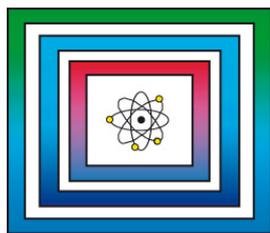


F+E Endlagerung

9Y3207000000

Endlagerstandortmodell
Nord (AnSichT) - Teil II
Zusammenstellung von
Gesteinseigenschaften für den
Langzeitsicherheitsnachweis



Zwischenbericht

Hannover, Januar 2013

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

F+E Endlagerung

Methodenentwicklung und Anwendung eines
Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen
HAW-Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT)

Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil II: Zusammenstellung
von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis

Zwischenbericht

Autoren: Jahn, Steffen, Dr.,
Sönnke, Jürgen

Auftraggeber: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Projekträger Karlsruhe, Wassertechnologie
und Entsorgung (PTKA.-WTE) für das
Bundesministerium für Wirtschaft und
Technologie

Auftragsnummer: Förderkennzeichen: 02E11061C

Geschäftszeichen: B3.4/B50112-43/2012-0009/001

Datum: 02.01.2013

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

Direktor und Professor Dr. V. Bräuer (Abteilungsleiter B3), Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	4
1 Zielsetzung.....	5
2 Einführung und Begriffsdefinitionen.....	6
3 Petrophysikalische Gesteinseigenschaften zur Charakterisierung toniger Wirtsgesteine.....	9
4 Dichte und Wichte.....	11
4.1 Dichte.....	11
4.2 Wichte.....	13
5 Thermische Parameter.....	13
5.1 Wärmekapazität.....	13
5.2 Wärmeleitfähigkeit.....	15
5.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient.....	17
5.4 Diffusionskoeffizient und scheinbarer Diffusionskoeffizient.....	19
5.5 Sorptions-Verteilungskoeffizient.....	20
6 Dynamische Elastizitätsparameter und seismische Geschwindigkeiten.....	22
6.1 Seismische Geschwindigkeiten.....	22
6.2 Dynamische Elastizitätsparameter.....	24
7 Geomechanische Parameter.....	25
7.1 Statische elastische Parameter und weitere Elastizitätskennwerte.....	25
7.2 Festigkeitseigenschaften.....	30
8 Quelleigenschaften.....	35
8.1 Quelldruck.....	35
8.2 Quellhebung.....	37
8.3 Quellversuche nach Huder/Amberg.....	39
9 Hydraulische Parameter.....	39
9.1 Permeabilität (Durchlässigkeit).....	40
9.2 Porositäten.....	43
9.3 Biot-Koeffizient.....	46
9.4 Biot-Modul.....	46
10 Mineralogische und sedimentpetrographische Parameter.....	46
10.1 Mineralogische Zusammensetzung.....	46
10.2 Korngrößenverteilungen.....	53
10.3 Kationenaustauschkapazität.....	60

Seite

11	Zusammenfassung.....	62
	Literaturverzeichnis.....	63
	Tabellenverzeichnis.....	69
	Abbildungsverzeichnis.....	72

Gesamtblattzahl: 72

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Jahn, Steffen, Dr.; Sönnke, Jürgen
Titel:	Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis
Stichwörter:	Endlagerung, Gesteinseigenschaften, Kennwerte, Modellrechnungen, Norddeutschland, Petrophysik, Tongestein

Das Vorhaben AnSichT hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Tongestein zu erarbeiten und dessen Anwendbarkeit für generische Endlagerstandorte in Nord- und Süddeutschland zu testen. Im Auftrag des BMWi werden die Arbeiten gemeinsam von der DBE TEC (Peine), der GRS (Braunschweig) und der BGR (Hannover) durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes stellt die BGR auf der Basis vorangegangener Vorhaben (vor allem aus dem Projekt Konrad) die Gesteinseigenschaften zusammen, die für den Langzeitsicherheitsnachweis erforderlich sind. Einbezogen werden außerdem Daten für Tongesteine aus der Sondierbohrung Benken und dem Felslabor Mont Terri (Opalinuston) bzw. dem Untertagelabor Meuse/Haute-Marne am Standort Bure (Tongesteine aus dem Callovium-Oxfordium).

1 Zielsetzung

Zur Erstellung eines geologischen Endlagerstandortmodells NORD wurde von REINHOLD & SÖNNKE (2012) ein Referenzprofil NORD für das östliche Niedersächsische Becken mit den stratigraphischen Einheiten Hauterivium und Barremium¹ als Wirtsgestein vorgeschlagen. Der Vorschlag des Referenzprofils berücksichtigt die wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und die Mindestanforderungen des AkEnd (2002), zudem werden die Ergebnisse der „Regionalen Tonstudie“ der BGR einbezogen (HOTH et al. 2007).

Basierend auf dem Referenzprofil NORD wird ein geologisch konsistentes Endlagerstandortmodell NORD erstellt. Ziel ist es, die lithostratigraphischen Einheiten am Endlagerstandortmodell NORD, deren Lagerungsverhältnisse, Mächtigkeiten sowie petrophysikalische und hydrogeologische Merkmale nachvollziehbar zu beschreiben. Da in Norddeutschland keine Ergebnisse spezifischer Untersuchungen für einen HAW-Endlagerstandort im Tongestein vorliegen, sind die erfolgten Festlegungen zur Geologie des Fernfeldes eines generischen Standortes und die Darstellung der geologischen Gesamtsituation am Endlagerstandortmodell NORD nur als Beispiel anzusehen. Die Beschreibung der geologischen Verhältnisse im Endlagerstandortmodell NORD ist dabei die Voraussetzung zur Erarbeitung von FEP (features, events, processes), die wiederum Grundlage für die Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen sind. Das Endlagerstandortmodell NORD und die Beschreibung der petrophysikalischen Parameter stellen einen zentralen Bestandteil des Projektes AnSichT dar.

Die Beschreibung des Endlagerstandortmodells Nord der BGR gliedert sich in drei Teile. Der hier vorgelegte Teil II ergänzt den ersten Teil (Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells NORD, REINHOLD et al. 2013) durch die Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Bereich des Referenzprofils Nord (REINHOLD & SÖNNKE (2012)). Teil II stellt wiederum die Datenquelle für den dritten Teil (Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen für den Langzeitsicherheitsnachweis am Endlagerstandortmodell NORD, NOWAK & MASSMANN 2013) dar.

¹ Im Gegensatz zur Dreiteilung des Barremium in Unter-, Mittel- und Ober-Barremium in den älteren der im Folgenden zitierten Arbeiten (wie RÖSCH 1985, BEYER 1988, MATTIAT & KREIMEYER 1991 und der Kompilierung von GERARDI 2005) wird diese Stufe nach heutiger Gliederung nur noch in Unter- und Ober-Barremium unterteilt. Das Ober-Barremium der heutigen Gliederung (vgl. HEUNISCH et al. 2007) umfasst dabei das Mittel- und Ober-Barremium der alten Unterteilung. Wenn hier noch der Terminus „Mittel-Barremium“ aus älteren Arbeiten zitiert wird, ist darunter das untere Ober-Barremium zu verstehen.

2 Einführung und Begriffsdefinitionen

Unter Tongesteinen werden nach HEIM (1990) sowohl plastisch verformbare Tone als auch harte Tonsteine, deren Bestandteile überwiegend im Korngrößenbereich $< 2 \mu\text{m}$ liegen (Pelite), zusammengefasst. *Ton* ist danach ein unverfestigtes Tongestein, welches in Wasser zur Dispersion gebracht werden kann, während dies bei einem (diagenetisch) verfestigten Tonstein (Analogie zu Sand = Lockersediment und Sandstein = Festgestein) nicht möglich ist. Tonschiefer entstehen aus Peliten bei Diagenese bis niedriggradiger Metamorphose (Anchimetamorphose). Eine genauere Gliederung der Tonschiefer ist z. B. durch den Grad der Illit-Kristallinität möglich. „Tongesteine“ ist als Überbegriff zu den drei Termini Ton, Tonstein und Tonschiefer zu verstehen. Als Mergel wird ein aus Tonen und feinkörnigen Karbonaten zusammengesetztes Sedimentgestein bezeichnet, wobei der Tongehalt zwischen 35% und 65% liegt. Nach dem Verhältnis Karbonat/Ton werden weitere Gesteine wie Tonmergel, Mergelton oder mergeliger Ton unterschieden. Bei Mergelsteinen handelt es sich (wieder in Analogie zu Sand – Sandstein bzw. Ton – Tonstein) um (diagenetisch) verfestigte Mergel.

Ungestörte Tongesteine besitzen sehr geringe Permeabilitäten, meist eine typische Plastizität und sind durch chemische Pufferwirkung und Rückhaltekapazitäten für Schadstoffe und Radionuklide charakterisiert. Infolge dieser Eigenschaften sind sie sowohl als Barriere- als auch als Wirtsgesteine bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle interessant. Ungeachtet ihrer weiten Verbreitung sind Tongesteine in Deutschland hinsichtlich ihrer Barriereigenschaften aber deutlich weniger untersucht als Salzgesteine. Bereits HOHN et al. (2007) weisen u. a. auf Defizite der Verfügbarkeit petrophysikalischer Daten für sonst geologisch und geochemisch gut charakterisierte Tongesteine hin und betonen die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen z.B. zu den Zusammenhängen zwischen chemischen und mechanischen Eigenschaften dieser Gesteine.

Im Rahmen von Standorterkundungsprogrammen werden derzeit in mehreren Ländern verfestigte Tongesteine untersucht. Dazu zählen der Opalinuston im Felslabor Mont Terri (BOSSART & THURY 2008) sowie aus der Sondierungsbohrung Benken (NAGRA 2001, NAGRA 2002), beide in der Schweiz, und Gesteine des Callovium-Oxfordium (COX), bei Bure (Meuse/Haute-Marne) in Frankreich (ANDRA 2005).

Tongesteine sind Materialien, die sich aus felsmechanischer Sicht schwer eingliedern und beschreiben lassen. Bedingt durch die geringe Porosität des Gesteins und die quellfähigen Minerale sowie die vergleichsweise stark deformierbare Gesteinsmatrix kann das Verhalten des Gesteins auf Belastung bzw. Laständerungen nicht einfach mit rein mechanischen Modellansätzen beschrieben werden. Vielmehr müssen bei der Beschreibung des Materialverhaltens gekoppelte Prozesse (z.B. hydro-mechanische Kopplung) berücksichtigt werden (NAGRA 2002: 266-270).

Lux et al. (2005) formulierten in diesem Zusammenhang: „Aus den internationalen Untersuchungen kann generalisierend ersehen werden, dass in auf numerische Analysen orientierte Modelle zur Abbildung des Materialverhaltens von Tongesteinen folgende Eigenschaften zu integrieren sind:

- elastische, plastische und viskose Deformationen (isotrop, anisotrop),
- Bruch- und Restfestigkeiten,
- Dilatanzfestigkeit und dilatante Deformationen,
- Abhängigkeit der Materialeigenschaften vom Wassergehalt,
- Abhängigkeit der Materialeigenschaften vom Porenwasserdruck,
- erhöhte Verformbarkeit und reduzierte Festigkeit auf Schicht- bzw. Schieferungsflächen.“

Petrophysikalische Werte für die Tongesteine der Unterkreide in Niedersachsen existieren kaum. Bei den in der Datenbank „BETTON“ (GERARDI 2005) zusammengetragenen Informationen zu Tongesteinen sind derartige Werte fast nur für Tonsteine und Tonmergelsteine vorhanden, die aus der Bohrung Konrad 101 oder aus den Schächten 1 und 2 des Endlagerbergwerks Konrad stammen (z. B. SCHNIER 1986a, SCHNIER 1986b, SCHNIER 1987). Darüber hinaus wurden in mehreren endlagerrelevanten Projekten wie GENESIS (JOBMANN et al. 2007) oder von WITTKE (1991 a, b) sowie LUX et al. (2005) gezielt Tongesteine aus diesen Lokalitäten beprobt und untersucht.

Die unterkretazischen Schichten im Bereich der Schachtanlage Konrad bauen sich aus Tonsteinen, Tonmergelsteinen und in untergeordnetem Maße auch aus Kalkmergelsteinen auf. Gemessen an der Gebirgsdruckfestigkeit sind Tonsteine dem Bereich geringer, Tonmergelsteine sowie Kalkmergelsteine hingegen dem Bereich mittlerer Festigkeiten zuzuordnen. Diese Gesteine sind nicht oder in nur geringem Maße kriechfähig (duktile). Jedoch hat SCHULZE (2009) darauf hingewiesen, dass das Gefüge eines Tonsteins einen deutlichen Einfluss auf sein Langzeit-Deformationsverhalten ausübt. Mit höherer Steifigkeit und Bruchfestigkeit ist im Falle einer Belastung parallel zur Schichtung (P-Orientierung, vgl. Abb. 1 ein geringeres Deformationsverhalten verbunden. Umgekehrt ist im Falle einer Belastung senkrecht zur Schichtung (S-Orientierung) mit einer geringeren Steifigkeit und Bruchfestigkeit ein systematisch duktileres Deformationsverhalten verknüpft (SCHULZE 2009).

Insgesamt ist der Einfluss eines Trennflächengefüges (latente Diskontinuitäten, Störungen und Klüfte), eines inhomogenen Gebirgsbaus und des anisotropen Korngefüges (Schichtung) auf die Tragfähigkeit bzw. auf die Gebirgsdruckfestigkeit zu beachten (LUX et al. 2005: 22, 25). Es wurde gezeigt, dass in der Schachtanlage Konrad auch in größeren

Teufen ein Trennflächengefüge vorhanden ist, das jedoch in den unterschiedlichen Tongesteinen (in Abhängigkeit vom Kalkgehalt) unterschiedlich stark ausgebildet ist. Während Tonsteine in perivertikale, relativ engständige Klufkörper zerlegt sind, werden in Tonmergel- und Mergelsteinen perivertikale, engständige Schieferungen im Zentimeterbereich bis hin zu eher singulären, aber regelmäßig angelegten Trennflächen im Abstand einiger Dezimeter beobachtet. Kalkmergelsteine zeigen hingegen kaum erkennbare Trennflächen (LUX et al. 2005: 168). Die für einen Endlagerstandort in Frage kommenden Tongesteinsformationen mit der geforderten geringen Permeabilität schließen ein hydraulisch wirksames Trennflächengefüge allerdings aus; solche Tongesteine dürften tendenziell auch keine mechanisch signifikant wirksamen Trennflächengefüge besitzen (LUX et al. 2005: 85).

Infolge der ausgeprägten Schichtung der Tongesteine sowie ihres hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung heterogenen Aufbaus zeigen einige der gesteinsphysikalischen Parameter eine deutliche Anisotropie, d.h. ein mehr oder weniger starkes richtungsabhängiges Differieren ihres Wertes. Dieser Tatsache wurde bei einer Reihe von Untersuchungen Rechnung getragen (vgl. z. B. WITTKÉ 1991 a, b). Bei In-situ-Messungen in Bohrlöchern wurden die Bohrlöcher mit 0° , 90° und 45° zur Schichtung gestoßen. Ferner sind die für Untersuchungen im Labor vorgesehenen Probenkörper gleichfalls parallel, senkrecht oder diagonal zur Schichtung gewonnen worden oder wurden entsprechend aus den Kernstücken orientiert gewonnen. Gelegentlich werden solche Proben als P-, S- bzw. Z-Proben bezeichnet, entsprechend ihrer Präparation parallel, senkrecht bzw. mit einem Winkel von 45° zu den Schichtflächen (vgl. Abb. 1).

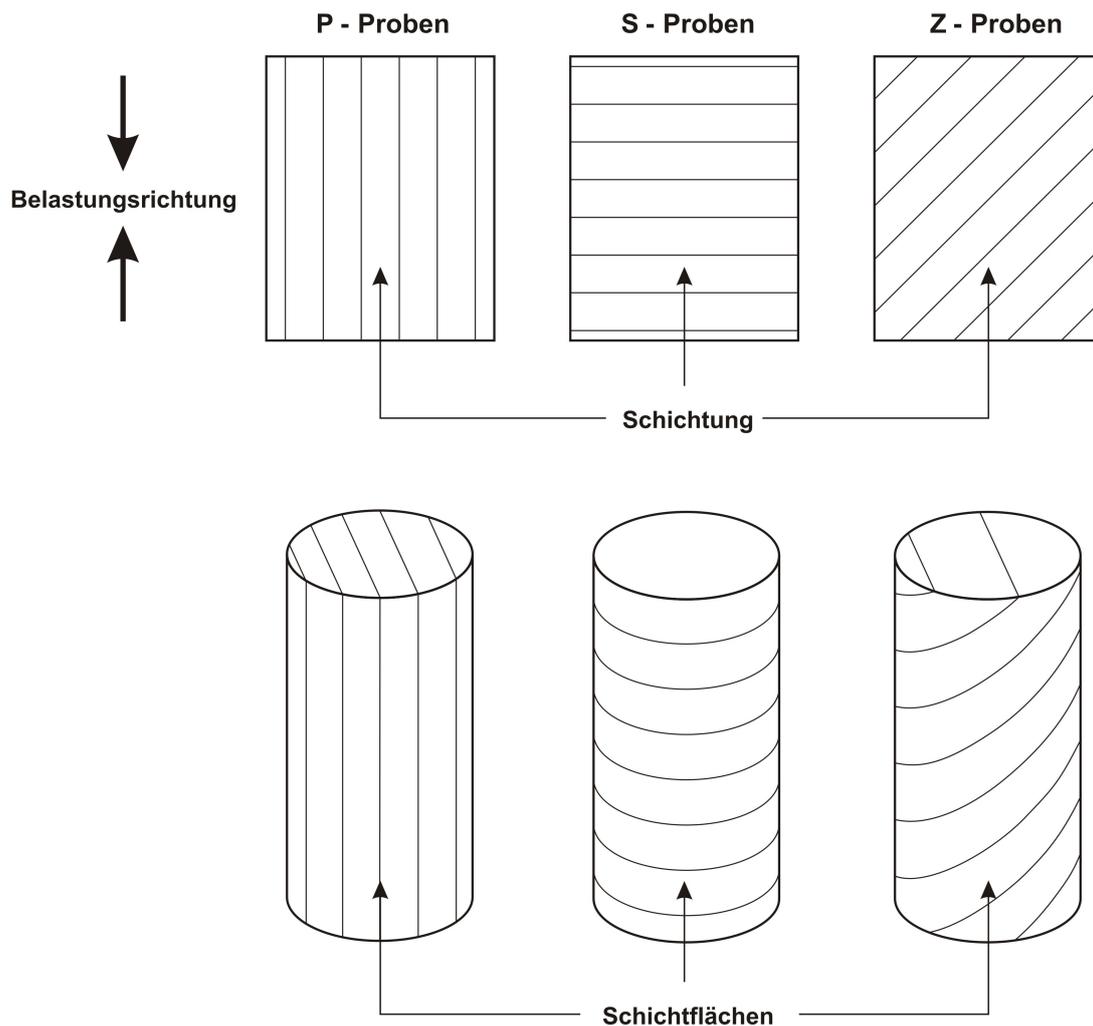


Abb. 1: Für die Untersuchung im Labor parallel (0°), senkrecht (90°) und im Winkel von 45° zur Schichtung (P-, S- und Z-Proben) orientierte Proben (nach: NAGRA 2001).

3 Petrophysikalische Gesteinseigenschaften zur Charakterisierung toniger Wirtsgesteine

Petrophysikalische Eigenschaften der Gesteine ermöglichen deren Klassifizierung und werden für Modellberechnungen als Eingabeparameter benötigt. Für felsmechanische, geophysikalische und hydrogeologische Untersuchungen wichtige Eigenschaften sind:

- Gesteinsdichte,
- thermische Parameter (Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und der die Wärmeausdehnung charakterisierende thermische Ausdehnungskoeffizient),
- dynamische Elastizitätsparameter und seismische Geschwindigkeiten,

- elastische Parameter (E-Modul, Poisson-Zahl, Schubmodul),
- Festigkeitsparameter (Reibungswinkel, Kohäsion, Dilatanzwinkel, Zugfestigkeit, Restreibungswinkel, Restkohäsion),
- Quelleigenschaften (Quellhebung, Quelldruck) und
- hydraulische Parameter (Biot-Koeffizient, Biot-Modul, Porosität, Permeabilität).

Die ersten drei der genannten Eigenschaften sind ausschlaggebend für seismische Modellierungen und liefern wichtige felsmechanische Informationen. So spiegelt die Gesamtdichte des wassergesättigten Gesteins bei relativ konstanter Korndichte die Porosität und damit den Wassergehalt wider. Die seismischen Geschwindigkeiten liefern zusammen mit anderen Parametern (z.B. natürliche Gamma-Strahlung, elektrische Leitfähigkeit) Hinweise auf die mineralogische Zusammensetzung der Tongesteine und erlauben eine Unterscheidung mechanisch ungestörter von gestörten Bereichen.

Die Parameter Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität gehen in die Berechnung der zeitlichen Entwicklung der Temperatur im Endlager und seinem Fernfeld nach der Einbringung von Wärme entwickelnden Abfällen ein. Da Temperaturänderungen in hydraulisch gering durchlässigen Gesteinen zu einer Porendruckerhöhung, Spannungsänderungen, zu einer Festigkeitserniedrigung und einer Änderung der Kriechraten und/oder zu mineralogischen Veränderungen führen können, sind diese Parameter für die Beurteilung der Entwicklung eines Endlagers von besonderer Bedeutung.

Untersuchungen zur bautechnischen Machbarkeit von Endlagern in tonigen Gesteinen erfordern Daten zum Quellvermögen, da quellendes Gestein problematisch für die Stabilität eines Hohlraums wie beispielsweise einer Strecke sein kann. Oft ist aber nicht das Quellen der Tongesteine der primäre Grund für derartige Probleme. Dieser liegt vielmehr in der Einlagerung von Wasser in das aufgelockerte Gebirge um den Hohlraum, welche zu einer Festigkeitsreduzierung und damit zu Deformationen führt. Wichtig ist der Quellprozess auch bei der Schließung und Abdichtung von natürlichen und induzierten Rissen (Selbstabdichtung). Durch das Quellen des Gesteins werden einerseits Risse geschlossen, andererseits können die entlasteten Grenzflächen des Risses (bei teilweisem Kollabieren des Risses) desintegrieren und zu einer Erniedrigung der Riss-Porosität und -Permeabilität beitragen, während sich die Porosität des umgebenden Gesteins erhöht (NAGRA 2002).

Die Messung der petrophysikalischen Eigenschaften erfolgt prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten. Sie werden entweder mit Hilfe von Bohrlochsonden in situ in Bohrungen gewonnen oder an Kernproben im Labor gemessen. Die In-situ-Messungen haben den Vorteil, dass sich die Parameter unter nahezu ungestörten Bedingungen (Druck, Temperatur) kontinuierlich über die gesamte Bohrstrecke ermitteln lassen. Allerdings

müssen meist indirekte Methoden und oft empirische Relationen genutzt werden, um die Parameter zu bestimmen (z. B. HOTH et al. 2007: 21-33). Laboruntersuchungen, die jeweils nur Stichproben darstellen können, sind methodisch meist besser, aber damit auch viel aufwändiger. Es besteht außerdem die Gefahr, dass die Ergebnisse durch irreversible Deformationen bei der Probenentnahme und/oder durch Veränderung der Gesteine bei der Lagerung (Oxidation, Wasserverlust, Austrocknung, schichtungspareller Zerfall etc.) verfälscht sind.²

4 Dichte und Wichte

4.1 Dichte

Die Dichte ρ eines Körpers wird als Quotient aus seiner Masse m und seinem Volumen V gebildet und in der Einheit $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ angegeben. Als Stoffkonstante ist sie eine für das Material des Körpers charakteristische und von seiner Form und Größe unabhängige Eigenschaft. Sie darf nicht mit der Wichte γ (siehe Kap. 4.2) verwechselt werden.

Die Dichte ρ eines Gesteins (entspricht der Gesteinsdichte) ist identisch mit dessen Feuchtdichte, die über die Masse des bergfeuchten Gesteins und dessen Volumen ermittelt wird. Die Trockendichte ρ_d ergibt sich aus der nach Trocknung bei 105 °C ermittelten Trockenmasse m_d und dem unveränderten Volumen. Die Korndichte ρ_s (oder Kornrohndichte) bezeichnet die Rohdichte der festen Einzelbestandteile des Bodens und ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Trockenmasse der festen Einzelbestandteile des Bodens und dem Volumen der Einzelbestandteile einschließlich ihrer von der Messflüssigkeit nicht benetzten Hohlräume. Sie wird mit Pyknometern nach einer standardisierten Vorschrift ermittelt.

Für die Dichte der Tongesteine der Unterkreide im Bereich der Schachanlage Konrad liegt eine Vielzahl von Messwerten vor (vgl. Tab 1). Nach den von GERARDI (2005) kompilierten Analysen nehmen die Werte für die Gesteinsdichte vom Ober-Albium bis zum Unter-Hauterivium zu. Die von WITTKÉ (1991 a) ermittelten Gesteinsdichten (Feuchtdichten) für 60 Gesteinsproben aus Untertagebohrungen im Mittel- und Ober-Albium (ausgehend von der im Mittel-Albium aufgefahrene 343-m-Strecke im Schacht 2) variieren zwischen 2150 kg/m^3 und 2440 kg/m^3 (Mittelwert 2350 kg/m^3), wobei mehr als 50 % der Proben Werte von 2400 kg/m^3 aufweisen. Sie weichen also relativ deutlich von den in GERARDI (2005) kompilierten Dichten ab. Ferner hat WITTKÉ (1991 b) Feuchtdichten an 31 Gesteinsproben

² Solche Alterationen haben z.B. an den von BUNTEBARTH (2005) und WITTKÉ (1991 a, b) verwendeten Bohrkern-Proben stattgefunden und müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

aus Untertagebohrungen im Barremium/Hauterivium (ausgehend von der im Mittel-Barremium aufgefahrenen 541-m-Sohle im Schacht 2) bestimmt. Diese variieren bei einem Mittelwert von 2420 kg/m³ zwischen 2300 kg/m³ und 2550 kg/m³.

Von UHLIG et al. (2006, zitiert in JOBMANN et al. 2007) wird für sämtliche Stufen und Unterstufen der Unterkreide ausnahmslos eine Dichte von 2520 kg/m³ angegeben, die im

Tab. 1: Gesteinsdichte (Feuchtdichte) und Korndichte der einzelnen stratigraphischen Einheiten im Bereich der Schachtanlage Konrad (aus: GERARDI 2005 ⁽¹⁾, UHLIG et al. 2006 in JOBMANN et al. 2007 ⁽²⁾, WITTKKE 1991 a, b, RÖSCH 1985, BUNTEBARTH 2005, DBE 1998 ⁽³⁾)

Stratigraphie	Gesteinsdichte ρ [kg/m ³]	Gesteinsdichte ρ [kg/m ³] (WITTKKE 1991 a, b)		Korndichte ρ_s [kg/m ³] (RÖSCH 1985)		Korndichte ρ_s [kg/m ³] (WITTKKE 1991 a, b)
		Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	
Ober-Albium	2160 ¹⁾	-	-	2580 - 2610	2603	2580
Mittel-Albium	2180 ¹⁾	2150 – 2440	2350	2630 - 2660	2645	2670 – 2690
Unter-Albium	2150 ¹⁾	-	-	2610	2610	-
Ober-Aptium	2310 ¹⁾	-	-	2540	2540	-
Ober-Barremium	2290 ¹⁾	-	-	2590 - 2610	2600	-
Mittel- Barremium	2210 ¹⁾	2300 – 2550	2420	2670 - 2710	2690	2650 – 2750
Unter- Barremium	2250 ¹⁾	-	-	-	-	-
Ober-Hauterivium	2310 ¹⁾	-	-	2680 - 2730	2705	-
Unter-Hauterivium	2450 ¹⁾	-	-	2690 - 2710	2700	-
Ob. Korallenoolith	-	-	-	2670 - 2720	2695	-
Mittl. Korallenoolith	-	-	-	2760	2760	-
Unt. Korallenoolith	-	-	-	2730	2730	-
Mittel-Callovium	2390 ¹⁾	-	-	2740 - 2750	2745	-
Unter-Callovium	2340 ¹⁾	-	-	2690	2690	-
Ober-Bathonium	2350 ¹⁾	-	-	-	-	-
Ober-Bajocium	2420 ¹⁾	-	-	2680 - 2740	2710	-
Mittel-Bajocium	-	-	-	2790	2790	-
Albium (gesamt)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Aptium (gesamt)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Fischschiefer (Unter-Aptium)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Barremium (gesamt)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Hauptblätterson (Unter-Barremium)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Hauterivium (gesamt)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Wealden (gesamt)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Ober-Jura (gesamt)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Mittel-Jura (gesamt)	2520 ²⁾	-	-	-	-	-
Ober-Jura (gesamt)	2400 ³⁾	-	-	-	-	-
Mittel-Jura (gesamt)	2400 ³⁾	-	-	-	-	-

Vergleich zu den anderen hier zusammengestellten Werten für die Dichte zu hoch liegt. Auch die in RÖSCH (1985) angeführten Dichten erscheinen im Vergleich zu den in GERARDI (2005) kompilierten und in WITTKÉ (1991 a, b) angegebenen Dichten zu hoch. Da sie aber mittels der Pyknometermethode bestimmt wurden, dürfte es sich bei ihnen um Korndichten handeln. In diesem Fall zeigen sie eine gute Übereinstimmung mit den von WITTKÉ (1991 a, b) ermittelten Korndichten.

4.2 Wichte

Von der Dichte abzugrenzen ist die Wichte γ , die im Unterschied zur Dichte als Quotient aus Gewichtskraft F_G und Volumen V (Einheit N/m^3 , früher kp/m^3) gebildet wird. Dichte und Wichte unterscheiden sich also durch den Wert der Fallbeschleunigung g , welche auf die Größe der Wichte Einfluss nimmt. Dadurch ist die Wichte im Gegensatz zur Dichte ortsabhängig, da sich die Fallbeschleunigung mit der geographischen Breite ändert. Die Wichte lässt sich mittels der Gleichung $\gamma = \rho \cdot g$ in die Dichte umrechnen, wobei an Stelle der Standard-Fallbeschleunigung $g = 9,80665 \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ oft der gerundete Wert $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ verwendet wird.

In SCHNIER (1986a, 1986b, 1987) sind Wichten für Tongesteine aus der Bohrung Konrad 101 sowie aus den Schachtwiderlagerbohrungen in den Schächten Konrad 1 und 2 zusammengestellt. Dort wird generalisierend ausgeführt, dass die Wichten mit zunehmender Teufe vom Ober-Albium mit ca. 22 kN/m^3 bis zum Oxfordium/Dogger mit ca. 25 kN/m^3 ansteigen. Abweichend davon zeigen „kalkige“ Gesteine mit hohem CaO-Gehalt höhere Wichten (24 kN/m^3 bis 26 kN/m^3) und keine Teufenabhängigkeit.

5 Thermische Parameter

5.1 Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität C_p [$Jkg^{-1}K^{-1}$] ist diejenige Wärmemenge ΔQ , die notwendig ist, um 1 kg Masse eines Körpers um 1 K zu erwärmen: $C_p = \Delta Q / (m \Delta T)$. Weil sich die Körper bei Erwärmung ausdehnen, wird zwischen der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen C_v sowie bei konstantem Druck C_p unterschieden. Aufgrund der nur sehr geringen Differenzen wird bei Festkörpern $C_p = C_v$ angenommen. BUNTEBARTH (2005) hat die spezifische Wärmekapazität an fünf bergfeuchten Tongesteinsproben aus dem Mittel-Albium und Mittel-Barremium unter Zuhilfenahme eines Wärmestrom-Differenz-Kalorimeters ermittelt, das mit der Differenz-Thermoanalyse-Apparatur der Fa. NETZSCH (Typ 404) arbeitete.

Tab. 2: Spezifische Wärmekapazitäten C_p [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] von Tongesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101 in Abhängigkeit von der Temperatur (aus: BUNTEBARTH 2005)

T [°C]	Tonstein (bergfeucht, 2 Proben) Mittel-Albium		mergeliger Tonstein (bergfeucht, 3 Proben) Mittel-Barremium		mergeliger Tonstein (getrocknet, 1 Probe) Mittel-Barremium	Mittelwert aller bergfeuchten Proben (n = 5)
	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	Bereich	
30	1000 – 1230	1115	870 – 1040	970	790	1030
200	830 – 970	900	860 – 920	890	910	900
MW	-	1010	-	930	850	960

Die spezifischen Wärmekapazitäten der Proben differieren deutlich und liegen bei 30 °C im Bereich von $870 \leq C_p \leq 1230 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ (vgl. Tab 2), der Mittelwert der fünf bergfeuchten Tongesteinsproben beträgt bei C_p (30 °C) $1030 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die starke Streuung der Werte ist darauf zurückzuführen, dass bei geringer Erwärmung adhäsiv gebundenes Wasser allmählich abgegeben wird und die verbrauchte Energie sich als scheinbare Wärmekapazität bemerkbar macht. Sobald auch Konstitutionswasser (Hydroxylgruppen) und Zwischenschichtwasser freigesetzt werden, nimmt der Energiebedarf weiter zu, wodurch die ermittelte Wärmekapazität zu hohen scheinbaren Wärmekapazitäten ansteigt. Alle fünf bergfeuchten Proben zeigen das Maximum der scheinbaren Wärmekapazität bei ca. 70 °C bis 80 °C, wo der Hauptanteil des Wassers freigesetzt wird. Nach der Zunahme der scheinbaren spezifischen Wärmekapazität von $C_p = 1030 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei 30 °C auf ca. $2000 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei 70 °C nimmt der Wert bis 200 °C wieder auf $900 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ab und liegt damit unter dem Ausgangswert bei 30 °C (Werte über alle fünf Proben gemittelt). Zum Vergleich: die spezifische Wärmekapazität des wassergesättigten Opalinustons (Bohrung Benken) beträgt im Mittel $920 \pm 80 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ (NAGRA 2002).

UHLIG et al. 2006 (in JOBMANN et al. 2007) haben die spezifische Wärmekapazität von Tongesteinen aus dem Aptium und Barremium ermittelt und nach diesen Daten für die spezifischen Wärmekapazitäten der weiteren Tongesteinsproben Modellannahmen mit Werten von jeweils $1400 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ getroffen (vgl. Tab. 3).

Tab. 3: Spezifische Wärmekapazitäten C_p von Tongesteinen aus der Bohrung Konrad 101 (UHLIG et al. 2006 zit. in JOBMANN et al. 2007)

Stratigraphie	Spezifische Wärmekapazität C_p [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Albium	1405
Mittel-/Unter-Aptium (Hedbergellenmergel)	1400*
Unter-Aptium (Fischschiefer)	1400*
Barremium	1429
Unter-Barremium (Hauptblättertton)	1400*
Hauterivium	1400*
Wealden	1400*
Ober-Jura	1400*
Mittel-Jura	1400*
* Modellannahmen nach ermittelten Messwerten für Albium und Barremium	

5.2 Wärmeleitfähigkeit

BUNTEBARTH (2005) bestimmte die Wärmeleitfähigkeit λ richtungsabhängig (parallel oder senkrecht zur Schichtung) bei natürlichem Wassergehalt (λ_{feucht}) unter einaxialem Druck von $p = 2 \text{ MPa}$ und bei Temperaturen von $40 \leq T \leq 150 \text{ °C}$. Zusätzlich wurde ein Versuch an einer bei über 170 °C getrockneten Probe durchgeführt (λ_{trocken}). Da nur eine Probe eine deutliche Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur (und auch nur bei $T > 90 \text{ °C}$) zeigt, werden hier lediglich die bei 35 °C bis 40 °C ermittelten Wärmeleitfähigkeiten zusammengestellt (vgl. Tab. 4). Die bei fast allen Proben zwischen 60 °C und 100 °C fixierten Abweichungen können auf den Einfluss der allmählichen Wasserfreisetzung zurückgeführt werden.

Tab. 4: Bei ca. 40 °C ermittelte Wärmeleitfähigkeiten von Tongesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101 und Vergleichsdaten

Wärmeleitfähigkeit λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Wassergehalt [%]	Stratigraphie und Anzahl Daten (in Klammern)	Messung zur Schichtung		Anisotropiefaktor	Quelle
				⊥		
λ_{trocken}	-	Albium	1,95	1,38	1,41	UHLIG et al. (2006)
λ_{feucht}	4,4 – 4,6	Mittel-Albium (2)	-	1,05	-	BUNTEBARTH (2005)
λ_{feucht}	4,4	Mittel-Albium (1)	1,65	1,07	∅ 1,45	BUNTEBARTH (2005)
λ_{trocken}	-	Mittel-/Unter-Aptium (Hedbergellenmergel)	2,41	1,65	1,46	UHLIG et al. (2006)
λ_{trocken}	-	Unter-Aptium (Fischschiefer)	2,41	1,65	1,41	UHLIG et al. (2006)
λ_{trocken}	-	Barremium	2,27	1,49	1,52	UHLIG et al. (2006)

Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Wassergehalt [%]	Stratigraphie und Anzahl Daten (in Klammern)	Messung zur Schichtung		Anisotropiefaktor	Quelle
				⊥		
λ_{feucht}	2,1 – 2,5	Mittel-Barremium (2)	1,88	-	-	BUNTEBARTH (2005)
λ_{trocken}	-	Mittel-Barremium (1)	1,90	-	-	BUNTEBARTH (2005)
λ_{trocken}	-	Unter-Barremium (Hauptblätterson)	2,27	1,49	1,52	UHLIG et al. (2006)
λ_{trocken}	-	Hauterivium	2,12	1,46	1,45	UHLIG et al. (2006)
λ_{trocken}	-	Wealden	2,41	1,65	1,46	UHLIG et al. (2006)
λ_{trocken}	-	Ober-Jura	2,50	2,00	1,25	UHLIG et al. (2006)
λ_{trocken}	-	Mittel-Jura	2,50	2,00	1,25	UHLIG et al. (2006)

An einer Probe aus dem Mittel-Albium ermittelte BUNTEBARTH (2005) die Wärmeleitfähigkeiten auch senkrecht (\perp) und parallel (\parallel) zur Schichtung bei unterschiedlichen Temperaturen (vgl. Tab. 5), woraus sich ein mittlerer Anisotropiefaktor $\lambda_{\parallel}/\lambda_{\perp}$ von 1,45 ergibt. Eine Probe aus dem Mittel-Barremium wurde nach der Messung im feuchten Zustand auch nach Trocknung bei $T > 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. Die Unterschiede zwischen beiden Probenarten sind bei den fünf Temperaturen jedoch nicht signifikant; die Wärmeleitfähigkeit dieser Probe kann bis $T = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ als konstant angesehen werden.

Tab. 5: Anisotropieverhältnis der Wärmeleitfähigkeit eines Tonsteins aus dem Mittel-Albium bei unterschiedlichen Temperaturen und $p = 2 \text{ MPa}$ (aus: BUNTEBARTH 2005)

T [$^{\circ}\text{C}$]	39	67	96	126	155	Mittelwert
$\lambda_{\parallel}/\lambda_{\perp}$	1,54	1,43	1,39	1,47	1,44	1,45

Bei den von UHLIG et al. (2006) bestimmten Wärmeleitfähigkeiten von Tongesteinen der Unterkreide parallel und senkrecht zu deren Schichtung ergeben sich mit Werten von 1,41 bis 1,52 vergleichbare Anisotropiefaktoren (vgl. Tab. 5) wie bei BUNTEBARTH (2005).

Untersuchungen der NAGRA (2002: 268 ff.) ergaben für den Opalinuston deutliche Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeiten vom Wassergehalt und der mineralogischen Zusammensetzung. Quarzreicher Opalinuston (Quarzgehalt 20 % bis 25 %) weist parallel zur Schichtung eine Wärmeleitfähigkeit von durchschnittlich $3,22 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, senkrecht dazu von $1,70 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Bei quarzärmerem Opalinuston (Quarzgehalt 10 % bis 15 %) beträgt die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Schichtung durchschnittlich $2,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, senkrecht dazu $1,26 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Der trockene quarzreiche Opalinuston zeigt parallel zur Schichtung eine Wärmeleitfähigkeit von $2,77 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, senkrecht dazu von $1,57 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die Richtungsanisotropie der Wärmeleitfähigkeit kann durch den Schichtaufbau der untersuchten

Tongesteine erklärt werden. Parallel zu den Schichtflächen bestimmen quarzreiche Lagen mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{Quarz}} = 7,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, ČERMÁK & RYBACH 1982) den Wärmefluss, während die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zu den Schichtflächen von tonreichen Lagen mit wesentlich geringerer Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{Tonstein}} = 1,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bis $3,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, ČERMÁK & RYBACH 1982) kontrolliert wird. Die ca. 30 % bis 40 % niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten der Proben von der Basis des Opalinustons korrelieren mit der Abnahme des Quarzgehalts (NAGRA 2002: 268f).

5.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

BUNTEBARTH (2005) ermittelte die linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α von Tongesteinen (Mittel-Albium und Mittel-Barremium) an Prüfkörpern aus Bohrkernen, welche aus der Schachanlage Konrad stammen (Tab.6). Je ein Prüfling senkrecht und parallel zur Schichtung (S-Fläche) wurde vor der Untersuchung auf über 300 °C erhitzt, im Exsikkator mit Silikagel-Trockenperlen über Nacht aufbewahrt und am nächsten Tag gemessen. Die lineare Wärmeausdehnung wurde mit einem NETZSCH-Dilatometer (Typ 402E) gemessen. Der Messteil besteht aus einem elektrischen Heizofen, der Probenhalterung und dem elektronischen Übertragungssystem der Längenänderung in eine elektrische Größe. Bei der Messung wurde eine Probe in einem elektrischen Heizofen erhitzt, wobei die Wärmeausdehnung dynamisch bei einer Heizrate von 2 K/min von Raumtemperatur bis 300 °C erfasst wird. Die axiale Längenänderung ΔL der Probe wird dabei in eine Induktivitätsänderung umgewandelt, aus welcher sich der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient berechnen ließ.

Tab. 6: Mittlere lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten von Tongesteinen aus der Bohrung Konrad 101 (BUNTEBARTH 2005)

Probe	Lithologie	mittlerer linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient α [K ⁻¹] bei		
		T = 20 – 100 °C	T = 20 – 200 °C	T = 20 – 300 °C
Mittel-Albium \perp zur Schichtung, getrocknet	Tonstein	$5,8 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$
Mittel-Barremium \parallel zur Schichtung, getrocknet	mergeliger Tonstein	$7,1 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
Mittel-Albium \perp zur Schichtung, unbehandelt	Tonstein	$-3,3 \times 10^{-6}$	$-2,0 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$
Mittel-Albium \perp zur Schichtung, unbehandelt	Tonstein	$-6,4 \times 10^{-6}$	$-4,1 \times 10^{-6}$	$0,8 \times 10^{-6}$
Mittel-Albium \parallel zur Schichtung, unbehandelt	Tonstein	$1,5 \times 10^{-6}$	$0,8 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
Mittel-Barremium \parallel zur Schichtung, unbehandelt	mergeliger Tonstein	$6,0 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$6,7 \times 10^{-6}$

Probe	Lithologie	mittlerer linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient α [K ⁻¹] bei		
		T = 20 – 100 °C	T = 20 – 200 °C	T = 20 – 300 °C
Mittel-Barremium \perp zur Schichtung, unbehandelt	mergeliger Tonstein	$-22,9 \times 10^{-6}$	$-31,7 \times 10^{-6}$	$-23,0 \times 10^{-6}$
Mittel-Barremium \perp zur Schichtung, unbehandelt	mergeliger Tonstein	-	-	-
Mittel-Barremium \perp zur Schichtung, unbehandelt	Tonstein	-	-	-
Mittel-Barremium \parallel zur Schichtung, unbehandelt	mergeliger Tonstein	$2,4 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-6}$	$5,7 \times 10^{-6}$
Mittel-Barremium \parallel zur Schichtung, unbehandelt	mergeliger Tonstein	-	-	-

Bei den wie beschrieben getrockneten Proben beträgt der mittlere lineare thermische Ausdehnungskoeffizient α (bei 20 °C bis 100 °C) $6,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; er steigt bis 300 °C auf $8,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ an. Zum Vergleich: Wasser besitzt bei Raumtemperatur einen Ausdehnungskoeffizienten von ca. $2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, für Montmorillonit wird der mittlere lineare Ausdehnungskoeffizient bei 20 bis 100 °C mit $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ angegeben. Die unbehandelten (nicht getrockneten) Proben verhalten sich hingegen völlig anders. Alle senkrecht zur S-Fläche orientierten Proben schrumpfen bis 300 °C. Unterhalb von ca. 180 °C überwiegt die Schrumpfung, die bei weiter ansteigenden Temperaturen durch einsetzende Dehnung teilweise kompensiert wird. Im Temperaturbereich zwischen 130 und 170 °C erreicht die Schrumpfung ihr größtes Ausmaß. Demgegenüber dehnen sich parallel zur Schichtung orientierte Tongesteinsproben im gesamten Temperaturbereich aus. Der lineare Ausdehnungskoeffizient zeigt dabei eine deutliche Abhängigkeit vom freigesetzten Wasser (je weniger Wasser enthalten ist, desto höher ist der Ausdehnungskoeffizient). Diese Unterschiede sind mit der unterschiedlichen mineralogischen Zusammensetzung (Gehalte an Tonmineralen bzw. Karbonaten, Gehalte an C_{org}) der Tongesteine erklärbar.

Bei einem in verschiedenen Richtungen gegensätzlichen Verhalten (Schrumpfung gegenüber Dehnung) ist der Begriff der Anisotropie nicht anwendbar; die Anisotropie a_{\perp}/a_{\parallel} lässt sich deshalb quantitativ nur für die beiden getrockneten Proben ermitteln. Sie beträgt 18 % für den Bereich zwischen 20 °C und 100 °C. Bis 300 °C haben sich die Werte parallel und senkrecht zur Schichtung im Mittel bereits angeglichen. Obwohl die Schichtung deutlich ausgeprägt ist, verschwindet die Anisotropie nach Freisetzung des Wassers (BUNTEBARTH 2005). Allerdings weisen diese Aussagen durch die geringe Probenanzahl einen Unsicherheitsfaktor auf.

In Tab. 7 sind die thermischen Parameter für das Mittel-Aptium (Hedbergellenmergel) aufgelistet, wie sie in Jobmann et al. (2007) für die Unterkreide in Norddeutschland als Berechnungsparameter für Modellberechnungen zusammengestellt worden sind. Die

hier angegebenen Berechnungsparameter stellen abgeminderte Parameter dar, die dem Einfluss von Inhomogenitäten im Gebirge und Ungenauigkeiten hinsichtlich der Gesteinsparameter Rechnung tragen sollen.

Tab. 7: Thermische Parameter für das Mittel-Aptium (Hedbergellenmergel) im Modellgebiet nordöstlich von Hannover (JOBMANN et al. 2007) und als Berechnungsparameter (DBE)

Parameter		Wert Mittel-Aptium (JOBMANN et al. 2007)	Berechnungsparameter DBE
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	[K ⁻¹]	2,8 × 10 ⁻⁵	1,3 × 10 ⁻⁵
Wärmeleitfähigkeit horizontal λ	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	2,41	2,0
Wärmeleitfähigkeit vertikal λ _⊥	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	1,65	2,0
Spezifische Wärmekapazität C _v	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	1400	1000

5.4 Diffusionskoeffizient und scheinbarer Diffusionskoeffizient

Der Diffusionskoeffizient, auch Diffusionskonstante oder Diffusivität genannt, dient in den Fickschen Gesetzen zur Berechnung des thermisch bedingten Transports eines Stoffes aufgrund der zufälligen Bewegung der Teilchen. Dabei kann es sich um einzelne Atome in einem Feststoff oder um Teilchen in einem Gas bzw. einer Flüssigkeit handeln. Der Diffusionskoeffizient ist daher ein Maß für die Beweglichkeit der Teilchen und lässt sich aus der in einer bestimmten Zeit zurückgelegten Wegstrecke ermitteln. Zur Angabe des Diffusionskoeffizienten gehört immer die Angabe, welcher Stoff in welchem Stoff diffundiert sowie als wichtigste Einflussgröße die Temperatur. Die SI-Einheit des Diffusionskoeffizienten ist m²s⁻¹.

Diffusionskoeffizienten in Feststoffen sind i. d. R. um einige Zehnerpotenzen kleiner als Diffusionskoeffizienten in Flüssigkeiten. Für die Diffusion in Festkörpern sind Sprünge zwischen verschiedenen Gitterplätzen erforderlich. Dabei müssen die Teilchen eine Energiebarriere (E) überwinden, was bei höherer Temperatur leichter möglich ist als bei niedrigerer. Der effektive Diffusionskoeffizient beschreibt Diffusion durch den Porenraum poröser Medien. Er ist eine makroskopische Größe, da er nicht einzelne Poren, sondern den gesamten Porenraum betrachtet. Der Porenraum wird dabei durch die für den Transport verfügbare Porosität (siehe Kap. 8.2), die Tortuosität („Gewundenheit“) und die Konstriktivität beschrieben. Die für den Transport zur Verfügung stehende Porosität entspricht der Gesamtporosität abzüglich Poren, die aufgrund ihrer Größe für die diffundierenden Teilchen nicht zugänglich sind, und abzüglich Sackgassen- und blinder Poren (Poren ohne Verbindung zum restlichen Porensystem). Die Konstriktivität beschreibt die Verlangsamung der Diffusion durch eine Erhöhung der Viskosität in engen Poren als Folge der größeren

durchschnittlichen Nähe zur Porenwand. Sie ist eine Funktion von Porendurchmesser und Größe der diffundierenden Teilchen.

Der scheinbare (apparente) Diffusionskoeffizient erweitert den effektiven Diffusionskoeffizienten um den Einfluss der Sorption. Bei nichtlinearer Sorptionsisotherme ist der scheinbare Diffusionskoeffizient stets eine Funktion der Konzentration, was die Berechnung der Diffusion erheblich erschwert. Für unterkretazische Tongesteinsproben aus der Schachanlage Konrad wurden aus Laborversuchen effektive (?) Diffusionskoeffizienten mit einem Rechenwert von $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ verwendet (BfS 2002: B IX - 13).

Wenn über diesen Diffusionskoeffizienten hinaus weitere Werte für das Endlagerstandortmodell NORD benötigt werden sollten, können diese aus vergleichbaren Tongesteinsformationen im Ausland (Schweiz, Frankreich) abgeleitet werden.

5.5 Sorptions-Verteilungskoeffizient

Freigesetzte Nuklide können mit Tiefenwässern mitgeführt werden und an den Oberflächen der durchströmten porösen oder klüftigen Gesteine angelagert (Sorption) bzw. wieder freigesetzt (Desorption) werden. Zur numerischen Erfassung des Sorptionsverhaltens für die verschiedenen Radionuklide dient der meist experimentell ermittelte Verteilungskoeffizient K_D [ml/g]. Dieser K_D -Wert ist abhängig

- von der Nuklidart (chemische Verbindung, Oxidationsstufe u.a.),
- von der Konzentration der Radionuklide in der Lösung,
- vom durchflossenen Gestein (Mineralbestand, innere Oberfläche und dgl.),
- von der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers (Mineralisation, Salzkonzentration etc.),
- von künstlichen und natürlichen Komplexbildnern und
- vom Verhältnis Volumen-Sorptionsmedium [ml] / Sorbensmasse [g].

Für die Sedimentgesteine der Schachanlage Konrad hat sich eine Beeinflussung der K_D -Werte insbesondere durch die unterschiedlichen Gesteinstypen, die Salinität der Grundwässer, die vorhandenen Komplexbildner und die Radionuklidkonzentration erwiesen (BfS 2002: B II – 34-36).

Die tonigen wassergeringleitenden Schichten in der Schachanlage Konrad weisen neben geringen Durchlässigkeiten (k_f -Werten) gegenüber den meisten Radionukliden eine

hohe Sorption (K_D -Werte) auf, so dass deren Ausbreitung mit dem Tiefengrundwasser durch das Gebirge wirksam behindert wird (BfS 2002: C II. 2.1.2.1 – 7). Für elf hydrogeologische Einheiten der Schachanlage Konrad existieren Werte für die Sorptions-Verteilungskoeffizienten (K_D) von Radionukliden (BfS 2002: Tabelle (B II.4/5)). Für die Sedimentgesteine der Schachanlage Konrad erfolgte die Bestimmung der K_D -Werte im Labor mit Hilfe von Säulen-, Diffusions- und mit Batchversuchen. Für die nicht beprobten Gesteinsschichten wurden K_D -Werte aus lithologisch und hydrogeologisch ähnlichen Einheiten übertragen.

Tab. 8: K_D -Werte für hydrogeologische Einheiten der Schachanlage Konrad (aus: BfS 2002, Tab. B II.4/5). Es bedeuten: 4 – Plänerkalke bis Flammenmergel, 5 – toniges Albium, 6 – Hilssandstein, 7 – Aptium bis Basis Unterkreide (tonig), 9 – Valanginium (sandig) und Wealden, 10 – Tithonium und Kimmeridgium, 11 – Oxfordium, Callovium und Bathonium (tonig), 12 – Cornbrash-Sandstein (Bathonium/Oberes Bajocium), 13 – Bajocium (tonig), 14 – Oberes Aalenium (tonig), 15 – Dogger-beta-Sandstein (Ober-Aalenium).

Radionuklid	K_D [ml/g] für hydrogeologische Einheiten Nr. 4 – 15 der Schachanlage Konrad										
	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15
Kohlenstoff	2	10	0,9	10	0,9	6	5	10	8	10	8
Nickel	1,5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Selen	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,1	0,1	0,4	0,2	0,4	0,2
Rubidium	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strontium	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zirkonium	1000	90	20	90	20	80	80	40	20	40	20
Niobium	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Molybdänium Technetium	0	0,5	0,2	0,5	0,2	0,3	0,7	0,4	0,6	0,4	0,6
Zinn/Blei	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Cäsium	600	60	10	50	10	30	30	40	16	40	16
Polonium	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
Radium	110	3	1	3	1	4	1,8	2	1	2	1
Actinium	190	30	3	30	3	30	30	30	3	30	3
Thorium	300	90	20	90	20	80	80	40	20	40	20
Protactinium	1000	1000	200	1000	200	1000	1000	1000	200	1000	200
Uranium	1	12	1	2	1	1,8	1,8	2	1	2	1
Neptunium	30	60	3	60	3	20	50	50	10	50	10
Plutonium Americium Curium	1000	1000	200	1000	200	1000	1000	1000	700	1000	700

6 Dynamische Elastizitätsparameter und seismische Geschwindigkeiten

6.1 Seismische Geschwindigkeiten

An Kernen aus der Bohrung Konrad 101 bestimmte SCHNIER (1986a) über Ultraschallmessungen im Labor die Geschwindigkeiten der P- und S-Welle (Tab. 9) und beobachtete dabei als generellen Trend eine Zunahme der Geschwindigkeiten mit der Teufe. Kerne aus den Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht Konrad 1 (SCHNIER 1987) und Schacht Konrad 2 (SCHNIER 1986b) lieferten Geschwindigkeiten der P- und S-Welle für Proben aus dem Ober-Hauterivium (Tab. 9). Dabei wurden die Kerne aus den Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht Konrad 1 sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtung gemessen. Aufgrund der Schichtung ergeben sich hier für die P- und die S-Welle deutliche Anisotropien.

Tab. 9: Ultraschallgeschwindigkeiten in mesozoischen Tonsteinen aus dem Bereich der Schachtanlage Konrad (¹⁾ SCHNIER 1986a, ²⁾ SCHNIER 1986b, ³⁾ SCHNIER 1987, ⁴⁾ GERARDI 2005, ⁵⁾ WITTKÉ 1991 a, b). Die Werte in ¹⁾ bis ³⁾ stammen aus Labormessungen, die Werte aus ⁵⁾ wurden aus Diagrammen abgeschätzt und repräsentieren In-situ-Messungen.

Stratigraphie	Geschwindigkeit P-Welle [m/s]			Geschwindigkeit S-Welle [m/s]		
	min	max	Mittelwert	min	max	Mittelwert
Ober-Albium ¹⁾	2810	3470	3117	1420	1850	1660
Mittel-Albium ¹⁾	2800	2800	2800	-	-	-
Mittel-Albium ⁵⁾ (WITTKÉ 1991 a)	2300	4740	3050	-	-	-
Unter-Albium ¹⁾	2600	3330	2794	1240	1420	1288
Mittel-Barremium ¹⁾	2740	2880	2810	1300	1300	1300
Mittel-Barremium ⁴⁾	-	-	2810	1300	1300	1300
Mittel-Barremium ⁵⁾ (WITTKÉ 1991 b)	2200	3700	~2800	-	-	-
Unter-Barremium ¹⁾	2980	2980	2980	1490	1490	1490
Ober-Hauterivium ²⁾	2410	3330	2880	1370	2050	1740
Ober-Hauterivium ³⁾ ohne Bezug zur Schichtung	3000	3650	3370	1550	2050	1780
⊥ zur Schichtung	2750	3650	3270	1550	1900	1750
zur Schichtung	3200	3900	3465	1750	2100	1970
Oberer Korallenoolith ¹⁾	2940	4500	3891	1830	2480	2195
Mittlerer Korallenoolith ¹⁾	3330	3570	3450	1890	2280	2085
Unter-Bathonium ¹⁾	3840	4460	4150	2080	2580	2330
Ober-Bajocium ¹⁾	3250	4170	3738	1760	2330	2055

In von der Schachtwandung sowie Untersuchungsstrecken auf der 343-m- bzw. 541-m-Sohle ausgehenden Doppelbohrungen (horizontal und vertikal und damit parallel bzw. senkrecht zur Schichtung) wurden auch von WITTKÉ (1991 a, b) Ultraschallmessungen durchgeführt (Tab. 9). Da bei diesen Messungen nur Geschwindigkeiten entlang der Bohrung gemessen

werden können, kann aus den Daten nicht auf eine Anisotropie geschlossen werden. Die mit zunehmender Entfernung von der Schachtwandung relativ stetige Zunahme der Schallgeschwindigkeiten deutet auf eine abnehmende Auflockerung des Gebirges. Eine deutliche Abgrenzung einer Auflockerungszone um den Schacht zum ungestörten Gebirge ist dabei im Bereich der 343-m-Strecke nicht festgestellt worden, vielmehr ist ein stetiger Übergang zwischen diesen Gebirgsbereichen zu konstatieren. Die niedrigeren Geschwindigkeiten in unmittelbarer Schacht- bzw. Streckennähe werden eindeutig durch Auflockerung der Proben verursacht.

Etwas anders verhält es sich im Bereich der 541-m-Strecke; auf diesem Niveau ist um den Schacht eine deutlich abgrenzbare, 1,5 m bis maximal 2 m mächtige Auflockerungszone festzustellen. Da im Bereich der 541-m-Strecke in längeren Bohrlöchern gemessen wurde, konnte in einigen Fällen neben der Geschwindigkeit der Kompressionswelle auch die der Scherwelle bestimmt werden. Zahlenwerte sind in dieser Arbeit allerdings nicht angegeben – die Bandbreiten für die P-Wellen wurden deshalb aus den Diagrammen abgelesen.

Tab. 10: Schichtaufbau des Untergrundes im Bereich der Schachtanlage Konrad. Die Daten stammen aus geophysikalischen Messverfahren (Reflexionsseismik sowie Bohrlochversenkungsmessungen (aus: ALHEID 1986).

Stratigraphie	Schichttiefe [m]	Mächtigkeit [m]	Geschwindigkeit v [m/s]		Dichte r [kg/m ³]	Poissonzahl ν [-]
			P-Welle	S-Welle		
Tertiär und Quartär	0 – 10	10	1650	750	2100	0,37
Unterkreide	10 – 260	250	3070	1720	2500	0,27
Unterkreide	260 – 720	460	2430	1370	2200	0,27
Malm	720 – 1220	500	3780	2120	2500	0,27
Dogger	1220 – 1370	150	3210	1800	2600	0,27
Lias	1370 – 1640	270	3570	2000	2500	0,27
Keuper	1640 – 1940	300	3960	2220	2400	0,27
Buntsandstein	1940 – 2630	690	4770	2680	2500	0,27
Zechstein	2630 – 2750	120	4500	2530	2200	0,27
Präzechstein	> 2750	250	5500	3180	2700	0,25

ALHEID (1986) fasste Materialparameter der einzelnen Schichten in der Umgebung der Schachtanlage Konrad zusammen, welche aus reflexionsseismischen Messungen sowie aus Bohrlochversenkungsmessungen in der Bohrung Konrad 101 abgeleitet wurden (siehe Tab. 10).

6.2 Dynamische Elastizitätsparameter

Aus den Laufzeitmessungen lassen sich die Parameter dynamischer Elastizitätsmodul E_{dyn} und dynamische Poissonzahl ν_{dyn} berechnen. Eine Reihe dieser Werte für Tongesteine aus Ober- und Unter-Albium bzw. Unter-Barremium hat SCHNIER (1986a, 1986b und 1987) bestimmt (Tab. 11).

Tab. 11: Dynamische elastische Parameter für Tongesteine im Bereich der Schachtanlage Konrad (aus: SCHNIER 1986a, 1986b, 1987, GERARDI 2005, LUX et al. 2005)

Stratigraphie/Literaturquelle	E-Modul E_{dyn} [GPa]		Poisson-Zahl ν_{dyn} [-]	
	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert
Ober-Albium (GERARDI 2005)	-	7,36	-	0,31
Ober-Albium (SCHNIER 1986a)	11,65 – 1995	16,35	0,28 – 0,34	0,31
Mittel-Albium (GERARDI 2005)	-	3,36	-	-
Unter-Albium (GERARDI 2005)	-	3,62	-	0,35
Unter-Albium (SCHNIER 1986a)	9,60 – 11,95	10,29	0,30 – 0,36	0,35
Albium insgesamt (LUX et al. 2005)	5,30 – 8,11	6,785	0,16 – 0,24	0,21
Ober-Aptium (GERARDI 2005)	-	5,14	-	-
Mittel-Barremium (GERARDI 2005)	-	5,52	-	0,36
Mittel-Barremium (SCHNIER 1986a)	10,95 – 11,30	11,125	0,35 – 0,37	0,36
Unter-Barremium (GERARDI 2005)	-	-	-	0,27
Unter-Barremium (SCHNIER 1986a)	1420	14,20	0,38	0,38
Barremium insg. (LUX et al. 2005)	-	5,356	-	0,218
Ober-Hauterivium (SCHNIER 1986b)	13,10 – 24,90	17,90	0,1 – 0,35	0,21
Ober-Hauterivium (SCHNIER 1987)				
Mittelwert	14,20 – 27,00	21,50	0,15 – 0,36	0,28
⊥ zur Schichtung	14,20 – 23,00	19,68	0,20 – 0,36	0,29
zur Schichtung	19,20 – 27,00	24,17	0,15 – 0,32	0,26
Oberer Korallenoolith (SCHNIER 1986a)	19,70 – 40,60	31,07	0,18 – 0,31	0,26
Mittlerer Korallenoolith (SCHNIER 1986a)	24,40 – 32,65	28,525	0,16 – 0,26	0,21
Unter-Bathonium (SCHNIER 1986a)	28,50 – 42,90	35,70	0,25 – 0,29	0,27
Ober-Bajocium (SCHNIER 1986a)	20,20 – 35,65	28,11	0,27 – 0,30	0,28
Ober-Jura (gesamt) (DBE 1998)	29,90	-	0,27	-
Mittel-Jura (gesamt) (DBE 1998)	12,78	-	0,27	-

Die einzelnen stratigraphischen Einheiten zeigen dabei charakteristische Bereiche mit hohen Moduln (bis fast 20 GPa) für die Tongesteine des Ober-Albium und wesentlich niedrigeren Moduln für die Gesteine aus Unter-Albium und Unter-Barremium. Die dynamischen Poissonzahlen zeigen im Allgemeinen einen genau umgekehrten Trend. Weitere Werte

für die dynamischen Parameter stammen aus GERARDI (2005) sowie aus LUX et al. (2005) (Tab. 11).

Die Bohrkern der Tongesteine des Ober-Hauteriviums im Bereich der Schachtwiderlager im Schacht Konrad 1 hat SCHNIER (1987) parallel sowie senkrecht zur Schichtung messen können. Die von ihm ermittelten Werte für E_{dyn} und ν_{dyn} weisen aufgrund der Schichtung eine deutliche Anisotropie auf.

7 Geomechanische Parameter

7.1 *Statische elastische Parameter und weitere Elastitätskennwerte*

Statische elastische Parameter und weitere Festigkeitsparameter hat SCHNIER (1986a) mittels einer Triaxial-Prüfmaschine an Prüfkörpern im Labor ermittelt (vgl. Abb. 2 und Tab. 12). Der statische Anfangsverformungsmodul E_v wurde bei 50 % der Bruchfestigkeit am Erstbelastungsast als Steigung der Versuchskurve ermittelt. Wenn der Prüfkern einen ausgeprägten Bereich zwischen Fließ- und Bruchgrenze besaß, wurde der lineare Teil der Erstbelastung zur Ermittlung von E_v verwendet (Abb. 2, Punkte a/a'). Der Elastizitätsmodul E wurde aus der Steigung der Geraden durch die Drittelpunkte (Abb. 2, Punkt c) des Erstbelastungsastes im Ent- und Wiederbelastungszyklus vor dem Bruch bestimmt. Der Restverformungsmodul RVM beschreibt das Verformungsverhalten im Nachbruchbereich; er ergibt sich aus der Steigung der Geraden durch den unteren Wendepunkt (Abb. 2, Punkt f') und den oberen Schnittpunkt (Abb. 2, Punkt f) des Ent- und Wiederbelastungszyklus.

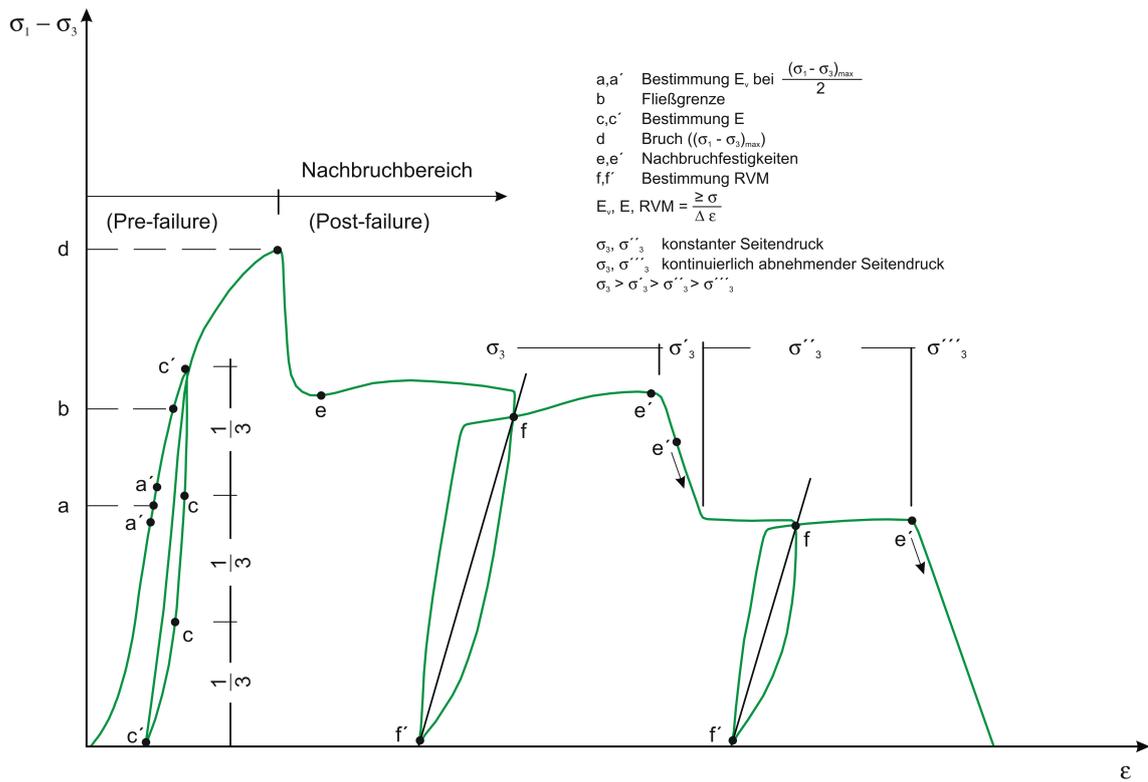


Abb. 2: Schematische Gesamtversuchskurve zur Bestimmung statischer elastischer Parameter (nach: SCHNIER 1986a, verändert)

Tab. 12: Festigkeitsparameter von Tongesteinen aus der Bohrung Konrad 101 ⁽¹⁾ SCHNIER 1986a) sowie den Widerlagerbohrungen der Schächte Konrad 2 ⁽²⁾ SCHNIER 1986b) und Konrad 1 ⁽³⁾ SCHNIER 1987)

Stratigraphie	Anfangsverformungsmodul (AVM) E_v [GPa]		statischer Elastizitätsmodul E [GPa]		Restverformungsmodul RVM [GPa]		
	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	σ_3	Bereich	Mittelwert
Ober-Albium ¹⁾	3,99 - 7,03	5,34	4,14 - 9,59	6,71	12,5	2,34 - 5,05	3,36
					7,5	1,92 - 4,75	3,20
					5	1,90 - 4,13	2,77
					2,5	0,76 - 3,43	2,38
					MW	0,76 - 5,31	3,11
Mittel-Albium ¹⁾	3,49	3,49	3,36	3,36	12,5	2,94	2,94

Stratigraphie	Anfangsverformungsmodul (AVM) E_v [GPa]		statischer Elastizitätsmodul E [GPa]		Restverformungsmodul RVM [GPa]		
	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	σ_3	Bereich	Mittelwert
Unter-Albium ¹⁾	1,56 – 6,05	3,35	2,18 – 6,03	3,92	12,5	1,82 - 3,70	2,76
					7,5	1,27 - 3,92	2,37
					5	1,23 - 3,36	2,05
					2,5	1,19 - 4,36	2,42
					MW	1,19 - 4,36	2,35
Ober-Aptium ¹⁾	4,20	4,20	5,14	5,14	2,5	2,28	2,28
Mittel-Barremium ¹⁾	2,48 – 4,72	3,48	3,94 – 5,52	5,01	12,5	2,29	2,29
					7,5	2,13 – 2,41	2,27
					5	1,96 – 2,85	2,54
					2,5	1,47 – 2,00	1,735
					MW	1,47 – 2,85	2,24
Unter-Barremium ¹⁾	2,48 – 4,72	3,76	3,94 – 5,52	5,08	7,5	1,44 – 3,77	2,445
Ober-Hauterivium ²⁾	2,91 – 8,05	5,70	5,22 – 13,10	9,96	15	3,29 – 6,47	5,21
					10	3,27 – 6,80	4,78
					5	3,01 – 6,65	4,29
					MW	3,01 – 6,80	4,74
Ober-Hauterivium ³⁾	3,11 – 10,38	6,89	8,20 – 14,15	10,75	15	5,10 – 6,08	5,53
					10	4,39 – 7,40	5,38
					5	2,70 – 6,80	5,13
					MW	2,70 – 7,40	5,35
Oberer Korallenoolith ¹⁾	8,43 – 23,07	14,795	19,60 – 29,21	23,79	12,5	11,25 - 16,22	13,25
					7,5	7,44 – 6,36	8,56
					5	6,47 – 8,54	7,505
					2,5	4,81 – 5,68	5,245
					MW	4,81 - 16,22	9,09
Mittlerer Korallenoolith ¹⁾	7,13 – 13,98	10,84	13,91	13,91	12,5	8,58	8,58
					7,5	6,28	6,28
					2,5	3,94	3,94
					MW	3,94 – 8,58	6,27
Unter-Callovium ¹⁾	3,89 – 6,04	4,965	-	-	-	-	-
Unter-Bathonium ¹⁾	6,76 – 13,49	10,07	-	-	-	-	-
Ober-Bajocium ¹⁾	6,42 – 15,08	11,57	18,87	18,87	12,5	9,39	9,39

Während die verformungsbeschreibenden Parameter E_v und E keine Spannungsabhängigkeit aufweisen, wird der Restverformungsmodul RVM vom herrschenden Spannungszustand in der Bruchfläche beeinflusst und nimmt mit steigendem Seitendruck σ_3 zu. In Tab. 12 sind deshalb die RVM mit dem Wert für den dazugehörigen Seitendruck sowie die über alle Seitendrücke gewichteten Mittelwerte angegeben.

WITTKÉ (1991 a) hat an Prüfkörpern aus dem Bereich der 343-m-Sohle (Mittel-Albium) und 541-m-Sohle (Mittel-Barremium), die aus horizontalen, vertikalen sowie im Winkel von 45° zu den Schichtflächen durchgeführten Bohrungen stammen, einaxiale Druckversuche durchgeführt. Da bei den untersuchten Tongesteinen bereits weit unterhalb der Festigkeitsgrenze Abweichungen von einem elastischen (also reversiblen) Spannungs-Verformungsverhalten auftraten, wurde bei den Proben aus dem Bereich der 343-m-Strecke kein Elastizitätsmodul bestimmt, sondern ein Erstbelastungsmodul E und ein Ent-/Wiederbelastungsmodul E_w . Für die Bestimmung der Poissonzahl ν aus dem Verhältnis von Querdehnung und axialer Stauchung wurden in der genannten Arbeit die Spannungs-Dehnungs-Linien der Erstbelastung zugrunde gelegt (vgl. Tab. 13).

Tab. 13: Verformungsparameter unterschiedlicher Belastungsrichtungen für Tongesteinsproben aus dem Bereich der 343-m- und 541-m-Strecken im Schacht Konrad 2 (WITTKÉ 1991 a, b)

Parameter	Belastungsrichtung	343-m-Strecke (* Mittel-Albium, ** Mittel- bis Ober-Albium)		541-m-Strecke (Mittel-Barremium)	
		Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert
Erstbelastungsmodul E [GPa]	horizontal	5,40 – 6,12	5,70	8,10 – 11,50	9,93
	45° zur Schichtung	4,80 – 6,00	5,41	-	-
	vertikal	3,66 – 6,76** 3,41 – 5,77*	4,45** 4,13*	3,79 – 8,06	6,33
Ent-/Wiederbelastungsmodul E _w [GPa]	horizontal	6,80 – 7,90	7,275	15,40 – 22,80	18,17
	45° zur Schichtung	-	-	-	-
	vertikal	3,66 – 6,70	4,45	-	-
Poissonzahl ν [-]	horizontal	0,26 – 0,36	0,31	0,26 – 0,44	0,33
	45° zur Schichtung	0,23 – 0,43	0,33	-	-
	vertikal	0,19 – 0,38** 0,27 – 0,49*	0,30** 0,36*	0,17 – 0,46	0,27
einaxiale Druckfestigkeit σ_D [MPa]	horizontal	11,1 – 24,1	18,3	17,7 – 25,4	21,7
	45° zur Schichtung	19,2 – 20,6	19,7	-	-
	vertikal	19,8 – 29,6**	24,0**	11,9 – 21,8	17,7

Die an den Prüfkörpern aus den vertikalen Bohrungen ermittelten Moduln sind kleiner als die an Prüfkörpern aus den horizontalen Bohrungen bestimmten. Ursache dafür ist eine gefügebedingte Anisotropie und/oder die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der Prüfkörper. Auch die in den vertikalen Bohrungen ermittelten Moduln zeigen deutliche Abweichungen zwischen den ins Hangende gerichteten bzw. der ins Liegende gerichteten Bohrung (Anisotropie). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei den Bohrungen ins Hangende das Ober-Albium erfasst wurde und schon allein daraus Unterschiede in der quantitativen und qualitativen mineralogische Zusammensetzung der Prüfkörper resultieren.

Von WITTKÉ (1991 a, b) wurden – ausgehend von den 343-m- und 541-m-Strecken im Schacht 2 Konrad – in Vertikalbohrungen ins Liegende Dilatomerversuche unternommen. Die Dilatanz beschreibt, mit welcher Intensität sich das Gesteinsmaterial auflockert; sie wird gleichgesetzt mit der Volumenzunahme eines Gebirgselements (Lux et al. 2005: 113). Bei Dilatomerversuchen wird ein Bohrloch rotationssymmetrisch aufgeweitet, um daraus das Spannungs-Verformungs-Verhalten eines örtlich begrenzten Gebirgsbereiches abzuleiten. Gleichzeitig lassen sich daraus die Verformungsmoduln bestimmen. Es wurde

ein elastisches und isotropes Spannungs-Dehnungsverhalten und eine Poissonzahl $\nu = 0,33$ angenommen. Die Moduln in den beiden von der 343-m-Strecke ausgehenden Bohrungen sind relativ konstant, was für relativ einheitliche Gebirgsverhältnisse im untersuchten Bereich spricht. In der von der 541-m-Strecke ausgehenden Bohrung weisen die Moduln im oberen Teil der Bohrung (Mittel-Barremium) deutlich geringere Werte als in deren unterem Teil, in dem das Unter-Barremium (und wohl auch das Ober-Hauterivium ansteht), auf (vgl. Tab. 14). Zu beachten ist, dass sich wegen der vertikalen Orientierung der Bohrung die Verformbarkeit des Gebirges lediglich in der horizontalen Ebene, also parallel zur Schichtung, bestimmen ließ.

Tab. 14: Über Dilatometerversuche ermittelte Verformungsmoduln (WITTKÉ 1991 a, b)

Stratigraphie	Belastungsmodul E_B [MN/m ²]		Entlastungsmodul E_E [MN/m ²]	
	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert
Mittel-Albium (2 Bohrungen)	3490 – 6630	4510 ± 710	7540 – 10860	8680 ± 1040
Mittel-Barremium	3050 – 6640	4220 ± 1430	4940 – 9370	7260 ± 1980
Unter-Barremium/ Ober-Hauterivium	5320 – 7110	6270 ± 610	10080 – 15020	12080 ± 1590

Der Schubmodul G (auch Gleitmodul, G -Modul, Schermodul oder Torsionsmodul) ist eine Materialkonstante, welche die lineare elastische Verformung einer Gesteinsprobe infolge einer Scherkraft oder Schubspannung beschreibt. Die einer mechanischen Spannung entsprechende SI-Einheit ist Nm^{-2} ($1 \text{ Nm}^{-2} = 1 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-2} = 1 \text{ Pa}$). Es handelt sich um eine Konstante, die sich aus dem Verhältnis von Schubspannung τ und dem Tangens des Schubwinkels γ (Gleitung) nach der Formel $G = \tau / \tan \gamma$ errechnet. Ferner steht der Schubmodul bei isotropen Materialien mit dem Elastizitätsmodul E , der Poissonzahl ν und dem Kompressionsmodul K in folgenden Beziehungen:

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

Tabellierte Schubmoduln sind für die unterkretazischen Tongesteine des Endlagerstandortmodells nicht bekannt.

7.2 Festigkeitseigenschaften

Von WITTKÉ (1991 a, b) wurden ferner triaxiale Druckversuche an zylindrischen Prüfkörpern durchgeführt, die im Bereich der 343-m-Strecke aus einer Horizontalbohrung und je einer Vertikalbohrung ins Hangende und ins Liegende sowie im Bereich der 541-m-Strecke aus einer Horizontalbohrung und einer Bohrung ins Liegende gewonnen wurden (vgl. Abb. 1

und Tab. 15). Die aus unterschiedlichen Belastungsrichtungen im Gestein (horizontal, diagonal und vertikal zur Schichtung) ermittelten Werte für Kohäsion und Reibungswinkel stimmen zwar in der Größenordnung überein, lassen sich aber – wie bereits bei den einaxialen Druckversuchen deutlich wurde – eindeutig voneinander abgrenzen. Auch hier dürfte eine gefügebedingte Anisotropie und/oder die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der Proben der Hauptgrund für die Abweichungen sein. Im Bereich der 541-m-Strecke im Mittel-Barremium sind die ermittelten Werte für Kohäsion und Reibungswinkel allerdings – unabhängig von der Richtung der Bohrung – nahezu identisch.

Tab. 15: Durch triaxiale Druckversuche an Prüfkörpern aus den 343-m- und 541-m-Strecken (Schacht Konrad 2) ermittelte Scherparameter (WITTKÉ 1991 a, b)

Parameter	Belastungsrichtung	343-m-Strecke (Mittel-Albium)		541-m-Strecke (Mittel-Barremium)	
		Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert
innerer Reibungswinkel φ [°]	horizontal	2,0 – 5,5 (3)	3,3	13,0 – 15,0 (2)	14,0
	vertikal ins Hangende	8,5 (1)	8,5	13,0 – 14,0 (2)	13,5
	vertikal ins Liegende	13,0 – 15,5 (2)	14,25	-	-
Kohäsion c [MPa]	horizontal	11,5 – 13,5 (3)	13,0	11,3 – 11,5 (2)	11,4
	vertikal ins Hangende	11,0 (1)	11,0	11,3 – 11,5 (2)	11,4
	vertikal ins Liegende	4,5 – 6,0 (2)	3,5	-	-

Ein Datensatz zu den Festigkeitsparametern für Tongesteine aus dem Hedbergellmergel im Mittel-Aptium (UHLIG et al. 2006 in JOBMANN et al. 2007) findet sich in Tab. 16. Die hier angegebenen „abgeminderten Parameter“ (für Berechnungen mit verminderten Gebirgsfestigkeiten) resultieren aus der Überlegung, dem Einfluss von Inhomogenitäten im Gebirge und Ungenauigkeiten hinsichtlich der Gesteinsparameter Rechnung zu tragen. Dazu wurden die kohäsiven Festigkeiten um 30 % und die Reibungsfestigkeiten um 20 % abgemindert. Gründe für den Zahlenwert dieser prozentualen Abminderungen werden allerdings nicht dargelegt. Aufgrund der verminderten Festigkeit des Tonsteins kann es im Modellgebiet Unterkreide Norddeutschland (UHLIG et al. 2006 zit. in JOBMANN et al. 2007) zu einem ca. 20 % bis 30 % größeren Bereich an plastifizierten Zonen (Überbeanspruchung von Bereichen um Hohlraumkonturen bei der Auffahrung infolge von Umverteilung von Spannungen) kommen.

Tab. 16: Festigkeitsparameter für Tongesteine aus dem Mittel-Aptium (Hedbergellenmergel) im Bereich der Bohrung Konrad 101 (UHLIG et al. 2006 zit. in JOBMANN et al. 2007)

Festigkeitsparameter		Parameter		abgeminderte Parameter	
		Matrix	Schichtung	Matrix	Schichtung
Zugfestigkeit σ_t	[MPa]	3,1	1,5	2,2	1,0
Spitzenkohäsion c	[MPa]	8,6	6,4	6,0	4,5
Reibungswinkel φ	[°]	30,8	24,9	25,5	20,4
Restkohäsion c_R	[MPa]	2,4	1,85	1,7	1,3
Restreibungswinkel φ_R	[°]	23	19,1	18,8	15,5

SCHNIER (1986a, 1986b, 1987) fasste an Prüfkörpern aus verschiedenen stratigraphischen Horizonten der Bohrung Konrad 101 sowie den Schachtwiderlagerbohrungen in den Schächten Konrad 1 und Konrad 2 im Labor ermittelte Werte für Kohäsion und Reibungswinkel für die Bruch- und für die Nachbruchfestigkeit zusammen (Tab. 17).

Tab. 17: Bruchfestigkeits- und Nachbruchfestigkeitsparameter für Tongesteine in der Schachtanlage Konrad

Stratigraphie	Petrographie	Parameter	Bruchfestigkeit	Nachbruchfestigkeit	Herkunft
Cenomanium	Mergelstein, mergeliger Kalkstein, Tonmergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	7,44	5,33	Bhrg. Konrad 101 SCHNIER (1986a)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	36,3	30,7	
Ober-Albium	Mergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	5,20	3,52	Bhrg. Konrad 101 SCHNIER (1986a)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	31,0	23,60	
	Tonmergelstein toniger Mergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	-	3,92	
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	-	9,10	
Mittel- bis Unter-Albium, Aptium	Tonmergelstein, toniger Mergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	4,70	1,24	Bhrg. Konrad 101 SCHNIER (1986a)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	19,1	22,0	
Barremium	Tonstein, Tonmergelstein, Mergelstein,	Kohäsion c/c_R [MPa]	3,20	0,93	Bhrg. Konrad 101 SCHNIER (1986a)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	29,3	25,4	
Ober-Hauterivium	Tonstein, toniger Mergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	4,14	1,36	Schacht Konrad 1 SCHNIER (1987)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	30,4	27,4	

Stratigraphie	Petrographie	Parameter	Bruchfestigkeit	Nachbruchfestigkeit	Herkunft
Ober-Hauterivium	Tonstein, Tonmergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	3,74	1,38	Schacht Konrad 2 SCHNIER (1986b)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	30,6	25,8	
Callovium	Tonmergelstein, Mergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	8,03	2,17	Bhrg. Konrad 101 SCHNIER (1986a)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	29,7	25,7	
Bathonium	toniger Kalksandstein, Kalkmergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	5,66	2,85	Bhrg. Konrad 101 SCHNIER (1986a)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	30,7	29,6	
Bajocium	toniger Kalksandstein, Kalkmergelstein, Tonmergelstein	Kohäsion c/c_R [MPa]	6,29	1,66	Bhrg. Konrad 101 SCHNIER (1986a)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	36,7	33,6	
Oberjura (gesamt)		Kohäsion c/c_R [MPa]	8,3	2,4	DBE (1998)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	48,8	40,1	
		einaxiale Druckfestigkeit σ_D [MPa]	35,0 – 42,0		
		Zugfestigkeit s_t [MPa]	3,1		
Mitteljura (gesamt)		Kohäsion c/c_R [MPa]	10,8	2,8	DBE (1998)
		Reibungswinkel φ/φ_R [°]	27,1	27,1	

Ebenfalls in SCHNIER (1986a, 1986b, 1987) finden sich Werte für die Spaltzugfestigkeiten σ_{SZ} . Diese wurden im Labor ausschließlich an Tongesteins-Prüfkörpern gewonnen, welche aus den Schachtwiderlagerbohrungen in den Schächten Konrad 1 und 2 stammen. Somit handelt es sich lediglich um Bohrkerne aus dem Ober-Hauterivium.

Die Kerne aus den Schachtwiderlagerbohrungen Konrad 2 ergaben Spaltzugfestigkeiten mit deutlicher Anisotropie. Schichtparallel belastete Proben liefern niedrigere Festigkeiten als senkrecht zur Schichtung belastete Probenkörper (Tab. 18). Bei den Kernen der Schachtwiderlagerbohrungen Konrad 1 ist eine derartige Anisotropie nicht zu beobachten.

Tab. 18: Werte für die Spaltzugfestigkeit von Tongesteinen des Ober-Hauterivium in der Schachanlage Konrad (aus: SCHNIER 1986a, 1986b und 1987)

Ober-Hauterivium	Spaltzugfestigkeit σ_{SZ} [MPa]			
	Schacht Konrad 1 (SCHNIER 1987)		Schacht Konrad 2 (SCHNIER 1986b)	
Belastungsrichtung	Bereich	Mittelwert	Bereich	Mittelwert
zur Schichtung	1,79 - 2,14	2,00	1,04 - 1,59	1,34
⊥ zur Schichtung	1,78 - 2,22	1,97	1,82 - 2,51	2,20
alle Werte	1,78 - 2,22	1,99	-	-

Lux et al. (2005: 102ff.) haben an Tongesteinen der Schachanlage Konrad Laboruntersuchungen zu deren Festigkeits- und Deformationsverhalten durchgeführt (vgl. Tab. 19). Zu den ermittelten Parametern zählen neben der Dilatanzfestigkeit auch Bruchfestigkeit und Bruchverzerrung.

Tab. 19: Weitere Parameter zum Festigkeits- und Deformationsverhalten von Tongesteinen aus der Schachanlage Konrad (Lux et al. 2005)

Parameter		Albium insgesamt (Kernmaterial untertage erbohrt)	Albium insgesamt (älteres, längere Zeit übertage gelagertes Kernmaterial)	Barremium insgesamt (Kernmaterial untertage erbohrt)
Minimalpannung σ_{min} [MPa]	Bereich	1,0 – 5,0	0 – 15,0	4,0
	Mittelwert	3,0	5,2	4,0
Bruchfestigkeit β [MPa]	Bereich	35,02 – 47,44	44,02 – 86,20	43,20
	Mittelwert	39,55	57,30	43,20
Dilatanzfestigkeit β_{Dil} [MPa]	Bereich	35,02 – 47,44	48,39 – 86,20	43,20
	Mittelwert	39,55	59,73	43,20
Bruchstauchung ϵ_f [%]	Bereich	1,60 – 2,10	0,97 – 2,80	1,50
	Mittelwert	1,95	2,00	1,50

Aus diesen Werten wurden abgeleitet bzw. berechnet (Lux et al. 2005):
 innerer Reibungswinkel $\varphi = 23^\circ$, einaxiale Druckfestigkeit $\sigma_D = 45,5$ MPa, Kohäsion $c = 10,9$ MPa

Dabei entspricht:

- die Bruchfestigkeit (mechanische Spannung) β der maximalen im Versuch gemessenen Axialspannung, bezogen auf die aktuelle Prüfkörperquerschnittsfläche im Bruchzustand,
- die Bruchverzerrung (Bruchstauchung) ϵ_f der zum Bruchspannungswert korrespondierenden axialen Verzerrung, und

- die Dilatanzfestigkeit β_{Dil} derjenigen Axialspannung, bei der die volumetrische Prüfkörperdeformation ein Minimum aufweist.

Unter der Bruchfestigkeit wird dabei diejenige mechanische Spannung verstanden, die bei einem Prüfkörper unter gleichmäßiger Steigerung der Belastung zum Bruch führt. Je nach Art der Beanspruchung unterscheidet man bei der Bruchfestigkeit in Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Scherfestigkeit oder Torsionsfestigkeit.

Analog zu Salzgesteinen zeigen die von Lux et al. (2005) untersuchten Tongesteine tendenziell eine lineare Abhängigkeit der Bruchfestigkeit von der Minimalspannung derart, dass die Festigkeiten mit steigender Minimalspannung deutlich zunehmen. Aus der graphischen Darstellung dieser Abhängigkeit lassen sich für die Tongesteinsproben (ohne Differenzierung nach Stratigraphie, Herkunft etc.) der innere Reibungswinkel φ , die einaxiale Druckfestigkeit σ_D und die Kohäsion c ableiten bzw. berechnen. Für die Kohäsion c ergibt sich dabei ein Wert von 15,1 MPa. Für eine ingenieurtechnisch konservative Einschätzung der Scherparameter ergibt sich hingegen eine Kohäsion von $c = 10,9$ MPa.

Ferner – und ebenfalls analog zu Salzgesteinen – zeigen die untersuchten Tongesteine eine Zunahme der Bruchstauchung bei steigender Minimalspannung. Die Dilatanzfestigkeit entspricht bei den untersuchten Gesteinen der Bruchfestigkeit.

8 Quelleigenschaften

Das Quellverhalten von Tongesteinen hängt im Wesentlichen von deren mineralogischer Zusammensetzung, von der Ionenkonzentration und der Salinität der im Gestein enthaltenen Formationswässer (bzw. des dem Gestein zugeführten Wassers) sowie vom Spannungszustand des Gesteins ab. WITTKÉ (1991 a, b) untersuchte die Quelleigenschaften der Tongesteine des Mittel-Albium (343-m-Strecke) und des Mittel-Barremium (541-m-Strecke) sowohl im destillierten als auch im salzhaltigen Wasser. Als salzhaltige Wässer (> 10 g/l) wurden Wässer aus dem Hilsandstein und Wässer aus dem Oxfordium (Ort 300 im Schacht Konrad 1) verwendet.

8.1 Quelldruck

Mit Quelldruckversuchen werden die Quelleigenschaften des Gesteins bei konstantem Volumen untersucht. Bei den in WITTKÉ (1991 a, b) beschriebenen richtungsabhängigen Quelldruckversuchen wird ein aus einer kreisförmigen Gesteinsscheibe bestehender Prüfkörper in ein Kompressionsgerät (Ödometer) eingesetzt und nach der Bewässerung in regelmäßigen Abständen die axiale Quellkraft bzw. Quellspannung σ_z gemessen. Eine

axiale Dehnung des Prüfkörpers wird vollständig verhindert. Der Versuch ist beendet, wenn keine Veränderung der Quellspannung mehr stattfindet.

Im Versuch ergaben sich im Bereich Mittel-Albium deutlich unterschiedliche Werte, die sich weder auf die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der Prüfkörper noch auf eine deutliche Anisotropie des Quellvermögens parallel bzw. senkrecht zur Schichtung (vgl. auch Abb. 1) zurückführen lassen (Tab. 20). Nach WITTKKE (1991 a) haben die Prüfkörper wohl schon vor Versuchsbeginn infolge der Eigenfeuchte des Gesteins eine unterschiedlich große Quellung erfahren. Außerdem lassen die Ergebnisse erkennen, dass der Quelldruck mit zunehmender Mineralisation des verwendeten Wassers abnimmt.

In den Proben aus dem Mittel-Barremium wurden Quelldrücke gemessen, die bei Messrichtung parallel zur Schieferung höhere Werte zeigen als bei Messrichtung senkrecht zur Schieferung – somit ist hier eine Anisotropie deutlich erkennbar (WITTKKE 1991 b). Auch hier nimmt der Quelldruck mit zunehmender Mineralisation des verwendeten Wassers ab; d.h., dass das Quellvermögen der untersuchten Tongesteine in mineralisierten Wässern deutlich geringer ist als in destilliertem Wasser.

Tab. 20: Ergebnisse von Quelldruckversuchen an Prüfkörpern von der 343-m-Strecke (Bohrung B11) und 541-m-Strecke (Bohrungen B10 und V104 im Schacht Konrad 2 (WITTKKE 1991 a, b). Bei den Versuchen fanden destilliertes Wasser sowie Wässer aus dem Hilssandstein und aus dem Ort 300 der Schachanlage Konrad Verwendung.

Bohrung, Bohrtiefe [m]	Belastungsrichtung zur Schichtung	Wasser	Gehalt an Smektit/ Tonmineralen ^{ges.} [Gew.-%]	Versuchsdauer [d]	maximaler Quelldruck σ_z^q [MPa]
343-m-Strecke (Bohrung B11, Mittel-Albium)					
9,0 – 9,3		destill. Wasser	26 / 35	98	0,9
26,5 – 27,5	⊥		27 - 28 / 37 - 38	57	2,1
9,0 – 9,3		Hilssandstein	26 / 35	160	2,3
26,5 – 27,5	⊥		27 - 28 / 37 - 38	47	1,5
26,7 – 27,5	⊥	Ort 300	27 - 28 / 37 - 38	47	0,8
541-m-Strecke (Mittel-Barremium)					
B10, 20,7–21,0	⊥	destill. Wasser	-	17 (26,5)	1,64
V104, 11,2–11,4			-	12 (78)	5,06
V104, 24,1–24,3			-	1 (78)	3,67
B10, 20,7–21,0	⊥	Hilssandstein	-	1 (26,5)	0,83
V104, 11,2–11,4			-	4 (78)	4,87
B10, 20,7–21,0	⊥	Ort 300	-	1 (24)	0,73

In NAGRA (2002) werden die Ergebnisse von Quellversuchen am Opalinuston intensiv diskutiert. Quellversuche mit deionisiertem Wasser zeigen für den Opalinuston aus der Bohrung Benken eine erhebliche Streuung und Anisotropie mit Quellhebungen (siehe Kap. 7.2) von 1,4 % bis 7,5 % senkrecht und 1% bis 4,5 % parallel zur Schichtung. Im Material vom Mont Terri wurden Quelldrücke von 1,2 MPa senkrecht und 0,6 MPa parallel zur Schichtung gemessen; es sind aber auch Quelldrücke von über 3 MPa bekannt. Allerdings konnte gezeigt werden, dass solche hohen Drücke auf Austrocknung der Proben vor der Messung zurückzuführen sind. Unterschiede in den Quelldrücken werden auf Unterschiede in der Wassersättigung der Proben und der Wasserchemie, im Ton- bzw. Smektitgehalt sowie Überlagerung und Orientierung bezüglich der Schichtung zurückgeführt. Ferner wurde festgestellt, dass im Labor ermittelte Quelldrücke beim Opalinuston höher liegen als in situ bestimmte Werte (NAGRA 2002).

8.2 Quellhebung

Beim Quellhebungsversuch wird im Gegensatz zur Bestimmung des Quelldrucks ein axiales Quellen unter einer Mindestspannung von min. $\sigma_z = 5$ kPa zugelassen. Auch hier wird der Prüfkörper in ein Kompressionsgerät (Ödometer) eingesetzt, bewässert und bei konstanter axialer Spannung min. σ_z in regelmäßigen Abständen die axialen Quellhebungen gemessen und anschließend in Quelldehnungen ε_z^q umgerechnet. Der Versuch ist beendet, wenn keine Quelldehnung mehr erfolgt.

Tab. 21: Ergebnisse von Quellhebungsversuchen an Prüfkörpern aus dem Schacht Konrad 2 (WITTKÉ 1991 a). Bei mit *) markierten Werten wurde bis zum Versuchsende kein Plateauwert der Quelldehnungen erreicht.

Bohrung, Bohrtiefe [m]	Messrichtung zur Schichtung	Wasser	Gehalt an Smektit/Tonmineralen ^{ges} [Gew.-%]	Versuchsdauer [d]	maximale Quelldehnung ε [%]
343-m-Strecke (Bohrung B11, Mittel-Albium)					
9,0 – 9,3		destill. Wasser	26 / 35	25	7,2
38,4 – 39,7			28 / 36	47	27,1*)
38,4 – 39,7			28 / 36	98	24,8*)
27,5 – 27,7	⊥		37 / 57	57	11,2*)
30,3 – 30,6	⊥		35 / 57	57	18,0*)
38,4 – 39,7	⊥		36 / 57	57	11,6*)
9,0 – 9,3		Hils-sandstein	26 / 35	25	0,1
14,9 – 15,3			27 / 35	203	5,5*)
19,9 – 20,4			27 / 35	151	0
38,4 – 39,7			28 / 36	39	0,2
27,5 – 27,7	⊥		28 / 37	28	0,8
30,3 – 30,6	⊥		27 / 35	43	0,9
38,4 – 39,7	⊥		28 / 36	48	2,4

Bohrung, Bohrtiefe [m]	Messrichtung zur Schichtung	Wasser	Gehalt an Smektit/ Tonmineralen ^{ges} [Gew.-%]	Versuchs- dauer [d]	maximale Quell- dehnung ϵ [%]
26,7 – 27,5		Ort 300	26 / 35	32	0,2
14,9 – 15,3			27 / 35	203	11*)
27,5 – 27,7	⊥		28 / 37	28	0,7

Auch bei den Versuchen zur Quellhebung ergaben sich im Bereich Mittel-Albium Werte, die sich weder auf die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der Prüfkörper noch auf eine deutliche Anisotropie des Quellvermögens parallel bzw. senkrecht zur Schichtung zurückführen lassen (Tab. 21). Nach WITTKÉ (1991 a) haben auch in diesem Fall die Prüfkörper schon vor Versuchsbeginn infolge der Eigenfeuchte des Gesteins eine unterschiedlich große Quellung erfahren. Noch stärker als bei den Quelldruckversuchen wird deutlich, dass das Quellvermögen der untersuchten Tongesteine in mineralisiertem Wasser signifikant geringer ist als in destilliertem Wassers.

Die Ergebnisse der Versuche zur Quellhebung an den Proben aus dem Mittel-Barremium streuen stark (Tab. 22). Die maximalen Quelldehnungen bei Bewässerung mit destilliertem Wasser liegen – bei einem Mittelwert von 21 % – zwischen 13 % und 28 %. Deutliche Anisotropieeffekte sind nicht wahrnehmbar. Zu erkennen ist aber auch hier, dass der Quelldruck mit zunehmender Ionenkonzentration des verwendeten Wassers abnimmt.

Tab. 22: Ergebnisse von Quellhebungsversuchen an Prüfkörpern aus dem Schacht Konrad 2 (WITTKÉ 1991 b). Bei mit *) markierten Werten wurde bis zum Versuchsende kein Plateauwert der Quelldehnungen erreicht.

Bohrung, Bohrtiefe [m]	Messrichtung zur Schichtung	Wasser	Versuchsdauer [d]	maximale Quelldehnung ϵ [%]
541-m-Strecke (Mittel-Barremium)				
B10, 21,1–21,1	⊥	destill. Wasser	44 (56)	14,4
B10, 34,2–34,4	⊥		45	16,8*)
B10, 25,2–25,3			30 (54)	12,9
B10, 27,2–27,5			98 (151)	25,0*)
B10, 28,9–29,3			33	25,2*)
V104, 11,2–11,4	⊥		63	28,2
V104, 24,1–24,3			78	18,5
V104, 41,0–41,2	⊥		78	28,6

Bohrung, Bohrtiefe [m]	Messrichtung zur Schichtung	Wasser	Versuchsdauer [d]	maximale Quelldehnung ε [%]
B10, 21,1–21,3	⊥	Hils- sandstein	32	1,8
B10, 34,2–34,4	⊥		27	5,7
B10, 34,4–34,6	⊥		27	3,5*)
B10, 12,0–12,2	⊥		150	0,2
B10, 16,2–16,4	⊥		150	7,0*)
B10, 25,2–25,3			32	0,4
B10, 28,9–29,3			33	8,2
V104, 11,2–11,4			63	(23,1)
V104, 24,1–24,3			78	(17,2)
V104, 41,0–41,2			78	(20,7)
B10, 21,1–21,2	⊥		Ort 300	29
B10, 34,4–34,6	⊥	27		1,3
B10, 12,0–12,2		150		3,0*)
B10, 25,2–25,3		29		1,9

8.3 Quellversuche nach Huder/Amberg

Quellversuche nach Huder/Amberg stellen mehrstufige Quellversuche dar, bei denen die Abhängigkeit der Quelldehnung vom Spannungszustand untersucht wird.

Mittel-Albium: Die bei einer axialen Spannung von $\sigma_c = 5$ kPa aus den Ergebnissen der Huder/Amberg-Versuche ermittelten Quelldehnungen ε_z^q liegen mit 17 % und 13 % in derselben Größenordnung wie die bei den Quellhebungsversuchen mit dest. Wasser ermittelten Quelldehnungen (WITTKÉ 1991 a).

Mittel-Barremium: Die bei einer axialen Spannung von $\sigma_c = 5$ kPa aus den Ergebnissen der Huder/Amberg-Versuche ermittelten Quelldehnungen ε_z^q liegen an der unteren Grenze der bei den Quellhebungsversuchen mit destilliertem Wasser ermittelten Quelldehnungen (WITTKÉ 1991 b).

9 Hydraulische Parameter

Die an Tongesteinen aus der Schachtanlage Konrad ermittelten hydraulischen Parameter (Permeabilität, Porosität) sind in den Tab. 23 bis Tab. 26 zusammengestellt.

9.1 Permeabilität (Durchlässigkeit)

Die Permeabilität K ist in der Geotechnik und Bodenkunde ein Maß zur Quantifizierung der Durchlässigkeit von Böden und Fels für Flüssigkeiten oder Gase (z. B. Grundwasser, Erdöl, Erdgas). Sie leitet sich aus dem Darcyschen Gesetz her und ist definiert als Quotient aus Fließrate Q , dynamischer Viskosität des Fließmediums η und durchströmter Länge des porösen Körpers l sowie der sich nach dem Strömen einstellenden Druckdifferenz und der durchströmten Querschnittsfläche Δp des porösen Körpers A :

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot l}{\Delta p \cdot A} \quad (2)$$

Ihre SI-Einheit ist m^2 , wobei oft die abgeleitete Einheit μm^2 verwendet wird. Anwendung findet auch das Darcy, wobei 1 Darcy $9,866 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ oder etwa 10^{-12} m^2 entspricht. Handelt es sich beim Fließmedium um Luft (mit der Viskosität $0,01799 \text{ cP}$), wird die Permeabilität als Luftpermeabilität bezeichnet.

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f (auch als hydraulische Leitfähigkeit, Filtrationskoeffizient oder gesättigte Wasserleitfähigkeit bezeichnet) steht mit der Permeabilität in engem Zusammenhang. Er stellt einen Wert dar, der in der Regel die Durchlässigkeit von Boden oder Fels für Wasser quantifiziert. Der Durchlässigkeitsbeiwert berechnet sich aus Permeabilität K sowie der Dichte des Fluids ρ , der Erdbeschleunigung g und der dynamischen Viskosität des Fließmediums η wie folgt:

$$k_f = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\eta} \quad (3)$$

Seine SI-Einheit ist m/s . Für Wasser mit $\rho = 1000 \text{ kgm}^{-3}$ und $\eta = 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$ sowie $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ gilt in grober Näherung $k_f = 10^7 \times K$.

Die unterkretazischen Tonsteine (toniges Valanginium bis toniges Albium) weisen sehr geringe Durchlässigkeiten auf. Hydraulische Tests (Packertests) in der Bohrung K 101 (getestet wurden horizontübergreifende Abschnitte von Untercenoman bis Ober-Albium, von Ober-Albium bis Unter-Albium, im Unter-Albium, von Ober-Aptium bis Ober-Hauterivium sowie von Mittel-Callovium bis Ober-Bathonium) ergaben Werte von generell weniger als 10^{-11} m/s (KLINGE & NEUMANN-REDLIN 1985, vgl. Tab. 23). Die Werte aus Laboruntersuchungen liegen in den unteren Bereichen der Unterkreide (ab Ober-Barremium) etwas höher (MÜLLER et al. 1986, vgl. Tab. 26).

Tab. 23: Durchlässigkeitsbeiwerte k_f sowie effektive Porositäten P^* der im Bereich der Grube Konrad angetroffenen Schichten (BfS 2002)

Hydrogeologische Einheit	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]			effektive Porosität P^* [%]	
	Antragsteller PTB Braunschweig BfS Salzgitter	Gutachter NLfB Hannover		Gutachter NLfB Hannover	
		Schichtenmodell	Bereich	Rechenwert ¹⁾	Bereich
Quartär	10^{-5}	$10^{-6} - 10^{-3}$	5×10^{-5}	10 - 40	20
Flammenmergel (oberstes Ober-Albium) bis Plänerkalke (Turonium)	10^{-7}	$10^{-10} - 10^{-5}$	5×10^{-7}	5 - 20	10
Albium (tonig)	10^{-7} (bzw. 10^{-12})	$10^{-13} - 10^{-10}$	10^{-11}	2 - 15	5
Hilssandstein	10^{-5}	$10^{-6} - 10^{-5}$	10^{-5}		
Basis Unterkreide bis Aptium	10^{-10} (bzw. 10^{-12})	$10^{-12} - 10^{-9}$	10^{-10}	2 – 15	5
Wealden und Valanginium	-	$10^{-9} - 10^{-5}$	10^{-7}	5 – 20	7,5
Tithonium und Kimmeridgium	10^{-8}	$10^{-10} - 10^{-7}$	10^{-8}	0,1 - 20	1
Oxfordium	10^{-7}	$10^{-10} - 10^{-7}$	10^{-8}	0,1 - 20	1
Callovium und Bathonium	10^{-10}	$10^{-12} - 10^{-9}$	10^{-10}	0,5 - 15	2
Cornbrash-Sandstein (Unter-Bathonium / Ober-Bajocium)	10^{-6}	$10^{-10} - 10^{-6}$	10^{-7}	0,1 - 20	3
Bajocium und Oberes Aalenium	10^{-10}	$10^{-12} - 10^{-9}$	10^{-10}	0,5 - 15	2
Dogger-beta-Sandstein (Aalensandstein, Oberes Aalenium)		$10^{-9} - 10^{-5}$	10^{-6}	5 – 25	10
Unteres Aalenium bis Sinemurium		$10^{-12} - 10^{-9}$	10^{-10}	0,5 - 15	2

¹⁾ Diese „Rechenwerte“ wurden für Modellberechnungen im Planfeststellungsbeschluss Konrad verwendet.

Einer Zusammenstellung zu In-situ hydraulisch getesteten Tongesteinsformationen in HOTH et al. (2007, vgl. Tab. 24) ist zu entnehmen, dass ein Tonanteil ≥ 80 % mit einer Gebirgsdurchlässigkeit $k_f \leq 1$ pm/s bzw. ein Tonanteil von 60 % bis 80 % mit einer Gebirgsdurchlässigkeit $k_f \leq 100$ pm/s (1 pm/s $\cong 1 \cdot 10^{-12}$ m/s) korreliert, wenn die Schichtenfolgen keine mächtigen, durch hohe hydraulische Leitfähigkeiten charakterisierten Sandstein- oder Karbonateinschaltungen enthalten.

Tab. 24: Durch hydraulische Testbohrungen in norddeutschen tonigen Gesteinsformationen ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte (aus: GERARDI 1986 und LENZ et al. 1986 a, b; kompiliert in HOTH et al. 2007: 20)

Bohrung	Tiefe Oberkante [m]	Tiefe Unterkante [m]	Stratigraphie	Tonanteil [%]	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]
Konrad 101	428	449	Unter-Albium	> 80	3×10^{-12}
Konrad 101	776	880	Mittel-Callovium bis Ober-Bathonium	> 80	$0,9 \times 10^{-12}$
Dolgen VI	102	111	-	> 80	$1,1 \times 10^{-12}$
Dolgen VI	119	129	-	> 80	$0,86 \times 10^{-12}$
Dolgen VI	140	150	-	> 80	$1,3 \times 10^{-12}$
Konrad 101	241	292	unterstes Unter-Cenomanium bis mittleres Ober-Albium	70	$1,0 \times 10^{-12}$
Konrad 101	302	427	mittleres Ober-Albium bis mittleres Unter-Albium	75	$0,5 \times 10^{-12}$
Konrad 101	480	608	oberstes Ober-Barremium bis oberstes Unter-Hauterivium	75	$1,0 \times 10^{-12}$
Konrad 101	919	1002	Bajocium	75	$0,4 \times 10^{-12}$

Für einen 128 m langen Abschnitt in der Bohrung Konrad 101, der vom obersten Ober-Barremium bis zum oberstes Unter-Hauterivium reicht und damit genau den im Endlagerstandortmodell NORD designierten Bereich des Wirtsgesteins umfasst, wurde in HOTH et al. (2007) ein Durchlässigkeitsbeiwert von $1,0 \times 10^{-12}$ m/s angegeben.

Die an Gesteinen (Bohrkernen) der Geothermiebohrung Groß Buchholz Gt1 (GeneSys) im Zeitraum 2010-2011 ermittelten Permeabilitäten und Porositäten (TISCHNER & KRUG 2012) sind in Tab. 25 zusammengestellt. Sie werden hier zu Vergleichszwecken angegeben.

Tab. 25: An Laborproben ermittelte Porositäten und Permeabilitäten von Gesteinen aus der Geothermiebohrung Groß Buchholz Gt1 (aus: TISCHNER & KRUG 2012)

		Porosität P [%]			Permeabilität K [mD]	
		min	max	Mittelwert	min	max
Wealden	Plugs	0	18	12	0	70
	Seitenwandkern	14	21	17	2	350
Dogger	Seitenwandkern	4	23	14	0,00	0,20
Keuper	Seitenwandkern	5	21	11	0,1	0,1
Mittlerer Buntsandstein Defurth-Folge	Plugs	0,3	2,3	1,1	0,02	0,87
Mittlerer Buntsandstein Volpriehausen-Folge	Plugs	0,1	1,9	0,9	0,00	0,02

9.2 Porositäten

Ein wichtiges Kriterium, in welchem sich tonreiche Gesteine von anderen Gesteinen signifikant unterscheiden, ist die Porosität. In Tongesteinen lassen sich in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode drei prinzipielle Porositätstypen unterscheiden (systematisiert in NAGRA 2002: 236-242): die physikalische Porosität, die Transportporosität und die geochemische Porosität (siehe u.a. PEARSON 1999). Unter physikalischer Porosität wird der Anteil eines Gesteins verstanden, welcher nicht durch Minerale (und organische Komponenten) eingenommen wird. Sie wird meist mit Methoden gemessen, welche sich die Dichteunterschiede zunutze machen; ferner existieren Injektions- oder Wasserverlustmethoden. Die in Transportexperimenten (z.B. Tracerversuche) ermittelte Transportporosität verwendet man zur Beschreibung der Fluidbewegung durch ein Gestein; sie bezeichnet denjenigen Porenanteil eines Gesteinsvolumens, der einen hydraulischen Transport von Fluiden im Untergrund zulässt. Hierbei handelt es sich um die vernetzten offenen Gesteinsporositäten, durch die in Poren oder in Klüften eine Grundwasserströmung erfolgen kann. Die Transportporosität wird weiter in Advektionsporosität und Diffusionsporosität (s. u.) unterteilt. Die Advektionsporosität ergibt sich aus dem Quotienten der Filtergeschwindigkeit (entsprechend dem Darcy-Gesetz) und der Abstandsgeschwindigkeit beim advektiven Transport gelöster Stoffe. Da sowohl isolierte Poren als auch nur einseitig angebundene Poren (Sackporen) an der Advektion nicht teilnehmen, ist die Advektionsporosität normalerweise geringer als die Gesamtporosität. Die Diffusionsporosität entspricht dem Teil des Porenraums, in dem sich gelöste Stoffe durch Diffusion ausbreiten können. Auf Grund der Wechselwirkung der transportierten Stoffe mit der Gesteinsmatrix erfolgt die Ausbreitung gelöster Stoffe unter Umständen nicht im gesamten Porenraum. Bei den Wechselwirkungen handelt es sich zum Großteil um elektrostatische Wechselwirkungen der geladenen Tonmatrix mit den ebenfalls geladenen Ionen, wie z.B. beim Anionenausschluss. Der Wert der Diffusionsporosität ist zwar von der Art des gelösten Stoffs abhängig, üblicherweise wird jedoch nur zwischen Anionen, Kationen und neutralen Stoffen unterschieden.

In der Hydrogeologie wird anstelle der Advektionsporosität häufig der Begriff der effektiven (auch offenen, wirksamen oder durchflusswirksamen) Porosität verwendet (DOMENICO & SCHWARTZ 1990). Die Advektionsporosität ist kleiner als die physikalische Porosität.

Die geochemische Porosität verwendet man zur Beschreibung der Veränderungen in Stoffkonzentrationen als Resultat von Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen und Transportprozessen. Sie hängt von der Ionenstärke des Porenwassers und der Porenstruktur ab (PEARSON 1999). Die geochemische Porosität für eine in Wasser gelöste Substanz (Wasserstoffisotope, Anionen, Kationen oder gelöste Gase) entspricht der Diffusionsporosität.

Geochemische und Diffusionsporosität sind vergleichbar, wenn die Bestimmung der Diffusionsporosität bei der in situ vorhandenen Ionenstärke erfolgt. In feinkörnigen Gesteinen hängen Diffusionsporosität und geochemische Porosität auch von der Ladung und Größe der Ionen ab. So haben elektrisch neutrale, gelöste Stoffe wie z.B. Helium und Wasserstoffisotope größere Diffusionsporositäten als im Wasser gelöste Anionen. Größere gelöste Anionen wie Br⁻ und I⁻ weisen geringere Diffusionsporositäten als kleinere Ionen wie Cl⁻ auf (NAGRA 2002: 242, 369).

Für die Grundwasserlaufzeitberechnungen werden numerische Angaben zu den wirksamen Porositäten benötigt. Durch die meisten Messverfahren werden im Gestein die Gesamtporositäten bestimmt; hieraus lässt sich jedoch die wirksame oder effektive Porosität abschätzen.

Tab. 26: Bandbreiten und Mittelwerte hydraulischer Parameter (Labortests) aus den Schichten im Bereich der Grube Konrad (MÜLLER et al. 1987)

Stratigraphie	effektive Porosität P* [%]		Durchlässigkeitsbeiwert k _f [m/s]		Luftpermeabilität [mD]**	
	Bereich	MW	Bereich	MW*	Bereich	MW
Ober-Albium	14,9 - 17,4	16,5	$2 \times 10^{-12} - <1 \times 10^{-11}$	$<1 \times 10^{-11}$	$<1 \times 10^{-4} - <1 \times 10^{-3}$	$<10^{-3}$
Mittel-Albium	14,5 - 20,4	17,8	$<2 \times 10^{-12} - <1 \times 10^{-11}$	$<1 \times 10^{-11}$	$<2 \times 10^{-4} - 1,1 \times 10^{-3}$	$<10^{-3}$
Unter-Albium	14,7 - 20,8	18,4	$6 \times 10^{-13} - 3 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-11}$	$6,1 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-4}$	$<10^{-4}$
Ober-Aptium	13,0 - 16,9	15,0	$2 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	$<10^{-4}$
Ober-Barremium	10,0 - 15,3	12,6	$6 \times 10^{-14} - 1 \times 10^{-10}$	$<1 \times 10^{-10}$	$6 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-2}$	$<10^{-2}$
Mittel-Barremium	13,4 - 17,5	15,5	$2 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-8}$	$<1 \times 10^{-8}$	$6,2 \times 10^{-4} - 5,0 \times 10^0$	$<10^{-4}$
Unter-Barremium	14,1 - 14,1	14,1	-	-	-	-
Ober-Hauterivium	13,6 - 13,6	13,6	5×10^{-12}	$<1 \times 10^{-8}$	$5,4 \times 10^{-4}$	$<10^{-2}$
Unter-Hauterivium	5,4 - 6,8	7,0	5×10^{-11}	-	$5,0 \times 10^{-3}$	-
Mittel-Callovium	5,9 - 13,3	10,9	$<1 \times 10^{-11}$	-	-	$<10^{-2}$
Unter-Callovium	11,1	-	$<1 \times 10^{-11}$	-	4×10^{-5}	-
Ober-Bathonium	11,5	-	$<1 \times 10^{-11}$	-	$1,7 \times 10^{-2}$	-
Mittel-Bajocium	-	-	$<1 \times 10^{-11}$	-	-	-

* Rissbildung in den Prüfkörpern äußert sich in schwankenden Werten für die Porosität. In Müller et al. (1986) wurden deshalb die Minimalwerte als am ehesten glaubwürdig bezeichnet. Es handelt sich demnach nicht um echte Mittelwerte!

** Bei der Permeabilitätsbestimmung wurde als Fließmedium Luft verwendet. Weitere Erläuterungen im Text. Als Ursache für die hohen Permeabilitäten ist Rissbildung möglich.

Angaben über die Porositäten der präquartären Schichten stammen aus Laboruntersuchungen an Kernen der Bohrung K 101 und an Gesteinsproben, die aus den Schächten, aus dem Grubengebäude und aus Erdölbohrungen entnommen worden sind. Bei Schichtgliedern, von denen keine Messwerte vorliegen, wurden über Analogieschlüsse, unter Berücksichtigung der Lithologie und der regionalen Geologie, Porositätswerte abgeschätzt. Die Bandbreiten der effektiven Gebirgsporositäten P^* [%] für die in den Modellen berücksichtigten hydrogeologischen Einheiten und die im Antragsteller- und im Gutachter-Modell Tab. 23) verwendeten Rechenwerte sind Tab. 26 zusammengestellt.

Tab. 27: Hydraulische Kennwerte der durchlässigen Sandsteine im Endlagerstandortmodell Nord

Schichteinheit	Mächtigkeit [m]	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	effektive Porosität P^* [%]
Hilssandstein (krlu) (Basis Albium)	35 m	10^{-5} m/s	10
Aalensandstein (jmal) (Basis Unt. Jura)	20 m	10^{-6} m/s	10
Rhaetiumsandstein (ko) (Top Keuper)	10 m	5×10^{-7} m/s	10

In Tab. 27 sind die hydraulischen Kennwerte für die durchlässigen Sandsteine im Endlagerstandortmodell Nord aufgelistet. Dazu werden folgende hydrogeologische Annahmen für weitere stratigraphische Abfolgen am Endlagerstandortmodell NORD getroffen: Die Sandsteine der Bückeberg-Formation (Wealden, Wd) sind mäßig bis hoch porös (7 % bis 22 %) und haben eine Permeabilität von bis zu 300 mD (vgl. ORILSKI et al. 2012). Für die wenige Zehner Meter mächtigen Schichten des Volpriehausen-Sandsteins und Detfurth-Sandsteins sind stark eingeschränkte Gesteinsdurchlässigkeiten anzunehmen. Die Porosität der Sandsteine des Volpriehausen (smV) und Detfurth (smD) ist kleiner als 4 % und die Permeabilität liegt unter 1 mD (vgl. ORILSKI et al. 2012, RÖHLING & HEINIG 2012).

Alle Werte werden für das Modell so festgelegt, dass sie den geologischen Verhältnissen von Lagerstätten entsprechen. Zum Teil entstammen sie Labormessungen mit unbekannter Kernqualität. Zudem wechselt die Lithofazies oft kleinräumig, so dass sich die Werte nicht über größere Entfernungen extrapolieren lassen. In der entsprechenden Tiefenlage der Sandsteine und außerhalb von Lagerstätten sind die angegebenen hydraulischen Kennwerte vermutlich deutlich geringer.

9.3 *Biot-Koeffizient*

Der Biot-Koeffizient α beschreibt in Abhängigkeit vom porösen Gefüge des Gesteins die mechanische Wirksamkeit des Porenwasserdrucks auf das Korngerüst, d.h. die Effektivität der Druckübertragung. Er variiert zwischen 0 und 1 und errechnet sich aus der Porosität n gemäß der Formel

$$\alpha_{\min} = (3n) / (2 + n) \quad (4)$$

Für ihre Zusammenstellung der Parameter für die Gebirgseigenschaften des Tonsteins am Modellstandort Unterkreide Norddeutschland (JOBMANN et al. 2007) haben LUX et al. (2010: 87) unter Verwendung der in MARTIN (2007) angegebenen Werte einen Biot-Koeffizienten von $\alpha = 0,6$ berechnet.

9.4 *Biot-Modul*

Der Biot-Modul M [MPa] beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Kompressionsmodul des Fluids K_f [MPa], dem Kompressionsmodul der Gesteinsmatrix K [MPa], dem Biot-Koeffizienten α [-] sowie der Porosität n [-]. Er errechnet sich gemäß

$$M = \frac{K_f}{n + (\alpha - n) \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{K_f}{K}} \quad (5)$$

Werte für den Biot-Modul sind für Tongesteine aus der Modellregion nicht publiziert, lassen sich aber aus den o. a. Gesteinsparametern berechnen.

10 *Mineralogische und sedimentpetrographische Parameter*

10.1 *Mineralogische Zusammensetzung*

Daten zur mineralogischen Zusammensetzung von Tongesteinen aus der Unterkreide des Ostteils des Niedersächsischen Unterkreidebeckens sind von vielen Lokalitäten bekannt. Dazu zählen die Bohrungen Wichendorf 1/86, Hoheneggelsen KB9 und Ahlum 1 (MÜLLER 1995 vgl. Tab. 29), die Tongruben Hoheneggelsen (LIPPMANN 1955) und Sarstedt (KEMPER & ZIMMERLE 1978 vgl. Tab. 30) sowie die Bohrung Konrad 101 und die Schachtbohrungen Konrad 1 und 2 (Daten dazu kompiliert in GERARDI 2005). Die letzten drei Arbeiten sind die einzigen, die ein vollständiges Unterkreide-Profil erschlossen haben, von dem ein vollständiger Datensatz zur mineralogischen Zusammensetzung der dabei angetroffenen

Tongesteine existiert (vgl. Tab. 28). Infolgedessen werden für die Aussagen zur Mineralogie der Tongesteine des Endlagerstandortmodells NORD vor allem diese Daten herangezogen.

Die Hauptkomponenten (vgl. Tab. 28) der in der Bohrung Konrad 101 angetroffenen Sedimente des Hauterivium und Barremium (Wirtsgestein im Endlagerstandortmodell NORD) sind Schichtsilikate (35 % bis 52 %), Quarz (13 % bis 30 %) und die Karbonate (Calcit, Dolomit und Siderit, 7 % bis 55 %, GERARDI 2005). Hier sind über die gesamte Schichtenfolge der mittleren Unterkreide (ausgehend vom Unter-Hauterivium bis zum Ober-Barremium) generelle Trends zur Abnahme der Karbonat- und zur Zunahme der Tongehalte festzustellen. Die Gehalte an quellfähigen Tonmineralen (Smektit/Montmorillonit sowie Wechsellagerungsminerale/Mixed Layer) lassen hingegen keine Aussage zu einem Trend zu. An Tongesteinen aus dem Ober-Barremium aus drei verschiedenen Bohrungen (Wichendorf 1/86, Hoheneggelsen KB9, Ahlum 1) ermittelte MÜLLER (1995 vgl. Tab. 28) deren mineralogische Zusammensetzungen via IR-Spektroskopie. Während die von ihm bestimmten Gehalte für Muskovit/Illit und Kaolinit mit den Ober-Barremium-Werten der Bohrung Konrad 101 sehr gut übereinstimmen, erhielt er wesentlich geringere Quarz-Werte, aber erstaunlich hohe Smektit-Werte, die in den Bohrungen im Mittel zwischen 25 und 33 % schwanken. LENZ et al. (1986), die ebenfalls Ober-Barremium-Sedimente aus der Bohrung Ahlum 1 untersuchten, fanden hier allerdings keinen Smektit, jedoch Werte, die im Allgemeinen recht gut mit denen der Ober-Barremium-Sedimente aus der Bohrung Konrad 101 übereinstimmen.

Tab. 28: Schwankungsbreiten (Minimum - Maximum) und Durchschnittsgehalte (MW) im Mineralbestand von Hauterivium und Barremium in den in der Bohrung Konrad 101 angetroffenen Sedimenten (aus: GERARDI 2005)

Mineral	Hauterivium				Barremium					
	Unter-Hauterivium		Ober-Hauterivium		Unter-Barremium		Mittel-Barremium		Ober-Barremium	
	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW
Quarz	4 – 29	13	17 – 29	23	6 – 49	25	23 – 37	30	20 – 31	26
Feldspat	2 – 4	3	1 – 3	2	2 – 7	3	1 – 2	2	1 – 10	3
Muskovit/Illit	2 – 27	15	20 – 36	23	15 – 37	23	10 – 23	16	15 – 25	19
Kaolinit	2 – 15	8	12 – 20	15	4 – 23	13	14 – 24	19	15 – 27	20
Chlorit	2 – 8	4	6 – 8	6	2 – 8	5	5 – 6	5	5 – 10	8
Smektit	2 – 6	4	2 – 2	2	-	-	3 – 3	3	-	-
Mixed Layer	3 – 5	4	-	-	5 – 8	6	5 – 10	8	5 – 5	5
Σ Tonminerale		35		46		47		51		52
Gips	2 – 2	2	-	-	2 – 12	7	2 – 2	2	2 – 5	4
Pyrit	1 – 8	5	2 – 9	5	3 – 33	8	3 – 8	5	2 – 9	5
Calcit	14 – 79	36	5 – 31	17	1 – 24	8	1 – 6	4	1 – 3	2

Mineral	Hauterivium				Barremium					
	Unter-Hauterivium		Ober-Hauterivium		Unter-Barremium		Mittel-Barremium		Ober-Barremium	
	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW
Dolomit	6 – 8	7	2 – 6	5	3 – 10	5	7 – 7	7	4 – 5	5
Siderit	12 – 12	12	-	-	3 – 14	6	-	-	-	-
Σ Karbonate		55		22		19		11		7
Goethit	20 – 20	20	-	-	3 – 3	3	-	-	-	-
Apatit	-	-	-	-	2 – 3	3	3 – 3	3	-	-
röntgenamorphe Komponente	5 – 22	13	3 – 19	8	1 – 15	9	4 – 36	19	1 – 31	16
organisches Material	-	0,4	-	0,7	-	1,85	-	3	-	1,5

Möglicherweise liefert die von MÜLLER (1995) verwendete Analytik (IR-Spektroskopie) bei schlecht mit dieser Methode nachweisbaren Phasen wie Smektit/Montmorillonit fehlerhafte Werte, zumal auch LIPPMANN (1955) sowie KEMPER & ZIMMERLE (1978, vgl. Tab. 29) an – allerdings aus Tagesaufschlüssen stammenden – Ober-Barremium-Sedimenten keine quellfähigen Tonminerale wie Smektit/Montmorillonit oder Wechsellagerungsminerale identifiziert haben. Auch DILL (1995) stellte bei der quantitativen Charakterisierung der Phyllosilikate der Bohrung Ahlum 1 für das Barremium eine Dominanz von Kaolinit, Illit sowie Chlorit fest. Smektit und Wechsellagerungsminerale treten danach erst ab dem Übergangsbereich Barremium/Aptium und verstärkt ab dem Unter-Albium auf.

Tab. 29: Schwankungsbreiten und Durchschnittsgehalte von Tongesteinen aus dem Ober-Barremium aus den Bohrungen Wichendorf 1/86, Hoheneggelsen KB9 und Ahlum 1 (aus: MÜLLER 1995 (Spalten 1-3) und LENZ et al. 1986 a, b (Spalten 4-5)).

Mineral	1		2		3		4		5	
	Bhrg. Wichendorf 1/86		Bhrg. Hoheneggelsen KB9		Bhrg. Ahlum 1		Bhrg. Ahlum 1		Bhrg. Ahlum 1	
	Ober-Barremium		Ober-Barremium		Ober-Barremium		Mittel-Barremium		Ober-Barremium	
	7 Analysen über 20-m-Profil		3 Analysen über 2,3-m-Profil		3 Analysen über 6,2-m-Profil		Profil über 53 m		Profil über 53 m	
	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW
Quarz	6 – 19	11,7	5 – 16	12,0	11 – 13	12,3	-	15	-	10
Feldspat	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Muskovit/Illit	3 – 58	34,3	22 – 25	23,7	6 – 34	24,0	-	20	-	20
Kaolinit	12 – 28	19,1	9 – 24	18,7	17 – 25	21,7	-	20	-	20
Chlorit	0 – 3	0,4	0 – 0	0	0 – 0	0	-	10	-	10
Smektit	4 – 48	26,9	19 – 35	29,0	29 – 33	31,3	-	-	-	-

Mineral	1		2		3		4		5	
	Bhrg. Wichendorf 1/86		Bhrg. Hoheneggelsen KB9		Bhrg. Ahlum 1		Bhrg. Ahlum 1		Bhrg. Ahlum 1	
	Ober-Barremium		Ober-Barremium		Ober-Barremium		Mittel-Barremium		Ober-Barremium	
	7 Analysen über 20-m-Profil		3 Analysen über 2,3-m-Profil		3 Analysen über 6,2-m-Profil		Profil über 53 m		Profil über 53 m	
	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW
Mixed Layer	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
Σ Tonminerale		80,7		71,4		77,0		51		50
Gips	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pyrit	2 – 10	4,0	2 – 6	3,7	1 – 5	3,0	-	1	-	5
Calcit	0 – 10	3,6	0 – 39	13	0 – 23	7,7	-	10	-	(20)
Dolomit	-	-	-	-	-	-	-	5	-	1
Siderit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ Karbonate		3,6		13		7,7		7,72		3,85
röntgenamorphe Komponente	-	-	-	-	-	-	-	15	-	10
organisches Material	-	-	-	-	-	-	0,81-3,06	1,9	-	3,21

Bei der Gegenüberstellung der in der Bohrung Konrad 101 angetroffenen Sedimente des Hauterivium und Barremium mit Tongesteinen aus ähnlichen, gut untersuchten tonreichen Formationen (NAGRA 2002: 233) wird deutlich, dass vergleichbare mineralogische Zusammensetzungen vorliegen (Abb. 3).

Im Schacht Konrad 2 wurde von der im unteren Ober-Barremium (früher: Mittel-Barremium) über die Vorbohrung B10 aufgefahrenen 541-m-Sohle die insgesamt 55 m lange Vertikalbohrung V106 abgeteuft, die das Unter-Barremium durchteufte und hier den Hauptblättertton antraf. Auch hier wurde für das Barremium als genereller Trend die Zunahme des Karbonatgehaltes auf Kosten von Quarz, Muskovit/Illit und Kaolinit festgestellt. Der Karbonat-Gehalt dieser Gesteine ist im Wesentlichen auf Calcit zurückzuführen; ausnahmsweise kann auch Siderit in erheblichem Maße zum Gesamtkarbonatgehalt beitragen.

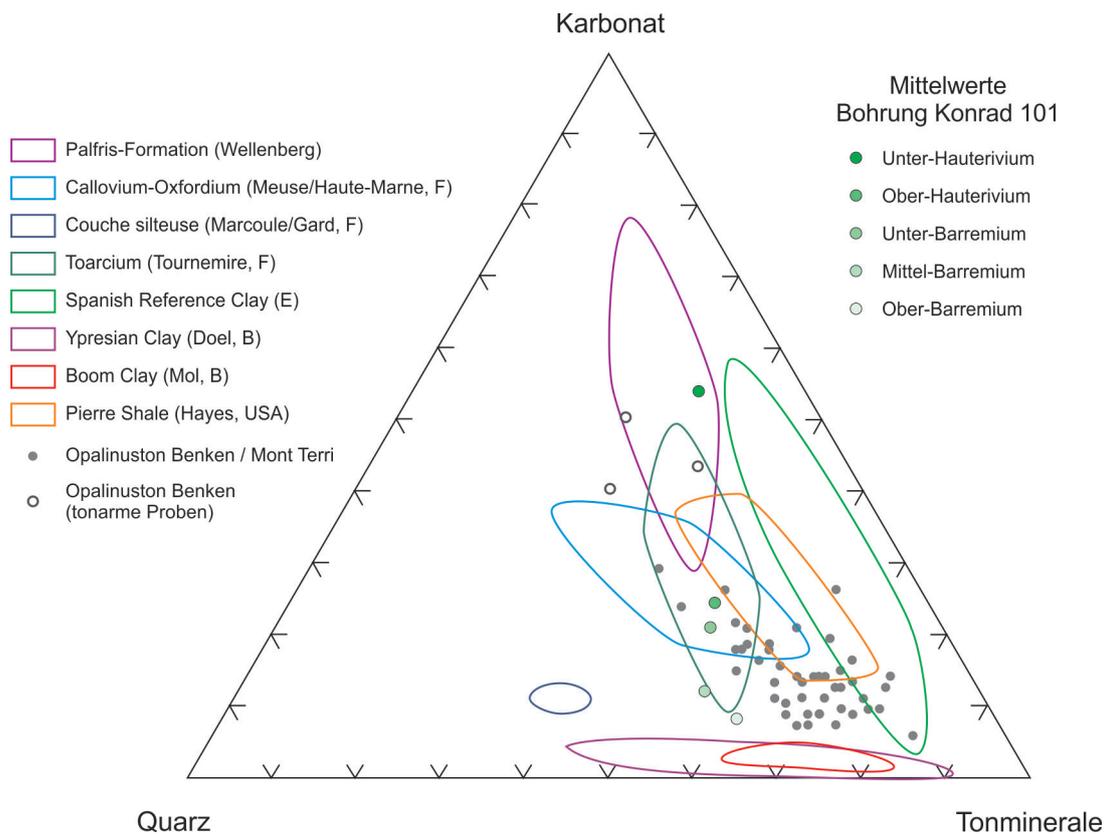


Abb. 3: Mittlere mineralogische Zusammensetzung der Hauterivium- und Barremium-Tongesteine der Bohrung Konrad 101 im Vergleich zum Opalinuston und anderen ebenfalls gut untersuchten tonreichen Formationen (nach: NAGRA 2002, verändert)

Als Hauptkomponenten (> 20%) wurden Muskovit/Illit und Quarz, als Nebenkompone (10–20 %) Kaolinit ermittelt. In wenigen Fällen ist Calcit ebenfalls als Nebenkompone, ansonsten in der Größenordnung Nebenkompone bis Spuren (5–10 %) angetroffen worden. Die restlichen Phasen (Feldspat, Gips, Pyrit, Dolomit, Siderit, Halit, Rutil) liegen in Gehalte < 5 % (Spuren) vor. Die an den Gesteinen des Unter-Barremium durchgeführten Wassergehaltsbestimmungen lassen sich fast ausschließlich auf adhäsiv gebundenes Wasser (Porenwasser) zurückführen. Die Anteile an Wasser aus den Zwischenschichten von Smektit und Illit sind vernachlässigbar klein. Die Wassergehalte variieren zwischen 0,7 Gew.-% und 6,7 Gew.-% bei einem Mittelwert von $5,6 \pm 1,1$ Gew.-%. Wasser- und Gesamtkarbonat-Gehalt korrelieren negativ miteinander (MATTIAT & KREIMEYER 1991: Abb. 2). Zum Vergleich: die Wassergehalte des Opalinustons der Bohrung Benken schwanken zwischen 3,6 Gew.-% und 4,0 Gew.-% (NAGRANTB 02-03: 289). In PEARSON et al. (2003: 52) werden Wassergehalte (bestimmt durch Masseverlust bei Aufheizung bis 105 °C) getrennt nach der Fazies des Opalinustons angegeben. In der sandigen Fazies variiert der Wassergehalt von 5,26 Gew.-% bis 7,80 Gew.-%, in der karbonatreichen, sandigen Fazies von 5,27 Gew.-% bis 7,49 Gew.-%, in der tonigen Fazies von 5,12 Gew.-% bis 8,58 Gew.-%.

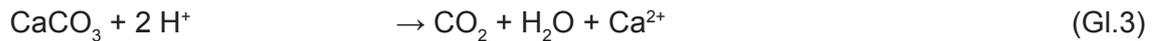
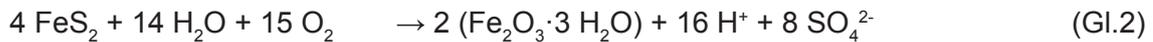
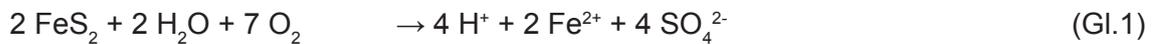
Tab. 30: Schwankungsbreiten und Mittelwerte (MW) der mineralogischen Zusammensetzung von Tongesteinen aus den Tongruben Hoheneggelsen und Sarstedt (aus: 1 - LIPPMAN (1955), 2 - KEMPER & ZIMMERLE (1978))

	1		2	
	Tongrube Hoheneggelsen		Tongrube Sarstedt	
	Ober-Barremium		Unter-Barremium	
	2 Analysen über 2,3-m-Profil		2 Analysen	
	Bereich	MW	Bereich	MW
Quarz	18 – 22	20	30 – 40	-
Feldspat	Spuren	-	-	-
Muskovit/Illit	48 – 52	50	20	-
Kaolinit	12 – 18	15	20	-
Chlorit	Spuren	-	-	-
Smektit	-	-	-	-
Mixed Layer	-	-	-	-
Σ Tonminerale		65		
Gips	-	-	-	-
Pyrit	Spuren	-	< 5	-
Calcit	Spuren	-	10 – 20	-
Dolomit	-	-	< 3	-
Siderit	-	-	-	-
Σ Karbonate				
röntgenamorphe Komponente	-	-	-	-
organisches Material	1,11 -1,14	1,12	1,99 – 2,02	-

Abschließend lässt sich mit MATTIAT & KREIMEYER (1991) feststellen, dass die Schichten des Barremium, insbesondere die des Mittel- und des Unter-Barremium, im Material aus dem Schacht 2 (541-m-Sohle) durch einen relativ stark schwankenden Mineralbestand gekennzeichnet sind.

Die Schichten des Hauterivium und des Barremium können zum Teil beträchtliche Pyrit-Gehalte aufweisen. Diese Pyrit-Gehalte sind zum Teil fein verteilt, zum Teil auch an Konkretionen und Knollen gebunden und füllen z.B. Grabgänge aus (GERARDI 1986, Teil 2). Insbesondere bei den Blättertonen des Unter-Barremiums sind sehr hohe Pyrit-Gehalte bis zu 33 % (im Mittel 8 % Tab. 28) zu konstatieren, die als Füllungen der Grabgänge von im Sediment lebenden Organismen sowie in Form von Konkretionen und Knollen „makroskopisch ... massenhaft“ vorliegen (GERARDI 1986, Teil1: 11). Pyritreiche Bohrkerne aus der Bohrung 101 dehnten sich an der Luft bis zu 10 % aus (GERARDI 1986, Teil 2: 21). Dies erfolgt durch Kristallisationsdruck infolge von Oxidation des Pyrits und Entstehung von Schwefelsäure (Gl.1), die darauf folgende Zersetzung der Karbonate

(Gl.3) sowie anschließende Neubildung von Gips (Gl.4). In sehr Wasser- und Sauerstoffreicher Umgebung entstehen bei der Pyritverwitterung neben Schwefelsäure hydratisierte Eisenoxide (Gl.2).



Die Gesamtschwefel-Gehalte der Blättertone korrelieren mit den Sulfidmineralen wie Pyrit (GERARDI 1986, Teil 1: 11) bzw. mit den Gehalten an C_{org} (BEYER 1988: 36).

Die C_{org} -Gehalte zeigen in der Bohrung V106 eine deutliche Teufenabhängigkeit (MATTIAT & KREIMEYER 1991: 9). Auf den ersten 25 m (entspricht grob dem unteren Ober-Barremium) liegen Werte zwischen 1,41 % und 2,70 % (Mittel $2,1 \pm 0,37$ %) vor. Von 26 m bis 40 m Bohrstrecke (entspricht dem Hauptblätterton des Unter-Barremium) steigen die Werte abrupt auf 2,10 % bis 3,83 % (Mittel $3,1 \pm 0,47$ %) an und gehen ab ca. 40 m Bohrstrecke ebenso sprunghaft auf Werte zwischen 0,78 % und 1,30 % (Mittel $1,0 \pm 0,15$ %) zurück. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Sedimente ab ca. 46 m Bohrstrecke unterhalb der 541-m-Sohle wahrscheinlich schon zum Ober-Hauterivium gehören (MATTIAT & KREIMEYER 1991: 15). Die hohen Gehalte an organischer Substanz wie auch an Pyrit sind für die Blättertone des Barremium sehr charakteristisch und weisen auf die Kohlenwasserstoffpotentiale dieser Sedimente hin (GAIDA et al. 1981, ČEPEK & KEMPER 1981, KEMPER & ZIMMERLE 1978, RULLKÖTTER et al. 1995). Allerdings hat das organische Material der Blättertone und des Fischeschiefers nicht die thermische Reife zur Bildung von Öl und Gas erreicht. Auch in den Arbeiten von RÖSCH (1985) und BEYER (1988) (vgl. Tab. 31) sowie MÜLLER (1995), LENZ et al. (1986 a, b) (vgl. Tab. 29), LIPPMANN (1955) und KEMPER & ZIMMERLE (1978) (vgl. Tab. 30) wird deutlich, dass die Sedimente des Barremium, insbesondere die Blättertone des Unter-Barremium, relativ hohe Gehalte an organischem Kohlenstoff C_{org} aufweisen, während die Tongesteine des Hauterivium deutlich ärmer an organischem Kohlenstoff sind.

Tab. 31: Schwankungsbreiten und Mittelwerte (MW) der Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) in Sedimenten aus der Bohrung Konrad 101 (RÖSCH 1985, BEYER 1988) und dem Schacht Konrad 2 (MATTIAT & KREIMEYER 1991)

Hauterivium				Barremium						Literatur
Unter-Hauterivium		Ober-Hauterivium		Unter-Barremium		Mittel-Barremium		Ober-Barremium		
Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	Bereich	MW	
0,17-0,50	0,37	0,62-0,85	0,76	0,68-3,04	2,28	1,02-4,36	2,31	1,36-4,49	2,19	RÖSCH (1985)
0,3-0,6	0,45	0,7-0,9	0,8	-	2,4	-	2,4	-	2,5	BEYER (1988)
-	-	0,78-1,30	1,0	2,10-3,83	3,1	1,41-2,70	2,1	-	-	MATTIAT & KREIMEYER (1991)

10.2 Korngrößenverteilungen

In den Sedimentgesteinen der Bohrung Konrad 101 sowie der Schachtwiderlagerbohrungen in den Schächten Konrad 1 und 2 wurden zum Teil sehr detaillierte Untersuchungen zur Korngrößenverteilung durchgeführt. Aus den Untersuchungen von RÖSCH (1985) und ECKARDT et al. (1989) ergibt sich, dass der Anteil der Tonfraktion ($< 2 \mu\text{m}$) in allen Schichten des Wirtsgesteins über 40 Gew.-% liegt (siehe Tab. 32). Im Unter-Hauterivium ist der Wert mit 61,4 Gew.-% am größten, im Unter-Barremium mit 42,6 Gew.-% am geringsten. Vom Unter- über das Mittel- bis zum Ober-Barremium nimmt der Anteil der Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ stetig zu. Bei fast allen Tongesteinen dominiert der Anteil des Ton- und Schluffbereichs; die Anteile der Korngrößen $> 63 \mu\text{m}$ liegen zumeist deutlich unter 2 Gew.-%. Nur wenige Proben zeigen Werte um 4 Gew.-%.

Tab. 32: Minima, Maxima und Mittelwerte der Gewichtsanteile der Korngrößenfraktionen von Tongesteinen des Barremium und Hauterivium der Bhrg. Konrad 101. Zum Vergleich ist die Korngrößenverteilung einer im Ober-Barremium angetroffenen Sandlage angegeben (aus: RÖSCH 1985 und ECKARDT et al. 1989).

Stratigraphie Probenanzahl	Fraktion	Minimum [Gew.-%]	Maximum [Gew.-%]	Mittelwert [Gew.-%]
Ober-Barremium n = 9	< 2 µm	39,7	60,6	51,9
	2-6,3 µm	14,1	22,0	17,7
	6,3-20 µm	16,4	22,8	20,7
	20-63 µm	2,7	16,6	8,3
	> 63 µm	0,1	4,2	1,2
Sandlage im Oberbarremium bei 500,95 m n = 1	< 2 µm	-	-	6,3
	2- 6,3 µm	-	-	5,6
	6,3-20 µm	-	-	8,4
	20- 63 µm	-	-	6,8
	> 63 µm	-	-	72,8
Mittel-Barremium n = 13	< 2 µm	38,8	52,4	47,9
	2-6,3 µm	12,9	22,7	17,4
	6,3-20 µm	19,8	25,3	21,6
	20-63 µm	7,2	19,3	12,0
	> 63 µm	0,3	2,1	0,9
Unter-Barremium n = 12	< 2 µm	34,1	49,5	42,6
	2-6,3 µm	11,8	24,2	20,4
	6,3-20 µm	18,8	27,0	23,8
	20-63 µm	6,5	19,4	12,6
	> 63 µm	0,1	1,4	0,6
Ober-Hauterivium n = 8	< 2 µm	43,2	59,5	53,8
	2-6,3 µm	14,9	23,7	17,9
	6,3-20 µm	18,1	22,3	19,9
	20-63 µm	2,7	15,1	7,3
	> 63 µm	0,3	2,1	1,0
Unter-Hauterivium n = 2	< 2 µm	56,9	65,9	61,4
	2-6,3 µm	12,0	17,2	14,6
	6,3-20 µm	14,2	14,4	14,3
	20-63 µm	2,3	8,8	5,5
	> 63 µm	0,2	3,8	2,0

Ergänzend ist in Tab. 32 die Korngrößenverteilung einer geringmächtigen (< 10 cm) Sandlage im Ober-Barremium bei 500,95 m uNN aufgeführt.

RÖSCH (1985) hat ferner an acht Proben nach dem röntgenographisch ermittelten Mineralbestand der entkarbonatisierten Gesamtprobe Atterberg-Fraktionierungen in Kornklassen (< 2 µm, 2-20 µm und > 20 µm) vorgenommen.

Tab. 33: Anteile der Mineralien an den Fraktionen < 2 µm, 2-20 µm und > 20 µm einiger dekarbonatisierter Tongesteine der Bohrung Konrad 101 im Vergleich zur Gesamtprobe GP. Für die Gesamtprobe sind zusätzlich die CaO-Gehalte (RFA) sowie die Gehalte an Gesamt-Kohlenstoff C_{ges} und organischer Komponente C_{org} angegeben (aus: RÖSCH 1985).

Probe	Fraktion [µm]	Quarz	Muskovit / Illit	Kaolinit	Smektit	Chlorit	Anteil TM	Feldspat	AK	Pyrit	Apatit	Calcit	CaO (RFA)	C _{ges}	C _{org}
		GP – Gesamtprobe, AK – röntgenamorphe Komponente, TM - Tonminerale. Alle Angaben in Gew.-%.													
Ober-Barremium 484 m uNN	GP	28	25	20	-	8	-	2	16	-	-	1	0,74	1,47	1,41
	< 2	5	35	50	-	10	85	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-20	30	35	35	-	5	-	-	-	5	-	-	-	-	-
	> 20	50	5	5	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-
Ober-Barremium 497 m uNN	GP	31	23	27	-	5	-	10	1	2	-	1	0,51	1,45	1,36
	< 2	10	45	40	-	5	90	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-20	25	30	30	-	5	-	5	-	5	-	-	-	-	-
	> 20	50	4	8	-	-	-	8	20	10	-	-	-	-	-
Mittel-Barremium 521 m uNN	GP	26	10	19	-	5	-	-	28	8	-	4	2,08	4,67	4,36
	< 2	5	45	35	-	10	90	-	-	5	-	-	-	-	-
	2-20	45	15	20	-	5	-	-	-	15	-	-	-	-	-
	> 20	55	8	10	-	2	-	-	10	15	-	-	-	-	-
Mittel-Barremium 530 m uNN	GP	29	19	14	3	5	-	2	19	5	-	4	2,06	3,70	3,26
	< 2	5	45	40	-	10	95	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-20	30	25	25	-	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-
	> 20	40	15	15	-	-	-	-	20	10	-	-	-	-	-
Mittel-Barremium 533 m uNN	GP	34	23	20	-	5	-	2	6	5	3	2	0,88	1,70	1,51
	< 2	5	45	40	-	10	95	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-20	25	20	35	-	9	-	3	-	8	-	-	-	-	-
	> 20	55	10	8	-	-	-	2	10	15	-	-	-	-	-
Unter-Barremium 555 m uNN	GP	25	25	23	-	5	-	2	12	3	3	2	1,18	2,49	2,43
	< 2	5	45	45	-	5	95	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-20	25	20	35	-	5	-	-	-	15	-	-	-	-	-
	> 20	35	10	10	-	-	-	-	20	25	-	-	-	-	-
Ober-Hauterivium 603 m uNN	GP	29	24	14	-	6	-	-	19	2	-	6	3,50	1,62	0,85
	< 2	5	50	25	-	20	95	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-20	35	25	20	-	10	-	5	-	5	-	-	-	-	-
	> 20	50	10	5	-	5	-	-	15	15	-	-	-	-	-
Ober-Hauterivium 575 m uNN	< 2	5	45	40	-	10	95	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-20	30	25	25	-	10	-	5	-	5	-	-	-	-	-
	> 20	55	15	15	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-

Die einzelnen Fraktionen wurden wiederum röntgenographisch auf ihren Mineralbestand hin untersucht (siehe Tab. 33). Es zeigt sich, dass die Fraktion < 2 µm zu 85 % bis 95 % aus Tonmineralen, die Fraktion > 20 µm dagegen in fast allen Fällen zur Hälfte aus Quarz besteht.

Tab. 34: Korngrößenverteilung sowie Gesamtkarbonat- und CaO-Gehalte der Bohrung V104 ins Liegende der 541-m-Strecke, Schacht Konrad 2 (aus: MATTIAT & KREIMEYER 1991).

Bohrstrecke Entfernung von der 541-m-Sohle [m]	Fraktionen [Gew.-%]					Gesamtprobe [Gew.-%]		
	< 2 µm	2-6,3 µm	6,3-20 µm	20-63 µm	> 63 µm	Karbonat (Scheibler)	CaO (RFA)	Calcit (XRD)
2,72-2,90	45,9	19,5	22,7	11,6	0,3	4,0	1,78	< 5
3,52-3,69	47,1	17,5	19,9	13,1	2,4	10,0	4,85	5-10
6,61-6,80	43,9	20,9	23,4	11,3	0,4	3,8	1,95	< 5
9,19-9,42	47,4	14,8	20,6	16,3	0,9	7,2	3,20	5-10
10,64-10,80	42,7	19,5	22,2	15,1	0,5	5,6	2,86	5-10
12,07-12,27	4,9	4,3	15,0	4,9	70,9	79,1	41,02	76
12,50-12,73	43,7	20,2	22,6	13,1	0,4	9,9	5,06	5-10
14,72-14,87	42,7	21,5	26,7	8,5	0,5	6,2	3,23	< 5
19,53-19,68	43,9	20,3	22,7	12,0	1,0	14,3	7,39	11
20,52-20,68	41,3	23,9	22,0	12,4	0,4	24,0	14,28	20
23,59-23,80	46,4	19,3	23,0	9,6	1,7	2,4	0,99	< 5
24,54-24,75	37,8	21,7	25,3	14,9	0,3	18,4	9,82	16
26,00-26,19	35,7	23,2	27,5	13,4	0,2	8,1	4,56	5-10
28,75-28,90	37,6	19,7	27,9	14,5	0,2	10,4	4,85	5-10
30,94-31,10	34,5	22,9	29,2	12,7	0,7	12,9	6,38	10
33,39-33,59	38,8	23,0	27,2	10,7	0,2	13,0	6,33	10
37,10-37,30	38,0	23,9	26,6	10,9	0,5	8,4	4,35	5-10
38,80-39,04	45,9	24,8	22,0	6,8	0,6	5,6	2,82	< 5
40,80-41,00	43,0	23,7	25,2	6,3	1,8	12,7	4,93	5-10
43,05-43,37	48,7	18,6	23,0	8,9	0,8	7,5	3,26	5-10
46,87-47,00	47,4	20,8	22,3	9,0	0,8	22,1	10,85	19
48,69-48,87	47,6	18,0	20,8	12,6	1,1	18,0	8,89	13
49,37-49,50	46,5	19,6	17,2	16,0	0,7	26,1	16,17	23
50,23-50,36	51,7	21,4	18,1	8,4	0,4	21,1	10,95	18
	Anteil CaO an der Fraktion [Gew.-%]							
2,72-2,90	2,23	1,61	2,05	1,28	-	-	-	-
12,07-12,27	25,45	39,78	44,90	37,07	41,29	-	-	-
28,75-28,90	3,52	6,47	4,69	4,88	-	-	-	-

Durch die Entkarbonisierung der Proben sind keine Aussagen zur Anreicherung der Karbonate in einer oder mehrerer Fraktionen möglich. Nach den Untersuchungen von BEYER (1988) sind Korngröße und Mineralogie bzw. Chemismus der unterkretazischen Tongesteine der Bohrung Konrad 101 grob miteinander korreliert. Die mittlere Korngröße der Tongesteine nimmt mit steigendem Gehalt an Al_2O_3 , der vor allem auf die Tonminerale zurückzuführen ist, ab. Beide sind negativ korreliert. Umgekehrt zeigt die mittlere Korngröße der Tongesteine eine positive Korrelation mit dem Wert für CaO, der vor allem auf den Calcit-Gehalt zurückzuführen ist. Auch die Summe aus Calcit und Quarz weist eine positive Korrelation mit der mittleren Korngröße auf.

Einige der von der 541-m-Sohle (Schacht Konrad 2, Mittel-Barremium) ins Liegende gestoßenen Bohrungen haben das Unter-Barremium durchteuft und das Ober-Hauterivium erreicht (MATTIAT & KREIMEYER 1991). Diese Bohrungen wurden z.T. alle 50 cm beprobt und die Proben anschließend für Korngrößenanalysen in die Fraktionen $< 2 \mu m$, 2-6,3 μm , 6,3-20 μm , 20-63 μm und $> 63 \mu m$ zerlegt. Karbonatgehalte nach der Scheibler-Methode sind zum Teil an den Fraktionen, zum Teil an den Gesamtproben bestimmt worden. An allen Fraktionen wurden auch quantitative Analysen zu den Hauptelementen (auch CaO-Gehalte) durchgeführt. Für alle Gesamtproben und wenige Fraktionen existieren auch halbquantitative Röntgenphasenanalysen.

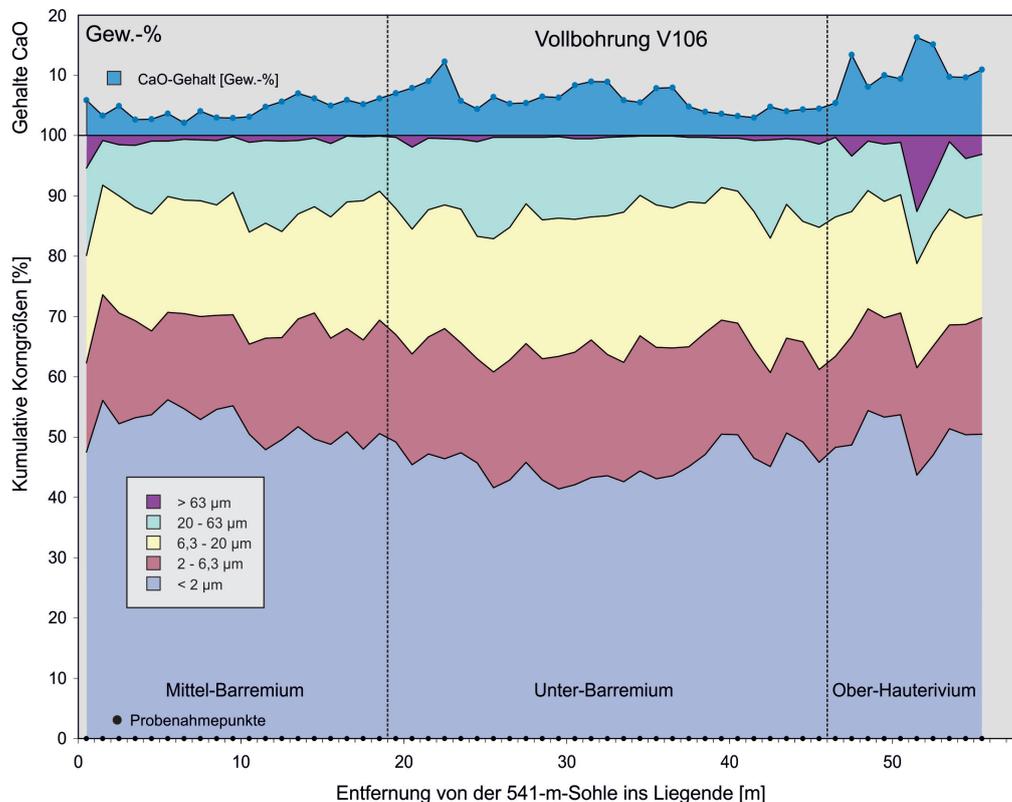


Abb. 4: Korngrößenverteilung sowie Gehalte an CaO der Proben aus der Bohrung V106, Schacht Konrad 2. Daten aus: MATTIAT & KREIMEYER (1991).

Tab. 35: Korngrößenverteilung [Gew.-%] sowie CaO-Gehalte [Gew.-%] der Bohrung V106 ins Liegende der 541-m-Strecke, Schacht Konrad 2 (aus: MATTIAT & KREIMEYER 1991).

Entfernung [m] von der 541-m-Sohle [m]	Fraktion [Gew.-%]					CaO (Gesamtprobe)	Entfernung [m] von der 541-m-Sohle [m]	Fraktion [Gew.-%]					CaO (Gesamtprobe)
	< 2 µm	2-6,3 µm	6,3-20 µm	20-63 µm	> 63 µm			< 2 µm	2-6,3 µm	6,3-20 µm	20-63 µm	> 63 µm	
0-1	47,5	14,8	17,8	14,5	5,5	5,84	28-29	42,9	20,1	23,0	13,7	0,3	6,45
1-2	56,1	17,5	18,2	7,4	0,8	3,28	29-30	41,4	22,0	22,9	13,5	0,2	6,27
2-3	52,2	18,4	19,4	8,5	1,5	4,88	30-31	42,1	22,0	22,0	13,4	0,4	8,32
3-4	53,2	16,1	18,8	10,3	1,6	2,63	31-32	43,3	22,8	20,4	13,0	0,6	8,91
4-5	53,7	13,9	19,4	12,1	0,9	2,68	32-33	43,6	20,1	23,0	13,0	0,3	8,90
5-6	56,2	14,5	19,2	9,2	0,9	3,60	33-34	42,6	19,8	24,9	12,5	0,2	5,83
6-7	54,7	15,8	18,8	10,1	0,6	2,08	34-35	44,4	22,4	23,3	9,8	0,1	5,46
7-8	52,9	17,1	19,2	10,1	0,7	4,01	35-36	43,1	21,8	23,6	11,4	0,2	7,83
8-9	54,6	15,6	18,3	10,7	0,8	2,94	36-37	43,6	21,2	23,2	11,9	0,1	7,92
9-10	55,2	15,1	20,3	9,2	0,2	2,88	37-38	45,1	19,9	24,0	10,7	0,2	4,79
10-11	50,5	14,9	18,6	14,9	1,2	3,08	38-39	47,1	20,2	21,5	10,9	0,3	3,91
11-12	47,9	18,5	19,1	13,7	0,8	4,74	39-40	50,5	18,9	22,0	8,2	0,4	3,57
12-13	49,6	16,9	17,6	15	0,9	5,61	40-41	50,4	18,5	21,9	8,8	0,5	3,22
13-14	51,7	17,9	17,4	12,2	0,7	6,97	41-42	46,5	18,0	22,9	11,8	0,8	2,94
14-15	49,7	20,9	17,6	11,4	0,4	6,13	42-43	45,1	15,6	22,3	16,3	0,7	4,74
15-16	48,8	17,6	20,1	12,2	1,4	4,93	43-44	50,7	15,7	22,2	10,9	0,5	4,01
16-17	50,9	17,1	21,0	10,9	0,2	5,87	44-45	49,2	16,6	20,0	13,5	0,7	4,31
17-18	48,0	18,1	23,1	10,6	0,2	5,17	45-46	45,8	15,4	23,6	13,8	1,5	4,46
18-19	50,6	18,8	21,4	9,1	0,2	6,13	46-47	48,3	15,1	23,1	13,2	0,3	5,37
19-20	49,2	17,8	20,9	11,8	0,3	6,99	47-48	48,7	18,0	20,7	9,2	3,3	13,38
20-21	45,4	18,4	20,7	13,6	1,8	7,85	48-49	54,4	16,9	19,6	8,2	1,0	8,05
21-22	47,2	19,4	21,1	11,9	0,4	8,99	49-50	53,3	16,5	19,3	9,5	1,5	9,97
22-23	46,4	21,6	20,5	11,0	0,5	12,25	50-51	53,7	16,9	19,6	8,7	1,1	9,38
23-24	47,4	18,2	22,2	11,6	0,6	5,74	51-52	43,7	17,8	17,3	8,6	12,5	16,26
24-25	45,7	17,3	20,3	15,7	1,1	4,38	52-53	47,0	18,1	18,9	9,0	7,2	15,08
25-26	41,6	19,2	22,1	16,8	0,4	6,38	53-54	51,4	17,2	19,2	11,2	1,1	9,73
26-27	42,9	19,9	22,0	14,9	0,3	5,28	54-55	50,4	18,3	17,6	9,9	3,8	9,63
27-28	45,8	19,7	23,2	11,0	0,2	5,36	55-56	50,5	19,3	17,1	10,0	3,2	10,91

Das Spektrum wird stellvertretend für die ca. 50 m lange Kernbohrung V104 (Tab. 34) und die 56 m lange Vollbohrung V106 (Tab. 35) dargestellt. Wie auch die Abb. 4 (Vollbohrung V106) und Abb. 5 zeigen, ist das Material der Tongesteine fast ausschließlich dem Ton-Schluff-Bereich zuzuordnen.

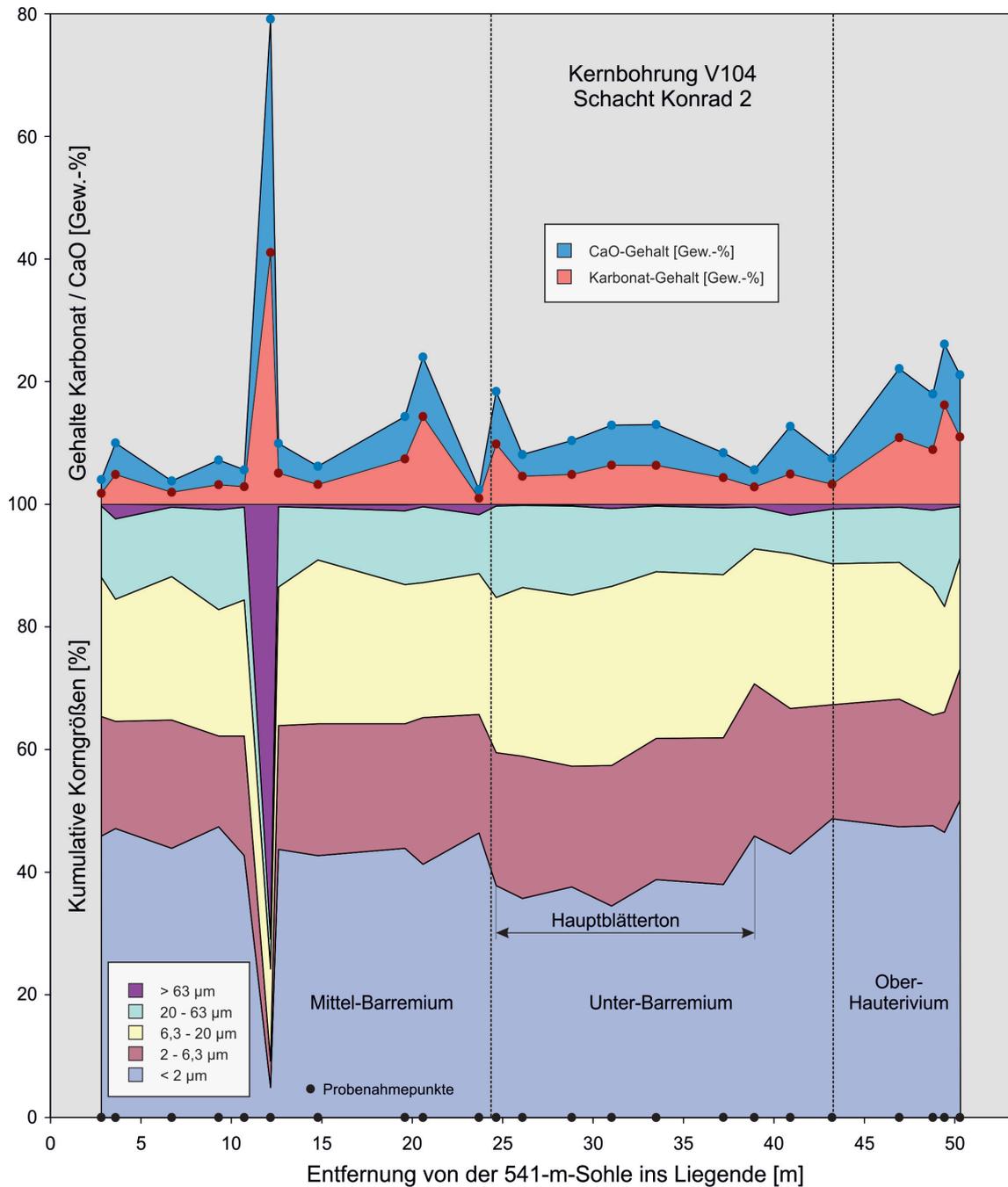


Abb. 5: Korngrößenverteilung sowie Gehalte an Karbonat und CaO der Proben aus der Bohrung V106, Schacht Konrad 2. Daten aus: MATTIAT & KREIMEYER (1991).

Korngrößen > 63 µm (Feinsand) sind in fast allen Fällen mit weniger als 3 Gew.-% am Aufbau der Gesteine beteiligt. Eine Korrelation der Karbonat- bzw. CaO-Gehalte mit einer oder mehrerer Korngrößenfraktionen ist nicht nachweisbar. Lediglich in der Fraktion 2 - 6,3 µm ist eine gewisse Karbonatanreicherung erkennbar, die auf Coccolithen-Detritus zurückzuführen ist (MATTIAT & KREIMEYER 1991). Diese Aussage beruht auf der Untersuchung der Korngrößenfraktionen von acht Proben, die im Schacht Konrad 2 –

ausgehend von der 541-m-Sohle – in das Hangende (Ober-Barremium) bzw. das Liegende Mittel- und Unter-Barremium gestoßen wurden (siehe Abb. 6). Die Autoren führen ferner aus, dass der Calcitgehalt der Ton- bis Tonmergelsteine auf die in ihnen vorhandenen Nanno- und Mikrofossilien zurückzuführen ist, während in linsenartigen Karbonatvorkommen neben organogenem Calcit chemisch gefällte Karbonate in den Vordergrund treten. Dafür sprechen auch die hier verstärkt zu beobachtenden Siderit-Gehalte. Bei der in der Bohrung V104 bei 12,07-12,27 m angetroffenen, extrem karbonatreichen Probe handelt es sich um eine solche Calcitlinse oder -konkretion.

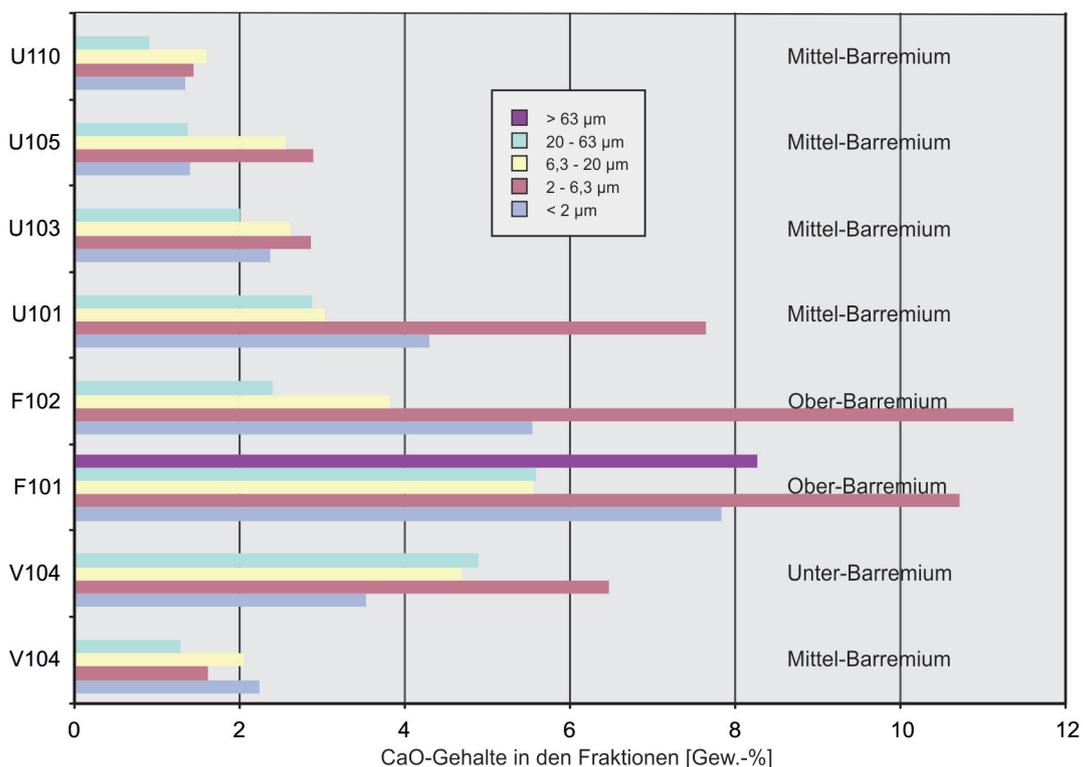


Abb. 6: CaO-Gehalte in den Korngrößenfraktionen von Proben aus verschiedenen, von der 541-m-Sohle aus gestoßenen Bohrungen im Schacht Konrad 2. Daten aus: MATTIAT & KREIMEYER (1991).

10.3 Kationenaustauschkapazität

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) ist ein Maß für die Menge der Kationen, die ein Mineral oder Gestein adsorbieren und gegen in Lösung befindliche Kationen wieder austauschen kann. Sie stellt damit ein Maß für die Anzahl der negativen Bindungsplätze von Kationenaustauschern dar. Die KAK ist eine wichtige, von der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung des Tongesteins abhängige Kenngröße und steigt mit steigendem pH-Wert der Austauschlösung. Sie ist ferner auch abhängig vom pH-Wertes des Wirtsgesteins. Je höher dessen pH-Wert ist, desto höher ist auch die KAK. Mit sinkendem

pH-Wert der Porenwässer, etwa durch Pufferung durch Tonminerale oder Karbonate, kann die KAK (variable Ladung) geringfügig absinken. Die Kationenaustauschkapazität bildet einen wichtigen Kennwert von rolligen und bindigen Sediment

In Tab. 36 sind die in GERARDI (2005) kompilierten Kationenaustauschkapazitäten (Summenparameter und einzelne Kationen) von Tongesteinsproben der Bohrung Konrad 101 zusammengefasst.

Tab. 36: Bandbreiten und Mittelwerte der Kationenaustauschkapazität von Tongesteinsproben (Summenparameter und einzelne Ionen [in 100 mval/100 g] der Bohrung Konrad 101 (aus: GERARDI 2005)

		KAK Summenparameter	KAK Ca ²⁺	KAK Mg ²⁺	KAK K ⁺	KAK Na ⁺	KAK H ⁺
Ober-Barremium	Bereich	14,90 – 23,40	6,90 – 26,10	1,40 – 2,30	1,10 – 1,40	21,20 – 24,70	-2,50 – -1,00
	MW	18,37	14,03	1,73	1,30	22,87	-1,90
Mittel-Barremium	Bereich	13,80 – 18,80	13,10 – 25,20	1,50 – 1,70	1,20 – 1,30	20,50 – 23,50	-1,20 – -1,00
	MW	16,13	18,50	1,60	1,23	21,77	-1,13
Unter-Barremium	Bereich	15,80	42,30	2,20	1,30	21,80	-2,00
Ober-Hauterivium	Bereich	16,40	35,70	1,70	1,30	19,30	-2,00
Unter-Hauterivium	Bereich	11,60 – 19,60	29,60 – 36,70	1,00 – 2,10	0,60 – 1,90	6,50 – 22,90	-2,00 – -1,00
	MW	15,60	33,15	1,55	1,25	14,70	-1,67

Die wichtigsten „natürlichen“ austauschbaren Kationen sind Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ sowie Al³⁺ und H⁺. Die Summe der austauschbaren Kationen, welche an die negativen Bindungsplätze der Austauscher gebunden sind, wird experimentell durch den Austausch mit einer Neutralsalzlösung bestimmt (z. B. BaCl₂, NH₄Cl und CaCl₂).

Die Kationenaustauschkapazität wird in Mol (oder cmol_c/kg Substanz; mmol_c/kg Substanz; mmol_{eq}/100 g Substanz) angegeben. In diesem Bericht wird noch die alte Einheit „Milliäquivalent pro Kilogramm“ (mval/kg) bzw. „100 mval / 100 g“ verwendet. In mval/kg verfügbare Werte können in guter Näherung auch in mmol_c/kg angegeben werden (Umrechnung nahezu 1:1). Die KAK liegt zwischen 2 mmol_c/kg (sandige Sedimente und 60 mmol_c/kg bei tonigen Sedimenten. Bei Dreischicht-Tonmineralen werden Werte > 200 mmol_c/kg erreicht).

11 Zusammenfassung

Das Vorhaben AnSichT hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für einen HAW-Endlagerstandorte im Tongestein zu erarbeiten und dessen Anwendbarkeit für generische Endlagerstandorte in Nord- und Süddeutschland zu testen.

In diesem Berichtsteil werden nach einer umfangreichen Literatursichtung auf der Basis vorangegangener Vorhaben (vor allem aus dem Projekt Konrad) die gesteinsphysikalischen, hydraulischen und mineralogischen Gesteinseigenschaften zusammengestellt, die für den Langzeitsicherheitsnachweis erforderlich sind. Einbezogen werden außerdem Daten für Tongesteine aus der Sondierbohrung Benken und dem Felslabor Mont Terri (Opalinuston) bzw. dem Untertagelabor Meuse/Haute-Marne am Standort Bure (Tongesteine aus dem Callovium-Oxfordium).

Der vorliegende Bericht mit der Zusammenstellung der gesteinsphysikalischen, hydraulischen und mineralogischen Kennwerte ergänzt die Beschreibung der geologischen Gesamtsituation im Gebiet des Endlagerstandortmodells NORD im Teil I des Gesamtberichtes (REINHOLD et al. 2013). Er liefert ferner die Basis für die im Teil III des Gesamtberichtes (NOWAK & MASSMANN 2013) erfolgte Parameterauswahl für die geplanten thermischen, hydraulischen und mechanischen (THM) Modellberechnungen.

Die ausgewählten Werte sind ggf. an neue Erkenntnisse anzupassen, die sich im Zuge des Projektverlaufs ergeben. Zur Prüfung der Integrität der geologischen Barriere müssen ggf. weitere Parameter festgelegt werden.

Literaturverzeichnis

- AkEnd [Hrsg.] (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). - 260 S.; Köln.
- ALHEID, H.-J. (1986): Seismische Lastannahme für unter Tage, Ableitung der Bewegungsgrößen unter Tage. – BGR-Bericht, Archiv-Nr.: 99 586, Rev. 1: 59 S., 28 Abb., 6 Tab.; Hannover.
- ANDRA (2005): Callovo-Oxfordien Rapport de Synthèse. - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne DRPADPE041110B: 219 S.; Châtenay-Malabry, France.
- BEYER, F. (1988): Konrad 101 - Petrographisch-geochemische Aspekte. – BGR-Bericht, Archiv-Nr.: 103 770: 13 S., 42 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- BfS (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002. - Bundesamt für Strahlenschutz.
- BOSSART, P. & THURY, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. - Rep. Swiss Geol. Surv. 3: 194 S.; Wabern.
- BUNTEBARTH, G. (2005): Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften an Tonstein-Proben der Unterkreide. - Bericht Geophysikalisch-technisches Büro: 34 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- ČEPEK, P. & KEMPER, E. (1981): Der Blättertonstein des nordwestdeutschen Barrême und die Bedeutung des Nannoplanktons für die fein laminierten, anoxisch entstandenen Gesteine. - Geol. Jahrb., A 58: 3-13; Hannover.
- ČERMÁK, V. & RYBACH, L. (1982): Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. - In: Angeneister, G. (Ed.): Landolt-Börnstein - Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie - Physikalische Eigenschaften der Gesteine, 305-343; Berlin (Springer).
- DBE (1998): Schachtanlage Konrad – Geomechanisches Normalprofil. - CAD-Nr. 26315200, 01/1998, DBE Technology GmbH; Peine.

- DILL, H.G. (1995) Sedimentpetrographie und -geochemie der Unterkreideschichten in den Bohrungen Wiechendorf 1/86 und Ahlum 1. - Geol. Jahrb., A 141: 459-483; Hannover.
- DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W. (1990): Physical and Chemical Hydrogeology.- 824 S.; New York (Wiley).
- GAIDA, K.-H.; GEDENK, R.; KEMPER, E.; MICHAELIS, W.; SCHEICH, R.; SCHMITZ, H.-H. & ZIMMERLE, W. (1981): Lithologische, mineralogische und organisch-geochemische Untersuchungen an Tonsteinen und Tonmergelsteinen der Unterkreide Nordwestdeutschlands (unter besonderer Berücksichtigung der Schwarzschiefer. - Geol. Jahrb., A 58: 15-47; Hannover.
- GERARDI, J. (1986): Bohrung Konrad 101. Teil I - Geologischer Bericht, Teil II - Schichtenverzeichnis. - BGR, Bericht, Archiv-Nr. 99 599: 26 bzw. 47 S.; Hannover.
- GERARDI, J. (2005): Barrierewirksame Eigenschaften von Ton und Tonstein: Fachinformationssystem BETTON. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bereich: Geotechnik/Endlagerung, Projektlaufzeit 01/2002 – 12/2007, www.bgr.bund.de.
- HEIM, D. (1990): Tone und Tonmineralien. - 157 S.; Stuttgart (Enke).
- HEUNISCH, C., CASPERS, G., ELBRACHT, J., LANGER, A., RÖHLING, H.-G., SCHWARZ, C. & STREIF, H. (2007): Erdgeschichte von Niedersachsen - Geologie und Landschaftsentwicklung. - GeoBer., 6: 3-85; Hannover.
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen : Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. - 118 S.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- JOBMANN, M., AMELUNG, P., BILLAUX, D., POLSTER, M., SCHMIDT, H. & UHLIG L. (2006): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein in Deutschland - GENESIS - Abschlussbericht. - DBE Technology GmbH, 92 S.; Peine.
- KEMPER, E. (1995): Sedimente, Fazies und Schichtenfolge des Barrême und Apt in NW-Deutschland. - Geol. Jahrb., A 141: 9-45; Hannover.

- KEMPER, E. & ZIMMERLE, W. (1978): Die anoxischen Sedimente der präoberaptischen Unterkreide NW-Deutschlands und ihr paläogeographischer Rahmen. - Geol. Jahrb., A 45: 3-41; Hannover.
- LENZ, K.-L., PILS, W. & UFFENORDE, H. (1986a): Geowissenschaftliche Vorsorgeuntersuchungen zur Standortfindung für die Ablagerung von Sonderabfällen [7]. Abschlußbericht Teil 3,1: Geologische Aufnahme. Band 1: Text. - BGR, Bericht, Archiv-Nr.: 0092117: 7: 53 Bl.; Hannover.
- LENZ, K.-L., PILS, W. & UFFENORDE, H. (1986b): Geowissenschaftliche Vorsorgeuntersuchungen zur Standortfindung für die Ablagerung von Sonderabfällen [9]. Abschlußbericht Teil 3,2: Geologische Aufnahme. Band 3: Kernbeschreibung, Laborberichte. - BGR, Bericht, Archiv-Nr. 0092117: 9: Sammelmappe, 18 Anl.; Hannover.
- LIPPMANN, F. (1955): Ton, Geoden und Minerale des Barreme von Hoheneggelsen. -Geologische Rundschau, 43: 475-503; Stuttgart.
- LUX, K.-H., CZAIKOWSKI, O., WOLTERS, R. & DÜSTERLOH, U. (2005): Endlagerstandortsuche. Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. - Abschlussbericht der TU Clausthal: 344 S., Clausthal-Zellerfeld.
- LUX, K.-H. (2010): Möglichkeiten der Datenerhebung von Übertage zur Standortbewertung von Endlagern im Tonsteingebirge, Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 3607R02596 Zeitraum 01.04.2007 – 30.09.2010 der TU Clausthal: 369 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- MARTIN, M. (2007): Geology of the Konrad area: surface based and underground geological site characterisation programme (techniques and results). – In: IAEA, DBE Technology, ITC (Veranst.) ITC-Workshop Methodologies for Geological Disposal - Deep Geological Repositories in Sedimentary Environments - 24.-28.09.2007; Peine. [veröffentlicht auf www.dbetec.de]
- MATTIAT, B. & KREIMEYER, R. (1991): Mineralogisch-petrographischer Untersuchungen an Gesteinsproben aus dem Bereich der Untersuchungsstrecke 541 m Sohle (Barreme) der Schachanlage Konrad, Schacht 2. - BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0108659: 17 S.; Hannover.
- MÜLLER, E. (1995): Geochemische und sedimentologische Untersuchung der Grenzschichten Barrême-Apt unter besonderer Berücksichtigung der Laminite. - Geol. Jahrb., A 141: 533-549; Hannover.

- MÜLLER, K., KREUTZ, H., ZIEGENMEYER, H. & MEIER, G.-A. (1987): Probenuntersuchungen an Lagerbegrenzungsbohrungen der Schachanlage Konrad (TA 2219.29). - Abschlussbericht der TU Clausthal: 194 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle NAGRA (2001): Sondierbohrung Benken. Untersuchungsbericht, Textband. - Technischer Bericht NTB 00-01, NAGRA: XXXV + 288 S.; Wettlingen.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle NAGRA (2002): Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. - Technischer Bericht NTB 02-03, NAGRA: 659 S.; Wettlingen.
- NOWAK, T. & MASSMANN, J. (2013): Projekt AnSichT - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen Standort im Tonstein. - Endlagerstandortmodell Nord. Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 31 S.; Hannover.
- ORILSKI, J., HÜBNER, W., WONIK, T. & GENESYS Projektgruppe (2012): Charakterisierung potentieller Nutzhorizonte zur geothermischen Energiegewinnung am Standort der Bohrung Groß Buchholz Gt1 (GeneSys-Projekt Hannover). - SDGG 80: 202; Hannover.
- PEARSON, F.J. (1999): What is the porosity of a mudrock?- In: Aplin, A.C., Fleet, A.J. & MacQuacker, J.H.S (eds), Muds and Mudstones: Physical and Fluid flow Properties. - Geol. Soc. London, Special Publ., 158: 9-21; London.
- PEARSON, F.J., ARCOS, D., BATH, A., BOISSON, J.Y., FERNÁNDEZ, A.M., GÄBLER, H.-E., GAUCHER, E., GAUTSCHI, A., GRIFFAULT, L., HERNÁN, P. & WABER, H.N. (2003): Geochemistry of water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. - Rep. FOWG Geol. Ser. 5: 141 S.; Bern.
- REINHOLD, K. & SÖNNKE, J. (2012): Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle in Tongestein. – BGR-Bericht: 20 S.; Hannover/Berlin.

- REINHOLD, K., JAHN, S., KÜHNLENZ, T., PTOCK, L. & SÖNNKE, J. (2013): Projekt AnSichT - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein. - Endlagerstandortmodell NORD. Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 71 S.; Hannover.
- RÖSCH, H. (1985): Tiefbohrung Konrad 101 - Laborbericht. – BGR-Bericht, nicht archiviert: 29 S., 22 Anl.; Hannover.
- RÖHLING, H.G. & HEINIG, S. (2012): Reservoireigenschaften des Mittleren Buntsandsteins in den Bohrungen Groß Buchholz-Gt1 (GeneSys-Projekt Hannover) und Hämelerwald-Z1: Ergebnisse petrographischer Untersuchungen. - SDGG 80: 458; Hannover.
- RULLKÖTTER, J., LITKE, R., HEBER, G., HORSFIELD, B., JENDRZEJEWSKI, L., NOTØ, H., RADKE, M. & SCHAEFER, R.G. (1995): Organic matter in Upper Barremian to Lower Aptian sediments in the Lower Saxony Basin, NW Germany (Wiechendorf 1/86 borehole). - Geol. Jahrb., A 141: 563-585; Hannover.
- SCHNIER, H. (1986a): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus dem Hangend- und Liegend-Bereich der Grube Konrad. – BGR-Bericht, Archiv-Nr.: 99 467/ I: 18 S., 17 Abb., 14 Tab., 8 Anl.; Hannover.
- SCHNIER, H. (1986b):): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Proben aus den Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht Konrad 2. – BGR-Bericht, Archiv-Nr. 99 467 / II: 8 S., 3 Abb., 3 Tab., 2 Anl.; Hannover.
- SCHNIER, H. (1987): Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus den Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht KONRAD 1. - BGR, Bericht, Archiv-Nr. 99 467 / IV: 12 S., 3 Abb., 5 Tab., 2 Anl.; Hannover.
- SCHULZE, O. (2009): Steinsalz und Tonstein - Untersuchung von Endlager relevanten Eigenschaften. - In: DMV & IGCM (Hrsg.): Tagungsband Energie und Rohstoffe 2009 - Sicherung der Energie- und Rohstoffversorgung - 6. – 12. September 2009, Goslar, 409-424; Clausthal-Zellerfeld.
- TISCHNER, T. & KRUG, S. (2012): GeneSys: Test- und Erschließungsarbeiten im Zeitraum 2010 - 2011. Interne Dokumentation der Arbeiten an der Geothermiebohrung Groß Buchholz Gt1. – BGR-Bericht: 250 S.; Hannover.

WITTKÉ, W. (1991 a): Endlager Konrad, Schachtverfüllung/ Alte Bohrungen, Teil 1: Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (343 m-Sohle). - Bericht A I., Unveröff. Textbd. XIII u. 2 Abbildungsbd.: 173 S., 1 Abb. / 141 Abb.; Aachen.

WITTKÉ, W. (1991 b): Endlager Konrad, Schachtverfüllung/ Alte Bohrungen, Teil 2: Ergebnisse des Untersuchungsprogramms im Bereich der Unterkreide (541 m-Sohle). - Bericht A II., Unveröff. Textbd. XIII u. 2 Abbildungsbd.: 128 S., 1 Abb. / zahlr. Abb.; Aachen.

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Gesteinsdichte (Feuchtdichte) und Korndichte der einzelnen stratigraphischen Einheiten im Bereich der Schachanlage Konrad (aus: GERARDI 2005 ⁽¹⁾ , UHLIG et al. 2006 in JOBMANN et al. 2007 ⁽²⁾ , WITTKÉ 1991 a, b, RÖSCH 1985, BUNTEBARTH 2005, DBE 1998 ⁽³⁾).....	12
Tab. 2: Spezifische Wärmekapazitäten C_p [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] von Tongesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101 in Abhängigkeit von der Temperatur (aus: BUNTEBARTH 2005).....	14
Tab. 3: Spezifische Wärmekapazitäten C_p von Tongesteinen aus der Bohrung Konrad 101 (UHLIG et al. 2006 zit. in JOBMANN et al. 2007).....	15
Tab. 4: Bei ca. 40 °C ermittelte Wärmeleitfähigkeiten von Tongesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101 und Vergleichsdaten.....	15
Tab. 5: Anisotropieverhältnis der Wärmeleitfähigkeit eines Tonsteins aus dem Mittel-Albium bei unterschiedlichen Temperaturen und $p = 2$ MPa (aus: BUNTEBARTH 2005).....	16
Tab. 6: Mittlere lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten von Tongesteinen aus der Bohrung Konrad 101 (BUNTEBARTH 2005).....	17
Tab. 7: Thermische Parameter für das Mittel-Aptium (Hedbergellenmergel) im Modellgebiet nordöstlich von Hannover (JOBMANN et al. 2007) und als Berechnungsparameter (DBE).....	19
Tab. 8: KD-Werte für hydrogeologische Einheiten der Schachanlage Konrad (aus: BfS 2002, Tab. B II.4/5). Es bedeuten: 4 – Plänerkalke bis Flammenmergel, 5 – toniges Albium, 6 – Hilssandstein, 7 – Aptium bis Basis Unterkreide (tonig), 9 – Valanginium (sandig) und Wealden, 10 – Tithonium und Kimmeridgium, 11 – Oxfordium, Callovium und Bathonium (tonig), 12 – Cornbrash-Sandstein (Bathonium/Oberes Bajocium), 13 – Bajocium (tonig), 14 – Oberes Aalenium (tonig), 15 – Dogger-beta-Sandstein (Ober-Aalenium).....	21
Tab. 9: Ultraschallgeschwindigkeiten in mesozoischen Tonsteinen aus dem Bereich der Schachanlage Konrad ⁽¹⁾ SCHNIER 1986a, ⁽²⁾ SCHNIER 1986b, ⁽³⁾ SCHNIER 1987, ⁽⁴⁾ GERARDI 2005, ⁽⁵⁾ WITTKÉ 1991 a, b). Die Werte in ⁽¹⁾ bis ⁽³⁾ stammen aus Labormessungen, die Werte aus ⁽⁵⁾ wurden aus Diagrammen abgeschätzt und repräsentieren In-situ-Messungen.....	22
Tab. 10: Schichtaufbau des Untergrundes im Bereich der Schachanlage Konrad. Die Daten stammen aus geophysikalischen Messverfahren (Reflexionsseismik sowie Bohrlochversenkungsmessungen (aus: ALHEID 1986).....	23
Tab. 11: Dynamische elastische Parameter für Tongesteine im Bereich der Schachanlage Konrad (aus: SCHNIER 1986a, 1986b, 1987, GERARDI 2005, LUX et al. 2005).....	24
Tab. 12: Festigkeitsparameter von Tongesteinen aus der Bohrung Konrad 101 ⁽¹⁾ SCHNIER 1986a) sowie den Widerlagerbohrungen der Schächte Konrad 2 ⁽²⁾ SCHNIER 1986b) und Konrad 1 ⁽³⁾ SCHNIER 1987).....	26

Tab. 13:	Verformungsparameter unterschiedlicher Belastungsrichtungen für Tongesteinsproben aus dem Bereich der 343-m- und 541-m-Strecken im Schacht Konrad 2 (WITTKÉ 1991 a, b).....	29
Tab. 14:	Über Dilatometerversuche ermittelte Verformungsmoduln (WITTKÉ 1991 a, b).....	30
Tab. 15:	Durch triaxiale Druckversuche an Prüfkörpern aus den 343-m- und 541-m-Strecken (Schacht Konrad 2) ermittelte Scherparameter (WITTKÉ 1991 a, b).....	31
Tab. 16:	Festigkeitsparameter für Tongesteine aus dem Mittel-Aptium (Hedbergellenmergel) im Bereich der Bohrung Konrad 101 (UHLIG et al. 2006 zit. in JOBMANN et al. 2007).....	32
Tab. 17:	Bruchfestigkeits- und Nachbruchfestigkeitsparameter für Tongesteine in der Schachanlage Konrad.....	32
Tab. 18:	Werte für die Spaltzugfestigkeit von Tongesteinen des Ober-Hauterivium in der Schachanlage Konrad (aus: SCHNIER 1986a, 1986b und 1987).....	34
Tab. 19:	Weitere Parameter zum Festigkeits- und Deformationsverhalten von Tongesteinen aus der Schachanlage Konrad (LUX et al. 2005).....	34
Tab. 20:	Ergebnisse von Quelldruckversuchen an Prüfkörpern von der 343-m-Strecke (Bohrung B11) und 541-m-Strecke (Bohrungen B10 und V104 im Schacht Konrad 2 (WITTKÉ 1991 a, b). Bei den Versuchen fanden destilliertes Wasser sowie Wässer aus dem Hilsandstein und aus dem Ort 300 der Schachanlage Konrad Verwendung.....	36
Tab. 21:	Ergebnisse von Quellhebungsversuchen an Prüfkörpern aus dem Schacht Konrad 2 (WITTKÉ 1991 a). Bei mit *) markierten Werten wurde bis zum Versuchsende kein Plateauwert der Quelldehnungen erreicht.....	37
Tab. 22:	Ergebnisse von Quellhebungsversuchen an Prüfkörpern aus dem Schacht Konrad 2 (WITTKÉ 1991 b). Bei mit *) markierten Werten wurde bis zum Versuchsende kein Plateauwert der Quelldehnungen erreicht.....	38
Tab. 23:	Durchlässigkeitsbeiwerte k_f sowie effektive Porositäten P^* der im Bereich der Grube Konrad angetroffenen Schichten (BfS 2002).....	41
Tab. 24:	Durch hydraulische Testbohrungen in norddeutschen tonigen Gesteinsformationen ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte (aus: GERARDI 1986 und LENZ et al. 1986 a, b; kompiliert in HOTH et al. 2007: 20).....	42
Tab. 25:	An Laborproben ermittelte Porositäten und Permeabilitäten von Gesteinen aus der Geothermiebohrung Groß Buchholz Gt1 (aus: TISCHNER & KRUG 2012).....	42
Tab. 26:	Bandbreiten und Mittelwerte hydraulischer Parameter (Labortests) aus den Schichten im Bereich der Grube Konrad (MÜLLER et al. 1987).....	44
Tab. 27:	Hydraulische Kennwerte der durchlässigen Sandsteine im Endlagerstandortmodell Nord.....	45
Tab. 28:	Schwankungsbreiten (Minimum - Maximum) und Durchschnittsgehalte (MW) im Mineralbestand von Hauterivium und Barremium in den in der Bohrung Konrad 101 angetroffenen Sedimenten (aus: GERARDI 2005).....	47

Tab. 29:	Schwankungsbreiten und Durchschnittsgehalte von Tongesteinen aus dem Ober-Barremium aus den Bohrungen Wichendorf 1/86, Hoheneggelsen KB9 und Ahlum 1 (aus: MÜLLER 1995 (Spalten 1-3) und LENZ et al. 1986 a, b (Spalten 4-5)).....	48
Tab. 30:	Schwankungsbreiten und Mittelwerte (MW) der mineralogischen Zusammensetzung von Tongesteinen aus den Tongruben Hoheneggelsen und Sarstedt (aus: 1 - LIPPMAN (1955), 2 - KEMPER & ZIMMERLE (1978)).....	51
Tab. 31:	Schwankungsbreiten und Mittelwerte (MW) der Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) in Sedimenten aus der Bohrung Konrad 101 (RÖSCH 1985, BEYER 1988) und dem Schacht Konrad 2 (MATTIAT & KREYMEIER 1991)	53
Tab. 32:	Minima, Maxima und Mittelwerte der Gewichtsanteile der Korngrößenfraktionen von Tongesteinen des Barremium und Hauterivium der Bhrg. Konrad 101. Zum Vergleich ist die Korngrößenverteilung einer im Ober-Barremium angetroffenen Sandlage angegeben (aus: RÖSCH 1985 und ECKARDT et al. 1989).....	54
Tab. 33:	Anteile der Mineralien an den Fraktionen $< 2 \mu\text{m}$, $2-20 \mu\text{m}$ und $> 20 \mu\text{m}$ einiger dekarbonatisierter Tongesteine der Bohrung Konrad 101 im Vergleich zur Gesamtprobe GP. Für die Gesamtprobe sind zusätzlich die CaO-Gehalte (RFA) sowie die Gehalte an Gesamt-Kohlenstoff C_{ges} und organischer Komponente C_{org} angegeben (aus: RÖSCH 1985).....	55
Tab. 34:	Korngrößenverteilung sowie Gesamtkarbonat- und CaO-Gehalte der Bohrung V104 ins Liegende der 541-m-Strecke, Schacht Konrad 2 (aus: MATTIAT & KREIMEYER 1991).....	56
Tab. 35:	Korngrößenverteilung [Gew.-%] sowie CaO-Gehalte [Gew.-%] der Bohrung V106 ins Liegende der 541-m-Strecke, Schacht Konrad 2 (aus: MATTIAT & KREIMEYER 1991).....	58
Tab. 36:	Bandbreiten und Mittelwerte der Kationenaustauschkapazität von Tongesteinsproben (Summenparameter und einzelne Ionen [in $100 \text{ mval}/100 \text{ g}$] der Bohrung Konrad 101 (aus: GERARDI 2005).....	61

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Für die Untersuchung im Labor parallel (0°), senkrecht (90°) und im Winkel von 45° zur Schichtung (P-, S- und Z-Proben) orientierte Proben (nach: NAGRA 2001).....	9
Abb. 2: Schematische Gesamtversuchskurve zur Bestimmung statischer elastischer Parameter (nach: SCHNIER 1986a, verändert).....	26
Abb. 3: Mittlere mineralogische Zusammensetzung der Hauterivium- und Barremium-Tongesteine der Bohrung Konrad 101 im Vergleich zum Opalinuston und anderen ebenfalls gut untersuchten tonreichen Formationen (nach: NAGRA 2002, verändert).....	50
Abb. 4: Korngrößenverteilung sowie Gehalte an CaO der Proben aus der Bohrung V106, Schacht Konrad 2. Daten aus: MATTIAT & KREIMEYER (1991).....	57
Abb. 5: Korngrößenverteilung sowie Gehalte an Karbonat und CaO der Proben aus der Bohrung V106, Schacht Konrad 2. Daten aus: MATTIAT & KREIMEYER (1991).....	59
Abb. 6: CaO-Gehalte in den Korngrößenfraktionen von Proben aus verschiedenen, von der 541-m-Sohle aus gestoßenen Bohrungen im Schacht Konrad 2. Daten aus: MATTIAT & KREIMEYER (1991).....	60