auch für die Widerlager. Für alle Teilsysteme sind die entsprechenden Nachweise zu führen.

<sup>4</sup> Gemäß (DIN EN 1990) ist dafür im Rahmen der Nachweisführung eine Dauerhaftigkeit der Konstruktion nachzuweisen: "Das Tragwerk ist so zu bemessen, dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer nicht unvorhergesehen verändern."

In Anlehnung an Abbildung 2-1 gilt der Sicherheitsnachweis für den Schachtverschluss als erbracht, wenn neben der qualitätsgerechten Herstellbarkeit für die auslegungsbestimmenden Rechenfälle jeweils folgende Anforderungen erfüllt sind:

- Dichtheit (Spezifizierung des hydraulischen Widerstandes im Dichtelement sowie in der Kontakt- und Auflockerungszone)
- Nachweis der Integrität, bestehend aus Filterstabilität, mechanischer Stabilität, Rissbeschränkung (konstruktionsbezogen), Verformungsbeschränkung, chem. Langzeitbeständigkeit

Im Weiteren sollen die Einzelnachweise näher auf die Umsetzung am Schachtverschluss und dessen Teilsysteme betrachtet werden. Diese allgemeine Betrachtung dient der Vorbereitung der folgenden beispielhaften Nachweisführung und soll zunächst allgemeingültig die Besonderheiten der Nachweisführung am Schachtverschluss hervorheben. Wirtsgesteinspezifische Besonderheiten werden zunächst nicht betrachtet.

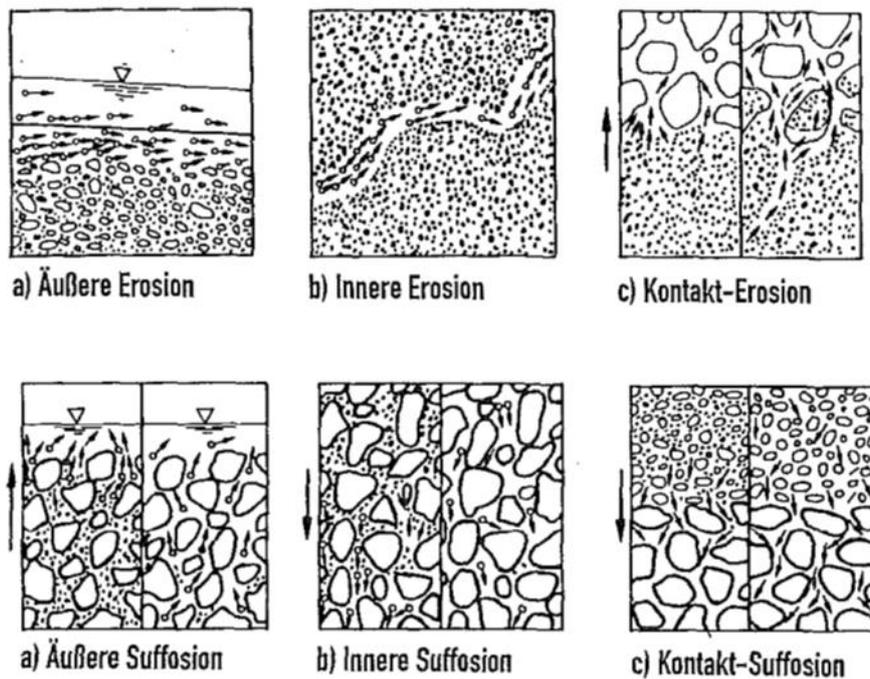
#### Dichtheit

Die Beurteilung der Dichtheit der einzelnen Dichtelemente und somit auch des gesamten Verschlussbauwerkes ist wie auch bei Streckenverschlüssen nicht nur für den Dichtungskörper selbst durchzuführen, sondern auch auf die parallel hydraulisch wirksame Kontakt- und Auflockerungszone anzuwenden. Aus der Kombination der drei Teilsysteme ist die integrale hydraulische Durchlässigkeit des Dichtungsstandortes zu bewerten.

Aufgrund der aus der Schwerkraft resultierenden Systemimmanenz kann bei Schachtverschlüssen an den Dichtelementen eine Beeinflussung der Dichtheit durch die Bildung von Firstspalten, wie sie etwa bei Streckenverschlüssen auftreten können, ausgeschlossen werden. Die Abdichtung des Schachtquerschnittes erfolgt in einer horizontalen Ebene. Mögliche Setzungserscheinungen in einem Verschlusselement oder zwischen zwei Teilsystemen führen anders als im Streckenverschluss nicht zwangsläufig zum Verlust oder Schwächung der Dichtwirkung.

#### Filterstabilität

Die Teilsysteme der Schachtverschlüsse müssen ggf. auf ihre Filterstabilität überprüft werden. Diese Filterstabilität kann durch die Vermeidung von Erosions- und Suffosionsvorgängen im betrachteten Teilsystem beschrieben werden. Aufgrund hoher hydraulischer Gradienten infolge Flüssigkeitszutritts aus den im Deckgebirge existierenden Grundwasserleitern kann speziell während der Aufsättigungsphase ein höheres Erosions- und Suffosionsrisiko bestehen. Diesem ist durch konstruktive Maßnahmen und geeigneter Nachweisführung entgegenzuwirken. Abbildung 2-3 verdeutlicht die grundlegenden Erosions- und Suffosionsvorgänge. Eine fehlende Filterstabilität kann beispielsweise an Dichtelementen zum Verlust der Dichtheit führen.



**Abbildung 2-3: Schematische Darstellung grundlegender Erosions- und Suffosionsvorgänge (DGGT 1997)**

### Mechanische Stabilität

Die vertikale Anordnung der Teilsysteme beinhaltet eine Systemsicherheit. Zur Gewährleistung der Lagesicherheit der Dichtungen bedarf es eines Nachweises der ausreichend kleinen Setzungen (Verformungsbeschränkung) in den Widerlagern und Filterschichten. Der Nachweis der ausreichend kleinen Setzungen ist Bestandteil des Integritätsnachweises.

Bei Widerlagern aus kohäsiven Baustoffen wird der Nachweis der mechanischen Tragfähigkeit durch den Nachweis der Rissbeschränkung abgedeckt. Das mechanische Versagen führt zu einer mechanischen Schädigung oder Versagen des Bauwerkes. Einer mechanischen Schädigung gehen bei kohäsiven Baustoffen immer Rissbildungen voraus.

Unter kohäsiven Baustoffen werden solche verstanden, die durch Bindemittel eine Zug- bzw. Haftzugfestigkeit entwickeln. Dazu gehören beispielsweise Salzbeton oder Sorelbeton. Kann für diese Baustoffe der Nachweis der Rissbeschränkung erbracht werden, ist somit auch eine mechanische Schädigung ausgeschlossen und der Nachweis der mechanischen Tragfähigkeit erbracht.

### Rissbildung

Der Nachweis der Rissbildungsbeschränkung ist sowohl für Dichtelemente, als auch für Widerlager aus kohäsiven Baustoffen relevant. Rissbildungen werden durch mechanische Überbeanspruchung der einzelnen Teilsysteme oder thermomechanische/chemische Prozesse während des Einbauprozesses begünstigt.

Beispielhaft für Rissbildungen infolge von Volumen- und/oder Temperaturänderungen sei an dieser Stelle der Abkühlprozess heißeingebauter Bitumen- oder Asphalt dichtungen erwähnt, bei dem das Dichtmaterial einen abkühlungsbedingten Volumenschwund erfährt. Wie in der Praxis beobachtet, kann dieser Volumenschwund zu einer Verringerung der wirksamen Dichtungslänge des Dichtelementes durch ein Zusammenziehen und Ablösen von der Kontur im oberen Teil des Dichtelementes führen (Herold, 2011).

Als weiteres Beispiel können Rissbildungen hervorgerufen durch Abbindeprozesse von Salzbeton oder Magnesiabinder bei der Errichtung entsprechender Widerlager oder Dichtungen aufgeführt werden. Zusätzliche Rissbildungen durch eine Überschreitung des Fluiddruckkriteriums (kleinste Normalspannung kleiner Fluiddruck) im Dichtelement und im Kontaktbereich können je nach eingesetztem Dichtungsmaterial und den entsprechenden Grenzständen möglich sein (Müller-Hoeppe & Krone, 1999). Als Beispiel sei hierfür der Großversuch zur Herstellung eines Schachtverschlusses in Salzdetfurth erwähnt. Hier führte eine zu schnelle Beaufschlagung eines Bentonitdichtelementes zur Schädigung der Dichtung (Teichmann et al., 2002).

#### Langzeitbeständigkeit/chem. Stabilität

Schachtverschlüsse verschließen die Tageszugänge des Endlagers. Durch die Anordnung innerhalb der geologischen Barriere und den wahrscheinlichen Kontakt zu von oben anstehenden Fluiden kommen Schachtverschlüssen besondere Langzeitsicherheitsfunktionen zu. Aus diesem Grund darf die Konstruktion nur aus Materialien bestehen, deren Langzeitverhalten durch natürliche Analoga oder weitergehende Untersuchungen zum Chemismus belegt ist. Für die Teilsysteme Widerlager und Dichtelement sind somit nur arteigene und weitgehend arteigene Verschlussmaterialien wie beispielsweise Salz- oder Sorelbeton bzw. langzeitstabile Materialien wie Tone (konkret Bentonit), Asphalt oder Bitumen und natürliche Gesteine nutzbar.

Ergänzend gilt auch für den Nachweis der verschiedenen Eigenschaften bzw. Rechenfälle bei einem Schachtverschluss für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle sinngemäß der Absatz 2.4.1 (2) nach (DIN EN 1997-1): „Es sollte berücksichtigt werden, dass die Kenntnis der Baugrundverhältnisse vom Umfang und von der Güte der Baugrunduntersuchungen abhängt. Deren Kenntnis und die Überwachung der Bauarbeiten sind im Allgemeinen wichtiger für die Einhaltung der grundsätzlichen Anforderungen als die Genauigkeit der Rechenmodelle und Teilsicherheitsbeiwerte.“

## **2.4 Beispiel für die Anwendung des Nachweiskonzeptes an Elementen eines Schachtverschlusses**

Zur Verdeutlichung der bisherigen Ausführungen soll am Beispiel eines Schachtverschlusses die Nachweisführung mit Hilfe der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte erläutert werden. Als Beispiel soll das im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (kurz VSG) konzipierte und anschließend auf seine Sicherheitsfunktion und Zuverlässigkeit

überprüfte Verschlusskonzept mit dem Stand der Vorbemessung dienen. Der im Rahmen der VSG beschriebene Schachtverschluss wird zunächst in Aufbau und vorgesehenen Materialien beschrieben. Danach werden repräsentativ ein Dichtelement und ein Widerlager ausgewählt, an denen die Nachweisführung verdeutlicht werden soll.

Die beispielhafte Nachweisführung soll ausgewählte Einzelnachweise des Referenzszenarios in vereinfachter Darstellung beinhalten und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Vereinfachungen dienen der Übersichtlichkeit und sollen ein Verständnis der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte sowie des generellen Vorgehens ermöglichen. Zu diesem Zweck bildet der Funktionsentwurf der Vorbemessung die Grundlage für den nachfolgenden, vereinfachten Nachweis. Für eine detailliertere und vollständige Darstellung des im Rahmen der VSG erarbeiteten Verschlusskonzeptes und der entsprechenden Nachweisführung sei auf (Müller-Hoeppe et al., 2013a) und (Müller-Hoeppe et al., 2013b) verwiesen.

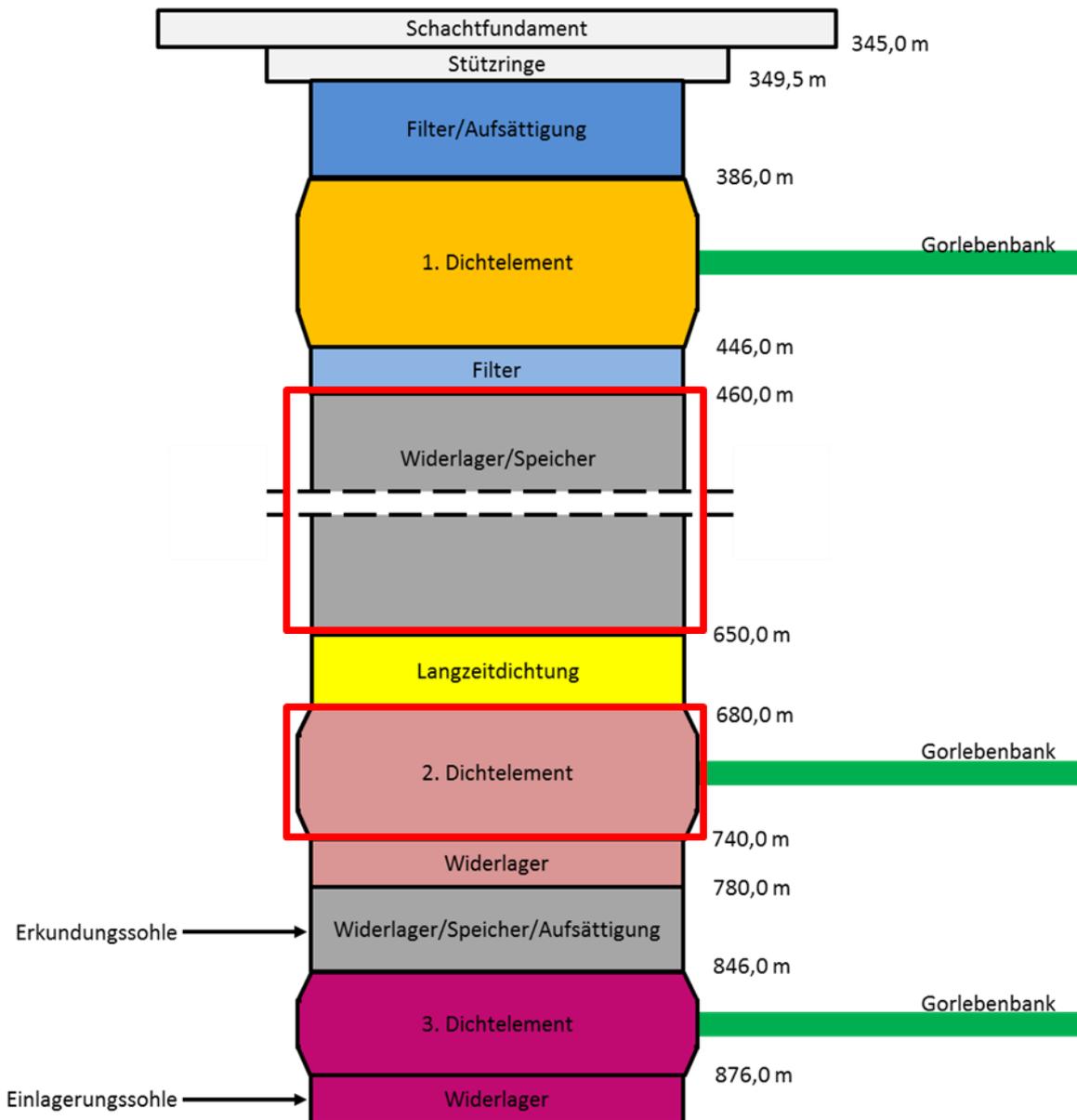
#### 2.4.1 Schachtverschlusskonzept gemäß VSG

Mit dem Erkundungsbergwerk Gorleben soll der gleichnamige Salzstock auf seine Eignung als Endlagerstandort untersucht werden. Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben wurde für den bereits existierenden Schacht Gorleben 1 ein geeignetes Verschlusskonzept erstellt und eine entsprechende Nachweisführung für dessen Zuverlässigkeit sowie Funktionsfähigkeit erarbeitet. Da der Schacht Gorleben 2 der Doppelschachanlage dem Schacht Gorleben 1 im geologischen Umfeld sowie Teufe und Konstruktion ähnelt, wurde unterstellt, dass in beiden Schächten grundsätzlich dasselbe Verschlusskonzept angewendet werden kann. Die Konstruktion der Schächte und der geplanten Verschlusssysteme unterscheiden sich in der Lage der einzelnen Komponenten bedingt durch die genaue Ausprägung der Geologie am jeweiligen Standort.

Die beiden Schächte sind im Bereich des Deckgebirges, mit einer äußeren, gebirgsverbundenen Ausbauschaale und einem Innenausbau, getrennt durch eine hydrostatische Asphalt-dichtung, versehen. Der Außenausbau erstreckt sich bis zu einer Teufe von 260 m und ist darunter durch ein Aufstandsfundament gestützt. Der Innenausbau reicht bis zu einer Teufe von 340 m und wird ebenfalls von einem Innenausbaufundament gestützt (bis 345 m Teufe). Der Innenausbau und das dazugehörige Fundament sind durch eine gleitfähige Teflonschicht voneinander getrennt. Unterhalb des Fundamentes schließt sich bis 349,5 m Teufe ein Stützring aus Stahlringen an (Müller-Hoeppe et al., 2012c).

Im Funktionsentwurf der Vorbemessung schließt der Schachtverschluss im Schacht unterhalb der Stützringe des wasserdichten Ausbaus an. Unterhalb der Stützringe beträgt der Schachtdurchmesser 7,63 m. Im Bereich des Schachtausbaus beträgt der Durchmesser 7,53 m. Der obere Schachtbereich des wasserdichten Ausbaus wird mit geeigneten Materialien verfüllt.

Der eigentliche Schachtverschluss setzt sich aus drei Dichtelementen unterschiedlicher Materialien sowie verschiedenen Widerlagern und weiteren Komponenten zusammen. Abbildung 2-4 stellt den Aufbau des Schachtverschlusses schematisch dar, wie er im ersten Entwurf vorliegt.



**Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Schachtverschlusses gemäß VSG (1. Entwurf); die in der beispielhaften Nachweisführung betrachteten Elemente sind rot umrandet (Müller-Hoeppe et al., 2013a)**

Den oberen Abschluss des Schachtverschlusses bildet zwischen dem unteren Teil der Stützringe und 386 m Teufe eine Filterschicht aus Basaltsplitt oder ggf. auch Kies und Sand. Eine ähnliche Filterschicht schließt sich auch unterhalb des 1. Dichtelementes bis 460 m Teufe an. Beide, die Bentonitdichtung umgebenden Filterschichten dienen zu Gewährleistung der

Filterstabilität der Dichtung. Das insgesamt 60 m mächtige erste Dichtelement aus Bentonit liegt zwischen 386 und 446 m Teufe. Wie auch die beiden anderen Dichtelemente schließt dieses den Bereich der Gorlebenbank ein. Die Gorlebenbank ist ein enggeschichtetes Anhydritmittel im Steinsalz. Sie wurde entsprechend der Halokinese gefalten und ist im Revenzschacht mehrmals angefahren. Da die Gorlebenbank als möglicher Fluidpfad zum Entwurfszeitpunkt nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte und in ihr Fluideinschlüsse angetroffen wurden, wird sie durch die Dichtelemente mit verschlossen und hat somit keine direkte Anbindung an die Speicherelemente. Zur Berücksichtigung der Gorleben-Bank wird die wirksame Länge des Dichtelementes bei der Bemessung um 10 m verringert. Zur Entfernung der stark aufgelockerten Teile der Auflockerungszone soll die Kontur am Standort des Dichtelementes um etwa 0,5 m nachgeschnitten werden (Müller-Hoeppe et al., 2012b). Die tatsächliche Nachschnitttiefe wird unter Berücksichtigung geotechnischer Messergebnisse festgelegt.

Unter der zweiten Filterschicht, bis zu einer Teufe von 650 m, gewährleistet ein Widerlager aus Hartgesteinsschotter die Lagestabilität des Teilsystems, bestehend aus Bentonitdichtung und Filterschichten (Müller-Hoeppe et al., 2013a).

Als Langzeitdichtelement ist im Verschluss, zwischen 650 und 680 m Teufe, ein Bereich mit angefeuchtetem und technisch verdichtetem Salzgrus vorgesehen. Der entsprechend des umliegenden Salzgesteins arteigene Salzgrus wird während des Einbaus technisch verdichtet. Zur besseren Verdichtbarkeit ist es notwendig, den Salzgrus anzufeuchten. Langfristig führt die Kompaktion der Langzeitdichtung in Verbindung mit der Konvergenz des umliegenden Gebirges zur Verheilung des durch den Schacht gestörten Gebirgsbereiches. Damit werden mögliche Zutritte von Lösungen zu den Abfällen und potenzielle Austritte von Lösungen aus dem verschlossenen Endlager heraus verhindert.

Unter der Langzeitdichtung liegt das 2. Dichtelement. Dieses Dichtelement soll aus Salzbeton errichtet werden. Es ist insgesamt 60 m mächtig und erstreckt sich bis zu einer Teufe von 740 m. Am Dichtungsstandort wird die Kontur um 0,6 m nachgeschnitten. Unterhalb des Dichtelementes bis 780 m Teufe schließt ein 40 m mächtiges Widerlager aus Salzbeton an. Beide Teilsysteme werden aus demselben Baustoff erstellt. Die Kontur wird im Widerlagerbereich nicht nachgeschnitten. Der untere Widerlagerbereich dient der Gewährleistung der Lagestabilität des Dichtelementes. Für beide Komponenten sind unterschiedliche Nachweise maßgeblich. Während am Dichtelement ein ausreichender hydraulischer Widerstand entscheidend ist, muss für das Widerlager vor allem der Nachweis der mechanischen Tragfähigkeit erbracht werden, der den Nachweis der Verformungsbeschränkung abdeckt. (Müller-Hoeppe et al., 2013a).

Zwischen 780 und 846 m Teufe liegt ein weiteres Widerlager aus Hartgesteinsschotter. Die an die Schächte angeschlossenen Grubenteile des Infrastrukturbereiches sind entsprechend des Verschlusskonzeptes ebenfalls mit Hartgesteinsschotter verfüllt. In den schachtnahen Teilen des Infrastrukturbereiches wird ein zusätzliches Depot aus technischen Bischoffit eingebracht. Dies soll mögliche von oben anstehende Salzlösungen soweit zu  $MgCl_2$ -reichen

Lösungen aufsättigen, dass Lösungerscheinungen am nachfolgenden Sorelbetondichte-  
lement vermieden werden.

Die an den Schacht angeschlossenen Grubenteile des Infrastrukturbereiches der Erkun-  
dungs- und Einlagerungssohle sind entsprechend des Verschlusskonzeptes mit Hartge-  
steinsschotter verfüllt. Zwischen den einzelnen Zugängen liegt das dritte Dichte-  
lement in 846 bis 876 m Teufe. Dieses wird aus Sorelbeton erstellt. Am Dichtungsstandort ist eine Nach-  
schnitttiefe von 0,8 m vorgesehen. Das mit der Schachtkontur kohäsiv verbundene Dich-  
telement aus Sorelbeton kann gleichzeitig eine Widerlagerfunktion ausüben. Die Füllortbe-  
reiche der Zugänge zur Einlagerungs- und Erkundungssohle werden ebenfalls mit Sorelbe-  
ton verfüllt und bilden ein weiteres Widerlager. Entsprechend dem 3. Dichte-  
lement wird auch der Schachtsumpf mit Sorelbeton verfüllt.

Zur Verdeutlichung des Nachweiskonzeptes sollen im Weiteren das obere Hartgesteins-  
schotterwiderlager in 460 bis 650 m Teufe und das 2. Dichte-  
lement in 680 bis 740 m Teufe  
näher betrachtet werden. Beide Elemente sind in Abbildung 2-4 hervorgehoben (rote Um-  
rahmung).

#### **2.4.2 Nachweis der Verformungssicherheit am Beispiel des Hartgesteinsschotter- widerlagers 460 bis 650 m**

Die Hauptfunktion des Hartgesteinsschotterwiderlagers unterhalb des ersten Dichte-  
lementes ist im Wesentlichen durch die Gewährleistung der Lagestabilität des Dichte-  
lementes und der eigenen Langzeitstabilität gekennzeichnet. Die Lagestabilität der Dichtung wird durch eine weit-  
gehende Setzungsstabilität des Hartgesteinsschotterwiderlagers ermöglicht. Mögliche Bemes-  
sungssituationen für das Hartgesteinsschotterwiderlager sind die Errichtungsphase, die instationäre  
Phase der Aufsättigung, die stationäre Phase in der die Schotterwiderlager auf-  
gesättigt ist und der Sonderfall eines Erdbebens. Im Weiteren soll exemplarisch der Nach-  
weis erbracht werden, dass das Widerlager während der instationären Phase der Aufsätti-  
gung setzungsstabil ist.

##### **2.4.2.1 Anforderungen**

Zur Beschreibung des Grenzzustandes muss gemäß Gleichung (2-1) gelten, dass das Wi-  
derlager den herrschenden Einwirkungen einen hinreichend großen Widerstand entgegen  
setzt, um den maximal zulässigen Setzungsbetrag nicht zu überschreiten. Mit der Einhaltung  
des zulässigen Setzungsbetrages wird eine Auflockerung des Bentonitdichte-  
lementes be-  
grenzt und die geforderten Kennwerte der hydraulischen Leitfähigkeit und des Quelldruckes  
bleiben in diesem erhalten. Nach (Wagner, 2005) ergibt sich der zulässige Setzungsbetrag  
( $\Delta l_{zul}$ ) aus:

$$\Delta l_{zul} = L * \left( \frac{\rho_{tr}}{\rho_{krit}} - 1 \right) \quad (2-7)$$

Mit

- L      wirksame Länge des Dichtelementes  
 $\rho_{tr}$     Einbautrockendichte  
 $\rho_{krit}$    kritische Einbautrockendichte

Für das betroffene Bentonitdichtelement dürfen die Setzungen einen Betrag von 3% der Dichtungslänge nicht überschreiten. Im Rahmen dieser zulässigen Setzungen bleibt die Dichte des Bentonits ausreichend hoch, um den geforderten Quelldruck und die hydraulische Leitfähigkeit zu erhalten (Wagner, 2005). Mögliche Setzungen treten im Hartgesteinsschotterwiderlager und der unteren Filterschicht auf. Das Widerlager ist somit als geschichtet anzusehen.

Die wirksame Gesamtlänge des Bentonitdichtelementes ist mit 50 m ausgewiesen (60 m Gesamtlänge, abzüglich des eingeschlossenen Bereiches der Gorlebenbank). Somit belaufen sich die maximal zulässigen Setzungen in der Schottersäule auf  $\Delta l_{zul} \leq 1,5$  m.

#### 2.4.2.2 Einwirkungen auf das Widerlager

Die resultierenden Setzungen lassen sich nach (Müller-Hoeppel & Eberth, 2009) gemäß der Silotheorie wie folgt beschreiben:

$$\Delta l = \frac{p_0 * (1 - 2 * \lambda * \nu)}{E} * \frac{A}{\lambda * U * \mu} * \left[ 1 - e^{\frac{-L * \lambda * U * \mu}{A}} \right] \quad (2-8)$$

Mit

- $\Delta l$     Setzung  
 $p_0$     Auflast  
 $\lambda$     Horizontallastverhältnis  
 $\nu$     Querdehnzahl  
E      Elastizitätsmodul  
U      Umfang  
A      Querschnitt  
L      Länge der Schottersäule

Die Einwirkungen auf das Widerlager sind durch die Auflast  $p_0$  gekennzeichnet. Diese setzt sich wie folgt zusammen:

- Belastung aus der darüber liegenden Verfüllsäule
- Belastung aus der Auflast des Dichtelementes

- Belastung aus der Auflast der Filterschichten

#### Belastung aus der darüber liegenden Verfüllsäule

Wie im Abschnitt 2.4.1 erläutert wurde, schließt die Konstruktion des Schachtverschlusses an den Schachtausbau an. Der mit einem wasserdichten Ausbau versehene Schachtteil zwischen Geländeoberkante und Schachtverschluss wird nach der Errichtung des Verschlussbauwerkes verfüllt. Über den nichtgebirgsverbundenen Innenausbau werden keine Lasten in das umliegende Gebirge abgeleitet, sodass die gesamte Last der Verfüllsäule auf das Hartgesteinswiderlager wirkt. Die Verfüllung besteht aus Sanden und Kiesen sowie Mineralgemischen. Die Dichte der Schachtverfüllung im Bereich des Deckgebirges wird bis zur Tagesoberfläche einheitlich mit  $2240 \text{ kg/m}^3$  angesetzt. Der Überlagerungsdruck aus der oberen Verfüllsäule ermittelt sich aus:

$$p_V = \rho_V * g * h = 2240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 349,5 \text{ m} = 7,68 \text{ MPa} \quad (2-9)$$

Aus der oberen Verfüllsäule resultiert somit eine Auflast von  $\sigma_{ZV} = 7,68 \text{ MPa}$  auf das Hartgesteinswiderlager. Die Baustoffe der Verfüllsäule werden in dichtester Lagerung eingebaut und die Geometrie der Verfüllsäule ist durch den Ausbau und die Teufe festgelegt. Durch die Eingrenzung der Parameter ist eine weitere Erhöhung der aus der oberen Verfüllsäule resultierenden Belastung nicht plausibel bzw. physikalisch nicht möglich. Gemäß (DIN EN 1997-1) ist somit für die ständige Einwirkung ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{F,1} = 1,0$  ausreichend.

#### Eigenlast des Dichtelementes

Die konservative Annahme, dass Dichtelement und Filterschicht keine lastabtragende Funktion erfüllen, bewirkt, dass deren gesamte Eigenlast auf das Widerlager wirkt. Für das Bentonitdichtelement wird eine Dichte von  $1750 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Dies stellt die obere Grenze der technisch herstellbaren Einbaudichte dar. Da eine weitere Verdichtung des Bentonits physikalisch nicht plausibel ist, kann für die Auflast des Dichtelementes als ständige und günstige Einwirkung ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{F,2} = 1,0$  genutzt werden. Das Dichtelement hat eine Gesamtmächtigkeit von 60 m. Die Auflast, resultierend aus dem Bentonitdichtelement beträgt:

$$p_B = \rho_B * g * h = 1750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 60 \text{ m} = 1,03 \text{ MPa} \quad (2-10)$$

Eigenlast der Filterschichten

Die beiden Filterschichten, bestehend aus Sanden, Kiesen und Splitt weisen eine Einbaudichte  $\rho_F = 1900 \text{ kg/m}^3$  auf. Die obere Filterschicht ist 36,5 m mächtig und die untere 14 m. Aus beiden Schichten resultiert in Summe eine Auflast von:

$$p_F = \rho_F * g * h = 1900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (36,5 \text{ m} + 14 \text{ m}) = 0,94 \text{ MPa} \quad (2-11)$$

Die technisch mögliche bzw. physikalische Obergrenze der Einbaudichte der Filterschichten kann an dieser Stelle nicht angegeben werden. Zur Berücksichtigung der möglichen Variation der Einbaudichte wird deren Einwirkung mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{F,3} = 1,35$  versehen (DIN EN 1997-1).

Gesamteinwirkungen

Die dem Widerlager entgegenstehenden Einwirkungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

**Tabelle 2-1: Übersicht der Einwirkungen**

Einwirkung	Betrag [MPa]	Teilsicherheitsbeiwert
Obere Verfüllsäule	7,68	1,0
Bentonitdichtung	1,03	1,0
Obere Filterschicht	0,68	1,35
Untere Filterschicht	0,26	1,35

Die Gesamteinwirkung bzw. die gesamte Auflast auf das Widerlager errechnen sich aus:

$$E_D = \sum_{i=1}^4 (E_i * \gamma_i) = \sigma_z * \gamma_{F,1} + p_B * \gamma_{F,2} + p_F * \gamma_{F,3} = 9,98 \text{ MPa} \quad (2-12)$$

Für den durchzuführenden Nachweis der Verformungsstabilität ist ein möglicher Lösungsdruck und daraus resultierender Auftrieb nicht zu berücksichtigen. Die auf die untere Filterschicht wirkende Auflast beträgt 9,1 MPa, resultierend aus der Summe der Auflasten der oberen Verfüllsäule, der oberen Filterschicht und der Bentonitdichtung.

**2.4.2.3 Widerstände**

Die den Einwirkungen entgegenstehenden Widerstände des Hartgesteinswiderlagers resultieren aus den Eigenschaften des verwendeten Baumaterials und der Geometrie des Widerlagers. Für die Bemessung von Silos existiert ein hoher Wissensstand. Die für die Bemessung wesentlichen Schüttgutkenngößen können mit Hilfe (DIN EN 1991-4) ermittelt werden.

Widerstände in der unteren Filterschicht

Der Anhang E aus (DIN EN 1991-4) beinhaltet charakteristische Werte der Kenngrößen für verschiedene Schüttgüter. Die jeweiligen Mittelwerte des Wandreibungskoeffizienten ( $\mu$ ) und des Horizontalspannungsverhältnisses ( $\lambda$ ) werden durch Umrechnungsfaktoren ( $a_\mu$ ,  $a_\lambda$ ) angepasst. Für beide Kenngrößen wird der untere Grenzwert verwendet, somit müssen die Mittelwerte durch die Umrechnungsfaktoren geteilt werden. Für die Filterschicht wird als Referenzmaterial der in (DIN EN 1991-4) enthaltenen Schüttgüter Betonkies gewählt. Die Kontur am Widerlagerstandort wird der Wandoberfläche Typ D3 zugeordnet. Die resultierenden Bemessungswerte sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

**Tabelle 2-2: Ermittlung der Schüttgutkennwerte gemäß (DIN EN 1991-4)**

Kenngröße	Mittelwert	Anpassungsfaktor	Bemessungswert
Wandreibungskoeffizient $\mu$ [-]	0,59	1,12	0,53
Horizontalspannungsverhältnis $\lambda$ [-]	0,52	1,15	0,45

Die Berücksichtigung eines weiteren Teilsicherheitsbeiwertes ist für beide Kennwerte nicht notwendig.

Nach (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009) wird ein Elastizitätsmodul  $E = 150$  MPa und eine Querdehnzahl  $\nu = 0,33$  berücksichtigt. Die Länge der Filterschicht ist  $L = 14$  m. Die zusätzliche Berücksichtigung einer Abweichung der geometrischen Größe gemäß Gleichung 5 ist nicht notwendig. Die Einhaltung der Schütthöhe wird während der Bauausführung überwacht und es liegt keine hinreichende Sensitivität der Filterschicht bei einer Veränderung der Schütthöhe vor.

Widerstände in der Schottersäule

Für die Schottersäule ist die Bestimmung der benötigten Kennwerte ebenfalls mit Hilfe der (DIN EN 1991-4) möglich.

Für den Schotter wird ein Elastizitätsmodul  $E = 200$  MPa und eine Querdehnzahl  $\nu = 0,32$  berücksichtigt. Die Länge der Schottersäule ist  $L = 190$  m. Das Horizontalspannungsverhältnis  $\lambda$  wird mit 0,41 berücksichtigt und der Wandreibungskoeffizient  $\mu$  mit 1,04. Den Kennwerten liegen Erfahrungswerte aus vorangegangenen Projekten zugrunde (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009), (Teichmann et al., 2002).

Die zusätzliche Berücksichtigung einer Abweichung der geometrischen Größe gemäß Gleichung 2-5 ist nicht notwendig. Die Einhaltung der Schütthöhe wird während der Bauausführung überwacht und es liegt keine hinreichende Sensitivität der Schottersäule bei einer Veränderung der Schütthöhe vor.

Die geometrische Größe Schachtdurchmesser im ausbaulosen Schachtteil ist  $d = 7,63$  m. Schachturnfang und -querschnitt können durch Beraubearbeiten geringfügig variieren. Da von den geringfügigen Schwankungen der Schachtgeometrie keine zusätzlichen Gefährdun-

gen ausgehen kann für Schachttumfang und -querschnitt jeweils der Nennwert ohne Berücksichtigung einer Abweichung verwendet werden. Es ergibt sich:

- Schachttumfang  $U_d = U_{\text{Nenn}} = 23,9 \text{ m}$
- Schachtquerschnitt  $A_d = A_{\text{Nenn}} = 45,7 \text{ m}^2$

#### 2.4.2.4 Ergebnis und Beurteilung

Aus den ermittelten Parametern und der Gleichung (2-8) errechnet sich für die untere Filterschicht eine Setzung von:

$$\begin{aligned} \Delta l_1 &= \frac{p_0 * (1 - 2 * \lambda * v)}{E} * \frac{A}{\lambda * U * \mu} * \left[ 1 - e^{-\frac{L * \lambda * U * \mu}{A}} \right] & (2-13) \\ &= \frac{9,1 \text{ MPa} * (1 - 2 * 0,45 * 0,33)}{150 \text{ MPa}} * \frac{45,7 \text{ m}^2}{0,45 * 23,9 \text{ m} * 0,53} \\ &\quad * \left[ 1 - e^{-\frac{-14 \text{ m} * 0,45 * 23,9 \text{ m} * 0,53}{45,7 \text{ m}^2}} \right] \\ &= 0,28 \text{ m} \end{aligned}$$

Für die Schottersäule ergibt sich aus Gleichung (2-8) eine Setzung von:

$$\begin{aligned} \Delta l_2 &= \frac{p_0 * (1 - 2 * \lambda * v)}{E} * \frac{A}{\lambda * U * \mu} * \left[ 1 - e^{-\frac{L * \lambda * U * \mu}{A}} \right] & (2-14) \\ &= \frac{9,98 \text{ MPa} * (1 - 2 * 0,41 * 0,32)}{200 \text{ MPa}} * \frac{45,7 \text{ m}^2}{0,41 * 23,9 \text{ m} * 1,04} \\ &\quad * \left[ 1 - e^{-\frac{-190 \text{ m} * 0,41 * 23,9 \text{ m} * 1,04}{45,7 \text{ m}^2}} \right] \\ &= 0,17 \text{ m} \end{aligned}$$

Die insgesamt zu erwartenden Setzungen ergeben sich aus der Addition der zu erwartenden Setzungen in der unteren Filterschicht und dem Hartgesteinwiderlager. In Summe liegen die Setzungen mit  $\Delta l_{\text{ges}} = \Delta l_1 + \Delta l_2 = 0,45 \text{ m}$  unter den zulässigen Setzungen von  $\Delta l_{\text{zul}} \leq 1,5 \text{ m}$  (resultierend aus 3% Setzungen der wirksamen Dichtungslänge). Die einfache Addition der Setzungen beider Teilelemente ist eine konservative Annahme. Tatsächlich ist zu erwarten, dass die Spannungen innerhalb der Filterschicht bereits zum Großteil an die Schachtwandung abgetragen werden. Auf die Schottersäule wirkt nur noch eine verminderte Auflast, die

nur geringe Setzungen verursacht. Mit der getroffenen konservativen Annahme kann die Verformungsstabilität des Widerlagers nachgewiesen werden (Müller-Hoeppe et al., 2013a).

### 2.4.3 Nachweiskonzept am Beispiel des Salzbetondichteelementes

Das 2. Dichtelement in 685 bis 755 m Teufe soll aus Salzbeton gemäß der Rezeptur Typ „Asse“ errichtet werden. Diese Referenzrezeptur wurde bereits bei der Errichtung des Asse-Vordammes erprobt. Das Material besteht aus 18 Ma.-% Hochofenzement, 72 Ma.-% Steinsalzgrus und 10 Ma.-% NaCl-Lösung (Müller-Hoeppe 2012b).

Am Dichtungsstandort wird die Kontur um 0,6 m nachgeschnitten, so dass der endgültige Durchmesser am Standort 8,83 m beträgt. Da das Dichtelement den Bereich der Gorlebenbank einschließt, wird nicht die Gesamtlänge von 60 m, sondern nur eine Dichtungslänge von 50 m als wirksame Länge angenommen (Müller-Hoeppe et al., 2013a).

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Dichtwirkung und Funktionsdauer des Schachtverschlusses und der einzelnen Komponenten resultieren im Fall eines Endlagers im Salinar aus den Kompaktionseigenschaften des Salzgrusversatzes im Endlager. Das arteigene Versatzmaterial erreicht durch die Konvergenz des Gebirges und die Kriecheigenschaften des Salzes langfristig die Permeabilität des Gebirges und führt zu einer Verheilung der für das Endlager aufgefahrenen Strecken im Gebirge. Die Funktionsdauer des Schachtverschlusses, in der die Dichtwirkung erhalten sein muss, begrenzt sich somit strenggenommen auf die Kompaktionsphase des Salzgruses. Den langfristig sicheren Einschluss übernehmen Gebirge und kompakter Versatz nach dessen postulierter Verheilung.

Für Steinsalz kann dieser Mindestfunktionszeitraum nach gegenwärtigem Wissensstand auf ca. 1.000 Jahre geschätzt werden (Müller-Hoeppe et al., 2013b). Für einen vergleichbaren Schachtverschluss im Tongestein steht diese Beurteilung noch aus.

Der Nachweis der Dichtheit gilt als erbracht, wenn die integrale Permeabilität am Dichtungsstandort hinreichend gering ist und wenn die Verzögerung möglicher Lösungsdurchflüsse durch das Dichtelement hinreichend groß ist.

#### 2.4.3.1 Permeabilitätsabschätzungen

Der Nachweis der Dichtheit muss für die integrale Permeabilität am Dichtungsstandort erbracht werden. Für diesen Nachweis sind die drei parallel zu einander wirkenden Teilsysteme Dichtelement, Kontaktzone und Auflockerungszone zu berücksichtigen. Für den Dichtungsstandort wird eine mittlere integrale Permeabilität von  $K_{\text{gef}} = 7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  angesetzt (Müller-Hoeppe et al., 2013a). Damit muss das Dichtelement unter den herrschenden Bedingungen mindestens diese mittlere Permeabilität aufweisen, um einen Lösungszutritt zum Endlagerbereich hinreichend lange zu verzögern. Die genannte Permeabilität stellt dabei die

in der Konstruktion vorhandene querschnittsgemittelte, integrale Permeabilität dar. Dieser ist während der Umsetzung auch bautechnisch nachzuweisen. Im Rahmen der Nachweisführung untersucht eine probabilistische Langzeitsicherheitsanalyse die möglichen Grenzzustände und Versagensfälle. Die tatsächliche/zu erwartende Verteilung der Permeabilität innerhalb des Dichtelementes wird im Rahmen dieser Analyse berücksichtigt. Die nachzuweisende integrale Permeabilität der Widerstandsseite setzt sich aus den auf die Fläche bezogenen Einzelpermeabilitäten der Komponenten zusammen. Formal bedeutet dies:

$$K_{int} = \frac{K_D * A_D + K_K * A_K + K_{ALZ} * A_{ALZ}}{A_D} \quad (2-15)$$

Entsprechend Gleichung 1 wird zur Einhaltung des Grenzkriteriums dieser Mittelwert der Permeabilität ( $K_{int}$ ) dem geforderten Grenzwert/Mindestwert ( $K_{gef} = 7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ ) gegenübergestellt. Auf eine Ausstattung der einzelnen Komponenten des Bemessungswiderstandes mit Teilsicherheitsbeiwerten wird an dieser Stelle verzichtet. Das Salzbetondichtelement ist Teil des Gesamtsystems Schachtverschluss zur Verzögerung potenzieller Zuflüsse. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Beurteilung des hydraulischen Gesamtsystems in einer anschließenden, probabilistischen Langzeitsicherheitsanalyse. In diese gehen die Verteilungsfunktionen direkt ein. Damit werden Modellunsicherheiten abgedeckt. Weiterhin beinhaltet diese Untersuchung auch Versagensfälle. Eine zusätzliche Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten für die einzelnen repräsentativen Werte der Kenngrößen findet nicht statt. Die in den Abschnitten 2.4.3.1.4 bis 2.4.3.1.7 aufgeführten repräsentativen Werte der Kenngrößen, speziell der Permeabilität, werden jeweils als Bemessungswert eingesetzt. Für die Permeabilität stellen die gewählten Werte Mittelwerte der vorhandenen Verteilung dar.

In Anlehnung an Abbildung 2-2 und (DIN EN 1990) sowie (DIN EN 1997-1) ist die Ermittlung des Bemessungswertes einer Eigenschaft neben empirisch/deterministische Methoden auch über statistische Verfahren möglich. Als vorsichtige Schätzung des Mittelwertes gilt das 95%-Konfidenzintervall bezogen auf den Mittelwert. Weiterhin kann abhängig vom Einzelfall der charakteristische Wert als 5%-Fraktile berechnet werden. Beides sind Möglichkeiten zur Bestimmung des Bemessungswertes des Widerstandes über den charakteristischen Wert. Zusätzlich ist auch die direkte Bestimmung des Bemessungswertes für Tragfähigkeitsnachweise möglich.

Im Folgenden werden die drei genannten Vorgehensweisen gemäß (DIN EN 1990), (DIN EN 1997-1) und (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009) vorgestellt. Danach erfolgt für Dichtelement, Kontaktbereich und ALZ beispielhaft die Bestimmung der mittleren Permeabilität mit Hilfe ausgewählter Messreihen.

### 2.4.3.1.1 Bestimmung des Bemessungswertes über den charakteristischen Wert

Die Bemessungswerte  $X_d$  einer Größe  $X$  sollten wie folgt festgelegt werden:

$$X_d = \frac{\eta_d * X_k}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} * m_x * [1 - k_n * V_x] \quad (2-16)$$

Mit

- $X_d$  Bemessungswert
- $X_k$  charakteristischer Wert
- $\eta_d$  Bemessungswert des Umrechnungsfaktors, mit dem Laborversuche auf in-situ-Verhältnisse skaliert werden, soweit die Umrechnung nicht in  $\gamma_m$  enthalten ist. Häufig gilt  $\eta_d = 1,0$ .
- $\gamma_m$  Teilsicherheitsbeiwert für Probeneigenschaften (Baustoffeigenschaften)
- $m_x$  Mittelwert der Eigenschaften von  $n$  Proben,  $m_x = \frac{1}{n} \sum(X_i)$
- $s_x = \sqrt{s_x^2}$  mit der Varianz  $s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum(X_i - m_x)^2$
- $s_x$  Standardabweichung
- $V_x$  Variationskoeffizient für  $X$ ,  $V_x = s_x/m_x$
- $k_n$  Tabellenwert aus Tabelle D.1 [EC] (siehe Tabelle 2-3)

**Tabelle 2-3: Werte  $k_n$  für charakteristische Werte (5%-Fraktile), entspricht Tabelle D.1 nach (DIN EN 1990)**

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_x$ bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$V_x$ unbekannt	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Die Vorgehensweise beruht auf folgenden Annahmen:

- die zugrunde liegende Verteilung ist die Normalverteilung
- es gibt keine Vorinformation über den Mittelwert
- bei dem Fall „ $V_x$  unbekannt“ gibt es keine Vorinformation über den Variationskoeffizienten
- bei dem Fall „ $V_x$  bekannt“ gibt es volle Vorinformation über den Variationskoeffizienten

### 2.4.3.1.2 Direkte Bestimmung des Bemessungswertes für Tragfähigkeitsnachweis

Der Bemessungswert  $X_d$  einer Größe  $X$  sollte wie folgt bestimmt werden, wobei der Wert  $\eta_d$  alle Unsicherheiten abdecken sollte, die durch die Versuche selbst nicht erfasst werden. Der Wert  $k_{d,n}$  sollte mit Tabelle Tabelle 2-4 bestimmt werden.

$$X_d = \eta_d * m_x * [1 - k_{d,n} * V_x] \quad (2-17)$$

Mit

- $X_d$  Bemessungswert
- $\eta_d$  Bemessungswert des Umrechnungsfaktors, mit dem Laborversuche auf in-situ-Verhältnisse skaliert werden. Häufig gilt  $\eta_d = 1,0$ .
- $m_x$  Mittelwert der Eigenschaften von  $n$  Proben ( $m_x = \frac{1}{n} \sum(X_i)$ )
- $k_{d,n}$  Tabellenwert aus Tabelle D.2 [EC] (siehe Tabelle 2.4-4)
- $V_x$  Variationskoeffizient für  $X$  ( $V_x = s_x/m_x$ )

**Tabelle 2-4: Werte  $k_{d,n}$  für den Bemessungswert für Tragfähigkeitsnachweise, entspricht Tabelle D.2 nach (DIN EN 1990)**

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_x$ bekannt	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
$V_x$ unbekannt	-	-	-	11,4	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit beträgt etwa 0,1%. Die Vorgehensweise beruht auf folgenden Annahmen:

- die zugrunde liegende Verteilung ist die Normalverteilung
- es gibt keine Vorinformation über den Mittelwert
- bei dem Fall „ $V_x$  unbekannt“ gibt es keine Vorinformation über den Variationskoeffizienten
- bei dem Fall „ $V_x$  bekannt“ gibt es volle Vorinformation über den Variationskoeffizienten

### 2.4.3.1.3 Bestimmung eines vorsichtig geschätzten Mittelwertes (95% Konfidenzintervall)

Wie bereits ausgeführt, lässt der für geotechnische Fragestellungen geltende Eurocode 7 (DIN EN 1997-1) die Verwendung von vorsichtig geschätzten Mittelwerten zu. Als vorsichtig geschätzter Mittelwert gilt das 95%-Konfidenzintervall bezogen auf den Mittelwert. Es wird wie folgt bestimmt (DIN EN 1990):

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} * \left[ m_x - k_n * s_n / \sqrt{n} \right] \quad (2-18)$$

Bei unbekanntem Variationskoeffizienten kann in diesem Fall die t-Verteilung nach Student für (n-1) Freiheitsgrade verwendet werden.

#### 2.4.3.1.4 Eigenschaften des Dichtelements

Der ursprüngliche Durchmesser im ausbaulosen Teilstück des Schachtes beträgt 7,63 m. Der konturnahe Bereich der Auflockerungszone wird am Dichtungsstandort um 0,6 m nachgeschnitten. Somit beträgt der Durchmesser des Salzbetondichteleses 8,83 m, was einer Querschnittsfläche des Dichteleses  $A_D = 61,24 \text{ m}^2$  entspricht. Die Berücksichtigung einer zusätzlichen Abweichung ist nicht nötig.

Die zu verwendende Salzbetonrezeptur Typ „Asse“ wird in (Müller-Hoeppe et al., 2012b) beschrieben. Der Salzbeton wurde in der Vergangenheit im Projekt Asse-Vordamm verwendet (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009). Mit Hilfe der vorliegenden Erfahrungen kann die Herstellbarkeit eines seigeren Dichteleses aus Salzbeton nachgewiesen werden. Aus Untersuchungen des Baukörpers sind Kenngrößen der Lösungs- und Gaspermeabilität des Salzbetons, der Kontaktfuge und auch der umgebenden Auflockerungszone bekannt. Für den Dichtungskörper selbst existieren nach (Müller-Hoeppe et al., 2012b) lediglich drei in situ ermittelte Messwerte für die Lösungspermeabilität. Sie liegt zwischen  $4 \cdot 10^{-20}$  und  $9 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ .

Für die Gaspermeabilität des Baustoffes liegt eine breite Datenbasis vor. In Tabelle 2-5 sind Messergebnisse der Gaspermeabilität für einen Baukörper aus Salzbeton zusammengefasst.

**Tabelle 2-5: Beispiel für gemessene Gaspermeabilitäten am Baukörper, Pulse-Tests bei 1,2 MPa Prüfdruck (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009)**

Sohlbohrungen	Firstbohrungen	Stoßbohrungen Süd	Stoßbohrungen Nord
$8 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$1,3 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	$4,4 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$	$8 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$
$3 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$3,5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	$1,5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$6 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$
$6 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$1,3 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	$7 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$
	$2 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$		

Mit Hilfe der statistischen Verfahren (siehe Abschnitt 2.4.3.1.1 bis 2.4.3.1.3) lassen sich aus den vorhandenen Messwerten charakteristische Werte für die Permeabilität ermitteln:

- Mittelwert (zum Vergleich)  $3 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
- 5%-Fraktile  $3 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
- 95%-Konfidenzintervall  $5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
- Direkt bestimmter Bemessungswert  $3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$

### 2.4.3.1.5 Eigenschaften der Kontaktzone

Die Kontaktzone zwischen Dichtelement und umgebenden Gebirge ist durch die Materialeigenschaften, die Einbaubedingungen und die Korngrößenverteilung des umliegenden Gebirges gekennzeichnet. Der feucht eingebaute Salzbeton wird während des Einbaus verdichtet, verteilt sich gleichmäßig im vorgesehenen Dichtungsbereich und haftet nach dem Abbinden am Gebirge. Am Dichtungsstandort steht das obere und untere Orangesalz des z3 an. In Anlehnung an (DAfStb 2004) wird die Ausdehnung der Kontaktzone mit  $2 \cdot D_{\max}$  angenommen. Da die genauen Eigenschaften des Gebirges am Dichtungsstandort nicht hinreichend bekannt sind, wird für die Kontaktfuge die in der Richtlinie ersatzweise angegebene Dicke von 30 mm genutzt. Die zusätzliche Berücksichtigung einer geometrischen Abweichung ist auf Grund der, im Vergleich zum Gesamtsystem, geringen Ausdehnung nicht nötig. Die als Kreisring ausgeprägte Kontaktfuge besitzt eine Fläche  $A_K = 0,84 \text{ m}^2$ .

Die Permeabilitätseigenschaften der Kontaktfuge werden beispielhaft vom Referenzobjekt Asse Vordamm abgeleitet. Im Kontaktbereich Salzbeton/Salzgestein wurden an Stößen und Sohle eine Permeabilität im Bereich  $K = 1 \cdot 10^{-23}$  bis  $7 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$  gemessen (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009), (Müller-Hoeppe, 2010), vergleiche auch Tabelle 2-6. Analog dem Vorgehen bei der Bestimmung des Bemessungswertes der Permeabilität im Salzbetonkörper kann auch die mittlere Permeabilität der Kontaktfuge bestimmt werden. Die Firste wird dabei nicht berücksichtigt.

**Tabelle 2-6: Beispiel für gemessene Gaspermeabilitäten an der Kontaktfuge Salzbeton/Steinsalz, Pulse-Tests bei 1,2 MPa Prüfdruck (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009)**

Sohlbohrungen	Firstbohrungen	Stoßbohrungen Süd	Stoßbohrungen Nord
$1 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$	$1,4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$	$7 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$4 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
$1 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$	$2,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$	$2,5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$6 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
	$6,5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$		
	$3,3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$		

Die deutlich erhöhten Permeabilitätswerte im Firstbereich des Dichtelementes begründen sich aus der Bauausführung und sind für ein seigeres Dichtelement nicht relevant. Sie werden im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt. Gleichwohl ist darauf hinzuweisen, dass eine Permeabilität im Bereich des geforderten Mittelwertes durchaus realisierbar ist. Dies verdeutlicht der Einzelwert  $6,5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ . Aus den Messdaten der Sohl- und Stoßbohrungen ergeben sich nach den drei genannten statistischen Methoden folgende charakteristische Werte bzw. Bemessungswerte:

- Mittelwert (zum Vergleich)  $1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
- 5%-Fraktile  $4 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
- 95%-Konfidenzintervall  $7 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
- Direkt bestimmter Bemessungswert  $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$

#### 2.4.3.1.6 Eigenschaften der Auflockerungszone

Im konturnahen Gebirgsbereich bildet sich während der Offenstandszeit des Schachtes eine Auflockerungszone (ALZ) aus. Die Ausprägung der ALZ ist vom vorherrschenden Spannungs- und Verformungszustand, der Hohlraumgeometrie und -größe, der Offenstandszeit, der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins und thermischen Einflüssen, beeinflusst beispielsweise vom Wetterzug, am jeweiligen Standort abhängig (Hunsche et al., 2003).

Gemäß den Berechnungen in Kapitel 3.2 erstreckt sich die auffahrungsbedingte plastische Zone der ALZ am geplanten Standort des 2. Dichtelementes bis 0,66 m von der Schachtkontur in das Gebirge. Die saisonal bzw. thermisch bedingten Veränderungen (siehe Kapitel 3.2.1.4) werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da sie durch technische Maßnahmen beherrschbar sind.

Nach dem geplanten Nachschnitt mit einer Tiefe von 0,6 m (Müller-Hoeppe et al., 2013a) verbleibt somit eine Auflockerungszone von 0,06 m. Dies unterliegt zusätzlich der Annahme, dass der Nachschnitt möglichst gebirgsschonend, der Einbau des Dichtelementes zeitnah erfolgt und somit eine erneute Auflockerung des konturnahen Gebirgsbereiches möglichst klein gehalten wird. Diese neuentstehende Auflockerung sollte vor dem Einbau abgeschätzt werden und in die Permeabilitätsberechnungen einfließen. Im vorliegenden beispielhaften Nachweis wird darauf verzichtet. Von der neuen Nachschnittkontur ( $r_N = 4,415$  m) reicht die verbleibende, ideal kreisrund angenommene ALZ weitere 0,06 m ins Gebirge. Unter Berücksichtigung der Kontaktzone verbleibt eine Auflockerungszone  $A_{ALZ} = 0,84$  m<sup>2</sup>.

Ergänzend zur eigentlichen Tiefe der ALZ muss auch die Permeabilität des aufgelockerten Bereiches ermittelt werden. Da diese, wie bereits erwähnt, von einer Vielzahl unterschiedlicher und standortspezifischer Faktoren abhängt, ist eine Ermittlung durch in-situ-Messungen zwingend notwendig. So führen beispielsweise Inhomogenitäten im Gebirge zu einer Abweichung der Ausdehnung der ALZ von der angenommenen idealen Kreisform um die Kontur. Charakteristischerweise weist der konturnahe Bereich die höchste Permeabilität auf. Mit größer werdendem Abstand zur Kontur nähert sich die Permeabilität immer mehr der ursprünglichen Gebirgspermeabilität an (Hunsche et al., 2003).

Aus diesen Gründen heraus ist es nach (Wagner, 2005) zielführend, eine Grenzpermeabilität festzulegen, womit durchlässige von technisch dichten Bereichen unterschieden und die genaue Ausprägung der ALZ festgelegt werden kann. In (Wagner, 2005) wird diese Grenzpermeabilität für das betrachtete Steinsalz mit  $K_{\min} = 10^{-19}$  m<sup>2</sup> festgelegt. Wobei dieser Wert nicht zwangsläufig als allgemeingültig angesehen werden muss. Vielmehr empfiehlt sich unter Berücksichtigung der die Durchlässigkeit beeinflussenden Parameter einen standortspezifischen Grenzwert zu definieren. Die effektive bzw. integrale Permeabilität innerhalb der ALZ kann über eine Extrapolation vorhandener Messreihen ermittelt werden. Aus den als Beispiel genutzten Messreihen zur Permeabilität können auch für die Auflockerungszone Schätzungen des Mittelwertes abgeleitet werden, siehe Tabelle 2-7.

**Tabelle 2-7: Beispiel für gemessene Gaspermeabilitäten in der ALZ, Pulse-Tests bei 1,2 MPa Prüfdruck (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009)**

Sohlbohrungen	Firstbohrungen	Stoßbohrungen Süd	Stoßbohrungen Nord
$3 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$	$1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$8 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$
$1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$	$2 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$	$24,6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	$1,2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
	$6,5 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$		
	$5,2 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$		
	$2,5 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$		

Aus den Messdaten der Sohl- und Stoßbohrungen ergeben sich nach den drei genannten statistischen Methoden folgende charakteristischen Werte bzw. Bemessungswerte:

- Mittelwert (zum Vergleich)  $2 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
- 5%-Fraktile  $2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$
- 95%-Konfidenzintervall  $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
- Direkt bestimmter Bemessungswert  $8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$

Mit zunehmender Standzeit führt das Kriechverhalten des umgebenden Salzgesteins zu einem Verheilen der verbleibenden Auflockerungszone. Die Permeabilität der ALZ verändert sich und erreicht langfristig wieder das Niveau des intakten Gebirges. Dieser, die Dichtwirkung des Salzbetonelementes positiv beeinflussende Effekt wird im vorliegenden, vereinfachten Nachweis nicht berücksichtigt. Als konservative Annahme wird nur die erhöhte Durchlässigkeit zu Beginn der Lebensdauer des Dichtelementes betrachtet.

#### 2.4.3.1.7 Ermittlung der integralen Permeabilität

Die in den vorangegangenen Abschnitten hergeleiteten Kennwerte werden zur Ermittlung der integralen Permeabilität in Gleichung 2-15 eingesetzt. Tabelle 2-8 fasst alle relevanten Größen noch einmal zusammen.

**Tabelle 2-8: Zusammenfassung der für die Berechnung der mittleren, integralen Permeabilität relevanten Bemessungswerte**

Element	Fläche $A_i$ [m <sup>2</sup> ]	$X_k$ als 5%-Fraktile [m <sup>2</sup> ]	$X_k$ als 95%-Konfidenzintervall [m <sup>2</sup> ]	$X_d$ als direkt bestimmter Bemessungswert [m <sup>2</sup> ]
Baukörper	61,24	$3 \cdot 10^{-22}$	$5 \cdot 10^{-23}$	$3 \cdot 10^{-21}$
Kontaktzone	0,84	$4 \cdot 10^{-22}$	$7 \cdot 10^{-23}$	$1 \cdot 10^{-20}$
ALZ	0,84	$2 \cdot 10^{-21}$	$1 \cdot 10^{-22}$	$8 \cdot 10^{-20}$

Daraus folgen für die drei genutzten Berechnungsverfahren jeweils eine querschnittsgemittelte, integrale Permeabilität  $K_{int}$  von:

- 5%-Fraktile  $3,3 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$
- 95%-Konfidenzintervall  $5,2 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$
- Direkt bestimmter Bemessungswert  $4,2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$

Der Vergleich mit dem gewählten Grenzkriterium der Durchlässigkeit  $K_{\text{gef}} \leq 7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  zeigt, dass die am Dichtungsstandort zu erwartende integrale Permeabilität, unter den hier getroffenen Annahmen ausreichend, kleiner als das angestrebte Grenzkriterium ist. Damit ist der Nachweis erbracht, dass unter den getroffenen Annahmen und bei entsprechender Umsetzung eine ausreichend kleine integrale Permeabilität erzeugt werden kann.

Für den Dichtheitsnachweis entscheidend ist letztlich allerdings nicht die integrale Permeabilität allein, sondern der aus dieser und den weiteren Eigenschaften des Dichtelementes resultierende, den Einwirkungen entgegenwirkenden Widerstand bzw. die Verzögerungswirkung des Dichtelementes.

### 2.4.3.2 Durchflusszeit

Der Abschnitt 2.4.3.1 verdeutlicht, dass das Dichtelement und somit auch der gesamte Schachtverschluss nicht vollständig dicht sind. Eine derartige komplette Dichtheit kann in der Praxis nicht erreicht werden. Stattdessen wird ein Zustand angestrebt, in dem das Dichtelement bzw. der gesamte Schachtverschluss als technisch dicht angesehen werden kann. Das bedeutet, für die Lebensdauer des Schachtverschlusses kommt es zu keiner vollständigen Durchströmung des Gesamtbauwerkes.

Der langfristig sichere Einschluss der Abfälle soll von dem das Endlager umgebenden Gebirgsbereich des Salzstockes erreicht werden. Für den Schachtverschluss im Salinar resultiert aus diesen Anforderungen eine Mindestlebensdauer bzw. Funktionsdauer, die sich nach dem Kompaktionsverhalten des Versatzmaterials im Endlagerbergwerk richtet. Erst wenn der eingebrachte Salzgrus in den Strecken soweit kompaktiert ist, dass dessen Permeabilität die der Streckenverschlüsse unterschreitet und der des umliegenden, unverritzten Gebirges ähnelt, ist eine Barrierewirkung des Schachtverschlusses nicht mehr zwingend nötig. Nach vorläufigen Berechnungen benötigt dieser Prozess ca. 1.000 Jahre (Müller-Hoeppe et al., 2013b). Somit muss der Schachtverschluss einen potenziellen Lösungszutritt mindestens um diesen Zeitraum verzögern. Das vorzeitige Eindringen von Lösungen in den Versatzkörper würde die weitere Kompaktion beeinflussen und entsprechend den sich einstellenden Porendrücken, diese evtl. stoppen. Eine Ausprägung von Wegsamkeiten wäre dann nicht mehr ausgeschlossen.

Das betrachtete zweite Dichtelement liegt in der Mitte des Schachtverschlusses. Das Anstehen von Lauge am oberen Teil des Dichtelementes setzt voraus, dass die vorgeschalteten Dicht- und Pufferelemente im Schachtverschluss durchströmt wurden bzw. deren Speicherkapazität ausgeschöpft ist. Es wird angenommen, dass salzhaltige Lösungen mit einer Dichte von  $1200 \text{ kg/m}^3$  anstehen. Unter diesen Annahmen wird für das beschriebene Dichtelement vorausgesetzt, dass die Salzbetondichtung von oben mit einem hydrostatischen Druck resultierend aus einer Lösungssäule bis zur Geländeoberkante belastet wird:

$$p = \rho * g * h = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 680 \text{ m} = 8,0 \text{ MPa} \quad (2-19)$$

Die Durchströmungszeit des Dichtelementes ergibt sich aus:

$$t = \frac{(n * (1 - S) * \eta)}{k * p} * \frac{L^2}{2} \quad (2-20)$$

Mit:

Porosität	$n = 10\%$
Sättigung	$S = 85\%$
Viskosität	$\eta = 1,5 \text{ mPa*s}$
Permeabilität	$k = 2,3 * 10^{-19} \text{ m}^2$
wirksame Dichtungslänge	$L = 50 \text{ m}$
hydrostatischer Druck	$p = 8,0 \text{ MPa}$
Lösungsdichte	$\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$
Lösungshöhe	$h = 680 \text{ m}$
Dichtungsquerschnitt	$A_D = 61,2366 \text{ m}^2$

Gemäß Gleichung 2-20 ergibt sich eine Durchströmungszeit  $t = 485$  Jahren. Ist das Dichtelement komplett gesättigt, wird es stationär durchströmt. Der entstehende Volumenstrom  $\dot{V}$  errechnet sich aus:

$$\dot{V} = \frac{k * p * A}{\eta * L} \quad (2-21)$$

Somit ergibt sich ein rechnerischer Volumenstrom  $\dot{V} = 0,05 \text{ m}^3/\text{a}$ . Unterhalb der Salzbetondichtung und des anschließenden Salzbetonwiderlagers liegt ein weiterer mit Hartgesteinschotter verfüllter Abschnitt der Schachtsäule. Dieser 66 m lange Abschnitt besitzt bei einer Einbauporosität von 38% ein Porenvolumen von rund  $1150 \text{ m}^3$ . Der ermittelte Volumenstrom würde rechnerisch ca. 23.000 Jahre benötigen, um diesen vorhandenen Speicherhohlraum unter dem 2. Dichtelement zu füllen. Das Dichtelement setzt den anstehenden Lösungen einen ausreichend großen Widerstand entgegen, um ein vorzeitiges Eindringen in die anschließenden Barrieren und Endlagerbereiche zu verhindern.

### 2.4.3.3 Ergebnis und Beurteilung

Die Verzögerungswirkung des zweiten Dichtelementes, bestehend aus Salzbeton, kann durch die gezeigten Berechnungen als ausreichend groß abgeschätzt werden. Ein möglicher Lösungszutritt wird in der betrachteten Komponente des Schachtverschlusses hinreichend verzögert. Das Dichtelement ist als technisch dicht anzusehen. Neben dem Nachweis der

hydraulischen Dichtheit konnte somit auch eine hinreichende Funktionsdauer gezeigt werden. Der vereinfachte Nachweis berücksichtigt nicht die Dicht- und Pufferwirkung der vor- und nachgeschalteten Elemente. Die Kombination der Teilsysteme ist Teil der Langzeitsicherheitsanalyse. Die Lebensdauer bzw. Funktionsfähigkeit des gesamten Schachtverschlusses kann somit deutlich größer eingeschätzt werden.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde beispielhaft und vereinfacht die integrale Permeabilität des Dichtelementes als charakteristische Widerstandsgröße ermittelt. Zur vereinfachten Darstellung wurden die einzelnen Permeabilitätskennwerte aus der Fachliteratur übernommen. Für einen tatsächlichen Nachweis ist in jedem Fall eine gesicherte Datenbasis nötig. Mit deren Hilfe sind statistisch abgesicherte Aussagen zu den Kenngrößen wie beispielsweise der Permeabilität der Auflockerungszone möglich und es können geeignete Streuungsfaktoren Anwendung finden. Da die ermittelte integrale Permeabilität in einen folgenden probabilistischen Langzeitsicherheitsnachweis einfließen würde, wurde auf die Einführung von Teilsicherheitsbeiwerten verzichtet. Gleichwohl sind jedoch bei der direkten Ermittlung von Bemessungswerten entsprechend der Norm "Teilsicherheitsbeiwerte" enthalten.

Von dem in Abbildung 2-1 dargestellten Gesamtnachweis wurden sowohl für das Dichtelement als auch für das Widerlager nur Einzelnachweise erbracht. Ziel war es anhand dieser Einzelnachweise die grundsätzliche Vorgehensweise aufzuzeigen. Der Einzelnachweis zur Setzungsstabilität der Schottersäule wurde unter Anwendung entsprechender Teilsicherheitsbeiwerte durchgeführt. Bei dem Nachweis der Dichtheit wurde auf die Anwendung dieser verzichtet. Dichtheit und Funktionsfähigkeit wurden rechnerisch nachgewiesen. Eine abschließende, probabilistische Analyse der Langzeitsicherheit des gesamten Schachtverschlusses untersucht das Systemverhalten in verschiedenen Grenzzuständen und wirkt somit abdeckend. Die Einführung zusätzlicher Teilsicherheitsbeiwerte zur Ermittlung der Dichtheit und Funktionsfähigkeit ist daher an dieser Stelle nicht nötig.

## 2.5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Arbeitspaket wurde die Methodik zur Anwendung des Nachweiskonzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte zusammengefasst. Die Anwendung des Konzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte zur Nachweisführung an einem geotechnischen Verschlussbauwerk ist grundsätzlich möglich. Konstruktions- und funktionsbedingte Besonderheiten eines Strecken- oder Schachtverschlusses erfordern jedoch spezifische Anpassungen im Rahmen des Nachweiskonzeptes.

Schachtverschlüsse sind ingenieurtechnische Bauwerke, für die, wie für alle anderen Bauwerke auch, vor ihrer Errichtung die Zuverlässigkeit während der geplanten Funktionsdauer und die Einhaltung der geforderten Sicherheitsfunktionen nachzuweisen ist. In Anlehnung an den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik im Bauwesen und Erd- und Grundbau werden dazu die bestehenden Regelwerke des Eurocodes genutzt. Herzstück der Normen ist die Anwendung des Konzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte. Dabei handelt es sich

---

um ein semiprobabilistisches, zuverlässigkeitsorientiertes Sicherheitsnachweiskonzept. Die Nachweise der Einhaltung der Sicherheitsfunktionen und Zuverlässigkeit setzen sich dabei für das Gesamtsystem Schachtverschluss und auch für die einzelnen Komponenten aus einer Vielzahl von Einzelnachweisen für verschiedene Eigenschaften bzw. Grenzzustände zusammen. Die jeweiligen Zustände bzw. vorhandenen Spannungen innerhalb des Bauwerks sind durch Gleichgewichtsbetrachtung zu ermitteln. Der eigentliche Nachweis erfolgt anschließend durch eine Grenzwertbetrachtung der sich gegenüber stehenden Einwirkungen und Widerstände. Die Einwirkungen auf das Bauwerk werden mit den Widerständen der Konstruktion durch Grenzkriterien, die den Einwirkungskombinationen zugeordnet sind, verglichen. Die Nachweise sind für alle zu betrachtenden Einwirkungskombinationen und deren Grenzzustände mit Hilfe der Rechenfälle zu führen.

Anschließend an die allgemeine Einführung in das Nachweiskonzept wurden die für einen Schachtverschluss notwendigen Einzelnachweise betrachtet und systembedingte Besonderheiten aufgezeigt. Anhand des beispielhaft gewählten Schachtverschlusskonzeptes der Vorbemessung der VSG wurden zwei Einzelnachweise zur Erläuterung der Methodik geführt. Damit ist eine Einführung geschaffen, die eine spätere Nachweisführung der noch zu planenden Großversuche auf der Basis anerkannter Verfahren ermöglicht.

### 3 AP3 – Randbedingungen für die Wirtsgesteine Salz und Tonstein

#### 3.1 Geomechanische Randbedingungen

##### 3.1.1 Vorüberlegungen und Allgemeines

Die Eigenschaften des an einem Endlagerstandort anstehenden Wirtsgesteines besitzen erheblichen Einfluss auf die möglichen anzuwendenden Endlagerkonzepte und spielen daher bei der Planung von Verschlussbauwerken eine bedeutende Rolle. Eine umfassende allgemeine Beschreibung und Charakterisierung von Gesteinsformationen, welche als Endlagerstandort in Frage kommen, wird in (Bollingerfehr et al., 2011) wiedergegeben.

Komponenten	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein
Einlagerungssohle	ca. 900 m	ca. 500 m	500 - 1200 m
Lagerungstechnik*	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher oder Strecken
Auslegungstemperatur	max. 200° C	max. 100° C	max. 100° C (Bentonitversatz)
Versatzmaterial*	Salzgrus	Bentonit	Bentonit
Zwischenlagerzeit (BE u. HAW-Kokillen)	min. 15 Jahre	min. 30 - 40 Jahre	min. 30 - 40 Jahre
Streckenausbau	nicht erforderlich	erforderlich, ggf. sehr aufwändig	in stark geklüfteten Bereichen erforderlich
Behälterkonzept	vorhanden	für Deutschland neu zu entwickeln	für Deutschland neu zu entwickeln
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	groß (Erzbergbau)

günstige Eigenschaft
  ungünstige Eigenschaft
  mittel

\* wird an das jeweilige Wirtsgestein angepasst

Abbildung 3-1: Zusammenfassung der für unterschiedliche Wirtsgesteine zu beachtenden Parameter (aus (Bollingerfehr et al., 2011))

Die geomechanischen Randbedingungen umfassen die Beschreibung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens der im Schacht anliegenden Gebirgsbereiche unter Berücksichtigung zeitabhängiger (z. B. Kriechen) und strukturmechanischer Prozesse (z. B. Rissbildung, Verheilung). Dabei müssen der Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit sowie die erwarteten Wechselwirkungen mit den Verschlusskomponenten berücksichtigt werden.

Als wesentliche Einflussfaktoren werden der In-situ Spannungszustand und das ggf. noch thermisch beeinflusste Konvergenzverhalten von Steinsalz und Tonstein sowie der Quelldruck der Bentonitdichtelemente erachtet. Von besonderer Bedeutung in diesem Zusammenhang ist das geomechanische Verhalten des Gebirges im Bereich durchteufter Inhomogenitäten, wie im Referenzfall Gorleben die sogenannte "Gorleben-Bank". Die geomechanische Wirkung dieser Inhomogenitäten auf anliegende Verschlusselemente soll charakterisiert werden.

Für Salinar und Tonstein werden die Unterschiede im geomechanischen Verhalten beschrieben. Dabei wird zwischen dem Verhalten im Ausgangszustand bzw. nach dem Konturnachschnitt und dem Verhalten nach Einbau der Schachtverschlusselemente unterschieden.

Die Elemente eines Schachtverschlusses müssen, damit die für die Verschlusselemente geplanten Funktionen zuverlässig erfüllt werden können, sorgfältig geplant werden. Dies beinhaltet unter anderem auch eine Anpassung der Ausführung, der verwendeten Materialien sowie des Einbauprozesses, an die vorhandene geologische und gebirgsmechanische Situation. Um die notwendigen Planungen vornehmen zu können, ist eine möglichst genaue Kenntnis der geomechanischen Eigenschaften der geologischen Einheiten in den vorgesehenen Einbauhorizonten notwendig.

Folgende zu betrachtende Eigenschaften und in-situ Bedingungen spielen für alle als möglich erscheinenden Wirtsgesteine eine Rolle (Buhmann et al., 2008):

- Temperatur und Temperaturdifferenzen am Einbauort (Sommer/Winter)
- lithostatischer Druck
- Luftfeuchte
- Kompetenz der Gesteine
- Kriechverhalten (Kriechrate)
- Konvergenzverhalten im Gebirge (Verformungsverhalten)
- Thermisches Verhalten ( $\lambda$  (Wärmeleitfähigkeit),  $c_p$  (Wärmekapazität))
- Klüftigkeit, Porosität (Dichte)
- Gaseindringdruck
- Permeabilität
- hydraulischer Gradient

Werden in der Schachtröhre Inhomogenitäten durchteuft, so ist abzuwägen, inwieweit der Einbau eines dichtenden Verschlusselementes im Bereich einer solchen Inhomogenität un-

umgänglich ist. Wenn möglich, sollten Dichtelemente nur innerhalb homogener Gesteinsschichten eingebaut werden, um eine maximale abdichtende Wirkung zu erreichen.

Zusätzlich zu den oben genannten Eigenschaften müssen jeweils die spezifischen Materialeigenschaften der Wirtsgesteine betrachtet werden.

Dabei kann zwischen isotropen, die Gesteinseigenschaften beeinflussenden Faktoren, wie beispielsweise Fluideinschlüssen im Steinsalz, dem Quell- und Schrumpfverhalten bei wechselnden (Luft-) Feuchtigkeitsgehalten und Temperaturen im Tonstein während der Betriebsphase durch Bewetterung, der Porosität sowie dem initialen Wassergehalt, und anisotropen Eigenschaften, wie dem Kriechen von Gesteinen unter der Beaufschlagung mit hohen Drücken unterschieden werden. (Vor allem Steinsalz neigt zum Kriechen. Tonsteine zeichnen sich ebenfalls durch das Vorhandensein einer Kriechneigung aus, welche im Regelfall jedoch deutlich geringer ausgebildet ist.)

Das Kriechverhalten von Salzgesteinen kann durch Materialgesetze beschrieben werden. Die Entwicklung dieser Materialgesetze ist äußerst komplex. Die Beschreibung setzt umfangreiche Untersuchungsserien an Gesteinsproben des entsprechenden Materials voraus. Die das Kriechverhalten bestimmenden Gesteinsparameter können sich im Verlauf weniger Dezimeter grundlegend ändern, so dass von einer Verallgemeinerung der für die Berechnung der Materialgesetze notwendigen Parameter Abstand genommen werden muss.

Die Materialgesetze für Steinsalz müssen jeweils spezifisch an das zu beschreibende Gestein angepasst werden (Hunsche & Schulze, 1994). Diese Anpassung geschieht durch Bestimmung der Parameter mit Hilfe von Laboruntersuchungen.

### **3.1.2 Definition einzelner, auf ein Verschlussbauwerk einwirkender Randbedingungen der Gesteine**

#### **3.1.2.1 Klüftigkeit (GeoLexikon, 2011)**

Die Klüftigkeit beschreibt den Grad der Zerklüftung von Gesteinskörpern. Die Klüftigkeitsziffer  $k$  [1/m] kann nach der Formel  $k=n/l$  ( $n$  = Anzahl der Kluftschnitte,  $l$  = Länge der gemessenen Strecke) bestimmt werden. Somit kann die Klüftigkeitsziffer als reziproker Wert der mittleren Kluftabstände beschrieben werden. Sie gibt die Anzahl der vorhandenen Kluftkörper an. Diese Zahl zeigt oftmals eine direkte Abhängigkeit von der Bankung. Ausnahmen von dieser Abhängigkeit bedingen meist eine intensive tektonische Beanspruchung.

#### **3.1.2.2 Kompetenz der Gesteine (Härte, Nachgiebigkeit, Kompressibilität ohne Verformung von Gesteinen (M.W., 2011)**

Die Kompetenz von Gesteinen gibt deren Fähigkeit an, gerichteten Druck fortzuleiten. Gesteinseinheiten mit hoher Kompetenz reagieren auf Druckbelastung eher spröde, während

sich Gesteine mit niedriger Kompetenz eher plastisch verhalten. Inkompetente Gesteine weisen aufgrund dieser Eigenschaft meist nur eine geringe Klüftung auf. Die Kompetenz von Gesteinen und Gesteinsverbänden wird durch deren rheologische Eigenschaften (3.1.5.8) beschrieben.

### **3.1.2.3 Kriechverhalten (siehe auch 3.1.6.4) [u. a] (Hunsche et al., 2003)**

Als Kriechen bezeichnet man eine zeitabhängige, plastische Verformung relativ inkompetenter, duktil reagierender Gesteine, unter gleichbleibender Spannung. Die Verformungsrate kann je nach Materialzusammensetzung und Betrag der aufgebrachten Spannung variieren und ist temperaturabhängig. Kriechen tritt bei Steinsalz in hohem Maße, in weit geringerem Maße auch im Tonstein auf (siehe auch 3.1.6.4) (Brasser et al., 2008a).

### **3.1.3 Definition einzelner, auf ein Verschlussbauwerk einwirkender Randbedingungen des Gebirges**

#### **3.1.3.1 Gaseindringdruck [(RSK, 2005) 379. Sitzung]**

Weist das Wirtsgestein eine ausreichende Durchlässigkeit auf, kann Gas in diese Gesteinsformation eindringen und möglicherweise durch sie hindurch entweichen. In diesem Fall ist von nur geringen Druckerhöhungen innerhalb des Endlagerbereiches auszugehen. Eine Erhöhung des Gasdruckes im Endlager und eine damit einhergehende mögliche Gasausbreitung innerhalb der geologischen Formation muss, als potenzieller Auslöser für die Ausbreitung kontaminierter Lösungen, in Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit berücksichtigt werden.

Im Steinsalz sowie in Tonsteinen mit sehr geringer Durchlässigkeit ist eine advective Gasmigration nur über Diskontinuitäten oder durch Zwei-Phasen-Strömung im Gesteinsverband möglich.

Im Steinsalz besteht nach derzeitigen Einschätzungen erst die Gefahr der Bildung neuer Wegsamkeiten, wenn der Gasdruck im Inneren eines Endlagers den lithostatischen Druck überschreitet.

Im Tonstein muss bereits beim Überschreiten des hydrostatischen Druckes, obwohl der in diesem Fall wirksame Druck noch unter dem Gebirgsdruck liegt, mit der Aufweitung von Porenraum gerechnet und somit mit der Bildung neuer Wegsamkeiten für Gase, gerechnet werden. Diese Tatsache führt zu der Annahme, dass im Tonstein die Gasdrücke in Hohlräumen den lithostatischen Druck nicht erreichen werden. Die sich bei der Aufweitung der Poren bildenden Wegsamkeiten sind mikroskopisch klein und werden nicht als Beeinträchtigung für die Integrität der Barriere angesehen. Der Gastransport wirkt so nicht begünstigend für die Ausbreitung von kontaminiertem Wasser im Wirtsgestein. Weiterhin wird dieser Vorgang im

Tonstein als reversibel angesehen, so dass sich die Wegsamkeiten bei einem Rückgang der Gasdrücke wieder zurückentwickeln.

### **3.1.3.2 Lokale Differentialbewegungen (Buhmann et al., 2008)**

Lokale Differentialbewegungen sind durch kleinräumig unterschiedliche Verschiebungsbeiträge gekennzeichnete Auf- oder Abwärtsbewegungen des Gebirges. Diese können beispielsweise durch Bewegungen des Wirtsgesteines (z. B. Salzstock – Halokinese), durch subrosive und diagenetische Ereignisse sowie in Folge der Wärmeproduktion der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle hervorgerufen werden.

### **3.1.3.3 Konvergenzverhalten im Gebirge (Buhmann et al., 2008)**

Als Konvergenz bezeichnet man die zeitabhängige Verengung des Querschnittes von Grubenbereichen, die aufgrund von Spannungsumlagerungen nach deren Auffahrung im umgebenden Gebirge einsetzt. Gesteine reagieren auf die an der Hohlraumkontur sowie auf die im angrenzenden Gebirge anliegenden Spannungen entsprechend der jeweiligen Materialeigenschaften spröde oder duktil. Bereits bei kleinen Deviatorspannungen können im Steinsalz Kriechvorgänge in Gang kommen. Weiter ist die Konvergenz von der Temperatur sowie möglichen Verunreinigungen im Steinsalz abhängig. Durch Konvergenz werden versetzte als auch unversetzte Hohlräume mit der Zeit in zunehmendem Maße verschlossen. Dies geschieht für versetzte Hohlräume aufgrund des geringeren noch vorhandenen Hohlraumvolumens in kürzeren Zeiträumen. Der Zustand der konvergenten Bewegung hält an, bis ein Gleichgewichtszustand der Spannungen in der ehemaligen Strecke und im angrenzenden Gebirge erreicht wird.

### **3.1.3.4 Lithostatischer Druck**

Der lithostatische Druck beschreibt die Druckverhältnisse, unter denen ein Gesteinskörper in einer bestimmten Teufe steht. Der lithostatische Druck ist abhängig von der Bezugsteufe und der Wichte der von der Erdoberfläche bis zur Bezugsteufe anstehenden Gebirges.

### **3.1.3.5 Reibungswinkel und Kohäsion**

Mit Hilfe des Reibungswinkels und der Kohäsion kann die Scherfestigkeit eines Materials nach dem Stoffgesetz von Mohr-Coulomb beschrieben werden.

### 3.1.3.6 Thermisches Verhalten von Gebirgseinheiten (Buhmann et al., 2008)

Das Thermische Verhalten gibt die Dichteänderung und somit eine Volumenänderung der Gesteine an. Die Dichteänderung wirkt sich auf die Konvergenz, die ablaufenden Differentialbewegungen, sowie auf die Kompetenz der Gesteine aus.

### 3.1.3.7 Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen (Buhmann et al., 2008)

Spannungsänderungen beschreiben eine Erhöhung oder Erniedrigung des Beanspruchungszustandes in einem Gebirgs- oder Tragwerksbereich. Spannungsumlagerungen hingegen sind Spannungsausgleichsprozesse zwischen unterschiedlich hoch beanspruchten Tragwerksbereichen mit einem daraus folgenden Spannungsabbau in den höchstbeanspruchten Bereichen und einer gleichzeitigen Erhöhung der Spannung in weniger beanspruchten Bereichen des Tragsystems.

### 3.1.3.8 Gestörte Zone (Excavation Damaged Zone EDZ), Auflockerungszone (Excavation disturbed zone Edz)

(Die Eigenschaften der EDZ werden ebenfalls in den Abschnitten 3.2 und 3.3 dieses Berichtes behandelt.)

„Von entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit eines Abdichtbauwerkes ist die Ausbildung der Auflockerungszone EDZ“ [(Kudla et al., 2010), S.118].

„Eine Auflockerungszone ist ein konturnah begrenzter und geschädigter Bereich des den Hohlraum umgebenden Wirtsgesteins, wobei dessen Schädigung und die daraus ggf. resultierende Sekundärpermeabilität durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes und die damit verbundene Spannungsumlagerung von der Hohlraumkontur ins Gebirge hinein abhängt“ [(Buhmann et al., 2008) S.389].

Die Neuverteilung von Spannungen durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen während der bergmännischen Arbeiten führt sowohl in Tonsteinen als auch in Steinsalz zur Ausbildung einer signifikanten aufgelockerten Zone, die sich aus der konturnahen EDZ (Excavation Damaged Zone) und der weiter ins Gebirge hineinreichenden, dilatanzbedingten Edz (Excavation disturbed zone) zusammensetzt. Diese Auflockerungszone besitzt gegenüber dem unveränderten Gebirge eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit und kann somit zur Radionuklidmigration beitragen. Die Entstehung und Ausbreitung einer solchen Auflockerungszone kann nicht gänzlich verhindert werden. Man kann die Ausbildung jedoch durch das zeitnahe Einbringen von Ausbau oder den zügigen Einbau von Verschlusselementen behindern.

Die dilatanzbedingte Edz ist in ihrer hydraulischen Wirkung weitgehend reversibel und mit dem Ansteigen der geomechanischen Minimalspannung über den maximalen Wert des an-greifenden Lösungsdruckes hinaus nicht mehr permeabilitätsbestimmend (das gilt offensicht-lich sogar für Frac-Risse). Nach dem Aufkriechen des Gebirges ist die permeabilitätserhö-hende Wirkung der dilatanzbedingten Edz abgeklungen. Sie stellt keine hydraulisch wirksa-me Schwachstelle im Umfeld des Abdichtbauwerkes mehr dar.

Die EDZ stellt dagegen für Abdichtelemente die eigentliche, unmittelbar konturnah permeabi-litätsbestimmende Zone im Kontaktbereich des Bauwerkes mit dem Gebirge dar. Sie bildet sich grundsätzlich ebenfalls mit der Wiedereinstellung des triaxialen Gebirgsspannungszu-standes in der Umgebung eines Verschlussbauwerkes durch das Aufkriechen des Gebirges zurück und ihre permeabilitätserhöhende Wirkung reduziert sich mit der Zeit. Dieser Vorgang ist jedoch schwierig zu quantifizieren.

Im günstigsten Fall, ist die EDZ durch vorheriges qualifiziertes Berauben und Versiegeln so-wie durch das spannungsbedingte Schließen der verbliebenen lokalen Hohlräume ebenfalls unwirksam. Wegen der Unsicherheit und mangelhaften Nachweisbarkeit dieses Vorganges, ist der durch die EDZ beeinflusste Bereich unmittelbar vor Einbau des Dichtelementes des-halb möglichst vollständig zu entfernen. Gegebenenfalls ist zusätzlich Injektionsmaterial in die Kontaktfuge zu verpressen. Zweckmäßigerweise ist auf Injektionsmaterial mit einer Rest-plastizität zu orientieren, damit die Möglichkeit besteht, dass dieses in der Kontaktfuge im Zeitverlauf und durch den Druck des auflaufenden Gebirges in evtl. verbliebene lokale Hohl-räume innerhalb der Kontaktzone wandern kann. Zeitnah nach der Errichtung des Dichte-lementes kann die Neubildung der Auflockerungszone vor allem durch die Einstellung eines möglichst hohen und bleibenden Quell- bzw. Kristallisationsdruckes des Baumaterials, ggf. in Verbindung mit einer Injektion der Kontaktfuge, behindert werden. Eine vollständige Verhin-derung der Neubildung einer Auflockerungszone ist jedoch nicht möglich (Eberth, 2007), (Blümling et al., 2005).

Zusammenfassend kann diesbezüglich festgestellt werden, dass von der Auflockerungszone unmittelbar vor dem Einbau des Dichtelementes die EDZ möglichst vollständig zu entfernen ist.

Im Steinsalz werden wegen der zeitabhängigen Verformungseigenschaften evtl. verbliebene Reste der EDZ im Zeitverlauf weiter reduziert (Kudla et al., 2010), da im Salinar aufgrund des Fließverhaltens von Salz unter allseitig einwirkendem Druck ein Schließen von offenen Rissen bis zu einer im Idealfall auftretenden Monolithisierung beobachtet werden kann.

In allen bislang untersuchten Tonsteinformationen werden räumlich begrenzt wirkende Pro- zesse (Fließen und Quellen) beschrieben, die eine (selbst-) versiegelnde Wirkung auf die EDZ haben. Dabei reagieren weiche Tonformationen weitaus schneller als härtere Formatio- nen, zu denen der Opalinuston zählt. Beobachtungen zeigen eine Abnahme der in der EDZ erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit um mehrere Zehnerpotenzen. Die während der „Selbst- heilung“ ablaufenden Prozesse sind noch nicht vollständig untersucht. Es wird jedoch davon

ausgegangen, dass dabei sowohl Prozesse des beschleunigten Fließens als auch Quellprozesse eine Rolle spielen. Messungen zeigen, dass auf größere Zeiträume gesehen die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ im Tonstein um etwa eine Zehnerpotenz höher liegt als im unverritzten Gebirge (Blümling et al., 2005).

### **3.1.4 Definition einzelner, von außen auf ein Verschlussbauwerk einwirkender Randbedingungen**

#### **3.1.4.1 Großräumige, langfristige Temperaturänderungen [u. a. (Buhmann et al., 2008)]**

Als Ursachen für Temperaturänderungen im Wirtsgestein kommen sehr viele verschiedene Möglichkeiten in Frage. Eine Temperaturerhöhung im Zeitraum von ca. 10.000 Jahren ist aufgrund der in den eingelagerten Stoffen entstehenden radioaktiven Zerfallswärme begründet. Mit der Abnahme der Zerfallsaktivität reduziert sich auch die Wärmeproduktion, was dann zu einer Temperaturabnahme führt. Weitere mögliche Temperaturänderungen, welche auch auf den Schachtverschluss wirken können, sind von unterschiedlichen endo- (Halokinese, Vulkanismus) als auch exogenen Prozessen (Erhöhung der Oberflächentemperatur) abhängig. Da aufgrund der strengen Auswahlkriterien bei der Suche nach einem möglichen Endlagerstandort sowohl neotektonische als auch vulkanische Aktivität ausgeschlossen werden muss, ist ein thermischer Einfluss auf ein Schachtverschlussbauwerk, zumindest bis zur nächsten Eiszeit, auszuschließen.

#### **3.1.4.2 Temperaturdifferenzen am Einbauort [u. a. (Buhmann et al., 2008)]**

Temperaturdifferenzen am Einbauort sollen hier lediglich im jahreszeitlichen Wechsel betrachtet werden, da langfristige Temperaturdifferenzen bereits unter dem vorangegangenen Abschnitt „Temperaturänderungen“ betrachtet werden. Temperaturdifferenzen im jahreszeitlichen Wechsel spielen nur in bewetterten Bereichen, beziehungsweise im oberflächennahen Bereich bis in wenige Meter Teufe eine Rolle. Da in einen Schachtverschluss in direkter Oberflächennähe kein Dichtelement eingebaut werden wird, ist somit nur während der Auffahrungs- und Einlagerungsphase, sowie während der Herstellung des Schachtverschlusses, solange die Grube oder Teile davon bewettert werden, mit einem Einfluss dieses Faktors zu rechnen.

#### **3.1.4.3 Luftfeuchte (Müller, 1987)**

Die Luftfeuchte gibt den in der Luft enthaltenen Wasserdampfgehalt an. Die Luftfeuchte hat im Steinsalz Einfluss auf Lösungsprozesse. Im Tonstein werden durch die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit feuchtigkeitsinduzierte Quell- und Schrumpfvorgänge beeinflusst.

Die relative Luftfeuchte  $\varphi$ , welche sich nach der Formel (3-1)

$$\varphi = \frac{x}{x_{max}} \tag{3-1}$$

berechnet, ist dabei die gebräuchlichste Art die Luftfeuchte zu quantifizieren. Die genannte Berechnungsformel benutzt  $x$  für die absolute Luftfeuchtigkeit, und  $x_{max}$  für die maximale Luftfeuchtigkeit. Die absolute Luftfeuchtigkeit ist mittels Formel

$$x = \frac{m_W}{m_L} \tag{3-2}$$

zu berechnen. Dabei wird die in einem Volumen Luft befindliche Masse Wasserdampf  $m_W$  durch die Luftmasse  $m_L$  des Luftvolumens dividiert. Die maximale Luftfeuchte  $x_{max}$  gibt die maximal in einem bestimmten Luftvolumen speicherbare Wassermenge an. Diese hängt stark von der herrschenden Lufttemperatur ab. Demzufolge wird auch die relative Luftfeuchte stark von der Lufttemperatur beeinflusst. (siehe Abbildung 3-2)

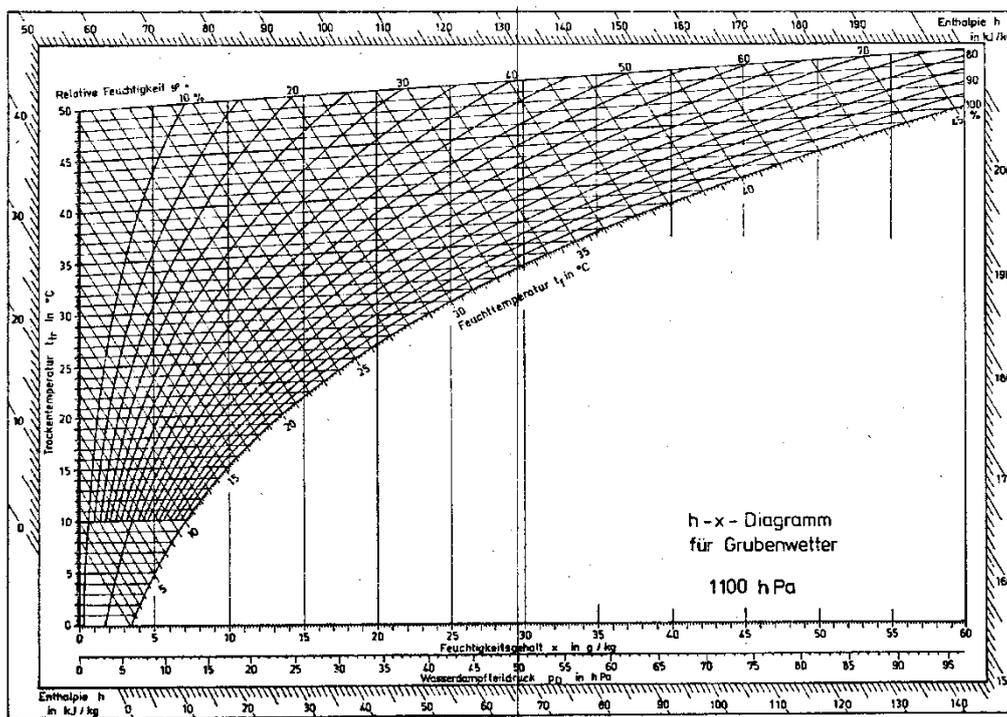


Abbildung 3-2: h-x Diagramm für einen Luftdruck von 1100 hPa [TUBAF 1987]

### 3.1.5 Endlagerspezifische petrophysikalische Parametern der Wirtsgesteine

In Tabelle 3-1 wird ein Überblick über petrophysikalische Kenngrößen gegeben.

Die Wirtsgesteine potenzieller Endlager für HAW, Salz- bzw. Tonformationen, weisen nur äußerst geringe Permeabilitäten auf. Tone und tonhaltige Materialien zeichnet als weitere Besonderheit eine reversible Quell- und Schrumpffähigkeit aus.

**Tabelle 3-1: Petrophysikalische Parameter [nach (Brasser et al., 2008a)]**

Gruppe	Parameter
Porenraumeigenschaften	Gesamtdichte
	Korndichte
	Porosität
Porenraumstruktur	Porenverteilung
	Porengröße
elastische Eigenschaften	Dynamischer Elastizitätsmodul
	Dynamische Querdehnungszahl
sonstige Eigenschaften	Seismische Geschwindigkeit
	Elektrische Leitfähigkeit
	Wassergehalt
	Anteil quellfähiger Minerale
thermische Eigenschaften	Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit
	spezifische Wärmekapazität
	Thermische Volumenausdehnung

#### 3.1.5.1 Permeabilität und Durchlässigkeitsbeiwert FEP: 2.1.08.02 (siehe auch Abschnitt 3.3)

Als Permeabilität  $K$  [ $m^2$ ] wird die Durchlässigkeit von Gesteinen für Flüssigkeiten oder Gase beschrieben. Die Formel (3-3) zu deren Bestimmung leitet sich aus dem Darcyschen Gesetz ab. Wie aus der Formeln (3-4) und (3-5) hervorgeht kann die Permeabilität auch mit Hilfe des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k_f$  beschrieben werden.

Die Permeabilität wird durch die mikroskopische Verteilung und die dreidimensionale Vernetzung des Porenraumes bestimmt. Sie resultiert aus dem Zusammenwirken vieler Einflussfaktoren, von denen die Porosität die bedeutendste ist. Dabei kann die Porosität eines betrachteten Gesteines abhängig von der Einspannung variieren. (Müller-Lyda, 1999).



Bei Grundwasserströmungsrechnungen werden die Permeabilitäten für die Nachweiszeiträume als konstant angesehen und direkt aus Labor- oder in-situ-Messungen ermittelt (Buhmann et al., 2008).

$$K = \frac{Q * \eta * l}{\Delta p * A} \quad (3-3)$$

Durchlässigkeitsbeiwert:

$$k_f = \frac{Q * l * \rho * g}{A * \Delta p} \quad (3-4)$$

$$k_f = \frac{K * \rho * g}{\eta} \quad (3-5)$$

- $k_f$  Durchlässigkeitsbeiwert in m/s  
 $Q$  Fließrate in m<sup>3</sup>/s  
 $l$  durchströmte Länge des porösen Körpers in m  
 $\rho$  Dichte des Fluids  
 $g$  9,81m/s<sup>2</sup>  
 $A$  durchströmte Querschnittsfläche in m<sup>2</sup>  
 $\Delta p$  Druckdifferenz, welche sich nach der Durchströmung einstellt (in N/m<sup>2</sup>)  
 $K$  Permeabilität in m<sup>2</sup>  
 $\eta$  dynamische Viskosität des Fluids, bei Wasser 10<sup>-3</sup> Ns/m<sup>2</sup> bei 20°C

### 3.1.5.2 Porosität

Die Porosität  $\Phi$  wird als das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum gesamten (Außen-) Volumen definiert (Formeln: (3-6) und (3-7)).

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3-6)$$

$$\phi = \frac{V_H}{V} = \frac{V_H}{V_H + V_F} \quad (3-7)$$

$V_H$  = Hohlraumvolumen

$V_F$  = Reinvolumen (Feststoffvolumen)

Die Porosität wird in der Bodenmechanik auch als Porenanteil  $n$  beschrieben.

Die Porosität darf nicht mit der Porenzahl  $e$  (Formel (3-8)), die das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Feststoffvolumen angibt, verwechselt werden. Für den Stofftransport durch ein poröses Medium zeigt sich die effektive Porosität als entscheidend. Diese beschreibt das durchgängig vernetzte Porensystem eines porösen Stoffes und wird auch als durchflusswirksame Porosität bezeichnet. Die effektive Porosität ist immer kleiner oder gleich der Gesamtporosität, da abhängig von der Struktur des Mediums im Normalfall ein Teil des Gesamtporenraumes nicht an den effektiv wirkenden Porenraum angeschlossen ist (Buhmann et al., 2008).

$$e = \frac{V_H}{V_F}$$

(3-8)

$V_H$  = Hohlraumvolumen

$V_F$  = Reinvolumen (Feststoffvolumen)

### 3.1.5.3 Verformungseigenschaften

Die Verformung von Gesteinen ist ein komplexer Vorgang und von der Belastung sowie von der Zeit abhängig. Zusätzlich besteht bei allen Verformungsarten eine Temperaturabhängigkeit. Dabei werden modellhaft folgende Verformungsarten unterschieden:

- a) lastabhängige, zeitunabhängige Verformung
- b) zeit- und lastabhängige Verformung
- c) zeitabhängige, aber lastunabhängige Verformung
- d) temperaturabhängige Verformung

#### a) lastabhängige, zeitunabhängige Verformung

In diesem Fall unterscheidet man elastisches (Sonderfall linear elastisches) und inelastisches Verhalten.

Materialparameter für das elastische Materialverhalten sind:

Querdehnungszahl  $\nu$  [-]

Elastizitätsmodul  $E$  [GPa]

Bei linear elastischem Verhalten ist der E-Modul konstant. Eine Beschreibung der elastischen Eigenschaften erfolgt im Abschnitt 3.1.5.7.

Inelastisches Verformungsverhalten ist z. B. für Verfestigungs- und Entfestigungsprozesse zutreffend.

### zeit- und lastabhängige Verformung

Für das zeit- und lastabhängige Verformungsverhalten gelten die Gesetzmäßigkeiten der Plastizitätstheorie bzw. der Rheologie. Dabei sind folgende Materialparameter zutreffend:

Dynamische Viskosität  $\eta$  [Pas]

Kriechrate  $\varepsilon$  [ $s^{-1}$ ]

Anfangsschubspannung bzw. Fließgrenze  $\tau_0$

Weiterhin sind hinsichtlich der Modellvorstellungen Mischformen wie elasto-viskoses oder elastoplastisches Materialverhalten bekannt, die in komplexen Stoffgesetzen beschrieben werden (siehe Abschnitt 3.1.5.8).

### b) zeitabhängige aber lastunabhängige Verformung

Diese Verformungsart ist für Quell- und Schrumpfvorgängen bei Tongesteinen zutreffend. Diese werden durch Änderung des Feuchtegehaltes oder der Feuchtezusammensetzung (Wasseraktivität) initiiert.

Materialparameter sind:

Expansionsdruck  $p_q$  [MPa] (bei behinderter Volumenausdehnung)

Volumenänderung  $\varepsilon_q = dV_q/V_o$  [-] (bei freiem Quellen)

Weiterhin kann man Beziehungen zwischen Spannung und Verformung (sog. Quellgesetze) als materialspezifische Stoffgesetze formulieren.

### c) temperaturabhängige Verformung

Infolge Temperaturänderungen treten Volumenänderungen auf. Bei behinderter Ausdehnung ist dieser Prozess maßgeblich mit für die Größe von Temperatureigen Spannungszuständen verantwortlich.

Der entscheidende Materialparameter ist der Thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  [ $K^{-1}$ ].

## **3.1.5.4 Sonstige Eigenschaften**

Von den in Tabelle 3-1 aufgeführten sonstigen und thermischen Eigenschaften sind für die anstehenden Gesteine im Bereich von einzubauenden Verschlussbauwerken die Temperatur- /Wärmeleitfähigkeit, der Wassergehalt sowie der Anteil quellfähiger Minerale von Bedeutung.

#### 3.1.5.4.1 Quelldruck; Anteil quellfähiger Minerale und Wassergehalt

Je nach Anteil an quellfähigen Mineralen im Wirtsgestein kann es bei Veränderung des Wassergehaltes zu Quell- oder Schrumpfvorgängen kommen.

Der Wassergehalt der Wirtsgesteine sollte während der Auffahrungs- und Betriebsphase so gering wie möglich verändert werden, da eine Reduzierung des Wassergehaltes die Wiederaufsättigungsphase verlängert.

Eine Beeinflussung des natürlichen Wasserhaushaltes ist nicht gänzlich vermeidbar, da allein durch Wetterbewegungen eine Austrocknung der Gesteine zu erwarten ist. Beim Einbau von Dichtmaterial muss ebenfalls auf die Wassergehalte des Gebirges Rücksicht genommen werden, da beispielsweise eine Bentonitdichtung mit geringerem Wassergehalt ansonsten eine Fluidmigration aus dem Nebengestein in das Dichtelement hervorrufen könnte, was zwar einen Quelldruck des Bentonitelementes erzeugen würde, jedoch zu einer Konsolidierung des Nebengesteines führen kann. Dabei ist der Effekt der Konsolidierung der Tonsteinformationen zu beachten, der mit einer Verfestigung und damit mit einer Reduktion der Permeabilität einhergeht. Welcher Effekt letztlich überwiegt, muss in weiterführenden Untersuchungen bestimmt werden.

Der Zusammenhang der Sättigung  $S$  und dem Wassergehalt  $w$  ist in Formel (3-9) dargestellt.

$$w = S \left[ \frac{1 + \varepsilon}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_0} \right] \rho_{FL} \quad (3-9)$$
$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0}$$

Der Wassergehalt der Wirtsgesteine spielt nur bei Standorten im Tonstein eine Rolle und wurde daher im ISIBEL FEP Katalog (Buhmann et al., 2008) nicht behandelt.

#### 3.1.5.5 Endlagerspezifische gesteinsmechanische Parameter der Wirtsgesteine

In Tabelle 3-2 sind die relevanten Parameter sowie die im Labor angewandten Messmethoden zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften, der elastischen Eigenschaften und der rheologischen Eigenschaften zusammengestellt (Brasser et al., 2008a).

**Tabelle 3-2: Relevante gesteinsmechanische Parameter nach (Brasser et al., 2008a)**

Gruppe	Parameter
Festigkeitseigenschaften	Einaxiale Bruchfestigkeit
	Dreiaxiale Bruchfestigkeit
	Zugfestigkeit
	Dilatanz
Elastische Eigenschaften	Statischer Elastizitätsmodul
	Statische Querdehnungszahl
	Kompressionsmodul
Rheologische Eigenschaften	Einaxiales Kriechen
	Dreiaxiales Kriechen
	Relaxation

### 3.1.5.6 Festigkeitseigenschaften

Für die Auswahl potenzieller Standorte und für die spätere Errichtung von Endlagern spielen die Festigkeitseigenschaften der Gesteine des anstehenden Gebirges sowie der verwendeten Baumaterialien eine bedeutende Rolle. Die wichtigsten Parameter hierbei sind die einaxiale sowie die dreiaxiale Bruchfestigkeit, die Zugfestigkeit sowie die Dilatanzgrenze.

#### 3.1.5.6.1 Gesteinsfestigkeiten

Die Festigkeitseigenschaften von Gesteinen können mit Hilfe der Angabe von Druck- und Zugfestigkeit beschrieben werden.

Da Gesteine im Regelfall dreidimensional eingespannt sind, kann die Einaxiale Druckfestigkeit lediglich als reiner im Labor bestimmter Wert in diese Betrachtung eingehen. Bei einer Bestimmung der eindimensionalen Druckfestigkeitswerte im Labor besteht die Möglichkeit der Ermittlung von E- Modul und Verformungsmodul.

Die einaxiale Druckfestigkeit wird für Gesteinsproben nach der Empfehlung Nr. 1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik und für Beton nach DIN 1048 Teil 5 (DIN 1048), Teil 5 durchgeführt (Gartung, 1979). Die eigentliche Prüfung erfolgt durch eine axiale Belastung der Prüfkörper in einer Prüfmaschine bis zum Bruch. Die dabei erreichte Höchstlast ist die einaxiale Druckfestigkeit (DIN 1048, Teil 5), (Gartung, 1979), (Brasser et al., 2008a).

Die Beurteilung der Festigkeit von Gesteinen im Gebirgsverband erfolgt in der Regel durch die Bestimmung der dreiaxialen Druckfestigkeit.

Die Bestimmung erfolgt mit Hilfe dreiaxialer Druckversuche. Die Prüfkörper werden dabei sowohl axial als auch radial mit Druck beaufschlagt. Der Radialdruck kann dabei unabhängig vom Axialdruck variiert werden (Rißler, 1979), (Brasser et al., 2008a).

Mit Hilfe der Zugfestigkeit von Gesteinen wird die maximal von Gesteinen aufnehmbare Belastung auf Zug beschrieben. Die Bruchlast kann nicht direkt in Zugversuchen getestet werden. Daher kommen indirekte Methoden wie Spaltzugversuche zum Einsatz, bei denen die Last mit Hilfe von zwei direkt gegenüberliegenden Lastverteilungstreifen auf einen zylindrischen Probekörper radial aufgebracht wird. Die Last wird bis zum Bruch des Prüfkörpers gesteigert (Gartung 1985), (Brasser et al., 2008a).

### 3.1.5.6.2 Dilatanz

Die Dilatanz ist eine Kenngröße, welche die Schädigung und damit einhergehende Permeabilitätserhöhung eines Materials angibt. Sie kann weiterhin als eine durch Auflockerung während einer Belastung bedingte, nicht reversible Volumenzunahme beschrieben werden. Diese Auflockerung tritt bei Belastung eines Prüfkörpers vor einem Bruch auf. (Smoltczyk, 2001), (Brasser et al., 2008a), (Hunsche & Schulze, 1994).

Eine bedeutende Rolle bei der Beschreibung der Materialeigenschaften spielt die Dilatanzgrenze. Ein Gestein, welches sich in einem Zustand oberhalb der Dilatanzgrenze befindet, akkumuliert Schädigungen, die langfristig ein Materialversagen hervorrufen können. Unter der Einwirkung einer Scherspannung ist bei einem Probekörper im initialen Stadium der Beanspruchung eine Volumenreduktion zu beobachten, die mit zunehmender Spannung in eine Volumenzunahme umschlägt. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Abgrenzung des kompressiblen zum dilatanten Verhalten der Probe nicht exakt möglich ist. Vielmehr handelt es sich während der beginnenden Belastung um einen Zustand, in welchem die Kompression überwiegt und die Dilatanz nur eine untergeordnete Rolle spielt. Dieses Verhältnis kehrt sich mit dem Auftreten dilatanten Verhaltens beim Überschreiten der Dilatanzgrenze um (Günther, 2009); (Hunsche & Hampel, 1999).

Die Dilatanz  $\Delta v_{01}$  kann aus dem Verhältnis des Endvolumens zum Ausgangsvolumen bestimmt werden. Die Formel (3-10) für die Volumenänderung infolge einer Beanspruchung des Materials stellt dies in einer starken Vereinfachung dar. Für eine genaue Bestimmung der dilatanten Anteile der Materialverformung existieren eigene komplexe Materialgesetze, die in der Literatur z. B. (Pudewills, 2011), (Hampel & Schulze, 2007) ausführlich dargestellt wurden.

$$\varepsilon_{\text{Vol}} = \frac{\Delta V}{V} \quad (3-10)$$

$\varepsilon_{\text{Vol}}$  = Volumenänderung

$V$  = Ausgangsvolumen

$\Delta V$  = Volumendifferenz

nach (Günther, 2009)

### 3.1.5.7 Elastische Eigenschaften

Die elastischen Eigenschaften von Gesteinen können mit Hilfe des statischen Elastizitätsmoduls, der statischen Querdehnungszahl, dem Schubmodul sowie dem Kompressionsmodul beschrieben werden (Brasser et al., 2008a). Ideal elastische Körper sind durch zwei der oben genannten Parameter eindeutig beschreibbar. Die weiteren Kenngrößen sind aus den ermittelten Größen rechnerisch ableitbar (Mehlhorn, 1997); (Brasser et al., 2008a). Durch den Elastizitätsmodul wird die Längenänderung eines Prüfkörpers bei axialer Belastung beschrieben. Die Querdehnungszahl, auch Poisson Zahl, wird als negatives Verhältnis relativer Dickenänderung zu relativer Längenänderung angegeben.

Der Kompressionsmodul ( $K$ ) gibt die bei verhinderter Seitendehnung auftretende Volumenänderung an.

$$K = -V * \frac{dp}{dV} = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad (3-11)$$

Mit:

$V$  = Volumen

$dp$  = infinitesimale Druckänderung

$dV$  = infinitesimale Volumenänderung

Um den Kompressionsmodul versuchstechnisch zu ermitteln ist die Durchführung eines dreiaxialen Druckversuches notwendig (Brasser et al., 2008a).

Bei dem Schubmodul ( $G$ ) handelt es sich um eine Materialkonstante, welche die lineare elastische Verformung eines Materials durch eine Schubspannung angibt. Der Schubmodul ist das Verhältnis der Schubspannung und der von ihr erzeugten Schubdehnung.

$$G = \frac{E}{2 + 2\nu} = \frac{3KE}{9K - E} = 3K \frac{1 - 2\nu}{2 + 2\nu} \quad (3-12)$$

Mit:

$\nu$  = Poissonzahl/Querdehnungszahl

$K$  = Kompressionsmodul

**E** = Elastizitätsmodul

(Gerthsen et al., 1974), (Tiab & Donaldson, 1999), (Brasser et al., 2008a)

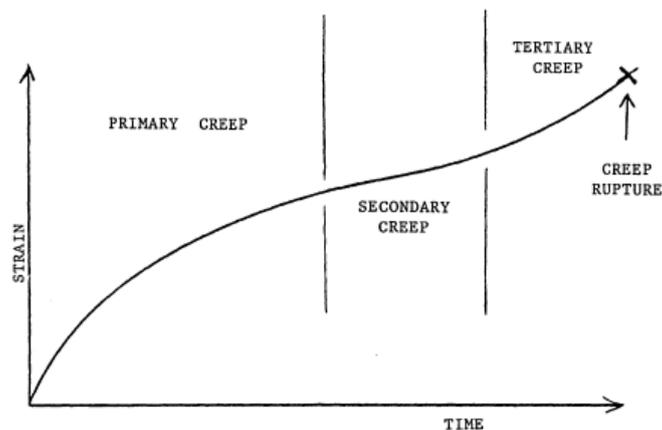
### 3.1.5.8 Rheologische Eigenschaften

Die rheologischen Gesteinsparameter werden durch die zeitabhängigen Eigenschaften Kriechen und Relaxion bestimmt (Hunsche, 1994), (Hunsche & Schulze, 1994), (Haupt & Mutschler, 1994), (Brasser et al., 2008a). Sowohl Kriechen als auch Relaxion treten vornehmlich im Steinsalz und in weit geringerem Maße im Tonstein unter der Einwirkung von Spannung auf (Zhang et al., 2004a). Beim Kriechen kann zwischen verschiedenen Stadien unterschieden werden (Brasser et al., 2008a), (Hunsche & Schulze, 1994).

Dabei handelt es sich um

1. **primäres Kriechen** (Übergangskriechen, auch als transientes Kriechen bezeichnet. Weist bei Versuchsbeginn oder bei Änderung der Bedingungen eine veränderliche Kriechrate auf).
2. **sekundäres Kriechen** (Verformung konstanter Rate über großen Verformungsbereich bei gleichbleibenden Versuchsbedingungen)
3. **tertiäres Kriechen** (beschleunigtes Kriechen)

In der vorliegenden Aufgabenstellung sind jedoch hauptsächlich das primäre sowie das sekundäre Kriechen von Interesse (Brasser et al., 2008a).



**Abbildung 3-3: Die drei Stadien des deviatorischen Kriechens ((NAGRA, 1990), S. 57)**

Die Betrachtung des Kriechverhaltens spielt für die Endlagerforschung eine bedeutende Rolle, da das Kriechen die gewünschte Konvergenz der Einlagerungsgesteine hervorruft, die zum Umschließen der Einlagerungsbehälter führt. Weiterhin führen Kriechprozesse zur Verheilung von Gebirgsschädigungen, die während der Auffahrung der Hohlräume entstehen (Brasser et al., 2008a).

Das mechanische Verhalten von Gesteinen unter Einfluss von Spannungen wird in Materialmodellen beschrieben. Zusätzlich zu den zeitunabhängigen elastischen Formänderungen werden auch die zeitabhängigen Verformungen sowie teilweise das Fließen des Steinsalzes berücksichtigt. Zusätzlich werden dilatante Deformationen, welche durch das plastische Fließen bedingt sind, in die Betrachtung eines viskoplastischen Stoffmodelles mit einbezogen. Das konstante Fließen des Steinsalzes hängt dabei von der Temperatur  $T$  sowie vom effektiv wirksamen Stress  $\sigma_{\text{eff}}$  ab. Die das Verhalten beeinflussenden Parameter werden, soweit nach derzeitigem Kenntnisstand möglich, unter 3.1.6 und 3.1.7 quantifiziert.

### **3.1.6 Spezifische Parameter im Steinsalz mit Bezug auf den Referenzstandort Gorleben**

#### **3.1.6.1 Kenntnisstand der Parameter**

In dem vorliegenden Dokument soll der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik dargestellt werden. Dies beinhaltet neben den allgemeinen hydraulischen, geomechanischen und geochemischen Parametern im Arbeitspaket 3 auch die Recherche und Auflistung von standortspezifischen Parametern. Für ein mögliches Endlager im Steinsalz beziehen die Autoren diese Angaben auf den Referenzstandort des Forschungsbergwerkes Gorleben. Dies stellt keine Fixierung auf diesen Standort für weitere Arbeiten dar, sondern spiegelt den Stand der vorliegenden Forschung wider, der für diesen Standort außerordentlich umfassend ist.

Das Erkundungsbergwerk Gorleben wurde seit 1979 von Übertage und seit 1986 untertägig erkundet. Für den Referenzstandort liegt somit der umfassendste Wissenstand zu Parametern für einen möglichen deutschen Endlagerstandort vor.

Die geomechanisch - geotechnischen Parameter des im Salzstock Gorleben anstehenden Steinsalzes sind sehr umfassend in der „Beschreibung Gorleben“ Teile 1 bis 4, insbesondere im Teil 4, „Geotechnische Erkundung“ beschrieben und dargestellt. Diesbezüglich soll an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung gegeben und auf die genannten Berichte der BGR (Klinge et al., 2007), (Köthe et al., 2007), (Bornemann et al., 2008), (Bräuer et al., 2011) verwiesen werden.

### 3.1.6.2 Teufenlage des Einlagerungsbereiches

Die beiden Schächte des derzeitigen Erkundungsbergwerkes Gorleben haben Teufen von 840 m und 933 m. Das entspricht Tiefen von ca. 820m und 913 m NN. Die derzeitige Erkundungssohle befindet sich auf der 840 m Sohle. Im Erkundungsbergwerk Gorleben existieren weitere Sohlen in Teufen von 820 m, 880 m sowie, auf den Bereich in direkter Schachtnähe beschränkt, in 930 m.

Nach dem heutigen Wissensstand wäre bei einem positiven Ausgang des atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens der Bau eines Endlagers in diesem Teufenbereich zwischen ca. 800 m bis etwa 1000 m wahrscheinlich. Daher wird dieser Teufenbereich als Teufenlage des Einlagerungsbereiches angenommen.

### 3.1.6.3 Stoffgesetze für das thermomechanische Kriechverhalten von Steinsalz

Betrachtet man das mechanische Verhalten von Steinsalz, so gilt es eine Vielzahl von Erscheinungen zu berücksichtigen. Dazu zählen transientes wie stationäres Kriechen, Dilatanz und Schädigung, Bruch und Kriechbruch sowie das Verhalten nach einem erfolgten Bruch und die danach erhalten gebliebene Restfestigkeit (Hampel et al., 2006).

Zur Beschreibung dieses Verhaltens ist die Anwendung eines zeitabhängigen Stoffgesetzes notwendig.

Unter der Annahme, dass Fließen, Verfestigung, sowie die Erfüllung von Fließ- und Verfestigungsbedingungen stets parallel eintreten, wurde beispielsweise in (Klee et al., 1981) ein allgemeines, inelastisches sowie zeitabhängiges Stoffgesetz hergeleitet. Mithilfe dessen lassen sich mit Hilfe geeigneter Grenzübergänge wiederum die viskoplastischen Stoffgesetze von Hohenemser, Prager und Perzyna, das aus der klassischen Plastizitätstheorie bekannte Fließgesetz von Levi, v. Mises und Melan als auch das verallgemeinerte Kriechgesetz von Norton herleiten (Klee et al., 1981). Die Entwicklung dieser komplexen Beschreibungen viskoplastischen Materialverhaltens kann vom erwähnten Norton Kriechansatz über die Arbeiten von Hunsche und Schulze (Hunsche & Schulze, 1994) in deren Ergebnis die Kriechgesetze BGRa und BGRb entstanden zu weiterführende Modellen von Hou, Lux, Salzer, Günther, Minkley und Pudewills verfolgt werden (Hou, 1997), (Hou, 2002), (Hampel et al., 2006), (Günther & Salzer, 2007), (Minkley & Mühlbauer, 2007), (Pudewills, 2011).

Die stetige Weiterentwicklung versuchstechnischer- und rechentechnischer Möglichkeiten führte dabei zu einer fortschreitenden Entwicklung des Verständnisses dieser komplexen Mechanismen.

Die mit Hilfe eines Stoffmodelles berechenbare Gesamtkriechrate  $\dot{\alpha}_{cr}^s$  von Salzgesteinen setzt sich immer aus den schädigungsfreien primären  $\dot{\alpha}_{cr}^p$  und sekundären  $\dot{\alpha}_{cr}^s$  Kriechanteilen

sowie aus einem Schädigungsinduzierten Anteil  $\dot{\epsilon}_{cr}^d$  zusammen. Das primäre Kriechen  $\dot{\epsilon}_{cr}^p$  wird oftmals auch als transientes Kriechen  $\dot{\epsilon}_{cr}^{tr}$  bezeichnet (Günther, 2009).

Ein umfassender Überblick über Stoffmodelle von Salzgesteinen wird unter anderem in der Dissertation von Günther (Günther, 2009), in Arbeiten von Hou (Hou, 2002), (Hou, 1997), Düsterloh (Düsterloh, 2009), sowie durch das BMBF Verbundvorhaben „Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ (Hampel et al., 2006); (Hampel, 2007) gegeben.

Während der Bearbeitung dieses Verbundvorhabens (Hampel et al., 2006) wurden von den fünf ausführenden Projektpartnern aktuell für Steinsalz gebräuchliche Stoffgesetze mit Hilfe von Benchmarkrechnungen unter Verwendung eines einheitlichen Kennwertsatzes verglichen. Dies erfolgte durch Nachrechnung von Versuchen und Belastungsfällen. In Tabelle 3-3 sind die Projektpartner sowie die von ihnen im Rahmen des Projektes bearbeiteten Stoffmodelle mit den jeweiligen Simulationsprogrammen, in welche die Berechnungsansätze implementiert wurden, aufgeführt.

**Tabelle 3-3: Übersicht der Projektpartner des BMBF Verbundvorhabens, mit Auflistung der verglichenen Stoffgesetze und der zur Rechnung verwendeten Software**

Projektpartner	Stoffgesetze	zur Modellierung verwendete Programmsysteme
BGR Hannover	Composite-Dilatanz-Modell	JIFE (FEM)
A. Hampel	Composite-Dilatanz-Modell	FLAC (FDM)
FZK-INE	transientes und stationäres Kriechen, + FZK-Modell für Dilatanz	ADINA, MAUS (FEM)
IfG Leipzig	Modell Günther/Salzer Modell Minkley	FLAC (FDM), UDEC (DE)
TU Clausthal	Modell Hou/Lux	FLAC (FDM), MISES3 (FEM)
Uni Hannover	IUB (Weiterentwicklung des MDCF Modells von Sandia)	UT2D (FEM), FLAC (FDM)

In (Hampel et al., 2006) wird erneut die Notwendigkeit einer intensiven und speziellen Anpassung der in den verwendeten Stoffmodellen genutzten Parameter an die zu beschreibenden Gesteinstypen deutlich. Wenn diese Anpassung gewissenhaft und umfassend erfolgt, kann von einer hohen Übereinstimmung der rechnerisch ermittelten Verformungen im Vergleich zu versuchstechnisch gemessenen Verformungen ausgegangen werden (Hampel et al., 2006), (Hampel et al, 2007).

Im weiterführenden Verbundvorhaben „Verbundprojekt II zum Stoffgesetzvergleich“ (Pudewills, 2011) konnten mittels Vergleichsrechnungen an einer 50 Jahre alten Streckenauffahrung in der Salzgrube Angersdorf (Sachsen Anhalt) ebenfalls hohe Übereinstimmungen zwischen numerischen Berechnungen und gemessenen Verformungen erzielt werden.

In den genannten Projekten konnte, unter der Voraussetzung der Ermittlung genauer Parameterwerte für die zu berechnenden Lithologien, die Möglichkeit einer genauen Berechnung zeitabhängiger Verformungen im Steinsalz nachgewiesen werden.

#### **3.1.6.4 Stoffgesetze für das thermomechanische Kriechverhalten von Steinsalz mit Bezug auf den Referenzstandort**

Für Steinsalz existiert eine Vielzahl komplexer Stoffmodelle. Ein Großteil der Modelle zeigt einen ähnlich hohen Entwicklungsstand, so dass mit diesen Modellen eine sehr präzise Vorhersage des thermoplastischen Verhaltens von Steinsalz möglich ist (Bräuer et al., 2011), (Hampel & Schulze, 2007), (Hou, 1997), (Hou, 2002).

Für eine genaue Beschreibung des Kriechverhaltens eines Gesteins müssen die Parameter der Materialgesetze wie in Abschnitt 3.1.1 und 3.1.6.3 bereits beschrieben, durch intensive Untersuchungen an Proben der zu beschreibenden Gesteine, statistisch abgesichert ermittelt werden.

Aus diesem Grund werden an dieser Stelle die im geotechnischen Erkundungsbericht für den potenziellen Endlagerstandort Gorleben (Bräuer et al., 2011) aufgeführten und beschriebenen Gesetzmäßigkeiten wiedergegeben.

Die Modelle BGRa und BGRb werden durch das Composite Dilatancy Modell (CDM) charakterisiert (Hampel & Schulze, 2007), (Bräuer et al., 2011).

In den Arbeiten der BGR (z. B. (Bräuer et al., 2011)) werden die Lithologien in Kriechklassen (K) von 1 bis 6 eingeteilt. Diese Klassen spiegeln das Langzeitkriechverhalten der jeweiligen Gesteine wider und gehen in die Berechnungen des stationären Kriechens nach [BGRa] und [BGRb] ein. Die folgenden Formeln beschreiben das temperatur- und spannungsabhängige Kriechverhalten von Steinsalz unter den jeweiligen Bedingungen.

Diese Kriechgesetze sind gut geeignet, Langzeitvorhersagen zur zeitlichen und räumlichen Entwicklungen von Deformationen und Spannungen, welche auf Kriechen basieren, zu treffen (Bräuer et al., 2011).

Salzkriechgesetz nach BGRa (Formel (3-13) (Bräuer et al., 2011):

Dieses an Asse Steinsalz entwickelte Salzkriechgesetz kann für Temperaturen bis zu 30°C und relative Luftfeuchten von ~ 45% angewandt werden.

Für die unterschiedlichen Kriecheigenschaften verschiedener Stratigraphien (Homogenzonen) wird der Strukturfaktor A (Formeln (3-13) sowie (3-15)) durch den von der anzuwendenden Kriechklasse bestimmten Faktor V Formeln (3-14) sowie (3-16)) ersetzt (Bräuer et al., 2011)

Es werden durch den Faktor V die unterschiedlichen Kriechkapazitäten der verschiedenen Salztypen berücksichtigt. Der Kriechfaktor wird unter einaxialer Belastung unter Anpassung an die bei 45% relativer Luftfeuchte und Temperaturen von bis zu 30 °C ermittelten stationären Kriechraten bestimmt (Bräuer et al., 2011).

$$\dot{\epsilon}_s = A * \exp\left(\frac{-Q}{R * T}\right) * \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad (3-13)$$

$$\dot{\epsilon}_s = V * \exp\left(\frac{-Q}{R * T}\right) * \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad (3-14)$$

$$V = \frac{2^K}{32} \quad (V = 1 \text{ bei } K = 5)$$

$\dot{\epsilon}_s$  = Kriechrate

A = 0,18 d<sup>-1</sup>

Q = 54 kJ/mol

R = 8,314\*10<sup>-3</sup> kJ/(mol\*K)

n = 5

$\sigma^*$  = 1 MPa (standartisiert)

T = Temperatur in K

K = Kriechklasse der homogenen Zone

V = Faktor, welcher sich aus der Kriechklasse ergibt

Die angegebenen Werte beziehen sich auf das am Referenzstandort Gorleben anstehende Steinsalz.

Salzkriechgesetz nach BGRb (Bräuer et al., 2011):

Das Kriechgesetz BGRb wurde an Steinsalz aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben entwickelt und besteht aus zwei Modulen. Es berücksichtigt die Temperaturabhängigkeit von zwei parallel ablaufenden Deformationsmechanismen. Es kann für Temperaturen über 30 °C bei relativen Luftfeuchten unter 45% genutzt werden, wenn luftfeuchtigkeitsbedingtes Kriechen keine Rolle mehr spielt. Der Faktor V wird analog zu BGRa bestimmt.

$$\dot{\epsilon}_s = \left[ A_1 * \exp\left(\frac{-Q_1}{R * T}\right) + A_2 * \exp\left(\frac{-Q_2}{R * T}\right) \right] * \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad (3-15)$$

$$\dot{\epsilon}_s = V * \left[ \exp\left(\frac{-Q_1}{R * T}\right) + \exp\left(\frac{-Q_2}{R * T}\right) \right] * \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad V = \frac{2^K}{32} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ d}^{-1} \\ A_2 &= 2,1 \cdot 10^6 \text{ d}^{-1} \\ Q_1 &= 42 \text{ kJ/mol} \\ Q_2 &= 113 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Die angegebenen Werte beziehen sich auf das am Referenzstandort Gorleben anstehende Steinsalz.

Bei Berücksichtigung der dilatanten Verformungskomponente von Steinsalz muss ein viskoplastisches Verhalten beschreibendes Stoffgesetz, wie das nach Drucker-Prager, zur Anwendung kommen ((Bräuer et al., 2011), S.133).

Stoffgesetz für Steinsalz nach Drucker-Prager ((Bräuer et al., 2011), S.133):

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta} * \langle F \rangle * \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}}; \quad Q = F \quad (3-17)$$

- $\eta$  Viskosität in MPa\*d
- $Q$  Spannungspotential (in MPa)
- $\langle F \rangle$   $\begin{cases} 0, & \text{wenn } F < 0 \\ F, & \text{wenn } F \geq 0 \end{cases}$  (in MPa)

$$F = 0 = \alpha * J_1 + \sqrt{J_2^D} - k$$

- $J_1$  erste Invariante des Spannungstensors (in MPa)
- $J_2^D$  zweite Invariante der Spannung

Die Parameter der obigen Gleichung werden so definiert, dass eine ausreichende Übereinstimmung zwischen der hier verwendeten Fließgrenze und der Dilatanz nach (Cristescu & Hunsche, 1998) erreicht werden kann ((Bräuer et al., 2011), S.133).

Es wurden folgende Parameter genutzt:

$$\alpha = 1/2\sqrt{3} \approx 0,2887$$

$$k = 0,0$$

Das benutzte viskoplastische Modell erlaubt die Beschreibung des dilatanten Materialverhaltens oberhalb der Dilatanzgrenze. Die zusätzliche Spannung, welche aus dem viskoplastischen Verhalten resultiert, bewirkt eine Umverteilung der Spannungen, wodurch diese zusätzlich wirkende Spannung abgebaut wird. Nach einem angemessenen Zeitraum befinden sich die Spannungszustände an allen Punkten an oder unterhalb der Dilatanzgrenze. Der Bereich, in dem die Spannungsbedingungen während der Berechnungen in einem Punkt oberhalb der Dilatanzgrenze liegen, wird als entfestigte Zone beschrieben. Die höchsten im



Material auftretenden Spannungen sind durch die Zone zwischen der Dilatanzgrenze und der maximal möglichen Entfestigungszone zu suchen. Die maximale wirksame Spannung des Materials tritt im Bereich unterhalb der Dilatanzgrenze auf. Die auf diese Weise abgeschätzte Größe einer Entfestigungszone kann damit als konservative Einschätzung gelten ((Bräuer et al., 2011), S. 134).

Der viskose Anteil im viskoplastischen Modell ist notwendig, um sicherzustellen, dass die Spannungszustände im Material zum Zeitpunkt der Auswertung auf oder unterhalb der Dilatanzgrenze liegen. Der Einfluss von Feuchtigkeit auf das Kriechverhalten wird in den Kriechgesetzen BGRa und BGRb über die Kriechfaktoren berücksichtigt.

### **3.1.7 Standortspezifische Parameter im Tonstein an den identifizierten potenziellen Modellregionen**

Die BGR hat 2007 mit der Studie „Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen“ eine Auflistung von untersuchungswürdigen Tonstein- und Tonformationen, welche eine Basis für die Identifizierung möglicher alternativer Endlagerstandorte darstellt (Hoth et al., 2007).

Mit Hilfe dieser Studie konnten zwei Modellregionen in Süddeutschland sowie ein größerer Bereich im Norddeutschen Becken als potenziell untersuchenswert identifiziert werden. In Süddeutschland handelt es sich dabei zum einen um ein Gebiet an der Bayerisch- Baden-Württembergischen Grenze in der Nähe von Neu-Ulm, sowie andererseits um ein kleines Gebiet an der Schweizer Grenze im Züricher Weinland (Insellage auf Schweizer Territorium). Die relative Großflächigkeit der untersuchungswürdigen norddeutschen Tonformationen macht weitere Einschränkungen für eine nähere Betrachtung möglicher Endlagerstandorte möglich und notwendig. Diese Einschränkungen werden im Abschlussbericht des FuE-Vorhabens GENESIS (Jobmann et al., 2007) umfassend behandelt. Im Ergebnis werden ebenfalls zwei mögliche Modellregionen in Norddeutschland identifiziert. Es handelt sich dabei um den Standort Nord 1 im Niedersächsischen Becken nordwestlich von Hannover, sowie um den Standort Nord 2 zwischen Minden und Hameln (Pöhler et al., 2010).

Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des potenziellen Standortes Süd 2, der Lage des Standortes im Opalinuston, der Nähe zur Sondierbohrung Benken, die zentraler Bestandteil des Entsorgungsnachweises der Nagra ist, und der damit möglichen Parallelisierung des Standortes mit Schweizer Untersuchungsergebnissen wird nur der Standort Süd 1 im folgenden intensiveren Betrachtungen unterzogen. Für den Standort Nord 2 ist der geowissenschaftliche Kenntnisstand gering, weshalb der Standort im Folgenden nicht näher betrachtet wird. Die geowissenschaftlichen Informationen für den möglichen Standort Nord 1 erwiesen sich als wesentlich belastbarer, so dass dieser ebenfalls im Folgenden kurz charakterisiert werden soll.

### 3.1.7.1 Teufenlage der potenziellen Standorte Nord 1 und Süd 1

Am potenziellen Endlagerstandort Nord 1 im Niedersächsischen Becken werden die weit-räumig verbreiteten Unterkreidetone als potenzielle Wirtsgesteine ausgewiesen. In dieser Region konnten durchgängige Tonstein-Profile mit Gesamtmächtigkeiten von über 1500 m ausgewiesen werden (Pöhler et al., 2010).

Der geowissenschaftliche Kenntnisstand der Region kann im Allgemeinen als gut beschrieben werden. In den Sedimenten der Unterkreide und des Jura wurden im West- und Zentralteil des Niedersächsischen Beckens weit verbreitet Kohlenwasserstofflagerstätten nachgewiesen.

Diese Tatsache führt zum Ausschluss der genannten Bereiche (West- und Zentralteil des Niedersächsischen Beckens) für eine weitere Betrachtung (Pöhler et al., 2010).

Das östliche Niedersächsische Becken wird durch Salzkissen und -stöcke in Becken und Schwellen mit sehr schwierigen Lagerungsverhältnissen in diesen Bereichen unterteilt. Am Nord- sowie am Südrand des Beckens treten Bruchstrukturen auf (Pöhler et al., 2010).

Nach (Pöhler et al., 2010) ist es im östlichen Bereich des Niedersächsischen Beckens möglich, mehrere Modellregionen auszuweisen, in welchen die für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle vom AkEnd gesetzten Mindestanforderungen erfüllt werden.

Auf Basis der aufgeführten Auswahlkriterien wird in (Pöhler et al., 2010) eine Modellregion nordöstlich von Hannover mit einem möglichen Endlagerstandort in ca. 300 – 400 m Teufe in einem ca. 250 m mächtigen mergeligen Tonstein des Apt beschrieben. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich liegt ca. 250 m unter der Geländeoberkante.

In einer von der BGR veröffentlichten Arbeit (Keller, 2009) wird von möglichen, durch eine Eiszeit initiierten subglazialen Rinnenbildungen mit bis zu 500 m Tiefe ausgegangen. Eine so tiefgreifende Erosion wird hauptsächlich an Stellen auftreten, an denen die Tonsteine nicht von harten und undurchlässigen oberkretazischen Karbonaten überdeckt sind. Durch die Entstehung derartige Rinnensysteme würde die Barriereintegrität des Wirtsgesteines mindestens geschwächt werden, möglicherweise könnte es sogar zu einer Erosion bis in den Endlagerstandort (am Modellstandort Nord 1) kommen (Keller, 2009).

Die Eignung des potenziellen Endlagerstandortes Nord 1 wird daher vor diesem Hintergrund kontrovers diskutiert.

„Aus der Gegenüberstellung zwischen den möglichen Wirtsgesteinen Tonstein bzw. Steinsalz in Norddeutschland ergibt sich somit, dass für die Endlagerung hochradioaktiver und wärmeentwickelnder Abfälle Tongesteine weniger geeignet sind als Salzgesteine in, durch Gewinnungsbergbau oder anderen Aktivitäten, unbeeinflussten Salzstöcken. Dies gilt be-

sonders für Standorte in Norddeutschland, die untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in einer Tiefe ab > 300 m bis etwa 500 m aufweisen.“ (Keller, 2009), S. 19).

Der Modellstandort Süd 1 liegt südlich der schwäbischen Alb in der Nähe von Ulm. In einer Tiefe von ca. 750 bis 850 m steht hier eine etwa 150 m mächtige Schicht Opalinuston an. Diese potentielle Wirtsgesteinsschicht wird von weiteren jurassischen Sedimenten überlagert. Oberhalb des Malm folgt eine Transgression, welche von tertiären Sedimentschichten bis zur Geländeoberkante überlagert wird (Pöhler et al., 2010).

Es ist bekannt, dass im Bereich der Modellregion Süd 1 die Schichten flach mit 5° – 6° vornehmlich nach SE einfallen und dass keine großen Störungssysteme mit bedeutenden Versatzbeträgen zu erwarten sind. Im Allgemeinen muss der geowissenschaftliche Kenntnisstand in dieser Region jedoch als sehr gering eingestuft werden (Pöhler et al., 2010).

### 3.1.7.2 Auf die möglichen Standorte im Tonstein anwendbare Stoffgesetze

Für die Fragestellung der geotechnischen Sicherheit von Endlagerstandorten spielen die plastischen Langzeitverformungen von Tonstein eine bedeutende Rolle, so dass auch hier der Gebrauch von Stoffgesetzen zur Modellierung des Langzeitverhaltens der Hohlräume notwendig ist. Trotz intensiver Forschungstätigkeiten hinsichtlich der Gesetzmäßigkeiten des Materialverhaltens von Tonsteinen in den letzten Dekaden gibt es im Vergleich zu Salzgesteinen dennoch erheblichen Nachholbedarf (Hou, 2002).

In (Hou, 2002) werden Gemeinsamkeiten von Ton- und Salzgesteinen ausführlich behandelt. Weiterhin werden die Eigenschaften und Besonderheiten der Gesteine der Untersuchungsstandorte Mont Terri (Opalinuston) und Bure (Argillite de l'Est Callovo Oxfordian) ausgeführt.

Tongesteine zeigen bezüglich ihres Materialverhaltens deutliche Parallelen zu Salzgestein. Im Unterschied zu Salinargesteinen zeigen Tonsteine jedoch eine deutliche Abhängigkeit ihrer mechanischen Eigenschaften von der Trockendichte und dem natürlichen Wassergehalt. Weiterhin reagieren Tonsteine mit Quellen auf eine Aufsättigung mit Wasser. Im Felslabor Mont Terri wurde die Ausbreitung der EDZ mit 0,5 m bis 2,0 m an der Auffahrung einer Strecke mit einem Querschnitt von 10 m<sup>2</sup> ermittelt. Eine Auflockerungszone mit dieser Eindringtiefe deutet bei einem derartigen Streckenquerschnitt auf eine allgemein größere Ausdehnung der EDZ als im Salinar hin.

Generell zeigen Tonsteine der Art des Opalinustones deutlich geringere Kriechraten als Salzgesteine (Hou, 2002).

Aufgrund der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Tongesteinen von deren Trockendichte und Wassergehalt wurde von (Su & Ozanam, 1999) eine Klassifikation für Tonsteine vorgeschlagen. Diese Klassifikation ist in Tabelle 3-4 dargestellt.

**Tabelle 3-4: Klassifikation für Tongesteine nach (Su & Ozanam, 1999) in ((Hou, 2002) S. 86)**

Parameter	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Trockendichte [g/cm <sup>3</sup> ]	< 2,15	2,15 – 2,35	> 2,35
Wassergehalt [Gew %]	> 9,5	5,5 – 9,5	< 5,5
Porosität [%]	> 20	13 – 20	< 13
Schallgeschwindigkeit [m/s]	< 2000	2000 – 3000	> 3000
einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	< 15	15 – 35	> 35
Deformationsverhalten	duktil	hybrid	spröd

Aus Tabelle 3-4 ergibt sich, dass sowohl der Tonstein aus Bure (Ost Argilites) als auch der Opalinuston aus dem Schweizer Felslabor Mont Terri der Klasse 2 angehören (Hou, 2002).

Auch für Tonstein werden Stoffmodelle mit Hilfe des Kontinuumsmechanischen Ansatzes aufgestellt. Speziell mit dem Bezug auf die Suche und Erforschung von Endlagerstandorten im Tonstein wurden erste Arbeiten zur modellhaften Darstellung des Kriechverhaltens von Tonstein um 1990 im Auftrag der NAGRA (NAGRA, 1990) durchgeführt.

In Tabelle 3-5 werden für Tonstein anwendbare Stoffgesetze aufgeführt, welche für möglicherweise endlagerrelevante Tonsteininformationen verifiziert wurden.

Für die Modellierung der Eigenschaften von Tonsteinen ist nach heutigem Kenntnisstand vor allem das Modell Hou/Lux-T (Hou, 2002) am weitesten entwickelt. Dieses auf dem Lubby 2 Modell aufbauende Stoffgesetz erlangt damit große Bedeutung. Das ursprünglich für Salzgestein entwickelte Stoffmodell Hou/Lux wird in (Hou, 2002) als Hou/Lux-T für die Beschreibung von Tonsteinen modifiziert (Hou, 2002). Diese Modifikation erfolgte weitestgehend unter Verwendung von Labordaten aus der Literatur. Ein Teil der für eine Verifizierung des Modellansatzes an den Gesteinen von Bure und Mont Terri benötigten Parameter konnte bislang noch nicht explizit abgeleitet werden, so dass sie auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Literatur abgeschätzt wurden.

**Tabelle 3-5: Auflistung von Stoffgesetzen für Tonstein und deren Anwendbarkeit auf spezielle Tonsteininformationen (Jobmann & Li, 2012), (Jobmann, 2012)**

Stoffmodell	Erfolgte Anwendungstests				Referenzpublikationen
	Bure	Opalinuston	Unterkreide Ton	Unterkreide Ton / Konrad	
Subiquitous		X	X		(Vermeer & de Borst, 1984), (NAGRA, 2002b), (Jobmann et al., 2007), (Czaikowski et al., 2005)
Drucker-Prager		X	X		(Jobmann, 2007), (Czaikowski et al., 2005)
Kombination von Hooke, Mohr-Coulomb und Norton	X				(Jobmann, 2007)
BBM model (CODE-BRIGHT)	X	X			(Zhang et al., 2007), (Zhang et al., 2004b), (Zhang et al., 2003), (Vaunat & Olivella, 2002)
Damage-elastoplastic model for argillaceous rock (CODE-BRIGHT)	X	X			(Gens et al., 1988), (Vaunat & Olivella, 2002), (Vaunat & Gens, 2004), (Gens & Olivella, 2006), (Göbel et al., 2006), (Gens et al., 2007), (Zhang et al., 2010)
Salzer-Kriechgesetz		X			(Salzer et al., 1998), (NAGRA, 2002b)
a unified plastic and viscoplastic model	X				(Jia et al., 2007), (Jia et al., 2008), (Zhou et al., 2008)
a modified elastic-perfectly plastic Drucker-Prager model	X				(Lublinter, 1990), (Laoufa et al., 2008)
a micromechanical model for the elasto-viscoplastic and damage behavior of a cohesive geomaterial	X				(Drucker & Prager, 1952), (Perzyna, 1962), (Cumier et al, 1995), (Welemane & Cormery, 2003), (Guéry et al., 2008)
Hoek-Brown	X				(Zhang & Rothfuchs, 2008)
modifiziertes cam-clay-Modell		X			(NAGRA, 2002b)
modified Mohr Coulomb		X			(Popp & Salzer, 2007); (Popp et al., 2008)
Lubby 2				X	(Czaikowski et al., 2005)
Hou/Lux-T	X	X		X	(Hou, 2002), (Czaikowski et al., 2005)

In (Hou, 2002) wird eine Verifizierung der Modellansätze von Ghoreychy (Ghoreychi, 1997), (Ghoreychi, 1999) und Hou/Lux-T (Hou, 2002) anhand von Labordaten von Proben des in Bure anstehenden Tonsteines erläutert. Eine umfassende Prüfung und Verifizierung verschiedener Modellansätze mit Hilfe von Benchmarkrechnungen, wie diese in (Hampel et al, 2007), (Hampel et al., 2006) und (Pudewills, 2011) für Steinsalz stattgefunden hat, wurde für Tonstein bislang noch nicht durchgeführt.

Die in (Hoth et al., 2007) ausgewiesenen potentiell eignungshöflichen Tonsteininformationen sind alle gänzlich unerkundet. Da somit keinerlei validierte spezifische geologische Daten für die anstehenden Gesteine zur Verfügung stehen, kann für diese Standorte derzeit weder die

Ermittlung spezifischer Parameter noch die Entwicklung spezifischer Modelle erfolgen (siehe Abschnitt 3.1.1).

Für den französischen Argilite de l'Est Callovo Oxfordian wurden in (Su, 2007) Materialmodelle ähnlich des Benchmarkings in (Hampel et al, 2007), (Hampel et al., 2006) und (Pudewills, 2011) entwickelt.

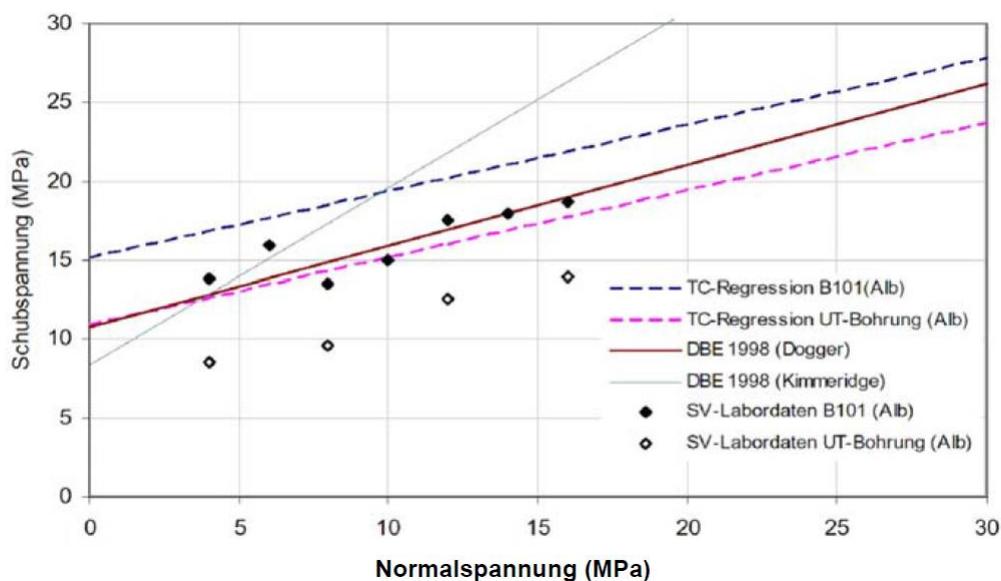
### 3.1.7.3 Parameterabschätzung für die möglichen Standorte N1 und S1

#### 3.1.7.3.1 Generischer Standort Nord 1

Das Wirtsgestein im Bereich des Referenzmodelles Nord 1 ist ein unterkretazischer Tonmergel des Apt. Die Materialparameter der Tonsteine werden vornehmlich aus Untersuchungsergebnissen der Tonsteine am Endlagerstandort Schacht Konrad übernommen (Jobmann et al., 2007).

Mit dieser Analogbetrachtung kann nach (Wittke, 1991) der Elastizitätsmodul mit 4 GPa sowie die Poissonzahl mit 0,35 abgeschätzt werden. Der Übergang der Spitzenfestigkeit zur Restfestigkeit wird als Bruchverzerrung beschrieben. Nach (Lux, 2005) kann für den am Schacht Konrad anstehenden Tonstein die Bruchverzerrung mit 1,5% angenommen werden. Der Dilatanzwinkel beträgt 0°. Sowohl der Wassergehalt als auch die Porosität werden nach (Wittke, 1991) analog zu den Bedingungen in Schacht Konrad mit 7,5% angenommen.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Gesteine in einem isotropen Grundspannungszustand befinden (Jobmann et al., 2007).



**Abbildung 3-4:** Ergebnisse der Scherfestigkeit von Tonsteinproben (Schachtanlage Konrad). Es wird zwischen von übertage bzw. von untertage aus gewonnenem Bohrkernmaterial unterschieden ((Lux, 2005) in (Jobmann et al., 2007))

### 3.1.7.3.2 Generischer Standort Süd 1

Das Wirtsgestein für den generischen Standort Süd 1 sind Tonsteine aus dem Dogger alpha (Opalinuston).

Der geologische Kenntnisstand zu den Eigenschaften der Tonsteinschichten am Standort Süd 1 muss wie oben bereits erwähnt als äußerst gering bezeichnet werden. Deshalb werden für den generischen Standort Süd 1 zumindest vorläufig die gesteinsmechanischen Parameter genutzt, welche die NAGRA für ihren Standort im Opalinuston ermittelt hat (siehe Tabelle 3-6).

**Tabelle 3-6: Felsmechanische Kennziffern des Opalinustons [geändert nach: (NAGRA, 2002b)]**

Eigenschaften	Parameter	Variationsbereich	Mittelwert	Einheit
Dichte und elastische Eigenschaften des Gebirges	Dichte	2,485 - 2,565	2,53	g/cm <sup>3</sup>
	E-Modul parallel zur Schichtung	5,5 - 15,5	10,50	GPa
	E-Modul senkrecht zur Schichtung	2,5 - 7,5	5,00	GPa
	Poissonzahl		0,27	
Festigkeitseigenschaften der Schichtpakete	Spitzenreibungswinkel	21,0 - 24,6	22,80	°
	Restreibungswinkel	20,0 - 24,0	22,00	°
	Spitzenkohäsion	6,9 - 8,6	7,75	MPa
	Restkohäsion	3,5 - 4,3	3,90	MPa
	Dilatanzwinkel (Spitze und Rest)		0,00	°
	Zugfestigkeit	1,0 - 2,5	1,75	MPa
Festigkeitseigenschaften der Schichtung	Spitzenreibungswinkel	20,0 - 24,1	22	°
	Restreibungswinkel	20,0 - 22,0	21	°
	Spitzenkohäsion	1,7 - 1,9	1,80	MPa
	Restkohäsion	0,7 - 1,0	0,85	MPa
	Dilatanzwinkel (Spitze und Rest)	0 - 5,0	2,50	°
	Zugfestigkeit	0 - 1,2	0,60	MPa
Sonstige Eigenschaften des Gebirges	Porosität	9 - 13	11,00	%
	Temperatur		38,00	°C

### 3.1.7.3.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann für mögliche Endlagerstandorte im Tonstein festgestellt werden, dass die zu erwartenden gesteinsmechanischen Parameter zwischen den Boom-Clay (Belgien) und den für den Opalinuston ermittelten Werten, mit einer deutlichen Tendenz zu den Werten des Opalinustones, liegen werden (siehe Tabelle 3-7). Ferner kann davon ausgegangen werden, dass für den Modellstandort Nord 1 die Parameter, welche für die Tongesteinsschichten von Schacht Konrad ermittelt wurden, vorerst angenommen werden.

**Tabelle 3-7: Vergleichende Darstellung des Wertebereiches bekannter Materialparameter nach: (Gruner, 2011), (Hou, 2002)**

E-Modul	Boom-Clay, Belgien: 0,2 – 0,4 GPa Opalinuston, Schweiz: 4 – 12 GPa
Einachsiale Druckfestigkeit	Boom-Clay, Belgien: 2 MPa Opalinuston, Schweiz: 10 – 16 MPa
Kohäsion	Boom-Clay, Belgien: 100 kPa Opalinuston, Schweiz: 2,2 – 5,5 MPa (Abhängigkeit von $\sigma_1$ )
Kriechverhalten	(Visko-)elasto – plastische Stoffgesetze
Wärmeleitfähigkeit	Boom-Clay, Belgien: ca. 1,5 W/m*K Opalinuston, Schweiz: ca. 0,8 – 1,9 W/m*K

### 3.1.8 Resümee

Es erfolgte eine Zusammenstellung von sowohl rein geomechanischen Eigenschaften als auch der die geomechanischen Eigenschaften beeinflussenden Eigenschaften und in-situ Bedingungen. Für mögliche Endlagerstandorte im Salzgestein wurden die verfügbaren Daten und Eigenschaften des als Referenzstandort definierten Salzstock Gorleben wiedergegeben. Derzeit existieren keine konkreten Überlegungen weiter potentielle Standorte im Steinsalz zu untersuchen.

Im Rahmen einer Studie sind in Deutschland 4 Modellregionen für HAW-Endlager in Tonsteinen betrachtet worden. Die als Nord und Süd 1 und 2 (unter 3.1.7 beschrieben) bezeichneten Gebiete zeigen in Bezug auf die anstehende geologische und räumliche Situation sowie auf den aktuellen Erkundungsgrad sehr unterschiedliche Ausgangssituationen. Die Modellregion Süd 2 zeigt geologisch deutliche Parallelen zum durch die NAGRA erkundeten Standort, weist allerdings eine geographisch ungünstige Lage auf und ist räumlich sehr begrenzt.

Da es derzeit keinen Referenzstandort für die Errichtung eines Endlagerstandortes in Tonformationen gibt und für die benannten möglichen Standorte keine gesicherten standortspezifischen geologischen und geomechanischen Daten vorliegen, können Aussagen zu diesen Standorten lediglich auf Analogieschlüssen beruhen.

## 3.2 Bedingungen in der Auflockerungszone

### 3.2.1 Auflockerungszone im Steinsalz am Beispiel Gorleben Schacht 1

#### 3.2.1.1 Modellvorstellung

Das Berechnungsmodell ist ein quaderförmiges Volumen mit einer horizontalen Breite von 400 m. In vertikaler Richtung repräsentiert das Modell einen Bereich des Salinars zwischen –294 m NN (Modelloberkante) und –906 m NN (Modellunterkante). Der Schacht mit einem Durchmesser von 7,5 m befindet sich in der Mitte des Modells und beginnt unterhalb des Schachtfundamentes und durchörtert das gesamte Modell. Die X-Achse des Modells entspricht der Ost-West-Richtung und die Y-Achse der Nord-Süd-Richtung.

Das Berechnungsmodell hat eine feine Diskretisierung innerhalb des Bereiches  $r = 3,75$  m und  $r = 7,75$  m. Im fein diskretisierten Bereich beträgt der Gitterpunktabstand ca. 0,3 m in horizontaler Richtung. In der Tiefe, in der sich die Dichtelemente befinden, beträgt der Gitterpunktabstand ca. 1,5 m in vertikaler Richtung. Mit zunehmender Entfernung vom Schacht vergrößert sich die Diskretisierung in horizontaler und vertikaler Richtung, um die Gesamtzahl der Modellzonen und damit die Rechenzeit zu minimieren. Abbildung 3-5 stellt die Modelldiskretisierung unter farblicher Kennzeichnung der verwendeten Kriechklassen dar (DBE, 2010).

Die numerische Simulation beinhaltet drei Schritte. In erstem Schritt wird der primäre Gebirgszustand simuliert, dann wird das Gebirge im Bereich des Schachtinnenausbaus aufgeföhren und der Innenausbau eingebaut. Anschließend wird der Schacht gemäß dem in Tabelle 3-8 angegebenen Ablauf aufgeföhren und die Simulation der Gebirgsantwort auf die Aufföhren für 20 Jahre fortgesetzt.

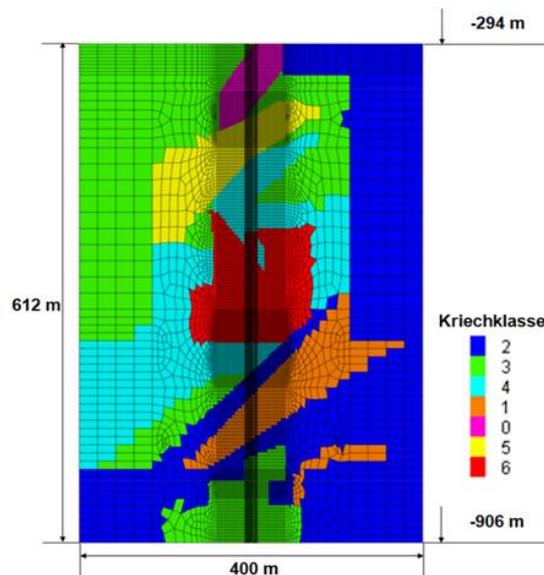


Abbildung 3-5: Modelldiskretisierung mit verwendeten Kriechklassen, Vertikalschnitt durch den Schacht 1 in E-W-Richtung

**Tabelle 3-8: Simulationsablauf / Ausgewählte Ereignisse beim Schachtteufen**

Datum	$t_{Modell}$		Ereignis
	[d]	[a]	
03.04.1994	0	0	Beginn der Modellberechnung Erkundungshorizont EH-350 erreicht (-354 mNN)
29.09.1994	179	0,5	Erkundungshorizont EH-450 erreicht (-455 mNN)
18.01.1995	290	0,8	Erkundungshorizont EH-550 erreicht (-554 mNN)
12.04.1995	374	1,0	Erkundungshorizont EH-650 erreicht (-652 mNN)
30.06.1995	453	1,2	Erkundungshorizont EH-720 erreicht (-719 mNN)
22.11.1995	598	1,6	Modellunterkante erreicht (-906 mNN)
29.03.2014	7300	20,0	Ende der Modellberechnung

### 3.2.1.2 Anfangs- und Randbedingungen

#### Spannung und Verschiebung

Basierend auf den Messungen der BGR ist der Primärspannungszustand in Gorleben isotrop. Die vertikale Spannung entspricht der Auflast der Überdeckung (Heusermann et al., 2003), (BGR, 2003). Das Deckgebirge, das nicht im Berechnungsmodell enthalten ist, hat eine Mächtigkeit von 321m und besteht aus dem quartären und tertiären Gebirge, dem Hutgestein und dem Salinar. Tabelle 3-9 zeigt die geologische Teufe, die Mächtigkeit, die Dichte und die Auflast der entsprechenden Gebirgstteile (Bornemann et al., 2008).

**Tabelle 3-9: Relevante Kennwerte des Deckgebirges**

Überdeckung	OK [m NN]	UK [m NN]	Mächtigkeit $h$ [m]	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Auflast $p$ [MPa]
Quartär und Tertiär	27	-189	216	1920	4,1
Hutgestein	-189	-209	20	2300	0,4
Salinar	-209	-294	85	2200	1,8

Aus der gesamten Auflast des oberen Gebirges ergibt sich für den oberen Rand des Berechnungsmodells eine vertikale Spannung von 6,3 MPa. Als Verschiebungsrandbedingungen werden die Gitterpunkte, die sich an den unteren und seitlichen Modellrändern befinden, in senkrechter Richtung zu ihrer zugehörigen Oberfläche fixiert.

#### Temperatur

An der Modelloberkante wurde eine Temperatur von 25,45°C initialisiert, die auf Grundlage von in (DBE, 2008) angegebenen Messergebnissen und einem Temperaturgradienten im Salinar von 2K/100m ermittelt wurde. An den seitlichen Rändern wurde die Temperatur entsprechend des initialen Temperaturfeldes fixiert und im weiteren Berechnungsablauf konstant gehalten. Die Temperatur am Schachtstoß wird nach der Auffahrung des Schachtes

durch die Schachtbewetterung beeinflusst. Um den Einfluss der Schachtbewetterung zu Berücksichtigung wurden die ersten Zonen hinter dem Schachtstoß mit einer inneren Temperaturrandbedingung beaufschlagt, so dass in diesen Zonen die Temperaturentwicklung vordefiniert ist. Die innere Temperaturrandbedingung wird durch eine Cosinusfunktion an den gemessenen Temperaturverläufen in den verschiedenen Teufen am Schachtstoß angepasst. Die Parameter der Funktion wurden für vier verschiedene Zeiträume angepasst, um die Phasen mit unterschiedlichen Temperaturtrends im Modell abzubilden. In Tabelle 3-10 sind die angepassten Berechnungsformeln aufgelistet:

**Tabelle 3-10: Formeln für die Berechnung der Temperaturrandbedingung**

Abschnitt	T [K]	Tiefabhängiger Anteil
1	$T = 1,382 \cdot \cos(-0,021 \cdot (t - 240,9319)) + C + 273,15$	$C = 29,17 + (-720+h)/100$
2	$T = 4,860 \cdot \cos(0,019 \cdot (t - 240,9319)) + C + 273,15$	$C = 19,07 + (-720+h)/100$
3	$T = 4,090 \cdot \cos(0,018 \cdot (t - 240,9319)) + C + 273,15$	$C = 20,51 + (-720+h)/100$
4	$T = 3,59 \cdot \cos(0,019 \cdot (t - 240,9319)) + C + 273,15$	$C = 20,47 + (-720+h)/100$

t = aktuelle Berechnungszeit im Modell [d]

h = Höhenlage des Gitterpunktes [m u. GOK]

### 3.2.1.3 Stoffmodell und Materialparameter

Das mechanische Verhalten der salinaren Gesteine wird durch das Stoffmodell PWIPP simuliert, das eine Kombination von dem visko-elastischen Modell WIPP und dem plastischen Modell Drucker-Prager ist. Die entsprechende Gesamtverzerrungsrate  $\dot{\epsilon}$  erfasst drei Anteile:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_v + \dot{\epsilon}_p \quad (3-18)$$

mit:

$\dot{\epsilon}_e$  = elastische Verzerrungsrate, 1/d

$\dot{\epsilon}_v$  = viskose Verzerrungsrate, 1/d

$\dot{\epsilon}_p$  = plastische Verzerrungsrate, 1/d

Die elastische Verzerrungsrate ist bestimmt durch das Hookesche Gesetz. Die Dichte wurde mit  $2200 \text{ kg/m}^3$ , das E-Modul mit 25 GPa und die Querdehnungszahl mit 0,27 angesetzt. Für den Kriechanteil wurde der Ansatz BGRa benutzt, wobei für die unterschiedliche Kriechfähigkeit der verschiedenen stratigraphischen Einheiten unterschiedliche Vorfaktoren (Kriechklassen) des BGRa-Ansatzes gemäß (BGR, 2002) gewählt. Es wurden die in (BGR, 2002) für den Schacht 1 ermittelten Homogenbereiche der Kriechklassen verwendet. Die Homogenbereiche wurden gemäß der geologischen Karte, Querschlag 1 West (Bollingerferh et al., 2011) extrapoliert (vgl. Abbildung 3-5). Um das plastische Verhalten zu ermitteln, wurde das Drucker-Prager-Fließkriterium im Stoffmodell verwendet. Die plastischen Parameter wurden

als Funktion vom aktuellen Spannungszustand eingesetzt, womit sich die Fließgrenze nach Drucker-Prager der Dilatanzgrenze nach Cristescu & Hunsche annähert.

Für die im Modell erfassten Gebirgsbereiche wird von thermisch isotropem Verhalten ausgegangen. Wärmeübertragung wird durch Wärmeleitung berücksichtigt und der Einfluss von Konvektion wird vernachlässigt. Der Einfluss der Schachtwetter wird, wie oben beschrieben, durch eine innere Temperaturrandbedingung berücksichtigt. Für das Salzgestein wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 5,3 W/(m·K), eine Wärmekapazität von 855 J/(kg·K) und ein Wärmeausdehnungskoeffizient von  $4 \cdot 10^{-5}$  1/K angesetzt. Alle aufgeführten Parameter werden als temperaturunabhängig angenommen.

### 3.2.1.4 Ergebnisse der numerischen Berechnungen

Es ergab sich ein interessanter Aspekt nach Erreichen der durchschlägigen Bewetterung im Grubengebäude von Schacht 1 zu Schacht 2. Für den Zeitraum nach der Schachterstellung wurde, wie erwartet, eine mit der Teufe zunehmende Auflockerungszone errechnet, die eine horizontale Ausdehnung von 0,25m bis 0,89m beträgt (Abbildung 3-6, oben links).

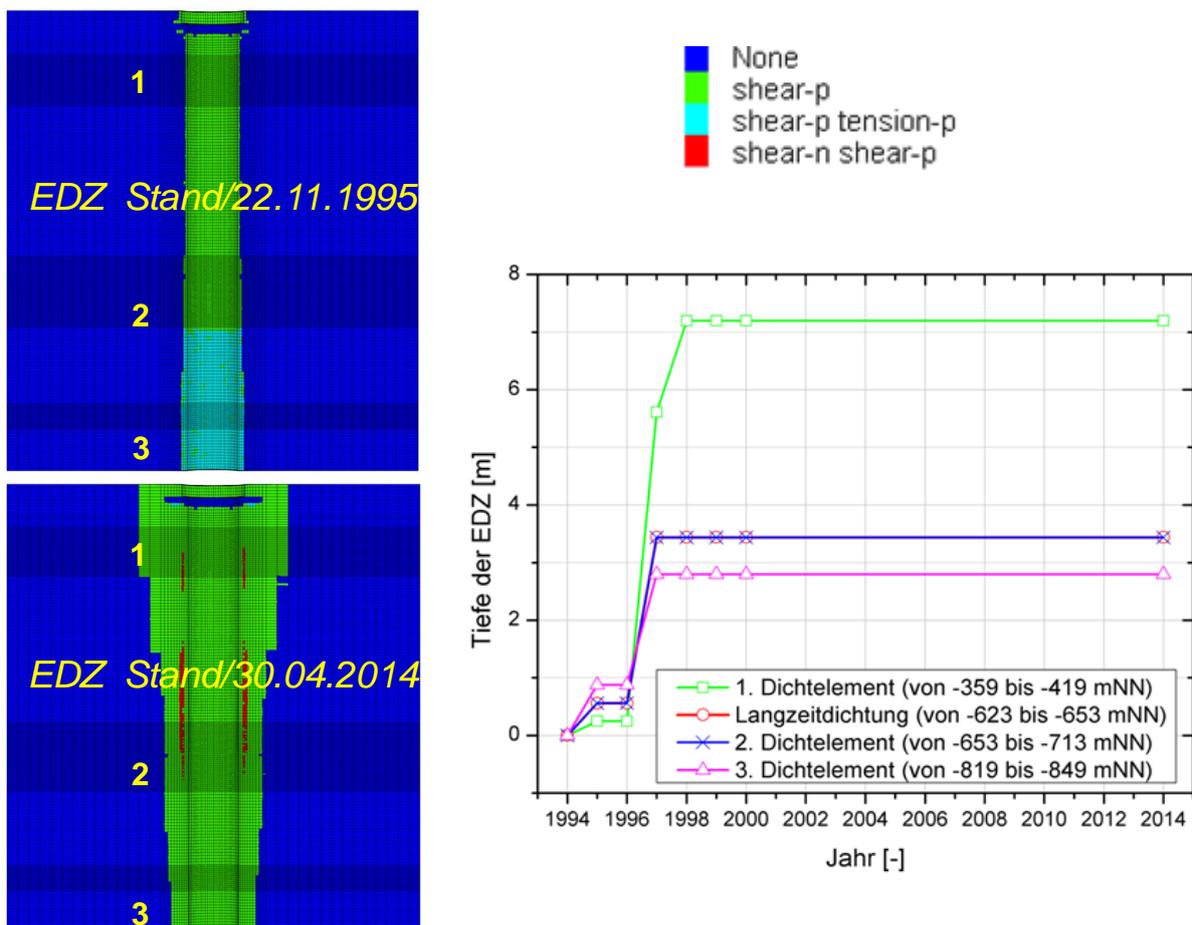


Abbildung 3-6: Zeitliche Entwicklung der Auflockerungszone

Durch den bewetterungsbedingten Temperatureinfluss nach dem Durchschlag, der eine Absenkung der mittleren Temperatur von 20°C ausmachte, wurde die Auflockerungszone im oberen Schachtbereich mit einer Größe von etwa 7m und im unteren Schachtbereich mit einer deutlich kleineren Ausdehnung (2,7m – 3,5m) berechnet, der Trend hat sich also umgekehrt (Abbildung 3-6, unten links). Diese Berechnungen werden durch Kartierungen im Schacht insoweit bestätigt, als an der Schachtkontur vorwiegend horizontal ausgerichtete Risse kartiert wurden. Berechnungen der BGR deuten auf eine Eindringtiefe von mehreren Metern hin (Heusermann & Eickemeier, 2008). Weitere Beobachtungen zeigen aber auch, dass sich diese kartierten Risse durch Einbau einer Schachtheizung zum Temperaturengleich, d. h. durch technische Maßnahmen, mit der Zeit wieder verschlossen haben. Die zusätzlich geschädigten Gebirgsbereiche sind also wieder verheilt. Das rechte Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Auflockerungszone im Salinarbereich des Schachtes, in dem sich die Dichtelemente befinden.

Ergänzend zur numerischen Betrachtung lässt sich die aufgelockerte Zone um die Schachtkontur über das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb ermitteln (Wagner, 2005).

$$\frac{r_0}{r_a} = \left[ \frac{2}{\kappa + 1} * \frac{(\kappa - 1) * p_G * \sigma_D}{\sigma_D} \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}} \quad (3-19)$$

Mit

$$\kappa = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3-20)$$

und

$$p_G = z * \gamma \quad (3-21)$$

- $r_0$  plastische Zone
- $r_a$  Schachtradius
- $p_G$  Gebirgsdruck
- $z$  Teufe
- $\gamma$  Wichte
- $\sigma_D$  einaxiale Druckfestigkeit
- $\varphi$  Winkel der inneren Reibung

Aufgrund der Formulierung von Gleichung (3-19) ergibt sich eine Grenzteufe, ab deren Überschreitung überhaupt erst eine Auflockerungszone ausgewiesen wird, ein Sachverhalt, der nicht der praktischen Erfahrung entspricht. Die empirische Praxis zeigt, dass Bereiche, in denen die kleinste Hauptspannung weniger als 1 MPa beträgt, häufig aufgelockert sind, wobei als Einflussgrößen z. B. Temperaturschwankungen und Schwankungen der Luftfeuchtigkeit angesehen werden können. Deshalb wird neben der Ausdehnung der plastischen Zone als zusätzliche Bedingung mittels Gleichung (3-22) überprüft, in welchem Abstand die Radialspannung bei elastisch angenommenen Gebirgsverhalten rechnerisch gerade 1 MPa beträgt.

$$\sigma_r = p_G \left[ 1 - \frac{r_a^2}{r_i^2} \right] \quad (3-22)$$

$r_a$  Hohlraumradius

$r_i$  Abstand zur Hohlraumachse, an dem die Radialspannung den Wert  $\sigma_r$  annimmt

$P_G$  Gebirgsdruck

Die Dichte des Deckgebirges und des Salzgebirges wird  $2240 \text{ kg/m}^3$  (Wichte  $0,022 \text{ MN/m}^3$ ) einheitlich angesetzt. Zur Bestimmung der plastischen Zone wurde das Dilatanzkriterium nach Hunsche und Cristescu durch einen Mohr-Coulomb Ansatz approximiert. Die in Gleichung (3-19) eingehenden Kennwerte für diesen Ansatz wurden Wagner (Wagner, 2005) entnommen. Einaxiale Druckfestigkeit: 16 MPa und Winkel der inneren Reibung:  $37^\circ$ . Damit ergeben sich die in Tabelle 3-11 berechneten Mächtigkeiten der Auflockerungszone im Bereich der Dichtelemente (Müller-Hoeppe, 2013a).

**Tabelle 3-11: Mächtigkeit der Auflockerungszone im Bereich der Dichtelemente**

Dichtelement	Teufe [m]	Gebirgsdruck [MPa]	Mächtigkeit der ALZ [m]
1	431	9,5	0,13
2	725	15,9	0,64
3	861	18,9	0,84

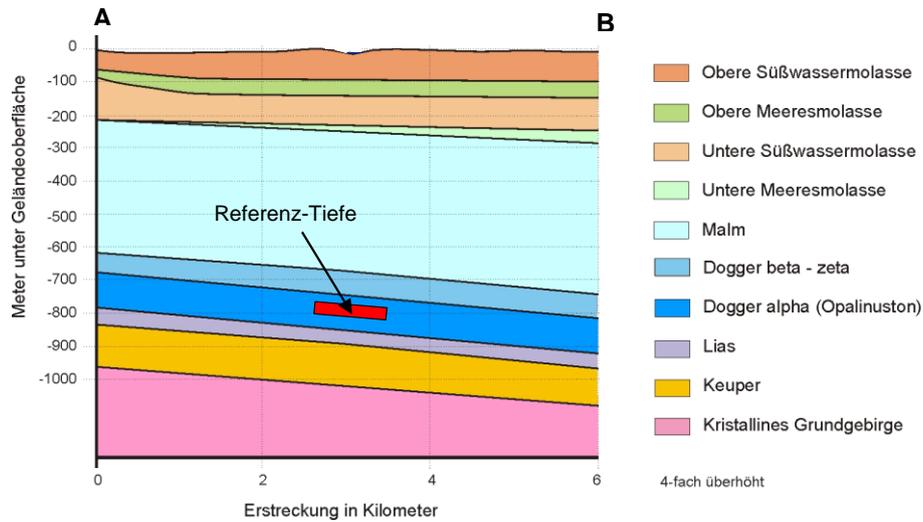
Diese über das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb ermittelten Mächtigkeiten der Auflockerungszone korrelieren sehr gut mit dem numerischen Berechnungsergebnis für die Auflockerungszone aus Gebirgsdruck (also ohne Temperaturbeanspruchung) (vgl. Abbildung 3-6). Gemäß Abbildung 3-6 erreicht die Auflockerungszone vor 1996 Plateauwerte, die denen von Tabelle 3-11 entsprechen.

### 3.2.2 Auflockerungszone im Tonstein am Beispiel zweier Referenzgebiete

#### 3.2.2.1 Referenzgebiet Süd

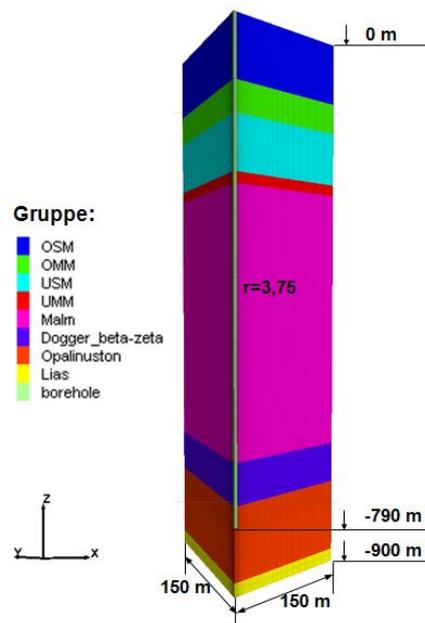
##### 3.2.2.1.1 Geologie und Modellgeometrie

Das Referenzgebiet Süd liegt im süddeutschen Molassebecken in der Nähe von Ulm. Das dortige Wirtsgestein ist die Opalinuston. Erkundungsdaten aus diesem Gebiet liegen nicht vor, so dass Resultate, die in der Bohrung Benken erzielt wurden, aufgrund der geringen Entfernung und gleicher regelmäßiger Schichtenfolge auf das Referenzgebiet Süd übertragen wurden. Gemäß der Untersuchung in der Bohrung Benken ist der Spannungszustand im Modellgebiet anisotrop. Der Seitendruckbeiwert wurde zwischen 0,96 und 1,34 angesetzt (Jobmann et al., 2007), (NAGRA, 2002a). Abbildung 3-7 zeigt einen geologischen Schnitt für das Referenzgebiet Süd.



**Abbildung 3-7: Geologischer Schnitt aus dem Referenzgebiet in Süddeutschland (Clauser et al., 2002)**

Aufgrund der symmetrischen Geometrie des Schachtes und unter Berücksichtigung des horizontal anisotropen Spannungszustandes wird das Berechnungsmodell zu einem Quader, der ein Viertel des Schachtes darstellt, vereinfacht. Das Modell hat eine horizontale Ausdehnung von 150m. In vertikaler Richtung reicht das Modell von der Geländeoberkante (Modelloberkante) bis -900m u. GOK (Modellunterkante). Der Schacht hat einen Durchmesser von 7,5m und endet auf -790m unter GOK. Abbildung 3-8 zeigt ein Schema und die Diskretisierung des Berechnungsmodells mit den unterschiedlichen Gesteinsschichten.



**Abbildung 3-8: Prinzipielles Modell**

Die numerische Simulation wurde in zwei Schritte unterteilt. In erstem Schritt wird der primäre Gebirgszustand simuliert. Anschließend wird der Schacht schrittweise unter sukzessiver Herausnahme der diskreten Elemente aufgeföhren und die thermo-hydro-mechanische Gebirgsantwort berechnet. Die Aufföhrgungsgeschwindigkeit wurde mit 1m/Tag angesetzt.

### 3.2.2.1.2 Ergebnisse aus rein mechanischem Verhalten

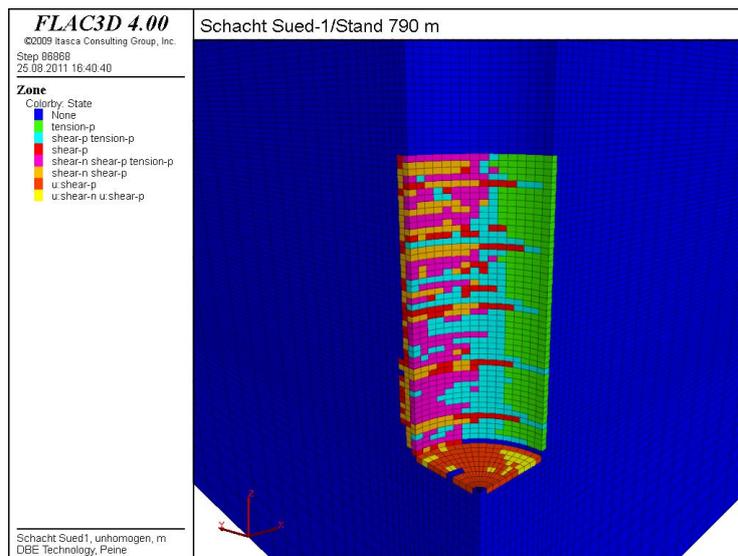
Das mechanische Verhalten des Opalinustons wurde unter Verwendung des elasto-plastischen Stoffmodell SUBQUITOUS JOINT simuliert, während das mechanische Verhalten der anderen Gesteinsschichten rein elastisch simuliert werde. Die verwendeten mechanischen Parameter sind in Tabelle 3-12 aufgelistet (Jobmann et al., 2007).

**Tabelle 3-12: Verwendete mechanische Parameter**

Festigkeitsparameter		Matrix	Schichtung
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2520	
Elastizitätsmodul	[MPa]	7000	
Poissonzahl	[-]	0,27	
Zugfestigkeit	[MPa]	2,5	1,2
Spitzenkohäsion	[MPa]	8,7/17,2	1,3/10,1
Reibungswinkel	[°]	30/14	34/12
Restkohäsion	[MPa]	4,3/16	0,7/5
Restreibungswinkel	[°]	29/13	33/11

Schicht	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Kompressionsmodul [MPa]	Schubmodul [MPa]
OSM	2463	9523,8	8695,7
OMM	2527	9523,8	8695,7
USM	2676	9523,8	8695,7
UMM	2527	9523,8	8695,7
Malm	2680	58333,0	26923,0
Lias	2000	6250,0	6818,1

Bei jedem Rechenschritt wurde der Schacht 20m tief aufgeföhren und jeweils das mechanische Gleichgewicht berechnet. Die Abbildung 3-9 stellt die Größe der Auflockerungszone nach der Aufföhrgung im Wirtsgestein dar. Die maximale Auflockerungszone befindet sich am Schachtstoß in Y-Richtung mit einer Tiefe von 0,97m. Die Auflockerungszone am Stoß in X-Richtung ist 0,3m tief und entsteht nur durch Zugversagen.

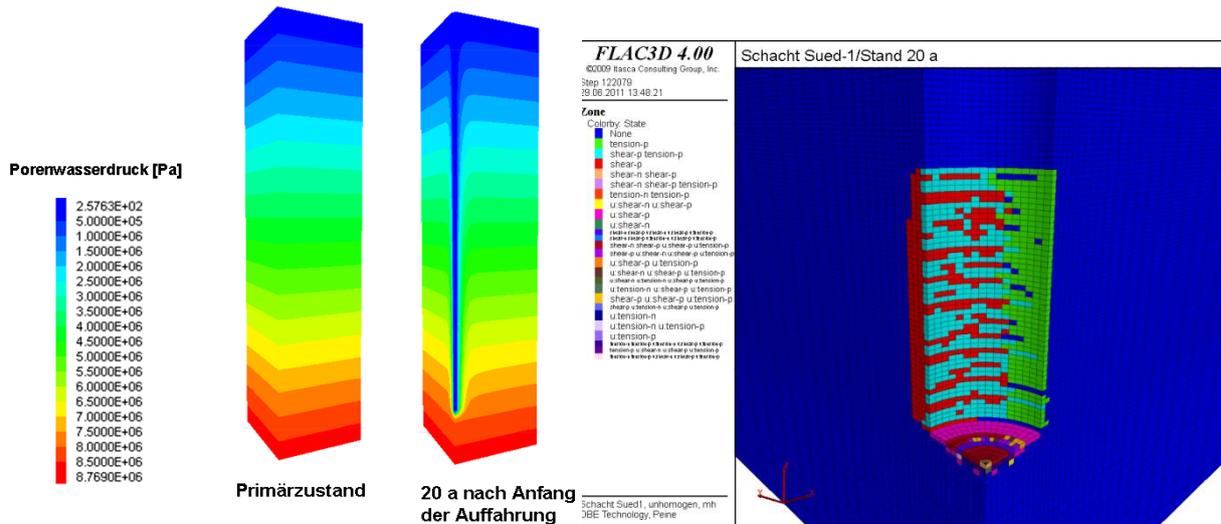


**Abbildung 3-9: Auflockerungszone aus mechanischer Wirkung**

### 3.2.2.1.3 Ergebnisse aus HM-Kopplung

Aufgrund fehlender Kenntnis über die tatsächlichen hydraulischen Parameter der Deck-schichten wurden die hydraulischen Parameter aller Gesteinsschichten auf den gleichen Wert wie die Parameter des Opalinustons gesetzt. Die hydraulische Durchlässigkeit wird mit  $2 \cdot 10^{-13}$  m/s, die Porosität mit 11% und der Biot-Koeffizient mit 0,6 angesetzt.

Im Primärzustand steigt der Porenwasserdruck kontinuierlich mit der Tiefe im Bereich von 0 MPa bis 8,8 MPa an. Nach der Auffahrung nimmt der Porenwasserdruck am Stoß auf 0 MPa ab. Wegen der geringeren Durchlässigkeit des Gesteins ändert sich der Porenwasserdruck in der Nähe der Schachtkontur nur langsam. Nach 20 Jahren ist der Porenwasserdruck am Schachtstoß gleich 0 MPa und vergrößert sich mit zunehmender Entfernung von der Schachtkontur bis auf den Primärwert der jeweiligen Tiefe (Abbildung 3-10).



**Abbildung 3-10: Porenwasserdruck bei Primärzustand und 20 a nach der Auffahrung**

**Abbildung 3-11: Auflockerungszone aus hydromechanischer Wirkung**

Die Veränderung des Porenwasserdruckes verändert auch die Größe der Auflockerungszone. Nach 790 Tagen ist die Auffahrung des Schachts beendet. Die Auflockerungszone im unteren Schachtbereich vergrößert sich mit der Zeit. Nach 830 Tagen, also 40 Tage nach Erreichen des Schachttiefsten, vergrößert sich die Auflockerungszone bis Ende des Simulationszeitraums nicht mehr. Die Abbildung 3-11 stellt die Auflockerungszone 20 Jahren nach Auffahrung dar. Die errechnete maximale Auflockerungszone befindet sich am Schachtstoß in Y-Richtung mit einer Tiefe von 1,36m. Die Auflockerungszone am Stoß in X-Richtung ist bis zu 0,61m tief und entsteht nur durch Zugversagen. Mit Berücksichtigung des Porenwasserdruckes ist die Auflockerungszone größer als ohne Berücksichtigung der Porenwasserdruckentwicklung.

### 3.2.2.1.4 Ergebnis aus vollständiger THM-Kopplung

Die Temperatur an der Geländeoberfläche wurde nach Literaturangaben auf 8,9°C gesetzt (Jobmann et al., 2007). Die Gebirgstemperatur erhöht sich infolge der Tiefe mit einem Gradient von 0,0375 K/m. Einen Überblick über die Gebirgstemperaturen im Modellgebiet zeigt Abbildung 3-12. Das thermische Verhalten des Wirtsgesteins wurde anisotrop, das der anderen Gesteinsschichten isotrop simuliert Die thermischen Parameter sind in Tabelle 3-13 aufgelistet (ANDRA, 1999), (Clauser et al., 2002). Im Primärzustand steigt die Temperatur kontinuierlich in Abhängigkeit von der Teufe von 8,9°C bis 42,6°C an.

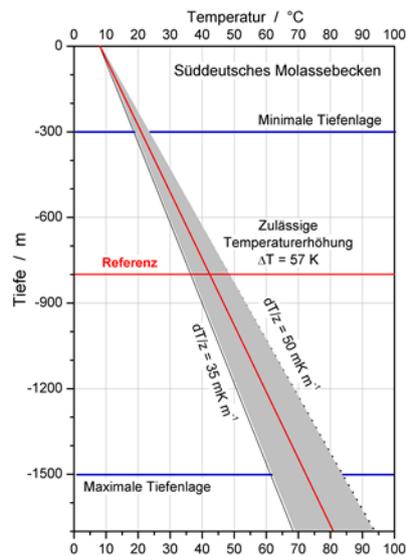


Abbildung 3-12: Gebirgstemperatur als Funktion der Tiefe im Süddeutschen Molassebecken

Tabelle 3-13: Verwendete thermische Parameter

Schicht	$\alpha_t$ [K <sup>-1</sup> ]	$c_p$ [J/kg·K]	$\lambda$ [W/m·K]
OSM	1,15E-5	1000	2,83
OMM	1,15E-5	1130	3,00
USM	1,15E-5	978	2,92
UMM	1,15E-5	1130	2,88
Malm	0,6 E-5	910	3,91
Dogger beta-zeta	2,5E-5	1060	2,75
Dogger alpha (Opalinuston)	2,5E-5	800	2,22 (  ) 1,07 (⊥)
Lias	5,0E-5	880	2,38

Nach der Auffahrung des Schachtes wird die Temperatur am Schachtstoß durch die Schachtbewetterung beeinflusst. Um den Einfluss einer Schachtbewetterung näherungsweise zu berücksichtigen, wurde die Temperaturrandbedingung am Schachtstoß analog zu der Berechnung zum Schacht Gorleben angesetzt. Abbildung 3-13 zeigt die Anfangstemperatur und die Temperatur nach 20 Jahren Simulationszeit. Die zeitabhängige thermische und hydraulische Wirkung bedingt eine entsprechende Vergrößerung der Auflockerungszone mit der Zeit. Ähnlich wie in den vorher beschriebenen Berechnungen vergrößert sich die Auflockerungszone in der Nähe des Schachtstiefsten nach 830 Tagen nicht mehr.

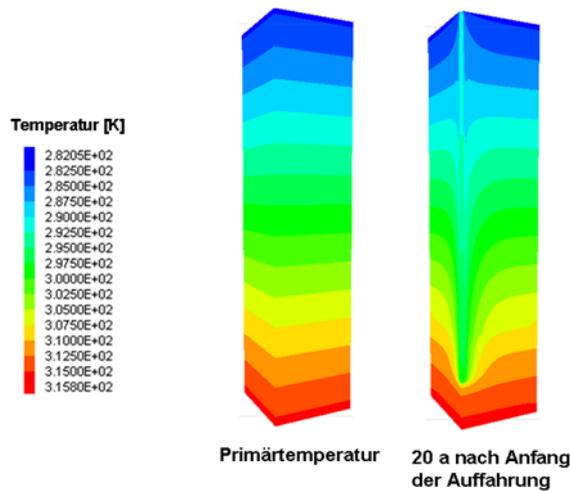


Abbildung 3-13: Temperatur am Anfang und nach 20 a nach der Auffahrung

Die errechnete maximale Ausdehnung der Auflockerungszone befindet sich in Y-Richtung mit einer Tiefe von 0,97m. Die Auflockerungszone in X-Richtung ist 0,3m tief und entsteht nur durch Zugversagen. Die Abbildung 3-14 zeigt die Ausdehnung der Auflockerungszone nach 20 Jahren Simulationszeit.

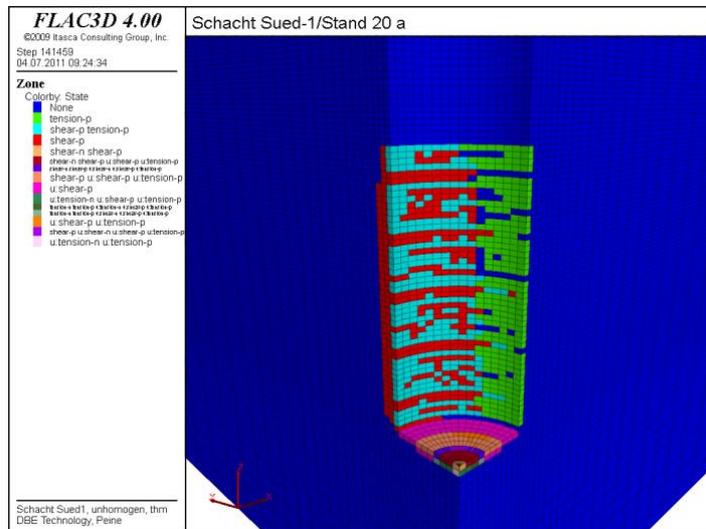


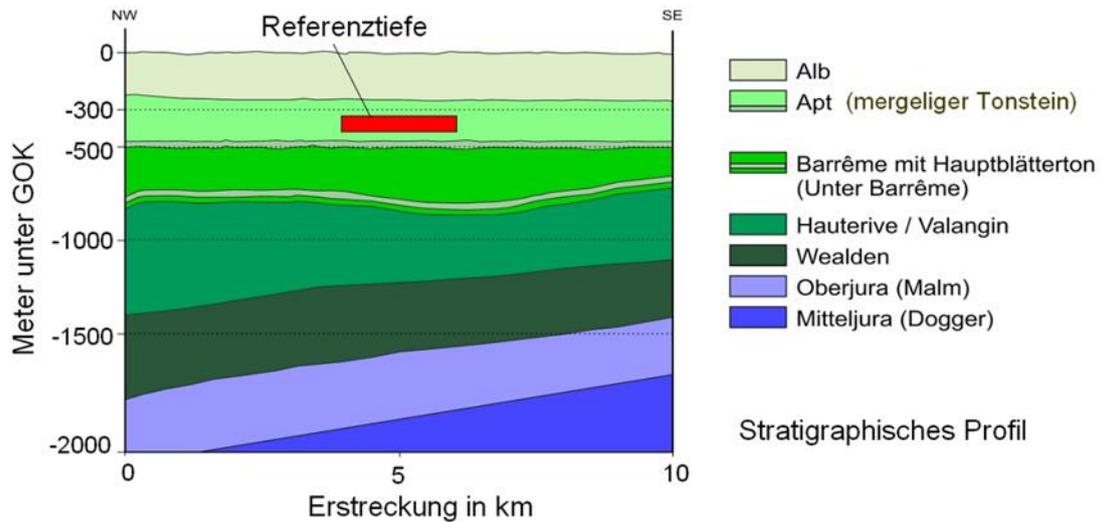
Abbildung 3-14: Auflockerungszone gemäß THM-gekoppelter Berechnungen

### 3.2.2.2 Referenzgebiet Nord

#### 3.2.2.2.1 Geologie und Modellgeometrie

Das Referenzgebiet Nord liegt im Niedersächsischen Becken nordöstlich von Hannover. Das Wirtsgestein ist der Tonstein des Apt. Die Abbildung 3-15 zeigt das geologische Profil im Gebiet Nord. Erkundungsdaten aus diesem Gebiet liegen ebenfalls nicht vor. Die Materialpa-

parameter wurden maßgeblich aus Untersuchungsergebnissen im Schacht Konrad, der ca. 40 km südöstlich des Referenzgebietes liegt, ermittelt. Gemäß Untersuchungen im Schacht Konrad zeigt das Material in den Formationen Alb und Apt vergleichbare Festigkeiten und Verformbarkeit. Der Spannungszustand ist isotrop in horizontaler Richtung. Die horizontale Spannung hat einen Seitendruckbeiwert von 0,5 und entspricht damit der Hälfte der vertikalen Spannung (Jobmann et al., 2007).



**Abbildung 3-15: Stratigraphisches Profil (4-fach überhöht) im Gebiet der Referenzregion Nord, (Jobmann et al., 2007))**

Aufgrund der symmetrischen Geometrie des Schachtes und unter Berücksichtigung des isotropen Spannungszustandes in horizontaler Richtung konnte das Berechnungsmodell zu einem Zylinder-Sektor vereinfacht werden. Das Modell hat eine horizontale Ausdehnung von 150m. In vertikaler Richtung erstreckt sich das Modell von der Geländeoberkante (Modelloberkante) bis -470m u. GOK (Modellunterkante). Der Schacht hat einen angenommenen Durchmesser von 7,5m, (analog Gorleben Schacht 1) und endet auf -335 m unter der GOK. Die Abbildung 3-16 zeigt das Modell und die Diskretisierung.

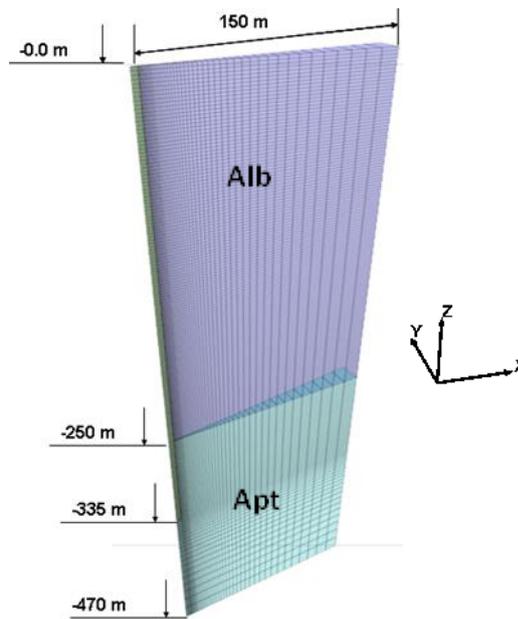


Abbildung 3-16: Dimension und Diskretisierung des Modells

### 3.2.2.2 Ergebnisse aus rein mechanischem Verhalten

Das mechanische Verhalten des Gebirges wird unter Ansatz des elasto-plastischen Stoffmodell Mohr-Coulomb simuliert. Die verwendeten mechanischen Parameter sind in Tabelle 3-14 aufgelistet (Jobmann et al., 2007), (Wittke, 1991).

Tabelle 3-14: Mechanische Parameter der Tonformationen Alb und Apt

Parameter	Einheit	Wert
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2446,5
E-Modul	[MPa]	2000
Poissonzahl	[-]	0,33
Kohäsion	[MPa]	2
Reibungswinkel	[°]	15
Dilatanzwinkel	[°]	0
Zugfestigkeit	[MPa]	0

Während der Simulation wird der Schacht in Schritten von 50m aufgefahren. Abbildung 3-17 zeigt die Auflockerungszone nach der Auffahrung. Im oberen Bereich entsteht die Auflockerungszone durch Überschreitung der Zugfestigkeit. Ab etwa 230 m wird das Gebirge am Schachtstoß auch durch Scherversagen geschädigt. Die maximale Ausdehnung der Auflockerungszone beträgt 1,95 m und befindet sich erwartungsgemäß in der Nähe des Schachtiefsten.

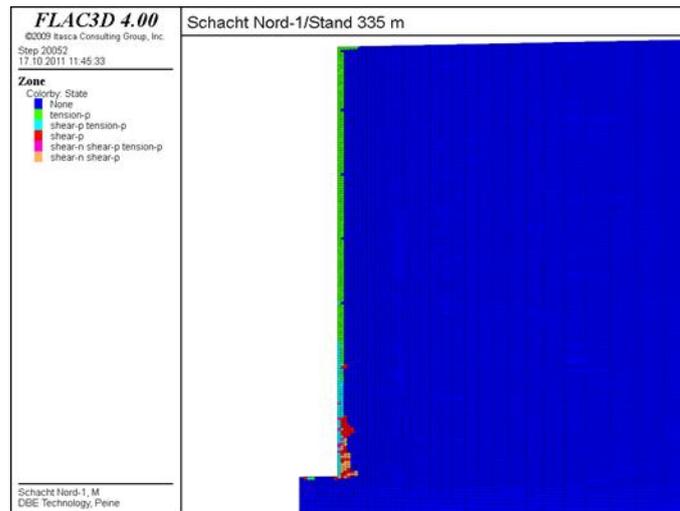


Abbildung 3-17: Auflockerungszone aus mechanischer Wirkung

### 3.2.2.3 Ergebnis aus gekoppelten Berechnungen

Die Temperatur an der Geländeoberfläche wird auf 8,0°C gesetzt (Jobmann et al., 2007). Die Gebirgstemperatur erhöht sich infolge der Tiefe mit einem Gradienten von 0,038 K/m (Abbildung 3-18). Das thermische Verhalten im Referenzgebiet Nord ist anisotrop. Die thermischen Parameter des Alb und Apt sind in Tabelle 3-15 aufgelistet (Jobmann et al., 2007), (Buntebarth, 2005).

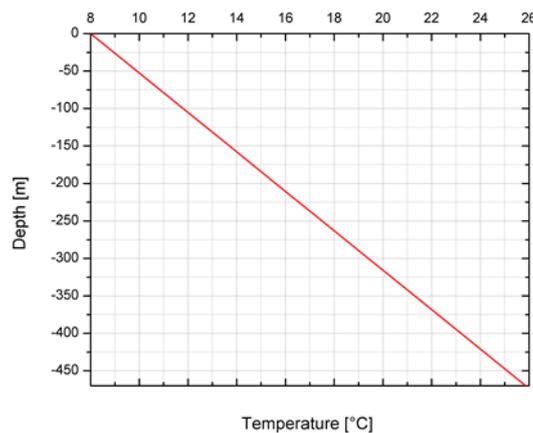


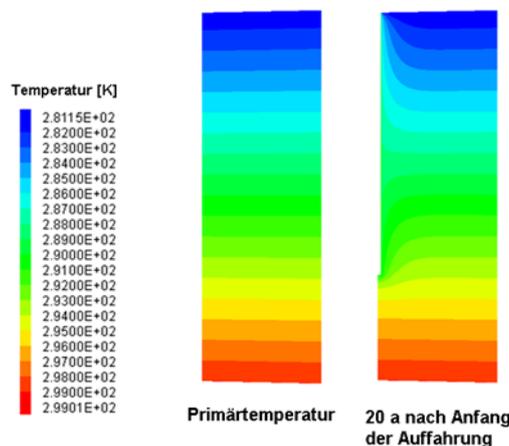
Abbildung 3-18: Thermischer Gradient im Niedersächsischen Becken

**Tabelle 3-15: Thermische Parameter**

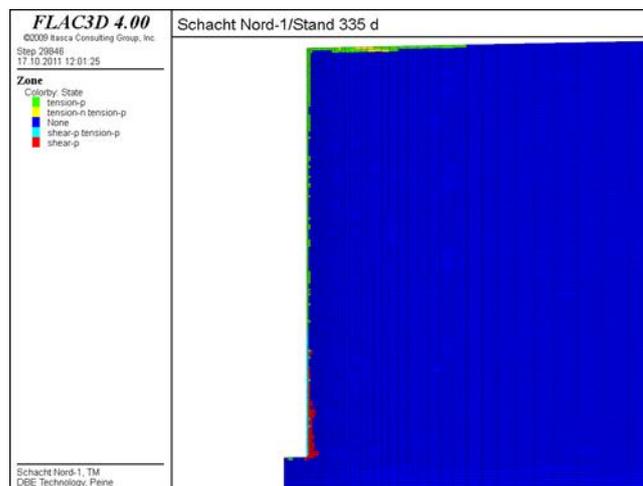
Schicht	$c_p$ [J/kg·K]	$\lambda_{//}$ [W/m·K]	$\lambda_{\perp}$ [W/m·K]
Alb	1405	1,95	1,38
Apt	1400	2,41	1,65

Der Einfluss der Temperatur bzw. der Schachtbewetterung wurde analog zu dem Modell für die Referenzregion-Süd behandelt.

Abbildung 3-19 zeigt die Anfangstemperatur und die Temperatur nach 20 Jahren Simulationszeit. Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 stellen die Auflockerungszone nach 335 Tagen und 20 Jahren Simulationszeit dar. Durch die zeitabhängige thermische Wirkung vergrößert sich die Auflockerungszone in der Nähe der GOK durch Zugversagen. Die Auflockerungszone in dem übrigen Bereich verändert sich nicht mehr mit der Zeit.



**Abbildung 3-19: Temperatur bei Primärzustand und 20 Jahre nach der Auffahrung**



**Abbildung 3-20: Auflockerungszone nach 335 Tagen**

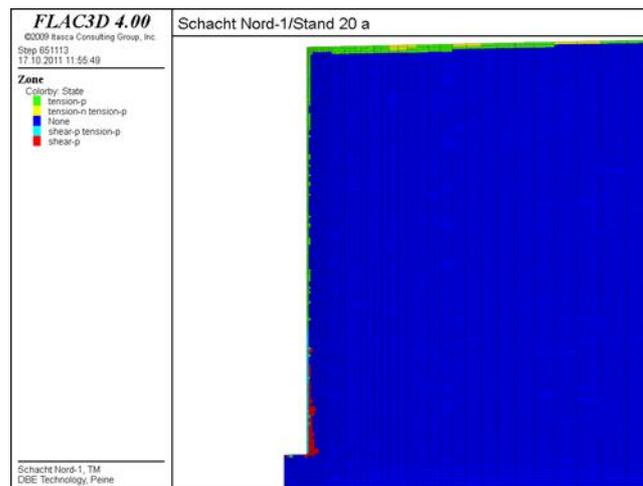


Abbildung 3-21: Auflockerungszone nach 20 Jahren

### 3.2.3 Permeabilität

Neben der Dicke der Auflockerungszone ist natürlich auch die Permeabilität der ALZ von Bedeutung. In-situ Untersuchungen bzw. Messwerte zur Permeabilität der Auflockerungszone im **Steinsalz**, insbesondere in Schächten, sind nur in sehr geringem Umfang verfügbar. Angaben dazu sind im Kapitel „Charakterisierung bestimmender Strömungs- und Transportprozesse“ zu finden, so dass an dieser Stelle nur darauf verwiesen wird. Ergänzend dazu soll hier noch der Aspekt angesprochen werden, dass sich die Permeabilität der ALZ im Laufe der Zeit durch Aufkriechen des Gebirges verringert. Um diesen Aspekt zu untersuchen, wurden im Rahmen von Laborversuchen mehrere Steinsalzproben zunächst vorsichtig künstlich geschädigt und im Anschluss daran die Permeabilität der geschädigten Proben gemessen. Diese Messung wurde bei verschiedenen Manteldruckstufen wiederholt, um den sich aufbauenden Druck durch Aufkriechen des Gebirges zu simulieren. Abbildung 3-22 zeigt die Reduzierung der Permeabilität als Funktion des Manteldruckes in linearer und logarithmischer Darstellung. Aus technischen Gründen war mindestens ein Manteldruck von 0,25 MPa erforderlich. Die Messwerte wurden auf den jeweiligen Anfangswert normiert.

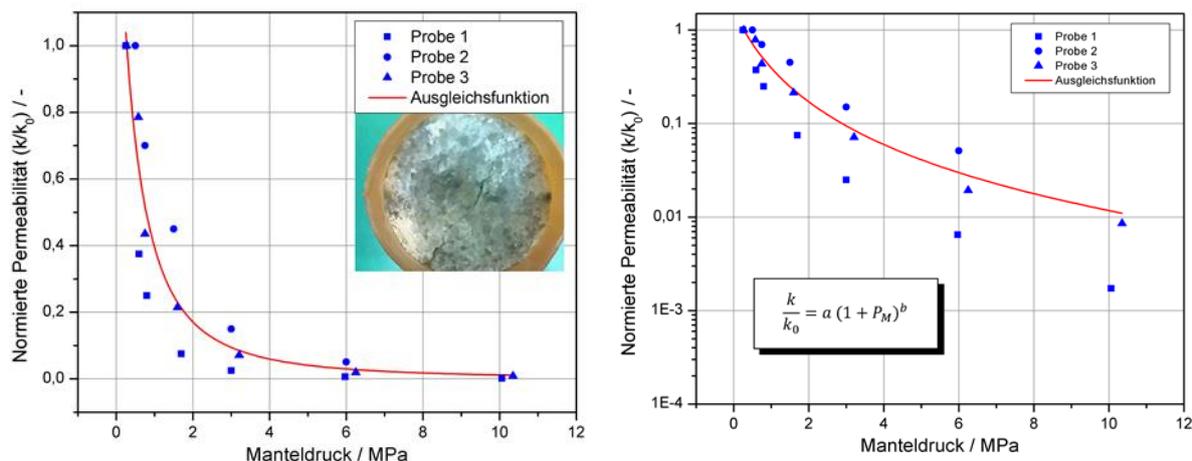


Abbildung 3-22: Abnahme der Permeabilität von Steinsalzproben mit zunehmendem Druck

Es ist sehr deutlich zu sehen, dass bereits bei geringen Drucksteigerungen die Permeabilität deutlich abnimmt. Oberhalb eines Druckes von etwa 6 MPa ist die Abnahme der Permeabilität nur noch sehr gering. In der halblogarithmischen Darstellung wird deutlich, dass die Verringerung der Permeabilität 2-3 Größenordnungen im Druckbereich bis 10 MPa beträgt. Die beobachtete Abnahme der Permeabilität ( $k/k_0$ ) vom Manteldruck  $P_M$  kann mit Hilfe von Gleichung (3-23) näherungsweise beschrieben werden, wobei die Parameter  $a = 1,64604$  und  $b = -2,06074$  die Anpassungsparameter sind.

$$\frac{k}{k_0} = a (1 + P_M)^b \tag{3-23}$$

Aktuelle Berechnungen zum Druckaufbau an der Schachtkontur bei dem Schachtverschluss, der im Rahmen der VSG entwickelt wurde, zeigen die in Tabelle 3-16 angegebene Druckentwicklungen (Radialspannungen) im Teufenbereich der Dichtelemente.

Tabelle 3-16: Berechnete Entwicklung der Radialspannung an der Schachtkontur auf Höhe der Dichtelemente im VSG Schachtverschlusskonzept

	100 a	1000 a	1.600 a	10.000 a
Dichtelement 1 (Bentonit) <sup>5</sup>	1,0 MPa	2,6 MPa	4,4 MPa	4,7 MPa
Dichtelement 2 (Salzbeton)	8,0 MPa	10,8 MPa	13,0 MPa	13,2 MPa
Dichtelement 3 (Sorelbeton)	11,0 MPa	14,0 MPa	14,5 MPa	15,6 MPa

Aus den in Tabelle 3-16 angegebenen Zahlen wird deutlich, dass im Bereich der Dichtelemente 2 und 3 die Radialspannungen bereits nach 100 Jahren so groß sind, dass die

<sup>5</sup> Ohne Quelldruckentwicklung. Die Werte werden sich daher noch um ca. 1 MPa erhöhen.

Schließung der Risse weitestgehend abgeschlossen ist und man davon ausgehen kann, dass sich die Permeabilität in dem Zeitrahmen bereits um ca. 2 Größenordnungen verringert hat.

Bei dem oberen Dichtelement, dem Bentonitelement, muss man allerdings davon ausgehen, dass die Reduzierung der Permeabilität der ALZ wesentlich länger dauern wird. Die Druckentwicklung ist hier auf einem wesentlich geringeren Niveau. Hier kann allerdings der sich ausbildende Quelldruck des Bentonits signifikant zur Permeabilitätsreduktion beitragen. Dies macht auch deutlich, wie wichtig es ist, die ALZ im Bereich der Dichtelemente soweit wie möglich zu entfernen, insbesondere bei solchen Dichtelementen, die in einem geringen Teufen- und damit Druckniveau angeordnet sind. An dieser Stelle wird auf die entsprechende Anforderung im Kapitel 4 „Anforderungen“ verwiesen. Die hier gemachten Abschätzungen können als konservativ angesehen werden, da die Zeitdauer der Druckerhöhung in der Realität wesentlich länger ist, das Gebirge also mehr Zeit zum Kriechen hat. Allerdings ist diese Konservativität zumindest insoweit begrenzt, als gemäß dem in Kapitel „Anforderungen“ erwähnten Funktionszeitraum von 1.000 Jahren die Aufkriechdauer entsprechend begrenzt ist.

Durch den Nachschnitt des besonders durchlässigen konturnahen Bereiches der ALZ soll die Permeabilität im Bereich der Dichtelemente verringert werden. Allerdings bildet sich an der nachgeschnittenen Kontur ein neuer aufgelockerter Bereich mit einer zeitlich zunehmenden Permeabilität heraus. Die Geschwindigkeit des Permeabilitätswiederanstiegs hängt von vielen Faktoren ab (Hunsche et al., 2003) und kann noch nicht zufriedenstellend modelltechnisch berücksichtigt werden. Technisch relevant ist die Forderung, den Zeitraum zwischen Nachschnitt der Kontur und dem Einbau des Dichtelementes zu minimieren.

Mit Blick auf einen möglichen **Tonstein**-Standort in Deutschland wurden analoge Untersuchungen auch an Opalinustonproben durchgeführt. Abbildung 3-23 zeigt die Verringerung der Permeabilität bei steigendem Druck in halblogarithmischer Darstellung (Jobmann et al., 2010).

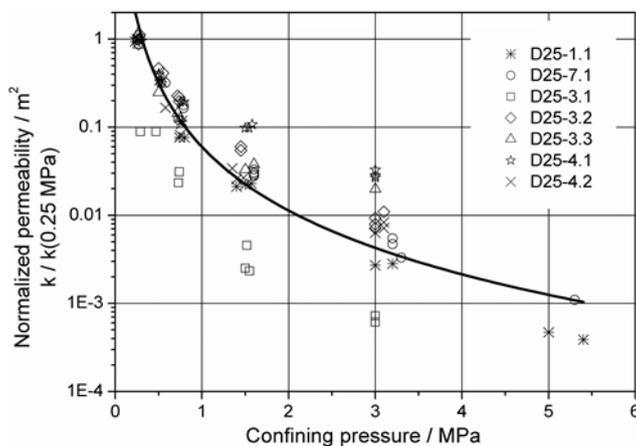


Abbildung 3-23: Abnahme der Permeabilität von Tonsteinproben mit zunehmendem Druck (Jobmann et al., 2010)

Im Vergleich zu den Messungen am Steinsalz fällt auf, dass die Reduktion der Permeabilität intensiver ausfällt. Die Permeabilität reduziert sich um mehr als 3 Größenordnungen im Druckbereich bis 6 MPa. D. h., die Reduktion ist nicht nur insgesamt größer, sondern sie erfolgt auch schon bei geringeren Druckniveaus. Das mag daran liegen, dass Tonsteinproben insgesamt „weicher“ sind und somit sich entstandene Risse eher schließen und man daher auch nicht so viel Druck benötigt.

### 3.2.4 Zusammenfassung

Auf Basis bisher verfügbarer Daten wurde die Auflockerungszone im Salinarbereich Gorleben Schacht 1 und in zwei potenziellen Schächten in den eignungshöffigen Tonsteinregionen Süd- und Norddeutschland durch numerische Berechnungen ermittelt. Im Zuge der Berechnungen ergab sich ein interessanter Aspekt nach Erreichen der durchschlägigen Bewetterung im Grubengebäude von Gorleben Schacht 1 zu Schacht 2. Für den Zeitraum nach der Schachterstellung wurde, wie erwartet, eine mit der Teufe zunehmende Auflockerungszone errechnet. Durch den bewetterungsbedingten Temperatureinfluss nach dem Durchschlag wurde dieser Trend umgekehrt und führte zu einer signifikanten Erhöhung des geschädigten Bereiches. Für die zwei Modellstandorte im Tonstein wurde die zu erwartende Auflockerungszone je nach Standort und Teufe mit einer Ausdehnung von 0,3 bis 1,9 m rechnerisch ermittelt. Um beurteilen zu können, inwieweit sich die schädigungsbedingt erhöhte Permeabilität der Auflockerungszone im Laufe der Zeit verringert, wurden Laborversuche mit dem Ziel durchgeführt, die Verringerung der Permeabilität mit zunehmendem Gebirgsdruck zu bestimmen. Es zeigte sich, dass für Steinsalz eine Reduzierung um 2-3 Größenordnungen im Druckbereich bis 10 MPa möglich ist. Bei den untersuchten Tonsteinproben ist diese Reduzierung der Permeabilität noch etwas größer und wird auch bereits bei einem Druck von 6 MPa erreicht. Ein Vergleich mit berechneten Druckentwicklungen im Schachtverschlusskonzept der VSG zeigt, dass bei den unteren Dichtelementen von einer deutlichen Reduzierung der ALZ in den ersten 100 Jahren ausgegangen werden kann, während bei dem höher gelegenen ersten Dichtelement von einer deutlich geringeren Reduzierung in diesem Zeitraum auszugehen ist. Die Bedeutung der Entfernung zumindest des stark geschädigten Bereiches der ALZ wird dadurch unterstrichen.

### 3.3 Charakterisierung bestimmender Strömungs- und Transportprozesse

#### 3.3.1 Prämissen

Für die nachfolgenden Erläuterungen gelten folgende Einschränkungen zu den betrachteten Prozessen und Szenarien.

1. Die Betrachtungen zu den Strömungsprozessen werden auf die Zweiphasenströmung von wässrigen Flüssigkeiten und Gas beschränkt. Es erfolgt, mit Ausnahme von Bitumen, keine Berücksichtigung von nicht wässrigen Flüssigkeiten.
2. Es werden ausschließlich Strömungsprozesse in der Nachbetriebsphase nach einer strömungstechnischen Abdichtung des Grubengebäudes betrachtet.
3. Alle Betrachtungen zu den Strömungsprozessen beschränken sich auf die technisch errichteten Dichtsysteme und das umgebende Gebirge. Es erfolgt keine Auseinandersetzung mit Strömungsprozessen aus dem Grubengebäude über die geologischen Barrieren sowie zu den Strömungsprozessen in den im Hangenden anschließenden Formationen der technischen Dichtsysteme.
4. Die Wirtsgesteine werden im Einbaubereich als geringpermeable, homogene geologische Barrieren mit einer räumlich begrenzten Auflockerung an der Schachtkontur angesehen. Es wird unterstellt, dass im Zuge der Standortauswahl ein entsprechender Schachtbereich ohne geologisch bedingte höher permeable Bereiche nachgewiesen und ausgewählt wurde.
5. Innerhalb der Dichtsysteme werden die Strömungsprozesse bestimmt durch gebirgsmechanische Rahmenbedingungen und geochemische Prozesse. In den nachfolgenden Erläuterungen werden diese Sachverhalte genannt und ggf. in ihrer Rolle beurteilt. Eine Erläuterung zu diesen Prozessen wird in den Abschnitten 3.1 und 3.4 des Projektes gegeben.
6. Es erfolgt keine Betrachtung von sekundär induzierten Prozessen im Hangenden des Dichtsystems, wie z. B. die Freisetzung natürlicher, gasförmiger Radionuklide (z. B. Radon).
7. Beschränkung auf isotherme Strömungsprozesse, da vorausgesetzt wird, dass der Einlagerungsbereich in entsprechend weiter Entfernung vom Schachtbereich liegt, so dass thermisch induzierte Strömungsänderungen vernachlässigbar sind.

Bestimmend für die Strömungsprozesse in einem Schachtverschlusssystem sind die standortbezogen, in Abhängigkeit von Geologie und bergtechnischer Situation auszuwählenden Einbaubereiche und die daraus resultierenden möglichen Fluiddruckbedingungen sowie die gebirgsmechanische Situation. Für Schachtverschlüsse in einem Endlager für HAW werden durch die geologischen Gegebenheiten der potentiell geeigneten Zechstein- und Tonformationen in Deutschland und die Grundkonzepte der Endlagerung im Salz und im Ton (Bollingerfehr et al., 2011) zu betrachtende strömungstechnische, geochemische und geomechanische Rahmenbedingungen und ihre Zeitabhängigkeit vorgegeben. Diese Rahmenbedingungen müssen für die zukünftigen Endlagerstandorte definiert werden. Sie bilden den Aus-

gangspunkt für die Betrachtungen zu den Strömungsprozessen und definieren die Beurteilungskriterien zur Bewertung der Relevanz ausgewählter Strömungsvorgänge.

Die Langfassung der nachfolgenden Abschnitte in (IBeWa, 2012b) bemüht sich um die Darstellung einer Übersicht des in der Fachliteratur recherchierten Kenntnisstandes zu den Strömungsprozessen in Schachtverschlusssystemen unter Berücksichtigung der Projekterfahrungen sowie der Versuchs- und Laborergebnissen der Projektbeteiligten. Vor diesem Hintergrund kann der Bericht nur eine Übersicht der Prozesse und bestimmenden Materialeigenschaften für eine beschränkte Auswahl von Szenarien geben. Für eine detaillierte Analyse von Einzelprozessen ist eine Auseinandersetzung mit der Originalliteratur und deren Autoren zu den prozessorientierten Untersuchungen und Modellrechnungen erforderlich.

Die nachfolgenden Abschnitte fassen die Informationen und Darstellungen in (IBeWa, 2012b) weiter zusammen.

### 3.3.2 Vorbetrachtungen

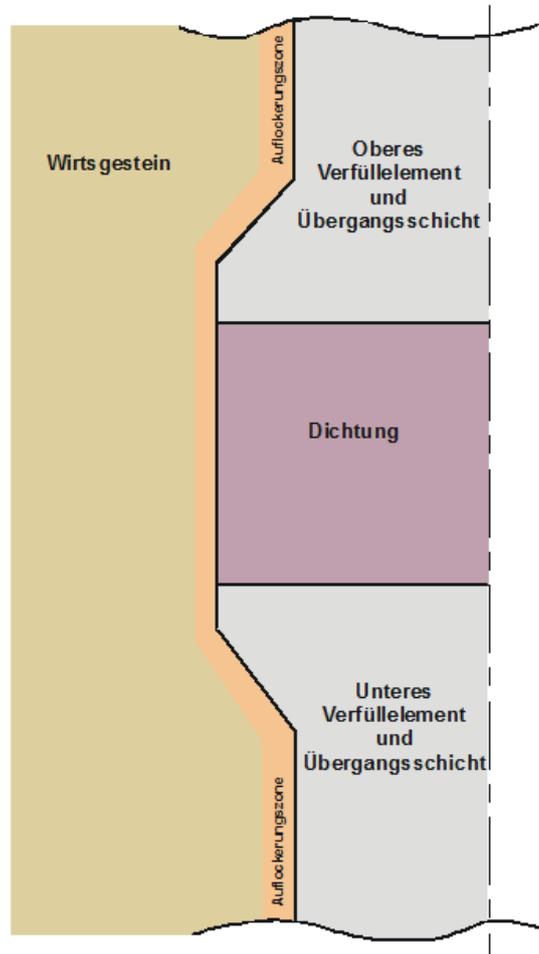
Für die Betrachtung der Strömungsprozesse in einem technischen Dichtsystem aus Dichtelement (Bentonit und/oder Bitumen bzw. Asphalt), Auflockerungszone im Gebirge und Gebirge entsprechend Abbildung 3-24 ist es erforderlich, die bergtechnischen, geologischen, hydrogeologischen und gebirgsmechanischen Ausgangsbedingungen im Einbaubereich des Dichtsystems zu diskutieren.

Als Ausgangszustand wird nachfolgend die Situation im Dichtsystem nach Abschluss der Schachtverwahrung angesehen. Für diese Situation wird unterstellt, dass die Schachtsäule oberhalb des Dichtsystems trocken (nicht geflutet) und das umgebende Wirtsgestein ebenfalls ungesättigt ist. In Abhängigkeit vom Verwahrungskonzept – Flutung der Schachtsäule im Hangenden, Anzahl der Dichtelemente, Aufbau des Dichtsystems, Redundanz und Diversität der Dichtelemente – ist langfristig von einem Anstrom des Dichtsystems und des umgebenden Wirtsgesteins aus dem Hangenden und dem umgebenden Wirtsgestein (maßgeblich für Ton/Schluffstein) sowie einem gaserfüllten Grubengebäude auszugehen. Dies führt zu einer hydrostatischen Druckentwicklung, einer Veränderung der Flüssigkeitssättigung und in der Folge zu veränderlichen Druck- und Permeabilitätsbedingungen in den Strömungsräumen des Dichtsystems.

In dieser Phase der Strömungsprozesse in einem Dichtsystem muss von einer Strömung von zwei Phasen – Gas und Flüssigkeit – ausgegangen werden.

Mit fortschreitender Aufsättigung der unterschiedlichen Strömungsräume wird der Strömungsprozess von der Flüssigkeitsströmung bestimmt und kann als Einphasenströmungsprozess angesehen werden. In Abhängigkeit von der Fluidruckentwicklung in der Umgebung des Dichtsystems ist zeitabhängig eine Zweiphasenströmung nicht auszuschließen. In Abschnitt 3.3.3 und (IBeWa, 2012b) wird auf die Szenarien der Fluiddruckbeaufschlagung und die daraus resultierenden Strömungsprozesse eingegangen. Auf Grund der zu unterstel-

lenden langsamen Gasdruckentwicklung im Grubengebäude wird angenommen, dass der Aufsättigungsprozess des Dichtsystems abgeschlossen und das Dichtsystem flüssigkeitsgesättigt ist, bevor der Gasdruck im Grubengebäude signifikant ansteigt.



**Abbildung 3-24: Schematische Darstellung Dichtsystem**

Ein- und Mehrphasenströmungsprozesse in gesättigten und ungesättigten Gesteinen und Dichtmaterialien wurden in der Vergangenheit unter sehr unterschiedlichen Aspekten, mit unterschiedlichen Zielsetzungen und unterschiedlicher Untersuchungstiefe durchgeführt. An dieser Stelle soll lediglich auf die Vielzahl von Forschungsberichten und Publikationen zu hydraulisch abdichtenden Horizonten in der Erdöl- und Erdgasindustrie (z. B. Tight gas-Lagerstätten), zu den Hangendschutzschichten des Kali- und Salzbergbaus, zur Fluidspeicherung in geologischen Formationen (z. B. Porenspeicher) und zu untertägigen Hohlräumen (z. B. Kavernen, Grubengebäude) sowie zum Berg- und Tiefbau hingewiesen werden. Neben dieser Fülle an Informationen zum Prozessverständnis und der Materialcharakterisierung liegt ebenfalls aus dem Themenbereich Endlagerung radioaktiver Materialien eine sehr breite Palette an Quellen vor, die unterteilt werden können in Publikationen zu Buffer- und Dichtmaterialien sowie zu Tongestein und Salzgestein als Wirtsgestein für Endlager.

Die im Rahmen dieser Bearbeitung berücksichtigten Quellen sind nur ein kleiner Auszug aus der vorwiegend endlagerorientierten Fachliteratur. Die Kenntnisse aus diesen Quellen können vereinfachend unterteilt werden in wissenschaftlich orientierte, detaillierte Untersuchungen zu den mineralogisch/geochemischen Eigenschaften und dem Verständnis der im Mikromaßstab ablaufenden Prozesse im Kontakt zu unterschiedlichen Fluiden sowie ihrer modelltheoretischen Beschreibung und Prognose (Grundlagenforschung zum Prozessverständnis). Der zweite Schwerpunkt beinhaltet die eher ingenieurtechnisch orientierten Untersuchungen auf die geomechanische und strömungstechnische Charakterisierung der unterschiedlichen porösen Materialien und die Anwendung dieser Kenntnisse für die Beurteilung und Beschreibung von Strömungs- und Transportprozessen im Zusammenhang mit der Konzipierung, Dimensionierung von Verschlussbauwerken und der Prognose ihrer langfristigen strömungstechnischen Wirkung. Aus dieser Unterteilung wird die erläuterte Problemstellung zum Prozessverständnis im Maßstab der Partikel- und Porenabmessungen, den daraus resultierenden Eigenschaften und der großräumig bestimmenden Heterogenität und Anisotropie der Eigenschaftsverteilung deutlich.

Vor diesem Hintergrund soll an dieser Stelle jedoch auch darauf hingewiesen werden, dass für die hier im Vordergrund stehende strömungstechnische Beurteilung von Verschlussbauwerken im Schacht eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle eine Berücksichtigung der Prozessdetails in den unterschiedlichen Materialien und die damit verbundene Vielfalt von komplexen chemischen, physikalischen und geotechnischen Problemstellungen nicht im Vordergrund stehen kann. Der Schwerpunkt der Betrachtungen konzentriert sich auf die ingenieurtechnische Beurteilung der aus den Einzelprozessen resultierenden Eigenschaften und Parameter, der Berücksichtigung der Skaleneffekte sowie der Ableitung von Schlussfolgerungen für die langfristig zu erwartenden Prozesse für die heute betrachteten Strömungsszenarien (s. Abbildung 3-25) in einem Endlagerschacht. Die heute bereits verfügbaren mathematischen Ansätze für die modellgestützte Abbildung werden dabei nicht betrachtet.

Die nachfolgenden Betrachtungen zu Strömungsprozessen in einem Schachtverschlussdichtelement konzentrieren sich auf die Prozessbeschreibung für die unterschiedlichen Materialien und Sättigungsbedingungen eines Dichtelementes. Ausgehend von einer kurzen Beschreibung des Prozessverständnisses werden die erforderlichen beschreibenden Prozessparameter abgeleitet und, soweit möglich und im Rahmen der Bearbeitung recherchierbar, der Kenntnisstand zu ausgewählten Parametern dargestellt. Die modelltheoretische Abbildung der Prozesse wird dabei bewusst zurückgestellt. Vielmehr wurde im Verlauf der Recherchen zu diesem Bericht versucht, den Stand der Kenntnisse zu den strömungstechnisch relevanten Parametern zur Beschreibung der Ein- und Mehrphasenströmung in den genannten Wirtsgesteinen und Dichtmaterialien zu charakterisieren. In (IBeWa, 2012b) werden einzelne Ergebnisse dieser Recherche in die Prozesserläuterungen integriert.

Die Strömungsvorgänge in einem Dichtelement sind in ihren Auswirkungen bzw. ihrem Prozesseinfluss abhängig vom betrachteten Maßstab. Dies resultiert in erster Linie aus der Heterogenität der Eigenschaftsverteilung, die in der Regel an mikroskopische Maßstäbe gebunden ist, jedoch in ihrer integralen Auswirkung im Bauwerksmaßstab beurteilt werden muss. Die Ursachen für die Heterogenitäten sind vielfältig. Für die Wirtsgesteine gehören

dazu z. B. geologische Inhomogenitäten, natürliche Riss- und Kluftsysteme und unregelmäßige Verteilung strömungstechnischer Eigenschaften im Einbaubereich des Dichtelementes. Für die Dichtelemente und die zum Dichtsystem gehörenden Komponenten entsteht die Streuung der Eigenschaften möglicherweise durch den Schwankungsbereich der Eigenschaften der verwendeten Materialien (z. B. Montmorillonitgehalt, Wassergehalt), einbautechnologisch bedingte Schwankungen (z. B. Einbaudichte, flächenhafte Eigenschaftsverteilung) sowie prozessbedingt räumlich veränderliche Eigenschaften (z. B. Kompaktion entlang des Strömungs- bzw. Aufsättigungspfades). Diese Skalen- und Maßstabeffekte müssen bei der Beurteilung der Strömungsprozesse und der Dimensionierung berücksichtigt werden (IBeWa, 2012b).

### 3.3.3 Szenarien Fluidbeaufschlagung und Druckbedingungen in einem Verschlusssystem

Ausgehend von den Erläuterungen zur bergtechnischen Situation ergeben sich für ein Dichtsystem im Tongestein oder Steinsalz (Berücksichtigung der Kombination mehrerer Dichtelemente in einem Verschlusskonzept) ohne Betrachtung der zeitlichen Dauer und Reihenfolge, die in Abbildung 3-25 dargestellten, möglichen Szenarien einer Fluiddruckbeaufschlagung.

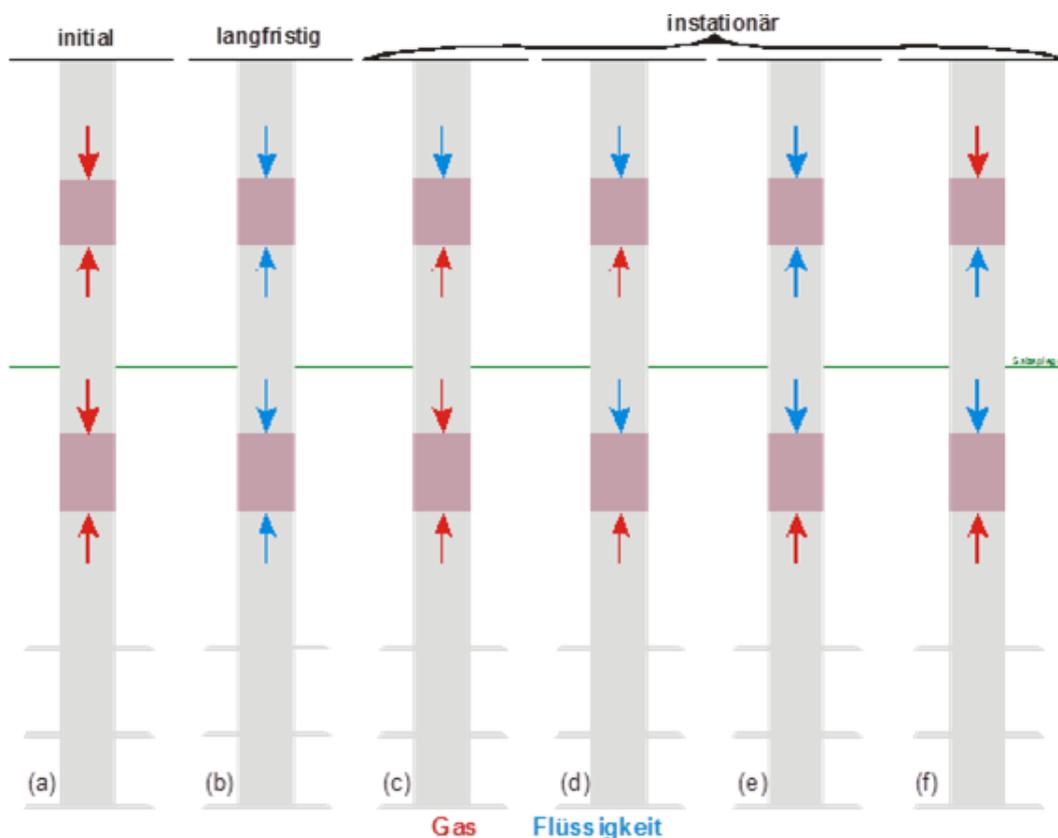


Abbildung 3-25: Szenarien der Fluiddruckbeaufschlagung für Schachtdichtungen

Es erfolgt in diesem Zusammenhang keine Betrachtung von strömungstechnischen Besonderheiten, wie wechselnden Druckbelastungen und Sättigungsbedingungen, Versagen von Dichtelementen oder Teilbereichen eines Dichtelementes oder eines konstruktiv differenzierten Aufbaus eines Dichtelementes. Die Beurteilung entsprechender Details und Prozesse wird durch die sich aus dem Verschlusskonzept und den Standortbedingungen ergebenden Verhältnisse bestimmt und muss im Zusammenhang damit analysiert und berücksichtigt werden. Dies gilt ebenfalls mit Bezug auf die Anzahl der in einem Dichtsystem kombinierten Dichtelemente und Wirkmechanismen. Auf ausgewählte Szenarien wird in (IBeWa, 2012b) näher eingegangen.

Die Strömungsprozesse in einem Schachtverschluss werden durch Wechselwirkungen der strömenden Fluide mit den Materialien und Gesteinen bestimmt. Dazu gehören u. a. Benetzung, Lösungs- und Kristallisationsvorgänge, Quellung, Trocknung (IBeWa, 2012b).

Die Strömungsprozesse in einem Dichtsystem werden bestimmt von den Druckbedingungen in der flüssigen und gasförmigen Phase. In Abhängigkeit von den in Abbildung 3-25 schematisch dargestellten Szenarien sowie den spezifischen Eigenschaften der Dichtmaterialien und der strömenden Fluide ergeben sich zeitabhängig unterschiedliche Druckbedingungen im Dichtsystem. Für die Betrachtung der Strömungsprozesse in einem Dichtsystem entsprechend Abbildung 3-24 ist die Berücksichtigung folgender Sachverhalte erforderlich:

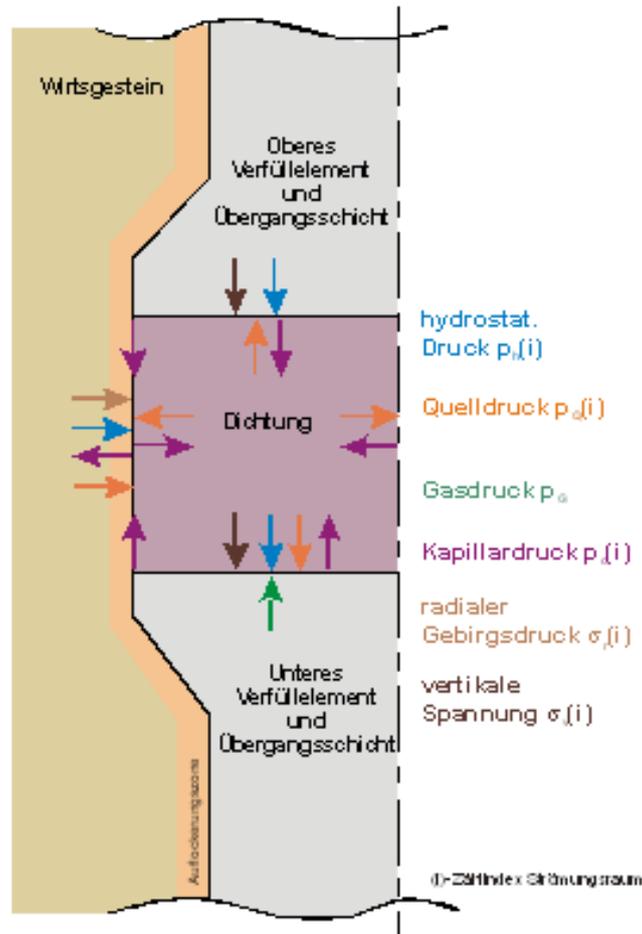
- Das Bauwerk unterliegt zeitabhängig einer veränderlichen gebirgsmechanischen Einspannung. Das Porengefüge und damit die strömungstechnischen Eigenschaften – Permeabilität, Porosität, Kapillardruck – ändern sich in Abhängigkeit von dem Einspannungszustand sowie der Höhe des Fluiddruckes im Zeitraum der Aufsättigung bis zur Einstellung konstanter Druck- und Sättigungsbedingungen.
- Die Verwendung von quellfähigen Bentonitmaterialien im Dichtelement führt dazu, dass, neben dem Fluiddruck, ebenfalls eine über das Partikelgefüge übertragene mechanische Druckkomponente im Dichtelement hervorgerufen wird.
- In Abhängigkeit von der Einbauteufe eines Dichtsystems und den Teufenbedingungen im Grubengebäude ist es nicht auszuschließen, dass der ein Dichtelement beaufschlagende Fluiddruck im Grubengebäude die Größenordnung des hydrostatischen Druckes oberhalb des Dichtelementes und der petrostatischen Einspannung im Einbaubereich erreicht und ggf. überschreitet.

Die Beurteilung von möglichen Strömungsprozessen macht daher die Betrachtung der Spannungs- und Druckverhältnisse im Einbaubereich erforderlich.

In Abbildung 3-26 sind schematisch die wirkenden Drücke und Spannungen dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen wird eine volumenstabile Begrenzung des Dichtelementes zu Grunde gelegt.

Der treibende Druckgradient für einen Strömungsprozess im Dichtsystem eines luftgefüllten Grubengebäudes ergibt sich aus dem hydrostatischen Druck im Hangenden des Dichtsystems, im umgebenden Wirtsgestein und dem Gasdruck im Grubengebäude bzw. an der Unterkante des Dichtsystems. Ausgehend von ungesättigten Bedingungen in allen ge-

nannten Strömungsräumen muss den Betrachtungen zu den Druckbedingungen im Porenfluid der Kapillardruck zu Grunde gelegt werden.



**Abbildung 3-26: Schematische Darstellung der strömungsrelevanten Drücke und Spannungen in einem Dichtsystem mit hydrostatischer Druckbelastung an der Oberkante**

Ausgehend von dem Konzept der effektiven Spannung nach Terzaghi (Terzaghi, 1936) muss die Spannungs- bzw. Druckverteilung im Porenraum in einem ungesättigten oder gesättigten Porenraum differenziert betrachtet werden. Für ein nicht quellfähiges Material ergibt sich der Druck in der flüssigen Phase aus dem hydrostatischen Druck ( $p_L = p_h$ ) in der Flüssigkeit im Porenraum. Mit zunehmender Sättigung des Porenraumes reduziert sich der Einfluss des Kapillardruckes. Für quellfähige Materialien beeinflusst der Quelldruck das sich im Porenraum einstellende Druckniveau.

### 3.3.4 Strömung in Wirtsgesteinen

Ausgehend von den im Abschnitt 3.3.3 definierten Szenarien der Fluidbeaufschlagung, dem Aufbau und den Wirkmechanismen sowie den strömungstechnischen Eigenschaften der Wirtsgesteine ergeben sich für ein Verschlussystem im Schacht unterschiedliche Strömungszustände.

Zum Zeitpunkt des Einbaus des Dichtsystems ist davon auszugehen, dass das Wirtsgestein im Einbaubereich im Ergebnis der Standzeit des Schachtes und der Offenhaltung im Zeitraum der Ausbaubereichung und des Nachschnittes als ungesättigt anzusehen ist. Gesteins- und standortabhängig ist von einer unterschiedlichen Eindringtiefe dieses ungesättigten Gebirgsbereiches auszugehen. Auf Grund der bisher nur sehr begrenzt recherchierten Erfahrungswerte zu den initialen Sättigungsbedingungen in einem Wirtsgestein wäre standortbezogen eine generelle Beurteilung der Sättigungsbedingungen im umgebenden Wirtsgestein erforderlich.

In der Hydrogeologie wird unter der Voraussetzung einer Durchlässigkeit aller geologischen Formationen und unter der Annahme eines hydrodynamischen Druckgleichgewichtes in den geologischen Formationen theoretisch eine Sättigung der Gesteinsformationen unterstellt. Auf Grund der Bedeutung dieser Ausgangssituation für die Beurteilung der Strömungsprozesse in der Formation und um das Dichtsystem sollten entsprechende Recherchen fortgesetzt und der Kenntnisstand zur Charakterisierung der initialen Bedingungen in einem Verschlussystem im Wirtsgestein sowie zu den methodischen Konzepten zur Ermittlung der initialen Sättigung vertieft werden (IBeWa, 2012b).

In Abhängigkeit vom Flüssigkeitsgehalt und den Saugspannungsverhältnissen in den eingebauten Materialien und dem Wirtsgestein ist in der Anfangsphase davon auszugehen, dass es zu Strömungsprozessen in Folge von Kapillardruckdifferenzen zwischen Wirtsgestein und Dichtmaterial kommen kann. Bei einem Transport von Flüssigkeit aus dem Wirtsgestein in die Bentonitdichtelemente des Verschlussystems kann es in der Folge zum Einsetzen von Quellprozessen in dem Dichtmaterial kommen. Für die Planung des Einbaus von Bentonitdichtelementen ist daher im Vorfeld die Charakterisierung des Kapillardruckverhaltens und der Sättigungsbedingungen in beiden Systemen erforderlich. Beim Einbau der Bentonitdichtelemente muss auf die jeweilige Situation reagiert werden.

Für den Zeitraum ungesättigter Bedingungen im Wirtsgestein und im Dichtsystem bestimmt, bei Gasdruckbelastung im Hangenden und Liegenden (Szenario (a), Abbildung 3-25), die maximale effektive Gaspermeabilität die Gasströmungsprozesse durch das Dichtsystem. Ausgehend von den zu erwartenden relativ hohen Gaspermeabilitäten in einem ungesättigten Dichtsystem (IBeWa, 2012b) ist davon auszugehen, dass eine Gasströmung in erster Linie über das Dichtsystem erfolgt. Mit Beginn des Anstiegs eines Flüssigkeitsdrucks an der Oberkante (Szenario (b) bis (e), Abbildung 3-25) des Dichtsystems beginnt der Aufsättigungsprozess der Dichtelemente und des Wirtsgesteins. Das Fortschreiten dieses Prozesses wird bestimmt von den Kapillardruckbedingungen und der initialen Sättigung sowie von

der sättigungs- und quelldruckabhängigen, effektiven Flüssigkeitspermeabilität in den genannten Strömungsräumen. In Abhängigkeit von den Permeabilitäts- und Kapillardruckbedingungen ist ein schnelleres Fortschreiten der Aufsättigung in einem der Strömungsräume nicht auszuschließen. Unter der Berücksichtigung der Ausnutzung des Quelldruckes von Bentonitdichtelementen zur Abdichtung des Kontaktbereiches zwischen Wirtsgestein und Dichtmaterial sollte geprüft werden, inwiefern durch technologische Maßnahmen im Einbauprozess und/oder die konstruktive Gestaltung der Dichtung der Aufsättigungsprozess im Dichtelement schneller voranschreitet als im Kontakt- und Auflockerungsbereich. Weiterführende Erläuterungen zum Strömungsprozess in Bentonit- und Bitumendichtelementen werden in den Abschnitten 3.3.5 und 3.3.6 gegeben.

In Abhängigkeit von der geologischen Situation, der Auflockerungszone in der Gebirgskontur und der Heterogenität des Wirtsgesteins im Einbaubereich ist auf Grund der zu erwartenden Unterschiede zwischen vertikaler und horizontaler Permeabilität der Gesteine von einer lateralen Ausbreitung der Flüssigkeit und Aufsättigung der Formation um den Schacht auszugehen. In Abhängigkeit von der Permeabilitätssituation und der Restgassättigung im Porenraum, welche sich möglicherweise erst über große Zeiträume durch die Änderung der Druckbedingungen und Lösungsprozesse reduziert, kommt es zur Einstellung der absoluten Lösungspermeabilität des Wirtsgesteins. Diese maximale Flüssigkeitspermeabilität des Wirtsgesteins bestimmt den langfristigen Strömungsprozess außerhalb des Dichtsystems im Schacht. Nach dem Einbau der Dichtung wird der Strömungsprozess von der Permeabilität der Auflockerungszone, des Kontaktzone und des Dichtelementes bestimmt. Abbildung 3-27 zeigt eine Auswahl von Beispielen zur Permeabilitätssituation in der Auflockerungszone im Steinsalz für unterschiedliche Teufen. Die Ermittlung der initialen Permeabilitätssituation im vorgesehenen Einbaubereich ist Grundvoraussetzung für die Konzipierung und Dimensionierung des Dichtsystems. Sie ist auch Voraussetzung zur Konzeption und erfolgreichen Durchführung einer möglichen Vergütung der Auflockerungszone.

Inwiefern es langfristig in Abhängigkeit von der Konvergenz des Wirtsgesteins für den sich einstellenden Gebirgsspannungszustand zu einer Reduzierung der Porosität und Permeabilität kommen kann, ist material- und standortabhängig und muss ggf. im Vorfeld der Entwicklung des Verschlusskonzeptes ermittelt werden. In Abbildung 3-28 ist ein für Steinsalz entwickelter theoretischer Ansatz für Dilatanz-Permeabilitäts-Beziehungen in Abhängigkeit von der minimalen Hauptspannung beispielhaft dargestellt (Lux et al., 2006).

Mit der Entwicklung eines Gasdruckes im Grubengebäude bzw. an der Unterkante des Dichtsystems ergibt sich eine Änderung des Druckregimes im Dichtsystem. Ausgehend von den Erläuterungen zum Druckregime in einem Dichtsystem im kommt es beim Überschreiten des Porenwasserdruckes lokal zum Einsetzen einer Gasströmung. Bestimmend für das Einsetzen eines Gasströmungsprozesses durch das Wirtsgestein sind die Porengrößenverteilung und der daraus resultierende Gaseindringdruck. Sollte der Gasdruck den Gaseindringdruck des gesättigten Wirtsgesteins überschreiten, kommt es in Abhängigkeit von der Kapillardruck-Sättigungsfunktion des Wirtsgesteins und der daraus resultierenden effektiven Gaspermeabilität zu einer Gasströmung über das Wirtsgestein. Unter der Annahme eines unver-

änderten Porengefüges ist die dafür wirksam werdende effektive Gaspermeabilität geringer als die absolute Permeabilität des Wirtsgesteins.

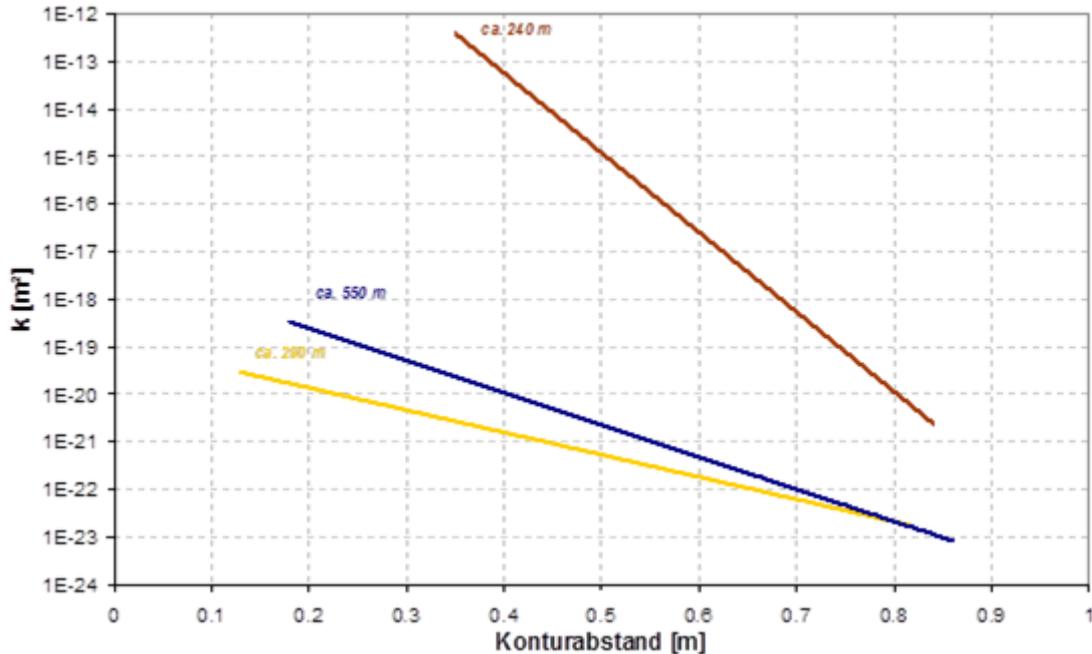


Abbildung 3-27: In situ-Gaspermeabilitäten in Abhängigkeit vom Konturabstand für ausgewählte Schachtstandorte im Steinsalz in unterschiedlichen Teufen (IBeWa, 2012a)

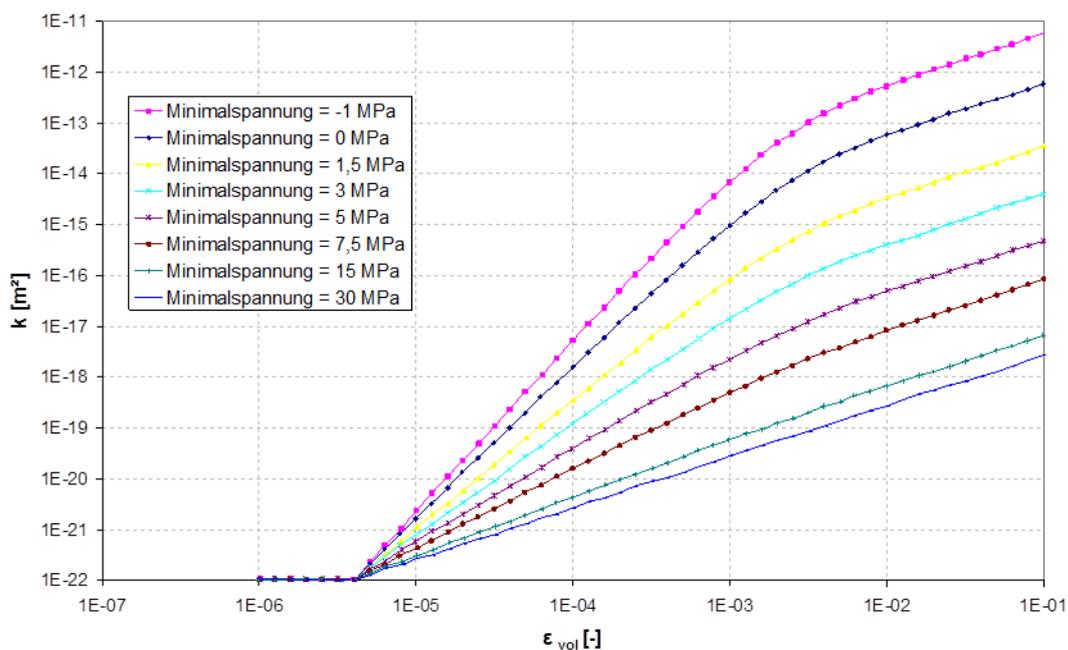


Abbildung 3-28: Dilatanz-Permeabilitäts-Beziehungen als Porositäts-Permeabilitäts-Ansatz (aus (Lux et al., 2006))(Lux et al., 2006)Die sich im Wirtsgestein einstellende effektive

Gaspermeabilität wird von der Porengrößenverteilung und dem sich daraus ergebenden Kapillardruck, der relativen Gaspermeabilität und der Gasdruckentwicklung im Grubengebäude bestimmt. Die langfristige Beurteilung eines möglichen Gasströmungsprozesses durch das Wirtsgestein erfordert eine Beurteilung dieser Eigenschaften und Randbedingungen in Abhängigkeit von dem sich nach dem Einbau des Dichtelementes einstellenden Spannungszustand

Im Zeitraum des Schachtbetriebs, der Ausbauraubung und des Nachschnittes des Gebirges muss durch die mechanische Beanspruchung, Dilatanzvorgänge und möglicherweise Trocknungsvorgänge von einer Rissbildung und Erhöhung der konturnahen Permeabilität des Wirtsgesteins ausgegangen werden. Entsprechend den Erläuterungen zur Parametrisierung von Wirtsgesteinen in (IBeWa, 2012b) ist langfristig von einer Abdichtung dieser Wegsamkeiten nach dem Einbau des Dichtelementes und der Gleichgewichtseinstellung des Spannungszustandes auszugehen. Für eine Beurteilung der strömungstechnischen Eigenschaften der konturnahen Zone des Wirtsgesteins für die unterschiedlichen Einspannungsbedingungen, sind im Rahmen der Planung des Verschlusskonzeptes standortbezogene Untersuchungen mit einem geeigneten Versuchskonzept erforderlich (s. Abschnitt 3.3.7).

Ausgehend von den kurzen Erläuterungen zu den Strömungsprozessen in den Wirtsgesteinen und den weiterführenden Erläuterungen in (IBeWa, 2012b) werden für die Charakterisierung der Strömungsprozesse im Wirtsgestein die in Tabelle 3-17 zusammengestellten Parameter und Zusammenhänge als erforderlich angesehen:

**Tabelle 3-17: Parameter und Zusammenhänge zur strömungstechnischen Charakterisierung des Wirtsgesteins**

Geologie im Einbaubereich	<ul style="list-style-type: none"> <li>– geologischer Aufbau und Schichtung → Heterogenität des Gebirges</li> <li>– Geometrie der einzelnen Strömungsräume (u. a. Mächtigkeit der aufgelockerten Zone, strömungswirksame Flächen und Volumina)</li> <li>– räumliche Ausdehnung der geologischen Formation</li> </ul>
Anfangs- und Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Temperatur, Luftfeuchte im Schacht und im Gebirge</li> <li>– Konvergenz Gebirge</li> <li>– initiale räumliche Druckverteilung</li> <li>– zeitabhängige, räumliche Druckentwicklung</li> </ul>
Parameter Wirtsgestein in Abhängigkeit Druck, Temperatur, Zeit, Ort	<p>Einphasenströmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– absolute Permeabilität</li> <li>– Porosität – totale Porosität, Porengrößenverteilung und Ableitung von Vorstellungen zur Porenstruktur und zum strömungs- und transportwirksamen Porenraum → effektive Porosität</li> <li>– initiale Sättigungsverteilung</li> </ul> <p>Wechselwirkungen Fluid-Gestein</p> <p>Zweiphasenströmung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– relative Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung</li> <li>– Kapillardruck-Sättigungsfunktion</li> <li>– Gaseindringdruck</li> <li>– Gaspermeabilität nach Überschreitung des Gaseindringdruckes</li> <li>– Restsättigungen für Gas und Flüssigkeit</li> <li>– Wechselwirkungen Fluid-Gestein</li> </ul>
Parameter Fluide (Porenlösung, Strömungsfluid) in Abhängigkeit von Temperatur und Ort:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– chemische Zusammensetzung, Dichte, Gesamtmineralisation</li> <li>– dynamische Viskosität</li> <li>– Grenzflächenspannung, Kontaktwinkel</li> </ul>

### 3.3.5 Strömung in Bentonitdichtelementen

Der Schwerpunkt der Untersuchungen zu Strömungsprozessen in quellfähigen Bentonitmaterialien und dem Langzeitverhalten konzentrierte sich in den letzten 10 bis 15 Jahren auf die Prozesse im Nahfeld der Einlagerungsbehälter. Der instationäre Prozess der Hydratation unter dem Einfluss der Temperaturentwicklung, der chemischen Wechselwirkungen und der geomechanischen Rahmenbedingungen stand dabei im Vordergrund der Forschung. Entsprechend den Erläuterungen im Abschnitt 3.3.1 beschränkte sich die Prozessbetrachtung für die Bentonitdichtelemente in Schächten auf die gegenläufigen Strömungsprozesse der aus dem Hangenden und dem umgebenden Gebirge einsetzenden Hydratation und der Gasdruckentwicklung im Grubengebäude.

Der Schwerpunkt der in der Literatur dokumentierten Untersuchungen konzentriert sich auf laborative und halbtechnische Strömungsversuche zur Hydratation, Quelldruckentwicklung

und Permeabilität von Bentonitmaterialien unterschiedlicher Zusammensetzung sowie zum Beginn der Gasströmung durch einen flüssigkeitsgesättigten Bentonit (Tanai et al, 1997), (Galle, 2000), (Herbert et al., 2002), (MFPA, 2004), (MFPA, 2009), (Kahr et al., 1986), (Agus, 2005), (Arifin, 2008), (Popp & Kern, 2001). In situ-Versuche im Bohrlochmaßstab wurden in erster Linie zu Permeabilitäts- und Aufsättigungsuntersuchungen durchgeführt u. a. (Bastiaens et al., 2007), (Rothfuchs et al., 2005). Großmaßstäbliche Untersuchungen in Bentonitdichtelelementen liegen nur vergleichsweise wenige vor (Brasser & Droste, 2008), (Bastiaens et al., 2007), (K+S, 2002).

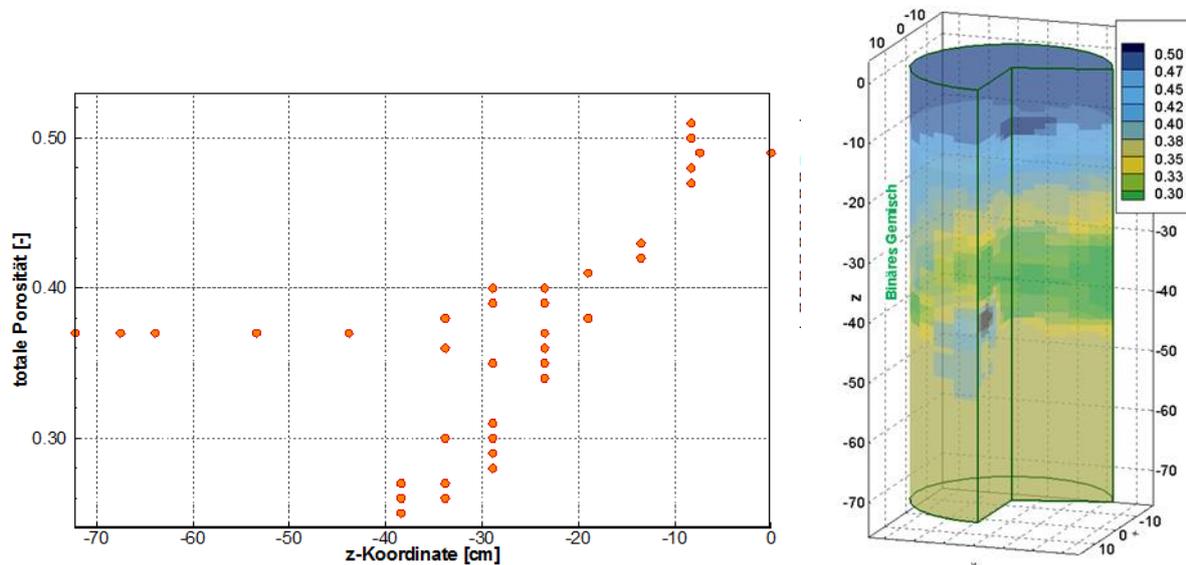
Für die in (IBeWa, 2012b) genannte Auswahl von in der Endlagerung verwendeten Na- und Ca-Bentoniten liegt mit sehr unterschiedlicher Datendichte in der Literatur eine Ausgangscharakterisierung der geotechnischen und strömungstechnischen Eigenschaften vor. Insbesondere der Natriumbentonit MX80 (Wyoming, USA) und der Calciumbentonit Calcigel bzw. früher Montigel (Bayern, BRD) werden als umfassend charakterisiert angesehen. Dies resultiert wesentlich aus der Prüfung der Materialien für die Verwendung als Buffermaterial im Endlagerbereich sowie den Einsatz als Dichtmaterial für Verschlussbauwerke in Salzbergwerken (K+S, 2002).

Neben der relativ großen Vielfalt von Bentonitmaterialien variiert ebenfalls die Palette der Modifikationen der Materialien, hinsichtlich der Kombination mit weiteren Gesteinen und Zuschlagstoffen als auch hinsichtlich der Materialaufbereitung. So kommen Bentonite als granulierten, gepresste oder Lockermischungen von Bentonit und Zuschlagstoffen (Mineralstoffgemische mit Zusatz von z. B. Basaltsplitt und anderen mineralischen Zuschlagstoffen) zum Einsatz. Reiner Bentonit kommt als Mehl, Granulat, kompaktierte Presslinge und Formsteine zur Anwendung. In Abhängigkeit von dem verwendeten Bentonit sowie der Mischung mit Zuschlagstoffen variiert der Anteil an quellfähigen Smektiten in den Bentonitmaterialien über eine große Spannweite. Diese Schwankung hat einen Einfluss auf die geotechnischen, strömungstechnischen und thermodynamischen Eigenschaften der Bentonitmaterialien.

Die komplexe Tonmineralogie, die geochemischen Wechselwirkungen mit dem strömenden Fluid und die sich daraus ergebenden Veränderungen der Tonminerale wurden intensiv untersucht u. a. (Herbert & Moog, 2002), (Hoffmann et al., 2007), (Musso & Romero, 2009), (Pusch & Forsberg, 1983), (Pusch et al., 1985), (Herbert et al., 2006), (Herbert et al., 2002), (Agus, 2005), (Arifin, 2008). Diese Prozesse im Maßstab der einzelnen Tonpartikel und Tonaggregate bestimmen in ihrem Wechselspiel und ihrer Gesamtheit die geotechnischen und strömungstechnischen Eigenschaften der Bentonite. In den nachfolgenden Erläuterungen wird der Schwerpunkt auf die resultierenden, für die Strömungsprozesse relevanten Eigenschaften gelegt.

Für die Dichtelemente wird im Einbauzustand von einer räumlich heterogenen Eigenschaftsverteilung – initiale Sättigung, Einbaudichte, Bentonitgehalt, Permeabilität, Porosität - in einem beschränkten Schwankungsbereich ausgegangen. Diese resultiert aus der Einbautechnologie und der Schwankung der Materialeigenschaften. Zur Veranschaulichung der in jedem Dichtelement zu unterstellenden räumlichen Heterogenität in der Eigenschaftsverteilung

ist in Abbildung 3-29 beispielhaft die Schwankung der totalen Porosität in einem halbtechnischen Durchströmungsversuch (Durchmesser 0,325 m; Länge ca. 0,75 m) sowie die räumliche Verteilung dargestellt (MFPA, 2009).



**Abbildung 3-29: Totale Porosität in einem Dichtelement und mögliche räumliche Verteilung (IBeWa, 2012a)**

Diese Heterogenität in der Eigenschaftsverteilung stellt für die Beurteilung der Strömungsprozesse im Dichtsystem einen wichtigen Sachverhalt dar. Lokale Schwankungen in der Eigenschaftsverteilung können zu bevorzugten Wegsamkeiten führen, die für die integrale strömungstechnische Wirkung und den Stofftransport und somit für die Dichtfunktion des Bauwerkes bestimmend sein können. Neben dem für Bentonitmaterialien diskutierten Vorlaufen der Flüssigkeitsfront im lokalen Bereich geringer Einbaudichten, höherer Porositäten und Permeabilitäten „fingering“ ist dies das klassische Szenario einer lokal höheren Permeabilität im Kontakt zwischen Dichtmaterial und Gebirge sowie in der Auflockerungszone des Gebirges (IBeWa, 2012b).

Für quellfähige Bentonitmaterialien – Granulat, Presslinge, Formsteine, Bentonit-Mineralstoffgemische – ist der weitgehend trockene Einbau eine Grundvoraussetzung für den Erhalt des Quellvermögens und die Gewährleistung der Verdichtbarkeit beim Einbau (z. B. binäres Gemisch). Für die hier betrachteten Dichtmaterialien kann für den Einbauzustand daher von ungesättigtem Porenraum und einem initialen Lösungsgehalt bzw. einer Anfangssättigung ausgegangen werden.

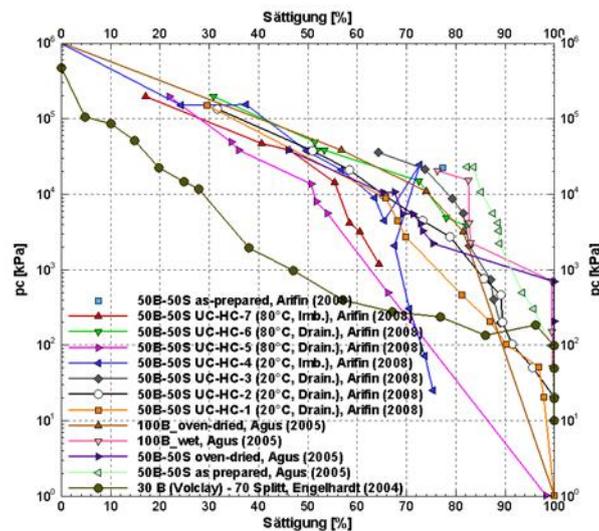
Beim Kontakt eines Bentonitdichtelementes zu einer zusitzenden Lösung (Abbildung 3-25) beginnt der Aufsättigungsprozess als Zweiphasenströmung in einem ungesättigten, quellenden Material. Der Aufsättigungs- und Quellprozess bestimmt das Porengefüge, den aus Kapillar- und Quelldruck resultierenden Porendruck, die Porenraumsättigung sowie die sich

daraus ergebenden Permeabilitäten (absolute Permeabilität, effektive Phasenpermeabilitäten). Die Anfangsphase wird von der hohen Ausgangspermeabilität des Bentonitmaterials bzw. der Bentonit-Zuschlagstoffgemische im Einbauzustand bestimmt. Erfahrungswerte weisen einen großen Permeabilitätsbereich von  $1,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  bis  $6,6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$  (u. a. (Tanai et al, 1997), (MFPA, 2004), (MFPA, 2009), (Rothfuchs et al., 2005)) nach. In Abhängigkeit von der Einbaudichte und der Einspannung des Bentonitdichtelementes kommt es, beginnend vom Aufsättigungsbereich des Dichtelementes, zur Ausbildung des Porenwasserdruckes und des Quelldruckes.

Bestimmt von der absoluten Permeabilität des Dichtelementes im aufgesättigten Bentonitbereich, setzt sich der Aufsättigungsprozess im Dichtmaterial durch die ansteigende Mächtigkeit des Aufsättigungsbereiches zusehend langsamer fort. In Abhängigkeit von der Höhe des hydrostatischen Druckes an der Oberkante des Dichtmaterials und der sich einstellenden geringen Permeabilität im gesättigten Bentonitbereich, ist eine nachträgliche Kompaktion des Bentonitdichtelementes nicht auszuschließen. Die Möglichkeit für eine solche nachträgliche Kompaktion des Bentonits resultiert aus der Minimierung des Wassergehaltes bei der Herstellung der Bentonitmaterialien und dem Einbau. Die Minimierung des Wassergehaltes gewährleistet einen maximalen Quelldruck der Bentonitmaterialien im Einbauzustand. Mit beginnender Aufsättigung erhöht sich die Kompaktionsfähigkeit des Bentonits.

Im Ergebnis dieses einsetzenden Setzungs- und Sackungsprozesses des ungesättigten Bentonits kommt es zusätzlich zu einer Erhöhung der Dichte, einer Reduzierung der Permeabilität und daraus resultierend, einer Verlangsamung des Aufsättigungsprozesses und einer Erhöhung des Quelldruckes. Im Hangenden des Dichtelementes führt die Kompaktion zu einer Absenkung der Oberkante des Dichtelementes. Durch das Verwahrungskonzept des Schachtes muss gewährleistet werden, dass ein solcher Setzungsprozess durch das im Hangenden anschließende Verfüllelement ausgeglichen wird. Dies ist die Voraussetzung für eine Gewährleistung des erforderlichen Quelldruckes im Dichtelement für die kontinuierliche Einspannung des Bentonitdichtelementes. Die Beschreibung dieses Vorgangs bzw. die Auswirkung auf den Kapillardruck ist ein wesentlicher Baustein der modelltheoretischen Beschreibung der Quell- und Strömungsprozesse in einem Dichtsystem. Zu dieser Fragestellung liegen eine Reihe von Modellansätzen vor z. B. (MFPA, 2004), (MFPA, 2009).

Ausgehend von den Erläuterungen zum Quelldruck, dem Kapillardruck und dem Gaseindringdruck in (IBeWa, 2012b) wird deutlich, dass die Porendrucksituation und der Gaseindringdruck als Voraussetzung für eine Gasströmung durch den Quelldruck im Porenraum beeinflusst werden. Für die in Abbildung 3-30 dargestellten Ergebnisse für den Kapillardruck und die daraus resultierenden Gaseindringdrücke wird deutlich, dass diese in Abhängigkeit vom Bentonitmaterial und der Einbaudichte geringer als die wirkenden Quelldrücke sind. Für die Beurteilung von Gasströmungsprozessen in einem gesättigten Bentonit ist damit nicht zwingend der Kapillardruck im gesättigten Zustand, sondern der Quelldruck, möglicherweise bestimmend für eine beginnende Gasströmung.



**Abbildung 3-30: Kapillardruck - Sättigungsfunktion für Calcigel-Sand-Gemisch (50 / 50) aufgesättigt bei konstantem Volumen (Arifin, 2008) (Imb. – Imbibition; Drain. – Drainage)**

Neben diesen sich überlagernden Druckkomponenten wird der Porendruck zusätzlich durch die zeitabhängig veränderliche gebirgsmechanische Einspannung bestimmt.

Im Abschnitt 3.3.3 werden die Druckbedingungen in einem Dichtsystem ohne quellfähige Dichtmaterialien vereinfacht dargestellt. Für die Betrachtung der Druckbedingungen in einem Dichtelement mit quellfähigem Dichtmaterial muss der Flüssigkeitsdruck um den im Porenraum wirkenden Quelldruck ergänzt werden. Im Inneren eines Bentonitaggregates bzw. zwischen den Bentonitaggregaten wirkt der Quelldruck in der immobilen flüssigen Phase im Porenraum und ruft an der Volumenbegrenzung einen Quelldruck hervor. Wirkt auf die Oberfläche eines quellfähigen Bentonitkörpers ein hydrostatischer Flüssigkeitsdruck so ergibt sich ein resultierender Porendruck in der flüssigen Phase.

Wird zu Grunde gelegt, dass der Quelldruck erst für einen vollständig gesättigten Porenraum wirksam wird, spielt er theoretisch für den Zeitraum der Aufsättigung des Porenraumes keinen bzw. erst beginnend für Flüssigkeitsgehalte nahe der vollständigen Sättigung ( $S_w = 1$ ) eine Rolle für das Druckniveau im Porenraum. In der Phase vor dem Erreichen der Flüssigkeitssättigung im Porenraum verändern der Hydratationsprozess und die einsetzende Quellung das Porengefüge in Abhängigkeit vom Quellvermögen der Tonminerale und dem vorhandenen Porenvolumen. Diese Veränderung des Porengefüges beeinflusst den Kapillardruck und in der Folge die relative Permeabilität der strömenden fluiden Phasen (s. Abbildung 3-31). Mit zunehmender Flüssigkeitssättigung steigt der Quelldruck. Untersuchungen in (Agus, 2005), (Arifin, 2008), (Agus & Schanz, 2005) zeigen, dass mit zunehmender Sättigung bzw. abnehmendem Kapillardruck bei Unterschreitung eines diskreten Kapillardruckes die Wirkung des Quelldruckes deutlich ansteigt (Abbildung 3-32). Ab diesem Sättigungszustand wird der Porendruck nicht mehr durch den Kapillardruck sondern auch durch den Quelldruck vorgegeben.

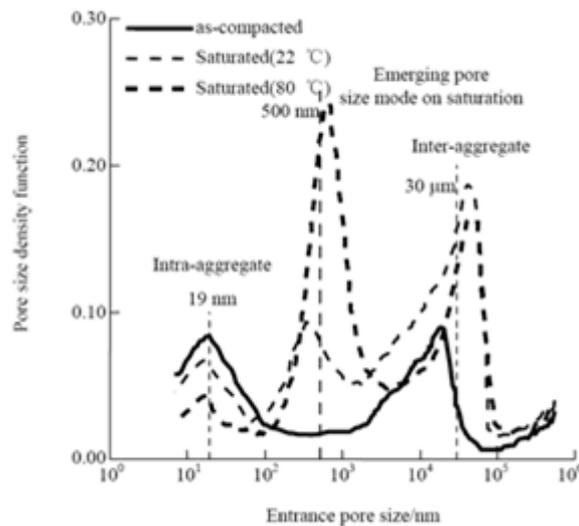


Abbildung 3-31: Porendichte in Abhängigkeit vom Porenradius FoCa Clay-Mineralgemisch (Romero & Li, 2006)

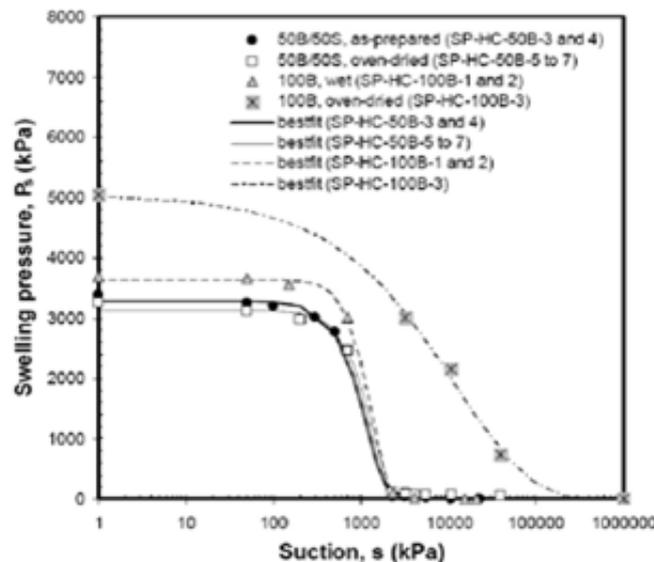


Abbildung 3-32: Zusammenhang von Quelldruck und Kapillardruck (Saugspannung) - Calcigel / Calcigel-Mineralstoffgemische (Agus, 2005)

Für die Berechnung des über die Dichtung wirksamen Druckgradienten muss dieser Zusammenhang möglicherweise berücksichtigt werden. Dies ist modell- und versuchstechnisch zu prüfen.

In Zusammenhang mit Gaseindringdruckuntersuchungen in (Pusch et al., 1985) und (Tanai et al, 1997) wurde beobachtet, dass für die gesättigten Bentonite der Gaseindringdruck dem Quelldruck entspricht. Für die Porengrößenverteilung des gequollenen Bentonits (Abbildung 3-31) von mehreren Mikrometern ist der gegenüber dem Eindringen von Gas wirksame Kapillardruck in den Makroporen (inter-Aggregat-Poren) in der Regel geringer als der wirkende Quelldruck. Für den beschriebenen Zusammenhang konnten, außer den genannten Gasein-

dringdrücken, keine Versuchsdaten und Kenntnisse in der Literatur recherchiert werden. Eine Überprüfung setzt Permeabilitätsuntersuchungen bei unterschiedlichen Druckniveaus an gequollenen Bentonitproben mit einem Quelldruck voraus.

Der Strömungsprozess über die Auflockerungszone des Gebirges bleibt von diesen Wechselwirkungen weitgehend unbeeinflusst (unter der Annahme, dass der Quelldruck nicht zur Veränderung der strömungstechnisch wirksamen Fließwege in der Auflockerungszone führt).

Die Strömungsprozesse im und über den Kontaktbereich zwischen Bentonit und Wirtsgestein müssen differenziert nach den Wirtsgesteinen betrachtet werden. Ausgangspunkt dafür bilden die Erläuterungen zu den Strömungsprozessen in den Wirtsgesteinen in Abschnitt 3.3.4 und (IBeWa, 2012b). Die Strömungsprozesse über den Kontaktbereich zwischen Bentonit und Wirtsgestein werden bestimmt von den Sättigungsbedingungen, den Kapillardrücken und dem Permeabilitätsniveau in den zwei Strömungsräumen Bentonit und Wirtsgestein. Als Ausgangspunkt ist dabei davon auszugehen, dass hinsichtlich der strömungstechnischen Eigenschaften beide Strömungsräume zweigeteilt aufgebaut sind. Die Anforderungen an die Einbaudichte des Bentonits machen erfahrungsgemäß (K+S, 2002), (Wilsnack et al., 2008) eine spezifische Materialauswahl und Einbautechnologie für den Bentonit im Kontaktbereich zum Gebirge erforderlich. Die Mächtigkeit dieses Bereiches wird in der Größenordnung mehrerer Zentimeter liegen. Die strömungstechnischen Eigenschaften dieses sensiblen Bereiches im Dichtelement müssen im Einbauzustand und im gequollenen Zustand charakterisiert werden.

Die Zweiteilung im Wirtsgestein resultiert aus der Unterscheidung in eine Auflockerungszone und das ungestörte Wirtsgestein. Die Auflockerungszone im Kontakt zum Dichtelement kann dabei Mächtigkeiten von mehreren Dezimetern erreichen (siehe Abschnitt 3.2).

In Abhängigkeit von der Porengrößenverteilung und den Sättigungsbedingungen kommt es bei der Gleichgewichtseinstellung zwischen den Kapillardruckverhältnissen zu einem Flüssigkeitstransport zwischen beiden Strömungsräumen. Führt die initiale Situation zu einem Flüssigkeitstransport aus dem Wirtsgestein in den Bentonit, ist vom Beginn der Bentoniquellung auszugehen. Eine entsprechende Möglichkeit ist in erster Linie für die Situation im Tongestein nicht auszuschließen. Die primär geringen Lösungsgehalte in der aufgelockerten Zone im Steinsalz lassen eher einen Flüssigkeitstransport aus dem Bentonit in das Steinsalz erwarten. Zur Einschätzung dieser Verhältnisse sollte die (ggf. nachgeschnittene) Auflockerungszone vor Einbau des Dichtelementes charakterisiert werden.

Mit beginnender Aufsättigung des Bentonits aus dem Hangenden sind der sich in Abhängigkeit von Kapillardruck, hydrostatischen Druck und Quelldruck einstellende Porendruck sowie die relative Flüssigkeitspermeabilität bestimmend für die Strömungsprozesse im Bentonit und im Kontaktbereich zum Wirtsgestein. In jedem Fall ist davon auszugehen, dass mit der Aufsättigung des Bentonits auch eine Aufsättigung des umgebenden Wirtsgesteins einsetzt. Auf diese Prozesse wird im Abschnitt 3.3.4 eingegangen. Für diese Prozessbetrachtungen wurde unterstellt, dass es durch die aufsättigende Flüssigkeit nicht zu Wechselwirkungen mit

den Feststoffen (Lösungs- und Kristallisationsreaktionen), die zu einer Volumenvergrößerung des Einbaubereiches und/oder zur Schaffung von Wegsamkeiten führen, kommt.

Langfristig setzt sich der Aufsättigungsprozess des Bentonits fort. In Abhängigkeit von der Permeabilitätsverteilung innerhalb des Bentonitkörpers sowie den Permeabilitätsverhältnissen zwischen Dichtelement und Auflockerungszone im Gebirge, ist ein Vorlaufen der Sättigungsfront in einem der Strömungsteilräume nicht auszuschließen. Im Bentonitelement wird sich über die Dauer des Aufsättigungsprozesses eine Vergleichmäßigung einstellen, die im Wesentlichen auf der Wirkung des Kapillardruckes im ungesättigten Bereich des Dichtelementes sowie der zunehmenden Länge des gesättigten Abschnittes mit sehr geringen absoluten Lösungspereabilitäten zurückgeführt wird. Inwiefern der Porendruck im Zeitraum der ungesättigten Bedingungen sowie der verbleibende Quelldruck bei Porenraumsättigung mit Lösung Einfluss auf den wirksamen Druckgradienten über das Dichtelement nimmt, ist nicht geklärt. Eine entsprechende Beurteilung setzt eine gezielte Auswertung vorliegender Ergebnisse und Versuchsdaten aus Quelldruck und Durchströmungsversuchen und gegebenenfalls zusätzliche kombinierte Versuche voraus.

Zur Beurteilung des Zeithorizontes des Aufsättigungsprozesses sowie den wirkenden Druckgradienten und der strömungstechnisch wirksamen Länge eines Dichtelementes liegen gegenwärtig keine abschließenden Aussagen vor. Konservativ wird für die Dimensionierung von Dichtelementen die absolute Permeabilität des Bentonits, im gequollenen Zustand und die maximale hydrostatische Druckhöhe zu Grunde gelegt. Ohne im Detail auf die verschiedenen Modellrechnungen, die zum Aufsättigungsprozess und zur Durchströmung durchgeführt wurden, einzugehen, wird eingeschätzt, dass eine abschließende Abbildung des Aufsättigungsprozesses unter Berücksichtigung der beschriebenen Teilprozesse bisher nicht erfolgt ist. Für eine Einordnung des Strömungsprozesses in die Gesamtbetrachtung und die Vorstellungen zum Zeitregime der Prozesse in einer Schachtverwahrung sollte der Vorgang der Aufsättigung auf der Grundlage vorliegender Versuchsdaten, für eine modellgestützte Abbildung aufbereitet und unter Verwendung geeigneter Programmsysteme zumindest strömungstechnisch simuliert und im Zeithorizont prognostiziert werden.

Ausgehend von den kurzen Erläuterungen zu den Strömungsprozessen in den Bentonitdichtmaterialien und den weiter führenden Erläuterungen in (IBeWa, 2012b) werden für die Charakterisierung der Strömungsprozesse in den bentonitgestützten Dichtelementen die in Tabelle 3-18 genannten Parameter und Zusammenhänge als erforderlich angesehen.

**Tabelle 3-18: Parameter und Zusammenhänge zur strömungstechnischen Charakterisierung von Bentonitdichtelementen**

<p>Aufbau und Funktionsweise</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aufbau → Heterogenität innerhalb der Segmente des Dichtelementes</li> <li>– Geometrie der einzelnen Strömungsräume (u. a. Mächtigkeit des Kontaktbereiches Dichtmaterial / Wirtsgesteinskontur, strömungswirksame Flächen und Volumina)</li> </ul>
<p>Anfangs- und Randbedingungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– entsprechend Erläuterungen zum Wirtsgestein in Tabelle 3-17</li> </ul>
<p>Parameter Material in Abhängigkeit Druck, Quellprozess, Temperatur, Zeit, Ort</p>	<p>Einphasenströmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– geochemisches Verhalten gegenüber Strömungsfluid</li> <li>– absolute Permeabilität</li> <li>– Porosität – totale Porosität, Porengrößenverteilung und Ableitung von Vorstellungen zur Porenstruktur und zum strömungs- und transportwirksamen Porenraum → effektive Porosität</li> <li>– initiale Sättigungsverteilung</li> <li>– Wechselwirkungen Fluid-Bentonit (ggf. Quellverhalten und Quelldruck)</li> </ul> <p>Zweiphasenströmung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– relative Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung</li> <li>– Kapillardruck-Sättigungsfunktion</li> <li>– Gaseindringdruck</li> <li>– Gaspermeabilität nach Überschreitung des Gaseindringdruckes</li> <li>– Restsättigungen für Gas und Flüssigkeit</li> <li>– Wechselwirkungen Fluid-Bentonit (ggf. Quellverhalten und Quelldruck)</li> </ul>
<p>Parameter Fluide:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– entsprechend Erläuterungen zum Wirtsgestein in Tabelle 3-17</li> </ul>

### 3.3.6 Strömung in Bitumen

Eine kurze Übersicht zu den einsetzbaren Bitumina wird in (IBeWa, 2012b) gegeben. Eine umfassendere Betrachtung der Bitumenarten sowie eine Beurteilung deren Anwendbarkeit in Bezug auf langzeitstabile Schachtverschlüsse wird in (Kudla et al., 2009), (Loeber et al., 1998) gegeben.

In Abhängigkeit von der Art des Bitumens, seiner Kombination mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen und den möglichen strömungstechnischen und mechanischen Belastungszuständen können bitumengestützte Dichtmaterialien das Verhalten von Feststoffen aber auch von Flüssigkeiten aufweisen. Für die hier im Vordergrund stehenden strömungstechnischen Prozesse wird grundsätzlich von dem Verhalten als Flüssigkeit ausgegangen. Dies führt dazu, dass es im Vergleich zu den in (IBeWa, 2012b) erläuterten Strömungsprozessen für zwei nicht mischbare fluide Phasen (Gas - Lösung) eine zusätzliche organische, nicht mischbare flüssige Phase zu berücksichtigen ist. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Betrachtung

eines Drei- bzw. Mehrphasensystems aus Gas – Lösung – organischer Phase (Bitumen). Wie für die Betrachtung der Zweiphasenströmungsprozesse wird der Feststoff in dieser Aufzählung nicht genannt.

Ausgehend von den Erläuterungen zur Mehrphasenströmung in (IBeWa, 2012b), ist Bitumen in einem natürlichen System mit einer Haftwassersättigung eine nicht benetzende flüssige Phase. Für die spezifischen Bedingungen eines Heißeinbaus bei Temperaturen deutlich über 100°C kann temporär und beschränkt auf die unmittelbare Gesteinsoberfläche von trockenen Bedingungen ausgegangen werden. In diesem Fall reduziert sich das zu betrachtende Phasensystem wieder auf zwei Phasen. Ist davon auszugehen, dass die Oberfläche trocken ist, kann das Bitumen als benetzende Phase angesehen werden. Inwiefern diese Prozessvorstellung zutreffend ist, kann aus den bisher vorliegenden Recherchen nicht beurteilt werden.

Da der Nachweis eines langfristig, vollständig trockenen Kontaktes zwischen Bitumen und Gebirge noch aussteht, ist, auf Grund der Benetzung einer Steinsalz- oder Silikatoberfläche durch Wasser, das Bitumen immer als nicht benetzende Phase anzusehen. Theoretisch ist daher davon auszugehen, dass für eine Feststoffoberfläche auf Grund der zu unterstellenden Porenstruktur im Kontakt zwischen Bitumen und Feststoffoberfläche und/oder in der unmittelbaren Auflockerungszone die Kapillarkräfte immer zu einer Benetzung durch wässrige Lösungen führen. Aus diesen Überlegungen folgt, dass für ein Bitumendichtsystem mit hydrostatischer Druckbelastung der Kapillardruck im Kontakt zwischen Bitumen und Gebirge bestimmend für den Strömungsprozess in dem Dichtelement wird (ohne Betrachtung der Auflockerungszone). Der Strömungsprozess durch eine bitumenbasierte Dichtung wird damit von der mechanischen Einspannung des Bitumenelementes maßgeblich bestimmt.

Die Dichtheit von Bitumen bzw. Asphalt gegenüber Flüssigkeiten, wie sie z. B. in (Kudla et al., 2009), (Rauche et al., 2004) hervorgehoben wird, lässt sich im Sinne einer Mehrphasenströmung durch das Konzept der relativen Permeabilität von Bitumen und wässriger Flüssigkeit im Porenraum beschreiben (IBeWa, 2012b). Bitumen als hoch viskose, hydrophobe Flüssigkeit im Porenraum eines Asphaltes bzw. eines anderen porösen Mediums beeinflusst in Abhängigkeit von der Sättigung die Permeabilität einer zweiten Phase, d. h. im betreffenden Fall reduziert sich die Permeabilität für die wässrige Flüssigkeit mit zunehmender Sättigung des Porenraumes mit Bitumen. Erreicht die Bitumensättigung 100 % ist die relative Permeabilität für die wässrige Flüssigkeit Null.

Aus dieser Überlegung heraus ergibt sich:

- Bitumen bzw. bitumengesättigter Asphalt ist undurchlässig,
- die Dichtheit erfordert die relative Ortsstabilität der viskosen Phase Bitumen und
- die vollständige Bitumensättigung → Benetzung → mechanische Einspannung des bitumenbasierten Dichtelementes.

Ausgehend von den kurzen Erläuterungen zu den Strömungsprozessen in Bitumenelementen und den weiter führenden Erläuterungen in (IBeWa, 2012b) ergibt sich für die Charakterisierung der Strömungsprozesse in den bitumengestützten Dichtelementen der gleiche Parameter- und Kenntnisbedarf wie für die Bentonitdichtelemente (Tabelle 3-18). Darüber hinaus macht das spezifische Verhalten von Bitumen die Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften, der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität sowie des Benetzungsverhaltens gegenüber der Wirtsgesteinskontur unter den standortbezogenen Druck-, Temperatur- und Feuchtebedingungen erforderlich.

### 3.3.7 Parametrisierung

Grundlage für die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Strömungsprozesse ist eine Parametrisierung der Strömungsräume Wirtsgestein und der unterschiedlichen Komponenten des Dichtsystems (Tabelle 3-17 und Tabelle 3-18).

Bezüglich der Zeitabhängigkeit der Strömungsparameter ist eine Differenzierung in den initialen Ausgangsstand und den sich langfristig einstellenden Einspannungs- und Sättigungszustand erforderlich. Inwiefern die dazwischen liegenden zeitabhängigen Vorgänge zu beschreiben sind, muss in Abhängigkeit vom Standort, dem Verschlusskonzept und den strömungstechnischen Randbedingungen beurteilt werden. Dies gilt z. B. für die Änderung der Permeabilität des Wirtsgesteines nach dem Nachschnitt des Ausbaus und der Gebirgskontur in Abhängigkeit von der Offenstandsdauer, der Temperatur und den Feuchtebedingungen. Ein weiteres Beispiel sind die sich möglicherweise über einen sehr langen Zeitraum verändernden Sättigungsbedingungen in einem Dichtsystem und die Auswirkungen auf die Strömungsprozesse.

Die räumliche Differenzierung der Parameterermittlung bezieht sich sowohl auf den räumlichen Aufbau der Wirtsgesteinsformation und des Dichtsystems als auch die Erfassung der Streubreite der strömungstechnischen Parameter innerhalb der Strömungsräume (Abschnitt 3.3.5, Abbildung 3-29).

Zielsetzung ist die Ermittlung repräsentativer Parametersätze für die Strömungsräume unter Berücksichtigung des materialspezifisch, geologisch und technologisch bedingten Streubereiches. Ein entsprechendes Konzept zur Erhebung repräsentativer Parameter ist dazu Voraussetzung.

In (IBeWa, 2012b) wird im Ergebnis einer Literaturlauswertung auf den Kenntnisstand zu einzelnen Eigenschaften und Zusammenhängen eingegangen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Regel die Erfahrungswerte für die Gesteine und Materialien auf einer begrenzten Anzahl von Labor- und in-situ Untersuchungen beruhen. Die aus der Probenbeschaffenheit, den Versuchsbedingungen, der Versuchsmethodik und der geologischen Heterogenität ergebende Streuung stellt eine Unschärfe für die Beurteilung der Strömungsprozesse dar. Gerade für die Tongesteine sind die Beprobung, Lagerung, Versuchsdurchführung sowie die

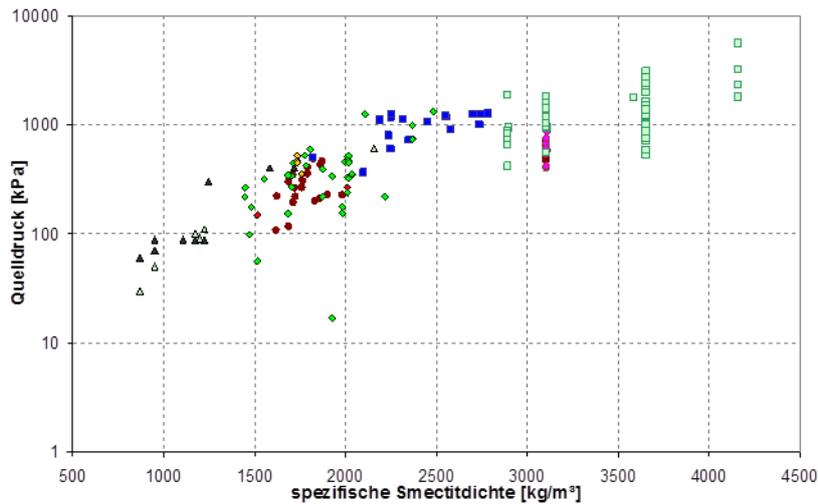
Dokumentation bestimmend für die ermittelten Parameter und die Prozessbeurteilung. Dies gilt z. B. für die angewendete Trocknungstemperatur und -dauer zur Ermittlung des Wassergehaltes, das Druckregime für Permeabilitäts- und Gaseindringdruckuntersuchungen sowie die Methodik der Porositätsermittlung.

Für die Ermittlung von Standardparametern, wie Dichte, Wassergehalt und Korngrößenverteilung liegen eine Reihe von Versuchsstandards vor, die nutzbar sind, jedoch für die Anwendung materialbezogen eine gezielte Interpretation erfordern. Für die Durchführung von Permeabilitäts-, Gaseindringdruck- und Quelldruckuntersuchungen liegen nach bisheriger Kenntnis z. B. (Herbert & Moog, 2002), (Agus, 2005) keine einheitlichen Versuchsstandards vor. In Abhängigkeit von der Zielsetzung der Untersuchungen werden diese Parameter zum Teil mit sehr unterschiedlichen Versuchskonzepten ermittelt. Vor diesem Hintergrund sollte für die Untersuchung von Wirtsgesteinen, ausgehend von einer Definition der erforderlichen Material- und Prozessparameter, die Auswahl einer Versuchspalette erfolgen (wenn nicht schon vorhanden) und als Grundlage einer Vergleichbarkeit und einheitlichen Beurteilung künftigen Untersuchungen zu Grunde gelegt werden. Die Versuchsmethodik und -bedingungen sollten sich an den Standortbedingungen im Einbaubereich orientieren und Konzepte für die Übertragung von Laborergebnissen auf in-situ Bedingungen vorgeben.

Mit Bezug auf die Erläuterungen zur Mehrphasenhydraulik (IBeWa, 2012b) sollte die Ermittlung der beschreibenden Material- und Prozessparameter (u. a. Kapillardruck, Porengrößenverteilung, relative Phasenpermeabilität und Benetzungseigenschaften der Fluide) sowie eine Vertiefung/Zusammenfassung des Prozessverständnisses (z. B. ungesättigte Strömung und Quellen) fortgeführt werden.

Die Konzipierung und Dimensionierung von Schachtverschlusssystemen sowie die Qualitätsüberwachung im Verlauf des Einbaus erfordern die Herleitung und Anwendung von beschreibenden funktionalen Zusammenhängen. Dazu gehören z. B. Permeabilitäts-Porositätsfunktionen, Spannungs-Porositäts-Permeabilitätsfunktionen (Abbildung 3-28) und der Quelldruck in Abhängigkeit von der spezifischen Smektitdichte<sup>6</sup> (Abbildung 3-33). Für die Beschreibung solcher Zusammenhänge liegt vielfach bereits eine große Fülle von Untersuchungen für unterschiedliche Fluide, thermodynamische Randbedingungen und geotechnischen Eigenschaften in der Literatur vor. Für die Beurteilung und Verwendung der Daten ist im Ergebnis der Recherche und Analyse eine Reduzierung der komplexen Einflussprozesse und Randbedingungen auf weitgehend unabhängige Ausgangsgrößen erforderlich. Abbildung 3-33 veranschaulicht dies am Beispiel des Quelldrucks unterschiedlicher Bentonitmaterialien in Abhängigkeit von dem Gehalt an quellfähigen Mineralen, normiert auf das initiale Porenvolumen.

<sup>6</sup> Smektitdichte ist der Masseninhalt (Trockenmasse) an quellfähigen Mineralen (z. B. Montmorillonit) bezogen auf das Porenvolumen



**Abbildung 3-33: Quelldruck in Abhängigkeit von dem auf das Porenvolumen normierten Gehalt an quellfähigen Mineralen (IBeWa, 2012a), (IfBuS-1, 2010), (Rothfuchs et al., 2005), (Herbert et al., 2006), (MFPA, 2009), (Miehe et al., 2003) (Reindichte von Zuschlag mit 2650 kg/m<sup>3</sup> angenommen, da kaum in den Quellen dokumentiert)**

### 3.3.8 Defizite

Der Kenntnisstand zu Strömungsprozessen in Schachtverschlusssystemen kann unterteilt werden in das grundlegende Prozessverständnis, die verfügbaren beschreibenden Material- und Prozessparameter sowie die Nutzbarkeit dieser Kenntnisse für die Standortauswahl, Konzipierung und Dimensionierung von Schachtverschlusssystemen. Für die hier betrachteten Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz sowie die Dichtmaterialien Bentonit und Bitumen kann generell eingeschätzt werden, dass die zu Grunde zu legenden Prozessvorstellungen weitgehend bekannt sind. Bezüglich der prozessbeschreibenden Parameter liegen zum Teil in der Fachliteratur eine Fülle an beschreibenden Prozessparametern und Materialparametern mit sehr unterschiedlichem Hintergrund und Informationsgehalt vor. Auf Grund der unterschiedlichen Zielsetzung der Untersuchungen, der Materialvielfalt, den komplexen Versuchsbedingungen und -methoden sowie der unvollständigen Dokumentation stehen diese Parameter und Kenntnisse für die Konzipierung, Dimensionierung und Qualitätsüberwachung von Dichtelementen nicht zur Verfügung.

Abgesehen von dem methodischen Vorgehen im Kali- und Steinsalzbergbau (Wilsnack et al., 2008), (K+S, 2002) liegen für:

- die Konzipierung, Dimensionierung und Materialauswahl,
- die Standortauswahl,
- die Einbautechnologie sowie
- die Qualitätsüberwachung und Testung

von Verschlussbauwerken in Schächten für ein HAW-Endlager bisher keine umfassenden methodischen Ansätze und zu Grunde zu legende Parametersätze für die Beschreibung der zu berücksichtigenden strömungstechnischen Zusammenhänge vor. Es liegt ein umfangreiches Wissen zu einzelnen Teilprozessen und beschreibenden Material- und Prozessparametern vor. Wie bereits oben dargestellt ist dies jedoch überwiegend dispers in einer Fülle von Fachpublikationen und Forschungsergebnissen verteilt und für die technische Realisierung eines Dichtsystems nur unaufbereitet verfügbar.

Bezüglich des Prozessverständnisses gilt dies im Besonderen für die Schwerpunkte:

- Zeitraum der ungesättigten Strömung in bentonitgestützten, quellfähigen Dichtsystemen,
- zeitabhängiges Druckregime der Fluide an der Ober- und Unterkante der Dichtsystems und die Auswirkungen auf die zeit- und ortsabhängigen Strömungsprozesse sowie
- Einfluss der gebirgsmechanischen Einspannung.

Für die material- und prozessbeschreibenden Parameter werden die Schwerpunkte gesehen in:

- der Entwicklung einer einheitlichen Methodik der Parameterermittlung,
- der Definition von Anforderungen an die Dokumentation der relevanten Materialparameter und
- der Formulierung/Zusammenfassung beschreibender funktionaler Zusammenhänge für dimensionierungs- und qualitätsrelevanten Größen.

Ausgehend von dieser Einschätzung wird die Notwendigkeit folgender Bearbeitungsschwerpunkte gesehen:

#### 1. Prozess- und Materialparameter

- Recherche, Auswertung, Qualitätsbeurteilung und verallgemeinerte Darstellung der verfügbaren beschreibenden Material- und Prozessparameter entsprechend (IBeWa, 2012b):
  - Bau- und Dichtmaterialien,
  - Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz,
  - Kontakt zwischen Dichtmaterial und Wirtsgestein im Einbaubereich,
  - Fluide,
- Identifikation von Defiziten zu Material- und Prozessparametern und Ermittlung der fehlenden Daten,
- Ableitung eines Methoden- und Parameterkataloges für die repräsentative Beprobung, Parameterbestimmungen und in-situ Untersuchungen im Rahmen der Standorterkundung und Auswahl des Einbaubereiches (Messmethodik zur volumenbezogenen Parameterermittlung aus geophysikalischen und in-situ Messmethoden) einschließlich der

- Definition von Anforderungen an die Dokumentation der erforderlichen Begleitinformationen,
- Ableitung eines für die Konzipierung und Dimensionierung von Schachtverschlusssystemen von HAW-Endlagern zu Grunde zu legenden Datensatzes,
2. Weiterentwicklung der Methodik für die Konzipierung, Dimensionierung, Einbautechnologie, Qualitätssicherung und den Funktionsnachweis von Schachtverschlusssystemen für HAW-Endlager ausgehend von dem Anwendungsstand des Kali- und Steinsalzbergbaus sowie der Sicherheitsphilosophie der VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben).
- Berücksichtigung der zum Prozessverständnis in den unterschiedlichen Dichtmaterialien und Wirtsgesteinen vorliegenden Kenntnisse bei der Konzipierung von Schachtverschlüssen – Schwerpunkte: Überlagerung von Mehrphasenströmung, Quellung, Kompaktion im Verlauf der Aufsättigung, Lösungs- und Kristallisationsreaktionen und gebirgsmechanischer Einspannung,
  - Definition der strömungstechnischen Randbedingungen (Gasdruck Grube, hydrostatischer Druck Schacht und Wirtsgestein in Abhängigkeit von der Zeit) für die Dimensionierung eines Verschlussbauwerkes unter Berücksichtigung der Ist-Situation im Wirtsgestein, dem Verschlusssystem und den zeitabhängig veränderlichen strömungstechnischen und gebirgsmechanischen Bedingungen (IBeWa, 2012b) → Ableitung von Anforderungen an die Dichtelemente,
  - Sensitivitätsanalyse für die sich im Dichtsystem überlagernden Teilprozesse, Maßstabseinflüsse und räumliche Eigenschaftsverteilung → Ableitung der für die Dimensionierung und Langzeitbeurteilung bestimmenden Strömungsprozesse (z. B. Beurteilung des Einflusses der Zweiphasenströmung für den Zeithorizont der Strömungsprozesse in einem Verschlusssystem),
  - Ableitung der modelltheoretischen Ansätze, die bei der Dimensionierung und Langzeitbeurteilung des Verschlusssystems erforderlich sind → Grundlage der Modell- und Programmauswahl für die modellgestützte Prozesssimulation und Prognose,

Die unter Punkt 1 und 2 genannten Sachverhalte bilden dann im nächsten Schritt die Grundlagen und Voraussetzungen für:

- die Entwicklung eines in-situ Funktionsnachweises für die Testung der einzelnen Komponenten des Verschlusssystems,
- die Definition der Anforderungen an die Qualitätssicherung bezüglich der Lage von Dichtelementen, der Eignungsbeurteilung der Materialien, der Einbautechnologie und der Überwachung im Verlauf des Einbaus.
- den Nachweis der Realisierbarkeit des Gesamtsystems unter in-situ Bedingungen

Diese stehen im Mittelpunkt der Vorbereitung einer großtechnischen Umsetzung und Testung eines Schachtverschlussbauwerkes für ein HAW-Endlager.

### 3.4 Geochemische Randbedingungen

Für die Entwicklung von Schachtverschlusssystemen bzw. Schachtverschlusskonzepten entsprechend den Anforderungen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle wird der natürliche bzw. thermodynamische Gleichgewichtszustand zwischen Wirtsgestein und geotechnischer Barriere (Schachtverschlussmaterial) als geochemische Randbedingung gefordert. Zur Erfüllung dieser Randbedingung ist der Phasenbestand beider Systeme (Wirtsgestein und geotechnische Barriere), die Zusammensetzung möglicher Zutrittslösung und deren Wechselwirkungen zu betrachten.

#### 3.4.1 Salzgestein

##### 3.4.1.1 Phasenbestand

Die Salzminerale bestehen entsprechend dem System der ozeanischen Salze aus den Hauptionen  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$ . Die wesentlichen Phasen sind Steinsalz, Anhydrit und Gips sowie die Kalisalze (K- und Mg-haltig) Sylvin, Carnallit, Polyhalit, Kainit und Kieserit (Tabelle 3-19). Bedingt durch die unterschiedlichen Löslichkeiten der verschiedenen Salzphasen haben sich mit der Eindampfung des Meerwassers bestimmte Salinarfolgen ausgebildet. Die stratigraphische Untergliederung in Nord- und Mitteleuropa basiert auf der Gliederung nach (Richter-Bernburg, 1955). Es werden vier Serien (= Folgen) unterschieden: Werra-Folge (Z1), Staßfurt-Folge (Z2), Leine-Folge (Z3) und Aller-Folge (Z4). Ergänzt wurden diese durch weitere, lokal begrenzte Folgen im Hangenden der Aller-Folge: Ohre-Folge (Z5), Friesland-Folge (Z6) und Fulda-Folge (Käding, 1978). Die Staßfurt-, Leine- und Aller-Folgen bilden die Hauptsalinarfolgen im Norddeutschen Becken.

**Tabelle 3-19: Salzphasen des Zechsteins**

Bezeichnung	Formel / Zusammensetzung
Halit = Steinsalz	$\text{NaCl}$
Anhydrit	$\text{CaSO}_4$
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Sylvin	$\text{KCl}$
Carnallit	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
Polyhalit	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2 \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Kainit	$\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,75 \text{H}_2\text{O}$
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Einige Salzvorkommen innerhalb der Zechsteinsequenzen sind weitgehend monomineralisch zusammengesetzt, z. B. Steinsalz und Anhydrit. Kalisalze weisen dagegen Mineralparagenesen auf und werden entsprechend der Hauptphase als Carnallit oder Sylvinit bezeichnet. Sogenannte Hartsalze bestehen aus ca. 65% Steinsalz, 15% Sylvinit und wechselnden Anteilen von Kieserit oder Anhydrit.

Endlager sollten in möglichst reinen Steinsalzhorizonten errichtet werden. Steinsalz (NaCl) ist thermisch stabil. Es kann daher ohne irreversible Schäden Temperaturen bis 200°C (und auch höher) ausgesetzt werden (durch wärmeentwickelnde Endlagerbehälter im Kontakt mit dem Wirtsgestein). Ein ausreichender Abstand ist zu Bereichen mit Salzen erforderlich, die in Gegenwart erhöhter Temperaturen Hydratwasser freisetzen und sich zersetzen (z. B. Carnallit, Kieserit, Gips).

Relevante Steinsalzbereiche mit großen Mächtigkeiten stellen die Staßfurt-Folge (Na 2) und die Leine-Folge (Na 3) dar. Tabelle 3-20 zeigt den Salzphasenbestand dieser Segmente am Beispiel des Salzstockes Gorleben (Müller-Schmitz, 1985), (Bornemann et al., 2008). Ein vereinfachter geologischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben mit Angabe der vorliegenden Sequenzen ist in Abbildung 3-34 dargestellt.

**Tabelle 3-20: Zusammensetzung des Staßfurt- und Leine-Steinsalzes am Beispiel Gorleben**

Folge	Untergliederung		Mineralbestand und Gehalte (Gew.-%)				
			alte Symbole	neue Symbole	Halit	Anhydrit	Polyhalit
Zechstein 3 Leine-Folge Z3	Anhydritmittelsalz	Na 3	z3AM	x	x		x
	Buntes Salz		z3BT	x	x	x	
	Bänder- u. Banksalz		z3BD/BK	97,1	0,4	2,0	0,5
	Orangesalz		z3OS	94,4	5,0	0,5	<0,1
	Liniensalz		z3LS				
	Basissalz		z3BS				
Zechstein 2 Staßfurt-Folge Z2	Hangendensalz	Na 2	z2HG	95,0	4,9	0,1	-
	Hauptsalz		z2HS				
	Basissalz		z2BS				

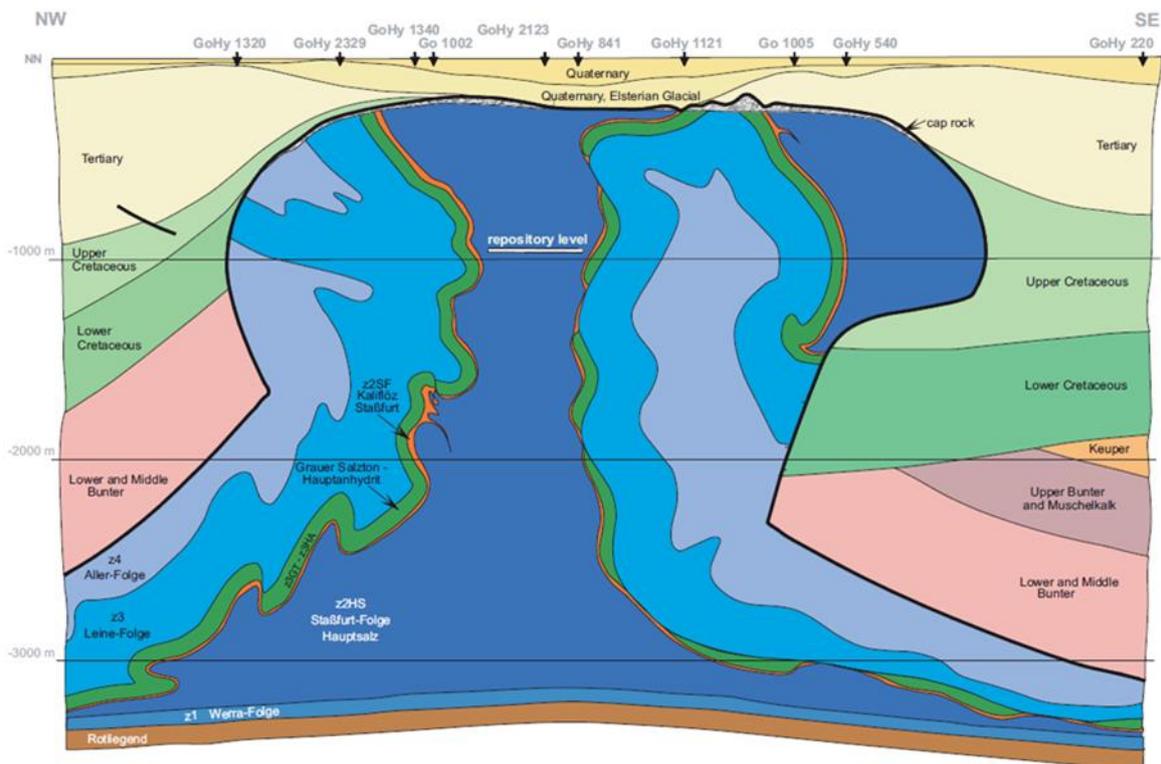


Abbildung 3-34: Vereinfachter geologischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben nach (Bornemann et al., 2008)

Neben den Steinsalzhorizonten treten in den Salinarfolgen des Zechsteins Kalisalzflöze auf. Diese Kalium- und Magnesiumsalzlagen weisen unterschiedliche Mächtigkeiten und unterschiedliche Zusammensetzungen auf (Tabelle 3-21). Im Falle eines Lösungszutritts beeinflussen diese Kalisalze (Carnallit, Kieserit, Sylvin, Kainit) die Zusammensetzung der resultierenden Lösung signifikant.

Die vorhandenen Anhydritlagen bestehen dem Namen nach hauptsächlich aus dem relativ schwerlöslichen Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) und beeinflussen die Zusammensetzung möglicher Zutrittslösung nur unwesentlich.

Die Steinsalzhorizonte, welche als mögliche Einlagerungsstandorte in Frage kommen, wie die Staßfurt-Folge (Na 2) oder die Leine-Folge (Na 3), enthalten im Detail nicht 100% reines NaCl, sondern noch Nebenbestandteile (Tabelle 3-20). Im Fall der Leine-Folge (Na 3) weist das Steinsalz folgende Zusammensetzungen in entsprechenden Lagen auf: Der Steinsalzhorizont beginnt mit dem *Anhydritmittelsalz* (z3AM), welches sich in Anhydritmittelsalz 1 - 9 weiter untergliedert. Es besteht neben Halitlagen aus feinkristallinem Anhydrit, welcher wiederum von Steinsalz und Carnallit durchsetzt ist. Weitere Bereiche bestehen aus sylvinitischen Kieserit-Anhydrit-Gestein. Die Anhydritmittelsalzsichten sind bis zu 2 m mächtig (Bornemann et al., 2008), (Fischbeck, 1985). Daran schließt sich das *Bunte Salz* (z3BT) an. Diese Steinsalzlage ist von tonig-anhydritisch-polyhalitischen Flocken oder Schichten unregelmäßig durchsetzt. Dem *Bunten Salz* schließt sich das *Bank-/Bändersalz* (z3BD/BK) an, welches sehr rein ist aber auch tonig-polyhalitische Flockenstreifen enthält (Bornemann et al., 2008).

**Tabelle 3-21: Zusammensetzung des Staßfurt- und Leine-Kaliflöz am Beispiel Gorleben (Bornemann & Fischbeck, 1987)**

Folge	Untergliederung			Mineralbestand und gegebenenfalls Gehalte (Gew.-%)			
		alte Symbole	neue Symbole	Halit	Anhydrit	Kieserit	Carnallit
Zechstein 3 Leine-Folge Z3	Kaliföz Riedel	K 3	z3RI	86	Spuren	Spuren	13 zudem 0,6 % Sylvin, in Spuren Polyhalit
	Kaliflöz Ronnenberg		z3RO	x	x	x	x sowie Sylvin, Polyhalit und Langbeinit
Zechstein 2 Staßfurt-Folge Z2	Kaliflöz Staßfurt	K 2	z2SF	57	1	16	25
	(Kieseritische Übergangsschichten)	Na 2 (K)	z2UE	x	x	x	- sowie Sylvin, Polyhalit und Langbeinit

Entsprechend der mittleren Zusammensetzung nach (Müller-Schmitz, 1985) sind zudem 0,5% Carnallit und 0,4% Anhydrit enthalten. Das sich daran anschließende *Orangensalz* (z3OS) wird in einen oberen, mittleren und unteren Bereich eingeteilt. Das mittlere Orangensalz wird auch als Gorlebenbank bezeichnet. Im Mittel enthalten diese Steinsalzlagen Anhydritlinien, polyhalitische Flockenlinien sowie Nester von Carnallit in unregelmäßiger Verteilung. Letzterer ist in der angegebenen Mineralzusammensetzung in Tabelle 3-20 für z3OS, z3LS (*Liniensalz*) und z3BS (*Basissalz*) nicht berücksichtigt (Bornemann & Fischbeck, 1987). Das *Liniensalz* gefolgt vom *Basissalz* schließt den Steinsalzhorizont der Leine-Folge ab.

Das Staßfurter Steinsalz (Na 2) besteht im zusammenhängend mächtigsten Teil aus dem *Hangendensalz* (z2HG), dem *Hauptsalz* (z2HS) und dem *Basissalz* (z2BS). Das Hauptsalz ist in weitere 3 Horizonte untergliedert: das *Kristallbrockensalz* (z2HS3), das *Streifensalz* (z2HS2) und das *Knäulsalz* (z2HS1). Neben Anhydrit enthalten diese Lagen Einschlüsse von Polyhalit (Abbildung 3-35). Die mittlere Zusammensetzung wird von (Müller-Schmitz, 1985) mit 95% NaCl, 4,9% Anhydrit und 0,1% Polyhalit angegeben (Tabelle 3-20).

Eine detaillierte Beschreibung der Stratigraphie und Petrographie der Staßfurt- Leine- und Aller-Folge ist auch in (Keller, 2007) zu finden.

Nach den vorliegenden Daten zum Phasenbestand der Steinsalzhorizonte mit Zusammensetzungen von ca. 95 – 97% NaCl und Nebenbestandteilen von Anhydrit, Polyhalit und Carnallit (ev. Kieserit) sind Entwicklungen möglicher Lösungszusammensetzungen bzw. Lösegleichgewichte zu betrachten.

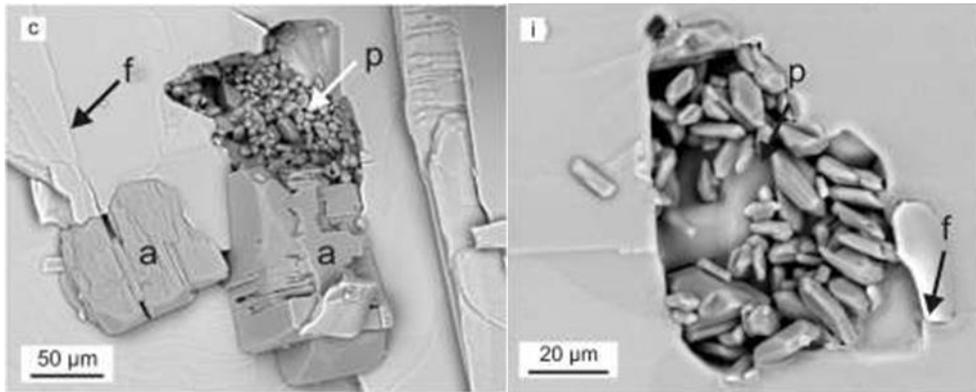


Abbildung 3-35: REM-Bilder von Einschlüssen im Kristallbrockensalz aus (Küster et al., 2011), c) Probe aus Lesum; i) Probe aus Gorleben; „a“ = Anhydrit, „p“ = Polyhalit (p

### 3.4.1.2 Entwicklung von Lösungszusammensetzungen im Gleichgewicht mit dem Phasenbestand des salinaren Wirtsgesteins

Für den Fall eines Zutritts ungesättigter Lösung (konservativer Fall: Süßwasser) kommt es bis zum Erreichen des Sättigungszustandes zum Auflösen des anstehenden Salzes. Dieser Vorgang ist beendet, sobald Ionenkonzentrationen in der Zutrittslösung erreicht sind die dem Lösegleichgewicht mit dem jeweiligen Salzphasenbestand entsprechen (Lösen und Kristallisieren des Salzes stehen im thermodynamischen Gleichgewicht). Je nach Art bzw. Phasenbestand des Salzes stellen sich unterschiedliche Ionengehalte in den Lösungen ein. Derartige Gleichgewichte sind temperaturabhängig und für das System der ozeanischen Salze bei 25°C hinreichend genau bestimmt worden. Mit Hilfe des Ionenwechselwirkungsmodells nach Pitzer (Pitzer, 1973) können diese Lösegleichgewichte für ausgewählte Salzsysteme entsprechend der experimentellen Daten berechnet werden.

Für den Phasenbestand der Steinsalzhorizonte des Zechsteins wurden die in (Harvie et al., 1984) veröffentlichten Löslichkeitsdaten und Pitzer-Parameter für das System Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO<sub>4</sub>-OH-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O bei 25°C verwendet, um die Entwicklung der Ionenkonzentrationen bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes von Lösung und Salz zu berechnen.

Für das Steinsalz der Leinefolge mit dem Phasenbestand des *Bänder- u. Banksalz* (z3BD/BK) von 97,1% NaCl, 0,4% Anhydrit, 2,0% Polyhalit und 0,5% Carnallit wurde die Entwicklung der Ionengehalte bis zum Erreichen des thermodynamischen Gleichgewichts entsprechend Abbildung 3-36 ermittelt. Demnach wird sehr schnell eine Sättigung an Halit und Anhydrit erreicht, für Polyhalit und besonders Carnallit stellt sich erst nach Kontakt mit größeren Mengen des *Bänder- u. Banksalz* das Lösegleichgewicht ein. Die Daten des Lösegleichgewichts sind in Tabelle 3-22 zusammengefasst.

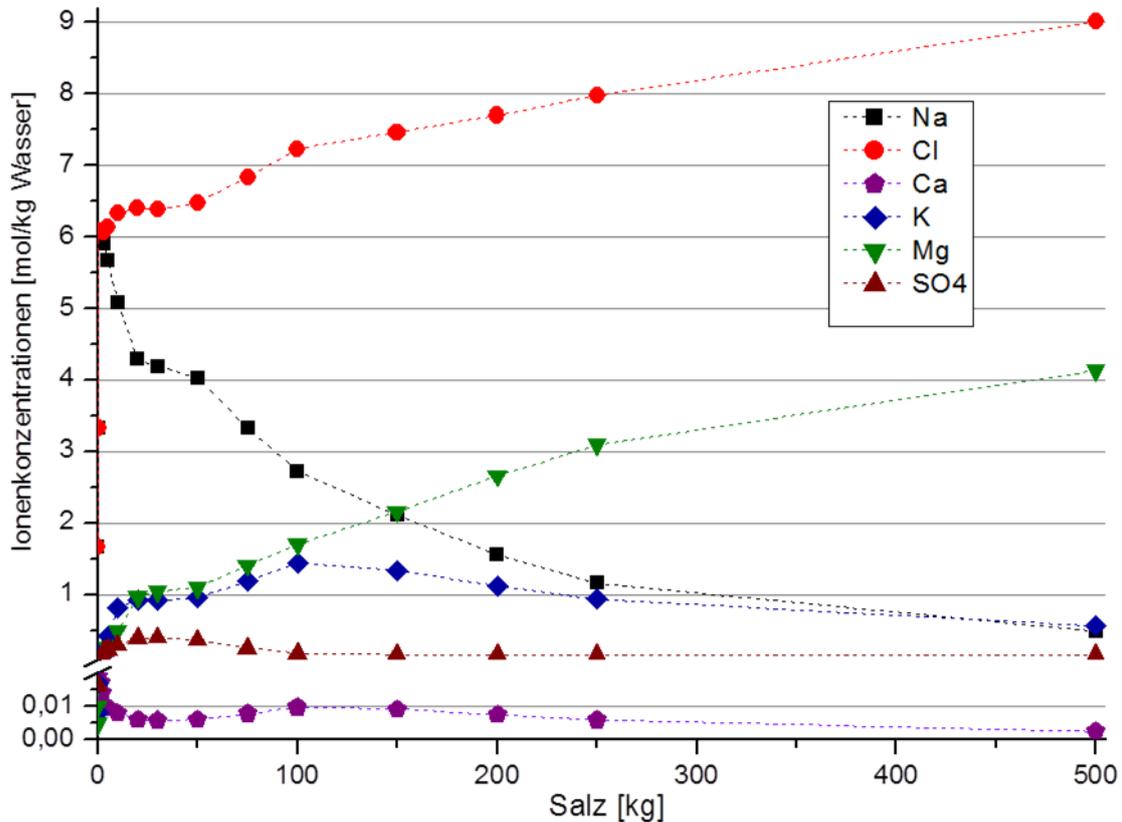
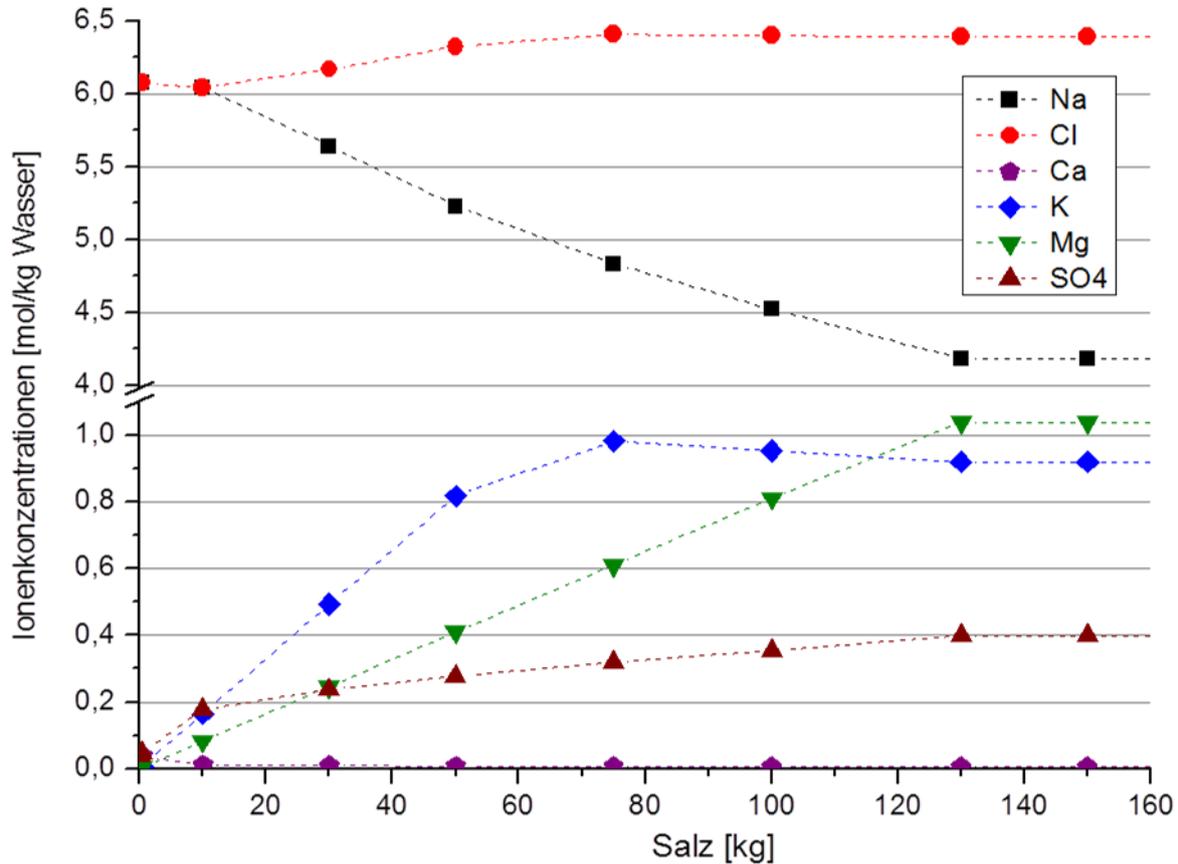


Abbildung 3-36: Entwicklung der Ionenkonzentrationen in einer Zutrittslösung (Wasser) bei Kontakt mit dem Zechstein-Steinsalz der Leine-Folge (Na 3): Bänder- u. Banksalz (z3BD/BK) (Phasenbestand s. Tabelle 3-20) bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes

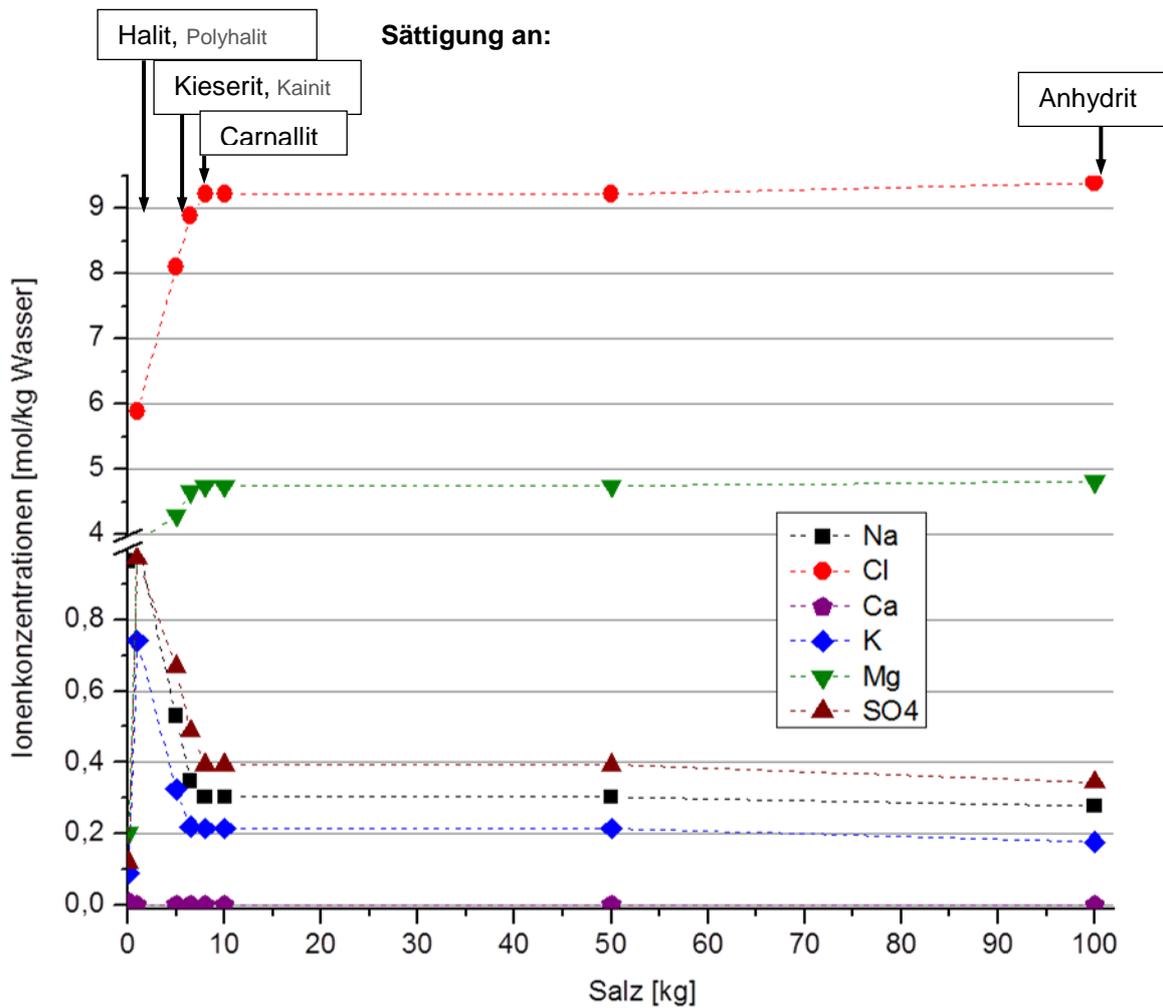
Für den Phasenbestand des *Orangensalz/Liniensalz/Basissalz* (z3OS/z3LS/z3BS) mit 94,5% Halit, 5% Anhydrit und 0,5% Polyhalit (Tabelle 3-21) wird schnell eine Sättigung an Halit und Anhydrit erreicht. Mit dem Auflösen von Polyhalit reichern sich in der Na<sup>+</sup>- und Cl<sup>-</sup>-dominierten Lösung Mg<sup>2+</sup>-Ionen an und die Na<sup>+</sup>-Konzentration fällt dadurch von etwa 6 auf 4 mol/kg Wasser ab. In diesem Verlauf werden auch die Sättigungskonzentrationen von Glauberit (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · CaSO<sub>4</sub>) und Syngenit erreicht (Abbildung 3-37). Die Daten des Lösegleichgewichts sind in Tabelle 3-22 angegeben.



**Abbildung 3-37:** Entwicklung der Ionenkonzentrationen in einer Zutrittslösung (Wasser) bei Kontakt mit dem Zechstein-Stoinsalz der Leine-Folge (Na 3): *Orangensalz (z3OS)/Liniensalz (z3LS)/Basissalz (z3BS)* (Tabelle 3-20) bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes; eine analoge Lösungszusammensetzung entwickelt sich in Kontakt mit dem Steinsalzbestand der Staßfurt-Folge

Für die Steinsalzhorizonte der Staßfurt-Folge (Na 2) wird ein zum Leinesalz (Na3):*Orangensalz/Liniensalz/Basissalz* (Abbildung 3-37) analoges Salz-Lösungs-Gleichgewicht erreicht, da ein identischer Phasenbestand (Tabelle 3-20) vorliegt, der sich nur geringfügig in den Gehaltsanteilen unterscheidet.

Die Entwicklung der Lösungskonzentration in Kontakt mit dem Phasenbestand des Kalisalzflözes Staßfurt (z2SF) mit 57% Halit, 1% Anhydrit, 16% Kieserit und 25% Carnallit (Tabelle 3-21) ist in Abbildung 3-38 dargestellt. Die Lösung wird von  $Mg^{2+}$  und  $Cl^-$  dominiert. Dabei liegen Sättigungszustände für NaCl, Polyhalit, Kieserit, Kainit, Carnallit und Anhydrit vor.



**Abbildung 3-38: Entwicklung der Ionenkonzentrationen in einer Zutrittslösung (Wasser) bei Kontakt mit dem Kaliflöz Staßfurt (z2SF) (Phasenbestand s. Tabelle 3-21, Tabelle 3-22) bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes**

Im Gesamtergebnis enthalten die Lösungen, die im Gleichgewicht mit dem Salinar des Zechsteins stehen, hohe Gehalte an Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und Cl<sup>-</sup> (sogenannte Q-, R-, IP21-Lösungen).

**Tabelle 3-22: Lösegleichgewichte für die Steinsalzformationen der Leine- und Staßfurt-Folge sowie des Kaliflözes Staßfurt**

Zechsteinschicht	Lösegleichgewicht		Entwicklung der Lösungs-zusammensetzung entsprechend:
	Salz Phasenbestand %	Lösung Ionenkonzentrationen mol/kg H <sub>2</sub> O	
Leine-Folge (Na 3) Bänder- u. Banksalz (z3BD/BK)	Halit – 97,1 Anhydrit – 0,4 Polyhalit – 2,0 Carnallit – 0,5	Na <sup>+</sup> - 0,49 Cl <sup>-</sup> - 9,01 K <sup>+</sup> - 0,56 Mg <sup>2+</sup> - 4,13 Ca <sup>2+</sup> - 0,003 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - 0,15	Abbildung 3-36
Leine-Folge (Na 3) Orangensalz (z3OS) / Linien-salz (z3LS) /Basis-salz (z3BS)	Halit – 94,5 Anhydrit – 5,0 Polyhalit – 0,5 Carnallit – 0	Na <sup>+</sup> - 4,18 Cl <sup>-</sup> - 6,39 K <sup>+</sup> - 0,92 Mg <sup>2+</sup> - 1,04 Ca <sup>2+</sup> - 0,006 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - 0,40	Abbildung 3-37
Staßfurt-Folge (K 2) Kaliflöz Staßfurt (z2SF)	Halit – 57 Anhydrit – 1 Kieserit – 16 Carnallit – 25	Na <sup>+</sup> - 0,28 Cl <sup>-</sup> - 9,39 K <sup>+</sup> - 0,18 Mg <sup>2+</sup> - 4,81 Ca <sup>2+</sup> - 0,001 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - 0,35	Abbildung 3-38

### 3.4.1.3 Lösungsvorkommen im Salz

Im Salzgebirge, so z. B. im Erkundungsbereich der Grube Gorleben, wurden nur in geringen Mengen eingeschlossene Salzlösungen gefunden welche genauso alt sind wie der Salzstock selbst. Neben diesen natürlichen Lösungen werden auch anthropogen verursachte Lösungsvorkommen sowie Mischungen aus beiden Typen vorgefunden (BfS, 2002). Eine detaillierte Beschreibung der Lösungsvorkommen und deren Entstehung sowie Zusammensetzung im Fall des Salzstockes Gorleben ist in (Keller, 2007) angegeben. Je nach Lokalität des Lösungsvorkommens wurden Sättigungskonzentrationen analysiert, die den Ionenkonzentrationen der Gleichgewichtslösungen in Tabelle 3-22 entsprechen bzw. mit diesen identisch sind oder sich „auf dem Weg“ zur Einstellung der Gleichgewichtskonzentration befinden.

### 3.4.1.4 Materialien für geotechnische Barrieren

Aus zahlreichen nationalen und internationalen Projekten mit technologischen Anwendungen liegen Erfahrungen und wissenschaftliche Untersuchungsergebnisse zu Materialien/Baustoffen vor, welche als geotechnische Barriere zur Isolierung eines Endlagers von

der Biosphäre in Betracht kommen bzw. es werden auch aktuell noch Untersuchungen an ausgewählten Stoffsystemen durchgeführt.

Entsprechend den geochemischen Randbedingungen sind für den Nachweis der Langzeitbeständigkeit dieser Materialien der thermodynamische Gleichgewichtszustand mit NaCl-gesättigten  $MgCl_2$ -haltigen Lösungen (im Bereich von Q-, R-, IP9-, und IP21-Lösungen) zu belegen oder aber auf natürliche Analoga zu stützen.

#### Salzgrus und Steinsalzformsteine

Salzgrus als Versatzmaterial und Steinsalzformsteine werden aus dem salinaren Wirtsgestein selbst gewonnen und sind damit Bestandteil des thermodynamischen Salz-Lösungs-Gleichgewichts.

#### Bentonit bzw. Tone

Bentonit stellt ein Gemisch aus verschiedenen Tonmineralien dar, wobei die Hauptphase Montmorillonit mit 70-90% enthalten ist. Als Nebenbestandteile können Glimmer, Feldspat, Quarz, Calcit und Pyrit auftreten.

Tonminerale sind Schichtsilikate, welche in schichtförmiger Abfolge aus eckenverknüpften  $SiO_4$ -Tetraederden (Si ist teilweise durch Al substituiert) (=Tetraederschicht) und kantenverknüpften  $AlO_6$ -Oktaedern (Al ist teilweise durch Mg substituiert) (=Oktaederschicht) aufgebaut sind. Eine Gruppe der Schichtsilikate stellen die Smektite dar, deren bekanntester Vertreter der Montmorillonit ist und eine Dreischicht-Struktur aufweist. Die Dreischicht-Struktur besteht aus zwei Tetraeder-Schichten, die über die Kationen einer Oktaeder-Zwischenschicht elektrostatisch vernetzt sind. Diese Schichten sind nicht starr miteinander verbunden, sondern können durch reversible Einlagerung von Wasser und Austauschkationen aufquellen.

Bentonit ist ein natürlich vorkommendes, weltweit verbreitetes Material. Anhand der konkreten chemischen Zusammensetzung der Smektitphasen (Art der Kationenbelegung) lassen sich Rückschlüsse auf die Bildungsbedingungen ziehen. Marine Bentonite sind meist mit  $Na^+$ -Ionen in den Zwischenschichten belegt (z. B. Kreide-Bentonite aus Wyoming), während fluviatile und limnische Bentonite häufig  $Ca^{2+}$ -Ionen als Zwischenschichtkation enthalten (z. B. Milos-Bentonite bzw. bayerische Bentonite aus Landshut u. Moosburg) (Hofmann, 2003).  $K^+$ -haltige Bentonite enthalten dagegen kaum noch diskreten Smektit bzw. Montmorillonit, sondern hauptsächlich Illit sowie Illit/Smektit Wechsellagerungen (hoher Kaliumgehalt in Illit und Biotit).

Der Kenntnisstand zum Verhalten von Bentoniten in Salzlösungen ist ausführlich in (Hofmann, 2003) diskutiert sowie weiterführend an natürlichen Bentonitproben untersucht. Demnach gibt es zahlreiche und auch widersprüchliche Untersuchungsergebnisse in der Literatur. Eine Auflösung von Smektit in gesättigten  $MgCl_2$ - als auch in gesättigten NaCl-Lösungen bei 200°C und 300°C wurde von (Komarneni & White, 1983a) beobachtet. Über Phasenumwandlungen oberhalb 200°C berichten (Eberl & Hower, 1977), (Inoue, 1983), (Komarneni &

White, 1983a), (Komarneni & Roy, 1983b), (Kasbohm et al., 2000). Bei niedrigeren Temperaturen, ab 25°C, wurden häufig Auflösungserscheinungen beobachtet, wenn der pH-Wert der Salzlösungen außerhalb von 6,5 - 7,5 lag (Zysset & Schindler, 1996), (Metz & Ganor, 1999), (Cama et al., 2000), (Huertas et al., 2001), (Metz, 2001). Bei diesen Untersuchungen erfolgten alle beobachteten Änderungen innerhalb kurzer Zeiträume (Tage bis Wochen). Dass die beobachteten Sachverhalte auch auf Reaktionen der Mineral-Nebenphasen zurückzuführen sein könnten, ist nicht auszuschließen, da nach Untersuchungen von (Hofmann, 2003) zur Schichtladung und Schichtladungsverteilung verschiedener Bentonitproben nur Zwischenschicht-Kationen-Austauschprozesse im Kontakt mit Salzgesteinen stattfinden, jedoch keine Phasenumwandlungen der Montmorillonite. Es wurden keine Änderungen der Eigenschaften bei Temperaturen bis 50°C über die Versuchsdauer von Monaten bis wenigen Jahren festgestellt. Es gibt keine Hinweise auf Wachstum oder Auflösung der Smektite in Salzlösungen. Salzlösungen haben somit keinen Einfluss auf die Kristallstruktur und wirken nicht destruktiv. Bentonit kann damit nachweislich stabil bleiben, wenn keine hohen Temperaturen (> ~80°C) erreicht werden, bei welchen Mineralumwandlungen stattfinden können. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass auch die Zeitdauer entscheidend ist, wie lange der Bentonit erhöhten Temperaturen ausgesetzt ist und ob in diesem Zeitraum überhaupt eine signifikante Menge an Smektiten umgewandelt werden können, so dass die Schutzfunktion eines aus Bentonit bestehenden Buffers zerstört wird. Das Quellvolumen ist in konzentrierten Salzlösungen jedoch deutlich reduziert, was auch ausführlich von (Herbert & Moog, 1999), (Herbert et al., 2008) beschrieben wurde. Als problematisch wird die Bildung von Aggregaten aus ursprünglich gleichmäßig verteilten Montmorillonit-Flocken im Bentonit und die damit verbundene Erhöhung der Permeabilität während des Kontaktes mit Salzlösung eingeschätzt (Hofmann, 2003).

Zur Einschätzung der Langzeitbeständigkeit von Bentonit bzw. der smektitischen Hauptphase Montmorillonit liegt die größte Tragweite auf Befunden von natürlichen Bentonitlagerstätten sowie zahlreicher Veröffentlichungen zu Bildungsbedingungen von Bentoniten, welche bestätigen, dass Bentonite durch Umwandlung vulkanischer Sedimente in salinärer Umgebung entstehen und dort auch über geologische Zeiträume stabile Vorkommen aufweisen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Lago-Pellegrini Lagerstätte in Nord-Patagonien. Die Bildung dieses Bentonits fand in Meerwasser statt, was durch die einheitliche Belegung der Zwischenschichten des Smektits mit Na<sup>+</sup>-Ionen neben dem Vorhandensein von Evaporiten (Salzgesteinen) belegt ist (Hofmann, 2003).

Ein „natürliches Analoga“ stellen auch die Salztone des deutschen Zechsteins dar. Speziell sind das der Braunrote Salztone (Oberer Werra-Ton) des Werra-Gebietes und der Rote Salztone als Basishorizont der Aller-Folge, deren Wirkung als wasserdichte Schutzschicht über geologische Zeiträume eindeutig belegt wurde. Der Endzustand beider natürlicher Salztone kann als Illit-Chlorit-Gemenge charakterisiert werden. Daraus lässt sich vorhersagen, dass der Bentonit nach Kontakt mit salinaren Lösung und nach geologischen Zeiträumen einen ähnlichen Zustand erreichen wird. Über die Geschwindigkeit des Erreichens dieses Endzustandes ist jedoch keine Aussage möglich (Gruner et al., 2003).

### Basaltschotter

Die Langzeitstabilität von Basalt in salinärer Umgebung ist durch ein natürliches Analogon belegt. Die Werra-Folge des Zechsteins (Z1) ist im Werra-Kali-Revier mit Basaltgängen durchzogen, welche sich infolge des tertiären Basaltvulkanismus in der Fulda-Region durch das Eindringen 1150°C heißer Basaltschmelze in die Salzformation gebildet haben und bis heute unverändert im Kontakt mit dem Salz stehen (Knipping, 1989).

### Bitumen und Asphalt

Bitumen ist ein natürlich vorkommendes wie auch aus Erdöl durch Vakuumdestillation hergestelltes Gemisch aus hochmolekularen aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen. Aus Bitumen wird durch den Zusatz von Mineralstoffen unterschiedlicher Gesteinskörnungen Asphalt hergestellt. Es gibt auch natürliche Asphaltvorkommen. Je nach Mineralstoffanteil wird dieses als Asphaltgestein (hoher Anteil) und mit weniger Mineralkornanteil als Asphaltit bezeichnet. Natürlicher Bitumen bzw. Asphalt entsteht aus Erdöl durch Verdunstung der leichter flüchtigen Bestandteile und oxidativer Polymerisation an der Erdoberfläche. Bitumen (als Bestandteil des Erdöls) ist im Zeitalter des Kambriums bis Tertiär aus organischer Substanz in Gegenwart von Salzwasser entstanden. *„Alle großen Ölfelder liegen in alten Flachseegebieten und Regionen früherer Golfe oder Binnenmeere. So sind die galizischen und rumänischen Öllagerstätten zur Tertiärzeit im schwarzen Meere entstanden, die Ölhorizonte von Apscheron und die übrigen kaspischen Lagerstätten zu gleicher Zeit im damals noch viel ausgedehnteren kaspischen Meere, die Öllager von Mesopotamien im ... persischen Golf. Die großen Ölvorräte der Central Valley of California bildeten sich, als dort noch ein Meerbusen bestand, gleich dem heutigen Golf von Kalifornien“* (Blumer, 1920). Die ursprüngliche organische wie auch die daraus hervorgegangenen bituminösen Substanzen wirken durch ihren Wasserstoffgehalt reduzierend. Das Sulfat des Salzwassers diente als Reaktionspartner und es bildeten sich daraus Sulfide, besonders FeS. Aus den Sulfiden bildete sich weiter Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), ein ständiger Begleiter aller Öllagerstätten. Primäre Lagerstätten, welche keinen tektonischen oder anderen Einflüssen ausgesetzt waren, bestehen einheitlich aus von Salzwasser, Erdöl und Erdgas durchtränkt, von Bitumen durchsetzter Ton- und Schiefermasse mit Einschaltungen poröser Sandstein- und Kalksteinbänke (Blumer, 1920).

Das weltweit größte Asphaltvorkommen ist der Asphaltsee von Trinidad. Auf der anderen Seite des Golfes von Paria, auf dem Festlande von Venezuela, liegt die zweitgrößte Fundstelle (Asphaltöl), der Pechsee von Bermudez. Auch in Deutschland gibt es Asphaltvorkommen (Asphaltberg bei Hannover; Naturasphalt-Untertageabbau bei Holzen u. a.), oftmals vergesellschaftet mit Evaporitgestein wie z. B. schwarzer, pechartiger Naturasphalt auf Anhydrit/Gipsmatrix (Weenzen, Niedersachsen). Die Asphaltvorkommen im südlichen Teil des Toten Meeres (auf der Meeroberfläche schwimmende Asphaltbrocken) sind schon seit Jahrtausenden bekannt (Tal von Siddim, Israel).

Andererseits ist auch bekannt, dass Bitumen unter Bedingungen, welche mikrobielle Aktivität ermöglichen, zerstört werden kann. Die Problematik im Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit von Bitumen für den Einsatz in einem Endlager wurde im Auftrag der NAGRA untersucht

(Wolf, 1989). Im Ergebnis wurde festgestellt, dass Bitumen sowohl unter aeroben als auch anaeroben Bedingungen abgebaut werden kann (Wolf, 1989). Der Abbau wird maßgeblich durch die chemische Zusammensetzung und den physikalischen Zustand des Bitumens sowie die vorherrschenden Umgebungsbedingungen bestimmt. In allen Fällen, auch unter optimalen Bedingungen für mikrobielles Leben, erfolgt der Abbau von Bitumen sehr langsam. Für die Betrachtung von Endlagesituationen ist davon auszugehen, dass sich mit dem Verschluss eines Endlagers nach wenigen Jahren anaerobe Verhältnisse einstellen. Bei linearer Extrapolation der für anaerobe Verhältnisse von (Wolf, 1989) ermittelten Abbaurate auf den sicherheitstechnisch relevanten Zeitraum von ungefähr 1000 Jahren muss mit einem ca. 0.3 - 0.8 %-igen Abbau der Bitumenmatrix gerechnet werden. Speziell für saline Umgebungsbedingungen existieren keine Aussagen auf der Basis von Laboruntersuchungen. Für die Einschätzung der Langzeitstabilität von Bitumen und Asphalt im Salinar liegt daher die größere Aussagekraft auf den Befunden der natürlichen Vorkommen, insbesondere der Entstehung und dem stabilen Verbleib in Kontakt mit Salzwasser über geologische Zeiträume.

#### MgO-Baustoff

Im MgO-Baustoff bilden basische Magnesiumchloridhydroxid-Hydrate ( $x\text{-}y\text{-}z$  mit  $x\text{ Mg(OH)}_2 \cdot y\text{ MgCl}_2 \cdot z\text{ H}_2\text{O}$ ) die Bindemittelphasen. Aus bekannten Löslichkeitsdaten leitet sich ab, dass die 3-1-8 Phase die thermodynamisch stabile Phase im zu betrachtenden Salz-Lösungs-System ist (Altmaier et al., 2003), (Freyer & Voigt, 2009), (Freyer & Voigt, 2010), (Dinnebier et al., 2010). Für den unwahrscheinlichen Fall einer reinen NaCl-Zutrittslösung würde eine endliche Menge des Baustoffs angelöst bis stabile Bedingungen (Anreicherung einer gewissen  $\text{Mg}^{2+}$ -Konzentration in der Kontaktlösung) erreicht sind. Diese Mengen hängen von der zutretenden Lösungsmenge ab und sind quantifizierbar (Voigt, 1999), (FZK INE, 2002). Der MgO-Baustoff ist folglich ein gegenüber  $\text{Mg}^{2+}$ -haltigen Lösungen langzeitbeständiger Baustoff, wenn die 3-1-8-Bindemittelphase (= thermodynamisch stabile Phase bis ca.  $80^\circ\text{C}$ ) vorliegt. Zahlreiche MgO-Baustoffrezepturen führen auch zur Ausbildung der 5-1-8 Bindemittelphase bzw. einem Gemisch aus 3-1-8 und 5-1-8 Phase. In Kontakt mit Salzlösung kommt es zur Umwandlung der metastabilen 5-1-8 Phase in die stabile 3-1-8 Phase. Der Verlauf der Umwandlung und welche Konsequenzen diese für die mechanischen Eigenschaften des Bauwerkes hat, hängt weitgehend von der Permeabilität und dem Einspannungszustand des Baustoffs ab. Kann für die Phasenumwandlung ein Integritätsnachweis (Phasenumwandlung bei Lösungstritt ohne Verlust der erforderlichen mechanischen Eigenschaften der Baustoffs) erbracht werden, so wäre auch ein MgO-Baustoff aus 5-1-8 Bindemittelphase als langzeitbeständig einzustufen.

#### Salzbeton

Die Bindemittelphasen des Salzbetons [Calciumsilikat-Hydrat-Phasen (CSH-Phasen)] stehen nicht im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem Salzgebirge und dessen Gleichgewichtslösungen. Die CSH-Phasen sind in konzentrierten Salzlösungen instabil. In der Literatur existieren noch keine entsprechenden Löslichkeitsdaten für CSH-Phasen. Salzbeton kann daher nur eingesetzt werden, wenn Beständigkeitsanforderungen lediglich für einen begrenzten Zeitraum gestellt werden. Die Zeit bis zur Zersetzung im Fall eines Lösungsangriffs wurde bisher aus Modellrechnungen (Transportmodelle) abgeleitet (Schmidt-Döhl,

2009) und hängt im Einzelfall von der Permeabilität des Baustoffs selbst ab. Ist diese entsprechend gering ( $k = 10^{-18} \text{ m}^2$ ), wird eine hinreichende Langzeitstabilität bzw. Dauerhaftigkeit für einen bestimmten Betrachtungszeitraum prognostiziert (GRS, 2002).

#### Steinsalz-Anhydrit-Baustoff

Im Fall von Steinsalz-Anhydrit-Baustoffen (Mischo, 2002), (Kühn, 2004), (Langefeld, 2005) stellt das Calciumsulfat-Dihydrat (Gips) die Bindemittelphase dar. Im Gleichgewicht mit dem Salinar und dessen Lösungen steht im Fall einer NaCl-gesättigten Lösung jedoch Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) im thermodynamischen Gleichgewicht. Demnach wandelt sich das Dihydrat unter Volumenverringern und Hydratwasserabgabe in Anhydrit um. Welche Konsequenzen das im Realfall für ein entsprechendes Bauwerk hat, wurde bisher nicht untersucht. Enthält die Zutrittslösung jedoch auch gewisse Konzentrationen an  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  sowie  $\text{SO}_4^{2-}$ -Ionen, bildet der Polyhalit ( $2 \text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) die thermodynamisch stabile Phase. Entsprechend der stöchiometrischen Umwandlung von Dihydrat in Polyhalit tritt keine Volumenabnahme und keine Hydratwasserabgabe auf. Unter derartigen Gesichtspunkten wurde der Baustoff jedoch bisher nicht untersucht und damit liegen auch keine Daten zu diesem Sachverhalt für den Baustoff vor, welche Aussagen zu dessen Langzeitbeständigkeit zulassen würden.

Aus den vorangegangenen Betrachtungen geht hervor, dass folgende Materialien als langzeitbeständig im Kontakt mit dem Salinar (Zechstein) und dessen Lösungen einzuschätzen sind:

- Salzgrus und Steinsalz-Formsteine
- Bentonit bzw. Tone
- Basaltschotter
- Bitumen / Asphalt
- MgO-Baustoff

Der Einsatz von Salzbeton ist an zeitlich begrenzte Anforderungen geknüpft.

### **3.4.2 Ton/Tonstein**

In einigen Ländern werden Endlagerkonzepte verfolgt, bei welchen aufgrund der geologischen Gegebenheiten Tongestein als Wirtsgestein untersucht wurde und wird. Tongesteine weisen eine große Bandbreite in ihrer mineralogischen Zusammensetzung auf. Je nach Gesteinstyp existieren plastische, verfestigte, spröde und geklüftete Tongesteinstypen mit unterschiedlichen Wassergehalten. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen resultieren aus den stattgefundenen Sedimentationsprozessen, aus Einwirkungen von Druck und Temperatur. Von Boisson (Boisson, 2005) wurde der "Clay Club Catalogue" – eine Zusammenstellung der verschiedenen Tonformationen, welche von den Mitgliedsländern der NEA im Hinblick auf potentielle Wirtsgesteine für Endlager untersucht worden sind/werden – erstellt. Dazu

gehören z. B. in der Schweiz der Opalinuston, in Frankreich der Callovo-Oxford-Ton, in Großbritannien der Oxford-Ton, in Ungarn der Boda-Ton und in Japan der Mizunami-Ton. Dabei handelt es sich um mehr oder weniger stark verfestigte Tongesteine. Plastische Tone der Boom-Formation werden in Belgien als potenzielle Wirtsgesteinsformation untersucht (Horsemann, 1987). Auch in Deutschland existieren Tonsteinformationen, die für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen untersuchungswürdig sind. Diese befinden sich in der Kreide Norddeutschlands und im Jura Nord- und Süddeutschlands (Norddeutsches Becken und Alpenvorlandbecken) (Hoth et al., 2007). Allerdings ist der Wissensstand hinsichtlich der deutschen Tonsteinformationen im Vergleich zu Salz deutlich geringer.

Tone besitzen eine Reihe von günstigen Eigenschaften für die Endlagerung von radioaktivem Abfall, wie die sehr geringe Wasserlöslichkeit, geringe Permeabilitäten für Grundwasser, chemische Pufferkapazität, Selbstverheilung, Kationenaustauschreaktionen, Rückhaltevermögen für Radionuklide, Selbstverheilung durch Quellung bei Wasserkontakt (rückläufig mit zunehmender Tiefe der Tonsteinlagen). Nachteilig sind Inhomogenitäten (Schichtungen mit anderen Gesteinslagen) und die geringe Wärmeleitfähigkeit.

Tone werden nicht nur als Wirtsgestein sondern gleichzeitig auch als Material für den Einsatz als geotechnische Barriere untersucht (s. Bentonit).

### 3.4.2.1 Phasenbestand

Tonminerale sind im Wesentlichen wasserhaltige Aluminiumsilikate, welche den Hauptbestandteil von Tonen und Tonsteinen bilden. Die Tonminerale (Schichtsilikate) sind aus 2-dimensional verknüpften  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern (zum Teil Si substituiert durch Al) sowie 2-dimensional verknüpften  $\text{AlO}_6$ -Oktaedern (zum Teil Al substituiert durch Mg) aufgebaut. Die Tetraederschichten wechsellagern mit den Oktaederschichten. Dabei kann sowohl eine Tetraederschicht mit einer Oktaederschicht (Zweischicht-Tonminerale) als auch zwei Tetraederschichten mit einer dazwischen liegenden Oktaederschicht (Dreischicht-Tonminerale) verknüpft sein. Über Kationen in den Schichtzwischenräumen sind die Schichtabfolgen elektrostatisch miteinander verbunden. Zu den Zweischicht-Mineralen zählen z. B. Kaolinit und Serpentin, zu den Dreischicht-Mineralen z. B. Montmorillonit und Glimmer. Zu Vierschicht-Tonmineralen gehören die Chlorite. Neben diesen überwiegend feinstkörnig (Korngröße  $< 2 \mu\text{m}$ ) vorkommenden Mineralen können Tone noch weitere organische und anorganische Materialien enthalten, wie z. B. Quarz, Kalzit, Dolomit, Feldspäte, u. a.. Unter Einwirkung von Druck und Temperatur (Diagenese) kommt es zu mineralogischen Umwandlungen verbunden mit Veränderungen in den mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften. So entstehende Tonsteine bzw. Tongesteine (auch Tonschiefer) weisen einen höheren Verfestigungsgrad auf. Die Quellfähigkeit nimmt aufgrund der Illit-Bildung z. B. aus Montmorillonit ab. Die Genese und Zusammensetzung von Ton bzw. Tongestein ist umfassend von (Brasser et al., 2008b) beschrieben. Je nach Zusammensetzung der Tone (Anteile an verschiedenen Tonmineralen, Wassergehalte und Nebenbestandteile) unterscheiden sich diese in ihren Eigenschaften. In einer Studie der BGR von 2007 sind detaillierte Unterschiede und deren geohistorische Ursachen zusammengefasst (Hoth et al., 2007).

Für den Opalinuston (Schweiz) wurden alle verfügbaren Daten, wie Geologie, Mineralogie, Gesteinschemie, Porenwasserzusammensetzung und hydraulische Eigenschaften in (Bossart & Thury, 2008), (NAGRA, 2002b) zusammengestellt.

Opalinus-Ton (Mont Terri) enthält durchschnittlich 66% Tonminerale (Minimum: 27%, Maximum 93%). Im Mittel ist Illit mit 23%, Kaolinit mit 22%, Illit-Smektit mit 11% und Chlorit mit 11% enthalten. Begleitminerale sind Quarz (13.7%), Calcit (13%), Siderit (3 %), Pyrit (1.1%) sowie Feldspat (2%) und Gips (0.2%). Der Kohlenstoffanteil aus organischen Bestandteilen wurde mit 0.8% bestimmt. Der Wassergehalt des Opalinustons liegt zwischen 5.0% und 9%. Eine Kationenaustauschkapazität von 11.1 meq/g (meq: Mol-Äquivalent) wurde bestimmt. Im Einzelnen liegen die Werte für Natrium und Kalium bei 5.1 bzw. 0.8 meq/100g Tonstein, für Magnesium und Calcium wurden 2.0 bzw 3.0 meq/100g Tonstein im Mittel bestimmt (Bossart & Thury, 2008), (NAGRA, 2002b).

Der Boom-Ton in Belgien enthält im Mittel 60% (Min: 30%, Max: 70%) Tonminerale, ebenso der Mizunami-Ton in Japan (Min: 40%, Max: 80%). Der mittlere Gehalt im französischen Callovo-Oxford-Ton liegt bei 45% (Min: 25%, Max:60%). Der Wassergehalt wurde ähnlich dem Opalinus-Ton im Durchschnitt mit 5% bestimmt. Wesentlich höher ist dieser im plastischen Boom-Ton mit 18-24%. Für den Mizunami-Ton werden im Maximum sogar 53% angegeben (Minimum: 14%) (Boisson, 2005). Die angegebenen Wassergehalte beinhalten auch das in der Kristallstruktur gebundene Wasser, welches nicht frei beweglich ist.

### 3.4.2.2 Porenlösungen

Das (geringe) Porenvolumen der Tonsteinmatrix ist meist wassergesättigt. Die chemische Zusammensetzung (Ionenkonzentration, pH-Wert) resultiert aus der Entwicklungsgeschichte der Tonlagerstätte und der jeweiligen mineralogische Zusammensetzung der Tone bzw. Tongesteine selbst sowie umliegenden Aquiferen. So wurde für den Opalinus-Ton nachgewiesen, dass das primäre Porenwasser Meerwasser war. Die Porenwasseranalysen zeigen jedoch deutliche Unterschiede. Die ermittelten Chlorid-Konzentrationsprofile weisen auf einen diffusiven Stofftransport vom Wirtgestein über die Rahmengesteine in die umgebenden Grundwässer (NAGRA, 2002b). Die darüber hinaus im Detail unterschiedlichen Ionenkonzentrationen resultieren aus einer komplexen Entstehungsgeschichte der Porenwässer.

Zusammensetzungen von Porenwässern verschiedenen Tonsteinformationen sind in (Brasser et al., 2008b), (Boisson, 2005) zusammengefasst, ausführlicher für Opalinus-Ton in (NAGRA 2002b), (Bossart & Thury, 2008) dargestellt.

Generell handelt es sich bei Porenwässern der Tone und Tongesteine um wässrige Lösungen mit einem geringen Mineralisationsgrad (0,2 - 20g/L (Boisson, 2005)), da die im Kontakt stehenden Schichtsilikate und Begleitminerale des Tongesteins nur sehr geringe Löslichkeiten aufweisen (Gleichgewichtslösungen mit geringen Ionenkonzentrationen).

### 3.4.2.3 Materialien für geotechnische Barrieren

Wesentliche Untersuchungen zu Verfüllmaterialien in Bezug auf den Verschluss eines Endlagers im Ton wurden im Auftrag der NAGRA durchgeführt. Im Verschlusskonzept (NAGRA, 2002a) sind unterschiedliche Materialien für verschiedene Bereiche des Tiefenlagers vorgesehen.

Für die Errichtung einer geotechnischen Barriere sind Materialien erforderlich, welche im Gleichgewicht mit dem Wirtsgestein stehen und durch welche die Integrität der Barrierewirkung des Wirtsgesteins wieder hergestellt wird.

#### Bentonit bzw. Tonstein

Bentonit stellt ein Gemisch aus verschiedenen Tonmineralien dar, wobei die Hauptphase Montmorillonit mit 70-90% enthalten ist. Als Nebenbestandteile können Glimmer, Feldspat, Quarz, Calcit und Pyrit auftreten (s. Bentonit unter 3.4.1). Die Porenwasserzusammensetzung liegt entsprechend im Bereich von Ton und Tongestein, da es sich um ein zum Wirtsgestein Ton arteigenes Material handelt, wodurch Langzeitbeständigkeit in Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein gegeben ist.

#### Basaltschotter

Basalt ist ein langzeitbeständiges Gestein, welches seit geologischen Zeiträumen existiert und beim Abkühlen aufsteigender Lava entstanden ist. Basalt gehört daher zu den Magmatiten, den Ergussgesteinen, speziell handelt es sich um Gesteine der Feldspat-Vulkanite. Aus chemischen Analysen geht hervor, dass es sich um basische Gesteine handelt, im Wesentlichen mit einer Zusammensetzung von 45-50%  $\text{SiO}_2$ , 10-15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und 8-10%  $\text{CaO}$ , hinzu kommen Anteile an  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  und  $\text{Na}_2\text{O}$  (Jubelt & Schreiter, 1972). Alle angegebenen Oxidbestandteile treten in Form verschiedener Silikatphasen (-minerale) im Basaltgestein auf. Die Grundeinheit bilden unterschiedlich verknüpfte  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder, wobei Si durch Al substituiert sein kann. Metallkationen sind über elektrostatische Wechselwirkungen in den Strukturen eingebunden.

Basalte zählen zu den dichtesten und festesten Natursteinen für Schotter. Sie sind weltweit verbreitet, riesige Vorkommen sind in Ozeanböden zu finden. Das Auftreten in Kontakt mit Meerwasser, wie beispielsweise die Basaltsäulen auf der Insel Staffa in Schottland zeigt, dass Basalt ein langzeitbeständiges Gesteinsmaterial in Gegenwart mineralisierter Wässer ist.

#### Bitumen und Asphalt

Natürliche Vorkommen von Bitumen und Asphalt in Gegenwart von Sedimentgesteinen wie auch mineralisierten Wässern belegen die Beständigkeit des Materials unter den geochemischen Randbedingungen, wie sie im Ton bzw. Tongestein vorliegen.

#### Zement/Beton

Der Mineralphasenbestand und die Porenwasserzusammensetzung von Ton bzw. Tonstein kann durch zementhaltige Stoffe beeinflusst werden. Durch den Kontakt des Porenwassers mit dem Zement kommt es über lange Zeiträume zur Bildung von alkalischen Lösungen,

welche die Korrosion des Zementes selbst bewirken (Auflösung/Umwandlung der CSH-Bindemittelphasen). Damit verbunden kommt es zu einer begrenzten Phasenumbildung der Tonminerale und Begleitminerale im Bereich der Auflockerungszone, allenfalls wenige Meter darüber hinaus. So führt die Auflösung von Dolomit, Tonmineralien und anderen Silikaten zur Neubildungen von Calcit, Illit, Mg-Hydroxiden und Ca-Al-Si-Hydraten verbunden mit einer Verringerung der Porosität und Permeabilität sowohl in den Zement- wie auch in den Tonstein-Umwandlungszonen. Aus diesen Ergebnissen experimenteller Untersuchungen und Modellrechnungen folgert die Nagra, dass die Wechselwirkungen zwischen Zement und Ton (im betrachteten Fall Opalinuston) keine nachteiligen Auswirkungen auf die Sicherheit eines Endlagers haben. Zement (Beton bzw. Mörtel) ist in Endlagerkonzepten als Ausbau- und Verfüllmaterial vorgesehen, damit aber auf den Einsatz als technische Barrieren (Containermaterial und Verfüllmaterial zwischen Containern sowie Betonpfropfen in Einlagerungsbereichen) beschränkt (NAGRA, 2002a). In diesem Zusammenhang wird die Anwendung von „low-pH-concrete“ (Zement bzw. Beton mit niedrigem pH-Wert) diskutiert (Cau Dit Coumes, 2008), (Garcia-Sineriz et al., 2008). Zur Vermeidung hoher Abbindtemperaturen ist die Verarbeitung als Spritzbeton vorgesehen.

Der Einsatz von Zement/Beton für den Schachtverschluss (geotechnische Barriere) wird nicht diskutiert.

Für die Errichtung einer geotechnische Barriere im Wirtsgestein Ton lassen sich den vorangegangenen Betrachtungen die folgenden Materialien ableiten:

- Bentonit bzw. Tone
- Basaltschotter
- Bitumen / Asphalt

### 3.5 Ableitung von Kenntnisdefiziten

Zu den Randbedingungen eines zukünftigen deutschen HAW-Endlagers für die Wirtsgesteine Salz und Tongestein leiten sich die nachfolgend beschriebenen Kenntnisdefizite ab. Diese Kenntnisdefizite sind für die Wirtsgesteinoption Tongestein durch das Fehlen eines erkundeten Standortes im Tongestein bedingt.

Für die Wirtsgesteinoption Steinsalz beziehen sich die Information auf den einzigen mit dieser Zielsetzung erkundeten Standort Gorleben. Die Kenntnisse zu den geomechanischen Randbedingungen am Standort Gorleben sind sehr umfangreich (siehe Abschnitt 3.1). Bei der angenommenen Auswahl eines alternativen Standortes im Steinsalz (z. B. in der flachen Lagerung) sind die grundlegenden geomechanischen Erkenntnisse übertragbar, es ist lediglich eine Parameterbestimmung erforderlich.

Für die Wirtsgesteinsoption Tonstein sind die geomechanischen Randbedingungen nicht spezifizierbar, da ein diesbezüglich erkundeter Standort nicht vorliegt. Es sind bisher lediglich untersuchungswürdige Modellregionen ausgewiesen, in denen keine Erkundungen durchgeführt wurden (siehe Abschnitt 3.1.8). Anhand allgemeiner Kenntnisse zu den bisher vorgeschlagenen Regionen ist eine grobe Klassifikation der wahrscheinlich vorliegenden Tongesteine möglich. Aufgrund internationaler Arbeiten im Tongestein und der Teilnahme deutscher Wissenschaftler an Teilen der Materialuntersuchungen der Nagra liegen Erfahrungen zum geomechanischen Verhalten von Opalinuston vor. Es wird eingeschätzt, dass die erwarteten Materialparameter für einen süddeutschen Standort tendenziell den Parametern des Opalinustons nahe kommen. Für norddeutsche Standorte wird vermutet, dass ähnliche Parameter, wie für die Tongesteinsschichten im Endlager Konrad vorliegen könnten (siehe Abschnitt 3.1.9)

Zur Ausdehnung der Auflockerungszone wurden Modellrechnungen durchgeführt, aus denen sich grundlegende Erkenntnisse zur Ausbreitung der ALZ ableiten lassen (siehe Abschnitt 3.2). Die Genauigkeit dieser Prognose wird durch den Erkundungsstand im Bereich der Schachtkontur bestimmt. Für die Option Tongestein ist eine Validierung der Berechnungsergebnisse zurzeit nicht möglich.

Zur Charakterisierung der bestimmenden Strömungs- und Transportprozesse (siehe Abschnitt 3.3) liegen die meisten Kenntnisdefizite vor. Einerseits sind für beide Wirtsgesteinsoptionen sowie für die Dichtmaterialien Bentonit und Asphalt die zugrunde liegenden Prozessvorstellungen weitgehend bekannt. Andererseits wird eingeschätzt, dass konkrete Parameter für die Konzipierung, Dimensionierung und methodische Ansätze für die Qualitätsüberwachung von Dichtelementen in Schachtverschlüssen für HAW-Endlager nicht zur Verfügung stehen. Dies gilt im Besonderen für den Zeitraum der ungesättigten Strömung, der Gasdruckbelastung aus dem Grubengebäude, für den Einfluss der gebirgsmechanischen Einspannung der Dichtelemente und eine einheitliche Methodik der Parameterermittlung. Daraus leiten sich folgende Schwerpunkte zukünftiger Arbeiten ab:

- Bestimmung der Prozess- und Materialparameter für die Bau- und Dichtmaterialien, für das an der Schachtkontur anliegende Gestein, für die Kontaktzone zwischen Dichtmaterial und Schachtkontur und für die möglichen Fluide. Dabei müssen die möglichen geochemischen Randbedingungen und Wechselwirkungen berücksichtigt werden.
- Weiterentwicklung der Methodik für die Konzipierung, Dimensionierung, den Einbau der Schachtverschlusssysteme und Definition der zeitabhängig veränderlichen strömungstechnischen Randbedingungen.
- Qualitätssicherung und Funktionsnachweis von Schachtverschlüssen für HAW-Endlager.

In diesen Schwerpunkten haben sich noch folgende Detailfragen herausgestellt, die zukünftig geklärt werden müssen:

- Ableitung eines Methoden- und Parameterkataloges für die repräsentative Beprobung, Parameterbestimmungen und in-situ-Untersuchungen im Rahmen der Standorterkundung und Auswahl des Einbaubereiches (Messmethodik zur volumenbezogenen Parameterermittlung aus geophysikalischen und in-situ-Messmethoden) einschließlich der Definition von Anforderungen an die Dokumentation der erforderlichen Begleitinformationen,
- Berücksichtigung der Kenntnisse zu folgenden Randbedingungen: Überlagerung von Mehrphasenströmung, Quellung, Kompaktion im Verlauf der Aufsättigung, Lösungs- und Kristallisationsreaktionen und gebirgsmechanischer Einspannung.
- Sensitivitätsanalyse für die sich im Dichtsystem überlagernden Teilprozesse, Maßstabseinflüsse und räumliche Eigenschaftsverteilung → Ableitung der für die Dimensionierung und Langzeitbeurteilung bestimmenden Strömungsprozesse (z. B. Beurteilung des Einflusses der Zweiphasenströmung für den Zeithorizont der Strömungsprozesse in einem Verschlusssystem).
- Ableitung der modelltheoretischen Ansätze, die bei der Dimensionierung und Langzeitbeurteilung des Verschlusssystems erforderlich sind → Grundlage der Modell- und Programmauswahl für die modellgestützte Prozesssimulation und Prognose.

Technisch relevant sind folgende Kenntnisdefizite:

1. Entwicklung eines in situ-Funktionsnachweises für die Testung der einzelnen Komponenten des Verschlusssystems.
2. Definition der Anforderungen an die Qualitätssicherung bezüglich der Lage der Dichtelemente, der Eignungsbeurteilung der Materialien, der Einbautechnologie und der Überwachung im Verlauf des Einbaus.
3. Nachweis der Realisierbarkeit des Gesamtsystems unter in situ Bedingungen.

Zu den möglichen Baumaterialien bestehen aus geochemischer Sicht folgende Kenntnisdefizite:

- Eigenschaften von MgO-Beton, dessen Bindemittel nur aus der 3-1-8-Phase besteht. Diese Untersuchungen sind Bestandteil des FuE-Vorhabens 02E10880.
- Nachweis der Langzeitbeständigkeit von MgO-Beton mit der 5-1-8-Bindemittelphase. Die Nachweisführung erfolgt ähnlich wie beim Salzbeton über den kinetischen Weg für einen entsprechenden Betrachtungszeitraum.
- Weiterentwicklung der CaSO<sub>4</sub>-basierten Salinarbaustoffe mit dem Ziel der Herausbildung von Polyhalit als langzeitstabile Phase. Diese Untersuchungen sind Inhalt des FuE-Vorhabens 02E11092 "Gefügestabilisierter Salzgrusversatz" - GESAV.
- Konsequenzen der Randbedingungen im Tongestein für die Einsetzbarkeit zementbasierter Baustoffe (Beton → low-pH-concrete).
- Vermeidung hoher Temperaturen im Tongestein (Quantifizierung, Baustoffauswahl), wenn diese zu Verschlechterungen der Materialeigenschaften des Wirtsgesteins, insbesondere der Auflockerungszone führen können.

## 4 AP4 – Anforderungen an Schachtverschlüsse

### 4.1 Einleitung und Zielsetzung

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, welche allgemeinen und speziellen Anforderungen an die Konzeption von Schachtverschlussbauwerken speziell an Salz- und Tonsteinstandorten derzeit bestehen.

### 4.2 Übergeordnete Sicherheitsanforderungen

Seit 2010 gelten die neuen Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010), die festlegen, welches Sicherheitsniveau zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in tiefen geologischen Formationen nachweislich einzuhalten hat. Dies betrifft auch das geotechnische Barrierensystem und damit auch den Schachtverschluss. Entsprechende Aussagen finden sich in den Kapiteln 7.2, 7.3 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen und werden im Folgenden zur Übersicht auszugsweise wiedergegeben:

**Kapitel 7.2:** *Zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist vor jeder wesentlichen Festlegung gemäß Kapitel 5.1 eine umfassende, standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung, die einen Zeitraum von einer Million Jahre umfasst, vorzunehmen. Sie umfasst alle Informationen, Analysen und Argumente, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen, und hat darzulegen, wodurch das Vertrauen in diese Bewertung begründet ist. Diese Bewertung und deren Dokumentation müssen insbesondere folgende Punkte umfassen:*

*..... Die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren, die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse sowie die diesbezügliche Vertrauensbildung und Qualifizierung der Modelle, die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in die Wahrscheinlichkeitsklassen gemäß Kapitel 6 und die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten.*

Für den Schachtverschluss bedeutet das, dass Prozesse, die auf einzelne Komponenten des Schachtverschlusses einwirken, identifiziert und anhand einer Szenarienanalyse hinsichtlich ihrer Konsequenzen bewertet werden müssen (vertiefte Nachweisführung).

*Diese Bewertung der Langzeitsicherheit muss sich darüber hinausgehend auf mindestens folgende Erkenntnisse abstützen:*

*Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs: Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen<sup>7</sup> Barrieren zu zeigen, dass die Ausbildung von solchen sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschluss-*

<sup>7</sup> Anmerkung: Die Autoren gehen davon aus, dass hier die technischen und geotechnischen Barrieren gemeint sind

wirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.

Letzteres bedeutet strenggenommen für den Schachtverschluss, dass für den Fall, dass Komponenten des Schachtverschlusses innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) liegen, für diese Komponenten gelten muss, dass in ihnen ablaufende, advektive Transportprozesse in ihrer Geschwindigkeit mit diffusiven Transportprozessen vergleichbar sind.

*Bei Salinar- und Tongesteinen ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs grundsätzlich anhand folgender Kriterien zu prüfen:*

*Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten. ....*

*Für Komponenten des Schachtverschlusses bedeutet das, dass z. B. für Dichtelemente, die einen Quelldruck zur Erreichung ihrer Abdichtfunktion aufbauen, dieser Quelldruck nicht die Gebirgsfestigkeiten überschreiten darf.*

*Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems:*

*Die langfristige Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert und dargelegt werden. Falls technische Barrieren im Hinblick auf die Langzeitsicherheit bedeutsame Sicherheitsfunktionen übernehmen und besonderen Anforderungen unterliegen und hierfür keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, muss deren Herstellung, Errichtung und Funktion grundsätzlich erprobt sein. Diese Erprobung muss eine nach Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführte Qualitätssicherung beinhalten. Diese Erprobung kann entfallen, falls die Robustheit dieser Bauwerke, d. h. ihre Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, anderweitig nachgewiesen werden kann oder falls Sicherheitsreserven in einem Umfang bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben.*

*Beim Nachweis der Integrität bzw. des Einschlusses sind die technisch unvermeidbaren Barriereperforationen (z. B. Schächte) und die Verfüllung des Endlagers zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass die von der geologischen Barriere geforderte Integrität und der von ihr zu gewährleistende Einschluss auch bei Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie Verfüllung erhalten bleiben. Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss. Soweit notwendig müssen sofort wirksame Barrieren den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barrieren noch nicht gegeben ist.*

Die vorstehenden Aussagen sind direkte Anforderungen an die Komponenten eines Schachtverschlusses.

**Kapitel 7.3:** Für die numerische Analyse des Langzeitverhaltens des Endlagers im Hinblick auf .....Eigenschaften der Verschlussbauwerke sind deterministische Rechnungen auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung (z. B. Medianwerte als Eingangsparameter) durchzuführen. Zielsetzungen dieser Rechnungen sind:

- Demonstration des erwarteten Systemverhaltens
- Ableitung von gegebenenfalls zeitabhängigen Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems .....

Zusätzlich sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können. Dabei sind auch Modellunsicherheiten zu berücksichtigen. Die Einhaltung von numerischen Kriterien, die sich aus diesen Sicherheitsanalysen ergeben oder daraus abgeleitet wurden, muss unter Berücksichtigung der Unsicherheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls resultierende numerische Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.

Diese Aussagen beziehen sich auf den Langzeitsicherheitsnachweis. Anforderungen an die geotechnischen Barrieren und damit auch den Schachtverschluss, die sich aus der Langzeitsicherheitsanalyse ableiten, sind zu identifizieren und bei der Konzeption des Schachtverschlusses zu berücksichtigen.

**Kapitel 8.7:** Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.

Für den Schachtverschluss bedeutet das, dass sowohl innerhalb des Schachtverschlusskonzeptes möglichst Redundanz und Diversität berücksichtigt werden sollten z. B. durch Verwendung mehrerer Dichtelemente mit diversitären Materialien, aber vor allem bedeutet es, dass der Schachtverschluss in seiner Bedeutung für die Sicherheit des Endlagers im Zusammenspiel mit den anderen Barrieren (z. B. Streckenverschlüsse) bewertet werden muss. Dies hat insbesondere eine Bedeutung hinsichtlich des Wirkungszeitraums des Schachtverschlusses.

### 4.3 Anforderungen gemäß der Sicherheits- und Nachweiskonzepte

Für einen Standort im Salzgestein wurde erstmals im Rahmen der Forschungsvorhaben ISIBEL (Krone et al., 2008), (Krone et al., 2010) und darauf aufbauend in der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) (Mönig et al., 2012) ein Sicherheits- und Nachweiskonzept entwickelt, dem die Sicherheitsanforderungen des BMU als regulatorische Grundlage zugrunde liegen. Im Rahmen dieses Sicherheits- und Nachweiskonzeptes werden die Sicherheitsanforderungen des BMU zur Umsetzung weiter konkretisiert.

Das *Sicherheitskonzept* beschreibt, durch welche Gegebenheiten und Maßnahmen die geforderte Sicherheit im technischen Sinn durch ein Endlager auf der Basis eines geeigneten Konzeptes am jeweiligen Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Das *Nachweiskonzept* legt dar, welche Nachweise unter der Voraussetzung der Umsetzung des Sicherheitskonzeptes für die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen und insbesondere für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle im Endlager zu führen sind (Mönig et al., 2012).

Ein analoges Sicherheits- und Nachweissystem wird derzeit für einen generischen Endlagerstandort im Tonstein im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens AnSichT entwickelt (Jobmann, 2011). Aus beiden Konzepten lassen sich konkretisierte Anforderungen an Schachtverschlussbauwerke und deren Konzeption ableiten (Abbildung 4-1).

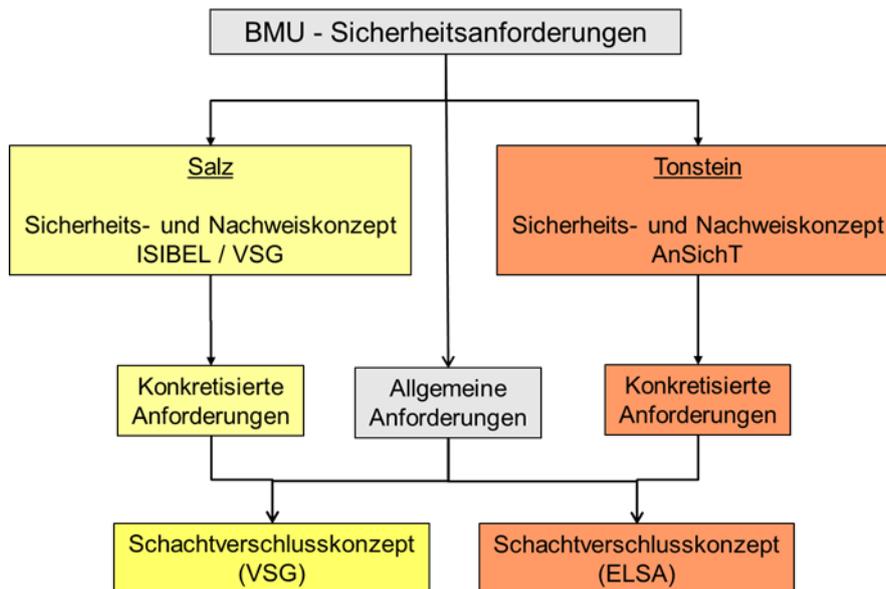


Abbildung 4-1: Zusammensetzung von Anforderungen an Schachtverschlüsse

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept für **Salzgestein** heißt es in Bezug auf die Konzeption von Schachtverschlüssen:

*.....Ein Teil der technischen Maßnahmen dient dazu, die unvermeidbare Durchörterung der geologischen Barriere schnell und wirksam abzudichten, langfristig zur Wiederherstellung ihrer*

Integrität beizutragen und Systementwicklungen zu vermeiden, bei denen es zu einer Verletzung der Integrität des ewG kommen kann. Im Einzelnen sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

In den Tagesschächten und in den Zugangsstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereichen werden Verschlussbauwerke mit einem spezifizierten hydraulischen Widerstand qualitätsgesichert errichtet. Die Verschlussbauwerke müssen solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass die Sicherheitsanforderungen des BMU, insbesondere die Sicherheitsprinzipien und die Anforderungen an die Endlagerauslegung erfüllt sind. Auf dieser Basis werden Untergrenzen für die Zeitdauer ihrer Wirksamkeit bestimmt, die größer oder gleich der für eine hinreichende Versatzkompaktion benötigten Zeit sind. Bei der Auslegung der Verschlussbauwerke werden Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Wirkungsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zu Grunde gelegt.

Als Anforderungen an die Konzeption von Schachtverschlüssen im Salzgestein ergeben sich demnach zum einen, dass der Schachtverschluss solange hinreichend dicht sein muss, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist.

Zum anderen ist für die Nachweisführung ein standortspezifischer FEP-Katalog (FEP = Features, Events and Processes) zu berücksichtigen und die FEPs zu identifizieren, die die Komponenten des Schachtverschlusses beeinträchtigen könnten. Dabei sind wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Prozesse zu berücksichtigen. Auf Basis dieser FEPs werden dann Szenarien für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen erarbeitet, die dann bei der Nachweisführung berücksichtigt werden. Das strukturelle Vorgehen wird in Abbildung 4-2 verdeutlicht.

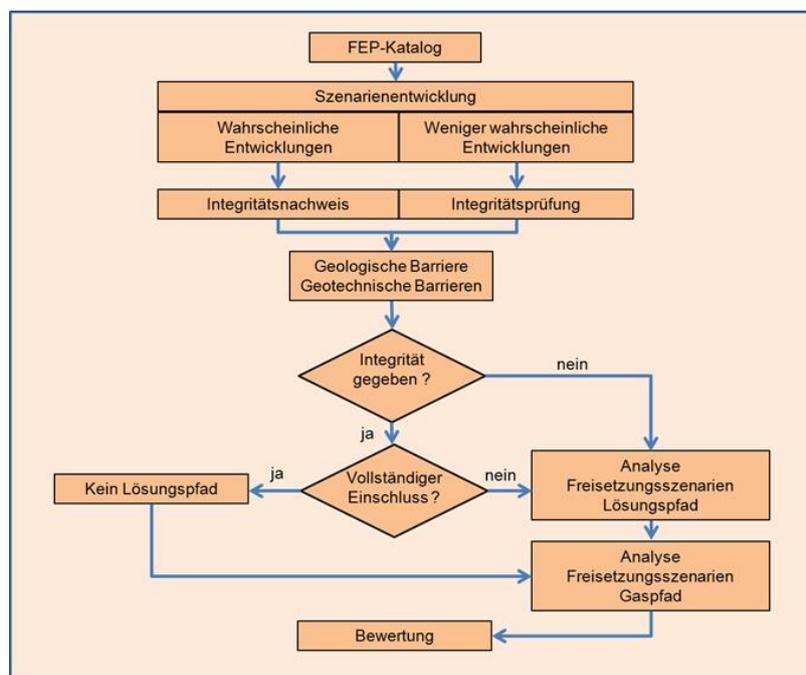


Abbildung 4-2: Strukturelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung am Salzstandort

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept für einen Salzstandort (Mönig et al., 2012) wird festgestellt, dass das optimale Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) dann gegeben ist, wenn es zu keinem Kontakt zwischen Lösungen und Abfällen kommt und wenn keine Radionuklide über den Gaspfad freigesetzt werden. Ein vollständiger Einschluss ist gemäß Sicherheits- und Nachweiskonzept aber auch dann gegeben, wenn es zwar zu einem Lösungskontakt mit den Abfällen kommt, aber keine Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden, und zwar weder über den Lösungspfad noch über den Gaspfad.

Der Entwurf eines Verschlusssystems am Salzstandort wird primär mit der Zielsetzung vorgenommen, einen durchgängigen Lösungspfad zwischen Deckgebirge und Abfällen im Referenzszenarium und den zugeordneten wahrscheinlichen Entwicklungen zu vermeiden. Im Falle wenig wahrscheinlicher Alternativszenarien ist das Entwurfsziel, den Austritt gelöster Radionuklide bzw. kontaminierter Lösungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu vermeiden und somit hinsichtlich eines lösungsgebundenen Transports den vollständigen Einschluss zu gewährleisten.

Sollten sich im Zuge der Bewertung also der Analyse von Freisetzungsszenarien ergänzende Anforderungen an Funktionselemente des Schachtverschlusses ergeben, so sind diese im Nachgang im Zuge einer vertieften Nachweisführung (Optimierung) zu berücksichtigen. Das heißt insbesondere, dass Anforderungen an Funktionselemente über die vertiefte Nachweisführung ggf. iterativ optimiert werden müssen und nicht a priori unveränderbar festgelegt werden können. Dies wird auch in Abbildung 2.1 im Kapitel „Sicherheitsnachweis“ deutlich.

Aufgrund dieser ggf. iterativen Optimierung ist es notwendig, zunächst eine sogenannte „Vorbemessung“ des Schachtverschlusses vorzunehmen. Diese Vorbemessung liefert eine konkrete Basis bezüglich der Dimensionierung der einzelnen Funktionselemente und ihrer Eigenschaften. Außerdem kann damit die grundsätzliche Herstellbarkeit des Bauwerkes gezeigt werden. Für den Schachtverschluss ist demnach eine chemische, mechanische und hydraulische Vorbemessung vorzunehmen.

Der Gaspfad wird bei der Vorbemessung des Verschlusssystems nicht berücksichtigt, da seine repräsentativen Kenngrößen für das Verschlusssystem erst im Rahmen eines iterativen Prozesses unter Berücksichtigung von Ergebnissen der Analyse von Freisetzungsszenarien festgelegt werden können (Abbildung 4-2). Der Gaspfad wird deshalb zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der vertieften Nachweisführung betrachtet und überprüft. Die Verhinderung bzw. Begrenzung eines Lösungszutritts zu den Abfällen ist hierfür jedoch bedeutsam. Dadurch wird die Gasbildung und somit die Transportleistung des Gaspfades und der Aufbau hoher Gasdrücke erheblich begrenzt. Die Berücksichtigung der Ergebnisse zum Gaspfad und die sich daraus ergebenden Anforderungen an das Dichtsystem können daher nur im Rahmen einer standortspezifischen Optimierung erfolgen.

Für den vorbemessenen Schachtverschluss sind die FEPs zu betrachten, die zu ihrer Beeinträchtigung führen können. Die die Komponenten eines Schachtverschlusses im Steinsalz möglicherweise beeinträchtigenden FEPs wurden in (Wolf et al., 2012) ermittelt und in (Beuth et al., 2012) Szenarien zugeordnet. Die wahrscheinlichen, primären FEPs, die zu einer Beeinträchtigung führen können, sind in Tabelle 4-1 angegeben, die auf den Angaben in (Beuth et al., 2012) basiert. Weiterhin wurden die weniger wahrscheinlichen FEPs zusammengestellt, die auch zu einer Beeinträchtigung führen könnten (Tabelle 4-2) (Müller-Hoeppe 2013a). Die FEPs sind entsprechend ihrer Strukturierung in der FEP-Datenbank (Wolf et al., 2012) nummeriert.

FEP-Kataloge für generische Standorte in zwei unterschiedlichen Tonsteinformationen werden derzeit im Rahmen des Forschungsvorhabens AnSichT erarbeitet (Jobmann, 2011). Prozesse, die auf den Schachtverschluss einwirken, sind aber zum großen Teil mit denen im Steinsalz identisch.

**Tabelle 4-1: Primäre FEPs, die den Schachtverschlusses beeinträchtigen können**

FEP-Nr.	FEP-Name
1.2.03.01	Erdbeben
1.2.09.01	Diapirismus
1.2.09.02	Subrosion
1.3.05.03	Glaziale Rinnenbildung
2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
2.1.07.01	Konvergenz
2.1.07.02	Fluiddruck
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
2.1.08.08	Quellen des Bentonits
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
2.2.01.01	Auflockerungszone
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

**Tabelle 4-2: Weniger wahrscheinliche FEPs, die den Schachtverschlusses beeinträchtigen können**

FEP-Nr.	FEP-Name
2.1.07.05	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses*
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen

\*inklusive einer nicht anforderungsgerechten Errichtung

Allerdings reicht die FEP-Analyse allein nicht aus. Erst die auf den relevanten FEP aufbauende Szenarienanalyse erlaubt Rückschlüsse auf mögliche Beeinträchtigungen und damit auf ggf. notwendige Veränderungen an der Bemessung.

Der maximale Funktionszeitraum des Verschlusssystems ist daher zunächst begrenzt durch das Auftreten der nächsten Eiszeit, die gemäß geologischer Langzeitprognose in ca. 50.000 Jahren auftritt (Mrugalla, 2011). Da für Teile des Verschlusssystems, insbesondere für den Schachtverschluss, die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge von grundlegender Bedeutung sind, eine Prognose der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge während und nach der nächsten Eiszeit aber nicht möglich ist, wird der Funktionszeitraum des Verschlusssystems auf den Zeitraum bis zur nächsten Eiszeit begrenzt. Im Nachgang ist dann zu prüfen, ob der Salzgrusversatz tatsächlich innerhalb eines Zeitraums < 50.000 Jahre seine Dichtfunktion erreicht hat.

Aktuelle Prognoseberechnungen im Rahmen der VSG zeigen, dass der Salzgrusversatz nach etwa 1000 Jahren einen ausreichenden Kompaktionsgrad erreicht hat (Czaikowski & Wieczorek, 2012). Die Funktionsdauer des Schachtverschlusses wäre somit auf 1000 Jahre anzusetzen. In diesem Fall muss der Schachtverschluss allein, ohne von Strecken und Bohrlochverschlüssen Kredit zu nehmen, in der Lage sein, den Zutritt von Lösungen aus dem Deckgebirge solange zu verzögern, bis der Salzgrusversatz in den Zugangsstrecken ausreichend kompaktiert ist.

Daraus resultiert die hydraulische Anforderung, dass der sich nach erstmaligem Durchtritt durch das gesamte Dichtsystem einstellende integrale Volumenstrom so gering sein muss, dass die zutretende Lösung den Salzgrusversatz in den Zugangsstrecken erst nach 1000 Jahren erreicht.

Für mögliche Standorte im Tonstein ist die Sachlage anders. Es handelt sich dann nicht um ein komplett trockenes Endlager wie im Salz, sondern Porenwässer sind von vornherein überall vorhanden. Das heißt, die primäre Aufgabe des Schachtverschlusses ist nicht mehr, wie im Salz, einen Lösungszutritt aus dem Deckgebirge zu den Abfällen zu vermeiden bzw. zu verzögern, um den Korrosionsbeginn zu verzögern.

Im ersten Entwurf zum Sicherheits- und Nachweiskonzept für **Tonstein** (Jobmann, 2011) heißt es in Bezug auf die Konzeption von Schachtverschlüssen:

*.....Der Einschluss und damit die Sicherheit des Endlagers ist dadurch charakterisiert, dass die radioaktiven Abfälle im Wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls, wie in den Sicherheitsanforderungen [1] festgeschrieben, als gering definierte Stoffmengen den ewG verlassen. Der Einschluss soll durch die Eigenschaften des Tonsteins im ewG, im Verbund mit dem geotechnischen Barrierensystem gewährleistet werden. Wesentlich für den Einschluss der radioaktiven Abfälle sind drei Eigenschaften, die durch das Wirtsgestein, die Verschlussbauwerke und die Versatzmaterialien während des Nachweiszeitraums sichergestellt werden:*

- Geringe Permeabilität: Die Permeabilität der in Betracht gezogenen Tonsteine ist so gering, dass die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt. Zusätzlich behindert die geringe Permeabilität der Verschlussbauwerke und Versatzmaterialien eine advective Lösungsbewegung entlang der aufgefahrenen Hohlräume. Also auch für den Schachtverschluss.

- **Geochemische Rückhaltung:** Das geochemische Milieu im Tonstein und den Verschluss- und Versatzmaterialien ermöglicht eine Rückhaltung und eine Verzögerung des Transports von Radionukliden, insbesondere der Aktiniden, durch Sorption und auf Grund von Löslichkeitsgrenzen. Beide Prozesse begrenzen den diffusiven Transport, so dass ein Großteil der Radioaktivität während des Nachweiszeitraums innerhalb des ewG durch radioaktiven Zerfall abgebaut wird. Die hohe Pufferkapazität des Wirtsgesteins und der Verschluss- und Versatzmaterialien bewahrt ein stabiles geochemisches Milieu über den gesamten Nachweiszeitraum. ....

Die wesentlichen Anforderungen an einen Schachtverschluss sind also die Unterbindung einer advectiven Lösungsbewegung aus dem Endlager bzw. aus dem ewG heraus, die Erhaltung eines stabilen geochemischen Milieus und die Verwendung von Materialien mit hoher Sorptionskapazität.

Das strukturierte Vorgehen bei der oben genannten Nachweisführung bzw. Sicherheitsbewertung ist mit leichten Abweichungen ähnlich wie beim Salzstandort (Abbildung 4-3)

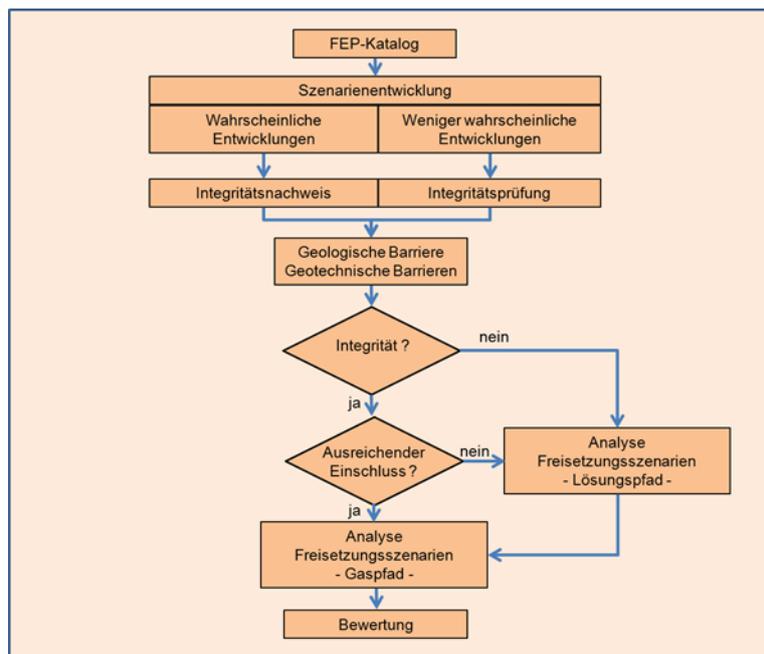


Abbildung 4-3: Strukturelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung am Tonsteinstandort

#### 4.4 Anforderungen gemäß technischen Funktionsnachweisen

Die Auslegung des Verschlussystems sollte in Anlehnung an die technischen Regelwerke (DIN EN 1997-1), (DIN EN 1990), (DGGT 1997), (DAfStb 2004) erfolgen, die darauf abzielen, das anforderungsgemäße Zuverlässigkeitsniveau von (Barriere-) Bauwerken nachzuweisen. Die Methodik ist im Kapitel „Sicherheitsnachweis“ beschrieben. Die einzelnen Funktionselemente eines Schachtverschlusses sind so zu konfigurieren, das gemäß dem Nach-

weiskonzept (s. Kapitel „Sicherheitsnachweis“) der Funktionsnachweis geführt werden kann. Folgende Einzelnachweise sind dabei zu führen:

- Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes (Dichtheitsnachweis)
- Nachweis der Standsicherheit (Integritätsnachweis)
- Nachweis der Dauerhaftigkeit
- Nachweis der Herstellbarkeit

Diese vier zu führenden Nachweise sind für den Langzeitsicherheitsnachweis eines Schachtverschlusses entscheidend.

Für den Nachweis einer ausreichenden hydraulischen Dichtheit sind nicht nur die Dichtelemente für sich zu betrachten, sondern immer im Zusammenspiel mit der Kontaktzone und der Auflockerungszone, d. h., die ausreichende hydraulische Dichtheit wird über die integrale Dichtheit dieser drei Komponenten bestimmt (vgl. Abbildung 2.1 im Kapitel „Sicherheitsnachweis“). Die hydraulische Dichtheit der Auflockerungszone kann dadurch verbessert werden, dass die Bereiche der signifikanten Auflockerung in Stoßnähe durch Nachschnitt entfernt werden. Dies geht auch konform mit den Anforderungen aus sonstigen Vorgaben (vgl. Kapitel 4.6). Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Tiefe der Auflockerungszone. Diese kann und sollte sowohl rechnerisch (vgl. Kapitel „Charakterisierung der EDZ“) als auch messtechnisch im Rahmen von in-situ Untersuchungen bestimmt werden. Der Nachschnitt des durchlässigen Bereiches der EDZ und der Einbau von Dichtelementen sollte zeitnah erfolgen, da nach dem Nachschnitt eine Wiederauflockerung der EDZ erfolgt, wobei die Geschwindigkeit dieser Wiederauflockerung unterschiedlich sein kann. Das Aufkriechen des Gebirges auf der einen Seite und der Gegendruck durch das Dichtelement, insbesondere bei Verwendung quellfähiger Materialien, auf der anderen Seite führen zu einer zeitabhängigen Reduzierung der Permeabilität im wieder aufgelockerten Bereich. Dieser Prozess wirkt in gleicher Weise auf die Kontaktzone zwischen Dichtelement und Gebirge. Wird einem Dichtelement eine sofortige Wirksamkeit im Rahmen des Verschlusskonzeptes zugeordnet, so ist zum Einen entweder der Einsatz quellfähiger Materialien vorzusehen, oder ein Material zu verwenden, das aufgrund anderer Eigenschaften in Verbindung mit dem Gebirge steht und auch bei Fluiddruckbelastung "den Kontakt hält" (z. B. Bitumen oder Asphalt), um die Kontaktzone abzudichten. Zum anderen ist die sich im Anschluss an den Nachschnitt der EDZ neu bildende aufgelockerte Zone ggf. zusätzlich durch technische Injektionsmaßnahmen zu vergüten.

Der Integritätsnachweis (Abb. 2.1 im Kapitel „Sicherheitsnachweis“) setzt sich zusammen aus der

- Nachweisbarkeit der Tragfähigkeit
- Nachweisbarkeit der Rissebeschränkung
- Nachweisbarkeit der Verformungsbeschränkung
- Nachweisbarkeit der Filterstabilität (Erosion, Suffosion)
- Nachweisbarkeit der Dauerhaftigkeit bzw. Langzeitstabilität

Eine Verformungs- und Rissebeschränkung kann dadurch erreicht werden, dass Dichtelemente aus einem Material hergestellt werden, das sich adhäsiv mit der Schachtkontur verbindet. Es treten dann nur geringe Setzungen auf. Ein Dichtelement, das adhäsiv mit der Schachtkontur verbunden ist, kann auch gleichzeitig Widerlagerfunktion ausüben, hat also eine doppelte Wirkungsfunktion.

Bei Verwendung von nicht kohäsiven und nicht eigentragfähigen Abdichtmaterialien wie beispielsweise Bentonit ist eine weitere Möglichkeit eine Verformungsbeschränkung zu erreichen, die Verwendung einer setzungsarmen Stützsäule, auf der das Dichtelement aufgesetzt wird. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass das Material und die Konstruktion der Stützsäule nur geringe Verformungen aufweisen darf. Nach (Wagner, 2005) dürfen die Setzungen einen Betrag von 3 % der Dichtungslänge nicht überschreiten. Dieser Setzungsbetrag wird aus der zulässigen Auflockerung im Dichtelement abgeleitet, bis zu der noch ein ausreichender Quelldruck erhalten bleibt. Eine Alternative zu setzungsarmem granularem Material kann die Verwendung einer kohäsiven Stützsäule sein, die ähnliche Stützeigenschaften hat.

Die Filterstabilität kann durch die Vermeidung von Erosions- und Suffosionsvorgängen im Dichtelement erreicht werden. Durch die gleiche Wirkungsrichtung von Schwerkraft und Flüssigkeitszutritt aus den im Deckgebirge existierenden Grundwasserleitern kann speziell während der Aufsättigungsphase ein höheres Erosions- und Suffosionsrisiko bestehen, insbesondere dann, wenn das Dichtelement aus feinkörnigem Erdstoff (z. B. Bentonit) besteht. Diesem ist durch konstruktive Maßnahmen entgegenzuwirken. D. h., zur Vermeidung von Erosion und Suffosion ist zwingend der Einsatz von Filterschichten am Dichtelement vorzusehen.

In jedem Fall sind Dimensionierungen der Funktionselemente, ihre Lage im Gesamtsystem und die Materialien so zu wählen, dass die oben aufgeführten Einzelnachweise geführt werden können. Für die zu verwendenden Materialien bedeutet das insbesondere, dass für alle Materialien belegbar ein vollständiger und konsistenter Datensatz zur Verfügung stehen muss, der das Materialverhalten bzw. seine Eigenschaften charakterisiert. Bevor also ein Material für ein Funktionselement vorgesehen wird, muss es entsprechend nachweisgerecht charakterisiert werden.

## **4.5 Anforderungen aus standortspezifischen Randbedingungen**

### **4.5.1 Geologische Randbedingungen**

Materialauswahl und Tiefenlage einzelner Funktionselemente sind abhängig von den gegebenen standortspezifischen Bedingungen. Durchörtert der zu verschließende Schacht Störungszonen oder Zonen, die potenziell flüssigkeitsführend sein können, so sind die Bereiche der flüssigkeitsführenden Zonen mit Dichtelementen abzudichten, wobei eine ausreichende Überdeckung unter- und oberhalb der Störungszone gewährleistet werden muss.

Im Schacht Gorleben beispielsweise liegen die stratigrafischen Einheiten mehrfach verfalltet vor. Insbesondere die sogenannte *Gorleben-Bank*, eine eng geschichtete Anhydritbank, wird dreimal durchörtert. Da Anhydrit deutlich andere mechanische Materialeigenschaften hat als das umgebende Steinsalz, kann prinzipiell eine spätere Lösungsführung nicht ausgeschlossen werden. Das Schachtverschlusskonzept, das im Rahmen der VSG entwickelt wurde, trägt diesem Umstand insofern Rechnung, als an der Gorlebenbank Dichtelemente mit entsprechender Überdeckung angeordnet wurden.

Treten lokations- oder teufenspezifisch unterschiedliche Arten von Salzlösung wie NaCl-Lösung oder MgCl-Lösung auf, so sind die Materialien der Dichtelemente entsprechend so zu wählen, dass es zu keiner signifikanten Korrosion der Dichtelemente bei Eintreffen entsprechender Lösungen kommt.

Dichtelemente aus nicht quellfähigem Material (z. B. Salzbeton) sollten so tief wie möglich im Schacht angeordnet werden. Um das Aufkriechen des umgebenden Salzes zu beschleunigen, ist eine möglichst tiefe Lage von Vorteil, da der Spannungsdeviator mit zunehmender Teufe zunimmt. Der Spannungsdeviator bestimmt anfangs die Aufkriechgeschwindigkeit des Salzes auf das Dichtelement und somit Zeitdauer und Ausmaß seiner Einspannung in das Gebirge. Je tiefer es liegt, umso schneller und stärker wird es eingespannt.

Gemäß bisherigen Konzepten wird der potenzielle Standort auf einer Erkundungssohle erkundet. Die spätere Einlagerung der Abfallbehälter soll auf der Einlagerungssohle unterhalb der Erkundungssohle erfolgen. Im Konzept für einen Schachtverschluss ist vorzusehen, dass die Einlagerungssohle von anderen Sohlen durch ein Dichtelement getrennt wird.

Speziell bei Konzeptentwicklungen für Schachtverschlüsse an potenziell geeigneten Tonsteinstandorten ist zu beachten, dass dort wo Wechsellagerungen von toniger und sandiger Fazies auftreten, Dichtelemente im Bereich der tonigen Fazies angeordnet werden, um keine Umläufigkeiten durch die sandigen Bereiche zu ermöglichen. Diese Wechsellagerungen treten beispielsweise in den Unterkreidetonen des Niedersächsischen Beckens auf, die laut bisherigen Studien als potenziell geeignet erscheinen (Jobmann, 2011), (Hoth et al., 2007), (Jobmann et al., 2007).

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „AnSichT“ (Jobmann, 2011) wird derzeit ein geologisches Referenzmodell für ein Endlager in zwei unterschiedlichen Tonsteinformationen erarbeitet. Genauere Angaben zu lokationsspezifischen Randbedingungen für Schachtverschlüsse in Deutschland sind erst nach Fertigstellung der Referenzmodelle möglich.

#### **4.5.2 Hydrogeologische Randbedingungen**

Für den Entwurf des Verschlussystems für Steinsalz sind die hydrogeologischen Randbedingungen im Bereich der Schächte im Hinblick auf die Aufgabenstellung, den Zutritt von

Salzlösungen zu den endgelagerten Abfällen über die Schächte zu vermeiden, von grundlegender Bedeutung. Beispielsweise sind im Bereich der Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2 mehrere Grundwasserstockwerke vorhanden, in denen Grundwasserleiter hoher Lieferfähigkeit durch Grundwassergeringleiter voneinander getrennt sind. Funktionselemente in diesem Schachtbereich haben zwar keine Dichtfunktion gegenüber dem Endlager, aber die Trennung der Grundwasserstockwerke soll soweit wie möglich erhalten bleiben. Dies ist bei der Konzeptionsentwicklung zu berücksichtigen.

Mit Bezug auf die primäre Zielsetzung, einen durchgängigen Lösungspfad zu den endgelagerten Abfällen im Steinsalz zu unterbinden, stellen die praktisch in unbegrenzter Menge vorhandenen Deckgebirgswässer, die bei hohen Druckaufbauzeiten bis zur Tagesoberfläche anstehen können, die maßgeblich zu beherrschende Einwirkung für das Verschlusssystem dar. Begrenzte Lösungsmengen, die salzstockintern vorkommen, sind dagegen im ersten Ansatz vernachlässigbar. Damit ist der Schachtverschluss offensichtlich der primäre und Strecken- oder Bohrlochverschlüsse sekundäre, redundante Verschlüsse.

Die Komponenten des Schachtverschlusses sind gegen den standortspezifisch maximal möglichen Lösungsdruck zuzüglich 50m (pauschal) durch klimabedingte Meeresspiegelschwankungen auszulegen.

#### 4.6 Anforderungen gemäß sonstiger Vorgaben

Aus den Erfahrungen bei der Stilllegung und Verwahrung von Schächten im deutschen Salzbergbau in den letzten 80 Jahren resultieren nachfolgende Vorgaben (OCZ, 1996), (Schmidt et al., 1995), (Kappei & Eikmeier, 2006):

- Salzschächte werden nach der Stilllegung vollständig verfüllt.
- Vor der Verfüllung sollten Schachteinbauten vollständig entfernt werden, soweit das arbeitssicherheitsmäßig vertretbar ist.
- Vorhandener wasserdichter Ausbau<sup>8</sup> wird nicht demontiert.
- In Verschlusshorizontalen wird der Ausbau entfernt, um Umläufigkeiten zu verhindern.
- In Verschlusshorizontalen wird die Auflockerungszone im Schachtstoß entfernt.
- Die Sohlenabgänge werden gegen das Auslaufen der Füllsäule gesichert.
- Dichtelemente aus nicht quellfähigem Material innerhalb der Schachtröhre müssen direkten Kontakt zum Gebirge haben<sup>9</sup>; sie sind somit gebirgsverbunden auszuführen.
- Der Einbau der Verfüllsäulen erfolgt im trockenen Milieu<sup>10</sup>.

<sup>8</sup> Im Bereich von Grundwasserleitern

<sup>9</sup> Dies gilt speziell für Salz- und Sorelbeton

<sup>10</sup> Feuchte Bereiche werden durch Dichtelemente abgedeckt

## 4.7 Zusammenfassender Überblick

In der folgenden Tabelle sind die genannten Anforderungen zusammengestellt.

**Tabelle 4-3: Zusammenstellung von Anforderungen an Schachtverschlüsse**

Quelle	Anforderung	Steinsalz	Tonstein
Sicherheitsanforderungen des BMU	• Prozessanalyse der Einwirkungen auf Schachtverschluss.	X	X
	• Falls Komponenten des Schachtverschlusses im ewG liegen, so müssen in den Komponenten ablaufende Transportprozesse in ihrer Geschwindigkeit mit diffusiven Transportprozessen vergleichbar sein (ausreichend geringe Durchlässigkeit).	X	X
	• Quelldrücke von Dichtelementen dürfen die Gebirgsfestigkeit nicht überschreiten.	X	X
	• Falls für geotechnische Barrieren keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, muss deren Herstellung, Errichtung und Funktion grundsätzlich erprobt sein. (Kann entfallen, falls die Robustheit anderweitig nachgewiesen werden kann oder falls ausreichend Sicherheitsreserven bestehen.)	X	X
	• Zum Nachweis der Bauwerksintegrität sind die maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss.	X	X
	• Soweit notwendig müssen sofort wirksame Barrieren den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barrieren noch nicht gegeben ist.	X	X
	• Eventuelle Anforderungen aus einer Analyse von Freisetzungsszenarien sind zu identifizieren und zu berücksichtigen.	X	X
	• Innerhalb des Schachtverschlusses soll möglichst Redundanz und Diversität berücksichtigt werden z. B. durch Verwendung mehrerer Dichtelemente mit diversitären Materialien.	X	X
	• Der Schachtverschluss ist in seiner Bedeutung für die Sicherheit des Endlagers im Zusammenspiel mit den anderen Barrieren (z. B. Streckenverschlüsse) zu bewerten (z. B. für die Festlegung des Wirkungszeitraums).	X	X

Quelle	Anforderung	Steinsalz	Tonstein
Sicherheits- und Nachweiskonzepte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximaler Wirkungszeitraum 50.000 Jahre (nächste Eiszeit). Einschränkung über Verschlusskonzept (Steinsalz): Der Schachtverschluss muss solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist. (1000 Jahre nach aktuellen Abschätzungen). Daraus resultiert die hydraulische Anforderung, dass der sich einstellende Volumenstrom so gering sein muss, dass die zutretende Lösung den Salzgrusversatz in den Zugangsstrecken erst nach 1000 Jahren erreicht.</li> <li>Maximaler Wirkungszeitraum 50.000 Jahre (nächste Eiszeit). Einschränkung über Verschlusskonzept (Tonstein): noch offen.</li> <li>Vorbemessung des Schachtverschlusses (Dimensionierung, Eigenschaften und Nachweis der prinzipiellen Herstellbarkeit).</li> <li>Berücksichtigung einer FEP-Liste mit wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Prozessen bezüglich einer Konsequenzanalyse. Daraus eventuell resultierende Anforderungen an Funktionselemente des Schachtverschlusses sind zu berücksichtigen (ggf. iterativ optimieren).</li> <li>Unterbindung einer advektiven Lösungsbewegung aus dem Endlager bzw. aus dem ewG heraus.</li> <li>Erhaltung eines stabilen geochemischen Milieus</li> <li>Verwendung von Materialien mit hoher Sorptionskapazität.</li> </ul>	<p>X</p> <p>-</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>-</p>	<p>-</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p>
Technische Funktionsnachweise	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Auslegung des Verschlussystems sollte in Anlehnung an die technischen Regelwerke DIN EN 1997-1 Eurocode 7, DIN EN 1990 Eurocode, DGGT-GDA-Empfehlungen und DAfStb Richtlinie 2004 erfolgen</li> <li>Die einzelnen Funktionselemente eines Schachtverschlusses sind so zu konfigurieren, dass gemäß dem Nachweiskonzept der Funktionsnachweis geführt werden kann.</li> <li>Für den Nachweis einer ausreichenden hydraulischen Dichtheit sind nicht nur die Dichtelemente für sich zu betrachten, sondern immer im Zusammenspiel mit der Kontaktzone und der Auflockerungszone (integrale Dichtheit).</li> <li>Im Bereich von Dichtelementen ist die Auflockerungszone bis in eine geeignete Tiefe zu entfernen.</li> <li>Wird einem Dichtelement eine sofortige Wirksamkeit im Rahmen des Verschlusskonzeptes zugeordnet, so ist zum Einen entweder der Einsatz quellfähiger Materialien vorzusehen, oder ein Material zu verwenden, das aufgrund anderer Eigenschaften in Verbindung mit dem Gebirge steht und auch bei Fluidruckbelastung den Kontakt hält (z. B. Bitumen oder Asphalt), um die Kontaktzone abzudichten. Zum anderen ist die sich im Anschluss an den Nachschnitt der EDZ neu bildende aufgelockerte Zone ggf. zusätzlich durch technische Injektionsmaßnahmen zu vergüten.</li> <li>Bei Verwendung von nicht kohäsiven und nicht eigentragfähigen Abdichtmaterialien ist eine setzungsarme Stützsäule vorzusehen (Setzung max. 3 % der Dichtungslänge).</li> <li>Zur Vermeidung von Erosion und Suffosion ist der Einsatz von Filterschichten am Dichtelement vorzusehen.</li> <li>Für alle Materialien muss ein vollständiger und konsistenter Datensatz zur Verfügung stehen, der das Materialverhalten bzw. seine Eigenschaften charakterisiert.</li> </ul>	<p>X</p>	<p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p> <p>X</p>

Quelle	Anforderung	Steinsalz	Tonstein
Standortspezifische Randbedingungen	• Durchörtert der zu verschließende Schacht Störungszonen oder Zonen, die potenziell flüssigkeitsführend sein können, so sind diese mit Dichtelementen mit ausreichender Überdeckung abzudichten.	X	X
	• In Abhängigkeit von der einwirkenden Porenlösung sind die Materialien der Dichtelemente entsprechend so zu wählen, dass es zu keiner signifikanten Korrosion der Dichtelemente bei Eintreffen entsprechender Lösungen kommt.	X	X
	• Dichtelemente aus nicht quellfähigem Material sollten aus Einspannungsgründen so tief wie möglich im Schacht angeordnet werden.	X	X
	• Es ist vorzusehen, dass die Einlagerungssohle von anderen Sohlen (z. B. Erkundungssohlen) durch ein Dichtelement getrennt wird.	X	X
	• Dort wo Wechsellagerungen von toniger und sandiger Fazies auftreten, sind Dichtelemente im Bereich der tonigen Fazies anzuordnen, um keine Umläufigkeiten durch die sandigen Bereiche zu ermöglichen.	-	X
	• Sind mehrere Grundwasserleiter vorhanden, so ist ein Kurzschluss der Grundwasserleiter durch Abdichtung zu vermeiden.	X	X
	• Die Komponenten des Schachtverschlusses sind gegen den standortspezifisch maximal möglichen vertikalen Lösungsdruck zuzüglich 50m durch klimabedingte Meeresspiegelschwankungen auszulegen.	X	X
Sonstige Vorgaben	• Schächte sind nach der Stilllegung vollständig zu verfüllen.	X	X
	• Vor der Verfüllung sollten Schachteinbauten vollständig entfernt werden, soweit das arbeitssicherheitlich vertretbar ist.	X	X
	• Vorhandener wasserdichter Ausbau im Bereich von Grundwasserleitern wird nicht demontiert.	X	X
	• In Verschlusshorizontalen wird der Ausbau entfernt, um Umläufigkeiten zu verhindern.	X	X
	• In Verschlusshorizontalen wird die Auflockerungszone im Schachtstoß entfernt.	X	X
	• Die Sohlenabgänge werden gegen das Auslaufen der Füllsäule gesichert und z. B. mit kohäsivem Füllgut abgedämmt.	X	X
	• Dichtelemente aus nicht quellfähigem Material (z. B. Salz- oder Sorelbeton) innerhalb des Schachtes müssen direkten und festen Kontakt zum Gebirge haben.	X	X
	• Der Einbau der Verfüllsäulen erfolgt im trockenen Milieu.	X	X

## Literaturverzeichnis

- (Agus & Schanz, 2005) Agus, S.S; Schanz, T.: Unsaturated Soils: Experimental Studies. Swelling pressures and wetting-drying curves of a highly compacted bentonite-sand mixture. Springer (Springer Proceedings in Physics, 93). pp. 241-256, 2005.
- (Agus, 2005) Agus, S.S. (2005): An experimental study on hydromechanical characteristics of compacted bentonite-sand mixtures. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, 2005.
- (Altmaier et al., 2003) Altmaier, M; Metz, V.; Neck, V.; Müller, R.; Fanghänel Th.: „Solid-liquid equilibria of  $Mg(OH)_2$  (cr) and  $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$  (cr) in the sytem Mg-Na-H-OH-Cl- $H_2O$  at 25°C.” *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2003), 67(19), 3595-3601.
- (ANDRA, 1999) ANDRA: Geological Statement Report of the Eastern Site, 1999.
- (Arifin, 2008) Arifin, Y.F. (2008): Thermo-Hydro-Mechanical Behavior of Compacted Bentonite-Sand Mixtures: Dissertation, Bauhaus-University Weimar, 2008.
- (Bartl et al., 2005) Bartl, H.; Döring, G.; Hartung, K.; Schilder, Ch.; Slotta, R.: Kali im Südharz-Unstrut Revier. Unter Mitarbeit von H. Rauche und V. Schwalm. Bochum: Dt. Bergbau-Museum, 2005.
- (Bastiaens et al., 2007) Bastiaens, W.; Bernier, F.; Li, X. L.: SELFRAC: Experiments and conclusions on fracturing, self-healing and self-sealing processes in clays. Clay in natural and engi-neered barriers for radioactive waste confinement - Part 2. In: Physics and Chemistry of the Earth (2007), Parts A/B/C 32 (8-14), S. 600–615.
- (Beuth et al., 2012) Beuth, T.; Bracke, G.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Keller, S.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Rüberl, A.; Wolf, J.W.: Szenarienentwicklung für den Standort Gorleben unter Einbeziehung verschiedener Einlagerungsvarianten, Abschlussbericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2012.
- (BfS, 2002) Bundesamt für Strahlenschutz: Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstockes Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben) 1. Fortschreibung, Anlage 1 : Datenblätter und Analysenblätter Erkundungsbergwerk - ohne Schächte, Anlage 2: Erkundungsbergwerk - Schächte, Anlage 3: Tiefenbohrungen; Anlage 4: Lösungseinschlüsse (Fluid Inclusions), BFS, IfAH, A. G. HERRMANN, 15.11.2002
- (BGR, 2002) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Gorleben, Laboruntersuchungen an Proben aus dem Salinarteil der Schächte Gorleben, Abschlussbericht. Hannover, 2002.

- (BGR, 2003) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Gorleben, Gebirgsspannungsuntersuchungen in den Schächten 1 und 2, Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2003.
- (Blumer, 1920) Blumer, E.: „Geschichte des Erdöls“. Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1920), 30 Seiten.
- (Blümling et al., 2005) Blümling, P.; Bernier, F.; Lebon, P.; Martin, C. D.: The Excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assesment. In: Andra (Hg.): Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement (2005), Bd. 2. Unter Mitarbeit von J.-F. Aranyossy. 2 Bände, S. 588–599.
- (BMU, 2010) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder, radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010.
- (Boisson, 2005) Boisson, J.-Y.: „Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks“, OECD 2005 NEA No. 4436, ISBN 92-64-01067-X
- (Bollingerfehr et al., 2011) Bollingerfehr, W.; Herklotz, M.; Herzog, C.; Jobmann, M.; Lommerzheim, A.; Weiß, E. et al.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Eugenia). Synthesebericht. Hg. v. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine. Peine, 2011.
- (Bornemann et al., 2008) Bornemann, O.; Belhau, J.; Fischbeck, R.; Hammer, J.; Jaritz, W.; Keller, S.; Mingerzahn, G.; Schramm, M.: Standortbeschreibung Gorleben Teil 3. Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Hannover, Stuttgart: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 2008. In Kommission, E. Schweizerbart.  
Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/284975550>.
- (Bornemann & Fischbeck, 1987) Bornemann, D.; Fischbeck, R.; Exkursionsführer I Zechstein 87, Internationales Symposium Kassel – Hannover, Exkursion K, 08.05.1987, Auszug: Zechstein 2-4 des Salzstocks Gorleben, 1987.
- (Bossart & Thury, 2008) Bossart P. & Thury M. (Ed) “Mont Terri Rock Laboratory - Project, Programme 1996 to 2007 and Results”, Annex 4: “Characteristics of the opalinus Clay at Mont Terri”, 2008. ISBN: 978-3-302-40016-7
- (Brasser et al., 2008a) Brasser, T.; Fein, E.; Herbert, H.J.; Miehe, R.; Müller-Lyda, I.; Nosek, U. et al.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Anhang Parameter Endlagerspezifische Parameter - Messmethoden und Bedeutung. Gesellschaft für Reaktorsicherheit. Braunschweig / Darmstadt, 2008.
- (Brasser et al., 2008b) Brasser, T.; Herbert, H.J.; Miehe, R.; Schmidt, G.: „Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland“, Abschlussbericht zum BMWi-Vorhaben FKZ 02E9783 und 02E9793, Anhang Wirtsgesteine, GRS Braunschweig/Darmstadt, 2008

- (Brasser & Droste, 2008) Brassler, Th.; Droste, J (2008): Endlagerung wärmeentwickelter radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untertagelabore. GRS-247. Braunschweig / Darmstadt (02E9783, 02E9793), 2008.
- (Bräuer et al., 2011) Bräuer, V.; Eickemeier, R.; Eisenburger, D.; Grisseemann, C.; Hesser, J.; Heusermann, S. et al.: Description of the Gorleben site Part 4. Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2011.
- (Breidung, 2002) Breidung, K.P: Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. Abschlussbericht - Kurzfassung. Hg. v. K+S AG. Bad Salzdetfurth, 2002.
- (Buhmann et al., 2008) Buhmann, D.; Möhnig, J.; Wolf, J.; Keller, S.; Weber, J.R; Eberth, S. et al.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW ISIBEL. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Hg. v. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine. DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS. Peine, 2008.
- (Buntebarth, 2005) Buntebarth, G: Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften an Tonstein Proben der Unterkreide, 2005.
- (Cama et al., 2000) Cama, J., Ganor, J., Ayora, C., and Lasaga, C. A.: "Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH 8.8." *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2000), 64(15), 2701-2717.
- (Cau Dit Coumes, 2008) Cau dit Coumes C.: "[Low pH cements for waste repositories a review](#)" Cement08, MECHANISMS AND MODELLING OF WASTE/CEMENT INTERACTIONS, 2nd International Workshop, [Domaine de Port aux Rocs](#) Le Croisic, 12.-16. October 2008.
- (Clauser et al., 2002) Clauser, Ch., Höhne, F., Hartmann, K., Rath, V., Deetjen, H., Rühaak, W., Schellschmidt, R., Zschocke, A.: Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe, Endbericht, RWHT Aachen, 2002.
- (Cristescu & Hunsche, 1998) Cristescu, N. D.; Hunsche, U.: Time effects in rock mechanics. Chichester: Wiley (Wiley series in materials, modelling and computation), 1998.
- (Curnier et al, 1995) Curnier, Alain; He, Qi-Chang; Zysset, Philippe: Conewise linear elastic materials. In: *J Elasticity* (1995) 37 (1), S. 1–38. Online verfügbar unter <http://www.springerlink.com/content/hn0m2t6064626715/>, zuletzt geprüft am 28.03.2012.
- (Czaikowski et al., 2005) Czaikowski, O.; Wolters, R.; Düsterloh, U.; Lux, K.-H.: Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Hg. v. Technische Universität Clausthal. Professur für Deponietechnik und Geomechanik, 2005.

- (Czaikowski & Wieczorek, 2012) Czaikowski, O.; Wieczorek, K.: Salzgruskompaktion – Kalibrierung der in CODE\_BRIGHT verwendeten physikalischen Modellansätze zur numerischen Simulation, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG), GRS Memorandum, 15.06.2012.
- (DAfStb 1997) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Sicherheitskonzept für Bauten des Umweltschutzes, Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- (DAfStb 2004) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen Teil 1: Grundlagen, Bemessung und Konstruktion unbeschichteter Betonbauten, Berlin, 2004.
- (DBE, 2008) Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH: Temperatur-Messergebnisse Schacht 1 bis 30.04.2008, DBE, Peine, 2008.
- (DBE, 2010) Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH: Numerische Modellierung des Salinarbereiches Schacht 1 Gorleben, Kurzdokumentation zu Berechnungen am 2D- und 3D-Modell, DBE, Peine, 2010.
- (DGGT 1997) Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. 1997: GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, Verlag Ernst und Sohn, 3. Auflage, 1997.
- (DIN 1048) DIN 1048 Teil 5, Juni, 1991: Prüfverfahren für Beton, Festbeton, gesondert hergestellte Prüfkörper.
- (DIN EN 1990) Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2010, Beuth Verlag, 2010.
- (DIN EN 1991-4) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, Deutsche Fassung EN 1991-4:2006, Beuth Verlag, 2006.
- (DIN EN 1997-1) DIN EN 1997-1, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik –Teil 1: Allgemeine Regeln, Deutsche Fassung 1997-1:2009, Beuth Verlag, 2009
- (Dinnebier et al., 2010) Dinnebier, R. E., Freyer, D., Bette, S., Oestreich, M.: “ $9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , a High Temperature Phase of the Magnesia Binder System“. *Inorg. Chem.* (2010) 49, 9970-9776
- (Dixon et al., 2010) Dixon, D.; Martino, J.; Kwong, G.; Jonsson, E.; Palonen, E.; DeCombarieu, M. et al.: Enhanced sealing Project (ESP). Design, Construction and Monitoring of a Full-Scale Shaft Seal. Abstract O/02A/2. In: Andra (Hg.): Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. 4th International Meeting March 29 – April 1, 2010. Abstracts p. 51. Nantes, 2010.
- (Drucker & Prager, 1952) Drucker, D.C.; Prager, W.: Soil mechanics and plastic analysis or limit design. In: *Quarterly of Applied Mathematics* (1952), (10), S. 157–175.

- (Düsterloh, 2009) Düsterloh, U.: Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlrumbaute-  
ten im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer  
Untersuchungen. Ein Beitrag zum Nachweis von Standsicherheit und  
Barrierenintegrität für untertägige Abfallentsorgungsanlagen und  
Hohlrumbaute des salinaren Berg- und Kavernenbaus. Habilitati-  
onsschrift. Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld,  
2009.
- (Eberl & Hower, 1977) Eberl, D. D.; Hower, J.: "The hdrothermal transformation of sodium  
and potassium smectite into mixed-layer clay" *Clays and Clay Miner-  
als* (1977) 25, 215-227.
- (Eberth, 2007) Eberth, S.: Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz  
und ihre Anwendung auf Querschnittabdichtungen im Salinargebirge.  
Dissertation. Technischen Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.  
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften, 2007.
- (Fairhurst et al., 1993) Fairhurst, C.; Gera, F.; Gnirk, P.; Gray, M.; Stillborg, B.: Technical  
Report 93-41. Stripa Project 1980-1992. Overview Volume I Executive  
Summary. Hg. v. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioak-  
tiver Abfälle, 1993.
- (Fischbeck, 1985) Fischbeck, R.: "Mineralogische und petrographische Untersuchungen  
am 9. Anhydritmittel (z3AM9) aus der Bohrung Gorleben 1004. *La-  
borbericht. BGR, Archiv-Nr. 95709*: 17 Seiten, 13 Abbildungen, Han-  
nover 1985.
- (Francke & Saeb, 1996) Francke, Chris; Saeb, Saeid: Rock mechanics activities at the waste  
Isolation Pilot Plant. Hg. v. National technical Information Service.  
Springfield, 1996.
- (Freyer & Voigt, 2009) Freyer, D., Voigt, W.: „ Anforderungen an Baustoffe im Salinar: Bin-  
demittelphasen des MgO-Baustoffs für den Einsatz im Kalisalz“. Jah-  
restagung der GDCh-Fachgruppe Bauchemie 2009, GDCh Monogra-  
phie Bd. 41, ISBN 978-3-936028-61-4, S. 67 - 72
- (Freyer & Voigt, 2010) Freyer, D., Voigt, W.: FuE-Abschlussbericht 02C1204: „Entwicklung  
eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlüsse im  
leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit)“, Teilbericht zu AP 5, 5.4 und  
Erweiterung 3.2E „MgO-Baustoff“. TU Bergakademie Freiberg, Institut  
für Anorganische Chemie, 2010.
- (FZK INE, 2002) Forschungszentrum Karlsruhe: Stellungnahme zur Beständigkeit von  
Baustoffen auf der Basis von Sorel-Phasen und Salzbeton gegenüber  
den im Grubengebäude des FB Asse auftretenden Lösungen, FZK  
INE Karlsruhe, 2002.
- (Galle, 2000) Galle, C.: Gas breakthrough pressure in compacted Fo-Ca clay and  
interfacial gas overpressure in waste disposal context. In: *Applied  
Clay Science* (2000) 17 (1-2), S. 85–97.

- (Garcia-Sineriz et al., 2008) Garcia-Sineriz, J. L.; Alonso, M. C.; Alonso, J.: „Application of Low pH Concrete in the Construction and the Operation of Underground Repositories”, Euradwaste '08 conference, 20.-22. October 2008
- (Gartung, 1979) Gartung, E. (1979): Einaxiale Druckversuche an Gesteinsproben.
- (Gartung 1985) Gartung, E. (1985): Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben - Spaltzugversuch.
- (Gens et al., 1988) Gens, A.; Garcia-Molina, A.J.; Olivella, S.; Alonso, E.E.; Huertas, F.: Analysis of a Full Scale in-situ Test Simulating Respository Conditions. In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (1988) (22), S. 515–548.
- (Gens et al., 2007) Gens, A.; Vaunat, J.; Garitte, B.; Wileveau, Y.: In situ behaviour of a stiff layered clay subject to thermal loading- observations and interpretation. In: *Géotechnique* (2007) (57), S. 207–208.
- (Gens & Olivella, 2006) Gens, A.A.; Olivella, S.: Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Analysis of Engineered Barriers for High-Level Radioactive Waste. In: *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engeneering* (2006) (4), S. 670–680.
- (GeoLexikon, 2011) Klüftigkeit - GeoLexikon (2011). Online verfügbar unter <http://www.geodsz.com/deu/d/Kl%C3%BCftigkeit>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2011, zuletzt geprüft am 15.11.2011.
- (Gerthsen et al., 1974) Gerthsen, C.; Kneser, H.O.; Vogel, H.: Physik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1974.
- (Ghoreychi, 1997) Ghoreychi, M.: Comportement rhéologique et couplages thermo-hydromécaniques dans les argélites de l'Est: expériences macroscopiques. Actes des journées scientifiques CNRS/ANDRA. Bar-le-Duc, 1997.
- (Ghoreychi, 1999) Ghoreychi, M.: Compartement thermo-hydro-mécanique des argilites de l'Est et son incidence sur les ouvrages souterrains. Etude pour la faisabilité des stockages de déchets radioactifs. Hg. v. Actes des journées scientifiques ANDRA. Nancy, 1999.
- (Göbel et al., 2006) Göbel, I.; Alheid, H.-J.; Jockwer, N.; Mayor, J.C.; Garcia-Siñeriz, J.L.; Alonso, E. et al.: Heater Experiment: Rock and bentonite Thermo-Hydro-Mechanical (THM) processes in the near-field of a thermal source for development of deep underground high level radioactive waste repositories. Hg. v. European Comission Directorate-General for Reseach Euratom, 2006. Online verfügbar unter [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp5-euratom/docs/fp5-euratom\\_he\\_projrep\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp5-euratom/docs/fp5-euratom_he_projrep_en.pdf), zuletzt geprüft am 27.03.2012.
- (Gray, 1993) Gray, M.: Technical Report 93-43. Stripa Project 1980-1992. Overview Volume III Engineered Barriers. Hg. v. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1993.

- (Greinacher & Piepenbreier, 1992) Greinacher, J.; Piepenbreier, G.: Langzeitsicherung unterirdisch einzulagernder Abfälle mit mineralischen Abdichtungsmaterialien. In: *Glückauf* (1992) 128 (4), S. 276–281.
- (GRS, 2002) GRS: Endlager Morsleben – Zementkorrosion, Abschlussbericht von GRS und IBMB, Projekt Morsleben PSP-Element 9M 232200-11/12, GRS-A-3034, April 2002.
- (Gruner, 2011) Dr. Matthias Gruner: Folien zur Vorlesung Entsorgungsbergbau. Freiberg, 2011.
- (Gruner et al., 2003) Gruner, M.; Elert, K.-H.; Schwandt, A.; Sitz, P.: „Salzton – natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar.“ *Kali und Steinsalz* (2003) Nr. 2, 12 – 17.
- (Guéry et al., 2008) Guéry, A. Abou-Chakra; Cormery, F.; Su, K.; Shao, J.F.; Kondo, D.: A micromechanical model for the elasto-viscoplastic and damage behavior of a cohesive geomaterial. In: *Physics and Chemistry of the Earth* (2008), *Parts A/B/C* 33 (1), S. 416–421. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147470650800291X>, zuletzt geprüft am 28.03.2012.
- (Günther, 2009) Günther, Ralf-Michael Dipl.-Ing: Erweiterter Dehnungs -Verfestigungs-Ansatz. Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2009. Geotechnik, zuletzt geprüft am 05.03.2012.
- (Günther & Salzer, 2007) Günther, R.-M.; Salzer, K.: A model for Rock salt, describing transient, stationary and accelerated creep and dilatancy. In: Manfred Wallner, Karl-Heinz Lux, Wolfgang Minkley und H. Reginal Hardy, Jr. (Hg.): *The mechanical behavior of salt. Understanding the THMC processes in salt : proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt 'Saltmech6'*, Hannover, Germany, 22-25 May 2007. London, New York: Taylor & Francis, S. 109–117.
- (Häfner et al., 2004) Häfner, F., Voigt, H.-D., Behr, A.: Zeitliche Veränderung der Ausdehnung und der Hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen um Hohlräume in Gesteinen mit visko-plastischen Eigenschaften, Abschlussbericht, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2004.
- (Hampel, 2007) Hampel, Andreas: Vergleich aktueller Stoffgesetze für die Modellierung von Untertagebauwerken im Steinsalz. In: Carsten Drebenstedt, Wolfram Kudla, Heinz Konietzky und Bernhard Jung (Hg.): *Modellierung, Simulation und Visualisierung von Prozessen in Bergbau und Bauwesen*. 1. Aufl. Freiberg: TU Bergakad, 2007., S. 211–224.
- (Hampel et al., 2006) Hampel, A.; Heemann, U.; Schulze, O.; Zetsche, F.; Pudewills, A.; Günther, R. et al.: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. Zwischenbericht 05/2006.

- (Hampel et al, 2007) Hampel, A.; Heemann, U.; Schulze, O.; Zetsche, F.; Pudewills, A.; Günther, R. et al.: Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behavior of rock salt - results from a joint research project - I. Modeling of deformation processes and benchmark calculations. In: Manfred Wallner, Karl-Heinz Lux, Wolfgang Minkley und H. Reginald Hardy, Jr. (Hg.): The mechanical behavior of salt. Understanding the THMC processes in salt : proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt 'Saltmech6', Hannover, Germany, 22-25 May 2007. London, New York: Taylor & Francis, S. 77–88.
- (Hampel & Schulze, 2007) Hampel, A.; Schulze, O.: The Composite Dilatancy Model: A constitutive model for the behavior of rock salt. In: Manfred Wallner, Karl-Heinz Lux, Wolfgang Minkley und H. Reginald Hardy, Jr. (Hg.): The mechanical behavior of salt. Understanding the THMC processes in salt : proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt 'Saltmech6', Hannover, Germany, 22-25 May 2007. London, New York: Taylor & Francis, S. 99–107.
- (Harrington & Horseman, 2003) Harrington, J. F; Horseman, S. T (2003): Gas migration in KBS-3 buffer bentonite Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. Stockholm SKB. (SKB Technical Report TR 03-02, TR-03-02). Stockholm, 2003.
- (Harvie et al., 1984) Harvie, E., Möller, N. and Weare, J. H.: "The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO<sub>4</sub>-OH-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system to high ionic strengths at 25°C". *Geochimica at Cosmochimica Acta* (1984) Vol. 48, 723-751
- (Haupt & Mutschler, 1994) Haupt, M.; Mutschler, T. (1994): Einaxiale Relaxionsversuche an Gesteinsproben. Hg. v. Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. Helmholtz Zentrum München (Hg.) (2010). Online verfügbar unter <http://www.asse-archiv.de/en/asse-archiv/asse-newsarchiv/news-detail/article/11094/5708/index.html>.
- (Helmholtz Zentrum München 2010) Helmholtz Zentrum München 2010 Hg. Online verfügbar unter <http://www.asse-archiv.de/en/asse-archiv/asse-newsarchiv/news-detail/article/11094/5708/index.html> , geprüft: 12.03.2013
- (Herbert et al., 2002) Herbert, H.-J.; Kasbohm, J.; Venz, C.; Kull, H.; Moog, H.; Sprenger, H. (2002): Langzeitstabilität von Tondichtungen in Salzformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-185, Braunschweig, 2002.
- (Herbert et al., 2006) Herbert, H.-J.; Moog, H. C.; Meyer, L; Reichelt, Ch. (2006): Modellentwicklung zur Quellung hochkompaktierter Bentonite. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-211, Braunschweig, 2006.

- (Herbert et al., 2008) Herbert, H.-J., Kasbohm, J., Sprenger, H., Fernández, A. M., Reichelt, Ch.: „Swelling pressures of MX-80 bentonite in solutions of different ionic strength”. *Physics and Chemistry of the Earth* (2008) 33, 327–342
- (Herbert & Moog, 1999) Herbert, H.-J.; Moog, H. C. “Cation exchange, interlayer spacing, and water content of MX-80 bentonite in high molar saline solutions”. *Engineering Geology* (1999) 54, 55-65.
- (Herbert & Moog, 2002) Herbert, H.-J.; Moog H. C.: Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-179, Braunschweig, 2002.
- (Herold, 2011) Herold, P.: Diplomarbeit. Auswertung der Bauausführung bisheriger Asphalt- und Bitumendichtungen in Schachtverschlüssen im Salinar und Schlussfolgerungen für zukünftige Dichtsysteme auf Basis von Asphalt und Bitumen. Hg. v. Institut für Bergbau und Spezialtiefbau TU Bergakademie Freiberg, 2011.
- (Heusermann et al., 2003) Heusermann, S., Eickemeier, R., Sprado, K.-H., Hoppe, F.-J.: Initial rock stress in the Gorleben salt dome measured during shaft sinking, In: *Geotechnical Measurements and Modelling: Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Measurements and Modelling, 23-25 September 2003, Karlsruhe*, Taylor & Francis Group.
- (Heusermann & Eickemeier, 2008) Heusermann, S.; Eickemeier, R.: Einfluss der Bewetterungstemperatur auf das mechanische Verhalten des Schachtes 1 im Erkundungsbergwerk Gorleben, In: *Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Band 87, Messen in der Geotechnik*, Braunschweig, 2008.
- (Hoffmann et al., 2007) Hoffmann, C.; Alonso, E. E; Romero, E. (2007): Hydromechanical behaviour of bentonite pellet mixtures. In: *Physics and chemistry of the earth* (32, 8-14) (2007), S. 832–849.
- (Hofmann, 2003) Hofmann, Heiko: „Einfluss konzentrierter Salzlösungen auf die physiko-chemischen Eigenschaften quellfähiger Tonminerale: Konsequenzen für den Einsatz von Bentonit als Versatzmaterial in einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Salzformationen“; Dissertation 2003; Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- (Horsemann, 1987) Horsemann, S.: Geotechnical characterization of Boom clay in relation to the disposal of radioactive waste. - EUR 1087 EN, Luxembourg, 1987.
- (Hoth et al., 2007) Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P., Feldrappe, H.: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 118 S.; Berlin/Hannover, 2007.

- (Hou, 1997) Hou, Zhengmeng: Untersuchungen zum Nachweis der Standsicherheit zum Nachweis der Standsicherheit für Untertagedeponien im Salzgebirge. Technische Universität Clausthal, Clausthal, 1997.
- (Hou, 2002) Hou, Zhengmeng Dr. - Ing.: Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung. Habilitationsschrift. Technische Universität Clausthal, Clausthal, 2002.
- (Huertas et al., 2001) Huertas, F. J.; Caballero, E.; Jimenez, C. C.; Huertas, F.; Linares, J.: "Kinetics of montmorillonite dissolution in granitic solutions". *Applied Geochemistry* (2001) 16(4), 397 - 407.
- (Hunsche et al., 2003) Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke (2003): Projekt Gorleben, Thermomechanisches Verhalten von Steinsalz, Abschlussbericht (9G2138110000), BGR Hannover.
- (Hunsche, 1994) Hunsche, U.: Ein- und dreiaxiale Kriechversuche an Gesteinsproben. Hg. v. Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Die Bautechnik), 1994.
- (Hunsche & Hampel, 1999) Hunsche, U.; Hampel, A. (1999): Rock salt — the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. In: *Engineering Geology* 52 (3–4), S. 271–291. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795299000113>.
- (Hunsche & Schulze, 1994) Hunsche, U.; Schulze, O.: Das Kriechverhalten von Steinsalz. In: *Kali und Steinsalz* (11) (1994).
- (IBeWa, 2012a) IBeWa-1 (bis 2012): Ergebnisse aus Labor- und in situ Untersuchungen. IBeWa-Ingenieurpartnerschaft, 2012.
- (IBeWa, 2012b) IBeWa-2 (2012) ELSA – Schachtverschlüsse für radioaktive Endlager, Teilvorhaben 1 – Definition von Nachweisen, Randbedingungen und Anforderungen. Langfassung Kapitel 3.3: Charakterisierung bestimmender Strömungs- und Transportprozesse, IBeWa-Ingenieurpartnerschaft, 2012.
- (IfBuS-1, 2010) IfBuS-1 (2010) Ergebnisse aus Laboruntersuchungen zu Eigenschaften unterschiedlicher Bentonite. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 2010.
- (Imbert et al., 2005) Imbert, C.; Billaud, P.; Touzé, G.; Villar, M.V.; García-Gutiérrez, M.; Mingarro, M. et al.: RESEAL-II. A large scale in situ demonstration test for repository sealing In an argillaceous host rock – phase II. CONTRACT N° FIKW-CT-2000-00010 Final report on laboratory tests (WP1). Hg. v. 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002 KEY ACTION: NUCLEAR FISSION EUROPEAN COMMISSION, 2005.
- (Inoue, 1983) Inoue, A.; "Potassium fixation by clay minerals during hydrothermal treatment". *Claysand Clay Minerals* (1983) 31, 81-91.

- (Jia et al., 2007) Jia, Y.; Song, X.C.; Duveau, G.; Su, K.; Shao, J.F.: Elastoplastic damage modelling of argillite in partially saturated condition and application. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 32 (2007), S. 656–666.
- (Jia et al., 2008) Jia, Y.; Bian, H.B.; Duveau, G.; Su, K.; Shao, J.F.: Hydromechanical modelling of shaft excavation in Meuse/Haute-Marne laboratory. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 33 (2008), S. 422–435. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706508002921>, zuletzt geprüft am 27.03.2012.
- (Jobmann, 2007) Jobmann, M.: Untersuchung Thermischer Expansions-Effekte (TEE) in Tonformationen. Hg. v. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine, 2007.
- (Jobmann, 2011) Jobman, M.: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein – AnSichT – FKZ: 02E11061B, Gemeinsame Vorhabensbeschreibung DBE TECHNOLOGY, BGR und GRS, Peine 2011.
- (Jobmann, 2012) Jobmann, M.I (2012): Stoffmodelle im Tonstein. Freiberg, 22.03.2012. persönlich an Falk Schreiter.
- (Jobmann et al., 2007) Jobmann, M.; Uhlig, L.; Amelung, P.; Billaux, D.; Polster, M.; Schmidt, H.: Untersuchung zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein, FuE-Vorhaben GENESIS-. Abschlussbericht. Hg. v. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine, 2007.
- (Jobmann et al., 2010) Jobmann, M., Wilsnack, Th., Voigt, H.-D.: Investigation of damage-induced permeability of Opalinus clay, *Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 47 (2010), 279-285, Elsevier.
- (Jobmann & Li, 2012) Jobmann, M.; Li, S.: Applied mechanic model for Clay. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, 2012.
- (Jubelt & Schreiter, 1972) Jubelt, R.; Schreiter P.: Gesteinsbestimmungsbuch, 6., überarbeitete Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1972.
- (K+S, 2002) K+S: Schachtverschluss Salzdetfurth. BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 02C0516 (2002).
- (Käding, 1978) Käding, K.C.: Stratigraphische Gliederung des Zechsteins im Werra-Fulda-Becken. - *Geol. Jb. Hessen* 106, S. 123-130, 1978.
- (Kahr et al., 1986) Kahr, G.; Kraehenbuehl, F.; Müller-Vonmoos, M.; Stoeckli, H. F. (1986): Wasseraufnahme und Wasserbewegung in hochverdichtetem Bentonit. Hg. v. Nagra. Baden (Schweiz), 1986. (Nagra Technischer Bericht, 86-14)
- (Kappei & Eikmeier, 2006) Kappei, G. & Eikmeier, V.: Verfüll- und Verschlusskonzept für die Schließung der Tagesschächte 2 und 4 des Bergwerkes Asse. (Schachtverschlusskonzept). - Bericht der GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, 2006. 16/ERV/GH/BZ/0001/00, 15.11.2006.

- (Kasbohm et al., 2000) Kasbohm, J., Venz, C., Henning, K.-H., and Herbert, H.-J.: „Zu Aspekten einer Langzeitsicherheit von Bentonit in hochsalinaren Lösungen“. In *Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe e. V.- Beiträge zur Jahrestagung* (2000), Vol. 7 (ed. R. Hermanns Stengele and M. Plötze), pp. 158-170.
- (Keller, 2007) Keller, S.: F + E Endlagerung 9Y3213060000 „Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz - Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz-“ Technischer Bericht, Beitrag für das Projekt ISIBEL, 31.01.2007
- (Keller, 2009) Keller, S.: Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Hannover: BGR, 2009. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/701496773>.
- (Klee et al., 1981) Klee, K.-D.; Paulun, J.; Stein, E.: Entwicklung inelastischer Stoffgesetze durch Äquivalenz- und Grenzbereichsbetrachtungen und ihre numerische Behandlung. In: *Ingenieur-Archiv* (50) (1981), S. 353–364.
- (Klinge et al., 2007) Klinge, H.; Boehme, J.; Grisseman, C.; Houben, G.; Ludwig, R.-R.; Rübél, A.; Schelkes, K. et al.: Standortbeschreibung Gorleben Teil 1. Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Stuttgart: Schweizerbart, 2007. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/213506791>.
- (Knipping, 1989) Knipping, B.: Basalt Intrusions in Evaporites. 132 p., Lecture Notes in Earth Sciences (1989) Vol. 24, VI, Berlin-Heidelberg-New York-Tokio (Springer)
- (Komarneni & White, 1983a) Komarneni, S. and White, W. B.: “Hydrothermal reaction of strontium and transuranic simulator elements with clay minerals, zeolites and shales”. *Clays and Clay Minerals* (1983) 31,113.
- (Komarneni & Roy, 1983b) Komarneni, S. and Roy, D. M.: “Alteration of clay minerals and zeolites in hydrothermal brines”. *Clays and Clay Minerals* (1983) 31(5), 383-391.
- (Köster, 2009) Köster, R.: Das Verschlusskonzept für das Endlager Konrad. Fachgespräch Verschlussysteme. Bundesamt für Strahlenschutz. Freiberg, Oktober 2009.
- (Köthe et al., 2007) Köthe, A.; Hoffmann, N.; Krull, P.; Zirngast, M.; Zwirner, R.: Standortbeschreibung Gorleben Teil 2. Die Geologie des Deck und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Stuttgart: Schweizerbart, 2007. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/213506792>.
- (Kreienmeyer et al., 2008) Kreienmeyer, et al: ISIBEL. AP5 Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine , 2008

- (Krone et al., 2008) Krone, J.; Buhmann, D.; Mönig, J.; Wolf, J.; Heusermann, S.; Keller, S.; Weber, J.R.; Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Kreienmeyer, M.; Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH. Hannover, Peine, Braunschweig., 2008.
- (Krone et al., 2010) Krone, J.; Keller, S.; Mrugalla, S.; Weber, J.R.; Lommerzheim, A.; Buhmann, D.; Mönig, J.; Wolf, J.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL-II. Gemeinsamer Abschlussbericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, 2010.
- (Kudla et al., 2009) Kudla, W.; Dahlhaus, F.; Glaubach, U.; Gruner, M.; Haucke, J.; Hofmann, M.; Wasowiecs, B.: Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung 02C1124. Hg. v. Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg. Freiberg, 2009.
- (Kudla et al., 2010) Kudla, W. Prof. Dr.; Knoll, P. Prof. Dr.; Finder, M. Dipl.-Ing: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV -CARLA-. Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. Hg. v. GTS Grube Teutschental. Teutschental, 2010.
- (Kühn, 2004) Kühn, K. Entwicklung von Steinsalz-Anhydrit-Baustoffen für Dammbauwerke und ihre Erprobung in einem Großversuch. Fachgespräch „Verschlussmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen – Kenntnisstand, offene Frage, FuE-Bedarf“ Braunschweig, 25./26.03.2004.
- (Küster et al., 2011) Küster, Y., Schramm M., Leiss B.: „Compositional and microstructural characterisation of solid inclusions in the laminated halite type „Kristallbrocken“ with regard to ist formation in the Central European Zechstein Basin“, Z. dt. Ges. Geowiss., 162/3, S. 277-294, 2011.
- (Langefeld, 2005) Langefeld, O.: Entwicklung von Steinsalz-Anhydrit-Baustoffen für Dammbauwerke und ihre Erprobung in einem Großversuch. Fachgespräch „Verschlussmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen – CARLA – Streckenverschlüsse im Carnallit und weitere FuE Aktivitäten“, Teutschental, 13./14.10.2005.
- (Laoufa et al., 2008) Laoufa, F.; Kazmierzak, J.; Armand, G.: Three-dimensional and time stepping modelling of the whole Meuse Haute Marne URL. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 33 (1) (2008), S. 448–456. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706508002957>, zuletzt geprüft am 28.03.2012.

- (Lloret et al., 2003) Lloret, A.; Villar, M. V.; Sanchez, M.; Gens A.; Pintado X.; Alonso, E. E.: Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. In: *Geotechnique* 53 (1) (2003), S. 27–40.
- (Loeber et al., 1998) Loeber, L.; Mullera, G.; Morelb, J.; Suttonc, O.: Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach. *Fuel*, 77, 13 (1998). S. 1443-1450
- (Lubliner, 1990) Lubliner, J. (1990): *Plasticity Theory*: Pearson Education. Online verfügbar unter <http://www.ce.berkeley.edu/~coby/plas/pdf/book.pdf>.
- (Lux, 2005) Lux, K.H. (2005): Endlagerstandortsuche, Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Abschlussbericht, TU Clausthal.
- (Lux et al., 2006) Lux, K.-H.; Eberth, S.; Düsterloh, U.: Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barrierenintegritäts- und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien mit besonderer Berücksichtigung der Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie. Abschlussbericht zum BMBFForschungsvorhaben 02C0720. Professur für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2006
- (Mehlhorn, 1997) Mehlhorn, G.: *Werkstoffe, Elastizitätstheorie*. Berlin: Ernst, 1997.
- (Metz, 2001) Metz V.: "Dissolution kinetics of smectite and kaolinite". Ph.D. Dissertation (2001), Ben-Gurion University of the Negev, Israel.
- (Metz & Ganor, 1999) Metz, V. and Ganor, J.: "Congruent Dissolution of Smectite in a Flow-Through System". *Mineral Water Interactions - Close to Equilibrium: Workshop of the Forschungszentrum Karlsruhe held at Speyer 25th and 26th of March 1999*, 88-91.
- (MFPA, 2004) MFPA: Entwicklung eines Messsystems zur Wassergehaltsbestimmung von Bentonit in salinärer Umgebung. AP 6: Test der Kabelsensoren in halbtechnischen Versuchen unter realitätsnahen Bedingungen; AP 7: Prognosemodell zur Feuchteausbreitung im Dichtelement. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung. IBeWa-Ingenieurpartnerschaft im Auftrag der Materialforschungs und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar. Weimar (02 C 0800), 2004.
- (MFPA, 2009) MFPA: Quantifizierung räumlich und zeitlich variabler Feuchte- und Dichteverteilung in Verschlussbauwerken mittels Time-Domain-Reflectometry (TDR). AP 8: Numerische Simulation der Feuchteausbreitung auf der Grundlage der messtechnisch ermittelten Feuchteverteilungen. Unter Mitarbeit von IBeWa-Ingenieurpartnerschaft. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Materialforschungs und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar. Weimar (02 C 1064), 2009.

- (Miehe et al., 2003) Miehe, R.; Kröhn, K.-P; Moog, H.: Hydraulische Kennwerte tonhaltiger Mineral-gemische zum Verschluss von Untertagedeponien (KENTON). Köln: GRS (GRS, 193), 2003.
- (Minkley & Mühlbauer, 2007) Minkley, W.; Mühlbauer, J.: Constitutive models to describe the mechanical behavior of salt rocks and the imbedded weakness planes. In: Manfred Wallner, Karl-Heinz Lux, Wolfgang Minkley und H. Reginald Hardy, Jr. (Hg.): The mechanical behavior of salt. Understanding the THMC processes in salt: proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt 'Saltmech6', Hannover, Germany, 22-25 May 2007. London, New York: Taylor & Francis, S. 119–127.
- (Mischo, 2002) Mischo, H.: „Untersuchungen an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge“ (Dissertation TU Clausthal 2002) Shaker Verlag GmbH, Aachen, ISBN 3-8322-0594-2, 232 S.
- (Mönig et al., 2012) Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltés, B., Peiffer, F., Fischer-Appelt, K.: Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS – 271., 2001.
- (Mrugalla, 2011) Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- (Müller, 1987) Müller, Wolfgang Doz. Dr. sc. techn.: Grubenbewetterung und Grubenklima. Heft 1 Grundlagen (I). Physikalische Kenngrößen der Grubenwetter. Hg. v. Sektion Geotechnik und Bergbau. TU Bergakademie Freiberg. Freiberg, 1987.
- (Müller-Hoeppe, 2010) Müller-Hoeppe, N.: Untersuchung der Kontaktzone am ASSE-Vordamm – Gesamtinterpretation, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2010
- (Müller-Hoeppe et al., 2007) Müller-Hoeppe, N. et al.: The Role of Structural Reliability of Geotechnical Barriers of an HLW/SF Repository in Salt Rock within the Safety Case, Peine, 2007
- (Müller-Hoeppe et al., 2012a) Müller-Hoeppe, N. et al.: vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben: AP 9.1, Materialspezifikation für Widerlager, Filter-/Aufsättigungs- und Speicherelemente, unveröffentlicht, Peine, 2012
- (Müller-Hoeppe et al., 2012b) Müller-Hoeppe, N. et al.: vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben: AP 9.1, Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Strecken- und Schachtverschlüssen, unveröffentlicht, Peine, 2012
- (Müller-Hoeppe et al., 2012c) Müller-Hoeppe, N. et al.: vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben: AP 9.1, Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2 - Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer, unveröffentlicht, Peine, 2012

- (Müller-Hoeppe et al., 2013a) Müller-Hoeppe, N. et al.: vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben Abschlussbericht Arbeitspaket 9b Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung, GRS-Bericht, Köln, 2013, in Vorbereitung
- (Müller-Hoeppe et al., 2013b) Müller-Hoeppe, N. et al.: vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben Abschlussbericht Arbeitspaket 9b Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 2: Vertiefte Nachweisführung, GRS-Bericht, Köln, 2013, in Vorbereitung
- (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009) Müller-Hoeppe, N.; Eberth, S.: ÜBERSICHT - Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine - Abschlussbericht, FZK02E9521, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2009
- (Müller-Hoeppe & Krone, 1999) Müller-Hoeppe, N.; Krone, J.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager – Abschlussbericht DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 1999
- (Müller-Lyda, 1999) Müller-Lyda, Ingo (1999): Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz. Ableitung einer Permeabilitäts-Druck-Relation für Langzeitsicherheitsanalysen. Köln; Garching b. München; Berlin, Braunschweig: GRS.
- (Müller-Schmitz, 1985) Müller-Schmitz, S. (1985): Mineralogisch-petrographische und geochemische Untersuchungen an Salzgesteinen der Staßfurt-, Leine- und Aller-Serie im Salzstock Gorleben (Niedersachsen, B.R. Deutschland). Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- (Musso & Romero, 2009) Musso, G.; Romero, E.: Pore size distribution effects on the hydro-chemo-mechanical behaviour of bentonite. In: 14th International Clay Conference (2009), p. 314, S. 314.
- (M.W., 2011) M.W. (2011): Geo-Glossar.de - Glossar > kompetent / inkompetent. Online verfügbar unter <http://www.geoglossar.de/woerterbuch/inkompetent.html>, zuletzt aktualisiert am 05.12.2011, zuletzt geprüft am 05.12.2011.
- (NAGRA, 1990) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (1990): Technical Report 90-02. Numerical Modeling of the creep behavior of clays with emphasis on tunnels and underground openings. Baden/Schweiz.
- (NAGRA, 2002a) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Technischer Bericht NTB 02-02. Wettingen 2002.

- (NAGRA, 2002b) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (2002a): Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Technischer Bericht NTB 02-03. Wettingen 2002.
- (Nold et al., 2002) Nold, A.L.; Zuidema, P.; Blümling, P. (2002): TECHNISCHER BE- RICHT 02-02. Konzept für die Anlage und Projekt Opalinuston, Kon- zept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Hg. v. Nationale Ge- nossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen.
- (OCZ, 1996) Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld: Richtlinien des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld für das Verfüllen und Abdecken von Tages- schächten vom 15.02.1996-11.2-10.2-3/95II-Bllf5.2-II.
- (Perzyna, 1962) Perzyna, P. (1962): The constitutive equations for rate sensitive plas- tic materials. In: *Quarterly of Applied Mathematics* (20), S. 321–332.
- (Pitzer, 1973) Pitzer, K. S.: „Thermodynamics of elektrolytes. I. Theoretical basis and general equations“ *J. Phys. Chem.* 77 (1973) S. 268
- (Pöhler et al., 2010) Pöhler, M.; Amelung, P.; Bollingerfehr, W.; Engelhardt, H.J.; Filbert, W.; Tholen, M. (2010): Referenzkonzept für ein Endlager für radioak- tive Abfälle in Tonstein. ERATO. Abschlussbericht. DBE TECHNOL- OGY GmbH. Peine.
- (Popp et al., 2008) Popp, Till; Salzer, Klaus; Minkley, Wolfgang (2008): Influence of bed- ding planes to EDZ-evolution and the coupled HM properties of Opal- inus Clay. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 33, S. S374. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706508002878>, zuletzt geprüft am 28.03.2012.
- (Popp & Kern, 2001) Popp, T.; Kern, H. (2001): Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. *Journal of Geophysical Research*, 106, S. 4061-4078
- (Popp & Salzer, 2007) Popp, Till; Salzer, Klaus (2007): Anisotropy of seismic and mechani- cal properties of Opalinus clay during triaxial deformation in a multi- anvil apparatus. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 32, S. 879–888. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706506002592>, zuletzt geprüft am 28.03.2012.
- (Pudewills, 2011) Pudewills, A.: Numerische Simulation zum mechanischen Langzeit- verhalten eines realen Untertagebauwerkes im Steinsalz. BMBF - Verbundprojekt 02C1597 Einzelbericht zum Teilprojekt 3. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe, 2011.

- (Pusch et al., 1985) Pusch, R.; Ranhagen, L.; Nilden, K. (1985): Gas Migration Through MX-80 Bentonite. Wettingen, Schweiz (NAGRA Technical Report, NTB-85-36).
- (Pusch & Forsberg, 1983) Pusch, R.; Forsberg, T.: Gas migration through bentonite clay. (SKBF/KBS Technical Report TR 83-71, TR 83-71) Stockholm SKB. Stockholm, 1983.
- (Pusch & Karnland, 1988) Pusch, R.; Karnland, O.: „Geological evidence of smectite longevity: The Sardinien and Gotland cases“. SKB Technical Report, TR-88-26, Stockholm 1988.
- (Rauche et al., 2003) Rauche, H.; Sitz, P.; Lukas, V.; Rumphorst, K.; Lippmann, G.; Wagner, K.; Teichert, T.: Nachweisführungen zur Langlebigkeit, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. Hg. v. Bundesamt für Strahlenschutz, 2003. Erfurt, Freiberg, Kassel, zuletzt geprüft am 19.09.2011.
- (Rauche et al., 2004) Rauche, H.; Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K., Bodenstern, J., Teichert, T.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben – Konzeptplanung der Schachtverschlüsse Bartensleben und Marie des ERA Morsleben. Bundesamt für Strahlenschutz, 2004. 9M/ 223 450 11/GHS/TF/ 0001/00, P182.
- (Richter-Bernburg, 1955) Richter-Bernburg, G.: Stratigraphie und Gliederung des deutschen Zechsteins. Z. dt. geol. Ges., 105, S. 843-854, Hannover, 1955.
- (Rißler, 1979) Rißler, P.: Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben. Hg. v. Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Berlin (Die Bautechnik), 1979.
- (Rodwell et al., 1999) Rodwell, W. R., Horris, A. W. Horseman, S. T.; Lolieux, P., Müller, W.; Ortiz Amoyo, L.; Pruess, K.: Gas Migration and Two Phase Flow through Engineered and Geo-logical Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste – A Joint EC/NEA Status Report. European Commission & Nuclear Energy Agency, EUR 19122 EN, Brüssel, Belgium, 1999.
- (Romero & Li, 2006) Romero, E.; Li, X.: Thermo-Hydro-Mechanical Characterization of Ophelie Backfill Mixture. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (2006), Vol. 25, No. 4
- (Rothfuchs et al., 2005) Rothfuchs, T.; Jockwer, N.; Mieke, R.; Zhang, C.-L.: Self sealing barriers of clay/mineral mixtures in a clay repository. SB experiment in the Mont Terri Rock Laboratory, final report., Köln, Hannover: GRS; GRS-212, 2005)
- (RSK, 2005) Reaktor-Sicherheitskommission (Hg.): RSK Stellungnahme. Gase im Endlager. (2005, 379. Sitzung).

- (Salzer et al., 1998) Salzer, K.; Konietzky, H.; Günther, R.-M.: A new creep law to describe the transient and secondary creep phase, Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems. In: Springer (Hg.): Proceedings of the Fourth European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (1998). Wien New-York: Springer Verlag, S. 377–387.
- (Schmidt et al., 1992a) Schmidt, W.; Sitz, P.; Kessler, J.: Physikalische und chemische Eigenschaften von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Literaturstudie. Wettingen, 1992..
- (Schmidt et al., 1992b) Schmidt, W.; Sitz, P.; Kessler, J.: Technischer Bericht 93-37. Physikalische und chemische Eigenschaften von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Literaturstudie. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, 1992.
- (Schmidt et al., 1994a) Schmidt, M.W.; Fruth, R.; Stockmann, N.; Birthler, H.; Boese, B.; Storck, R. et al.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. - Vorprojekt -. Band 1 Text und Abbildungen. Hg. v. GmbH GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. Braunschweig, 1994.
- (Schmidt et al., 1994b) Schmidt, M.W.; Fruth, R.; Stockmann, N.; Birthler, H.; Boese, B.; Storck, R. et al.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. - Vorprojekt -. Band 2: Anhang. Hg. v. GmbH GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. Braunschweig, 1994.
- (Schmidt et al., 1995) Schmidt, M.W.; Fruth, R.; Stockmann, N.; Birthler, H.; Boese, B.; Storck, R.; Sitz, P.; Krauß, A.; Eulenberger, K.-H.; Schleinig, J.-P.; Duddeck, H.; Ahrens, H.; Menzel, W.; Salzer, K.; Minkley, W.; Busche, H.; Lindhoff, U.; Gierenz, S.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken - Vorprojekt. - GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Bericht 32/95, Neuherberg, 1995.
- (Schmidt-Döhl, 2009) Schmidt-Döhl, F.: „Dauerhaftigkeitsprognose von Salzbeton in Kontakt mit salinaren Lösungen“. Jahrestagung der GDCh-Fachgruppe Bauchemie 2009, GDCh Monographie Bd. 41, ISBN 978-3-936028-61-4, S. 81 - 88
- (Sitz, 1997) Sitz, Peter Prof. Dr.-Ing: Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 02 C 0193. TU Bergakademie Freiberg, 1997.
- (Sitz, 2001) Sitz, P: Langzeitstabile Verschlussbauwerke in Strecken und Schächten. In: Bergbau (2001) (11), S. 520–526.

- (Sitz et al., 1989) Sitz, P.; Köckritz, V.; Oellers, Th.: Shaft Sealing for nuclear Waste Repositories. In: Shaft Engineering (1989), S. 345–352.
- (Smolczyk, 2001) Smolczyk, U. (Hg.): Grundbau Taschenbuch. Teil 1 Geotechnische Grundlagen. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2001.
- (Studer et al., 1984) Studer, J.; Ammann, W.; Meier, P.; Müller, Ch.; Glauser, E.: Technischer Bericht 84-33. Verfüllen und Versiegeln von Stollen Schächten und Bohrlöchern. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Baden/Schweiz, 1984.
- (Su, 2007) Su, Kun: Development of Hydromechanical Models of the Callovo-Oxfordian Argillites for the Geological Disposal of Radioactive Waste. Hg. v. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra). EURATOM, 2007.
- (Su & Ozanam, 1999) Su, K.; Ozanam, O.: Rheological Model for the eastern Argillites - Summary of Status for the Rheological Studies. Hg. v. Andra. Paris, 1999.
- (Tanai et al, 1997) Tanai, K.; Kanno, T.; Galle, C.: Experimental study of gas permeabilities and breakthrough pressures in clays. In: Material Research Society Symp. (1997) Proc. 465, S. 995–1002.
- (Teichmann et al., 2002) Teichmann, et al.: FuE-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth; Geotechnische Messungen; Untersuchungen zur Schottersäule Schacht 1, DBE, Peine, 2002
- (Therzaghi, 1936) Therzaghi, K.: The shear resistance of saturated soils. In the Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics (1936), Vol.1, P 54-56
- (Tiab & Donaldson, 1999) Tiab, D.; Donaldson, E.C.: Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties. Houston, Texas, 1999
- TUBAF (1987) TUBAF (1987): Grubenbewetterung und Grubenklima. Physikalische Kenngrößen der Grubenbewetterung Das h-x-Diagramm für feuchte Luft Heft 1. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg. Sektion Geowissenschaften und Bergbau.
- (US Department of Commerce, 1995) US Department of Commerce: WIPP Sealing System Design Report. Hg. National technical Information Service. Springfield, 1995.
- (Van Geet et al., 2007) Van Geet, M.; Volckaert, G.; Bastiaens, W.; Maes, N.; Weetjens, E.; Sillen, X. et al.: Efficiency of a borehole seal by means of precompacted bentonite blocks. In: Physics and Chemistry of the Earth 32 (2007), S. 123–134.

- (Vaunat & Gens, 2004) Vaunat, J.; Gens, A.: Aspects of modelling geotechnical problems in hard soils and soft argillaceous rocks, vaunat, J., Gens, A., 2004. Hg. v. Department of Geotechnical Engineering and Geosciences Technical University. Department of Geotechnical Engineering and Geosciences Technical University of Catalonia (UPC). Barcelona, 2004.
- (Vaunat & Olivella, 2002) Vaunat, Jean; Olivella, Sebastià: CODE\_BRIGHT/GID: A 3-D Program for Thermo-Hydro-Mechanical Analysis in geological media. Hg. v. Department of Geotechnical Engineering and Geosciences Technical University of Catalonia (UPC). Department of Geotechnical Engineering and Geosciences Technical University of Catalonia (UPC), 2002. Barcelona. Online verfügbar unter [http://www.gid-usa.com/2002/Papers/16\\_Vaunatpaper.pdf](http://www.gid-usa.com/2002/Papers/16_Vaunatpaper.pdf), zuletzt geprüft am 26.03.2012.
- (Vermeer & de Borst, 1984) Vermeer, P.A; Borst, R. de: Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock. Hg. v. Delft University of Technology, 1984. Online verfügbar unter <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4ee188ab-8ce0-4df3-adf5-9010ebfaabf0>.
- (Voigt, 1999) Voigt, W.: Thermodynamische Modellrechnungen zur Nachweisführung der Langzeitstabilität der Verfüllstoffe. In: Endlager Morsleben – Verfüllen untertägiger Bohrungen und Abbauhohlräume mit Magnesitabinder. BfS, 9X/1141/BE/J/0001/02, 03.09.1999.
- (Wagner, 2005) Wagner, K: Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge, Dissertation an der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. 2005
- (Weleman & Cormery, 2003) Weleman, H.; Cormery, F. (2003): An alternative 3D model for damage induced anisotropy and unilateral effect in microcracked materials. In: J. Phys. IV France 105, S. 329–336.
- (Wikipedia, 2011a) Wikipedia (Hg.) (2011a): Waste Isolation Pilot Plant. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83186856>, zuletzt aktualisiert am 17.07.2011, zuletzt geprüft am 04.08.2011.
- (Wikipedia, 2011b) Wikipedia (Hg.) (2011b): Waste Isolation Pilot Plant - Wikipedia, the free encyclopedia. Online verfügbar unter <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=433733560>, zuletzt aktualisiert am 30.07.2011, zuletzt geprüft am 04.08.2011.
- (Wilsnack et al., 2008) Wilsnack, T.; Sitz, P.; Heinemann, K.-H.; Rumphorst, K.; Hunstock, F.: Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. In: Kali und Steinsalz (3) (2008), S. 24–35.
- (Wittke, 1991) Wittke, R.: Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (343m Sohle) (Bericht A1), Endlager Konrad Schachtverfüllung / Alte Bohrungen Bericht Teil A11, Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (541m Sohle). (1991).

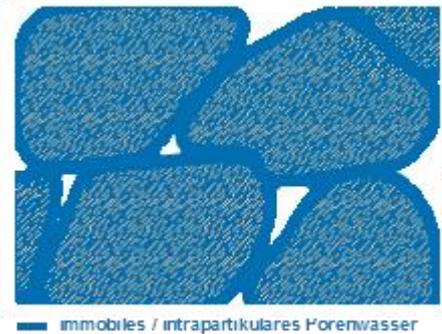
- (Wolf, 1989) Wolf, M.: „Mikrobieller Abbau von Bitumen“ NAGRA Technischer Bericht 89-14, Institut für Pflanzenbiologie der Universität Zürich, April 1989
- (Wolf et al., 2012) Wolf, J.; Behlau, J.; Beuth, T.; Bracke, G.; Bube, C.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Hammer, J.; Keller, S.; Kienzler, B.; Klinge, H.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Metz, V.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Popp, T.; Rübel, A.; Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 987-3-393355-58-8, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- (Zhang et al., 2003) Zhang, Chun-Liang; Kröhn, Klaus-Peter; Rothfuchs, Tilmann: Applications of CODE-BRIGHT to thermal-hydrromechanical experiments on clays. Hg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. GRS Braunschweig, 2003, <http://www.springerlink.com/content/q86mx70472gw6720/fulltext.pdf>.
- (Zhang et al., 2004a) Zhang, C.L.; Rothfuchs, T.; Moog, H.; Dittrich, J.M.: Mechanical and Geochemical Behaviour of the Callo-Oxfordian Argillite and the Opalinus Clay. GRS-202. Köln, 2004.
- (Zhang et al., 2004b) Zhang, Chung-Liang; Rothfuchs, Tilmann; Moog, Moog; Dittrich, Jürgen; Müller, Jürgen: Thermo-Hydro- Mechanical and Geochemical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Argillite and the Opalinus Clay. Hg. v. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, 2004. Online verfügbar unter <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-202.pdf>, zuletzt geprüft am 26.03.2012.
- (Zhang et al., 2007) Zhang, Chun-Liang; Rothfuchs, Tilmann; Jockwer, Norbert; Wiczorek, Klaus; Dittrich, Jürgen; Müller, Jürgen et al.: Thermal Effects on the Opalinus Clay. A Joint Heating Experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terri URL (HE-D Project). Hg. v. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. Köln; Garching b. München; Berlin; Braunschweig, 2007. Online verfügbar unter <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS%20-%20224d.pdf>, zuletzt geprüft am 26.03.2012.
- (Zhang et al., 2010) Zhang, Chung-Liang; Czaikowski, Oliver; Rothfuchs, Tilmann (2010): Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Clay Rock. Within the Framework of GRS/ANDRA Cooperation Programme and the EC TIMODAZ Project. Hg. v. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, 2010. Online verfügbar unter <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-266.pdf>, zuletzt geprüft am 26.03.2012.

- 
- (Zhang & Rothfuchs, 2008) Zhang, Chun-Liang; Rothfuchs, Tilmann: Damage and sealing of clay rocks detected by measurement of gas permeability. In: *Physics and Chemistry of the Earth* (2008), Parts A/B/C 33 (1), S. 363–373. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706508002866>.
- (Zhou et al., 2008) Zhou, H.; Jia, Y.; Shao, J.F.: A unified elastic-plastic and viscoplastic damage model for quasi-brittle rocks. In: *International Journal of Rock MEchanics and Mining Sciences* (2008) 45 (8), S. 1237–1251. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160908000142>, zuletzt geprüft am 28.03.2012.
- (Zysset & Schindler, 1996) Zysset, M., Schindler P. W.: "The proton promoted dissolution kinetics of K-montmorillonite". *Geochimica et Cosmochimica Acta* (1996) 60(6), 921-931

## Glossar

Advektion	<p>Advektion beschreibt den Transport eines gelösten Stoffs mit der Abstandsgeschwindigkeit des strömenden Wassers.</p> $u_a = \frac{u_f}{n_{\text{eff}}}$ <p> <math>u_a</math> - Abstandsgeschwindigkeit m/s  <math>u_f</math> - Darcy-Geschwindigkeit m/s  <math>n_{\text{eff}}</math> - effektive Porosität         </p>
Bemessungskriterien	Beschreibung der für die Einhaltung der Grenzzustände zu erfüllenden Bedingungen
Bemessungssituation	Dem Nachweis der Einhaltung eines Grenzzustandes zu Grunde liegende, im betrachteten Zeitraum konstante Bedingungen des Tragwerks einschließlich der maßgebenden Einwirkungen, Umweltbedingungen usw., für die der Tragwerksplaner die Einhaltung der maßgebenden Grenzzustände nachweist. Es wird zwischen vorübergehenden, ständigen und außergewöhnlichen Bemessungssituationen unterschieden
Bemessungswert	Für die Nachweise von Grenzzuständen, z. B. der Tragfähigkeit zu Grunde zu legender Wert des Tragwiderstands
charakteristischer Wert der Einwirkung	wichtigster repräsentativer Wert einer Einwirkung, von dem angenommen wird, dass er mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer und der entsprechenden Bemessungssituation nicht überschritten oder unterschritten wird
charakteristischer Wert des Widerstandes	durch die charakteristischen Werte der maßgebenden Baustoffeigenschaften, z. B. Festigkeit, und die Nennwerte der Querschnittsgrößen festgelegter Tragwiderstand
Dauerhaftigkeit	Fähigkeit des Tragwerks und seiner Teile, Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit während der gesamten Nutzungsdauer sicherzustellen
Dichtsystem	im Sprachgebrauch dieses Berichtes Einheit aus technischen Dichtelementen und umgebendem Gebirge
Einwirkung	Auf das Tragwerk einwirkende Größen, z. B. Kraft und Verformungsgrößen
Einwirkungskombination	Festlegung der Bemessungswerte der gleichzeitig auftretenden Einwirkungen, die für den betrachteten Nachweis entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens zu berücksichtigen sind
Gebrauchstauglichkeit	Fähigkeit des Tragwerks und seiner Teile, die planmäßige Nutzung entsprechend festgelegter Bedingungen zu ermöglichen

Grenzflächenspannung	<p>Grenzflächenspannung charakterisiert das Kräftegleichgewicht an der Grenzfläche zwischen zwei fluiden Phasen. In Abweichung zum klassischen Spannungsbegriff (Kraft / Fläche) wird die Grenzflächenspannung als Arbeit bzw. Energie je Fläche definiert und wird daher mit der Einheit <math>J/m^2</math> bzw. <math>N/m</math> angegeben.</p> <p>Bei der begrifflichen Verwendung wird teilweise unterschieden in:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Oberflächenspannung gegenüber Dampfphase des Stoffes</li><li>• Grenzflächenspannung gegenüber anderer Phase</li></ul>
Grenzzustand	<p>Zustand des Tragwerks, bei dessen Überschreitung die der Tragwerkplanung zu Grunde gelegten Anforderungen (Funktionsanforderungen) nicht mehr erfüllt sind</p>
Grenzzustand der Tragfähigkeit	<p>Zustand des Tragwerks, dessen Überschreitung unmittelbar zu einem rechnerischen Einsturz oder anderen Formen des Versagens führt; der Grenzzustand ergibt sich im Allgemeinen aus dem größten rechnerischen Tragwiderstand</p>
immobiler/intrapartikulärer Porenraum	<p>Porenraum in einzelnen Partikeln bzw. Aggregaten; Haftlösung; nicht durchströmbarer Porenraum; unbewegliche Porenlösung</p>
mobiler/interpartikulärer Porenraum	<p>Porenraum zwischen einzelnen Partikeln bzw. Aggregaten; durchströmbarer Porenraum; bewegliche Porenlösung</p>
Rechenfall	<p>aus den Einwirkungskombinationen der jeweiligen Eigenschaften gebildete Grenzwertbetrachtung</p>
repräsentativer Wert	<p>Wert einer Einwirkung, der der Nachweisführung in den Grenzzuständen zu Grunde liegt</p>



---

Rissabdichtung – „sealing“	Reduzierung der Permeabilität von permeablen Wegsamkeiten in Folge mechanischer, geochemischen und biologischen Prozessen [4] (Kapitel 3.3)
Rissheilung – „healing“	irreversible Permeabilitätsreduzierung in Folge mechanischer, geochemischer und biologischer Prozesse [4] (Kapitel 3.3)
Sicherheit	Fähigkeit des Tragwerks zur Sicherstellung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit (Funktionsfähigkeit), die eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung verhindern
Teilsicherheitsbeiwert	Beiwert zur Bestimmung des Bemessungswertes von Einwirkungen, von Beanspruchungen oder von Tragwiderständen aus den repräsentativen bzw. charakteristischen Werten
Tragfähigkeit	Fähigkeit des Tragwerks und seiner tragenden Teile, allen auftretenden Einwirkungen zu widerstehen, denen es während der Errichtungs- und Nutzungsdauer planmäßig standhalten soll, wird als Synonym für die Vermeidung einer Gefahr für Leib und Leben auch auf nicht mechanische Eigenschaften übertragen
Zuverlässigkeit	Wahrscheinlichkeit der Sicherstellung von Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit während der vorgesehenen Lebensdauer (qualitativ)
Zuverlässigkeitsniveau	früher auch als Sicherheitsniveau oder Konfidenzniveau bezeichnet, Wahrscheinlichkeit, mit der ein definierter Grenzzustand für den vorgegebenen Bezugszeitraum nicht überschritten wird (quantitativ)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Übliche technische Varianten der Schachtverwahrung im Salinar in Deutschland (nach (Bartl et al., 2005))	16
Abbildung 1-2:	Schachtverschlusskonzept Typ Salzdetfurth (Schmidt et al., 1994a)	17
Abbildung 1-3:	Detaillierter Aufbau eines Bentonitdichtelementes (Wilsnack et al., 2008)	18
Abbildung 1-4:	Verfüllkonzept der Tagesschächte des Endlagers Asse (nach (Kappei & Eikmeier, 2006))	20
Abbildung 1-5:	Technisches Grundkonzept eines Schachtverschlusses für Endlager im Salinar (Sitz, 2001)	21
Abbildung 1-6:	Verfüllplan für das Endlager Morsleben (Schacht Marie) (Rauche et al., 2003)	22
Abbildung 1-7:	Schachtverschlusskonzept der WIPP Site (nach: (US Department of Commerce, 1995) und (Kudla et al., 2009))	23
Abbildung 1-8:	Schachtverschlusskonzept des Schachtes Konrad Teil 1 (Köster, 2009)	25
Abbildung 1-9:	Schachtverschlusskonzept des Schachtes Konrad Teil 2 (Köster, 2009)	26
Abbildung 1-10:	Einbauvarianten der mineralischen Abdichtung im Schacht Konrad (Köster, 2009)	28
Abbildung 1-11:	Konzeptvorschlag für Schachtversiegelung -NAGRA- (Nold et al., 2002)	29
Abbildung 1-12:	Prinzipskizze des Großversuches für eine Schachtversiegelung in Tonigen Gesteinen - Phase II (Imbert et al., 2005)	30
Abbildung 1-13:	Vorgesehener Schachtverschluss für das Kanadische Untertagelabor (Dixon et al., 2010)	31
Abbildung 2-1:	Verknüpfung der hydraulischen Langzeitberechnungen im Langzeitsicherheitsnachweis und den funktionsbezogenen Einzelnachweisen am Beispiel eines Schachtverschlusses (Müller-Hoeppe et al., 2013a)	36
Abbildung 2-2:	Zuverlässigkeitsmethoden zur Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten (DIN EN 1990)	38
Abbildung 2-3:	Schematische Darstellung grundlegender Erosions- und Suffosionsvorgänge (DGGT 1997)	41
Abbildung 2-4:	Schematische Darstellung des Schachtverschlusses gemäß VSG (1. Entwurf); die in der beispielhaften Nachweisführung betrachteten Elemente sind rot umrandet (Müller-Hoeppe et al., 2013a)	44

---

Abbildung 3-1:	Zusammenfassung der für unterschiedliche Wirtsgesteine zu beachtenden Parameter (aus (Bollingerfehr et al., 2011))	64
Abbildung 3-2:	h-x Diagramm für einen Luftdruck von 1100 hPa [TUBAF 1987]	72
Abbildung 3-3:	Die drei Stadien des deviatorischen Kriechens ((NAGRA, 1990), S. 57)	81
Abbildung 3-4:	Ergebnisse der Scherfestigkeit von Tonsteinproben (Schachtanlage Konrad). Es wird zwischen von übertage bzw. von untertage aus gewonnenem Bohrkernmaterial unterschieden ((Lux, 2005) in (Jobmann et al., 2007))	93
Abbildung 3-5:	Modelldiskretisierung mit verwendeten Kriechklassen, Vertikalschnitt durch den Schacht 1 in E-W-Richtung	96
Abbildung 3-6:	Zeitliche Entwicklung der Auflockerungszone	99
Abbildung 3-7:	Geologischer Schnitt aus dem Referenzgebiet in Süddeutschland (Clauser et al., 2002)	102
Abbildung 3-8:	Prinzipielles Modell	102
Abbildung 3-9:	Auflockerungszone aus mechanischer Wirkung	104
Abbildung 3-10:	Porenwasserdruck bei Primärzustand und 20 a nach der Auffahrung	105
Abbildung 3-11:	Auflockerungszone aus hydromechanischer Wirkung	105
Abbildung 3-12:	Gebirgstemperatur als Funktion der Tiefe im Süddeutschen Molassebecken	106
Abbildung 3-13:	Temperatur am Anfang und nach 20 a nach der Auffahrung	107
Abbildung 3-14:	Auflockerungszone gemäß THM-gekoppelter Berechnungen	107
Abbildung 3-15:	Stratigraphisches Profil (4-fach überhöht) im Gebiet der Referenzregion Nord, (Jobmann et al., 2007))	108
Abbildung 3-16:	Dimension und Diskretisierung des Modells	109
Abbildung 3-17:	Auflockerungszone aus mechanischer Wirkung	110
Abbildung 3-18:	Thermischer Gradient im Niedersächsischen Becken	110
Abbildung 3-19:	Temperatur bei Primärzustand und 20 Jahre nach der Auffahrung	111
Abbildung 3-20:	Auflockerungszone nach 335 Tagen	111
Abbildung 3-21:	Auflockerungszone nach 20 Jahren	112
Abbildung 3-22:	Abnahme der Permeabilität von Steinsalzproben mit zunehmendem Druck	113
Abbildung 3-23:	Abnahme der Permeabilität von Tonsteinproben mit zunehmendem Druck (Jobmann et al., 2010)	114

---

Abbildung 3-24: Schematische Darstellung Dichtsystem	118
Abbildung 3-25: Szenarien der Fluiddruckbeaufschlagung für Schachtdichtungen	120
Abbildung 3-26: Schematische Darstellung der strömungsrelevanten Drücke und Spannungen in einem Dichtsystem mit hydrostatischer Druckbelastung an der Oberkante	122
Abbildung 3-27: In situ-Gaspermeabilitäten in Abhängigkeit vom Konturabstand für ausgewählte Schachtstandorte im Steinsalz in unterschiedlichen Teufen (IBeWa, 2012a)	125
Abbildung 3-28: Dilatanz-Permeabilitäts-Beziehungen als Porositäts-Permeabilitäts-Ansatz (aus (Lux et al., 2006))(Lux et al., 2006)Die sich im Wirtsgestein einstellende effektive Gaspermeabilität wird von der Porengrößenverteilung und dem sich daraus ergebenden Kapillardruck, der relativen Gaspermeabilität und der Gasdruckentwicklung im Grubengebäude bestimmt. Die langfristige Beurteilung eines möglichen Gasströmungsprozesses durch das Wirtsgestein erfordert eine Beurteilung dieser Eigenschaften und Randbedingungen in Abhängigkeit von dem sich nach dem Einbau des Dichtelementes einstellenden Spannungszustand	125
Abbildung 3-29: Totale Porosität in einem Dichtelement und mögliche räumliche Verteilung (IBeWa, 2012a)	129
Abbildung 3-30: Kapillardruck - Sättigungsfunktion für Calcigel-Sand-Gemisch (50 / 50) aufgesättigt bei konstantem Volumen (Arifin, 2008) (Imb. – Imbibition; Drain. – Drainage)	131
Abbildung 3-31: Porendichte in Abhängigkeit vom Porenradius FoCa Clay-Mineralgemisch (Romero & Li, 2006)	132
Abbildung 3-32: Zusammenhang von Quelldruck und Kapillardruck (Saugspannung) - Calcigel / Calcigel-Mineralstoffgemische (Agus, 2005)	132
Abbildung 3-33: Quelldruck in Abhängigkeit von dem auf das Porenvolumen normierten Gehalt an quellfähigen Mineralen (IBeWa, 2012a), (IfBuS-1, 2010), (Rothfuchs et al., 2005), (Herbert et al., 2006), (MFPA, 2009), (Miehe et al., 2003) (Reindichte von Zuschlag mit 2650 kg/m <sup>3</sup> angenommen, da kaum in den Quellen dokumentiert)	139
Abbildung 3-34: Vereinfachter geologischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben nach (Bornemann et al., 2008)	144
Abbildung 3-35: REM-Bilder von Einschlüssen im Kristallbrockensalz aus (Küster et al., 2011), c) Probe aus Lesum; i) Probe aus Gorleben; „a“ = Anhydrit, „p“ = Polyhalit (p)	146
Abbildung 3-36: Entwicklung der Ionenkonzentrationen in einer Zutrittslösung (Wasser) bei Kontakt mit dem Zechstein-Steinsalz der Leine-Folge	

---

(Na 3): Bänder- u. Banksalz (z3BD/BK) (Phasenbestand s. Tabelle 3-20) bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes	147
Abbildung 3-37: Entwicklung der Ionenkonzentrationen in einer Zutrittslösung (Wasser) bei Kontakt mit dem Zechstein-Steinsalz der Leine-Folge (Na 3): <i>Orangensalz</i> (z3OS)/ <i>Liniensalz</i> (z3LS)/ <i>Basissalz</i> (z3BS) (Tabelle 3-20) bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes; eine analoge Lösungszusammensetzung entwickelt sich in Kontakt mit dem Steinsalzbestand der Staßfurt-Folge	148
Abbildung 3-38: Entwicklung der Ionenkonzentrationen in einer Zutrittslösung (Wasser) bei Kontakt mit dem Kaliflöz Staßfurt (z2SF) (Phasenbestand s. Tabelle 3-21, Tabelle 3-22) bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes	149
Abbildung 4-1: Zusammensetzung von Anforderungen an Schachtverschlüsse	165
Abbildung 4-2: Strukturelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung am Salzstandort	166
Abbildung 4-3: Strukturelles Vorgehen zur Sicherheitsbewertung am Tonsteinstandort	170

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Auflistung verwahrter Schächte mit zur Anwendung gekommenem Verschlusskonzept (Herold, 2011)	17
Tabelle 2-1: Übersicht der Einwirkungen	49
Tabelle 2-2: Ermittlung der Schüttgutkennwerte gemäß (DIN EN 1991-4)	50
Tabelle 2-3: Werte $k_n$ für charakteristische Werte (5%-Fraktile), entspricht Tabelle D.1 nach (DIN EN 1990)	54
Tabelle 2-4: Werte $k_{d,n}$ für den Bemessungswert für Tragfähigkeitsnachweise, entspricht Tabelle D.2 nach (DIN EN 1990)	55
Tabelle 2-5: Beispiel für gemessene Gaspermeabilitäten am Baukörper, Pulse-Tests bei 1,2 MPa Prüfdruck (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009)	56
Tabelle 2-6: Beispiel für gemessene Gaspermeabilitäten an der Kontaktfuge Salzbeton/Steinsalz, Pulse-Tests bei 1,2 MPa Prüfdruck (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009)	57
Tabelle 2-7: Beispiel für gemessene Gaspermeabilitäten in der ALZ, Pulse-Tests bei 1,2 MPa Prüfdruck (Müller-Hoeppe & Eberth, 2009)	59
Tabelle 2-8: Zusammenfassung der für die Berechnung der mittleren, integralen Permeabilität relevanten Bemessungswerte	59
Tabelle 3-1: Petrophysikalische Parameter [nach (Brasser et al., 2008a)]	73

---

Tabelle 3-2:	Relevante gesteinsmechanische Parameter nach (Brasser et al., 2008a)	78
Tabelle 3-3:	Übersicht der Projektpartner des BMBF Verbundvorhabens, mit Auflistung der verglichenen Stoffgesetze und der zur Rechnung verwendeten Software	84
Tabelle 3-4:	Klassifikation für Tongesteine nach (Su & Ozanam, 1999) in ((Hou, 2002) S. 86)	91
Tabelle 3-5:	Auflistung von Stoffgesetzen für Tonstein und deren Anwendbarkeit auf spezielle Tonsteininformationen (Jobmann & Li, 2012), (Jobmann, 2012)	92
Tabelle 3-6:	Felsmechanische Kennziffern des Opalinustons [geändert nach: (NAGRA, 2002b)	94
Tabelle 3-7:	Vergleichende Darstellung des Wertebereiches bekannter Materialparameter nach: (Gruner, 2011), (Hou, 2002)	95
Tabelle 3-8:	Simulationsablauf / Ausgewählte Ereignisse beim Schachtteufen	97
Tabelle 3-9:	Relevante Kennwerte des Deckgebirges	97
Tabelle 3-10:	Formeln für die Berechnung der Temperaturrandbedingung	98
Tabelle 3-11:	Mächtigkeit der Auflockerungszone im Bereich der Dichtelemente	101
Tabelle 3-12:	Verwendete mechanische Parameter	103
Tabelle 3-13:	Verwendete thermische Parameter	106
Tabelle 3-14:	Mechanische Parameter der Tonformationen Alb und Apt	109
Tabelle 3-15:	Thermische Parameter	111
Tabelle 3-16:	Berechnete Entwicklung der Radialspannung an der Schachtkontur auf Höhe der Dichtelemente im VSG Schachtverschlusskonzept	113
Tabelle 3-17:	Parameter und Zusammenhänge zur strömungstechnischen Charakterisierung des Wirtsgesteins	127
Tabelle 3-18:	Parameter und Zusammenhänge zur strömungstechnischen Charakterisierung von Bentonitdichtelementen	135
Tabelle 3-19:	Salzphasen des Zechsteins	142
Tabelle 3-20:	Zusammensetzung des Staßfurt- und Leine-Steinsalzes am Beispiel Gorleben	143
Tabelle 3-21:	Zusammensetzung des Staßfurt- und Leine-Kaliflöz am Beispiel Gorleben (Bornemann & Fischbeck, 1987)	145
Tabelle 3-22:	Lösegleichgewichte für die Steinsalzformationen der Leine- und Staßfurt-Folge sowie des Kaliflözes Staßfurt	150

---

Tabelle 4-1:	Primäre FEPs, die den Schachtverschlusses beeinträchtigen können	168
Tabelle 4-2:	Weniger wahrscheinliche FEPs, die den Schachtverschlusses beeinträchtigen können	168
Tabelle 4-3:	Zusammenstellung von Anforderungen an Schachtverschlüsse	175