nagra.

Technischer Bericht 14-02

SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage

Geologische Grundlagen

Dossier VI
Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine

Dezember 2014

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

nagra.

Technischer Bericht 14-02

SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage

Geologische Grundlagen

Dossier VI
Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine

Dezember 2014

**Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle**

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Das vorliegende Dossier VI – Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine - wurde von einem Projektteam folgender Zusammensetzung erarbeitet:

Hauptautoren: Andreas Gautschi, Martin Mazurek, Gaudenz Deplazes, Daniel Traber, Paul Marschall, Thomas Gimmi, Urs Mäder

Text- und Figurenbeiträge, redaktionelle Mitarbeit (in alphabetischer Reihenfolge): Jens Becker, Petra Blaser, Urs Fischer, Bruno Kunz

Das Dossier und die dazu verwendeten Referenzberichte (Nagra Arbeitsberichte, NAB) haben von zahlreichen Fachdiskussionen und Reviews durch eine Vielzahl von internen und externen Personen profitiert; diesen Personen sei an dieser Stelle für ihre Arbeit gedankt.

ISSN 1015-2636

Korrigierte PDF-Version, Januar 2015

"Copyright © 2014 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.
Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Zusammenfassung

In Dossier VI 'Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine' werden deren Parameter und Konzeptualisierungen für die Dosisberechnungen und den sicherheitstechnischen Vergleich im Rahmen von SGT Etappe 2 beschrieben. Dies bildet die geowissenschaftliche Grundlage für die qualitative und quantitative Bewertung von zahlreichen SGT-Kriterien bzw. der zugehörigen Indikatoren und für die Identifikation allfällig vorhandener eindeutiger Nachteile.

Das Kapitel 'Barriereneigenschaften der Wirtgesteine' enthält eine Charakterisierung der Wirtgesteine bezüglich der für den Transport der Radionuklide relevanten Eigenschaften. Die Definition der lithofaziellen Einheiten baut auf den im Dossier II präsentierten Grundlagen auf und teilt diese basierend auf Erfahrungen betreffend den Zusammenhang zwischen Tonmineralgehalt und hydraulischen Eigenschaften in drei Kategorien ein (< 20, 20 – 40 und > 40 Gew.-%):

- Die mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons liegt im Bereich der Tonsteine und sandigen Tonsteine. Für die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen kann er als eine einzige lithofazielle Einheit mit Tonmineralgehalt > 40 Gew.-% betrachtet werden.
- Die mineralogischen Analysen des 'Braunen Doggers' zeigen im Füchtbauer-Dreieck eine beträchtliche Variation. Für die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen werden drei lithofazielle Einheiten unterschieden: Die Tonigen Abfolgen mit in der Regel > 40 Gew.-% Tonmineralen umfassen das Wirtgestein *sensu stricto* bestehend aus Tonsteinen und Tonmergeln der Parkinsoni-Württembergica-Schichten und der Variansmergel-Formation. Die Sandig-tonigen Abfolgen fassen die stark sandigen Tonsteine und Mergel der Murchisonae-Oolith-, der Wedelsandstein- und der Humphriesioolith-Formation zusammen, der mittlere Tonmineralgehalt liegt im Bereich von 20 – 40 Gew.-%. Unter dem Begriff 'Sandkalkabfolgen' werden die "harten Bänke" bestehend v.a. aus z.T. sandigen Kalken und Eisenoolithen mit charakteristischen Tonmineralgehalten < 20 Gew.-% zusammengefasst.
- Die mineralogischen Analysen der Effinger Schichten fallen im Füchtbauer-Dreieck in die Felder der (z.T. sandigen) Kalkmergel, tonigen Kalke und Kalke. Für die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen werden die lithofaziellen Einheiten Kalkmergelabfolgen (Kategorie Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-%) und Kalkbankabfolgen (Kategorie Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%) unterschieden.
- Die mineralogischen Analysen der Mergel-Formationen des Helvetikums (Helvetische Mergel) liegen im Füchtbauer-Dreieck typischerweise im Bereich von kalkig-sandigen Tonsteinen, sandigen Ton- und Kalkmergeln, tonigen Kalken bis zu nahezu reinen Kalken und weisen damit im Vergleich zu den Effinger Schichten ein ähnliche, aber variablere Zusammensetzung auf. Die Helvetischen Mergel sind so stark ineinander verschuppt und verfaltet, dass im Hinblick auf die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen lediglich zwei lithofazielle Einheiten unterschieden werden. Die Mergel, welche die Hauptmasse des Wirtgesteins ausmachen, fallen in die Kategorie Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-%. Die häufig boudinierten und auseinandergerissenen Kalkbankabfolgen fallen in die Kategorie Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%.

Aus Untersuchungen an Bohrkernen von zahlreichen Tiefbohrungen der Nordschweiz und am Wellenberg liegen Analysenresultate zahlreicher Parameter vor. Insbesondere bezüglich der Porosität werden die Resultate verschiedener Methoden vorgestellt und diskutiert.

Die Charakterisierung der Porenwässer stützt sich insbesondere auf Untersuchungen von Bohrkernen aus den Standortregionen. Zusätzlich werden, wo vorhanden, Analysen von Grundwässern und im Fall des Opalinustons Resultate aus dem Felslabor Mont Terri berücksichtigt. Mögliche regionale Unterschiede resp. Ungewissheiten werden über Varianten des Referenzporenwassers abgedeckt.

Die Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften basiert auf In situ-Tests in Bohrungen, Experimenten mit Bohrkernen und Beobachtungen in Untertagebauten. Zusätzlich erfolgte ein systematischer Vergleich des Strukturinventares der Bohrkerne mit den Resultaten der In situ-Tests. Die Datensätze beschreiben dabei die Gesteine auf unterschiedlichen Massstäben. Die Labortests an Bohrkernen ergeben für die Gesteinsmatrix allgemein sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten und zeigen damit, dass die bei einzelnen Wirtgesteinen beobachteten erhöhten Durchlässigkeiten durch diskrete tektonisch-strukturelle Elemente bedingt sein müssen:

- Beim lithologisch relativ homogenen Opalinuston zeigt die Übereinstimmung der sehr geringen Durchlässigkeiten aus Laborexperimenten und In situ-Tests in Bohrungen (unter Berücksichtigung von kleineren Störungen und unterschiedlicher lithofazieller Untereinheiten), dass eine Modellierung als homogen-poröses Medium mit diffusionsdominiertem Transport angezeigt ist.
- Beim 'Braunen Dogger' zeigen In situ-Tests im Einklang mit Untersuchungen an Bohrkernen sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten des ungestörten Wirtgesteins. Einzig in der nahe am Hegau-Bodensee-Graben gelegenen Bohrung Schlattingen-1 wurde in einem Intervall mit zwei potenziell offenen Strukturen in der Wedelsandstein- und in der Humphriesioolith-Formation eine erhöhte Durchlässigkeit angetroffen. In den Tonigen Abfolgen wird in Analogie zum Opalinuston eine effiziente Selbstabdichtung erwartet.
- Bei den Effinger Schichten zeigen In situ-Tests im ungestörten Wirtgestein wie auch hydraulische Tests an Bohrkernen sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten. Erhöhte K-Werte finden sich in gestörten Bereichen, beispielsweise in den Gerstenhübel-Schichten der Bohrung Oftringen. Die Kalke dieser Einheit sind äusserst tonmineralarm, so dass kein relevantes Selbstabdichtungsvermögen zu erwarten ist
- Bei den Helvetischen Mergeln handelt es sich um ein geklüftetes Medium mit sehr gering durchlässiger Matrix. Die Wasserführung ist ausschliesslich an Strukturen der spröden Deformation und an spröd überprägte (reaktivierte), duktile Strukturen gebunden. Unterhalb eines 500 – 600 m mächtigen Bereichs mit erhöhten Durchlässigkeiten liegen die Werte im Bereich von 10^{-13} bis 10^{-10} m/s.

Bei allen Wirtgesteinen, bei denen zumindest in einzelnen lithofaziellen Einheiten Störungen oder Klüfte hydraulisch wirksam sein können, stellt sich die Frage, in wie weit einzelne Bohrungen die zu erwartende Bandbreite abdecken können. Um die Transmissivitäten im Bereich von tektonisch-strukturellen Elementen robust einzugrenzen, werden deshalb Erfahrungen aus anderen, lithologisch ähnlichen Gesteinen und auch konzeptuelle Überlegungen zur Selbstabdichtung von Störungen berücksichtigt.

Die Diffusionseigenschaften beruhen auf Messungen im Labor sowie auf im Rahmen von Feldexperimenten im Felslabor Mont Terri gewonnen Datensätzen. Zusätzlich besteht ein empirischer Zusammenhang zwischen der Porosität und dem Diffusionskoeffzienten (*extended Archie's law*); dieser Ansatz basiert auf einer breiten internationalen Datenbasis und erlaubt eine robuste Abschätzung einzig auf Grund der Porosität. Porenwasser-Tracerprofile erlauben die Validierung über den Massstab Formation und über lange Zeiträume.

Unabhängige Evidenzen wie Tracerprofile oder anomale hydraulische Potenziale im Wirtgestein belegen die Einschlusswirksamkeit der Wirtgesteine über sehr lange Zeiträume und untermauern beispielsweise im Fall des Opalinustons die Dominanz des diffusiven über den advektiven Stofftransport sowie die hydraulische Barrierenwirkung resultierend in ausgeprägtem Grundwasser-Stockwerkbau.

Im Kapitel 'Barriereneigenschaften der Rahmengesteine' werden die lithofaziellen Einheiten, die Gesteinsparameter und die Transportparameter hergeleitet. Es handelt sich dabei um die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura-Südfuss und Jura Ost (Passwang-Formation, Untere Acuminata-Schichten) und die unteren Rahmengesteine des Opalinustons in allen Standortgebieten der Nordschweiz. Die lithofaziellen Einheiten der restlichen als Rahmengesteine ausgeschiedenen Gesteine in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern (Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten) wurden bereits als Wirtgesteine charakterisiert. Die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Helvetischen Mergel im Standortgebiet Wellenberg haben keine Rahmengesteine.

Unter dem Opalinuston folgt die lithofazielle Einheit Toniger Lias mit typischen Tonmineralgehalten von 40 Gew.-% und sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten von $\leq 10^{-13}$ m/s. Einzig im Standortgebiet Jura-Südfuss ist der Lias unter dem Opalinuston vergleichsweise sandig-kalkig ausgebildet und wird deshalb als Kalkiger Lias bezeichnet. Beobachtungen zur Wasser- und Gasführung insbesondere in der Bohrung Gösgen SB4 legen nahe, dass es sich um eine Einheit mit gegenüber dem Tonigen Lias erhöhter Durchlässigkeit handelt.

Die lithofazielle Einheit 'Arietenkalk' besteht aus z.T. tonigen und sandigen Kalksteinen und zeigte in den Tiefbohrungen Benken, Weiach, Riniken und Schafisheim geringe Durchlässigkeiten. Demgegenüber gibt es aus oberflächennahen Bereichen und Tunneln Evidenzen, dass der 'Arietenkalk' in Zusammenhang mit einer verstärkten Deformation (Störungen, Klüfte) Aquifercharakter aufweisen kann.

Zwischen 'Arietenkalk' und Keuper-Aquifer finden sich in der lithofaziellen Einheit Toniger Keuper wiederum tonreiche Lithologien mit geringer Durchlässigkeit.

Im Oberen Mittelkeuper finden sich Einheiten, die in Abhängigkeit der lokalen lithologischen Ausbildung Aquifer-Charakter aufweisen können. Diese werden in der lithofaziellen Einheit Keuper-Aquifer zusammengefasst.

Unter dem Keuper-Aquifer folgen gering durchlässige Gesteine, welche zur mächtigen lithofaziellen Einheit 'Gipskeuper' zusammengefasst werden.

Die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss umfassen insbesondere die Passwang-Formation. In Analogie zum 'Braunen Dogger' wurde sie in die lithofaziellen Einheiten Sandig-tonige Abfolgen und Sandkalkabfolgen unterteilt. Die Passwang-Formation wurde in den Bohrungen Riniken und Schafisheim hydraulisch getestet, in beiden ergaben sich sehr geringe Durchlässigkeiten. Insbesondere mit dem Sissach-Member kann sie eine lokal markante, bis über 10 m mächtige Kalkbankabfolge direkt über dem Opalinuston aufweisen, welche in Bereichen mit einer stärkeren Klüftung resp. bei kleineren Störungen deutlich erhöhte Durchlässigkeiten aufweisen könnte.

Das Kapitel 'Standortbezogene Modellkonzepte und Parameter für den Radionuklidtransport in den Wirt- und Rahmengesteinen' präsentiert die Herleitung der Modellkonzepte und den Geodatensatz für die provisorische Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich im Rahmen von SGT Etappe 2. Dieser basiert auf den in den beiden vorangehenden Kapiteln präsentierten Grundlagen und berücksichtigt bei den hydraulischen Parametern auch Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen. Die präsentierten Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten beruhen auf den in Dossier II präsentierten Grundlagen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I

Inhaltsverzeichnis V

Tabellenverzeichnis IX

Figurenverzeichnis XI

Beilagenverzeichnis XIV

1 Einleitung 1
1.1 Inhalt des Dossiers 1
1.2 Wirtgesteine, Rahmengesteine und einschlusswirksamer Gebirgsbereich: Definitionen, Abgrenzungen 3
1.3 Bedeutung für den sicherheitstechnischen Vergleich für SGT Etappe 2: Übersicht der betroffenen Indikatoren 5
1.4 Aufbau des Dossiers 5

2 Barriereneigenschaften der Wirtgesteine 7
2.1 Aufbau der Wirtgesteine: Lithofazielle Einheiten 7
2.2 Mineralogische Zusammensetzung 9
2.2.1 Datenbasis und Methodik 9
2.2.2 Resultate und Diskussion 10
2.2.3 Vergleichende Darstellung der mineralogischen Zusammensetzung der Wirtgesteine 20
2.3 Dichten, Porositäten, Porengrössen, Kationenaustauschkapazitäten und Oberflächen 21
2.3.1 Datenbasis und Methodik 21
2.3.1.1 Dichten, Porositäten und Porengrössen 21
2.3.1.2 Kationenaustauschkapazität 23
2.3.1.3 Oberflächen 23
2.3.2 Resultate und Diskussion 23
2.3.2.1 Porositätsbestimmungen in der Übersicht 23
2.3.2.2 Korrelation zwischen Porosität und Tonmineralgehalt 30
2.3.2.3 Anionenzugängliche Porosität 31
2.3.2.4 Porengrössen 32
2.3.2.5 REM- und TEM-Untersuchungen 35
2.3.2.6 Kationenaustauschkapazität und Oberflächen 37
2.3.2.7 Schlüsselparameter der Wirtgesteine im Vergleich 39
2.4 Porenwasserchemie, Mikrobiologie und Kolloidfiltration 40
2.4.1 Methodik 41
2.4.2 Datengrundlage 43

2.4.3 Übersicht über die Referenzporenwässer ... 44
2.4.4 Opalinuston ... 47
2.4.5 'Brauner Dogger' ... 49
2.4.6 Effinger Schichten ... 49
2.4.7 Helvetische Mergel ... 52
2.4.8 Mikrobielle Aktivität ... 54
2.4.9 Kolloidfiltration ... 54
2.5 Hydraulische Eigenschaften ... 54
2.5.1 Hydraulische In situ-Tests in den Wirtgesteinseinheiten, Laboruntersuchungen an Bohrkernen und hydrogeologische Beobachtungen in Untertagebauten ... 54
2.5.1.1 Datenbasis und Methodik ... 54
2.5.1.2 Ergebnisse von Untersuchungen im Opalinuston ... 55
2.5.1.3 Ergebnisse von Untersuchungen im 'Braunen Dogger' ... 60
2.5.1.4 Ergebnisse von Untersuchungen in den Effinger Schichten ... 64
2.5.1.5 Ergebnisse von Untersuchungen in den Helvetischen Mergeln ... 68
2.5.2 Selbstabdichtung in Sedimentgesteinen ... 72
2.5.2.1 Daten und Beobachtungen aus tonmineralreichen und tonmineralarmen Lithologien ... 73
2.5.2.2 Paläo-Selbstabdichtung durch Aderbildung ... 75
2.5.2.3 Erfahrungen aus der Öl- und Erdgasindustrie ... 76
2.6 Diffusionseigenschaften ... 78
2.6.1 Datenbasis und Methodik ... 78
2.6.1.1 Direkte Messdaten ... 78
2.6.1.2 Indirekte Daten ... 79
2.6.2 Resultate und Diskussion ... 80
2.6.3 Anisotropie von Diffusionskoeffizienten ... 86
2.6.4 Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von der Temperatur ... 87
2.6.5 Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von der Ionenstärke des Porenwassers ... 87
2.6.6 Skalenabhängigkeit des diffusiven Stofftransports ... 88
2.6.7 Vergleich mit anderen tonmineralreichen Formationen ... 88
2.7 Wasserführende Systeme in den Wirtgesteinen ... 90
2.7.1 Opalinuston ... 90
2.7.1.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen ... 90
2.7.1.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von Bruchstrukturen ... 91
2.7.1.3 *Wet spots* im Felslabor Mont Terri ... 93
2.7.2 'Brauner Dogger' ... 95
2.7.2.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen ... 95
2.7.2.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen ... 96

2.7.2.3 Grösserräumige Betrachtung von Wasserfliesswegen ... 97
2.7.2.4 Gültigkeitsbereich der Charakterisierung von Wasserfliesswegen ... 98
2.7.3 Effinger Schichten ... 98
2.7.3.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen ... 98
2.7.3.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen ... 102
2.7.3.3 Grösserräumige Betrachtung von Wasserfliesswegen ... 104
2.7.3.4 Fliesswege infolge Verkarstung ... 105
2.7.4 Helvetische Mergel ... 105
2.7.4.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen ... 105
2.7.4.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von wasserführenden Strukturen ... 106
2.7.4.3 Grösserräumige Betrachtung von Wasserfliesswegen ... 108
2.8 Unabhängige Evidenzen ... 111
2.8.1 Tracerprofile in Porenwässern ... 111
2.8.2 Stockwerkbau der Aquifere ... 113
2.8.3 Anomale Drücke ... 114

3 Barriereneigenschaften der Rahmengesteine ... 115
3.1 Lithofazielle Einheiten der Rahmengesteine ... 115
3.2 Eigenschaften der unteren Rahmengesteine des Opalinustons ... 116
3.2.1 Gesteinsparameter (Mineralogie, Porosität) ... 116
3.2.2 Hydraulische Eigenschaften ... 116
3.2.2.1 Toniger Lias ... 116
3.2.2.2 'Arietenkalk' und Kalkiger Lias ... 117
3.2.2.3 Toniger Keuper ... 118
3.2.2.4 Keuper-Aquifer ... 118
3.2.2.5 'Gipskeuper' ... 118
3.2.3 Diffusionskoeffizienten ... 118
3.3 Obere Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss ... 119
3.3.1 Gesteinsparameter ... 119
3.3.2 Hydraulische Durchlässigkeit ... 119
3.3.3 Diffusionskoeffizienten ... 119

4 Standortbezogene Modellkonzepte und Parameter für den Radionuklidtransport in den Wirt- und Rahmengesteinen bzw. in den einschlusswirksamen Gebirgsbereichen ... 121
4.1 Allgemeines Vorgehen bei der Herleitung der Modellkonzepte für den Radionuklidtransport und die Eingabeparameter für die Dosisberechnungen ... 121
4.2 Wechselwirkung von lithofaziellen Einheiten und tektonisch-strukturellen Elementen, vereinfachte konzeptuelle Modelle für die Modellierung des Radionuklidtransports ... 122

4.3 Modellkonzepte für die Wirt- und Rahmengesteine in den geologischen Standortgebieten ... 125
4.3.1 Modellkonzepte für die geologischen Standortgebiete der Nordschweiz und Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten (Referenzwerte, Bandbreiten) ... 125
4.3.2 Modellkonzepte für das Standortgebiet Wellenberg und Länge der Fliesspfade in verschiedenen lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins ... 139
4.4 Mineralogische Zusammensetzung der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine (Referenzwerte, Bandbreiten) ... 141
4.4.1 Wirtgesteine ... 141
4.4.2 Untere Rahmengesteine ... 142
4.4.2 Obere Rahmengesteine ... 143
4.5 Porositäten der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine (Referenzwerte, Bandbreiten) ... 143
4.5.1 Wirtgesteine ... 143
4.5.2 Untere Rahmengesteine ... 147
4.5.3 Obere Rahmengesteine ... 147
4.6 Geochemische Bedingungen (Porenwasser, Mikrobiologie, Kolloidfiltration) ... 148
4.7 Hydraulischen Durchlässigkeit der lithofaziellen Einheiten und Transmissivitäten von Störungen in den Wirt- und Rahmengesteinen ... 148
4.7.1 Durchlässigkeitsmessungen in den vier Wirtgesteinseinheiten im Vergleich mit Messungen in ähnlichen Gesteinen ... 148
4.7.2 Wirtgesteine ... 149
4.7.2.1 Datensatz Opalinuston ... 149
4.7.2.2 Datensatz 'Brauner Dogger' ... 151
4.7.2.3 Datensatz Effinger Schichten ... 153
4.7.2.4 Datensatz Helvetische Mergel ... 155
4.7.3 Untere Rahmengesteine ... 156
4.7.3.1 Datensatz Toniger Lias ... 157
4.7.3.2 Datensatz 'Arietenkalk' und Kalkiger Lias ... 157
4.7.3.3 Datensatz Toniger Keuper ... 157
4.7.3.4 Datensatz Keuper-Aquifer ... 158
4.7.3.5 Datensatz 'Gipskeuper' ... 158
4.7.4 Obere Rahmengesteine ... 158
4.8 Diffusionskoeffzienten der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine (Referenzwerte und Bandbreiten) ... 158
4.8.1 Wirtgesteine ... 158
4.8.2 Untere Rahmengesteine ... 160
4.8.3 Obere Rahmengesteine ... 160
4.9 Bezug zum Bericht Nagra (2014b): Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme ... 160

5 Literaturverzeichnis ... 161

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.2-1: Quellenangaben zu den mineralogischen Daten der Wirtgesteine. 9

Tab. 2.2-2: Mineralogie der Wirtgesteine in der Nordschweiz: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten. 11

Tab. 2.2-3: Mineralogie der Helvetischen Mergel am Wellenberg: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten gemäss Nagra (1997). 13

Tab. 2.3-1: Dichten, Porositäten, Kationenaustauschkapazität und Oberflächen der Wirtgesteine in der Nordschweiz: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten. 24

Tab. 2.3-2: Dichten, Porositäten, Kationenaustauschkapazität und Oberflächen der Helvetischen Mergel am Wellenberg: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten gemäss Nagra (1997). 26

Tab. 2.4-1: Überblick über Inputdaten und Randbedingungen für die Referenzporenwässer. 42

Tab. 2.4-2: Übersicht über die für die Referenzporenwässer verwendeten Daten. 45

Tab. 2.4-3: Vergleich der Zusammensetzung der Referenzporenwässer von SGT Etappe 2 für alle Wirtgesteine (Mäder 2009a, b, 2010; Mazurek et al. 2012). 46

Tab. 2.4-4: Zusammensetzung des Referenzporenwassers für Opalinuston und 'Brauner Dogger' mit Varianten zur Absteckung des möglichen Zusammensetzungsbereichs. 48

Tab. 2.4-5: Varianten der Referenzporenwasserzusammensetzung für die Effinger Schichten zur Eingrenzung des möglichen Zusammensetzungsbereichs. 51

Tab. 2.4-6: Referenzporenwasser für die Helvetischen Mergel (Standortgebiet Wellenberg) mit Varianten, welche den möglichen Zusammensetzungsbereich abstecken. 53

Tab. 2.5-1: Hydraulische Durchlässigkeiten des Opalinustons aus Packertests in den Bohrungen Benken, Riniken, Schafisheim und Weiach (nach Beauheim 2013): Bandbreiten und bester Schätzwert [BE]. 57

Tab. 2.5-2: Zusammenstellung von hydraulischen Untersuchungen an Kernproben aus dem Opalinuston. 59

Tab. 2.5-3: Hydraulische Durchlässigkeiten des 'Braunen Doggers' aus Packertests in den Bohrungen Benken und Schlattingen-1 (nach Beauheim 2013): Bandbreiten und bester Schätzwert [BE]. 61

Tab. 2.5-4: Zusammenstellung von hydraulischen Untersuchungen an Kernproben aus dem 'Braunen Dogger'. 63

Tab. 2.5-5: Hydraulische Durchlässigkeiten der Effinger Schichten aus Packertests in den Bohrungen Gösgen, Küttigen und Oftringen (nach Beauheim 2013): Bandbreiten und bester Schätzwert [BE]. 65

Tab. 2.5-6: Zusammenstellung von hydraulischen Untersuchungen an Kernproben aus den Effinger Schichten. 67

Tab. 2.6-1: Diffusionskoeffizienten D_e und diffusionszugängliche Porositäten ε an Proben der Wirtgesteine gemäss Durch- und Ausdiffusionsexperimenten im Labor sowie In situ-Experimenten im Felslabor Mont Terri. 81

Tab. 4.3-1: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Südranden. 134

Tab. 4.3-2: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Zürich Nordost. 135

Tab. 4.3-3: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Nördlich Lägern. 136

Tab. 4.3-4: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Jura Ost. 137

Tab. 4.3-5: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins Opalinuston und seiner Rahmengesteine im Standortgebiet Jura-Südfuss. 138

Tab. 4.3-6: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss. 139

Tab. 4.4-1: Tonmineralgehalte der Wirtgesteine der Nordschweiz: Referenz- und Eckwerte der lithofaziellen Einheiten. 142

Tab. 4.4-2: Tonmineralgehalte der Helvetischen Mergel: Referenz- und Eckwerte der lithofaziellen Einheiten. 142

Tab. 4.4-3: Tonmineralgehalte der lithofaziellen Einheiten der unteren Rahmengesteine des Opalinustons in denen Sorption berücksichtigt wird. 142

Tab. 4.5-1: Porosität der Wirtgesteine der Nordschweiz: Referenz- und Eckwerte der lithofaziellen Einheiten. 143

Tab. 4.5-2: Helvetische Mergel: Referenz- und Eckwerte der Porositäten der lithofaziellen Einheiten. 147

Tab. 4.5-3: Porositäten der lithofaziellen Einheiten der unteren Rahmengesteine des Opalinustons. 147

Tab. 4.8-1: Eigenschaften und geschätzte Anisotropiefaktoren der Diffusionskoeffizienten der lithofaziellen Einheiten der Wirtgesteine. 159

Tab. 4.8-2: Eigenschaften und geschätzte Anisotropiefaktoren der Diffusionskoeffizienten der unteren Rahmengesteine des Opalinustons. 160

Figurenverzeichnis

Fig. 1.1-1: Tektonische Übersichtskarte der Nordschweiz mit geologischen Standortgebieten und wichtigsten tiefen Bohrungen (Legende s. Beilage 4.1 in Dossier II). 2

Fig. 1.2-1: Stratigraphische Abgrenzung des Wirtgesteins (WG) und des potenziell einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) für die Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' (vgl. Figur 3.3-1 in Dossier II). 4

Fig. 2.2-1: Nomenklatur kalkig-klastischer Sedimentgesteine nach Füchtbauer (1988). 10

Fig. 2.2-2: Mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons in der Darstellung nach Füchtbauer (1988). 14

Fig. 2.2-3: Mineralogische Zusammensetzung des 'Braunen Doggers' in der Darstellung nach Füchtbauer (1988). 16

Fig. 2.2-4: Tonmineralgehalte aus bohrlochgeophysikalischen Logs (Medianwert aus drei Logs, nicht geglättete Daten von Albert & Schwab 2013) im Vergleich mit den im Kern identifizierten "harten Bänken". 17

Fig. 2.2-5: Mineralogische Zusammensetzung der Effinger Schichten in der Darstellung nach Füchtbauer (1988). 18

Fig. 2.2-6: Mineralogische Zusammensetzung der Helvetischen Mergel in der Darstellung nach Füchtbauer (1988). 19

Fig. 2.2-7: Zusammenfassende Darstellung der mineralogischen Zusammensetzung der Wirtgesteine. 20

Fig. 2.3-1: Verteilung von Porositäten in den Wirtgesteinen. 29

Fig. 2.3-2: Abhängigkeit der Porosität vom Tonmineralgehalt in Wirtgesteinen der Nordschweiz (inklusive Mont Terri). 30

Fig. 2.3-3: Abhängigkeit der Hg-Injektionsporosität vom Tonmineralgehalt in den Helvetischen Mergeln. 31

Fig. 2.3-4: Verhältnis von anionen- und wasserzugänglicher Porosität aus Diffusionsexperimenten als Funktion des Tonmineralgehalts. 32

Fig. 2.3-5: Porengrössenverteilung der Opalinustonprobe 590.30 der Bohrung Benken (Nagra 2002a, Gimmi 2003). 33

Fig. 2.3-6: Porengrössenverteilungen der Opalinustonprobe SLA 880.30 der Bohrung Schlattingen-1, abgeleitet aus Daten in Wersin et al. (2013a). 34

Fig. 2.3-7: Porengrössenverteilungen der Proben SLA 765.31 und 816.73 des 'Braunen Doggers' der Bohrung Schlattingen-1, abgeleitet aus Daten in Wersin et al. (2013a). 34

Fig. 2.3-8: Porengrössenverteilungen von Proben OFT 438.59 und OFT 619.07 aus den Effinger Schichten der Bohrung Oftringen, abgeleitet aus Daten in Mazurek et al. (2012). 35

Fig. 2.3-9: Mit BIB-SEM visualisierte Porengeometrien einer Probe aus der tonigen Fazies des Opalinustons im Felslabor Mont Terri. 36

Fig. 2.3-10: TEM-Abbildung einer Probe aus der tonigen Fazies des Opalinustons im Felslabor Mont Terri mit einem detritischen Quarzkorn (links, mit Stern markiert) und Tonmineralen (rechts). ... 36

Fig. 2.3-11: Kationenaustauschkapazität der Wirtgesteine als Funktion des Tonmineralgehalts. ... 37

Fig. 2.3-12: Äussere und totale Oberflächen der Nordschweizer Wirtgesteine. ... 38

Fig. 2.3-13: Totale Oberfläche der Nordschweizer Wirtgesteine als Funktion des Tonmineralgehalts. ... 38

Fig. 2.3-14: Porositäten der Wirtgesteine in der Übersicht. ... 39

Fig. 2.3-15: Kationenaustauschkapazität (repräsentiert durch den Ni-Verbrauch) und äussere Oberfläche (BET-Methode) der Wirtgesteine in der Übersicht. ... 40

Fig. 2.5-1: Hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten). ... 56

Fig. 2.5-2: Hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons im Felslabor Mont Terri (Datensatz extrahiert aus AFC 2012). ... 58

Fig. 2.5-3: Hydraulische Durchlässigkeit des 'Braunen Doggers' in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten). ... 62

Fig. 2.5-4: Hydraulische Durchlässigkeit der Effinger Schichten in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten). ... 66

Fig. 2.5-5: Hydraulische Durchlässigkeit der Helvetischen Mergel in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten). ... 69

Fig. 2.5-6: Grösserräumige (effektive) hydraulische Durchlässigkeit der Helvetischen Mergel im Standortgebiet Wellenberg (Nagra 1997). ... 70

Fig. 2.5-7: Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit vom Tonmineralgehalt in Bohrungen der Nordschweiz und des Wellenbergs. ... 74

Fig. 2.5-8: Permeabilität von Störungen (*Fault rocks*) in verschiedenen Tiefenbereichen der Brent Province (Nordsee) als Funktion des Tonmineralgehalts (nach Jolley et al. 2007). ... 75

Fig. 2.6-1: Diffusionskoeffizienten für HTO und wasserzugängliche Porosität gemäss Durchdiffusionsexperimenten senkrecht zur Schichtung. ... 85

Fig. 2.6-2: Diffusionskoeffizienten für $^{36}Cl^-$ und Cl^--zugängliche Porosität gemäss Durchdiffusionsexperimenten senkrecht zur Schichtung. ... 85

Fig. 2.6-3: Diffusionskoeffizienten für $^{22}Na^+$ und wasserzugängliche Porosität gemäss Durchdiffusionsexperimenten senkrecht zur Schichtung. ... 86

Fig. 2.6-4: Beziehung zwischen dem effektiven Diffusionskoeffizienten für HTO senkrecht zur Schichtung und der wasserzugänglichen Porosität für eine Reihe von tonmineralreichen Formationen. ... 89

Fig. 2.6-5: Beziehung zwischen dem effektiven Diffusionskoeffizienten für Cl^- senkrecht zur Schichtung und der Cl^--zugänglichen Porosität für eine Reihe von tonmineralreichen Formationen. ... 90

Fig. 2.7-1: Geometrische Konzeptualisierung von beobachteten Brucharchitekturen im Opalinuston. ... 92

Fig. 2.7-2: Lokalisierung von *Wet spots* in den Bohrungen BWS-H1 und BWS-H2 (nach Mazurek et al. 2009a). 94

Fig. 2.7-3: Geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen im 'Braunen Dogger' (aus Mazurek 2013a). 97

Fig. 2.7-4: Vorkommen von Kalkbänken (rot), Kalkbankabfolgen (KBA, hellblau) sowie weiteren lithologischen Elementen (dunkelblau, grau) in den Kernbohrungen Oftringen (linke Skala) und Gösgen KB5a (rechte Skala) (aus Mazurek 2013b). 100

Fig. 2.7-5: Kernfotos im Bereich der Gerstenhübel-Schichten (585.00 – 587.14 m) in der Bohrung Oftringen. 102

Fig. 2.7-6: Geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen in den Effinger Schichten (aus Mazurek 2013b). 103

Fig. 2.7-7: Geometrisches Konzept für Spröddeformation in geschichteten Medien nach Ferrill & Morris (2003). 104

Fig. 2.7-8: Geometrische Konzeptualisierung von wasserführenden Strukturen in den Helvetischen Mergeln (Nagra 1997). 108

Fig. 2.7-9: Geometrie von Störungen in der Palfris-Formation (Nagra 1997). 109

Fig. 2.7-10: Strukturelle Karte, mechanistische Interpretation und mögliche modellhafte Konzeptualisierungen einer Störung in der Palfris-Formation. 110

Fig. 2.7-11: Korrelationsversuch im Bereich der Bohrungen SB4 – SB4a/v – SB4a/s mit Kalkbankabfolgen sowie duktilen und spröden Grossstrukturen (Nagra 1997). 111

Fig. 2.8-1: Profil von δ^2H in der Bohrung Benken und Resultate von advektiv-diffusiven Modellrechnungen (farbige Kurven). 113

Fig. 3.2-1: West-Ost-Profil der hydraulischen Durchlässigkeit von potenziell durchlässigen Formationen der unteren Rahmengesteine des Opalinustons beobachtet in Tiefbohrungen (aus Nagra 2002a). 117

Fig. 4.2-1: Schematische Darstellung potenziell wasserführender Systeme in einer Abfolge von "harten Bänken" (Kalke, Sandkalke, Sandsteine) mit schlechtem Selbstabdichtungsvermögen, eingebettet in einer geringer durchlässigen tonreicheren Gesteinseinheit. 124

Fig. 4.3-1: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Südranden (vgl. Beilage A1-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und seiner Rahmengesteine. 127

Fig. 4.3-2: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Zürich Nordost (vgl. Beilage A1-6 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und des 'Braunen Doggers' und ihrer Rahmengesteine. 128

Fig. 4.3-3: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Nördlich Lägern (vgl. Beilage A2-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und des 'Braunen Doggers' und ihrer Rahmengesteine. 129

Fig. 4.3-4: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Jura Ost (vgl. Beilage A3-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und seiner Rahmengesteine. 130

Fig. 4.3-5: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Jura-Südfuss (vgl. Beilage A4-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und seiner Rahmengesteine. 131

Fig. 4.3-6: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Jura-Südfuss (vgl. Figur 3.3-16 in Dossier II) mit Konzeptualisierung der Effinger Schichten. 132

Fig. 4.3-7: Geologische Konzeptprofile und Konzeptprofile für die provisorische Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich für die geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz. 133

Fig. 4.3-8: Geologisches Konzeptbild für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Standortgebiet Wellenberg. 141

Fig. 4.5-1 Boxplot-Darstellung der Pyknometerporositäten des Opalinustons in Bohrungen der Nordschweiz und im Felslabor Mont Terri (MT). 145

Fig. 4.5-2: Tonreiche Abfolge des 'Braunen Doggers': Boxplot-Darstellung der Pyknometerporosität. 146

Beilagenverzeichnis

Beil. 6-1: Geologische Konzeptbilder der Gesteinsprofile für die Standortgebiete der Nordschweiz

(Anmerkung: In der digitalen Version dieses Berichtes (PDF) sind die Beilagen im Register "ANLAGEN" (Symbol Büroklammer) abgelegt.)

1 Einleitung

1.1 Inhalt des Dossiers

Die in SGT Etappe 2 verlangte provisorische Sicherheitsanalyse und der sicherheitstechnische Vergleich beinhalten Dosisberechnungen, eine qualitative und quantitative Bewertung der SGT-Kriterien bzw. der zugehörigen Indikatoren und die Identifikation von allenfalls vorhandenen eindeutigen Nachteilen (BFE 2008). Die qualitative und quantitative Charakterisierung der Barriereneigenschaften der im Rahmen von SGT Etappe 1 ausgewählten Wirt- und Rahmengesteine bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs[1] spielt dabei eine zentrale Rolle.

In diesem Dossier sind die entsprechenden geologischen Grundlagen zusammenfassend dokumentiert, namentlich die Mächtigkeit und laterale Ausdehnung der Wirt- und Rahmengesteine und ihrer lithofaziellen Einheiten, der mineralogische und petrophysikalische Aufbau dieser Gesteine, Beobachtungen zur Art des Radionuklidtransports (poröses vs. geklüftetes Medium, interne Struktur von potenziell wasserführenden Störungen) und daraus abgeleitete konzeptuelle Modelle. Weitere Grundlagen sind Parameter für die Quantifizierung des advektiv-dispersiven und diffusiven Radionuklidtransports in den Gesteinen sowie die geochemischen Bedingungen, welche die Speziation der Radionuklide und somit deren Sorptionsverhalten und Löslichkeit bestimmen.

Die Charakterisierung der Barriereneigenschaften beruht auf einer sehr breiten Datenbasis. Datenquellen sind zahlreiche Bohrungen im Bereich der geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz (Fig. 1.1-1), Daten aus 7 Bohrungen im Standortgebiet Wellenberg (Nagra 1997) sowie Feldaufnahmen an Aufschlüssen (die stratigraphischen Sammelprofile aller Standortgebiete der Nordschweiz sind in den standortspezifischen Anhängen von Dossier II zu finden). Für den Opalinuston besteht zudem ein umfangreicher Datensatz aus dem Felslabor Mont Terri. Berücksichtigt wurden auch Erfahrungen aus Untertagebauten in den Wirtgesteinen ausserhalb der Standortgebiete sowie Permeabilitäts-/Durchlässigkeits- und Diffusionsmessungen von ähnlichen Gesteinen.

Die Bewertung der Eigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine ist im sicherheitstechnischen Vergleich (Nagra 2014a) zu finden, die Ergebnisse der Radionuklidtransportrechnungen für das Inventar der verschiedenen Abfallkategorien sind detailliert in Nagra (2014b) und zusammengefasst in Nagra (2014a) dokumentiert.

[1] Definitionen und Abgrenzungen, siehe Kap. 1.2.

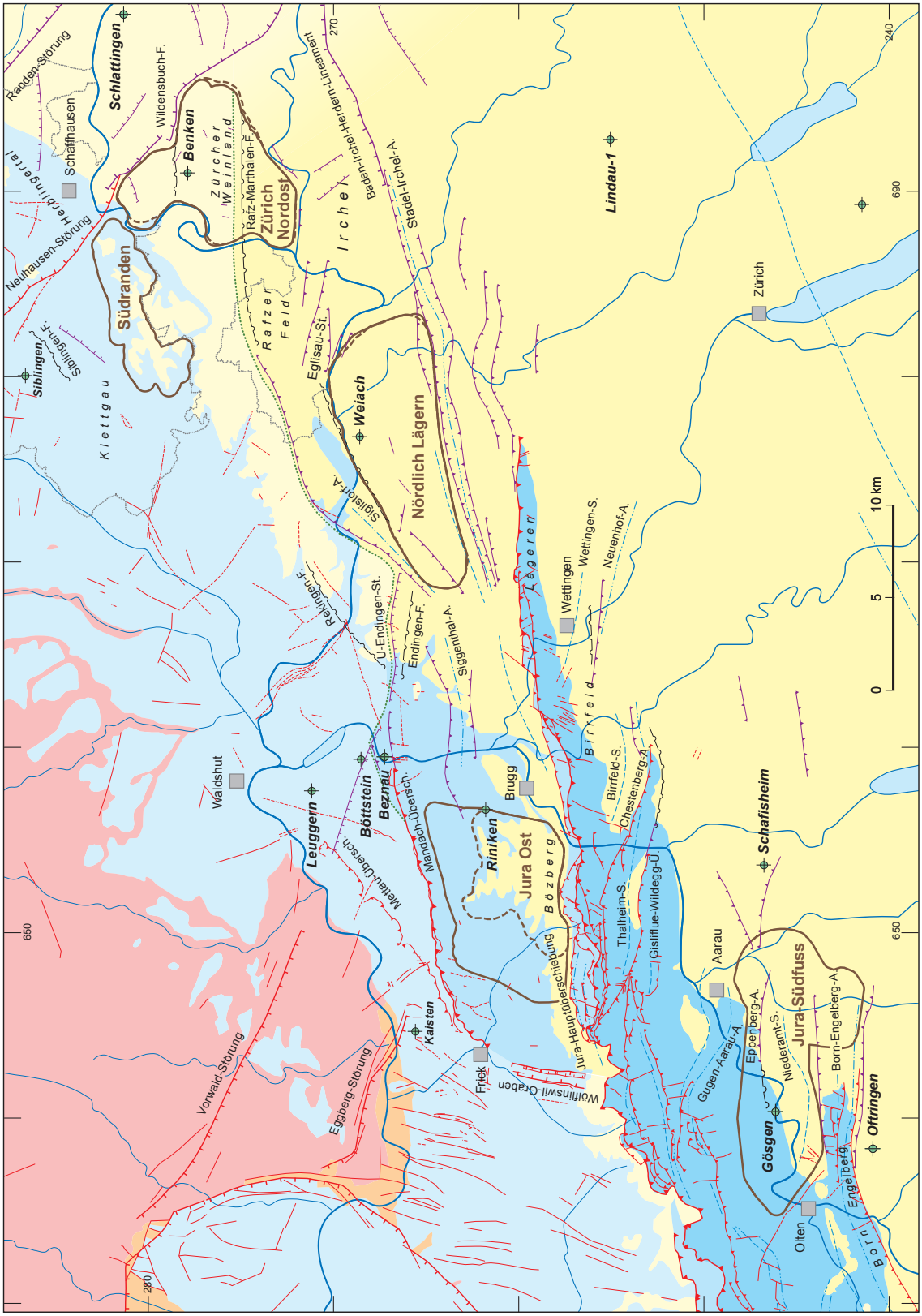


Fig. 1.1-1: Tektonische Übersichtskarte der Nordschweiz mit geologischen Standortgebieten und wichtigsten tiefen Bohrungen (Legende s. Beilage 4.1 in Dossier II).

1.2 Wirtgesteine, Rahmengesteine und einschlusswirksamer Gebirgsbereich: Definitionen, Abgrenzungen

Ein Wirtgestein bildet zusammen mit seinen gering durchlässigen Rahmengesteinen definitionsgemäss den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (BFE 2008).

Die Wirtgesteine in der Nordschweiz (Opalinuston, 'Brauner Dogger'[2] und Effinger Schichten) haben in mehreren geologischen Standortgebieten auch die Funktion von Rahmengesteinen eines anderen Wirtgesteins (Fig. 1.2-1). Aus diesem Grund stellt die Charakterisierung dieser Wirtgesteine gleichzeitig auch eine Charakterisierung der entsprechenden Rahmengesteine dar. Die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenberg haben keine Rahmengesteine; diese Wirtgesteine entsprechen dem gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs hängt von den lokalen Gegebenheiten ab und ist zum Teil mit grösseren Ungewissheiten behaftet. In der Nordschweiz reicht der einschlusswirksame Gebirgsbereichs im günstigsten Fall vom Top des Muschelkalk-Aquifers bis an die Basis des Malm- bzw. Hauptrogenstein-Aquifers. Weil seine Ausdehnung auch geringer sein kann, wird dieser Bereich auch als *potenziell* einschlusswirksamer Gebirgsbereich bezeichnet.

Die unteren Rahmengesteine des Opalinustons haben aufgrund der beschränkten Mächtigkeit tonreicher Abfolgen keine Wirtgesteinsfunktion. Sie tragen in den meisten Standortgebieten in einem gewissen Ausmass zur Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei. Die Barrierenfunktion der unteren Rahmengesteine bzw ihre Untergrenze hängt von der hydrogeologischen Einstufung potenziell durchlässiger lithofazieller Einheiten im Lias und im Keuper ab, welche je nach Standortgebiet verschieden sein kann. Dabei geht es auch um die Frage, ob diese lithofaziellen Einheiten lateral kontinuierlich oder nur lokal ausgebildet sind. Bezüglich der Barrierenwirkung der potenziell durchlässigen Einschaltungen wird bei den Dosisberechnungen und beim sicherheitstechnischen Vergleich aufgrund der relativ grossen Ungewissheiten bezüglich der hydrogeologischen Bedeutung der einzelnen Einheiten ein breites Spektrum von Konzeptualisierungen betrachtet (Nagra 2014a, b).

In den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss bilden die Passwang-Formation und die Unteren Acuminata-Schichten die oberen Rahmengesteine des Opalinustons. Sie haben dort insgesamt einen grösseren Anteil an kalkig-sandigen lithofaziellen Einheiten als der 'Braune Dogger' im Faziesraum Ost und haben deshalb keine Wirtgesteinsfunktion.

---

[2] Mit dem Begriff Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' (kurz 'Brauner Dogger') wird seit SGT Etappe 1 eine Abfolge von tonreichen Gesteinseinheiten zusammengefasst, welche stratigraphisch zwischen dem Opalinuston und der Wildegg-Formation (Birmenstorfer und Effinger Schichten) liegt, im Geologischen Atlas der Schweiz mit braunen Farbtönen dargestellt ist und vom Tafeljura östlich des unteren Aaretals bis zum Nordrand des Molassebeckens im Gebiet Zürcher Weinland – Schaffhausen vorkommt.

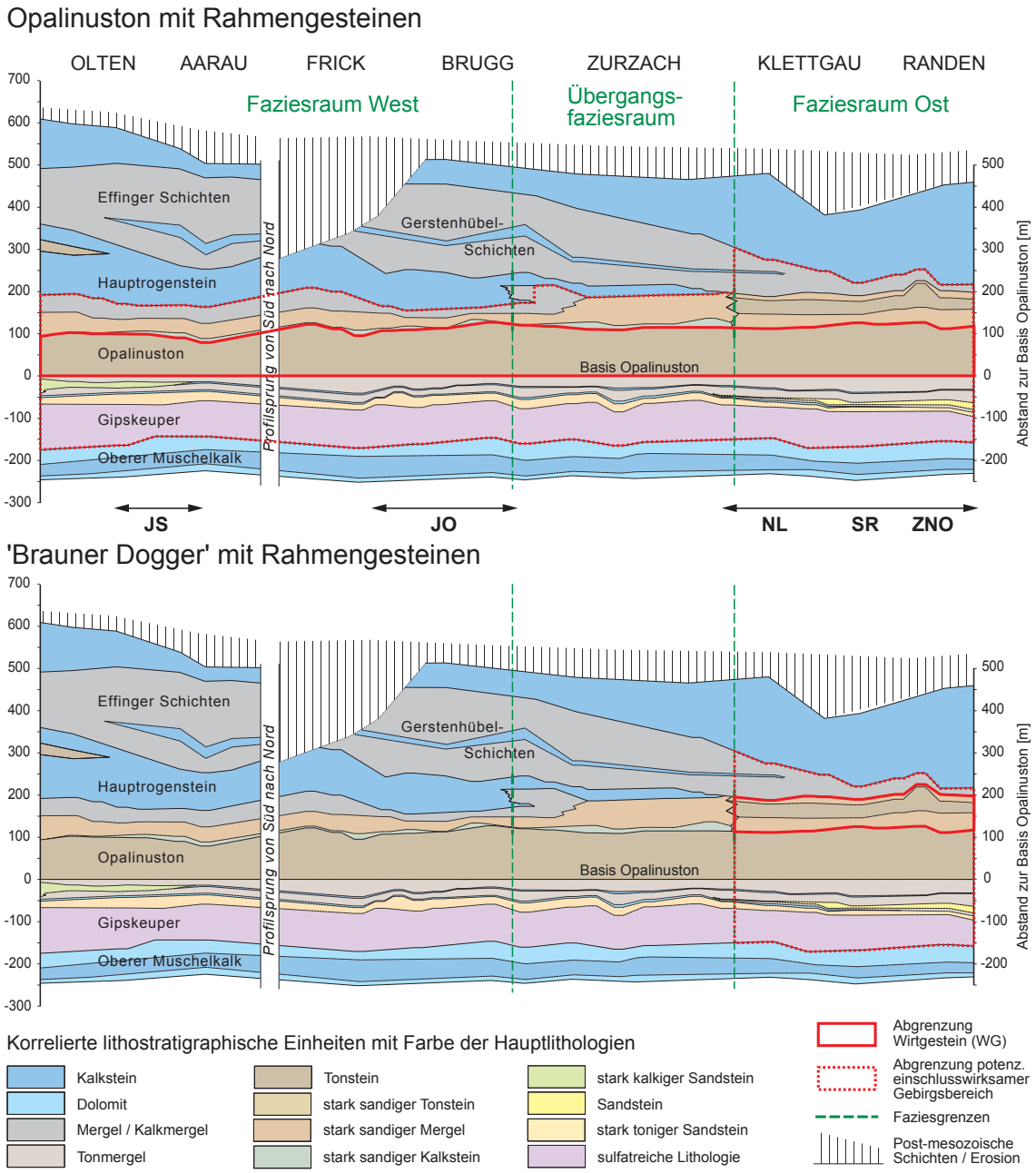


Fig. 1.2-1: Stratigraphische Abgrenzung des Wirtgesteins (WG) und des potenziell einschluss-wirksamen Gebirgsbereichs (EG) für die Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' (vgl. Figur 3.3-1 in Dossier II).

1.3 Bedeutung für den sicherheitstechnischen Vergleich für SGT Etappe 2: Übersicht der betroffenen Indikatoren

Das vorliegende Dossier liefert Grundlagen für die Bewertung folgender Kriterien und Indikatoren des Sachplans Geologische Tiefenlager (SGT; BFE 2008):

- Kriterium 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung: Indikatoren '*Tiefenlage im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', 'Hydraulische Durchlässigkeit'*
- Kriterium 1.3 Geochemische Bedingungen: Indikatoren '*Mineralogie', 'pH', 'Redox-Bedingungen', 'Salinität', 'mikrobielle Prozesse', 'Kolloide'*
- Kriterium 1.4 Freisetzungspfade: Indikatoren '*Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums', 'Homogenität des Gesteinsaufbaus', 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade', 'Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade', 'Tonmineralgehalt (als Grundlage für Durchlässigkeit/Transmissivität/Selbstabdichtungsvermögen)', 'Selbstabdichtungsvermögen'*
- Kriterium 2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften: Indikator *'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen (Verkarstungsfähigkeit der Wirtgesteine)'*
- Kriterium 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen: Indikator *'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation'.*

1.4 Aufbau des Dossiers

In Kap. 2 und 3 werden die Grundlagendaten (Messungen, Beobachtungen) dokumentiert, in Kap. 4 werden darauf basierend vereinfachte konzeptuelle Modelle entwickelt und Eingabeparameter (Referenzwerte, Eckwerte) für die Dosisberechnungen hergeleitet.

Nach der Einleitung (Kap. 1) werden in Kap. 2 die Barriereneigenschaften der vier Wirtgesteine evaluiert. Das Kapitel ist gegliedert nach sedimentologischen, mineralogischen, petrophysikalischen, geochemischen und hydraulischen Eigenschaften, gefolgt von Diffusionseigenschaften und einer Charakterisierung der potenziell wasserführenden Systeme. Am Schluss werden unabhängige Evidenzen für die geringe Durchlässigkeit der Wirtgesteine angeführt.

In Kap. 3 sind die Barriereneigenschaften derjenigen Rahmengesteine dokumentiert, welche keine Wirtgesteinsfunktion haben und deshalb in Kap. 2 nicht behandelt werden.

Kap. 4 beschreibt am Anfang die vereinfachte Gliederung der Wirt- und Rahmengesteine in drei Typen von lithofaziellen Einheiten mit unterschiedlichem Selbstabdichtungsvermögen und die Auswirkung einer tektonischen Überprägung. Danach werden standortspezifisch Modellkonzepte entwickelt, unter Berücksichtigung der lokalen sedimentologischen Verhältnisse und der Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten. Auf Basis der in Kap. 2 und 3 zusammengestellten Daten werden schliesslich Referenz- und Eckwerte der Eingabeparameter für die Dosisberechnungen abgeleitet.

2 Barriereneigenschaften der Wirtgesteine

Dieses Kapitel enthält Beschreibungen und Ergebnisse von Feld- und Labormessungen an den vier Wirtgesteinen sowie Vergleiche mit ähnlichen Gesteinen. Daraus abgeleitete Referenz- und Eckwerte der Eingabeparameter für die Dosisberechnungen sind in Kap. 4 zu finden.

2.1 Aufbau der Wirtgesteine: Lithofazielle Einheiten

In den Wirtgesteinen können verschiedene lithofazielle Einheiten mit unterschiedlichen Eigenschaften mit Relevanz für die Barrierenwirkung und in Hinsicht auf die Sicherheitsbetrachtungen unterschieden werden (vgl. Kap. 4.3 und Fig. 4.3-7). Die schematische Unterteilung basiert auf der lithofaziellen Beschreibung der Gesteine und berücksichtigt v.a. auch die z.T. gemessenen und z.T. abgeschätzten Tonmineralgehalte (Kap. 2.2 dieses Dossiers sowie Kapitel 3 in Dossier II). Lithofazielle Einheiten werden nur ausgeschieden, wenn sie mindestens ca. 1 m mächtig sind, d.h. dass beispielsweise eine einzelne, dm-mächtige Kalkbank in einer tonigen Abfolge nicht ausgeschieden wird (wohl aber der Verband solcher Bänke in grösserem Massstab, z.B. in den Effinger Schichten oder im 'Braunen Dogger'). Aus den Tiefbohrungen in der Nordschweiz gibt es keine Hinweise, dass solche Lagen eine hydrogeologische Bedeutung haben. Ausserdem werden auch nur lithofazielle Einheiten ausgeschieden, bei welchen eine laterale Ausdehnung in der Grössenordnung von 200 m und mehr[3] nicht ausgeschlossen werden kann. Die lithofaziellen Einheiten werden aufgrund der Erfahrungen betreffend Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine vom Tonmineralgehalt im Hinblick auf die Konzeptualisierung in drei Kategorien unterteilt (< 20 Gew.-%, 20 – 40 Gew.-% und > 40 Gew.-%, vgl. Kap. 4.2). Das standortspezifische Auftreten der lithofaziellen Einheiten und deren Mächtigkeiten werden in Kap. 4.3 erläutert.

Der **Opalinuston** der Nordschweiz lässt sich in ca. 5 lithologische Untereinheiten gliedern (vgl. Figur 3.3-8 in Dossier II), welche ähnliche hydrogeologische Eigenschaften bzw. eine ähnliche Barrierenwirkung für den Radionuklidstransport aufweisen. Aus diesem Grund wird der Opalinuston in der Sicherheitsanalyse als eine einzige lithofazielle Einheit (OPA) betrachtet, welche einen mittleren Tonmineralgehalt von > 40 Gew.-% aufweist (Kap. 2.2).

Die Sedimente des **'Braunen Doggers'** können vereinfacht in drei lithofazielle Einheiten unterteilt werden (z.B. Fig. 4.3-1, Bläsi et al. 2013, Kapitel 3.3 in Dossier II):

- Tonige Abfolgen (TA): Unter diesem Begriff werden die Tonmergel und Tonsteine der Parkinsoni-Württembergica-Schichten und der Variansmergel-Formation im oberen Teil des 'Braunen Doggers' zusammengefasst (Bohrungen Weiach, Benken, Schlattingen-1; s. Bläsi et al. 2013). Der mittlere Tonmineralgehalt ist in der Regel grösser als 40 Gew.-%. Diese lithofazielle Einheit bildet das Wirtgestein *sensu stricto* (Nagra 2014a) des 'Braunen Doggers' (Einheit TA-1 in Fig. 4.3-7).
- Sandig-tonige Abfolgen (STA): Unter diesem Begriff werden die z.T. stark sandigen Tonsteine und Mergel der Murchisonae-Oolith-, Wedelsandstein- und Humphriesioolith-Formation zusammengefasst. Der mittlere Tonmineralgehalt schwankt zwischen 20 und 40 Gew.-%. Die Formationen sind durch grosse laterale und vertikale Fazieswechsel geprägt.

[3] Der Mindestabstand zu regionalen Störungszonen beträgt 200 m

- Sandkalkabfolgen (SKA): Unter diesem Begriff werden die im 'Braunen Dogger' anzutreffenden Abfolgen von "harten Bänken" zusammengefasst. Ein detailliertes Inventar der Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 findet sich in Bläsi et al. (2013). Lithologisch können die Sandkalkabfolgen unterteilt werden in eisenoolithische Intervalle und sandig-kalkige Bankabfolgen:
  - Eisenoolithische Intervalle: Die Mächtigkeiten sind in den Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 kleiner als 5 m, in rund der Hälfte der Fälle kleiner als 1 m (Mazurek 2013a). Der lithologische Aufbau ist heterogen (Bläsi et al. 2013). In den meisten Fällen liegen die mittleren Tonmineralgehalte bei über 20 Gew.-%, teilweise gar über 40 Gew.-%. Betrachtet man nur Bänke mit über 1 m Mächtigkeit, so finden sich in den Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 drei Intervalle mit weniger als 20 Gew.-% mittlerem Tonmineralgehalt (Mazurek 2013a).
  - Sandig-kalkige Bänke: Diese finden sich in geringer Mächtigkeit in nahezu allen Formationen des 'Braunen Doggers'. In den Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 beträgt die maximale Mächtigkeit 60 cm, der Mittelwert liegt bei 20 cm (Mazurek 2013a). Die einzelnen Bänke können Kalkbankabfolgen bilden. Aus der seismischen Faziesanalyse gibt es Hinweise, dass im östlichsten Teil des Standortgebiets Nördlich Lägern die Mächtigkeiten oder der relative Anteil dieser Bänke bedeutend grösser sein könnten (Meier & Deplazes 2014b). Dominierende Lithologien sind biodetritische Kalke, sandige Kalke und sandige Kalkmergel (Mazurek 2013a) mit mittleren Tonmineralgehalten < 20 Gew.-%.

Die **Effinger Schichten** lassen sich vereinfacht in zwei lithofazielle Einheiten unterteilen (Deplazes et al. 2013, Traber & Blaser 2013, Kapitel 3.3 in Dossier II):

- Kalkmergelabfolgen (KMA) mit Mächtigkeiten meist > 10 m bis mehrere Dekameter, mit mittleren Tonmineralgehalten 20 – 40 Gew.-%. Die Kalkmergelabfolge KMA-5 (Fig. 4.3-6 und 4.3-7) stellt das Wirtgestein *sensu stricto* dar.
- Kalkbankabfolgen (KBA) mit Mächtigkeiten meist < 10 m (wichtigste Ausnahme: östliche Gerstenhübel-Schichten bis 30 m), mit mittleren Tonmineralgehalten < 20 Gew.-%.

Die **Mergel-Formationen des Helvetikums (Helvetische Mergel)** sind im Standortgebiet Wellenberg so stark ineinander verschuppt und verfaltet, dass sich nur zwei lithofazielle Einheiten ausscheiden lassen, welche sich über grössere Distanzen verfolgen lassen (Nagra 1997, Kapitel 3.3 in Dossier II):

- Mergel (MGL), welche die Hauptmasse des Wirtgesteins bilden und aus Lithologien mit einem breiten Spektrum von Tonmineralgehalten bestehen. Die in grösseren Tiefen (> 600 m) gemessenen, sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten sind vermutlich durch den eingeschuppten und eingefalteten Anteil an Lithologien mit mittleren Tonmineralgehalten um 40 Gew.-% zu erklären. Die lithofazielle Einheit Mergel (MGL) weist als ganzes mittlere Tonmineralgehalte von 20 – 40 Gew.-% auf.
- Kalkbankabfolgen (KBA, mittlere Tonmineralgehalte < 20 Gew.-%), welche zwar häufig boudiniert und auseinandergerissen sind, für welche aber Hinweise bestehen, dass sie stellenweise über grössere Distanzen zusammenhängend sein könnten (Fig. 2.7-11).

2.2 Mineralogische Zusammensetzung

2.2.1 Datenbasis und Methodik

Für alle Wirtgesteinseinheiten besteht eine umfassende mineralogische Datenbasis. Der Grossteil der Daten ist in Mazurek (2011) zusammengestellt und statistisch ausgewertet. Traber & Blaser (2013) haben auf dieser Basis Referenz- und Eckwerte für die Weiterverwendung der Daten in der Sorptionsdatenbank (Baeyens et al. 2014) abgeleitet. Die Originalquellen aller mineralogischen Daten sind in Tab. 2.2-1 zusammengestellt.

Die mineralogischen Analysen wurden mittels Röntgendiffraktometrie und Coulometrie durchgeführt. Eine Dokumentation der Methodik ist z.B. Mazurek et al. (2012) zu entnehmen. Die auf der mineralogischen Zusammensetzung basierende lithologische Nomenklatur nach Füchtbauer (1988) ist in Fig. 2.2-1 dargestellt.

Tab. 2.2-1: Quellenangaben zu den mineralogischen Daten der Wirtgesteine.

Einheit	**Lokalität**	**Referenz**
Opalinuston	Benken	Langer et al. (2001), Waber et al. (2003)
	Beznau	Peters & Matter (1981)
	Mont Terri	Bläsi et al. (1991), Pearson et al. (2003)
	Riniken	Matter et al. (1987), Meier & Mazurek (2011)
	Schafisheim	Matter et al. (1988b), Meier & Mazurek (2011)
	Schlattingen-1	Wersin et al. (2013a)
	Weiach	Matter et al. (1988a), Meier & Mazurek (2011)
'Brauner Dogger'	Benken	Langer et al. (2001), Waber et al. (2003), Meier & Mazurek (2011)
	Schlattingen-1	Wersin et al. (2013a)
	Weiach	Matter et al. (1988a), Meier & Mazurek (2011)
	Aufschlüsse Wutach (D)	Mazurek (2013a)
Effinger Schichten	Benken	Langer et al. (2001), Waber et al. (2003), Meier & Mazurek (2011)
	Gösgen	Mazurek et al. (2012)
	Oftringen	Albert & Bläsi (2008), Mazurek et al. (2012), Mazurek (2013b)
	Schlattingen-1	Wersin et al. (2013a)
	Weiach	Matter et al. (1988a), Meier & Mazurek (2011)
	Jakobsberg	Mazurek (2013b)
	Schümel	Mazurek (2013b)
Helvetische Mergel	Wellenberg	Mazurek et al. (1994), Nagra (1997)

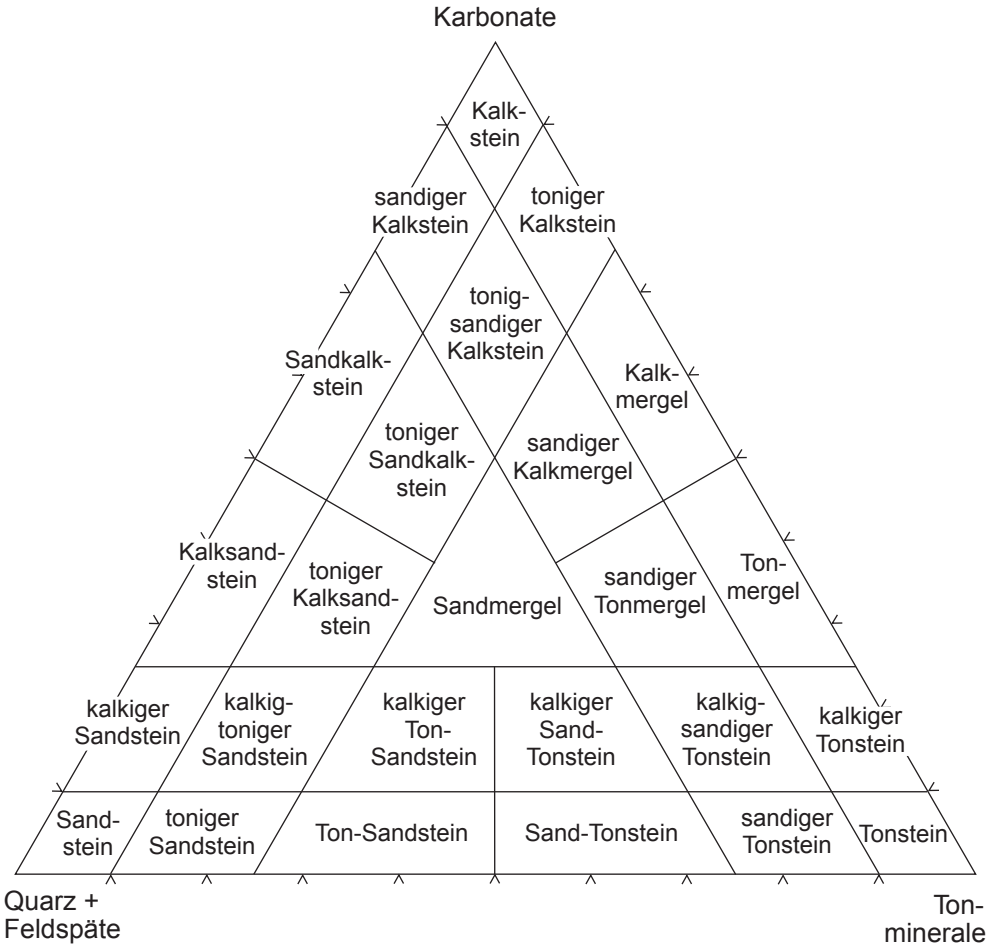


Fig. 2.2-1: Nomenklatur kalkig-klastischer Sedimentgesteine nach Füchtbauer (1988).

Alternativ wird statt Sand-Tonstein die Bezeichnung 'stark sandiger Tonstein' oder statt kalkiger Sand-Tonstein 'kalkiger stark sandiger Tonstein' verwendet.

2.2.2 Resultate und Diskussion

Statistische Kennwerte zur Mineralogie aller Wirtgesteine aufgrund der verfügbaren Daten sind in Tab. 2.2-2 und 2.2-3 dargestellt. Graphische Darstellungen der wichtigsten Mineralgruppen im Dreiecksdiagramm nach Füchtbauer (1988) finden sich in Fig. 2.2-2, 2.2-3, 2.2-5 und 2.2-6. In allen Wirtgesteinen kommen weitgehend dieselben Minerale vor, wenn auch in verschiedenen Anteilen. Siltig-sandige klastische Komponenten beinhalten Quarz und kleine Anteile an Feldspäten. Karbonate sind von Calcit dominiert, als untergeordnete Phase kommen Dolomit/Ankerit und Siderit vor. Pyrit ist in allen Einheiten die dominierende Sulfid-Phase, ebenso enthalten alle Einheiten kleine Anteile (meist < 1 Gew.-%) organischen Materials. Die Tonminerale werden von Illit und Illit-reichen Illit-Smektit-Wechsellagerungen dominiert, mit variablen Anteilen an Chlorit und Kaolinit.

Tab. 2.2-2: Mineralogie der Wirtgesteine in der Nordschweiz: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten.

Datenbasis: Kompilation von Daten der Nordschweiz (Mazurek 2011) sowie neueren Daten aus der Bohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a), aus den Steinbrüchen Jakobsberg und Schümel sowie neue Analysen der Gerstenhübel-Schichten der Bohrung Oftringen (Mazurek 2013b). BEN = Benken, BEZ = Beznau, GOS = Gösgen KB5a, MT = Mont Terri, OFT = Oftringen, RIN = Riniken, SHA = Schafisheim, SLA = Schlattingen-1, WEI = Weiach, JAK = Steinbruch Jakobsberg, SML = Steinbruch Schümel.

Pro Standort wurde der arithmetischer Mittelwert für alle Parameter berechnet. Aus diesen Werten wurde dann der in der Tabelle angegebene "Mittelwert (Mittel der Mittelwerte jedes Standorts") berechnet. Dadurch erhält jeder Standort dasselbe Gewicht bei der Ermittlung des regionalen Mittelwerts, unabhängig von der Zahl Einzelmessungen pro Standort.

	Quarz [Gew.-%]	**Kalifeldspat** [Gew.-%]	**Plagioklas** [Gew.-%]	**Calcit** [Gew.-%]	**Dolomit + Ankerit** [Gew.-%]	**Siderit** [Gew.-%]	**Anhydrit** [Gew.-%]	**Gips** [Gew.-%]	**Pyrit** [Gew.-%]	**C(org)** [Gew.-%]	**Illit** [Gew.-% des Gest.]	**Il/Sm WL** [Gew.-% des Gest.]	**Smektit** [Gew.-% des Gest.]	**Kaolinit** [Gew.-% des Gest.]	**Chlorit** [Gew.-% des Gest.]	**Chl/Sm WL** [Gew.-% des Gest.]	**Summe Tonmin.** [Gew.-% des Gest.]
Opalinuston																	
Mittelwert (Mittel der Mittelwerte jedes Standorts)	19.9	1.8	1.0	13.6	0.6	3.1	0.1	0.0	1.2	0.6	22.9	12.3	0.0	18.2	7.6	0.0	59.2
1 sigma (Variabilität der Mittelwerte der Standorte)	2.5	0.7	0.3	3.3	0.3	1.7	0.3	0.0	0.2	0.2	6.6	5.5	0.0	3.6	2.4	0.0	5.1
Anzahl Standorte	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Mittelwert aller Einzelanalysen	19.9	1.9	0.9	13.8	0.5	3.4	0.1	0.0	1.2	0.7	22.0	13.2	0.0	18.6	7.3	0.0	58.8
1 sigma aller Einzelanalysen	5.9	1.4	0.8	9.5	0.9	5.0	0.6	0.1	0.9	0.4	7.9	7.1	0.0	5.6	3.1	0.0	11.6
Minimalwert (Einzelanalyse)	6.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	5.0	2.8	0.0	7.0	2.0	0.0	17.4
Maximalwert (Einzelanalyse)	40.0	7.5	5.0	67.0	8.0	40.0	5.0	1.0	4.5	2.7	35.6	31.0	0.2	30.7	14.3	0.0	81.8
Anzahl Einzelanalysen	125	125	125	223	223	223	125	125	121	221	84	84	84	84	84	84	125
Datenherkunft	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI

Tab. 2.2-2: (Fortsetzung)

	Quarz [Gew.-%]	**Kalifeldspat** [Gew.-%]	**Plagioklas** [Gew.-%]	**Calcit** [Gew.-%]	**Dolomit + Ankerit** [Gew.-%]	**Siderit** [Gew.-%]	**Anhydrit** [Gew.-%]	**Gips** [Gew.-%]	**Pyrit** [Gew.-%]	**C(org)** [Gew.-%]	**Illit** [Gew.-% des Gest.]	**Il/Sm WL** [Gew.-% des Gest.]	**Smektit** [Gew.-% des Gest.]	**Kaolinit** [Gew.-% des Gest.]	**Chlorit** [Gew.-% des Gest.]	**Chl/Sm WL** [Gew.-% des Gest.]	**Summe Tonmin.** [Gew.-% des Gest.]
'Brauner Dogger'																	
Mittelwert (Mittel der Mittelwerte jedes Standorts)	20.1	2.9	0.7	30.3	1.8	0.6	0.0	0.0	1.4	0.4	13.2	14.8	0.0	10.5	4.2	0.0	43.4
1 sigma (Variabilität der Mittelwerte der Standorte)	2.8	0.6	0.3	0.5	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	6.0	5.7	0.0	3.6	1.6	0.0	6.6
Anzahl Standorte	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Mittelwert aller Einzelanalysen	20.8	3.0	0.8	30.5	1.7	0.7	0.0	0.0	1.4	0.4	13.0	14.5	0.0	10.7	4.2	0.0	42.1
1 sigma aller Einzelanalysen	9.4	2.0	1.0	17.5	2.8	1.6	0.0	0.0	0.8	0.3	7.5	8.7	0.0	6.7	4.3	0.2	16.1
Minimalwert (Einzelanalyse)	1.7	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	4.2
Maximalwert (Einzelanalyse)	48.8	9.1	4.0	85.0	19.9	8.0	0.0	0.0	3.2	1.8	34.3	34.0	0.2	23.7	27.6	1.0	70.1
Anzahl Einzelanalysen	51	51	51	83	83	83	51	51	55	84	40	40	40	40	40	40	51
Datenherkunft	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI
Effinger Schichten																	
Mittelwert (Mittel der Mittelwerte jedes Standorts)	6.9	0.3	0.2	66.3	2.5	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	10.9	8.7	0.1	4.3	1.1	0.0	22.2
1 sigma (Variabilität der Mittelwerte der Standorte)	1.8	0.2	0.4	5.3	1.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	6.0	2.3	0.2	2.1	0.8	0.0	3.6
Anzahl Standorte	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	5	5	5	5	5	5	7
Mittelwert aller Einzelanalysen	7.6	0.4	0.0	64.7	2.6	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	9.4	8.4	0.2	5.3	0.6	0.0	21.6
1 sigma aller Einzelanalysen	3.8	0.5	0.3	15.3	2.9	0.1	0.0	0.0	0.5	0.3	6.5	3.3	0.7	4.3	0.9	0.0	10.7
Minimalwert (Einzelanalyse)	0.7	0.0	0.0	30.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Maximalwert (Einzelanalyse)	17.0	2.0	2.0	99.3	15.0	1.0	0.0	0.0	2.2	1.1	29.2	13.0	3.0	14.0	3.8	0.0	51.5
Anzahl Einzelanalysen	86	86	86	117	117	117	86	86	92	117	39	39	39	39	39	39	86
Datenherkunft	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI JAK SML

Tab. 2.2-3: Mineralogie der Helvetischen Mergel am Wellenberg: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten gemäss Nagra (1997).

	Quarz [Gew.-%]	**Kalifeldspat** [Gew.-%]	**Plagioklas** [Gew.-%]	**Calcit** [Gew.-%]	**Dolomit + Ankerit** [Gew.-%]	**Siderit** [Gew.-%]	**Anhydrit** [Gew.-%]	**Gips** [Gew.-%]	**Pyrit** [Gew.-%]	**C(org)** [Gew.-%]	**Illit** [Gew.-% des Gest.]	**Il/Sm WL** [Gew.-% des Gest.]	**Smektit** [Gew.-% des Gest.]	**Kaolinit** [Gew.-% des Gest.]	**Chlorit** [Gew.-% des Gest.]	**Chl/Sm WL** [Gew.-% des Gest.]
Helvetische Mergel																
Mittelwert	16.1	0.1	0.9	43.7	6.8	0.0	0.0	0.0	1.1	0.6	12.9	11.2	0.0	0.6	8.3	0.0
1 sigma	8.0	0.3	1.0	19.8	5.1	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	5.6	5.2	0.1	1.6	3.9	0.0
Minimalwert	2.1	0.0	-0.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0
Maximalwert	63.8	3.0	7.0	93.2	22.2	0.0	0.0	0.0	4.3	2.1	26.4	23.8	1.5	12.7	21.0	0.0
Anzahl Analysen	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213	117	117	117	117	117	117
Palfris-Formation																
Mittelwert	13.7	0.1	0.7	44.9	8.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.6	13.6	11.0	0.0	0.8	8.1	0.0
1 sigma	5.3	0.4	0.8	20.9	5.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	5.9	5.2	0.2	1.9	3.9	0.0
Minimalwert	2.1	0.0	-0.3	9.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0
Maximalwert	31.4	3.0	4.0	93.2	22.2	0.0	0.0	0.0	4.3	1.8	26.0	21.7	1.5	12.7	21.0	0.0
Anzahl Analysen	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	82	82	82	82	82	82
Vitznau-Mergel																
Mittelwert	19.7	0.0	1.1	55.2	4.7	0.0	0.0	0.0	1.1	0.7	8.0	8.8	0.0	0.7	3.2	0.0
1 sigma	11.3	0.0	1.4	16.3	3.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	3.4	4.8	0.0	0.8	1.8	0.0
Minimalwert	4.7	0.0	0.0	28.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.2	2.9	1.4	0.0	0.0	1.4	0.0
Maximalwert	38.0	0.0	4.0	73.7	9.3	0.0	0.0	0.0	1.7	2.1	12.3	14.4	0.0	1.9	5.9	0.0
Anzahl Analysen	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	6	6	6	6	6	6
'Schimberg-Schiefer'																
Mittelwert	28.8	0.0	1.4	36.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	10.6	12.0	0.0	0.2	9.4	0.0
1 sigma	7.8	0.0	1.3	7.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	2.2	2.7	0.0	0.3	2.3	0.0
Minimalwert	17.2	0.0	0.0	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	6.3	7.8	0.0	0.0	6.0	0.0
Maximalwert	40.0	0.0	3.4	47.7	4.7	0.0	0.0	0.0	1.3	0.9	14.7	17.0	0.0	0.7	13.5	0.0
Anzahl Analysen	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	11	11	11	11	11	11
'Globigerinenmergel'																
Mittelwert	18.2	0.1	1.4	43.9	2.2	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	11.3	11.8	0.0	0.1	9.0	0.0
1 sigma	2.7	0.3	1.7	7.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	3.0	5.7	0.0	0.2	3.2	0.0
Minimalwert	15.0	0.0	0.3	33.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	6.0	4.9	0.0	0.0	5.3	0.0
Maximalwert	24.0	1.0	7.0	61.0	6.7	0.0	0.0	0.0	1.5	1.1	16.2	23.8	0.0	0.4	14.1	0.0
Anzahl Analysen	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	14	14	14	14	14	14
Interhelvetisches Mélange																
Mittelwert	28.2	0.0	1.6	19.8	4.9	0.0	0.0	0.0	0.8	0.4	18.5	14.6	0.0	0.0	13.0	0.0
1 sigma	17.1	0.0	1.8	16.1	4.7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	8.1	9.5	0.0	0.1	4.3	0.0
Minimalwert	14.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	7.4	0.6	0.0	0.0	8.4	0.0
Maximalwert	63.8	0.0	4.0	52.3	12.1	0.0	0.0	0.0	1.5	0.9	26.4	20.8	0.0	0.2	17.6	0.0
Anzahl Analysen	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	4	4	4	4	4

Opalinuston

Im Vergleich zu den anderen Wirtgesteinseinheiten ist der Opalinuston mineralogisch relativ homogen, mit den meisten Datenpunkten im Bereich der Tonsteine und Sand-Tonsteine nach der Füchtbauer-Nomenklatur (Fig. 2.2-2).

Anhydrit wurde einzig in 4 Proben der Bohrung Schafisheim mit Gehalten von 1 – 5 Gew.-% identifiziert. Spuren von diagenetischem Anhydrit wurden aufgrund von Dünnschliffuntersuchungen auch im Felslabor Mont Terri festgestellt (Bläsi et al. 1991). In einer einzigen Probe aus der Bohrung Schafisheim wurde 1 Gew.-% Gips gefunden. Hierbei handelt es sich mit grosser Wahrscheinlichkeit um ein Artefakt von Anhydrit-Hydratation oder Pyrit-Oxidation seit Entnahme des Bohrkerns. Zudem haben Wersin et al. (2013a) und De Haller et al. (2014) in Proben der Bohrung Schlattingen-1 bzw. des Felslabors Mont Terri auch Spuren eines Sr-Ba-Sulfats (Cölestin-Baryt) identifiziert.

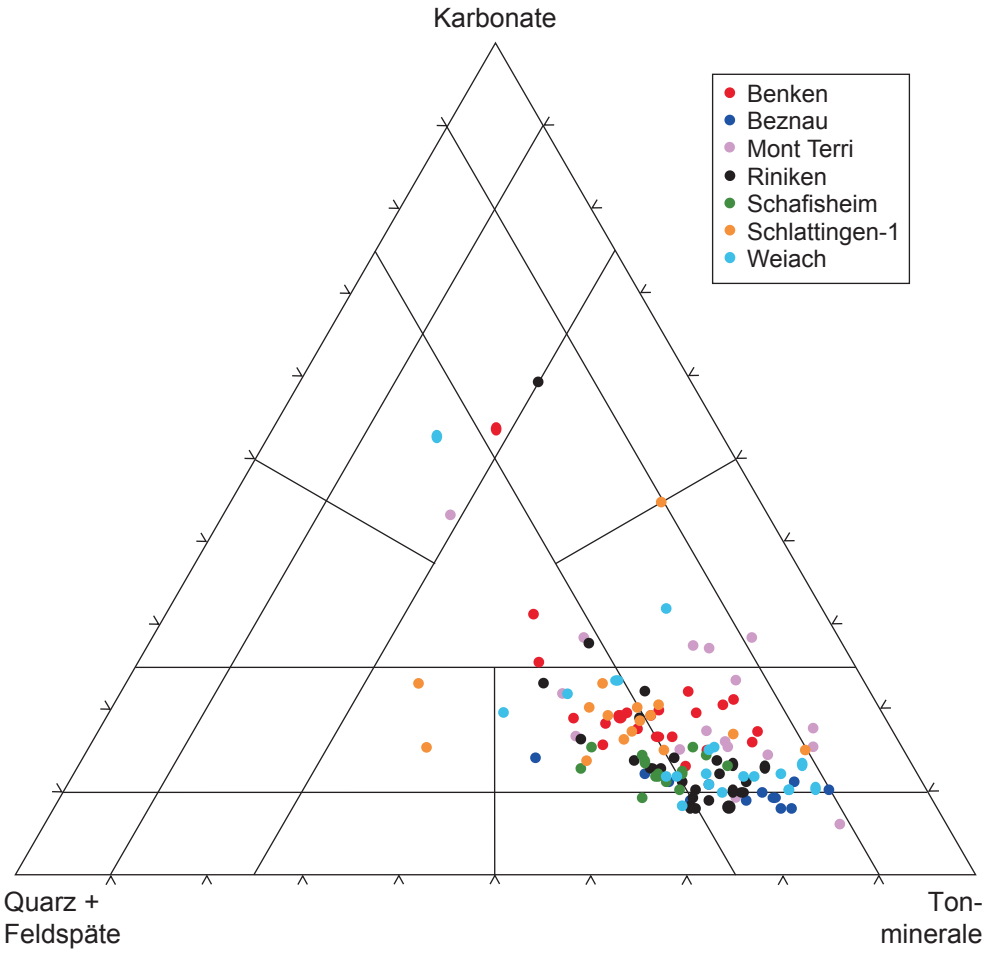


Fig. 2.2-2: Mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons in der Darstellung nach Füchtbauer (1988).

'Brauner Dogger'

Der 'Braune Dogger' ist grossenteils tonig ausgebildet, enthält aber insbesondere in der Wedelsandstein-Formation eingelagerte sandig-kalkige Bänke sowie im ganzen Profil eisenoolithische Horizonte (Fig. 2.2-4). Lokalisierung, Ausbildung und Geometrie dieser Heterogenitäten sind in Bläsi et al. (2013) und Mazurek (2013a) detailliert beschrieben.

Die Mehrheit der Datenpunkte im Füchtbauer-Diagramm liegt für Proben ausserhalb sandig-kalkiger Bänke und Eisenoolithe gemäss Fig. 2.2-3 im Bereich der Mergel und Tonsteine, die Variabilität der mineralogischen Zusammensetzung ist aber beträchtlich. Sandig-kalkige Bänke liegen in den Feldern von Kalk- oder Sandsteinen bzw. tonigen Kalk- oder Sandsteinen. Zum Vergleich wurden in Fig. 2.2-3 auch Daten von Proben der Wedelsandstein-Formation aus Aufschlüssen im Wutachtal (D) dargestellt[4].

Die Eisenoolithe im 'Braunen Dogger' sind im dm-Massstab heterogen aufgebaut (s. Mazurek 2013a). Charakteristisch ist ihre Armut an Quarz, und in Fig. 2.2-3 liegen Datenpunkte für die verfügbaren Proben in den Feldern von Ton- bzw. Kalkmergeln. Die aus bohrlochgeophysikalischen Logs abgeleiteten Tonmineralgehalte in Eisenoolithen zeigen ein uneinheitliches Bild (Fig. 2.2-4). Einige der mächtigeren Horizonte zeigen erniedrigte Gehalte, andere zeigen keine Auffälligkeiten oder gar erhöhte Tonmineralgehalte. Im Mittel weisen die Eisenoolithe einen Tonmineralgehalt von 35 Gew.-% auf. Die teilweise rostbraune Färbung der Eisenoolithe geht auf Fe-Hydroxide zurück. In einer Probe der Bohrung Schlattingen-1 wurden 8 Gew.-% Goethit nachgewiesen (Wersin et al. 2013a).

[4] Diese Proben wurden in Tab. 2.2-2 nicht berücksichtigt, da sie aus einer proximalen Fazies mit mächtigen Bänken kommen, welche in der Schweiz in dieser Ausbildung nicht bekannt sind.

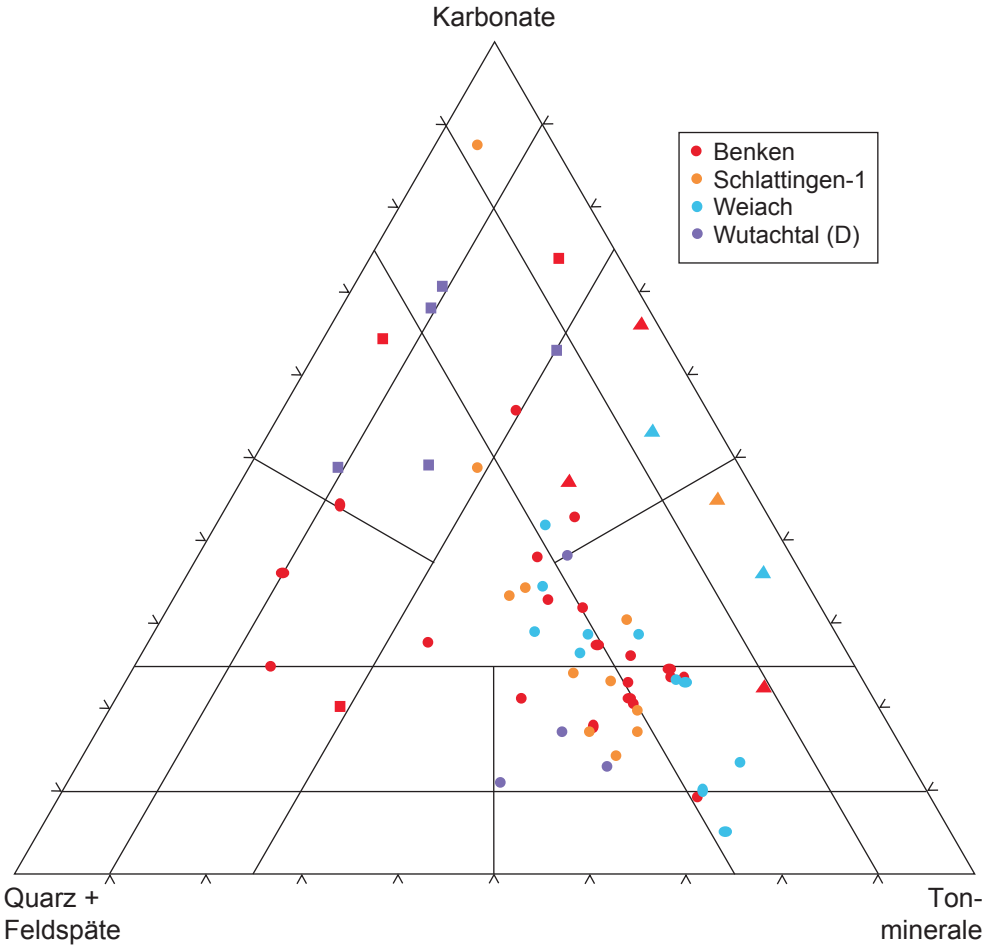


Fig. 2.2-3: Mineralogische Zusammensetzung des 'Braunen Doggers' in der Darstellung nach Füchtbauer (1988).

Quadrate: Proben aus > 10 cm mächtigen sandig-kalkigen Bänken; Dreiecke: Proben aus Eisenoolithen; Kreise: Proben aus Bereichen ausserhalb von sandig-kalkigen Bänken und Eisenoolithen.

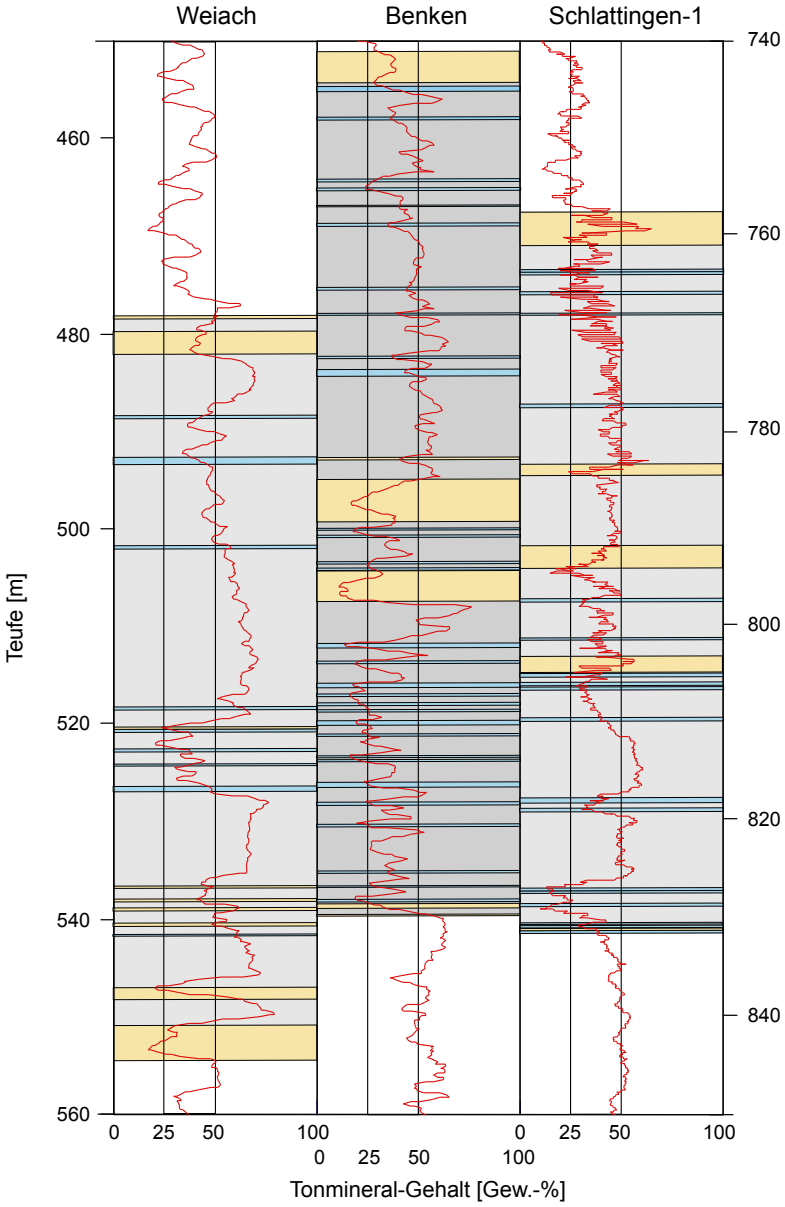


Fig. 2.2-4: Tonmineralgehalte aus bohrlochgeophysikalischen Logs (Medianwert aus drei Logs, nicht geglättete Daten von Albert & Schwab 2013) im Vergleich mit den im Kern identifizierten "harten Bänken".

Linke Teufenskala gilt für Weiach und Benken, rechte Skala für Schlattingen-1. Farbiger Hintergrund: Ausdehnung des 'Braunen Doggers'. Gelbbraun: Eisenoolithe; blau: sandig-kalkige Bänke.

Effinger Schichten

Die Effinger Schichten bestehen zum grösseren Teil aus Kalkmergelabfolgen, welche keine oder nur vereinzelte Kalkbänke enthalten (Deplazes et al. 2013). Darin eingelagert sind Kalkbankabfolgen mit Mächtigkeiten im Bereich 1.5 – 34 m, in welchen Kalkbänke gehäuft vorkommen (typischerweise mit einem Anteil von mindestens einem Drittel). Kalkbankabfolgen lassen sich zwischen Bohrungen in der Regel gut korrelieren und weisen somit laterale Ausdbehnungen im Bereich vieler km auf (Dossier II, Kapitel 3.3).

Mineralogisch bilden die Effinger Schichten im Füchtbauer-Dreieck einen eng begrenzten Bereich ab (Fig. 2.2-5). Sie bestehen hauptsächlich aus (z.T. sandigen) Kalkmergeln, tonigen Kalken und Kalken. Das Verhältnis von Quarz + Feldspäten zu Tonmineralen ist unabhängig vom Karbonatgehalt recht konstant, im Mittel bei 1:3.

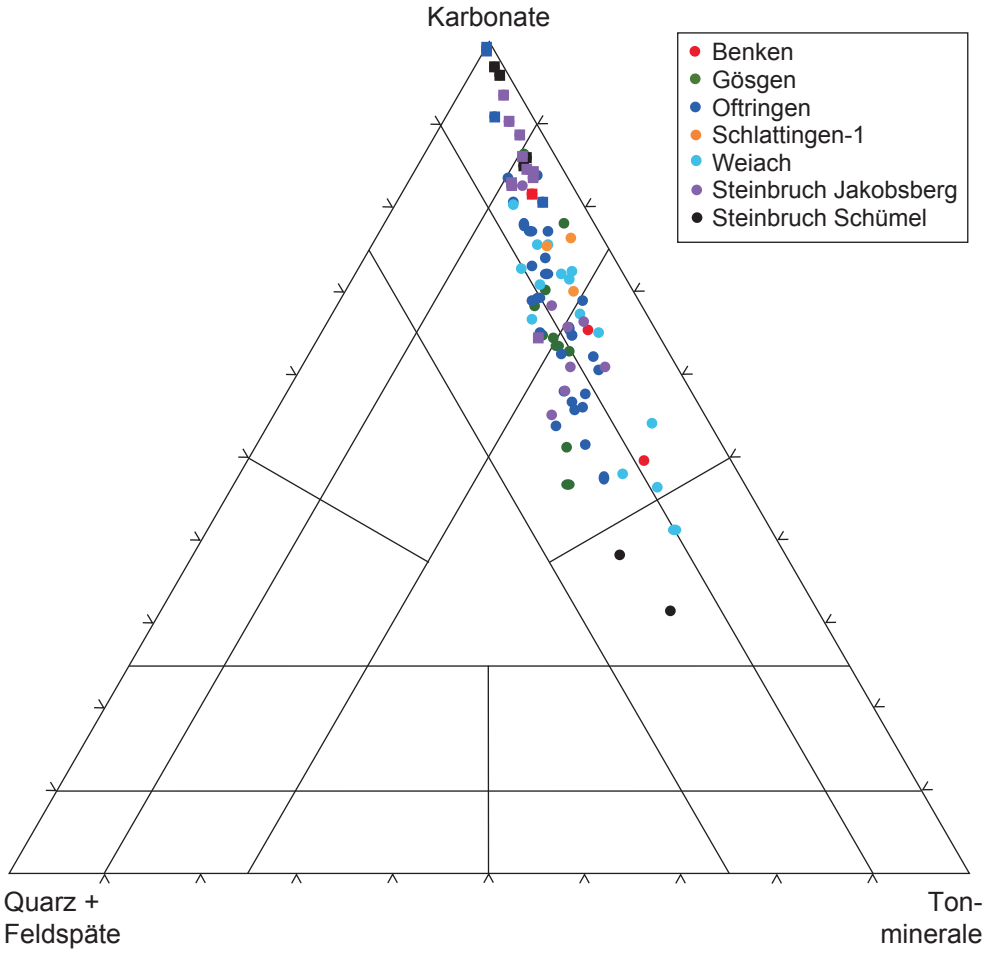


Fig. 2.2-5: Mineralogische Zusammensetzung der Effinger Schichten in der Darstellung nach Füchtbauer (1988).

Quadrate: Proben aus > 10 cm mächtigen Kalkbänken; Kreise: Proben aus Bereichen ausserhalb dieser Kalkbänke.

Aufgrund makroskopischer Beobachtungen am Bohrkern bzw. im Aufschluss wurden harte, kalkige Bänke mit einer Mächtigkeit > 10 cm dokumentiert (Mazurek 2013b). Proben aus diesen Bereichen liegen in Fig. 2.2-5 im Feld der Kalke bzw. der tonigen Kalke. Kalkbänke in den Gerstenhübel-Schichten, einer der Kalkbankabfolgen innerhalb der Effinger Schichten (Deplazes et al. 2013), weisen teilweise sehr geringe Tonmineralgehalte bis gegen 0 Gew.-% auf. Ausserhalb dieser Einheit liegen die Tonmineralgehalte von Kalkbänken stets über 5 Gew.-% (Details in Mazurek 2013b).

Im Gegensatz zu den Wirtgesteinen im Liegenden ist in den Effinger Schichten mittels Röntgenanalyse und gemäss Dünnschliff-Information kein Siderit nachweisbar. Als einzige Einheit können sie Spuren von Smektit enthalten.

Helvetische Mergel

Die Helvetischen Mergel enthalten in der Palfris-Formation analog den Effinger Schichten lithologische Heterogenitäten in Form von Kalkbankabfolgen (Nagra 1997). Deren laterale Kontinuität ist nicht genau bekannt, angesichts der starken tektonischen Beanspruchung aber wesentlich kleiner als in den Effinger Schichten.

Zwischen den einzelnen Einheiten der Helvetischen Mergel bestehen Unterschiede in den relativen Mineralgehalten (Fig. 2.2-6). Die Palfris-Formation deckt mineralogisch ein weites Feld zwischen kalkig-sandigen Tonsteinen über sandige Ton- und Kalkmergel und tonige Kalke bis zu nahezu reinen Kalken ab. Bezüglich Mineralogie besteht eine Ähnlichkeit mit den Effinger Schichten, wobei die Variabilität in der Palfris-Formation grösser ist. Die Vitznau-Mergel sind Quarz-reicher als die Palfris-Formation und liegen mehrheitlich in den Feldern von z.T. tonigen Kalksandsteinen und Sandkalksteinen. Die 'Schimberg-Schiefer' (ein Teil der Hohgant-Formation) liegen zumeist im Feld der Sandmergel und sind mineralogisch eher homogen. Die 'Globigerinenmergel' (Stad-Formation) decken einen eng begrenzten Bereich in den Feldern der sandigen Ton- und Kalkmergel sowie tonig-sandiger Kalke ab. Die wenigen verfügbaren Daten des Interhelvetischen Mélanges liefern ein heterogenes Bild, was durch die tektonische Durchmischung verschiedener Lithologien bedingt ist.

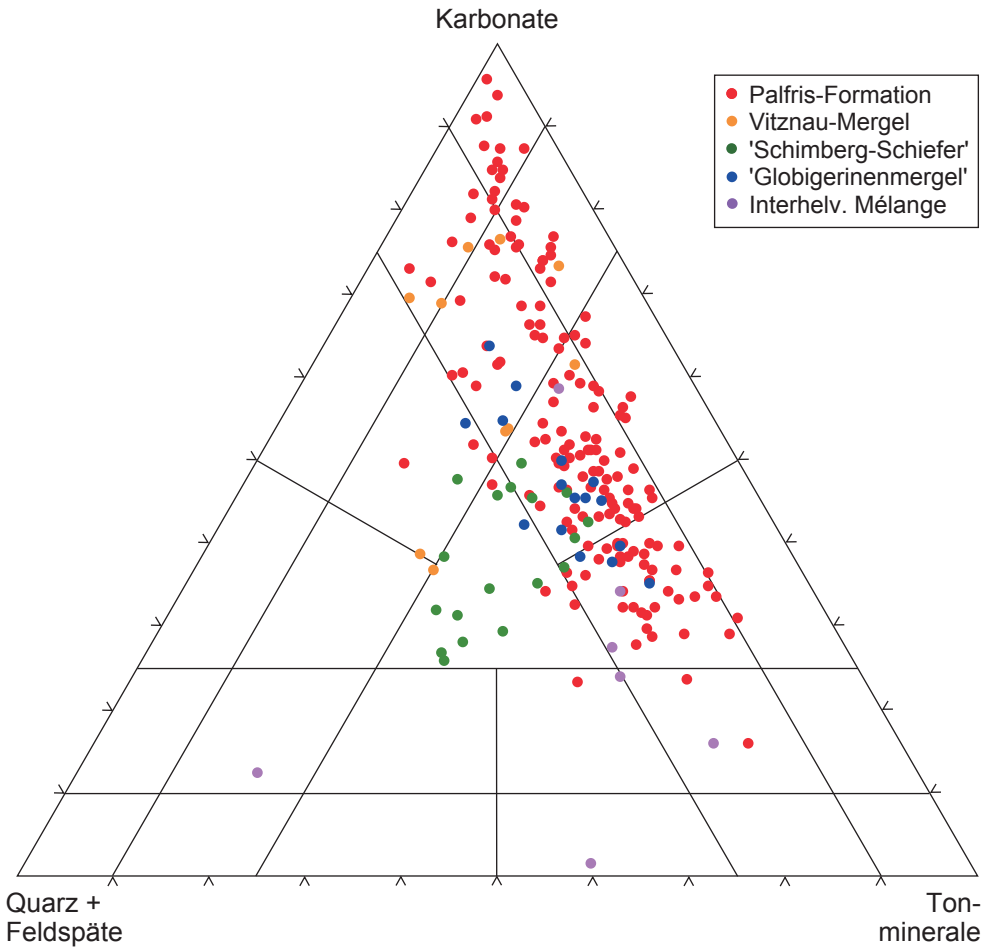


Fig. 2.2-6: Mineralogische Zusammensetzung der Helvetischen Mergel in der Darstellung nach Füchtbauer (1988).

2.2.3 Vergleichende Darstellung der mineralogischen Zusammensetzung der Wirtgesteine

Die von der mineralogischen Zusammensetzung der Wirtgesteine im Füchtbauer-Diagramm eingenommenen Bereiche sowie die Mittelwerte sind in Fig. 2.2-7 dargestellt. Opalinuston ist das tonmineralreichste und homogenste Wirtgestein. Effinger Schichten und Helvetische Mergel decken ähnliche Bereiche ab, wobei letztere eine grössere Variabilität aufweisen. Der 'Braune Dogger' deckt das weiteste Feld ab.

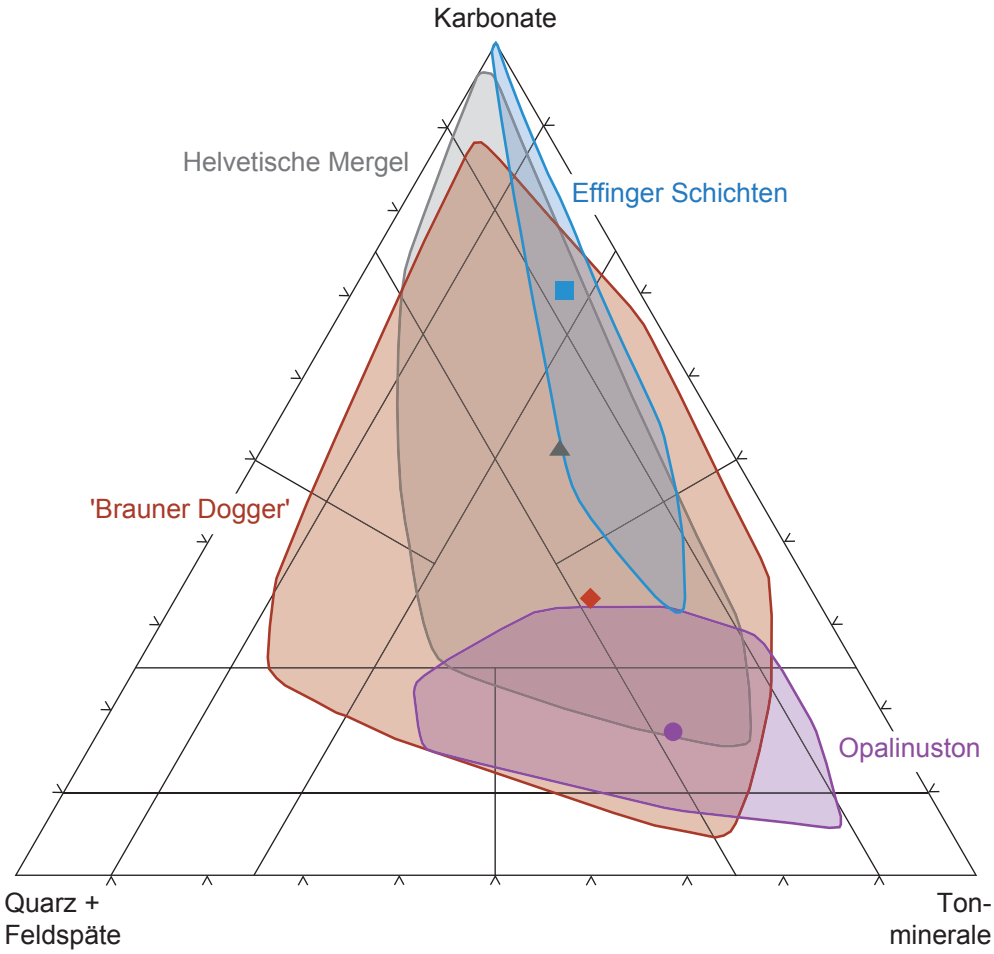


Fig. 2.2-7: Zusammenfassende Darstellung der mineralogischen Zusammensetzung der Wirtgesteine.

Symbole stellen die Mittelwerte der mittleren Gehalte der einzelnen Lokalitäten dar. Im Falle von Opalinuston und Helvetischen Mergeln sind einzelne Ausreisser für die Darstellung der Bereiche nicht berücksichtigt worden.

2.3 Dichten, Porositäten, Porengrössen, Kationenaustauschkapazitäten und Oberflächen

2.3.1 Datenbasis und Methodik

Physiko-chemische Gesteinsparameter für die Wirtgesteine wurden über längere Zeiträume erhoben, im Verlauf derer sich die Methodik weiterentwickelt hat. Heute gängige Methoden sind in Mazurek et al. (2012) und Wersin et al. (2013a) dokumentiert.

Der Grossteil der Daten ist in Mazurek (2011) zusammengestellt und statistisch ausgewertet. Traber & Blaser (2013) haben auf dieser Basis Referenz- und Eckwerte abgeleitet. Die Originalquellen der Daten sind in Tab. 2.2-1 zusammengestellt. Hinzu kommen noch die Daten der Bohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a) sowie aus Diffusionsexperimenten abgeleitete Porositäten (Datenzusammenstellung und Originalquellen s. Kap. 2.6).

2.3.1.1 Dichten, Porositäten und Porengrössen

Definitionen und Nomenklatur verschiedener Porositätstypen werden gleich gehandhabt wie in Nagra (2002a, Kapitel 5.4). Dies bedeutet, dass gemessene Porositäten nach der Messmethode benannt werden (z.B. diffusionszugängliche oder Wasserverlust-Porosität), wogegen auf interpretierende oder konzeptuelle Bezeichnungen (z.B. totale Porosität) nach Möglichkeit verzichtet wird, bzw. eine solche Interpretation erst in einem zweiten Schritt erfolgt. In verschiedenen Berichten wurde seitdem von dieser Praxis geringfügig abgewichen. So verwenden z.B. Mazurek (2013a, b), Mazurek et al. (2012), Wersin et al. (2013a) und Traber & Blaser (2013) den Begriff 'Physikalische Porosität' für die aus Messungen von Gesteins- und Korndichte berechnete Porosität. In diesem Bericht wird für die Resultate der dichtebasierten Porositätsbestimmung gemäss Nagra (2002a) der Begriff 'Pyknometerporosität' verwendet. Diese kann geringfügig kleiner sein als die physikalische Porosität, welche definiert ist als der nicht von Mineralen eingenommene Teil eines Gesteinsvolumens (einschliesslich des durch Zwischenschichtwasser eingenommenen Raums; Pearson 1999).

In den älteren Tiefbohrungen Beznau, Riniken, Schafisheim und Weiach wurden *Pyknometerporositäten* aus Messungen der Gesteins- und Korndichte bestimmt. Bei Porositäten > 5 Vol.-% sind die Werte in der Regel zuverlässig; bei kleineren Porositäten steigt der Fehler hingegen stark an. Zudem kann eine vollständige Trocknung bei tonreichen Proben schwierig sein, sodass die Korndichte unterschätzt und die Gesteinsdichte überschätzt wird. Zu hohe Gesteinsdichten können sich auch durch ein Schrumpfen bei der Trocknung, welche der Messung der Gesteinsdichte vorangeht, ergeben (Details in Mazurek 2011). Beide Effekte führen tendenziell zu leicht geringeren Werten im Vergleich zur physikalischen Porosität. Um den zweiten Effekt zu vermeiden, wurden in jüngerer Zeit die Gesteinsdichten bergfeuchter Proben bestimmt, und die Trockendichten wurden dann mithilfe des ebenfalls gemessenen Wassergehalts berechnet.

Die *Wasserverlustporosität*, berechnet aus dem gravimetrischen Wasserverlust durch Trocknung bei 105 °C, liegt für gesättigte tonige Gesteine erfahrungsgemäss ebenfalls leicht unterhalb der physikalischen Porosität, da auch nach Trocknung bei 105 °C ein kleiner Teil des Porenwassers im Gestein verbleibt (Nagra 2002a, Kapitel 5.4). Seit dem Abteufen der Bohrung Benken werden Wassergehalte systematisch gemessen.

Für die Helvetischen Mergel des Standortgebiets Wellenberg stehen nur wenige Pyknometerporositäten zur Verfügung, die zudem wegen der kleinen Porositätswerte beträchtliche analytische Fehler aufweisen. Eine Anzahl Wasserverlustporositäten liegt für die Palfris-Formation der Bohrung SB4a/s vor[5]. Die Porosität der Helvetischen Mergel wurde hauptsächlich mit der *Hg-Injektionsmethode* bestimmt. Da Hg in feinporigen Gesteinen nicht in den gesamten Porenraum eindringt, insbesondere nicht in die Nanoporen von Tonmineralen (s. z.B. Sammartino et al. 2003, Yven et al. 2007), liefert die Hg-Injektionsmethode Porositätswerte, die deutlich[6] unter der Wasserverlustporosität liegen, und die Hg-Porosität ist somit nicht direkt mit letzterer vergleichbar.

Für alle Wirtgesteine wurden *diffusionszugängliche Porositäten* aus Diffusionsexperimenten im Labor sowie, für den Opalinuston, aus In situ-Experimenten im Felslabor Mont Terri abgeleitet (s. Kap. 2.6). Die für HTO zugängliche Porosität gilt grundsätzlich als gutes Mass für die physikalische Porosität. Sie liegt erfahrungsgemäss auch nahe der Pyknometer- oder Wasserverlustporosität; die experimentellen Ungewissheiten können jedoch vergleichsweise gross sein, zudem ist die Datenbasis geringer. Die anionenzugängliche Porosität (bestimmt aus Diffusionsexperimenten mit Cl^- und I^-) ist für die Wirtgesteine kleiner als die Pyknometer- oder Wasserverlustporosität. In zahlreichen Fällen wurden Experimente mit verschiedenen Tracern an derselben Probe ausgeführt, so dass der anionenzugängliche Anteil der Porosität berechnet werden kann.

Pyknometer- und Wasserverlustporositäten wurden auch an Oberflächenproben der Effinger Schichten aus den Steinbrüchen Jakobsberg und Schümel bestimmt (Mazurek 2013b). Da diese Analysen teilweise von Artefakten (unvollständige Wassersättigung, Quellung) beeinflusst sind, werden sie hier nicht berücksichtigt. Eine vertiefte Diskussion der Methodik sowie der Vergleichbarkeit verschiedener Methoden zur Bestimmung der Porosität findet sich in Nagra (2002a, Kapitel 5.4).

Pyknometer- und Wasserverlustporositäten bilden den grössten Teil der Datenbasis für die Wirtgesteine. Aus Gründen der Vergleichbarkeit und wegen der nur geringen erwarteten Abweichungen werden diese Daten als bestes Mass für die physikalische Porosität bevorzugt.

Porengrössenverteilungen können aus Wasser- und Stickstoff-Adsorptionsisothermen (BET-Methode) sowie aus Hg-Injektionsdaten ermittelt werden (s. z.B. Mazurek et al. 2012, Wersin et al. 2013a). Die Methoden und Auswerteverfahren sind in Gimmi (2003) beschrieben. Es ist zu beachten, dass jede Methode ihre Eigenheiten hat, die durch die notwendige Vorbehandlung der Proben (insbesondere die Trocknung) sowie – bei Adsorption – durch unterschiedliche Wechselwirkungen der adsorbierten Moleküle mit den Oberflächen zustande kommen. Die ermittelten Daten geben deshalb lediglich Anhaltspunkte für typische Porengrössen und keine exakten Grössenverteilungen. Hinweise zu typischen Porengrössen und zur Porenstruktur von Wirtgesteinen lassen sich schliesslich auch mit nanotomographischen Methoden (*focused ion beam* [FIB]-Nanotomographie, REM-Bilder von mit *broad ion beam* [BIB] polierten Oberflächen) ableiten.

---

[5] Die Daten stammen aus Lippmann et al. (1998) und beinhalten Messungen des Wassergehalts. Für die Umrechnung in Wasserverlustporositäten wurde eine Korndichte von 2.75 g/cm^3 angenommen.

[6] Im Callovo-Oxfordien von Bure (F) erfasst die Hg-Injektionsmethode im Mittel 74 % des Porenraums (Yven et al. 2007). Für die Effinger Schichten der Bohrung Oftringen haben Mazurek et al. (2012) einen mittleren von der Hg-Injektionsmethode erfassten Anteil von 46 % der Pyknometerporosität bzw. 62 % der Wasserverlustporosität abgeleitet. In den vergleichsweise stärker kompaktierten Helvetischen Mergeln mit vermutlich kleineren Porenaperturen könnte dieser Anteil kleiner sein.

2.3.1.2 Kationenaustauschkapazität

In den oben genannten älteren Bohrungen wurde für die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität die Ba-Methode verwendet. Diese ist bei karbonathaltigen Gesteinen fehlerbehaftet und wird daher nicht berücksichtigt (s. Mazurek 2011). Für jüngere Bohrungen (einschliesslich Wellenberg) wurde die Ni-en-Methode (Ni-en: Nickel-Aethylendiamin) angewandt, welche zuverlässige Resultate liefert. Der Verbrauch des Index-Kations (Ni) wird als bestes Mass für die Kationenaustauschkapazität betrachtet.

2.3.1.3 Oberflächen

Die Methodik der Bestimmung der äusseren Oberfläche mit der BET-Methode (Brunauer et al. 1938) hat sich über die Zeit nicht wesentlich geändert, sodass alle verfügbaren Daten als vergleichbar betrachtet werden können. Messungen der totalen Oberfläche werden mittels Adsorption einer polaren Flüssigkeit durchgeführt. Für die älteren Bohrungen (Beznau, Riniken, Schafisheim und Weiach) wurde Glycerin verwendet, in jüngerer Zeit erfolgten die Messungen mittels Äthylenglykol-Monomethyläther (EGME) oder Wasseradsorption. Letztere Methoden liefern vergleichsweise deutlich niedrigere Werte; diese sind konsistent mit aus der Mineralogie und den mineralspezifischen Oberflächen berechneten Werten (Scheffer & Schachtschabel 2010; vgl. auch Gimmi 2003) und zeigen zudem plausible Korrelationen mit BET-Oberflächen und Tonmineralgehalt. Da dies für die mit der Glycerin-Methode bestimmten Oberflächen nicht zutrifft, werden diese hier nicht berücksichtigt.

2.3.2 Resultate und Diskussion

2.3.2.1 Porositätsbestimmungen in der Übersicht

Statistische Kennwerte zu den Gesteinsparametern aller Wirtgesteine aufgrund der verfügbaren Daten sind in Tab. 2.3-1 und 2.3-2 dargestellt. In Fig. 2.3-1 werden die Porositätsverteilungen der Wirtgesteine verglichen.

- Opalinuston im Raum Weiach – Benken – Schlattingen weist mittlere Porositäten um 11 – 12 Vol.-% (Fig. 2.3-1a) auf. Aus Diffusionsexperimenten abgeleitete für HTO zugängliche Porositäten liegen etwas höher als Pyknometer- und Wasserverlustporositäten. Der Grossteil der Diffusionsexperimente stammt aus dem untersten, tonmineralreichen Teil des Opalinustons von Benken (s. Tab. 2.6-1), was eine mögliche Erklärung für die höheren Werte darstellt (neben den oben diskutierten Gründen).
- Opalinuston des Felslabors Mont Terri hat vergleichsweise höhere Porositäten mit einem Mittelwert um 16 Vol.-% (Fig. 2.3-1b), was auf die geringere maximale Versenkungstiefe und somit geringere Kompaktion (Mazurek et al. 2006) sowie evtl. die stärkere Deformation zurückzuführen ist.
- Der 'Braune Dogger' weist eine Porositätsverteilung auf, welche derjenigen von Opalinuston im Raum Weiach – Benken – Schlattingen sehr ähnlich ist (Fig. 2.3-1c). Die etwas häufigeren niedrigen Porositätswerte gehen auf die sandig-kalkigen Bänke zurück.
- Die Effinger Schichten im Raum Oftringen – Gösgen haben mittlere Porositäten von 7 – 8 Vol.-% (Fig. 2.3-1d), also niedrigere Werte als Opalinuston und 'Brauner Dogger'. Die Verteilung ist im Vergleich zu diesen Formationen breiter, was die lithologische Heterogenität, v.a. den variablen Tonmineralgehalt, widerspiegelt. Die Porositätsverteilung in den Effinger Schichten des Raums Weiach – Benken – Schlattingen (nicht illustriert) unterscheidet sich nicht signifikant von derjenigen des Raums Oftringen – Gösgen.

Tab. 2.3-1: Dichten, Porositäten, Kationenaustauschkapazität und Oberflächen der Wirtgesteine in der Nordschweiz: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten.

BEN = Benken, BEZ = Beznau, GOS = Gösgen KB5a, MT = Mont Terri, OFT = Oftringen, RIN = Riniken, SHA = Schafisheim, SLA = Schlattingen-1, WEI = Weiach. Trockendichten basieren auf direkter Messung bzw. auf Berechnungen aus gemessener Feuchtdichte (nur Oftringen und Schlattingen-1); methodische Details s. Mazurek (2011). Diffusionszugängliche Porositäten sind aus Labor- und Feld-Diffusionsexperimenten abgeleitet (s. Kap. 2.6). Falls für dieselbe Probe diffusionszugängliche Porositäten aus Experimenten sowohl parallel wie senkrecht zur Schichtung verfügbar waren, wurde für obige Berechnungen der Mittelwert verwendet.

	Dichten und Porositäten							**Kationen-austausch**	**Oberflächen**		
	Gesteinsdichte trocken [g/cm^3]	**Korndichte** [g/cm^3]	**Pyknometerporosität** [Vol.-%]	**Wasserverlustporosität (105 °C)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (HTO)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (Anionen)** [Vol.-%]	**Verhältnis diffusionszugängliche Porosität Anionen / HTO** [-]	**Ni-Verbrauch (Ni-en)** [meq/kg Gest.]	**Äussere Oberfläche BET** [m^2/g]	**Innere Oberfläche** [m^2/g]	**Totale Oberfläche** [m^2/g]
Opalinuston											
Mittelwert (Mittel der Mittelwerte jedes Standorts)	2.41	2.72	11.1	12.5	14.21	6.01	0.45	110.2	28.3	59.3	82.6
1 sigma (Variabilität der Mittelwerte der Standorte)	0.06	0.02	2.6	2.8	0.62	2.24	0.18	5.9	4.2	8.8	7.5
Anzahl Standorte	7	7	7	3	2	2	2	2	6	2	2
Mittelwert aller Einzelanalysen	2.42	2.72	11.0	14.5	14.17	6.33	0.48	111.0	27.2	61.0	84.0
1 sigma aller Einzelanalysen	0.07	0.04	2.7	2.9	2.53	2.07	0.16	6.8	5.9	15.8	20.9
Minimalwert (Einzelanalyse)	2.28	2.63	3.5	5.5	9.00	3.90	0.28	101.4	9.8	19.2	29.0
Maximalwert (Einzelanalyse)	2.61	2.80	17.0	19.1	18.30	11.00	0.73	120.0	36.0	76.4	104.0
Anzahl Einzelanalysen	81	87	81	85	22	15	15	5	39	11	11
Datenherkunft	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN BEZ MT RIN SHA SLA WEI	BEN MT SLA	BEN MT	BEN MT	BEN MT	BEN SLA	BEN BEZ RIN SHA SLA WEI	BEN SLA	BEN SLA

Tab. 2.3-1: (Fortsetzung)

	Dichten und Porositäten							**Kationen-aus-tausch**	**Oberflächen**		
	Gesteinsdichte trocken [g/cm^3]	**Korndichte** [g/cm^3]	**Pyknometerporosität** [Vol.-%]	**Wasserverlustporosität (105 °C)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (HTO)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (Anionen)** [Vol.-%]	**Verhältnis diffusionszugängliche Porosität Anionen / HTO** [-]	**Ni-Verbrauch (Ni-en)** [meq/kg Gest.]	**Äussere Oberfläche BET** [m^2/g]	**Innere Oberfläche** [m^2/g]	**Totale Oberfläche** [m^2/g]
'Brauner Dogger'											
Mittelwert (Mittel der Mittelwerte jedes Standorts)	2.46	2.74	10.2	11.7	11.98	6.68	0.56	112.5	28.7	68.3	92.0
1 sigma (Variabilität der Mittelwerte der Standorte)	0.07	0.02	2.7	0.1				17.5	6.8		
Anzahl Standorte	3	3	3	2	1	1	1	2	2	1	1
Mittelwert aller Einzelanalysen	2.44	2.74	11.0	11.6	11.98	6.68	0.56	116.6	25.6	68.3	92.0
1 sigma aller Einzelanalysen	0.08	0.06	3.3	2.9	2.20	1.41	0.07	16.3	7.6	3.4	8.7
Minimalwert (Einzelanalyse)	2.33	2.64	2.6	3.7	9.60	5.00	0.47	100.1	11.3	65.9	82.0
Maximalwert (Einzelanalyse)	2.63	2.94	15.8	17.3	13.90	8.20	0.64	132.6	37.0	70.7	97.0
Anzahl Einzelanalysen	31	31	31	17	4	4	4	3	11	2	3
Datenherkunft	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA WEI	BEN SLA	BEN	BEN	BEN	BEN SLA	SLA WEI	SLA	SLA

Tab. 2.3-1: (Fortsetzung)

	Dichten und Porositäten							**Kationen-aus-tausch**	**Oberflächen**		
	Gesteinsdichte trocken [g/cm^3]	**Korndichte** [g/cm^3]	**Pyknometerporosität** [Vol.-%]	**Wasserverlustporosität (105 °C)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (HTO)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (Anionen)** [Vol.-%]	**Verhältnis diffusionszugängliche Porosität Anionen / HTO** [-]	**Ni-Verbrauch (Ni-en)** [meq/kg Gest.]	**Äussere Oberfläche BET** [m^2/g]	**Innere Oberfläche** [m^2/g]	**Totale Oberfläche** [m^2/g]
Effinger Schichten											
Mittelwert (Mittel der Mittelwerte jedes Standorts)	2.53	2.75	8.0	8.6	9.13	4.28	0.47	60.8	16.4	42.4	60.5
1 sigma (Variabilität der Mittelwerte der Standorte)	0.02	0.02	0.9	3.5	1.24	0.67	0.01	13.5	1.7		
Anzahl Standorte	5	5	5	4	2	2	2	3	3	1	1
Mittelwert aller Einzelanalysen	2.54	2.75	7.6	6.8	9.13	4.28	0.47	56.7	15.5	42.4	60.5
1 sigma aller Einzelanalysen	0.06	0.03	2.3	2.5	1.01	0.55	0.01	25.9	6.3	8.1	6.4
Minimalwert (Einzelanalyse)	2.37	2.67	1.7	1.9	8.20	3.80	0.46	8.6	2.1	36.7	56.0
Maximalwert (Einzelanalyse)	2.66	2.83	12.6	13.8	10.00	4.80	0.48	99.0	29.7	48.1	65.0
Anzahl Einzelanalysen	45	45	45	25	4	4	4	12	32	2	2
Datenherkunft	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA WEI	BEN GOS OFT SLA	GOS OFT	GOS OFT	GOS OFT	GOS OFT SLA	GOS OFT SLA	SLA	SLA

- Die Porosität der Helvetischen Mergel ist angesichts der stärkeren maximalen Versenkung und somit ausgeprägteren Kompaktion deutlich geringer als im Mesozoikum der Nordschweiz (Fig. 2.3-1e). Direkt vergleichbar sind allerdings nur die Werte für Pyknometer-, Wasserverlust- und diffusionszugängliche Porosität, während die Hg-Injektionsporosität aus methodischen Gründen nur einen Teil des Porenraums erfasst (s.o.). Angaben zur Porosität in Tab. 2.3-2 schliessen Proben mit starker[7] Spröddeformation aus; diese sind aber in den Figuren mitberücksichtigt.

[7] Der Grad der spröden Deformation wurde in Nagra (1997) für alle Proben auf einer Skala von 0 (undeformiert) bis 4 (*Fault gouge* im Zentrum einer spröden Scherzone) definiert. Als stark spröd deformiert werden hier Proben mit einem Wert ≥ 2 verstanden.

Tab. 2.3-2: Dichten, Porositäten, Kationenaustauschkapazität und Oberflächen der Helvetischen Mergel am Wellenberg: Zusammenfassung aller verfügbaren Daten gemäss Nagra (1997).

Proben mit starker spröder Deformation wurden in der Tabelle nicht berücksichtigt. Trockendichten basieren auf direkter Messung. Diffusionszugängliche Porositäten sind aus Laborexperimenten abgeleitet (s. Kap. 2.6).

	Dichten und Porositäten								**Kationen-austausch**	**Oberflächen**		
	Gesteinsdichte trocken [g/cm^3]	**Korndichte** [g/cm^3]	**Pyknometerporosität** [Vol.-%]	**Wasserverlustporosität (105 °C)** [Vol.-%]	**Hg-Injektions-Porosität** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (HTO)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (Anionen)** [Vol.-%]	**Verhältnis diffusionszugängliche Porosität Anionen / HTO** [-]	**Ni-Verbrauch (Ni-en)** [meq/kg Gest.]	**Äussere Oberfläche BET** [m^2/g]	**Innere Oberfläche** [m^2/g]	**Totale Oberfläche** [m^2/g]
Helvetische Mergel												
Mittelwert	2.67	2.78	3.6	3.1	1.8	2.95	0.38	0.129	34.3	6.5		
1 sigma	0.04	0.06	2.2	1.0	1.1	0.34	0.05	0.010	20.7	2.8		
Minimalwert	2.50	2.72	0.7	0.8	0.2	2.60	0.33	0.118	4.6	2.1		
Maximalwert	2.75	2.88	7.3	4.8	5.0	3.40	0.42	0.140	57.7	11.5		
Anzahl Analysen	103	7	6	14	101	4	4	4	8	8	0	0
Palfris-Formation												
Mittelwert	2.67	2.78	4.2	3.1	1.9	2.95	0.38	0.129	34.3	6.5		
1 sigma	0.04	0.06	1.9	1.0	1.2	0.34	0.05	0.010	20.7	2.8		
Minimalwert	2.50	2.72	2.6	0.8	0.2	2.60	0.33	0.118	4.6	2.1		
Maximalwert	2.75	2.88	7.3	4.8	5.0	3.40	0.42	0.140	57.7	11.5		
Anzahl Analysen	83	6	5	14	81	4	4	4	8	8	0	0
Vitznau-Mergel												
Mittelwert	2.69				1.6							
1 sigma	0.05				1.0							
Minimalwert	2.63				0.4							
Maximalwert	2.75				2.7							
Anzahl Analysen	4	0	0		4	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 2.3-2: (Fortsetzung)

	Dichten und Porositäten								**Kationen-austausch**	**Oberflächen**		
	Gesteinsdichte trocken [g/cm^3]	**Korndichte** [g/cm^3]	**Pyknometerporosität** [Vol.-%]	**Wasserverlustporosität (105 °C)** [Vol.-%]	**Hg-Injektions-Porosität** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (HTO)** [Vol.-%]	**Diffusionszugängliche Porosität (Anionen)** [Vol.-%]	**Verhältnis diffusionszugängliche Porosität Anionen / HTO** [-]	**Ni-Verbrauch (Ni-en)** [meq/kg Gest.]	**Äussere Oberfläche BET** [m^2/g]	**Innere Oberfläche** [m^2/g]	**Totale Oberfläche** [m^2/g]
'Schimberg-Schiefer'												
Mittelwert	2.68	2.74	0.7		1.6							
1 sigma	0.02				0.7							
Minimalwert	2.65				0.8							
Maximalwert	2.72				2.5							
Anzahl Analysen	6	1	1		6	0	0	0	0	0	0	0
'Globigerinenmergel'												
Mittelwert	2.68				1.3							
1 sigma	0.03				0.7							
Minimalwert	2.63				0.3							
Maximalwert	2.72				2.4							
Anzahl Analysen	7	0	0		7	0	0	0	0	0	0	0
Interhelvetisches Mélange												
Mittelwert	2.65				0.7							
1 sigma	0.04				0.4							
Minimalwert	2.62				0.3							
Maximalwert	2.70				1.0							
Anzahl Analysen	3	0	0		3	0	0	0	0	0	0	0

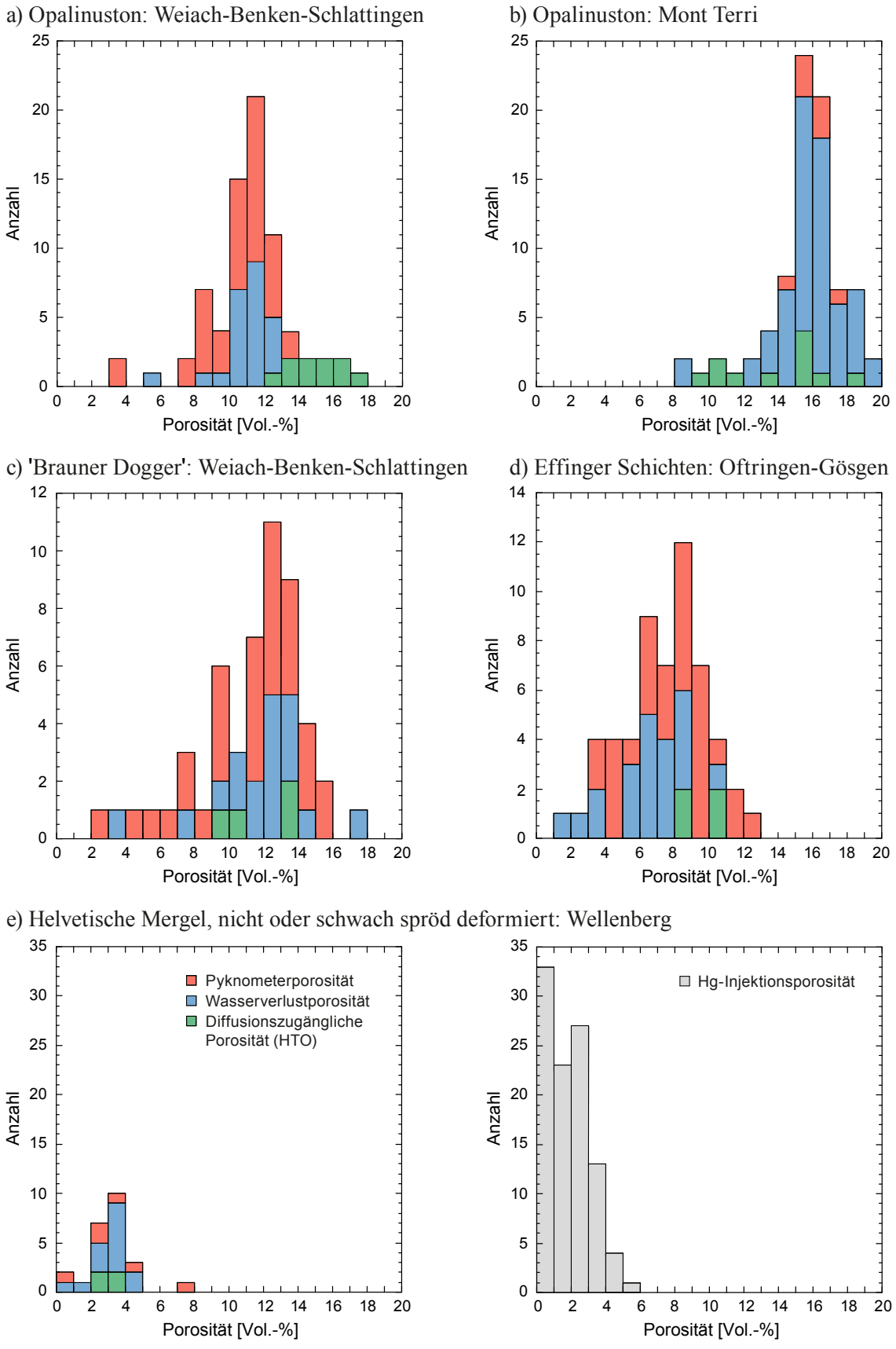


Fig. 2.3-1: Verteilung von Porositäten in den Wirtgesteinen.

2.3.2.2 Korrelation zwischen Porosität und Tonmineralgehalt

Wie in Fig. 2.3-2 illustriert, zeigt für die Nordschweizer Wirtgesteine die Wasserverlustporosität eine bessere Korrelation mit dem Tonmineralgehalt als die Pyknometerporosität. Das ist teilweise erklärbar durch die im Vergleich zur Wasserverlustporosität kleineren Probenvolumina, welche für die der Pyknometerporosität zugrundeliegenden Dichtebestimmungen verwendet werden, womit die kleinräumige Heterogenität stärker ins Gewicht fällt. Zudem bestehen wegen der möglichen Schrumpfung methodische Ungewissheiten bei der Bestimmung der Gesteinsdichte, die zur Berechnung der Pyknometerporosität verwendet wird (s.o.).

Für die Helvetischen Mergel des Standortgebiets Wellenberg korreliert die Hg-Injektionsporosität gut mit dem Tonmineralgehalt für nicht oder wenig deformierte Gesteine (Fig. 2.3-3). Bei stärkerer Spröddeformation geht diese Korrelation verloren und die Porositäten sind oft wesentlich höher. Der Grad der duktilen Deformation hat für Proben, welche keine oder nur geringe Spröddeformation zeigen, keinen erkennbaren Einfluss auf die Porosität.

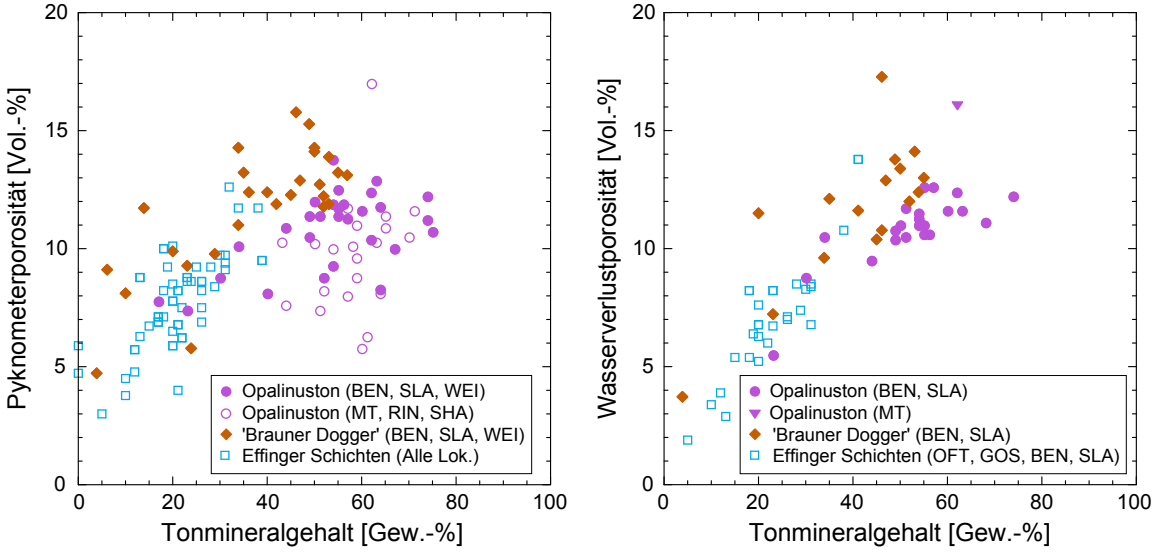


Fig. 2.3-2: Abhängigkeit der Porosität vom Tonmineralgehalt in Wirtgesteinen der Nordschweiz (inklusive Mont Terri).

Pyknometerporosität (links), Wasserverlustporosität (rechts).

BEN = Benken, GOS = Gösgen KB5a, MT = Mont Terri, OFT = Oftringen, RIN = Riniken, SHA = Schafisheim, SLA = Schlattingen-1, WEI = Weiach. Pyknometerporosität Effinger Schichten (Alle Lok.): Benken, Gösgen, Oftringen, Schlattingen-1, Weiach.

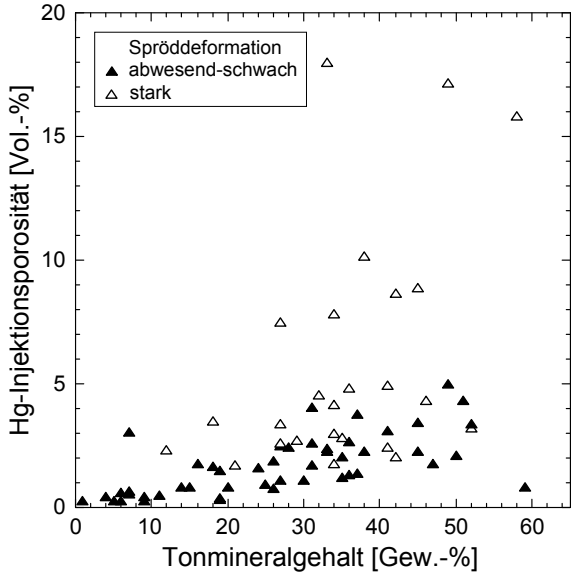


Fig. 2.3-3: Abhängigkeit der Hg-Injektionsporosität vom Tonmineralgehalt in den Helvetischen Mergeln.

2.3.2.3 Anionenzugängliche Porosität

Wegen der negativen Oberflächenladung von Tonmineralen (v.a. Smektit-haltige Phasen) werden im Porenwasser gelöste Anionen von den Mineraloberflächen abgestossen, ihnen steht also nur ein Teil des wasserzugänglichen Porenraums zur Verfügung (Details s. Nagra 2002a, Kapitel 5.4). Der Grad des Anionenausschlusses ist eine Funktion von Mineralogie und Porenraum-Architektur des Gesteins sowie der Ionenstärke des Porenwassers. Daten aus verschiedenen konsolidierten, tonmineralreichen Formationen in Europa deuten auf anionenzugängliche Porositätsanteile im Bereich von 0.3 – 0.6 (Mazurek et al. 2011) hin.

Der anionenzugängliche Teil der Porosität in den Wirtgesteinen kann u.a. aus Diffusionsexperimenten abgeleitet werden (s. Kap. 2.6), und Fig. 2.3-4 zeigt die verfügbaren Daten. In der Nordschweiz schwanken die anionenzugänglichen Porositätsanteile im Bereich von 0.28 bis 0.73, mit einem Mittelwert von ca. 0.5. Eine Abhängigkeit vom Tonmineralgehalt lässt sich aufgrund der heutigen Datenlage nicht klar belegen.

Für den Opalinuston des Felslabors Mont Terri haben Pearson et al. (2003) durch den Vergleich von Cl^--Gehalten aus wässrigen Auszügen mit denjenigen aus ausgepressten und in situ beprobten Wässern einen mittleren Wert von 0.54 abgeleitet. Der aus Diffusionsexperimenten abgeleitete Wert liegt im Bereich von 0.44 bis 0.73.

Für die Sequenz 'Brauner Dogger' – Opalinuston – Lias in der Bohrung Schlattingen-1 haben Wersin et al. (2013a) aufgrund von Auspressexperimenten und wässrigen Auszügen einen anionenzugänglichen Porositätsanteil von 0.44 – 0.65 (Mittelwert bei 0.55) berechnet. Eine Korrelation mit dem Tonmineralgehalt konnte auch hier nicht festgestellt werden.

Für die Effinger Schichten der Bohrungen Oftringen und Gösgen haben Mazurek et al. (2012) verschiedene Datensätze zur Ableitung der anionenzugänglichen Porosität diskutiert. Sie schliessen daraus, dass ein Wert um 0.5 am plausibelsten ist, wobei er kleinräumig infolge der Heterogenität von Mineralogie und Porenraum-Architektur variieren kann.

Gemäss Diffusionsexperimenten an wiederaufgesättigten Proben liegt der anionenzugängliche Porositätsanteil in den Helvetischen Mergeln mit 0.12 – 0.14 deutlich unter den Werten aus der Nordschweiz (Van Loon 2014; Fig. 2.3-4). Der stärkere Anionenausschluss ist wahrscheinlich durch die stärkere Kompaktion zu erklären, welche zu vergleichsweise sehr kleinen Porenaperturen geführt hat. Demgegenüber hat Pearson (1999) für den anionenzugänglichen Porositätsanteil einen Wert von 0.3 abgeleitet. Dieser basiert auf dem Vergleich der Cl^--Gehalte in einer (kontaminierten) Grundwasserprobe und dem wässrigen Auszug einer Gesteinsprobe aus dem Testintervall. Aufgrund der heutigen Datenlage lässt sich nicht klar entscheiden, welcher Wert den In situ-Verhältnissen besser entspricht.

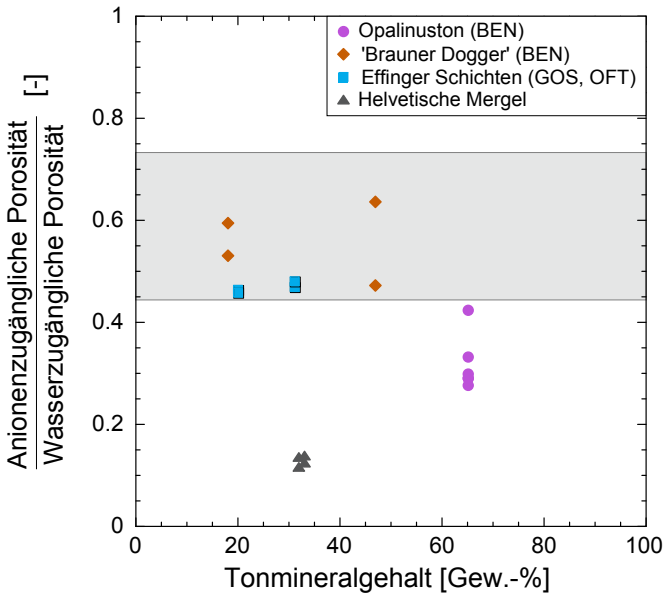


Fig. 2.3-4: Verhältnis von anionen- und wasserzugänglicher Porosität aus Diffusionsexperimenten als Funktion des Tonmineralgehalts.

Daten aus Tab. 2.6-1. Die graue Fläche bezeichnet den Bereich für Opalinuston im Felslabor Mont Terri (für die untersuchten Proben bestehen keine mineralogischen Daten). BEN = Benken, GOS = Gösgen KB5a, OFT = Oftringen.

2.3.2.4 Porengrössen

Daten zur Quecksilberporosimetrie (Hg-Injektion) sowie zu N_2- und teilweise H_2O-Ad- und Desorptionsisothermen bestehen für Opalinuston der Bohrung Benken (Nagra 2002a, Gimmi 2003), für Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten der Bohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a) und für die Effinger Schichten der Bohrung Oftringen (Mazurek et al. 2012).

Hg-Injektionsporosimetrie-Daten für Opalinuston der Bohrungen Benken und Schlattingen-1 (Fig. 2.3-5 und 2.3-6) zeigen, dass nur ein kleiner Teil an Poren mit einem äquivalenten Radius $r > 25$ nm (Makroporen; Definitionen s. IUPAC 1997) vorhanden ist. Es ist zu beachten, dass Poren mit Grössen von etwa 0.2 mm, wie am Beispiel aus Schlattingen-1 beobachtet (Fig. 2.3-6), auch durch die Probenpräparation entstehen können (Trocknung), sodass der tatsächliche Anteil Makroporen eher noch kleiner ist. Die H_2O- und N_2-Adsorptionsisothermen bestätigen, dass der grösste Anteil der Poren im Mesoporenbereich (1 nm < r < 25 nm) liegt,

wobei der Anteil der grösseren Mesoporen bei den N_2-Daten tendenziell etwas grösser ist. Sowohl aus den N_2- als auch aus den H_2O-Isothermen leiten sich nur sehr geringe Anteile an Mikroporen (r < 1 nm) ab. Während dies bei der N_2-Adsorption erwartet wurde, da N_2 nicht in Zwischenschichten von Smektiten eindringen kann, ist dieser geringe Anteil bei der H_2O-Adsorption nicht eindeutig zu erklären. Es wird vermutet, dass die vorgängige Trocknung der Proben eine Strukturänderung (Kollabieren der Zwischenschichten) verursacht, welche während der Messung nur partiell reversibel ist. Eine weitergehende spezifische Interpretation einzelner Peaks der aus H_2O- oder N_2-Isothermen abgeleiteten Porenspektren erscheint deshalb als nicht sinnvoll.

Hg-Injektions- und N_2-Adsorptionsdaten zweier Proben aus dem 'Braunen Dogger' der Bohrung Schlattingen-1 weisen auf eine ähnliche Porenverteilung wie die der Opalinustonproben hin (Fig. 2.3-7). Die Unterschiede zwischen den beiden Proben sind trotz unterschiedlicher Tonmineralgehalte (23 bzw. 53 Gew.-%) gering. Der Hauptanteil der Poren liegt in beiden Fällen im Mesoporenbereich.

Porengrössenverteilungen aus Hg-Injektionsporosimetrie und N_2-Adsorption für Proben aus den Effinger Schichten zeigen ähnliche Muster (Fig. 2.3-8). Durch die typischerweise geringere Porosität ergeben sich etwas flachere Kurven im Vergleich zum Opalinuston. Der grösste Anteil der Poren liegt ebenso im Mesoporenbereich.

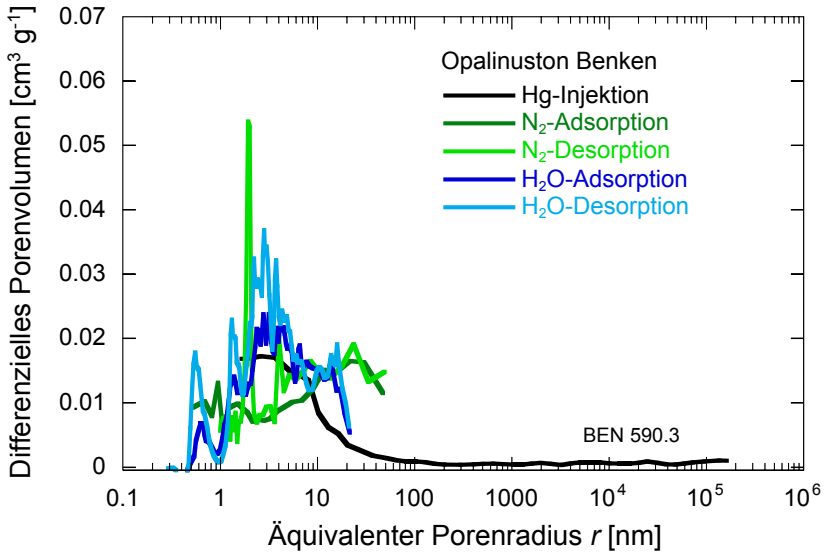


Fig. 2.3-5: Porengrössenverteilung der Opalinustonprobe 590.30[8] der Bohrung Benken (Nagra 2002a, Gimmi 2003).

Porengrössenverteilung abgeleitet aus Hg-Injektion sowie Ad- und Desorption von N_2 und H_2O (BJH-Algorithmus). Die Probe weist eine Porosität von 11 Vol.-%; die nächste Probe (593.26 m) einen Tonmineralgehalt von 53 Gew.-% auf. Die Flächen unter den Kurven sind proportional zum Volumenanteil der verschiedenen Bereiche.

[8] Diese und folgende Proben: Tiefenangaben in m.

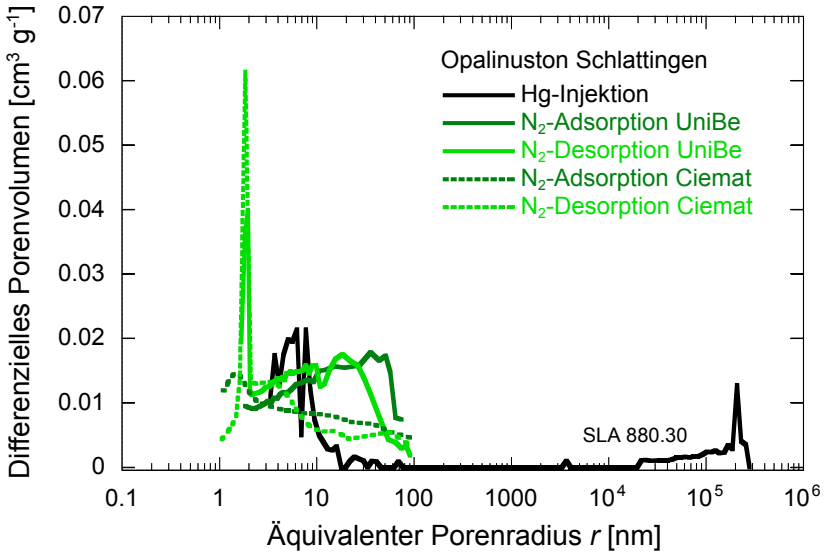


Fig. 2.3-6: Porengrössenverteilungen der Opalinustonprobe SLA 880.30 der Bohrung Schlattingen-1, abgeleitet aus Daten in Wersin et al. (2013a).

Porengrössenverteilung abgeleitet aus Hg-Injektion sowie Ad- und Desorption von N_2 (BJH-Algorithmus). Die Probe weist einen Tonmineralanteil von 55 Gew.-% und eine Porosität von 11.4 Vol.-% auf. Die Flächen unter den Kurven sind proportional zum Volumenanteil der verschiedenen Bereiche.

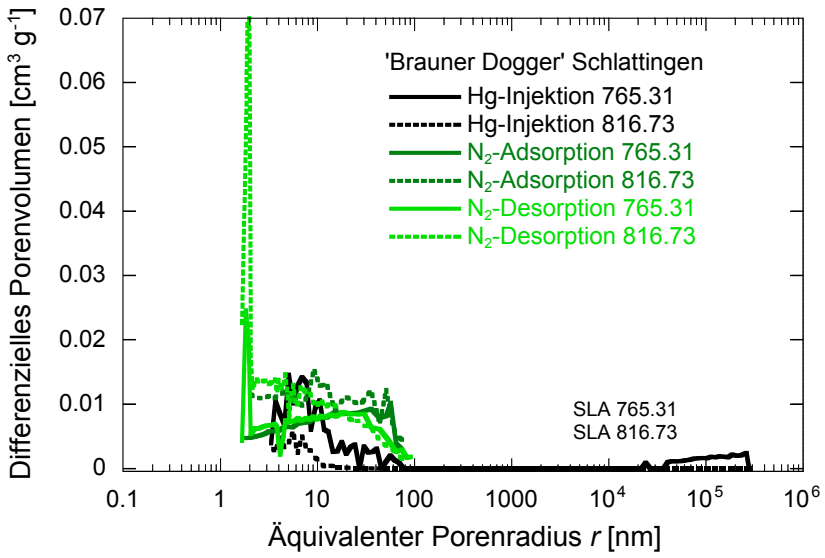


Fig. 2.3-7: Porengrössenverteilungen der Proben SLA 765.31 und 816.73 des 'Braunen Doggers' der Bohrung Schlattingen-1, abgeleitet aus Daten in Wersin et al. (2013a).

Porengrössenverteilung abgeleitet aus Hg-Injektion sowie Ad- und Desorption von N_2 (BJH-Algorithmus). Die Proben weisen einen Tonmineralanteil von 23 Gew.-% (SLA 765.31) bzw. 53 Gew.-% (SLA 816.73) und eine Porosität von 9.6 bzw. 9.9 Vol.-% auf. Die Flächen unter den Kurven sind proportional zum Volumenanteil der verschiedenen Bereiche.

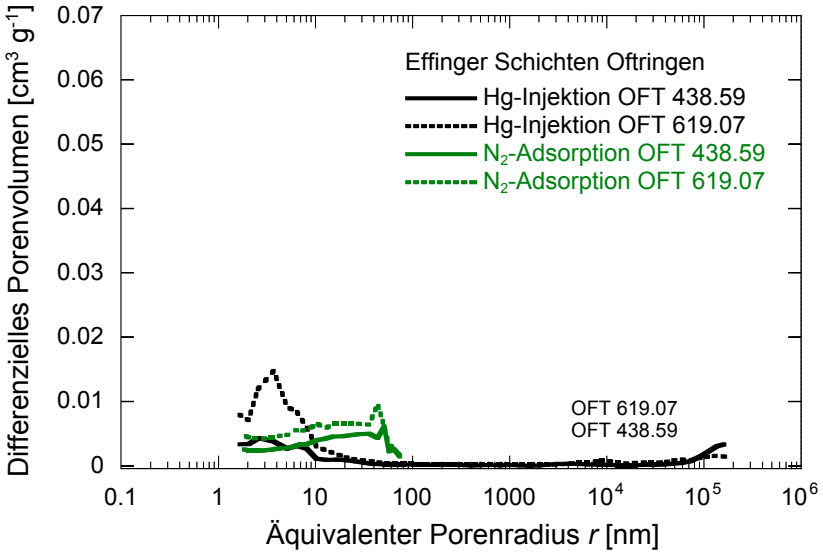


Fig. 2.3-8: Porengrössenverteilungen von Proben OFT 438.59 und OFT 619.07 aus den Effinger Schichten der Bohrung Oftringen, abgeleitet aus Daten in Mazurek et al. (2012).

Porengrössenverteilung abgeleitet aus Hg-Injektion sowie Adsorption von N_2 (BJH-Algorithmus). Die Tonmineralanteile sind 10 Gew.-% für Probe OFT 438.59 und 31 Gew.-% für Probe OFT 619.07, die Porositäten 4.6 bzw. 9.0 Vol.-%. Die Flächen unter den Kurven sind proportional zum Volumenanteil der verschiedenen Bereiche.

2.3.2.5 REM- und TEM-Untersuchungen

Die Geometrie und die Grössenverteilung von Poren im Opalinuston wurden mithilfe von µCT, BIB-SEM, FIB-SEM sowie STEM[9] untersucht (Houben et al. 2013, 2014, Keller et al. 2011a, b, 2013a, b). Die räumliche Auflösung der verschiedenen Methoden variiert stark. So können mit der angewandten BIB-SEM-Methode Poren mit Radien ≥ 100 nm aufgelöst werden, mit FIB-SEM ≥ 10 nm und mit TEM sind noch höhere Auflösungen möglich. Da die Porosität des Opalinustons von Mesoporen dominiert wird (äquivalente Radien von 1 – 25 nm), kann je nach Methode nur ein bestimmter Teil des Porenraums abgebildet werden. Fig. 2.3-9 zeigt typische mit BIB-SEM visualisierte Porenraumgeometrien in der tonreichen Matrix, in kalkigen Fossilbruchstücken sowie in diagenetischem Pyrit und Siderit. Fig. 2.3-10 zeigt eine TEM-Aufnahme auf nanometrischem Massstab. Die Poren können auf Grundlage solcher Bilder segmentiert werden, was die Basis für eine rechnerische Rekonstruktion des dreidimensionalen Porennetzwerks darstellt. Aus solchen Netzwerken lassen sich verschiedene Materialeigenschaften ableiten bzw. abschätzen, z.B. Transportparameter.

[9] Abkürzungen: µCT = micro X-ray computed tomography; BIB-SEM: Broad ion beam scanning electron microscopy; FIB-SEM: Focussed ion beam scanning electron microscopy; STEM = Scanning transmission electron microscopy.

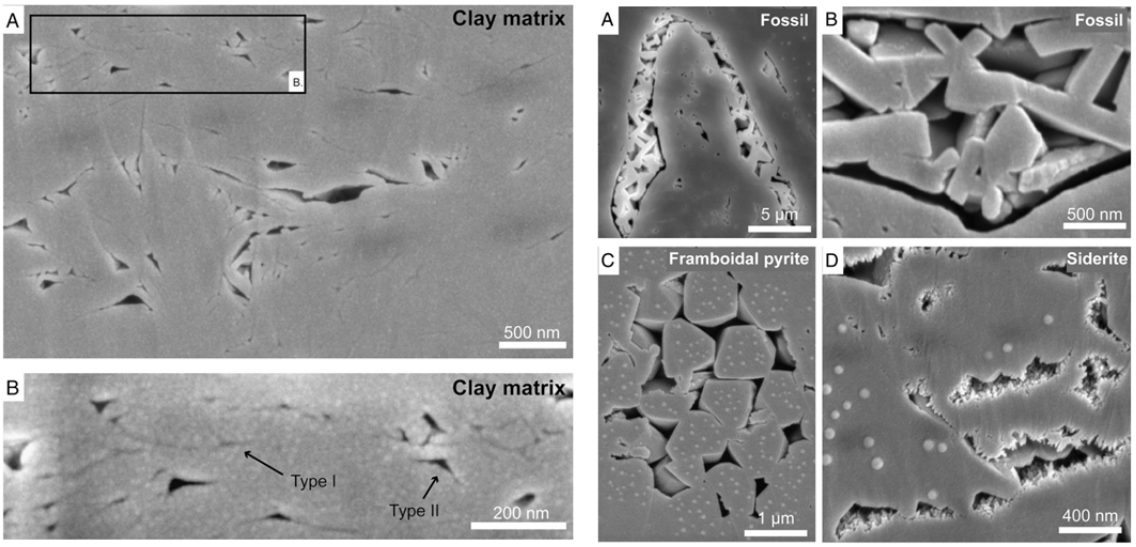


Fig. 2.3-9: Mit BIB-SEM visualisierte Porengeometrien einer Probe aus der tonigen Fazies des Opalinustons im Felslabor Mont Terri.

Links: Poren in der Tonmatrix; rechts: Poren in kalkigen Fossilien (oben) sowie in diagenetischem Pyrit und Siderit. Aus Houben et al. (2013).

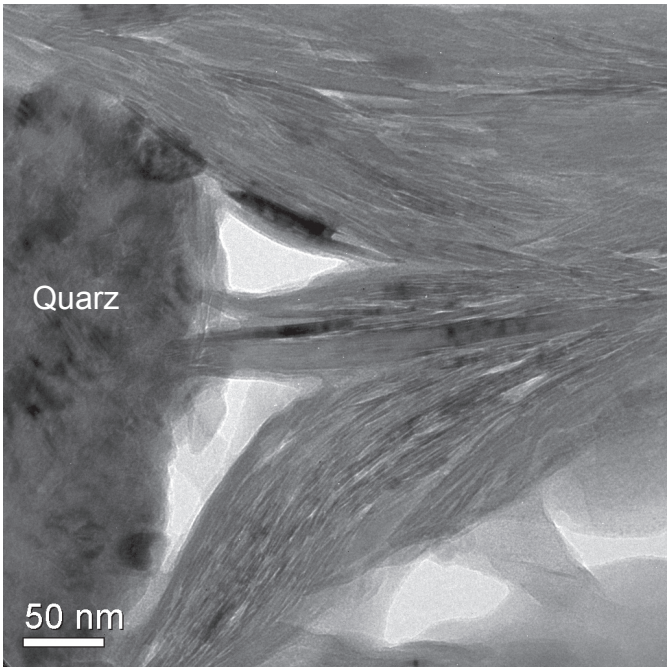


Fig. 2.3-10: TEM-Abbildung einer Probe aus der tonigen Fazies des Opalinustons im Felslabor Mont Terri mit einem detritischen Quarzkorn (links, mit Stern markiert) und Tonmineralen (rechts).

Im Druckschatten des Quarzkorns ist die Kompaktion der Tonminerale behindert, was zu grösseren Poren (weiss) führt. Aus Keller et al. (2013a).

2.3.2.6 Kationenaustauschkapazität und Oberflächen

Daten zur Kationenaustauschkapazität, ausgedrückt als Verbrauch des Index-Kations Ni, sind in Tab. 2.3-1 und 2.3-2 zusammengestellt. In Fig. 2.3-11 sind diese Daten als Funktion des Tonmineralgehalts dargestellt. Die Nordschweizer Wirtgesteine liegen grob auf derselben Korrelationsgeraden. Proben der Helvetischen Mergel liefern ebenfalls eine lineare Korrelation, wobei die Kationenaustauschkapazität bei gegebenem Tonmineralgehalt geringer ist. Dies ist plausibel, zumal die Helvetischen Mergel eine deutlich höher temperierte Diagenese durchlaufen haben, was zu einem stärkeren Grad der Illitisierung innerhalb der Illit/Smektit-Wechsellagerungen und somit einer kleineren Oberflächenladungsdichte geführt hat. Der Grad der Spröddeformation hat gemäss Fig. 2.3-11 keinen signifikanten Einfluss auf die Kationenaustauschkapazität der Helvetischen Mergel.

Mit der BET-Methode bestimmte äussere Oberflächen sowie mit den EGME- und H_2O-Adsorptionsmethoden bestimmte totale Oberflächen sind in Tab. 2.3-1 und 2.3-2, Fig. 2.3-12 und 2.3-13 dargestellt. Wie Fig. 2.3-12 zeigt, ist die totale Oberfläche im Mittel 3.5-mal höher als die äussere Oberfläche. Es besteht auch eine Korrelation mit dem Tonmineralgehalt (Fig. 2.3 13).

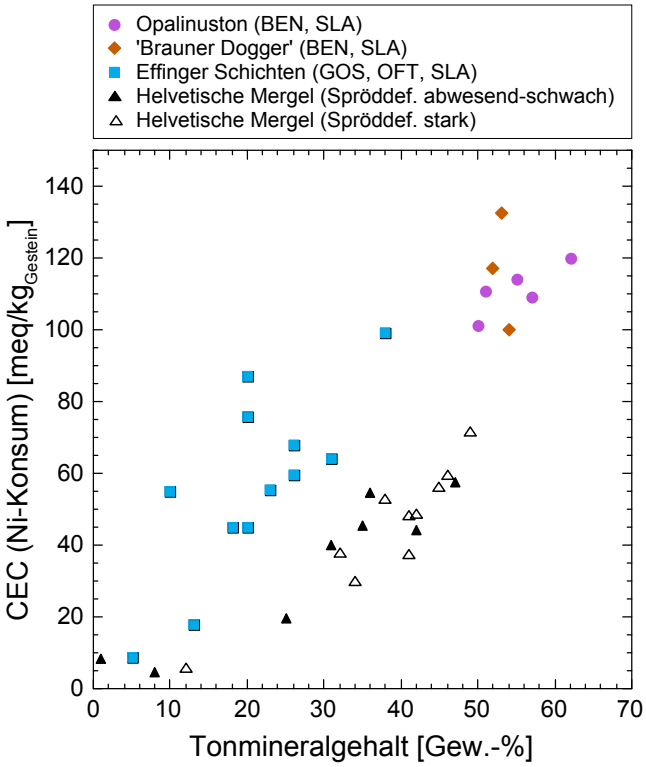


Fig. 2.3-11: Kationenaustauschkapazität der Wirtgesteine als Funktion des Tonmineralgehalts.

BEN = Benken, GOS = Gösgen KB5a, OFT = Oftringen, SLA = Schlattingen-1.

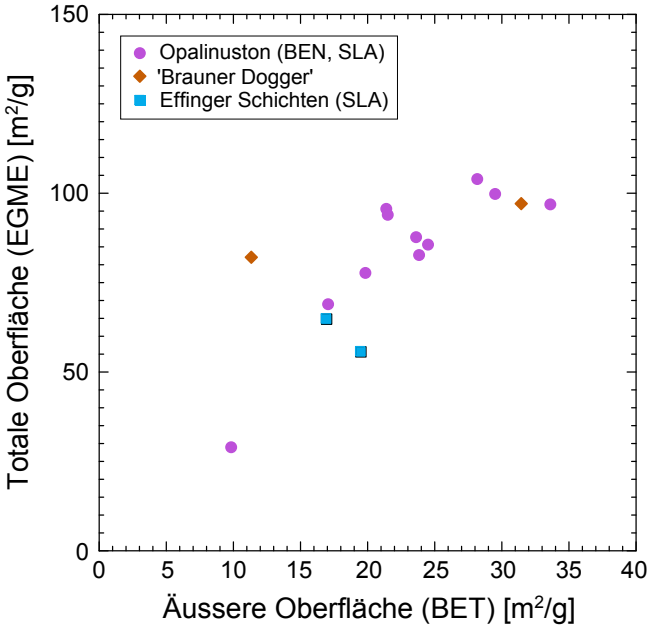


Fig. 2.3-12: Äussere und totale Oberflächen der Nordschweizer Wirtgesteine.

BEN = Benken, SLA = Schlattingen-1.

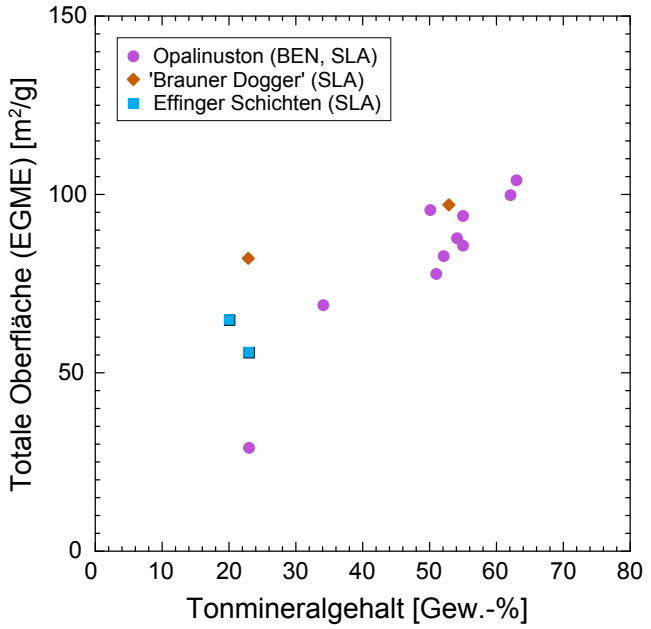


Fig. 2.3-13: Totale Oberfläche der Nordschweizer Wirtgesteine als Funktion des Tonmineralgehalts.

BEN = Benken, SLA = Schlattingen-1.

2.3.2.7 Schlüsselparameter der Wirtgesteine im Vergleich

Fig. 2.3-14 und 2.3-15 enthalten vergleichende Darstellungen von Porositäten, Kationenaustauschkapazität und äusserer Oberfläche der Wirtgesteine.

- Die Pyknometerporosität ist neben der Wasserverlustporosität und Diffusionsporosität für HTO (letztere beiden sind in Fig. 2.3-14 nicht dargestellt) in der Regel eine gute Annäherung der physikalischen Porosität. Sie deckt im Opalinuston und 'Braunen Dogger' ähnliche Bereiche ab. Die Effinger Schichten weisen hauptsächlich wegen ihres geringeren Tonmineralgehalts eine kleinere Pyknometerporosität auf. Die kleinsten Werte liefern die Helvetischen Mergel, was hauptsächlich durch ihre wesentlich tiefere Maximalversenkung und somit stärkere Kompaktion zu erklären ist.
- Die anionenzugängliche Porosität ist kleiner als die Pyknometerporosität. Der Anionenausschluss ist insbesondere in den Helvetischen Mergeln gross.
- Kationenaustauschkapazität und äussere Oberfläche sind im Opalinuston und 'Braunen Dogger' wegen ihres hohen Tonmineralgehalts deutlich höher als in den Effinger Schichten. Die kleinsten Werte sind in den Helvetischen Mergeln zu finden, was als Folge der höheren Versenkungstemperaturen und damit stärkeren Rekristallisation und Mineralumwandlung (z.B. Illitisierung von Smektit) interpretiert wird.

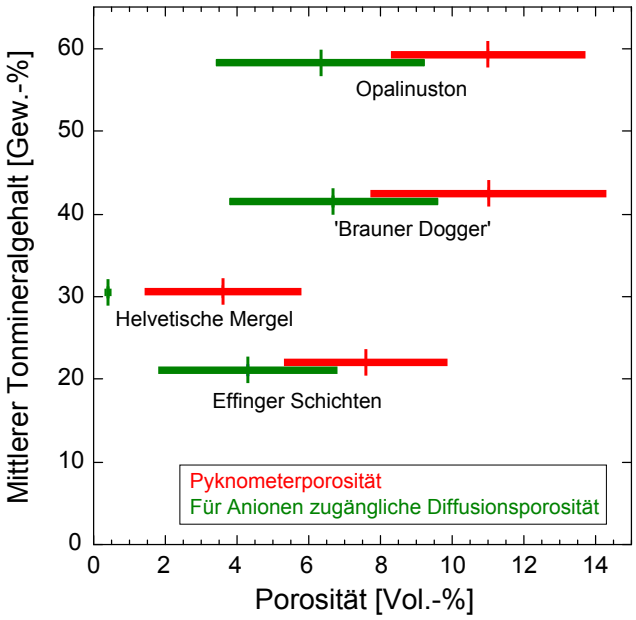


Fig. 2.3-14: Porositäten der Wirtgesteine in der Übersicht.

Dargestellt sind Mittelwerte und 1σ-Streubereiche aller Einzelanalysen.

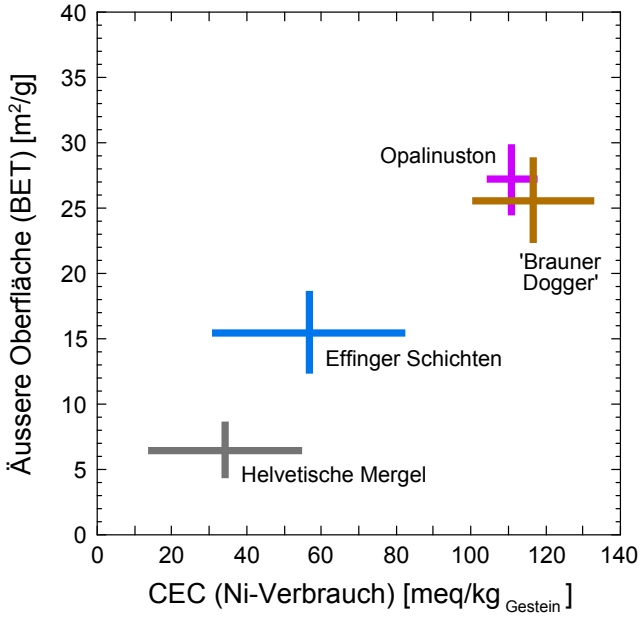


Fig. 2.3-15: Kationenaustauschkapazität (repräsentiert durch den Ni-Verbrauch) und äussere Oberfläche (BET-Methode) der Wirtgesteine in der Übersicht.

Dargestellt sind jeweils Mittelwerte und 1σ-Streubereiche aller Einzelanalysen.

2.4 Porenwasserchemie, Mikrobiologie und Kolloidfiltration

Die Zusammensetzung der Porenwässer der Wirtgesteine ist ein wichtiger Parameter zur Erstellung der Sorptionsdatenbanken für Radionuklide und zur Berechnung deren Löslichkeitslimiten für die Sicherheitsanalyse. Ebenso beeinflusst die Porenwasserchemie des Wirtgesteins die zu erwartenden Wechselwirkungen mit den Materialien der technischen Barrieren. Für die provisorische Sicherheitsanalyse als Teil von SGT Etappe 2 wurden Referenzporenwässer für alle potenziellen Wirtgesteine definiert (Mäder 2009a, b, 2010). Durch die Definition von drei oder vier zusätzlichen Varianten des Porenwassers (z.B. niedriger/hoher Partialdruck von CO_2, geringe/hohe Salinität) wurde dem erwarteten Zusammensetzungsbereich und den Ungewissheiten in den relevanten Parametern Rechnung getragen.

In diesem Abschnitt werden Methodik, Stand des Wissens, neue Ergebnisse und Ungewissheiten zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Zusammensetzung der Referenzporenwässer robust definiert wurde, den neuen Erkenntnissen Stand hielt und in einem Fall der Zusammensetzungsbereich reduziert werden konnte (Effinger Schichten). Ansonsten werden diese Referenzporenwässer und deren Varianten beibehalten.

Die Interpretation der Chloridkonzentrationen aus Felddaten und somit auch die Werte der Referenzporenwässer sind gut abgesichert. Grössere Ungewissheiten bestehen in den Werten für die Sulfatgehalte, deren Obergrenze aber auch verlässlich durch Minerallöslichkeiten eingeengt wird, und dies wird in den Referenzporenwässern berücksichtigt. Bezüglich pH-Wert, Partialdruck von CO_2 und Alkalinität konnte der Ungewissheitsbereich bereits in den provisorischen Referenzwässern gegenüber älteren Arbeiten merklich reduziert werden und reflektiert den Wissensstand.

Zusätzlich finden sich in diesem Kapitel auch Beiträge zu den Aspekten der mikrobiellen Aktivität und zur Kolloidfiltration.

2.4.1 Methodik

Artefakte verhindern eine Beprobung von ungestörten Porenwässern in wenig durchlässigen tonigen Gesteinen. Deshalb kann die Zusammensetzung eines Porenwassers nicht direkt aus gemessenen Konzentrationen, einem pH-Wert und einem gemessenen Partialdruck von CO_2 abgeleitet werden (z.B. Opalinuston; Nagra 2002a, Kapitel 5.12). Die messbaren Konzentrationen (z.B. Chloridkonzentration) müssen deshalb ergänzt werden mit Annahmen zum Sättigungszustand bezüglich der relevanten Minerale (z.B. Calcit, Dolomit) und meist auch mit wenigen Parametern, die gemäss einer *expert opinion* geschätzt werden (z.B. Partialdruck von CO_2). Die Belegung des Kationenaustauschers (Tonminerale) - sofern technisch messbar - ist direkt abhängig von den Kationenverhältnissen im Porenwasser und kann so auch in das Modell einfliessen (z.B. Opalinuston). Die ungleiche Datengrundlage bedingt, dass der *expert opinion* in weniger erforschten Wirtgesteinen (z.B. 'Brauner Dogger') mehr Tragkraft zukommt.

Das Konstrukt von direkt gemessenen, indirekt hergeleiteten und geschätzten Parametern wird in einem robusten thermodynamischen Modell vereint. Dieses Modell basiert auf der Nagra-PSI Thermodynamischen Datenbank (Hummel et al. 2002), trägt der Speziierung der gelösten Stoffe Rechnung, verwendet die Löslichkeitskontrollen wichtiger reaktiver Minerale und beinhaltet die Verteilungsgleichgewichte zwischen gelösten Kationen und den an den Austauschkomplex der Tonminerale gebundenen Kationen. Dieses Modell ist flexibel bezüglich der zur Verfügung stehenden Messgrössen und den mineralogischen Gegebenheiten und ist somit generell anwendbar. Es berücksichtigt zudem die gekoppelten Abhängigkeiten zwischen wichtigen Zusammensetzungsparametern, wie z.B. pH-Wert, Alkalinität, P_{CO2}, und Konzentrationen von Ca^{2+} und SO_4^{2-}. Ein so definiertes Referenzporenwasser ist somit inhärent konsistent mit akzeptierten thermodynamischen Grundlagen und Grunddaten.

Tab. 2.4-1 fasst die für alle Referenzporenwässer gültigen Randbedingungen des Porenwassermodells zusammen. Eine detaillierte Diskussion wird in den einzelnen Unterkapiteln zu den Wirtgesteinen präsentiert.

Alle Berechnungen der Referenzporenwässer wurden für eine Temperatur von 25 °C durchgeführt. Dies ist zum einen eine Einschränkung der zur Verfügung stehenden thermodynamischen Datenbank. Zum anderen werden auch alle Radionuklid-spezifischen nachgeschalteten Berechnungen bei dieser Temperatur durchgeführt.

Eine für Tongesteine intrinsische Eigenschaft gründet in den elektrostatischen Wechselwirkungen der permanent negativ geladenen Tonoberflächen mit den gelösten Stoffen und resultiert in einer für Anionen reduzierten zugänglichen Porosität (Kap. 2.3.2.3, Appelo & Wersin 2007, Altmann et al. 2012). Dieser Effekt führt zu einer direkten Skalierung der Salinität im anionenzugänglichen Porenraum relativ zur Salinität berechnet aufgrund des gesamten Wassergehalts. Dem Ausmass dieses Effekts kommt deshalb besondere Bedeutung zu (ca. 50 % für Opalinuston) und ein Schwerpunkt neuerer Untersuchungen war, diese Datenbasis zu verbreitern und somit die möglichen Bandbreiten in den zu erwartenden Salinitäten zu verringern. Die Annahmen, welche dem Modell für Referenzporenwässer zugrunde liegen, sind unabhängig vom Wert der anionenzugänglichen Porosität, und die verwendeten gemessenen Chloridkonzentrationen stammen aus Methoden, welche direkt dasjenige Porenwasser beproben, welches nicht oder nur wenig durch Elektrostatik beeinflusst wird. Details zu dieser Thematik im Kontext der Wirtgesteine sind in Mazurek et al. (2012), Wersin et al. (2013a) und Van Loon (2014) zusammengefasst und diskutiert.

Tab. 2.4-1: Überblick über Inputdaten und Randbedingungen für die Referenzporenwässer.

Parameter	**Datenherkunft**	**Randbedingung**
Temperatur		Konstant, 25 °C
Cl(Total)	Experiment/Analytik	Bestimmte Konzentration
S^{VI}(Total)	Experiment/Analytik oder Thermodynamik/Mineralogie	Bestimmte Konzentration oder Minerallöslichkeit (Cölestin, Gips)
Log[P_{CO2}]	*expert opinion* oder von Messwerten abgeleitet	Bestimmter Partialdruck von CO_2
pH	Thermodynamik oder Experiment	Modelliert oder gemessen
C^{IV}-Spezien	Thermodynamik	Gerechnete Speziierung in der Lösung
Ca^{2+}	Thermodynamik, Mineralogie	Löslichkeit von Calcit
Mg^{2+}	Thermodynamik, Mineralogie	Löslichkeit von Dolomit oder Kationenaustauscher (Helv. Mergel)
Na^{+} K^{+}	Analytik, Thermodynamik	Belegung auf Kationenaustauscher und Austauschgleichgewicht, oder gemessen
Sr^{2+}	Analytik, Thermodynamik oder Mineralogie	Belegung auf Kationenaustauscher und Austauschgleichgewicht, oder Löslichkeit von Cölestin
Si	Thermodynamik, Mineralogie	Löslichkeit von Quarz
F^{-}	Thermodynamik, Mineralogie	Löslichkeit von Fluorit
Fe^{2+}	Thermodynamik, Mineralogie	Löslichkeit von Siderit
S^{-II}	Thermodynamik, Mineralogie	Löslichkeit von Pyrit
Eh (pe)	Thermodynamik, Mineralogie	S^{VI}/S^{-II} Redoxgleichgewicht bei Sättigung von Pyrit + Siderit
Summe Kationen, Summe Anionen	Thermodynamik	Neutrale Ladungsbilanz

Die Behandlung der Ungewissheiten bezüglich der Porenwasserzusammensetzung soll sowohl den analytischen Fehlern Rechnung tragen wie auch die Ungewissheiten in den Modellannahmen beinhalten. Letzteres ist nicht rigoros quantifizierbar und widerspiegelt den Kenntnisstand, die Datendichte und die interne Konsistenz aller Beobachtungen (Verständnis der geochemischen Prozesse) bezüglich eines Wirtgesteins. Aufgrund der regional spärlich vorhandenen Daten wurde auf eine Standortregion-spezifische Definition von Referenzporenwässern verzichtet. Der definierte Zusammensetzungsbereich deckt deshalb auch diese möglichen regionalen Unterschiede ab, wie auch mögliche laterale oder vertikale Gradienten innerhalb eines Wirtgesteins einer Standortregion. Aus Sicht der Sicherheitsanalyse kann argumentiert werden, dass es wichtig ist, die maximal möglichen Salinitäten abzudecken, da eine erhöhte Salinität des Porenwassers die Diffusion und Sorption der Radionuklide im Wirtgestein und im Bentonit beeinflussen kann (Cloet et al. 2014).

Mit aufwändigen experimentellen und analytischen Studien war es möglich, an einzelnen Lokalitäten mit genügender Probendichte die Porenwasserzusammensetzung einiger Wirtgesteine verlässlich und umfassend zu charakterisieren (Wersin et al. 2013a, Mazurek et al.

2012, Waber et al. 2003, Pearson et al. 2003). Diese lokalitätsbezogenen umfassenden Datensätze trugen entscheidend zum Verständnis der Porenwasserchemie bei. Ein Referenzporenwasser für ein Wirtgestein im überregionalen Sinn stellt eine Verallgemeinerung solcher lokaler Beobachtungen dar und kann und soll nicht alle Details an allen Lokalitäten beschreiben.

Bisherige Referenzporenwässer (Helvetische Mergel am Wellenberg, Opalinuston für den Entsorgungsnachweis) unterscheiden sich unwesentlich von den aktuellen Werten. Der Hauptunterschied liegt in der konsequenten Anwendung eines thermodynamischen Modells für alle Parameter, im Gegensatz zu den früher verwendeten Hybridmodellen, bei welchen die Modellierung selektiv für einige Parameter verwendet wurde, aber ein Messwertbereich für andere Parameter. Den kumulativen Fehlern wurde in den früheren Modellen durch Wertebereiche für jeden Parameter Rechnung getragen (ohne strikte Beachtung von Korrelationen), während bei den aktuellen Referenzporenwassermodellen jeweils mehrere Varianten definiert wurden, welche die mögliche Bandbreite abdecken. Die neu modellierten Referenzporenwässer erlauben zudem eine direkte und konsistente Implementierung in die nachgeschalteten Modellierungen zur Erarbeitung von Sorptionsdatenbanken und Löslichkeitslimiten.

Für das französische Wirtgestein (Callovo-Oxfordian in Bure) wurde das für den Opalinuston entwickelte Porenwassermodell (Pearson et al. 2003) weiter entwickelt, um die Abhängigkeit von der *expert opinion* bezüglich pH / P_{CO2} zu vermeiden (THERMOAR, Gaucher et al. 2009). Hierfür wurden weitere Mineralgleichgewichte von OH-haltigen Silikaten (z.B. Tonminerale) berücksichtigt, deren Hydrolysereaktionen eine pH-Abhängigkeit beinhalten. So konnten gemäss Phasenregel sämtliche Parameter inklusive pH und P_{CO2} thermodynamisch berechnet werden. Allerdings bedingte auch dieses Vorgehen eine *expert opinion* bezüglich der zu berücksichtigenden Minerale (das Inventar ist wesentlich grösser als die Phasenregel erlauben würde) und eine möglichst direkte und aufwändige Bestimmung der thermochemischen Eigenschaften dieser neu berücksichtigten Silikate. Diese Art von Modell wurde auch bezüglich der Anwendbarkeit auf Opalinuston vertieft diskutiert (Pearson et al. 2011). Insbesondere wurde auch die Revisionsbedürftigkeit des Selektivitätskoeffizienten für Kalium zwischen Porenwasser und Ton-Austauschkomplex vertieft, sowie darauf hingewiesen, dass das Ca/Mg-Verhältnis im Porenwasser nicht zwingend durch das Calcit-Dolomit-Gleichgewicht bestimmt wird, sondern durch die Kationenbelegung des Ton-Austauschkomplexes, im Gleichgewicht lediglich mit Calcit. Ein Angleichen des Selektivitätskoeffizienten für Kalium wurde von Mäder (2009a, b, 2010) berücksichtigt, auf eine Erweiterung des Porenwassermodells im Sinne von THERMOAR wurde jedoch aus folgenden Gründen verzichtet: (1) die relevanten Mineralphasen (für Opalinuston und insbesondere für alle anderen Wirtgesteine) sind nicht im Detail thermochemisch charakterisiert (insbesondere natürliche Tonminerale), (2) ein einheitliches, möglichst einfaches Modell sollte für alle Wirtgesteine verwendet werden, und (3) der *expert opinion* kann nicht entronnen werden, sie wird lediglich von durch mehrfache Evidenzen eingrenzbaren Parametern pH und P_{CO2} hin zu für die Wirtgesteine noch wenig belastbaren oder nicht vorhandenen thermochemischen Parametern komplexer Mineralphasen verschoben.

2.4.2 Datengrundlage

Als Datengrundlage dienen die mineralogische Zusammensetzung und die petrophysikalischen Grössen Wassergehalt und Porosität. Kerninfiltrationsexperimente (*advective displacement*; z.B. Mazurek et al. 2012) und zum Teil auch *squeezing*-Experimente (Wersin et al. 2013a, b) ergeben direkt die Zusammensetzung – zumindest für einige Komponenten – des Porenwassers. Wässerige Auszüge zusammen mit Messungen der anionenzugänglichen Porosität ergeben Chloridgehalte und selten auch Sulfatgehalte des Porenwassers. Die gemessene Kationenbelegung des Austauschkomplexes der Tonminerale zusammen mit bekannten Selektivitätskoeffizienten bestimmen die Kationenverhältnisse im Porenwasser (z.B. Pearson et al. 2003,

Baeyens & Bradbury 1994). pH-Werte konnten an wenigen Proben experimentell gemessen werden (Kerninfiltrationsexperimente) oder werden thermodynamisch modelliert. Der Partialdruck von CO_2 fliesst hier als *expert opinion* ein, ist aber durch eine vielgestaltige Datenbasis recht verlässlich bekannt (Pearson et al. 2003, Mazurek et al. 2012, Pearson et al. 2011, Wersin et al. 2013a). Mineralgleichgewichte (Calcit, Dolomit, Cölestin, Siderit, Pyrit, Quarz, Fluorit) bestimmen direkt oder über komplexe Abhängigkeiten einzelne Konzentrationen (Pearson et al. 2003, Mazurek et al. 2012, Pearson et al. 2011). Die detaillierten Angaben zu dieser Datengrundlage für die Wirtgesteine ist in den Referenzberichten dokumentiert und diskutiert (Mäder 2009 a, b und 2010), und Tab. 2.4-2 vermittelt einen Überblick.

Ein wichtiges Argument für die Verwendung mechanistisch und thermodynamisch gleichartiger Porenwassermodelle für alle Wirtgesteine ist die sehr ähnliche mineralogische Zusammensetzung (Kap. 2.2). Entscheidend sind nicht die Mineralgehalte an sich, sondern das Vorhandensein einer Mineralphase, welche so die Löslichkeit kontrollieren kann. Die Mineralogie – insbesondere die Karbonate – ist auch der Grund für das sehr ausgeprägte chemische Pufferungsvermögen, welches alle Wirtgesteine und deren einschlusswirksame Rahmengesteine besitzen (z.B. experimentell am Mont Terri demonstriert, Koroleva et al. 2011b).

2.4.3 Übersicht über die Referenzporenwässer

Die Zusammensetzungen der provisorischen Referenzporenwässer (Mäder 2009a, b und 2010) sind in Tab. 2.4-3 zusammengefasst. Die verschiedenen Varianten zur Absteckung der möglichen Zusammensetzungsbereiche sind vermerkt, aber nicht im Detail aufgelistet (siehe hierfür wirtgesteinsspezifische Unterkapitel).

Aufgrund der neu erhobenen Daten seit 2009 wurde eine Variante aus der obigen Liste gestrichen (Effinger Schichten, hochsaline Variante) und diverse andere Werte oder Modellannahmen konnten besser belegt werden. Die Details sind in den entsprechenden Unterkapiteln erörtert.

Am wenigsten durch Experimente oder Bohrlochbeprobungen belegt sind die Konzentrationen für Fe^{II}. Zum einen sind die Konzentrationen niedrig, und zum anderen sind Artefakte schwierig zu vermeiden (Instrumentierung, Sauerstoffkontamination, Probennahme, Analytik). Deshalb werden in den Referenzporenwässern die Werte mit Siderit-Pyrit-Gleichgewicht gerechnet. Siderit ist als Proxy für eine Fe-reiche Karbonatphase zu verstehen. Diese Annahme mag den errechneten Fe-Gehalt beinflussen, nicht aber den generell reduzierenden Redoxzustand, welcher durch Gleichgewicht mit Pyrit bestimmt wird.

Die Fluoridkonzentrationen sind in den Berichten für SGT Etappe 2 (Mäder 2009a, b und 2010) noch nicht enthalten, sie wurden deshalb für diese Zusammenstellung mit demselben Modell nachgerechnet (Sättigung bezüglich Fluorit).

Tab. 2.4-2: Übersicht über die für die Referenzporenwässer verwendeten Daten.

EFF = Effinger Schichten; OPA = Opalinuston; BD = 'Brauner Dogger'; HM = Helvetische Mergel; X = Daten verwendet für die Referenzporenwässer von SGT Etappe 2; x = neue Daten, erhoben seit 2009. In Klammern: Unterstützende Datensätze mit analytischen Ungewissheiten.

Komponente	**Art der Daten / Datenherkunft**	**EFF**	**BD**	**OPA**	**HM**
Temperatur	25 °C	X	X	X	X
Cl (Salinität)	Kerninfiltrationsexperiment	X	X	X	
	Wässrige Auszüge, anionenzugängliche Porosität	X	X	X	X
	Porewater squeezing		x	x	
	Bohrlochbeprobung, z.T. mit Korrekturrechnungen			X	X
SO_4	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	Xx	
	Gleichgewicht mit Cölestin	X	X	X	
	Porewater squeezing		x	x	
Ca	Gleichgewicht mit Calcit	X	X	X	X
	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	Xx	
Mg	Gleichgewicht mit Dolomit	X	X	X	
	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	Xx	
Na	Ladungsgleichgewicht ($Cl+2SO_4$-2Ca-2Mg)	X	X	X	X
	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	Xx	
K	Na/K Ionenaustauschgleichgewicht	X	X	X	X
	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	Xx	
Sr	Na/Sr Ionenaustauschgleichgewicht	X	X	X	X
	Gleichgewicht mit Cölestin	X	X	X	
	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	Xx	
Fe^{II}	Gleichgewicht mit Siderit	(X)	X	X	(X)
F	Gleichgewicht mit Fluorit	X	X	X	X
	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	(X)x	
Si	Gleichgewicht mit Quarz	X	X	X	X
	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	Xx	
Eh (pε)	Gleichgewicht mit Pyrit	X	X	X	X
P_{CO2}	*Expert opinion*	X	X	X	X
	Kerninfiltrationsexperiment, gerechnet	X	x	Xx	
Alkalinität (C^{IV})	Gleichgewicht mit Calcit-P_{CO2}	X	X	X	X
	Kerninfiltrationsexperiment	(X)	(x)	(X)	
pH	Kerninfiltrationsexperiment	X	x	X	
	Gleichgewicht mit Calcit-Dolomit-P_{CO2}	X	X	X	

Tab. 2.4-3: Vergleich der Zusammensetzung der Referenzporenwässer von SGT Etappe 2 für alle Wirtgesteine (Mäder 2009a, b, 2010; Mazurek et al. 2012).

EFF = Effinger Schichten; OPA = Opalinuston; BD = 'Brauner Dogger'; HM = Helvetische Mergel; SI: Sättigungsindex. Alle Porenwässer sind zusätzlich auf Sättigung bezüglich Calcit und Fluorit gerechnet.

Komponente / Variante	**Einheit**	**EFF**	**BD**	**OPA**	**HM**
Temperatur	[°C]	25	25	25	25
pH		7.307	7.203		7.467
pε		-2.939	-2.781		-3.418
Na (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	374.1	164.4		197.7
K (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	1.99	2.604		2.338
Ca (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	60.34	12.51		2.273
Mg (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	45.18	9.625		1.320
Sr (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.811	0.2106		0.162
Fe^{II} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.290	0.0524		0.0110
Fe^{III} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	$25.5 \cdot 10^{-9}$	$3.31 \cdot 10^{-9}$		$0.918 \cdot 10^{-9}$
Si (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.174	0.1779		0.178
Cl (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	565.9	160.0		202.0
S^{VI} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	11.50	24.72		0.20
S^{-II} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	$5.29 \cdot 10^{-9}$	$12.4 \cdot 10^{-9}$		$51.7 \cdot 10^{-9}$
C^{IV} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.429	2.506		5.413
F (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.108	0.153		0.282
SO_4/Cl	[mol/mol]	0.020	0.155		0.001
Alkalinität	[meq/kg_{H2O}]	0.420	2.308		5.184
HCO_3 (Spezies)	[mmol/kg_{H2O}]	0.263	2.043		4.740
P_{CO2}	[bar]	$10^{-3.19}$	$10^{-2.20}$		$10^{-2.10}$
Wasseraktivität		0.982	0.994		0.993
Ionenstärke	[molal]	0.677	0.2299		0.211
SI(Gips)		-0.20	-0.28		-2.94
SI(Strontianit)		-1.08	-0.98		-0.36
SI(Cölestin)		gesättigt	gesättigt		-2.04
SI(Dolomit)		gesättigt	gesättigt		-0.10
Hochsaline Variante			X		X
Tiefsaline Variante		X			
Hoch-Sulfat Variante		X			
Hoch-P_{CO2} / tief-pH-Variante		X	X		X
Tief-P_{CO2} / hoch-pH-Variante			X		X
Tief-pε Variante					X

2.4.4 Opalinuston

Das grundlegende Verständnis der Porenwasserchemie des Opalinustons wurde mittels umfangreicher Untersuchungen im Felslabor Mont Terri und Bohrkernuntersuchungen im Labor erarbeitet (Pearson et al. 2003). Die dort gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen zur Beprobung und Probenaufbereitung wurden bei der Tiefbohrung Benken konsequent angewendet und resultierten in einem qualitativ hochstehenden und umfassenden Datensatz und einer Definition eines Referenzporenwassers für den Entsorgungsnachweis (Nagra 2002a, Pearson 2002). Die grösste Ungewissheit bestand damals in den korrelierten Werten für pH, P_{CO2} und Alkalinität und diese wurden mit einer relativ grossen Bandbreite von einem Faktor 10 nach oben und unten im P_{CO2} und einer entsprechenden Ungewissheit von ± 0.5 pH-Einheiten versehen.

Die für SGT Etappe 2 definierte Porenwasserzusammensetzung (Tab. 2.4-4; Mäder 2009b) weicht wenig von Nagra (2002a) ab, stützt sich gleichermassen auf Daten von Benken, gilt aber nun für den Opalinuston aller Standortregionen und beinhaltet folgende Verbesserungen (siehe Details in Mäder 2009b):

- Einen revidierten Selektivitätskoeffizienten für Kalium zwischen Kationenaustauscher (Tonminerale) und dem Porenwasser.
- Die Berechnung des Sulfatgehalts mit der Löslichkeitslimite von Cölestin, wobei die Strontium-Konzentration im Porenwasser durch die Belegung des Kationenaustauschers bestimmt wird.
- Eine reduzierte Bandbreite des CO_2-Partialdrucks (P_{CO2}) von neu nur noch einer Log-Einheit.

Zwei Varianten (Tab. 2.4-4) mit unterschiedlichem CO_2-Partialdruck von $10^{-1.8}$ und $10^{-2.8}$ bar decken den möglichen pH-Bereich ab (pH 7 bis 7.5), mit einem Unterschied von etwa einem Faktor 3 in den zugehörenden Alkalinitäten. Die Redox-Bedingungen sind robust definiert durch Gleichgewicht mit Pyrit und Fe-Karbonat (Siderit), bei vorgegebenem Sulfatgehalt.

Die maximalen Chloridgehalte der Bohrung Benken entsprechen jenem des Referenzporenwassers (6 g/kg). Dies ist etwa die Hälfte der maximalen Gehalte im Felslabor Mont Terri (12 – 13 g/kg; Pearson et al. 2003, Mazurek et al. 2011) und viel geringer als die maximal beobachtete Salinität am Mont Russelin (Koroleva & Mazurek 2009) von 23 g/l. Neuere Daten der Bohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a) zeigen ähnlich moderate Salinitäten wie in Benken. Es wird erwartet, dass die Salinitäten im Opalinuston (und im 'Braunen Dogger') der Standortregionen jene des Referenzporenwassers nicht wesentlich übersteigen. Die hochsaline Variante, welche sich an der Situation am Mont Russelin orientiert, trägt der Ungewissheit Rechnung, dass die Salinitätsentwicklungen in den Grundwasserleitern im Hangenden und Liegenden nicht genau bekannt sind und somit auch nicht die zeitliche Entwicklung der vertikalen Salinitätsprofile im Opalinuston in allen Standortgebieten.

Neue und umfassende Untersuchungen an Proben der Tiefbohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a, b) zeigen auch konsistente Daten für Chlorid und Sulfat aus Methoden, welche das Porenwasser direkt beproben (Kerninfiltrationsexperiment, *pore water squeezing*). Diese Porenwässer sind beinahe gesättigt bezüglich Cölestin. Die anionenzugängliche Porosität liegt etwa bei 50 % für die Squeezing-Daten, vergleichbar mit der Auswertung von Diffusionsexperimenten (Van Loon 2014). Die Chloridkonzentrationen im Porenwassers des Opalinustons im Profil Schlattingen-1 entsprechen etwa jenen des Referenzporenwassers (Tab. 2.4-4), die Sulfatgehalte sind jedoch mit 1.3 – 1.6 g/kg deutlich geringer als jener des Referenzporenwassers (2.3 g/kg, Tab. 2.4-4). Das Porenwasserprofil ist in der Bohrung Schlattingen-1, wie in Benken, durchgehend zwischen 'Braunem Dogger' und dem Opalinuston.

Tab. 2.4-4: Zusammensetzung des Referenzporenwassers für Opalinuston und 'Brauner Dogger' mit Varianten zur Absteckung des möglichen Zusammensetzungsbereichs.

Die Porenwässer sind gesättigt bzgl. Calcit, Dolomit, Cölestin, Quarz und Siderit sowie Gips für die saline Variante. Es wurde PHREEQC (Version 2.15.07) verwendet mit der Nagra-PSI Thermodynamischen Datenbank Version 01/01. Daten aus Mäder (2009a).

Parameter	**Einheit**	**Referenz**	**$P_{CO2} = 10^{-1.8}$** [bar]	**$P_{CO2} = 10^{-2.8}$** [bar]	**Hoch-NaCl**
Temperatur	[°C]	25	25	25	25
pH		7.203	7.001	7.505	7.009
pε		-2.781	-2.550	-3.126	-2.563
Na (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	164.4	165.0	163.8	527.5
K (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	2.604	2.616	2.594	1.77
Ca (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	12.51	12.68	12.37	49.71
Mg (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	9.625	9.748	9.519	37.55
Sr (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.2106	0.2124	0.2091	0.422
Fe^{II} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.0524	0.0542	0.0509	0.246
Fe^{III} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	$3.31 \cdot \times 10^{-9}$	$1.73 \cdot \times 10^{-9}$	$9.72 \cdot \times 10^{-9}$	$8.23 \cdot \times 10^{-9}$
Si (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.1779	0.178	0.179	0.172
Cl (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	160.0	160.0	160.0	662.0
S^{VI} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	24.72	24.70	24.74	21.06
S^{-II} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	$12.4 \cdot \times 10^{-9}$	$13.7 \cdot \times 10^{-9}$	$11.6 \cdot \times 10^{-9}$	$6.11 \cdot \times 10^{-9}$
C^{IV} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	2.506	4.148	1.214	1.057
SO_4/Cl	[mol/mol]	0.155	0.154	0.155	0.032
Alkalinität	[meq/kg_{H2O}]	2.308	3.624	1.178	0.962
HCO_3 (Spezies)	[mmol/kg_{H2O}]	2.043	3.222	1.028	0.631
P_{CO2}	[bar]	$10^{-2.20}$	$10^{-1.80}$	$10^{-2.80}$	$10^{-2.50}$
Wasseraktivität		0.994	0.994	0.994	0.978
Ionenstärke	[molal]	0.2299	0.231	0.229	0.762
SI (Gips)		-0.28	-0.28	-0.29	0.00
SI (Strontianit)		-0.98	-0.98	-0.98	-1.28

2.4.5 'Brauner Dogger'

Die Datenbasis zur Zeit der Festlegung der Referenzporenwässer (Mäder 2009b) war recht dünn, mit belastbaren Daten aus der Tiefbohrung Benken und einigen unpublizierten wässerigen Chloridauszügen von alten Proben der Tiefbohrung Weiach (nördliche Lägern), welche nicht verlässlich auf Porenwasserkonzentrationen hochgerechnet werden konnten (unzuverlässige Porositäten erhoben an trocken gelagerten Bohrkernen). Durch die Untersuchungen in der Bohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a, b) konnte die Datenbasis stark erweitert werden, diese haben die Definition der Referenzporenwässer im Wesentlichen bestätigt.

In der Bohrung Benken zeigen die Chloridgehalte im 'Braunen Dogger' identische Werte wie der unmittelbar darunter liegende Opalinuston (Nagra 2002a). Die beiden Einheiten zeigen ein kontinuierliches vertikales Diffusionsprofil in den Chloridgehalten (Gimmi & Waber 2004, Mazurek et al. 2011): Dieses ist deutlich asymmetrisch, mit geringen Chloridgehalten gegen den Keuper-Aquifer im Liegenden (ca. 500 mg/l) und deutlich höheren Konzentrationen gegen den Malm-Aquifer im Hangenden (ca. 4600 mg/l).

Die Mineralogie des 'Braunen Doggers' ist jener des Opalinustons sehr ähnlich, insbesondere auch bezüglich Tonmineralogie und Akzessorien (Kap. 2.2) und deshalb sind auch die das Porenwasser bestimmenden Wechselwirkungen mit den Mineralbestandteilen vergleichbar. Dies führte zum Schluss, das Referenzporenwasser für den Opalinuston mit seinen Varianten auch für den 'Braunen Dogger' zu verwenden (Mäder 2009b). Neuere für die Porenwasserzusammensetzung direkt relevante Untersuchungen bestätigen diese Annahme.

Neue und umfassende Untersuchungen an vielen Proben der Tiefbohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a, b) zeigen ungefähr konsistente Daten für Chlorid und Sulfat aus Methoden, welche das Porenwasser direkt beproben (*pore water squeezing*, Kerninfiltrationsexperiment). Auch sind diese Porenwässer beinahe gesättigt bezüglich Cölestin, aber untersättigt bezüglich Gips. Die anionenzugängliche Porosität liegt etwa bei 50 % für die *squeezing*-Daten, vergleichbar mit der Auswertung von Diffusionsexperimenten (Van Loon 2014), lediglich das Kerninfiltrationsexperiment aus dem oberen Bereich des 'Braunen Doggers' zeigt örtlich einen etwas weniger starken Ausschlusseffekt (Wersin et al. 2013a). Die Chloridkonzentrationen des Porenwassers des 'Braunen Doggers' im Profil Schlattingen-1 von 5 – 6 g/kg entsprechen etwa jenen des Referenzporenwassers (Tab. 2.4-4), die Sulfatgehalte sind jedoch mit 1.3 g/kg deutlich geringer als jener des Referenzporenwassers (2.3 g/kg, Tab. 2.4-4). Das Porenwasserprofil ist in der Bohrung Schlattingen-1, wie in Benken, durchgehend zwischen 'Braunem Dogger' und dem Opalinuston.

Die Definition eines identischen Referenzporenwassers für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' konnte somit weiter gefestigt werden und wird beibehalten. Insbesondere bestehen keine Messdaten, welche gegen diese Vereinfachung sprechen würden. Da der 'Braune Dogger' lithologisch weniger homogen ist als der Opalinuston, wäre es denkbar, dass lokale Variationen in der Porenwasserchemie auftreten, aber kaum wirksam sind bezüglich der Formationsskala.

2.4.6 Effinger Schichten

Die Einbettung der 2009 vorhandenen Daten bezüglich Porenwasserzusammensetzung im regionalen Kontext ist in Mäder (2009a) diskutiert und bezüglich des regionalen hydrogeologischen und hydrogeochemischen Kontexts auf den neuesten Stand gebracht worden (Dossier V). Die Datengrundlage bezüglich Porenwasserzusammensetzung für die Effinger Schichten zur Zeit der Definition der Referenzporenwässer für SGT Etappe 2 (Mäder 2009a) war spärlich, und die Interpretation der vorhandenen Daten war mit Ungewissheiten behaftet,

insbesondere bezüglich der Sulfatgehalte und der Bandbreite der anionenzugänglichen Porosität (Mäder 2009a, Mazurek et al. 2012). Die Ungewissheiten in der anionenzugänglichen Porosität und der damit verbundenen maximal zu erwartenden Chloridkonzentration (Salinität) führten zur Definition einer hochsalinen Variante mit etwa 40 g/kg Chlorid (etwa doppelte Salinität von Meerwasser) und maximal löslichem Sulfat. Diese im Vergleich zu allen anderen Formationen anomal hohe Salinität konnte aufgrund neuer Daten entkräftet werden. Die nach 2009 erhobenen Daten beinhalten komplementäre Methoden wie Kerninfiltrationsexperimente (Mazurek et al. 2012) und Bestimmung der anionenzugänglichen Porosität mittels Diffusionsexperimenten (Van Loon 2014). Diese Daten sind im Synthesebericht zu den Effinger Schichten im Detail diskutiert (Mazurek et al. 2012). Das Referenzporenwasser für Etappe 2 (Tab. 2.4-5) entspricht der *low-salinity* Variante des Referenzporenwassers in Mäder (2009a).

Die vergleichsweise grösseren Ungewissheiten in der Interpretation des Sulfatgehalts bleiben teilweise bestehen. Es wurde festgestellt, dass wässrige Auszüge offensichtlich Sulfat aus einer Festphase in Lösung bringen, was bei Rückrechnung auf Porenwasserkonzentration zu einer rechnerischen Übersättigung bezüglich Cölestin und Gips führt (Mazurek et al. 2012). Die aus dem Kerninfiltrationsexperiment gewonnenen Porenwasserproben liegen nahe der Sättigung mit Cölestin (Mäder 2009a, Mazurek et al. 2012). Die bevorzugte Interpretation ist, dass die Sulfatgehalte durch die Präsenz von Cölestin limitiert sind, auch wenn Cölestin bislang nur in wenigen Proben nachgewiesen werden konnte. Dies deckt sich mit der von Mäder (2009a) gemachten Annahme zur Definition des Referenzporenwassers, und diese Annahme hat weiterhin Bestand.

Im Unterschied zum Opalinuston konnte die Kationenbelegung auf dem Austauschkomplex der Tonminerale nicht bestimmt werden, nur die Austauschkapazität. Dies liegt in der Reaktivität des Gesteins begründet, welche während des Experiments (Nickel-Methode) zu Artefakten führt (Mazurek et al. 2012). Die Kationenverhältnisse wurden (Mäder 2009a) und werden demnach weiterhin auf die gemessene Zusammensetzung einer Porenwasserprobe aus dem Kerninfiltrationsexperiment abgestützt (Details in Mazurek et al. 2012).

Die Redox-Bedingungen sind definiert durch Gleichgewicht mit Pyrit und Siderit (Fe-Karbonat). Während Pyrit röntgenographisch insbesondere in den Kalkmergelabfolgen regelmässig nachgewiesen wird, wurde Siderit einzig in einer Probe aus der Bohrung Weiach quantifiziert. Siderit ist im Modell ein Proxy für eine Fe^{II}-haltige Mineralphase, z.B. für Fe-haltigen Calcit oder Fe-haltigen Dolomit, welche in Spongiennadeln resp. im Zement angetroffen worden sind. Diese Vereinfachung hat keine Auswirkungen auf pH, CO_2-Partialdruck oder Hauptliganden.

Den Ungewissheiten im Zusammensetzungsbereich wurde mit der Definition von drei zusätzlichen Varianten für die Effinger Schichten Rechnung getragen (Tab. 2.4-5): (1) tief-Chlorid-Variante, (2) hoch-Sulfat-Variante, und (3) hoch-P_{CO2}/tief-pH-Variante. Die tief-saline Variante (tief-Cl in Tab. 2.4-5) ist eine verdünnte Version des Referenzporenwassers. Sie ist von untergeordneter Bedeutung bezüglich Sorptionsdatenbanken oder Löslichkeitsberechnungen für Radionuklide. Die hoch-Sulfat-Variante trägt der oben diskutierten Ungewissheit in den Sulfatgehalten Rechnung und stellt den maximalen Sulfatgehalt bei Gipssättigung im Referenzporenwasser dar, aber lediglich mit etwas mehr als doppelt so hohen Sulfatkonzentrationen im Vergleich zur Referenz. Die hoch-P_{CO2}-Variante deckt die Ungewissheit im Partialdruck von Kohlendioxid ab mit damit verbundener maximaler Alkalinität bei minimalem pH-Wert. Die wesentlichen Unterschiede sind durch fettgedruckte Werte markiert (Tab. 2.4-5).

Tab. 2.4-5: Varianten der Referenzporenwasserzusammensetzung für die Effinger Schichten zur Eingrenzung des möglichen Zusammensetzungsbereichs.

Für alle Varianten wurde Sättigung bezüglich Calcit, Dolomit, Quarz, Cölestin, Siderit und Pyrit sowie Gips für die hoch-Sulfat-Variante angenommen. Die Berechnungen wurden mit PHREEQC (Version 2.15.07) durchgeführt mit der Nagra-PSI Thermodynamischen Datenbank Version 01.01. Siehe Mäder (2009a) für Details.

Parameter	**Einheit**	**Referenz**	**Tief-Cl**	**Hoch-SO_4**	**Hoch-P_{CO2} (tief-pH)**
Temperatur	[°C]	25	25	25	25
pH		7.307	**7.090**	**7.251**	**6.803**
Pε		-2.939	-2.735	-2.826	-2.364
Na (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	374.1	155.9	374.7	374.1
K (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	1.99	0.828	1.99	1.99
Ca (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	60.34	25.13	34.61	60.59
Mg (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	45.18	18.77	26.35	45.35
Sr (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.811	1.051	0.298	0.814
Fe^{II} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.290	0.109	0.155	0.294
Fe^{III} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	$25.5 \cdot \times 10^{-9}$	$4.49 \cdot \times 10^{-9}$	$11.5 \cdot \times 10^{-9}$	$5.12 \cdot \times 10^{-9}$
Si (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.174	0.177	0.175	0.174
Cl (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	565.9	**234.4**	444.8	565.9
S^{VI} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	11.50	**5.505**	**26.92**	11.50
S^{-II} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	$5.29 \cdot \times 10^{-9}$	$10.3 \cdot \times 10^{-9}$	$7.00 \cdot \times 10^{-9}$	$7.07 \cdot \times 10^{-9}$
C^{IV} (Total)	[mmol/kg_{H2O}]	0.429	**1.512**	**0.892**	**1.496**
SO_4/Cl	[mol/mol]	0.020	0.023	**0.060**	0.020
Alkalinität (tot)	[meq/kg_{H2O}]	0.420	**1.373**	0.847	**1.282**
HCO_3 (Spezies)	[mmol/kg_{H2O}]	0.263	1.121	0.631	0.836
P_{CO2}	[bar]	$10^{-3.19}$	$\mathbf{10^{-2.35}}$	$\mathbf{10^{-2.76}}$	$\mathbf{10^{-2.18}}$
Wasseraktivität		0.982	0.993	0.985	0.982
Ionenstärke	[molal]	0.677	0.287	0.535	0.678
SI (Gips)		-0.20	-0.68	0.00	-0.20
SI (Strontianit)		-1.08	-0.59	-1.27	-1.08

2.4.7 Helvetische Mergel

Referenzporenwässer für die Helvetischen Mergel im Rahmen des Wellenberg-Projekts (Nagra 1997) wurden zu einer Zeit definiert, als weder die konzeptionellen Modelle noch die Probenaufbewahrung und Analytik auf einem mit Opalinuston vergleichbaren Stand waren; dies betrifft auch Daten zu Wassergehalt und Porosität. Es wurde damals ein salines Na-Cl-Wasser für die Kernregion der Mergel sowie ein wenig mineralisiertes Na-HCO_3-Wasser für die untieferen Lagen definiert. Die damalige Argumentation sowie die revidierte Formulierung des Na-Cl-Referenzporenwassers wurden detailliert in Mäder (2010) beschrieben und diskutiert.

Mäder (2010) definierte ein Na-Cl-Referenzporenwasser (Tab. 2.4-6) gültig für das Innere des Mergelstapels, wo auch dereinst ein Tiefenlager platziert werden würde. Die Salinität von 0.2 mol/kg deckt sich mit jener der ursprünglichen Definition (Nagra 1997). Messwerte für pH oder P_{CO2} stehen keine zur Verfügung. Dieser Ungewissheit wird durch eine tief-pH / hoch-P_{CO2}- und eine hoch-pH / tief-P_{CO2}-Variante Rechnung getragen. Das Referenzporenwasser von Nagra (1997) gleicht der tief-pH / hoch-P_{CO2}-Variante.

Bezüglich des Redoxzustands können nicht alle Indizien der Feldbeobachtungen in Einklang mit thermodynamischen Gleichgewichten gebracht werden. Der Grund dafür ist das scheinbar simultane Auftreten von relativ hohen Methangehalten in einem Sulfat-dominanten Wasser. Ein gerechnetes Referenzporenwasser im Gleichgewicht mit Pyrit und Siderit (Proxy für Ankerit; Mäder 2010[10]) liegt im Stabilitätsbereich von Sulfat (und nicht Sulfid) und erlaubt keine messbaren Methangehalte. Andererseits ist eine Wasserzusammensetzung mit Methan und im Gleichgewicht mit Pyrit im Stabilitätsfeld von Sulfid und ausserhalb der Stabilität von Siderit. Die Details sind in Mäder (2010) diskutiert. Der scheinbare Widerspruch gründet zum Teil in der damaligen Probennahmetechnik und deren Kontaminationsgrad und/oder widerspiegelt Ungleichgewichtszustände, welche im Nachhinein nicht verlässlich geklärt werden können. Der mögliche Redoxbereich wird mit dem Referenzporenwasser (etwas weniger reduzierend, mit Sulfat, kaum Methan) und einer tief-pε-Variante im Stabilitätsbereich von Sulfid und mit relativ hohem Partialdruck von Methan eingegrenzt.

Eine hoch-saline Variante mit 0.5 mol/kg Chloridgehalt trägt der Ungewissheit bezüglich der anionenzugänglichen Porosität Rechnung (0.12 – 0.3; s. Kap. 2.3.2.3 sowie Diskussion in Mäder 2010) und deckt auch die Ungewissheiten der wenigen analysierten Wasserproben und deren Korrektur für die Kontamination durch die Bohrspülung ab. Diese Variante beinhaltet auch die obere Bandbreite für den Sulfatgehalt. Die derzeitige Datenlage erlaubt keine Erklärung der grossen Bandbreite der anionenzugänglichen Porosität ohne neue Probennahme. Ein möglicher Faktor von 2-2.5 Unsicherheit wäre aber durch die hochsaline Variante von 0.5 mol/kg Chloridgehalt abgedeckt, im Vergleich zu jener des Referenzporenwassers von 0.2 mol/kg.

[10] Siderit wurde in den Helvetischen Mergeln röntgenographisch nicht nachgewiesen, Ankerit ist die Fe-reichste Karbonatphase.

Tab. 2.4-6: Referenzporenwasser für die Helvetischen Mergel (Standortgebiet Wellenberg) mit Varianten, welche den möglichen Zusammensetzungsbereich abstecken.

Die Porenwässer sind gesättigt bezüglich Calcit, Quarz, Pyrit, Fluorit und Siderit (nicht für tief-pε-Variante). Es wurde PHREEQC (Version 2.15.07) verwendet mit der Nagra-PSI Thermodynamischen Datenbank Version 01/01. Daten aus Mäder (2010).

Parameter	**Referenz**	**Hoch-P_{CO2}**	**Tief-P_{CO2}**	**Tief-pε**	**Hoch-NaCl**	**Einheit**
Temperatur	25	25	25	25	25	[ºC]
pH	7.467	7.012	7.948	7.456	7.156	
Ionenstärke	0.211	0.219	0.208	0.211	0.521	[molal]
pε (25 ºC)	-3.418	-2.897	-3.968	-4.841	-2.995	
P_{CO2}	$10^{-2.10}$	$10^{-1.21}$	$10^{-3.05}$	$10^{-2.070}$	$10^{-2.14}$	[bar]
P_{CH4}	$10^{-11.6}$	$10^{-11.2}$	$10^{-12.0}$	$10^{-0.1}$	$10^{-12.5}$	[bar]
HCO_3^-	4.740	12.73	1.606	4.862	2.092	[mmol/kg_{H2O}]
C^{IV} (Total)	5.413	15.86	1.800	5.558	2.794	[mmol/kg_{H2O}]
Cl (Total)	202	202	202	202	500	[mmol/kg_{H2O}]
S^{VI} (Total)	0.2	0.2	0.2	$2.51 \cdot \times 10^{-6}$	0.4	[mmol/kg_{H2O}]
S^{-II} (Total)	$51.7 \cdot \times 10^{-9}$	$58.9 \cdot \times 10^{-9}$	$43.1 \cdot \times 10^{-9}$	0.2	$22.5 \cdot \times 10^{-9}$	[mmol/kg_{H2O}]
F (Total)	0.282	0.275	0.285	0.282	0.157	[mmol/kg_{H2O}]
Na (Total)	197.7	206.5	194.7	197.6	460.6	[mmol/kg_{H2O}]
K (Total)	2.338	2.420	2.306	2.337	5.155	[mmol/kg_{H2O}]
Ca (Total)	2.273	2.512	2.182	2.267	11.15	[mmol/kg_{H2O}]
Mg (Total)	1.320	1.459	1.268	1.316	6.843	[mmol/kg_{H2O}]
Sr (Total)	0.162	0.180	0.155	0.161	0.780	[mmol/kg_{H2O}]
Si (Total)	0.178	0.177	0.180	0.178	0.174	[mmol/kg_{H2O}]
Fe^{II} (Total)	0.0110	0.0140	0.0100	$0.549 \cdot \times 10^{-12}$	0.0546	[mmol/kg_{H2O}]
Fe^{III} (Total)	$0.918 \cdot \times 10^{-9}$	$0.204 \cdot \times 10^{-9}$	$6.14 \cdot \times 10^{-9}$	$1.61 \cdot \times 10^{-21}$	$1.637 \cdot \times 10^{-9}$	[mmol/kg_{H2O}]
SO_4/Cl	0.001	0.001	0.001	0	0.0008	[mmol/kg_{H2O}]
Ca/Mg	1.72	1.72	1.72	1.72	1.63	[mmol/kg_{H2O}]
SI (Dolomit)	-0.10	-0.10	-0.11	-0.10	-0.08	
SI (Gips)	-2.94	-2.92	-2.95	-7.85	-2.17	
SI (Cölestin)	-2.04	-2.02	-2.04	-6.94	-1.26	
SI (Strontianit)	-0.36	-0.36	-0.36	-0.36	-0.36	

2.4.8 Mikrobielle Aktivität

Die mikrobielle Aktivität ist in Tongesteinen wegen zu kleiner Porenmeist sehr niedrig. Auch wenn grössere Poren und Klüfte vorhanden sind, ist die Aktivität wegen der bezüglich der Nährstoffe kargen Umgebung meist sehr klein. Die Porenwasserzusammensetzung ist allerdings durch die mikrobielle Katalyse chemischer, insbesondere Redoxreaktionen beeinflusst, welche zumindest vor der Versenkung und Kompaktion der Tongesteine wirksam war. Mikroorganismen können die Sorption zwar grundsätzlich beeinflussen, wegen der oben erwähnten geringen Aktivität ist dieser Einfluss aber minimal und deshalb für die Quantifizierung der Sorption nicht relevant.

Die Nagra ist seit 2003 am "Microbial activity"-Experiment (MA) im Felslabor Mont Terri beteiligt. Dabei wurde der ungestörte Opalinuston auf Mikroorganismen untersucht (Stroes-Gascoyne et al. 2007) und bei Experimenten auftretende Mikroorganismen wurden charakterisiert (Stroes-Gascoyne et al. 2011). Es konnte dabei gezeigt werden, dass Mikroorganismen aus dem Opalinuston sich zwar kultivieren lassen, es aber aufgrund des kleinen Porenraumes, des limitierten Angebots an Nährstoffen und Wasser zu keiner mikrobiellen Aktivität im ungestörten Opalinuston kommt. Wird das Gestein zum Beispiel durch eine Bohrung gestört und wird dem Porenwasser Nährstoffe zugegeben, werden Mikroorganismen aktiv und können, wie Stroes-Gascoyne (2011) zeigen konnte, das im Porenwasser natürlich vorhandene Sulfat zu Sulfid reduziert, was einen etwas niedrigeren pH im Porenwasser zur Folge hat (z.B. Wersin et al. 2011). In Tiefbohrungen lassen sich ungestörte mikrobielle Verhältnisse wegen zahlreicher Kontaminationsquellen nicht untersuchen.

2.4.9 Kolloidfiltration

Aufgrund der geringen Porengrössen der tonigen Gesteine ist die Filtration von Kolloiden sehr effizient (vgl. Voegelin & Kretzschmar 2002). Angaben zur Porengrössenverteilung liegen aus allen Wirtgesteinen vor (Kap. 2.3). Für die Wirtgesteine (*sensu stricto*), welche Sprödstrukturen mit möglicherweise reduzierter Kolloidfiltration enthalten (Effinger Schichten, Helvetische Mergel), werden in der Sicherheitsanalyse entsprechende alternative Fälle untersucht. Aus Tiefbohrungen können keine Angaben zur Kolloidfiltration in Sprödstrukturen gewonnen werden.

2.5 Hydraulische Eigenschaften

2.5.1 Hydraulische In situ-Tests in den Wirtgesteinseinheiten, Laboruntersuchungen an Bohrkernen und hydrogeologische Beobachtungen in Untertagebauten

2.5.1.1 Datenbasis und Methodik

Zur grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit der verschiedenen Wirtgesteine und zur Transmissivität von präferenziellen Fliesspfaden liegen von allen vier Wirtgesteinen quantitative Daten aus Tests innerhalb und ausserhalb der geologischen Standortgebiete und aus verschiedenen Tiefenbereichen vor, wobei die Anzahl der Tests in den verschiedenen Wirtgesteinen unterschiedlich ist (siehe wirtgesteinsspezifische Unterkapitel). Hinzu kommen hydrogeologische Beobachtungen in Untertagebauten, welche in erster Linie semiquantitative Hinweise zur Wasserführung sowie Informationen über die Art der Wasserführung geben; letztere Aspekte sind in Kap. 2.6 diskutiert.

In einem lithologisch relativ homogen aufgebauten Wirtgestein wie dem Opalinuston sind die Bandbreiten der Ungewissheiten erfahrungsgemäss gering, bei den lithologisch inhomogenen Gesteinsabfolgen mit Einschaltungen von potenziell wasserführenden sandig-kalkigen und kalkigen lithofaziellen Einheiten ('Brauner Dogger', Effinger Schichten, Helvetische Mergel) sind sie bedeutend grösser.

Laboruntersuchungen an Bohrkernen zeigen, dass die Gesteinsmatrix der vier in SGT Etappe 1 vorgeschlagenen tonigen Wirtgesteine durchwegs sehr gering durchlässig ist (s. unten). Auch in den sandig-kalkigen und kalkigen lithofaziellen Einheiten (sog. "harte Bänke") ist die ungestörte Gesteinsmatrix aufgrund einer pervasiven diagenetischen Zementierung immer sehr gering durchlässig. Eine gegenüber der ungestörten Gesteinsmatrix erhöhte Durchlässigkeit ist immer durch diskrete strukturelle Elemente (Klüfte, Störungen) bedingt (Kap. 2.7). Die aus Packertests ermittelten hydraulischen Durchlässigkeiten sind Mittelwerte der Testintervalle, welche oft einen bis mehrere Dekameter umfassen. Aus methodischen Gründen liefern Packertests in Bohrungen in ungestörten Teststrecken nur hydraulische Durchlässigkeiten parallel zur Schichtung. Werte senkrecht zur Schichtung liegen nur aus Labortests an Bohrkernen vor.

Wegen bohrtechnischen Einschränkungen in tonreichen Gesteinen und methodischen Einschränkungen im sehr gering durchlässigen Bereich wurden nur in Ausnahmefällen sogenannte Fluid-Logs gefahren, mit welchen diskrete Wasserzuflüsse lokalisiert werden können. Das bedeutet, dass – von wenige Ausnahmen abgesehen – keine Hinweise vorliegen, welche strukturellen Elemente innerhalb eines Testintervalls das Testergebnis massgeblich bestimmt haben; die verschiedenen Möglichkeiten werden jeweils diskutiert.

Maximale Transmissivitäten von Störungen ergeben sich, wenn der Transmissivitätswert eines hydraulischen Tests vollumfänglich einem einzigen transmissiven Element (Störung, Kluft) innerhalb des Testintervalls zugeordnet wird. Dies ist gerechtfertigt, wenn im betreffenden Testintervall beispielsweise aufgrund von Kernbeobachtungen oder eines Fluid-Loggings nur ein einziges potenziell transmissives Element in Frage kommt. Andernfalls führt die Zuordnung zu einem einzigen Element zu einer Überschätzung der Transmissivität. Weiter ist zu beachten, dass die Reichweite eines hydraulischen Tests bei einer Testdauer von wenigen Tagen bei Transmissivitäten im Bereich von 10^{-8} m^2/s maximal einige Dekameter, bei 10^{-9} m^2/s maximal einige Meter und bei 10^{-10} m^2/s weniger als 1 m beträgt (homogene Transmissivitätsverteilung, radiale Fliessgeometrie; De Marsily 1986). Falls die getesteten transmissiven Elemente ausserhalb der Testreichweite nicht vollständig mit Elementen gleicher oder höherer Transmissivität vernetzt sind, man aber trotzdem dem gesamten Transportpfad die gemessene Transmissivität zuordnet, werden die grösserräumigen Transmissivitäten tendenziell überschätzt.

2.5.1.2 Ergebnisse von Untersuchungen im Opalinuston

Hydraulische Packertests in Bohrungen

Für den Opalinuston liegt ein umfangreicher Datensatz aus hydraulischen Packertests in Bohrungen vor (Fig. 2.5-1, Tab. 2.5-1): Daten aus drei Nagra-Tiefbohrungen der Nordschweiz (Datenkompilation in Nagra 2010), aus zahlreichen Bohrungen im Felslabor Mont Terri (AFC 2012) sowie aus untiefen Bohrungen in der Schwäbischen Alb (Hekel 1994). Die hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons ist tiefenabhängig (Fig. 2.5-1). In Oberflächennähe kann sie aufgrund von Dekompaktionseffekten und Verwitterungsprozessen K-Werte bis 10^{-4} m/s aufweisen. Im Bereich von 10 bis 30 m Tiefe nimmt sie aber um mehrere Grössenordnungen ab. Diese Abnahme korreliert mit einer starken Zunahme des Chloridgehalts der Porenwässer (Hekel 1994, vgl. Figur 4.3-3 in Nagra 2008). Zwischen 50 und 250 m Tiefe gibt es keine Daten

aus hydraulischen Tests in Bohrungen. Der umfangreichste und zuverlässigste Datensatz stammt aus der Sondierbohrung Benken (Nagra 2002a, Beauheim 2013). Er zeigt konsistente, wenig streuende (horizontale) hydraulische Durchlässigkeiten, typischerweise von 2×10^{-14} bis 1×10^{-13} m/s. Im Opalinuston des Felslabors Mont Terri, der verglichen mit Benken eine höhere Porosität zeigt, sind die Durchlässigkeiten tendenziell etwas höher und erreichen Werte bis 6×10^{-12} m/s (Fig. 2.5-2).

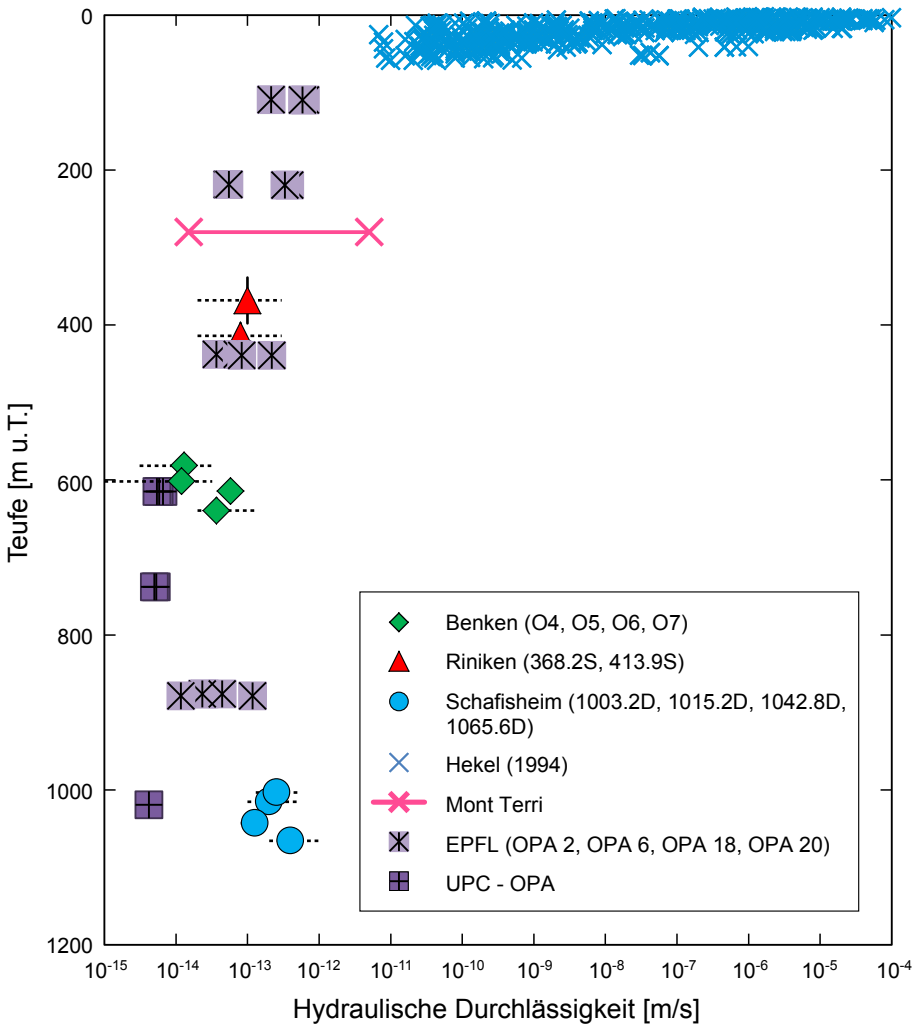


Fig. 2.5-1: Hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten).

Packertests: Werte parallel zur Schichtung, Laborexperimente (EPFL, UPC) an Bohrkernen: beide Richtungen. Herkunft der Daten siehe Tab. 2.5-2. Die äquivalente Tiefe der Labortests wurde aus der für die jeweiligen Tests repräsentativen mittleren Effektivspannung berechnet.

Tab. 2.5-1: Hydraulische Durchlässigkeiten des Opalinustons aus Packertests in den Bohrungen Benken, Riniken, Schafisheim und Weiach (nach Beauheim 2013): Bandbreiten und bester Schätzwert [BE].

n.b.: nicht bestimmt, GOK: Geländeoberkante.

Bohrung	**Test**	**Testintervall** [m]	**K** [m/s]		
			min	**BE**	**max**
Benken	D2-P1	548.78 – 564.51	n.b.	n.b.	3.2×10^{-12}
Benken	O3	544.60 – 564.50	n.b.	n.b.	2.5×10^{-12}
Benken	O4	566.46 – 596.51	3.1×10^{-15}	1.3×10^{-14}	3.1×10^{-14}
Benken	O5	600.07 – 603.45	1.0×10^{-15}	1.2×10^{-14}	3.2×10^{-14}
Benken	O6	605.14 – 623.61	4.4×10^{-14}	5.8×10^{-14}	6.5×10^{-14}
Benken	O7	623.72 – 655.70	2.0×10^{-14}	1.3×10^{-13}	1.4×10^{-13}
Riniken	368.2S	338.65 – 397.70	2.0×10^{-14}	1.0×10^{-13}	3.0×10^{-13}
Riniken	413.9S	397.70 – 430.10	2.0×10^{-14}	8.0×10^{-14}	3.0×10^{-13}
Schafisheim	1015.2D	1001.30 – 1029.16	1.0×10^{-13}	2.0×10^{-13}	5.0×10^{-13}
Schafisheim	1065.6D	1051.70 – 1079.56	2.0×10^{-13}	4.0×10^{-13}	1.0×10^{-12}
Schafisheim	1003.2D	989.30 – 1017.16	1.3×10^{-13}	n.b.	5.0×10^{-13}
Schafisheim	1042.8D	1028.88 – 1056.74	8.0×10^{-14}	n.b.	2.0×10^{-13}
GOK Benken: 404.3 m ü.M. GOK Riniken: 385.07 m ü.M. GOK Schafisheim: 421.20 m ü.M.					

In den zahlreichen Tests im Felslabor Mont Terri wurden keine Unterschiede zwischen toniger und sandiger Fazies festgestellt (Fig. 2.5-2). In der Bohrung Benken zeigt der Test O4 im Bereich der sandigsten Fazies den niedrigsten K-Wert aller Tests im Opalinuston (Figur 4.6-1 in Nagra 2002a).

In vielen Bohrungen im Felslabor Mont Terri sowie in Tiefbohrungen der Nordschweiz (Benken, Riniken, Schafisheim) wurden auch Intervalle mit kleinen und grösseren Störungen sowie Störungszonen getestet. Die K-Werte dieser Intervalle unterscheiden sich nicht signifikant von denjenigen von ungestörten Abschnitten (Tabelle 4.3-3 in Nagra 2010).

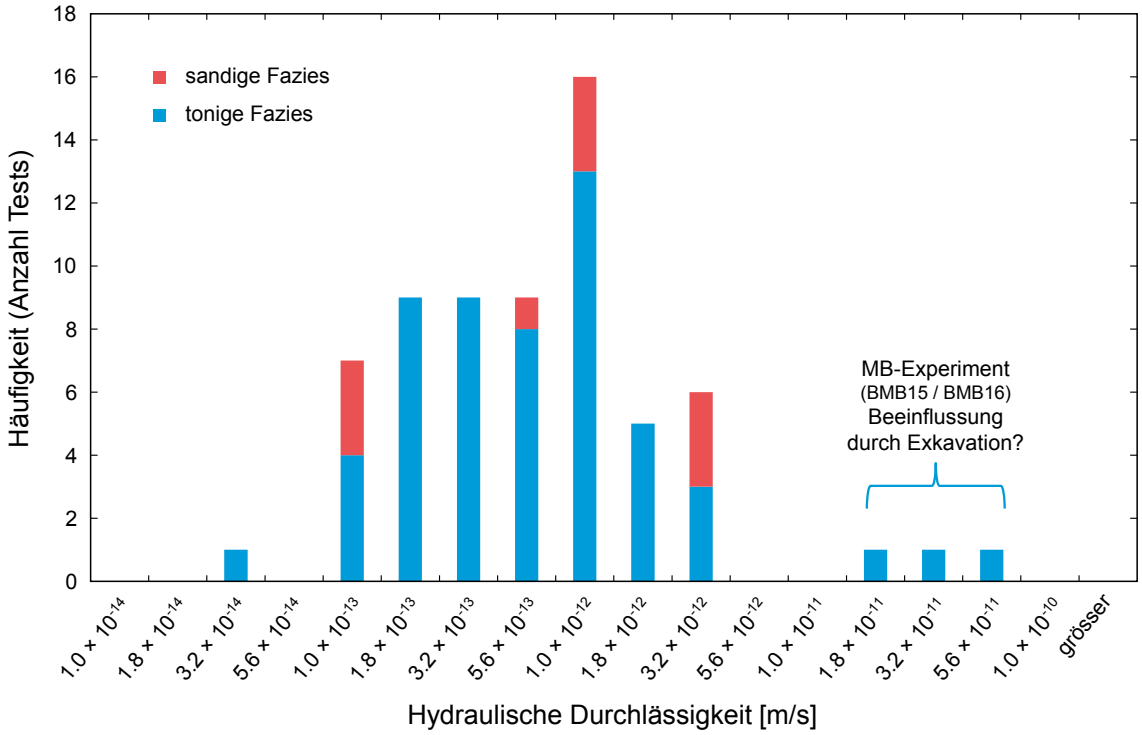


Fig. 2.5-2: Hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons im Felslabor Mont Terri (Datensatz extrahiert aus AFC 2012).

Es besteht eine Ungewissheit, ob die höchsten Werte auf einen Einfluss der Spannungsumlagerungen im Umfeld der Untertagebauwerke zurückzuführen sind. Werte für sandige und tonige Fazies zeigen keine systematischen Unterschiede.

MB: Mine-by Experiment im Felslabor Mont Terri.

Hydraulische Laboruntersuchungen an Bohrkernen

Im Rahmen früherer Laborprogramme (Entsorgungsnachweis Opalinuston) sind erste Permeametertests an Opalinustonproben aus Benken und Mont Terri durchgeführt worden (Nagra 2002a). Die Proben aus Benken ergaben K-Werte zwischen 3.0×10^{-14} und 6.0×10^{-14} m/s parallel zur Schichtung und zwischen 0.6×10^{-14} und 3.0×10^{-14} m/s senkrecht zur Schichtung. Die Bohrkerne aus dem Felslabor Mont Terri zeigten Durchlässigkeiten zwischen 6.0×10^{-14} und 12×10^{-14} m/s senkrecht zur Schichtung (Tab. 2.5-2).

Für SGT Etappe 2 führten Ferrari et al. (2013) sowie Romero & Gómez (2013) umfangreiche geotechnische Untersuchungen an vier Kernproben aus dem Opalinuston der Geothermiebohrung Schlattingen-1 durch (vgl. auch Dossier IV). In einer Hochdruck-Ödometerzelle wurde anhand von Konsolidierungstests die Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit und der Porosität von der mittleren Effektivspannung ermittelt (Tab. 2.5-2). Romero & Gómez (2013) führten in einer Triaxialzelle hydraulische Tests und Gastests an einer weiteren Kernprobe aus Schlattingen-1 durch (UPC-OPA), um Kompressibilität, hydraulische Durchlässigkeit und Gastransporteigenschaften des Opalinustons parallel und senkrecht zur Schichtung zu charakterisieren. Im Unterschied zu Ferrari et al. (2013) wurde die Durchlässigkeit unter isotroper Totalspannung in einem mehrstufigen Permeametertest mit konstanter Fliessrate gemessen. Für alle Tests zeigt sich eine markante Verringerung von Porosität und hydraulischer Durchlässigkeit mit zunehmender Effektivspannung. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen decken sich mit den in Fig. 2.5-1 gezeigten Tiefenprofilen der hydraulischen Packertests.

Eine Kompilation von Anisotropiekoeffizienten der hydraulischen Durchlässigkeit wurde im Rahmen einer laufenden PhD-Arbeit erarbeitet (V. Favero, EPFL). Die gemessenen Werte variieren zwischen 3 und 5 für die Kernproben aus dem Felslabor Mont Terri und Werten von 1 bis 2 für die weniger überkonsolidierte Probe aus der Bohrung Schlattingen-1. Zwischen den K-Werten des Opalinustons und des 'Braunen Doggers' kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Tab. 2.5-2: Zusammenstellung von hydraulischen Untersuchungen an Kernproben aus dem Opalinuston.

Bohrung / Referenz	**Test-methode**	**Mineralogie** [Gew.-%]	**Porosität** [%]	**Kern ID**	**Tiefe** [m]	**K** [m/s]	
Schlattingen-1 / Ferrari et al. (2012)	Ödometer-tests	Ton [1]: 68 % Quarz [1]: 17 % Karb. [1]: 11 %	11.4 – 13.6	OPA 2	838.12	$9.36 \times 10^{-15} – 5.24 \times 10^{-14}$	
		Ton [1]: 50 % Quarz [1]: 25 % Karb. [1]: 21 %	8.1 – 9.7	OPA 6	882.35	$1.35 \times 10^{-14} – 6.47 \times 10^{-13}$	
		Ton [1]: 45 % Quarz [1]: 32 % Karb. [1]: 14 %	9.7 – 11.9	OPA 20	854.71	$5.84 \times 10^{-15} – 2.16 \times 10^{-13}$	
		Clay [1]: 50 % Quarz [1]: 28 % Karb. [1]: 15 %	8.6 – 10.6	OPA 18	891.13	$2.74 \times 10^{-15} – 5.88 \times 10^{-13}$	
Schlattingen-1 / Romero & Gómez (2013)	Permeameter-tests (isostatisch)	Ton [1]: 55 % Quarz [1]: 26 % Karb. [1]: 17 %	5.5 – 7.6	OED / UPC-OPA	879.79	$4.26 \times 10^{-15} – 6.70 \times 10^{-15}$	
Benken / Horseman & Harrington (2002)	Permeameter-tests (isostatisch)	n.b.	n.b.	OPA 1	606.35	$7.2 \times 10^{-15} – 7.4 \times 10^{-15}$ [3]	$8.4 \times 10^{-14} – 9.4 \times 10^{-14}$ [4]
		n.b.	n.b.	OPA 2	606.35	$1.1 \times 10^{-15} – 2.9 \times 10^{-14}$ [3]	$1.4 \times 10^{-14} – 4.1 \times 10^{-14}$ [4]
Mont Terri / Marschall et al. (2003)	Permeameter-tests	n.b.	n.b.	SED-B3 06		2.2×10^{-11} [2]	
		n.b.	n.b.	BFP-16		$1.5 \times 10^{-13} – 1.8 \times 10^{-13}$	
		n.b.	n.b.	BWS-E4 06		$1.9 \times 10^{-13} – 2.1 \times 10^{-13}$	
		n.b.	n.b.	BED-C5/7		1.9×10^{-13}	
		n.b.	n.b.	SHGN		$6.0 \times 10^{-14} – 1.2 \times 10^{-13}$ [3]	

[1] Werte aus der Mineralogie-Datenbank der Uni Bern (Mazurek 2011)

[2] Gestörte Kernprobe?

[3] K-Wert senkrecht zur Schichtung

[4] K-Wert parallel zur Schichtung

n.b.: nicht bestimmt

Hydrogeologische Beobachtungen in Untertagebauten

Hydrogeologische Beobachtungen in Tunneln[11] zeigen bei weniger als 200 m Überlagerung in seltenen Fällen kleine Wasserzutritte, die in der Regel an Störungen gebunden sind (Gautschi 2001). Dort, wo Angaben vorliegen, handelt es sich um saline Wässer. Die einzigen Hinweise auf eine lokalisierte Wasserführung im Opalinuston bei einer Überdeckung von > 200 m sind die *Wet spots* im Felslabor Mont Terri (Kap. 2.7.1.3). Deren Lokalisierung lässt keinen Zusammenhang mit Mineralogie, Lithologie oder Fazies des Opalinustons erkennen und nur teilweise konnte ein Zusammenhang mit Sprödstrukturen festgestellt werden. Die geringe Transmissivität der Störungen wird auf das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons zurückgeführt (Kap. 2.5.2).

Die starke entlastungsbedingte Erhöhung der Durchlässigkeit des Opalinustons in Oberflächennähe (Hekel 1994) und die hydrogeologischen Beobachtungen in Untertagebauten hatten in SGT Etappe 1 dazu geführt, dass eine Mindestanforderung an die Tiefenlage der Obergrenze des Opalinustons von 200 m festgelegt wurde.

2.5.1.3 Ergebnisse von Untersuchungen im 'Braunen Dogger'

Hydraulische Packertests in Bohrungen

In der allgemein tonreichen Wirtgesteinseinheit 'Brauner Dogger' ist die hydraulische Datenbasis deutlich kleiner als in den anderen drei Wirtgesteinen. Sämtliche Tests stammen aus Tiefen unterhalb 450 m, d.h. es gibt keine hydraulischen Tests aus dem oberflächennahen potenziell dekompaktierten Bereich.

Hydraulische Tests aus dem 'Braunen Dogger' existieren aus den Bohrungen Weiach[12], Benken und Schlattingen-1 (Fig. 2.5-3), wobei nur in den Bohrungen Benken und Schlattingen-1 die gesamte Abfolge fast lückenlos getestet wurde (Beauheim 2013). Die Testintervalle waren mit 35 m (Schlattingen-1) bzw. 50 m (Benken) allerdings so gross, dass immer mehrere lithofazielle Einheiten gleichzeitig getestet wurden (Tab. 2.5-3). Deshalb können die stratigraphischen Untereinheiten des 'Braunen Doggers' bezüglich ihrer hydraulischen Eigenschaften – mit Ausnahme der Wedelsandstein-Formation – kaum differenziert werden. Falls die etwas erhöhten K-Werte der untersten Tests allein der Wedelsandstein-Formation zugeordnet werden, liegen die höchsten Werte bei 1×10^{-9} m/s (max. 2×10^{-9} m/s) in der Bohrung Schlattingen-1 (Beauheim 2013). Die K-Werte der übrigen Untereinheiten liegen im Bereich zwischen 10^{-14} und 5×10^{-11} m/s. Die Porenwässer im 'Braunen Dogger' sind in allen Bohrungen salin, mit Chloridgehalten im Bereich von 4 – 8 g/l (Meier & Mazurek 2011, Wersin et al. 2013a).

Ein weiterer Test aus einem stratigraphisch ähnlichen Abschnitt stammt aus der Erdöl-Explorationsbohrung Herdern-1, welche rund 12 km südöstlich der Bohrung Schlattingen-1 liegt. Der Test wurde in einem Äquivalent der Wedelsandstein-Formation, den sog. Dogger-β-Sandsteinen

---

[11] Die optische Erkennung von Zuflüssen in Tunneln hängt von verschiedenen Faktoren wie Ventilation, Luftfeuchtigkeit und lokalen hydraulischen Gradienten ab. Die Nachweisgrenze von diskreten Zuflüssen an Störungen in ventilierten Stollen dürfte im Bereich von $T = 10^{-9} – 10^{-10}$ m^2/s liegen (Eugster & Senger 1994), in wenig oder nicht ventilierten Bereichen (z.B. Stollenende) wären wahrscheinlich auch viel geringere Zuflüsse erkennbar.

[12] In Weiach wurde ein drill-stem Test in einem Intervall mit 12 m Murchisonae-Oolith-Fm. und rund 2 m Opalinuston durchgeführt. Es ist keine genaue Auswertung möglich, die hydraulische Durchlässigkeit liegt wahrscheinlich zwischen 10^{-14} und 10^{-12} m/s (Beauheim 2013).

in einer Tiefe von rund 1720 m durchgeführt und ergab eine hydraulische Durchlässigkeit von $K = 3 \times 10^{-11}$ m/s (min. / max. 5×10^{-12} / 1×10^{-10} m/s, Klemenz et al. 2000). Die Relevanz dieses Tests ist fraglich, weil die Fazies in Herdern-1 aufgrund der näheren Lage zur Küste bedeutend sandiger ist als im 'Braunen Dogger' der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost (Burkhalter et al. 1997).

Generell muss festgehalten werden, dass – vielleicht mit Ausnahme der Bohrung Schlattingen-1, in welcher der 'Braune Dogger' von extensionalen Strukturelementen durchsetzt ist (Albert et al. 2012) – im 'Braunen Dogger' keine grösseren Störungen durchfahren und getestet wurden. In der Bohrung Schlattingen-1 treten Störungen nur im tonreichen oberen Abschnitt (Parkinsoni- bis Varians-Schichten) auf, der sehr niedrige K-Werte zeigt. Die Wasserführung im unteren, durchlässigeren Bereich ist demzufolge an kleine, unspektakuläre Strukturelemente gebunden (Tabelle 3.4-1 in Albert et al. 2012, vgl. auch Kap. 2.7.2). Die Bohrung Schlattingen-1 liegt in der Randzone des Hegau-Bodensee-Grabens. Dieses tektonische Regime wurde in SGT Etappe 1 als 'konzeptionell zu meidende tektonische Zone' eingestuft und kam für die Platzierung eines geologischen Tiefenlagers nicht in Betracht.

Bezüglich einer dekompaktionsbedingten Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit in der Nähe der Erdoberfläche wird davon ausgegangen, dass die tonreichen Abfolgen (Parkinsoni-Württembergica-Schichten) ein ähnliches Verhalten zeigen wie der Opalinuston. Für die kalkig-sandigen lithofaziellen Elemente muss damit gerechnet werden, dass sich die Dekompaktion aufgrund eines spröderen Verhaltens dieser Lagen bis in grössere Tiefen auswirkt als im Opalinuston und etwa vergleichbar ist mit derjenigen in den Effinger Schichten (Kap. 2.5.1.4).

Tab. 2.5-3: Hydraulische Durchlässigkeiten des 'Braunen Doggers' aus Packertests in den Bohrungen Benken und Schlattingen-1 (nach Beauheim 2013): Bandbreiten und bester Schätzwert [BE].

Bohrung	**Test**	**Testintervall** [m]	**K** [m/s]		
			min	**BE**	**max**
Benken	MD1	446.27 – 497.57	1.9×10^{-14}	1.6×10^{-13}	3.9×10^{-13}
Benken	D2	496.27 – 547.57	1.9×10^{-14}	1.6×10^{-13}	3.9×10^{-13}
Schlattingen-1	BD3	727.00 – 762.92	3.0×10^{-14}	6.0×10^{-14}	2.0×10^{-13}
Schlattingen-1	BD2	762.00 – 797.92	1.3×10^{-11}	1.3×10^{-11}	4.1×10^{-11}
Schlattingen-1	BD1	799.25 – 833.50	3.0×10^{-10}	1.0×10^{-09}	2.0×10^{-09}
GOK Benken: 404.3 m ü.M. GOK Schlattingen-1: 416.6 m ü.M.					

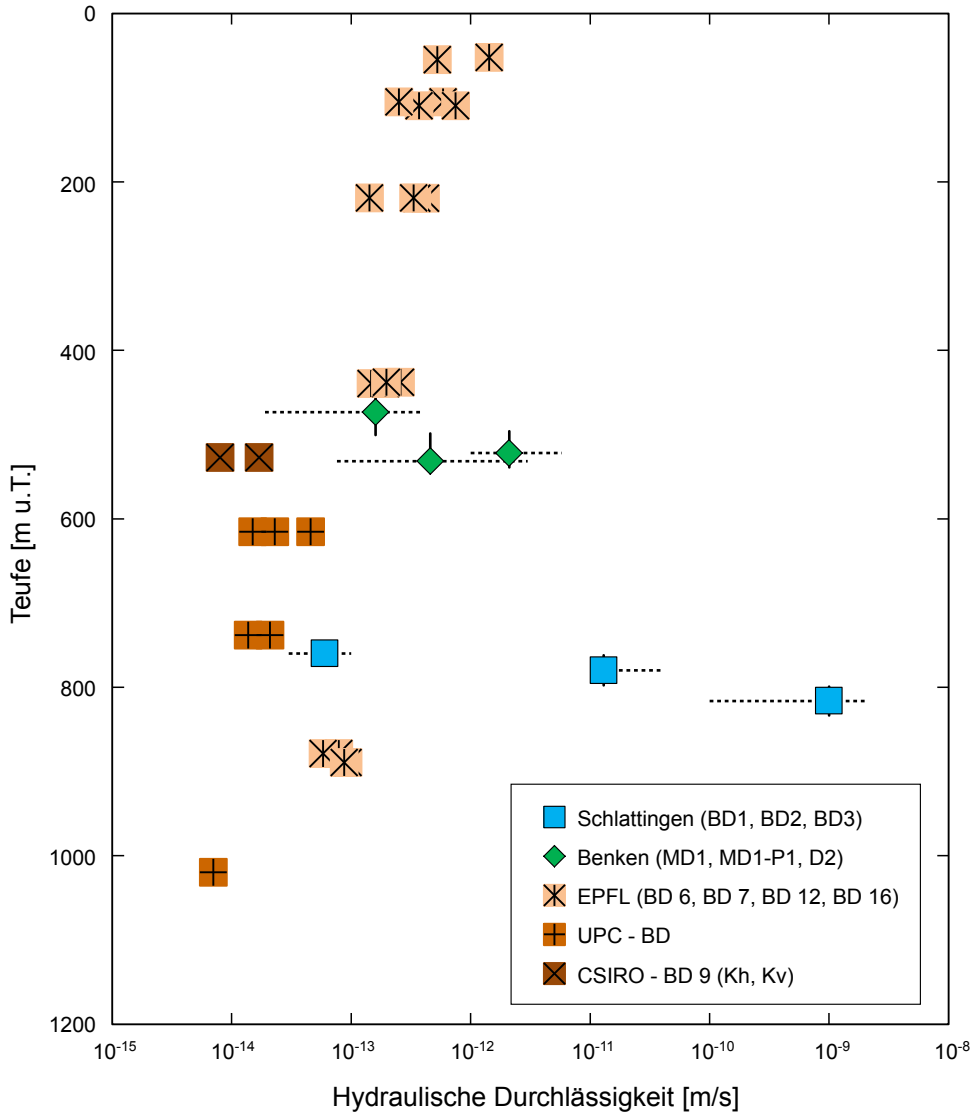


Fig. 2.5-3: Hydraulische Durchlässigkeit des 'Braunen Doggers' in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten).

Packertests: Werte parallel zur Schichtung, Laborexperimente an Bohrkernen (EPFL, UPC und CSIRO): beide Richtungen. Herkunft der Daten siehe Text.

Der hydraulische Test in 550 m Tiefe aus dem untersten Bereich des 'Braunen Doggers' der Bohrung Weiach ist wegen grosser Ungewissheiten nicht geplottet (10^{-14} – 10^{-12} m/s, kein bester Schätzwert möglich, Beauheim 2013).

Hydraulische Laboruntersuchungen an Bohrkernen

Hydraulische Laboruntersuchungen an Kernproben aus dem 'Braunen Dogger' führten Ferrari et al. (2013), Romero & Gómez (2013) und Sarout et al. (2013) mit Probenmaterial aus der Bohrung Schlattingen-1 durch (vgl. auch Dossier IV). Ferrari et al. (2013) bestimmten im Rahmen von Konsolidierungstests an vier Kernproben ödometrische Module, Porositäten und Durchlässigkeiten bei verschiedenen Effektivspannungen. An einer weiteren Probe (UPC-BD) charakterisierten Romero & Gómez (2013) in einer Triaxialzelle die hydraulische Durchlässigkeit und die Gastransporteigenschaften des 'Braunen Doggers'. Mit der verwendeten Triaxialzelle können Kompressibilität und hydraulische Durchlässigkeit bei verschiedenen Effektivspannungen gemessen werden. Zur Ermittlung der K-Werte wurden für verschiedene Effektivspannungen Durchflussmessungen mit stationären Fliessperioden durchgeführt. Sarout et al. (2013) verwendeten ein in der Öl- und Gasindustrie gebräuchliches Permeameter (*Membrane Efficiency Screening Equipment MESE*), um an einer Kernprobe aus dem 'Braunen Dogger' die hydraulische Durchlässigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung bei stationärer Durchströmung und definierten Spannungsbedingungen zu erfassen.

Die ermittelten K-Werte und Porositäten sowie die mineralogischen Hauptkomponenten der getesteten Kernproben sind in Tab. 2.5-4 zusammengefasst. Alle Ödometertests wurden senkrecht zur Schichtung durchgeführt, so dass auch die ermittelten K-Werte die Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung repräsentieren. Die Durchlässigkeiten zeigen eine klare Abhängigkeit von der vertikalen Effektivspannung. Die mit dem MESE-System ermittelten K-Werte zeigen ein Anisotropie-Verhältnis K_h / K_v von 2.1 an.

Tab. 2.5-4: Zusammenstellung von hydraulischen Untersuchungen an Kernproben aus dem 'Braunen Dogger'.

Bohrung / Referenz	**Test-methode**	**Mineralogie** [Gew.-%]	**Porosität** [Vol.-%]	**Kern ID**	**Tiefe** [m]	**K** [m/s]	
Schlattingen-1 / Ferrari et al. (2012)	Ödometer-tests	Ton [1]: 25 % Quarz [1]: 21 % Karb. [1]: 51 %	7.5 – 9.1	BD 6	766.84	5.8×10^{-15} – 1.4×10^{-12}	
		Ton [1]: 43 % Quarz [1]: 18 % Karb. [1]: 33 %	9.1 – 10.9	BD 7	781.33	3.7×10^{-13} – 6.5×10^{-15}	
		Ton [1]: 28 % Quarz [1]: 11 % Karb. [1]: 58 %	8.2 – 9.9	BD 12	778.41	6.8×10^{-15} – 5.3×10^{-13}	
		Ton [1]: 25 % Quarz [1]: 15 % Karb. [1]: 53 %	8.7 – 11.2	BD 16	769.70	1.4×10^{-14} – 2.5×10^{-13}	
Schlattingen-1 / Romero & Gómez (2013)	Triaxialtest (isostatisch)	Ton [1]: 25 % Quarz [1]: 21 % Karb. [1]: 51 %	8.2 – 10.2	OED 20	776.50	1.4×10^{-14} – 4.6×10^{-14}	
Schlattingen-1 / Esteban et al. (2013)	MESE Permea-meter	Ton [1]: 41 % Quarz [1]: 20 % Karb. [1]: 35 %	2.0 – 13.5	BD 9	772.76	8.0×10^{-15}	1.7×10^{-14}

[1] Werte aus der Mineralogie-Datenbank der Uni Bern (Mazurek 2011)

Hydrogeologische Beobachtungen in Untertagbauten

Im Verbreitungsgebiet des 'Braunen Doggers' existieren keine Untertagebauten.

2.5.1.4 Ergebnisse von Untersuchungen in den Effinger Schichten

Hydraulische Packertests in Bohrungen

Für die Effinger Schichten liegt ein umfangreicher Datensatz aus Packertests in den obersten 300 m vor (Laws & Deplazes 2007, Beauheim 2013), aus grösserer Tiefe existiert eine lückenlose Testsequenz aus der Bohrung Oftringen sowie ein Test in einem sehr gering mächtigen östlichen Ausläufer der Effinger Schichten in der Bohrung Benken (Beauheim 2013; Fig. 2.5-4 und Tab. 2.5-5). In einer Kompilation von Erdwärmesonden-Daten im Raum Aarau und Umgebung (Eberhard & Partner AG 2010) gibt es Hinweise auf diskrete Wasserzuflüsse bis 250 m Tiefe, wobei diese Information aufgrund der allgemeinen Erfahrung mit derartigen Informationsquellen[13] nur mit grösserem Vorbehalt verwendet werden kann.

Die hohen hydraulischen Durchlässigkeiten in den obersten 200 – 300 m sind durch Dekompaktions-, Verwitterungs- und Verkarstungseffekte bedingt. Dabei können sowohl Störungen, einzelne Verschiebungsflächen (Scherflächen) oder Klüfte wie auch Schichtfugen als Wasserwegsamkeiten wirken (Laws & Deplazes 2007, Mazurek 2013b; Kap. 2.7.3). In überkonsolidierten tonmineralreichen Gesteinen mit hoher Steifigkeit und Festigkeit wie den Effinger Schichten hängt die Transmissivität dieser Diskontinuitäten in grossem Mass von der In situ-Gebirgsspannung ab, was sich in einer Abnahme der Werte mit zunehmender Überlagerung äussert. Zusätzlich spielt die Versiegelung von potenziell wasserführenden Strukturen mit Calcit eine wichtige Rolle (Kap. 2.7.3).

Sämtliche heute bekannten hydraulischen Tests aus den Effinger Schichten aus Tiefen > 300 m zeigen horizontale hydraulische Durchlässigkeiten $\leq 1.0 \times 10^{-11}$ m/s (Fig. 2.5-4; Beauheim 2013), wobei nur aus der Bohrung Oftringen Tests aus Bereichen mit Störungen vorliegen, welche allerdings meistens (aber nicht immer) mit Calcit verheilt sind oder die Calcitadern sind durch eine spätere Reaktivierung der Störung wieder aufgebrochen (Kap. 2.7.3).

Unterhalb der oberflächennahen Dekompaktionszone sind durchwegs saline Porenwässer vorhanden (Mazurek et al. 2012; Kap. 2.8). Auch in Oberflächennähe gibt es Bereiche, in welchen noch saline Poren- und Grundwässer vorkommen, d.h. nicht durch schwächer mineralisierte meteorische Wässer verdrängt worden sind (Klump et al. 2008).

---

[13] Die Tiefen der Wasserzutritte stammen meistens aus Bohrmeister-Rapporten, beim Luftbohrverfahren findet zudem eine relativ starke Vermischung der Cuttings statt, was in einer ungenauen Lokalisierung der Kalkbankabfolgen resultiert.

Tab. 2.5-5: Hydraulische Durchlässigkeiten der Effinger Schichten aus Packertests in den Bohrungen Gösgen, Küttigen und Oftringen (nach Beauheim 2013): Bandbreiten und bester Schätzwert [BE].

n.b.: nicht bestimmt.

Bohrung	**Test**	**Testintervall** [m]	**K** [m/s]		
			min	**BE**	**max**
Gösgen	2	253.89 – 316.61	1×10^{-15}	1×10^{-14}	1×10^{-13}
Gösgen	3	191.17 – 253.89	1×10^{-15}	2×10^{-14}	3×10^{-13}
Gösgen	4	128.98 – 191.69	1×10^{-15}	2×10^{-14}	3×10^{-13}
Gösgen	5	75.79 – 138.50	1×10^{-15}	3×10^{-14}	8×10^{-13}
Gösgen	6	212.32 – 229.98	n.b.	n.b.	n.b.
Küttigen	1	209.84 – 249.99	n.b.	n.b.	n.b.
Küttigen	2	162.00 – 202.15	2×10^{-10}	8×10^{-10}	3×10^{-9}
Küttigen	3	121.93 – 162.08		$\sim 3 \times 10^{-13}$	
Küttigen	4	62.00 – 102.15	1×10^{-15}	1×10^{-14}	1×10^{-13}
Küttigen	5	37.00 – 77.15			$< 1 \times 10^{-13}$
Küttigen	6	163.00 – 169.12	1×10^{-9}	4×10^{-9}	2×10^{-8}
Oftringen	2	590.00 – 640.04	4×10^{-13}	1×10^{-12}	6×10^{-12}
Oftringen	3	550.00 – 600.04	8×10^{-13}	2×10^{-12}	4×10^{-12}
Oftringen	4	500.00 – 550.04	1×10^{-14}	4×10^{-14}	1×10^{-13}
Oftringen	5	449.85 – 499.89		$\sim 1 \times 10^{-14}$	
Oftringen	7	632.50 – 641.59	3×10^{-14}	6×10^{-14}	8×10^{-14}
Oftringen	8	621.50 – 630.59		$\sim 1 \times 10^{-14}$	
Oftringen	9	583.00 – 592.09	8×10^{-12}	9×10^{-12}	1×10^{-11}
GOK Gösgen: 380.75 m ü.M. GOK Küttigen: 374.20 m ü.M. GOK Oftringen: 433.00 m ü.M.					

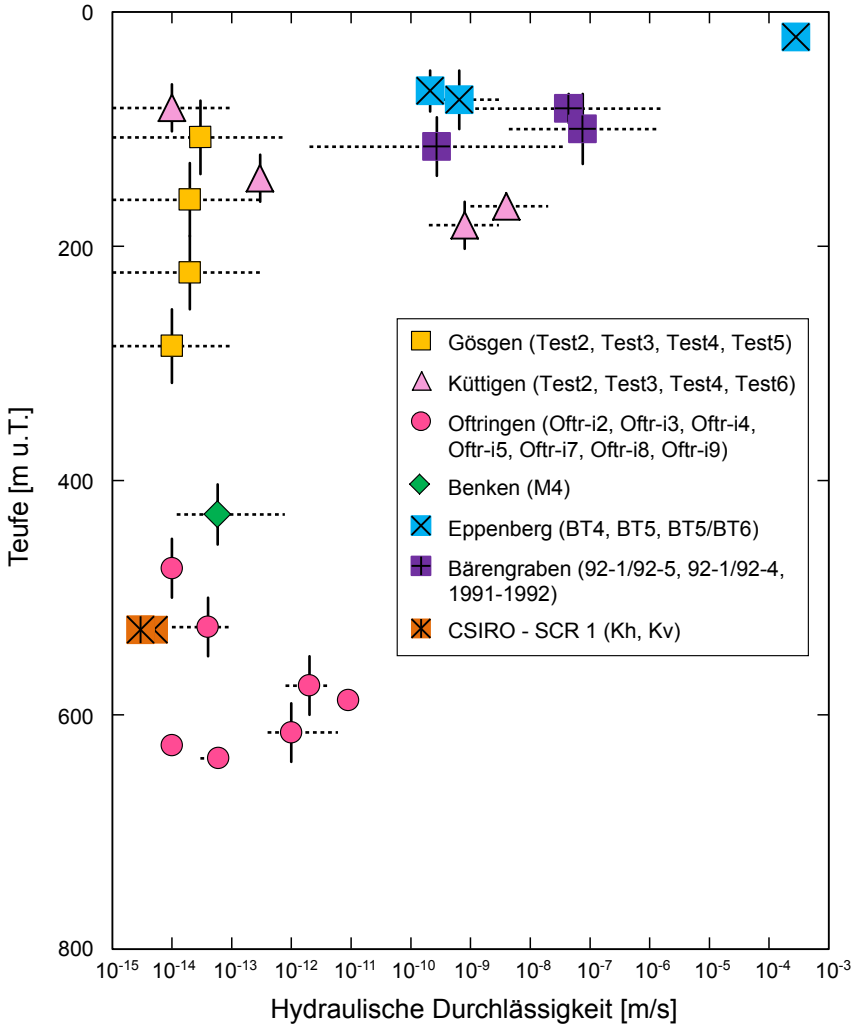


Fig. 2.5-4: Hydraulische Durchlässigkeit der Effinger Schichten in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten).

Packertests: Werte parallel zur Schichtung, Laborexperimente an Bohrkernen (CSIRO): beide Richtungen. Herkunft der Daten siehe Text.

Hydraulische Laboruntersuchungen an Bohrkernen

Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns (2008) führte felsmechanische Tests an 24 Kernproben aus den Effinger Schichten der Geothermiebohrung in Oftringen durch. Die geotechnische Charakterisierung umfasste Wassergehalt, Zugfestigkeit, seismische Geschwindigkeiten, Poisson-Verhältnis (dynamisch, statisch), Steifigkeit und Restfestigkeit. Darüber hinaus wurden insgesamt drei Durchlässigkeitsversuche in einer Triaxialzelle durchgeführt. Die Versuche wurden parallel und senkrecht zur Schichtung durchgeführt und ergaben sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit $< 10^{-14}$ m/s (Tab. 2.5-6).

Mazurek et al. (2012) führten Langzeit-Kerninfiltrationsexperimente an der Kernprobe 122.89 m aus den Effinger Schichten der Bohrung Gösgen KB5a und an der Kernprobe 444.50 m aus der Bohrung Oftringen durch. Beide Proben sind mineralogisch ähnlich mit mit einem Schichtsilikatgehalt von 20 Gew.-%, einem Quarzanteil von 10 res. 11 Gew.- % und einem Karbonatgehalt von 68 Gew.-%. Die Pyknometerporositäten liegen bei 9.0 resp.

6.6 Vol.-%. Die hydraulische Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung liegt in beiden Fällen bei rund 10^{-13} m/s oder tiefer.

Sarout et al. (2013) führten petrophysikalische Untersuchungen an Kernproben aus der Bohrung Schlattingen-1 durch. Die einzige getestete Probe SCR1 (748.22 bis 748.62 m u.T.) aus den Effinger Schichten wies einen sehr hohen Karbonatgehalt aus (Karbonat: 95 %). Am Bohrkern wurden mit dem MESE-Permeameter zwei Durchlässigkeitsversuche parallel und senkrecht zur Schichtung durchgeführt, die ebenfalls eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit von 3×10^{-15} m/s parallel zur Schichtung und 5×10^{-15} m/s senkrecht zur Schichtung ergaben (Tab. 2.5-6).

Tab. 2.5-6: Zusammenstellung von hydraulischen Untersuchungen an Kernproben aus den Effinger Schichten.

Bohrung / Referenz	**Testmethode**	**Mineralogie** [Gew.-%]	**Porosität** [Vol.-%]	**Kern ID**	**Tiefe** [m]	**K** [m/s]
Oftringen / Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns (2008)	Permeameter, Triaxialzelle	Ton [1]: 28 % Quarz [1]: 13 % Karb. [1]: 57 %	8.5	KM48-1_PP	~ 464	$< 1.0 \times 10^{-14}$
				KM46-2_S_PP	~ 459	$< 1.0 \times 10^{-14}$
				KM46-2_P_PP	~ 459	$< 1.0 \times 10^{-14}$
Gösgen / Mazurek et al. (2012)	Kerninfiltration	Ton: 20 % Quarz: 10 % Karb.: 68 %	9.0	GOS 122.89	122.9	1.3×10^{-13} K_v
Oftringen / Mazurek et al. (2012)	Kerninfiltration	Ton: 20 % Quarz: 11 % Karb.: 68 %	6.6	OFT 444.50	444.5	$< 10^{-13}$ K_v
Schlattingen-1 / Sarout et al. (2013)	MESE System	Ton [2]: 18 % Quarz [2]: 6 % Karb. [2]: 75 %	8.2 [2]	SCR 1	748.4	5.0×10^{-15} K_v 3.0×10^{-15} K_h

[1] Referenz-Probe: OFT 462.53 (Mazurek 2011)
[2] Referenzprobe: SLA 750.73 (Mazurek 2011)

Hydrogeologische Beobachtungen in Untertagebauten

Hydrogeologische Beobachtungen aus Untertagebauten im relevanten Tiefenbereich liegen ausschliesslich aus Tunnelstrecken im Faltenjura vor, wo die Schichten vorwiegend steil einfallen und die Gesteine einen relativ hohen Deformationsgrad aufweisen (Traber 2004). Bei einer Überlagerung der Tunnelstrecken von weniger als 300 m waren Wasserzuflüsse und Feuchtstellen sehr häufig, bei grösserer Überdeckung wurden aber auch vereinzelte Wasserzutritte beobachtet, vorzugsweise im stratigraphisch obersten und untersten Abschnitt der Effinger Schichten. Die Wasserzutritte aus den steilgestellten Effinger Schichten im Weissensteintunnel zeigen trotz einer Gesteinsüberdeckung von ca. 450 m sehr niedrige Chloridgehalte (ca. 20 mg/l) und hohe Sulfatgehalte bei relativ niedrigem Calciumgehalt (Traber 2004), was ein Hinweis auf rasche Grundwasserzirkulation in teilweise verkarsteten Fliesssystemen und oxi-

dierende Verhältnisse mit Pyritoxidation ist. Schwankungen in der Schüttung weisen zudem auf eine Kopplung mit Niederschlägen hin. Die Erfahrungen im Faltenjura können deshalb nicht auf Gebiete mit flach liegender Schichtung und flacherer Topographie übertragen werden.

Im Tafeljura wurden die Effinger Schichten nur sehr oberflächennah (Überdeckung knapp 100 m) mit dem Bözberg-Strassentunnel durchfahren. Die Angaben zur Wasserführung sind sehr spärlich (Hinweise auf Feuchtstellen an der Tübinginnenseite, Hartmann et al. 2013).

2.5.1.5 Ergebnisse von Untersuchungen in den Helvetischen Mergeln

Hydraulische Packertests in Bohrungen

Zahlreiche hydraulische Packertests und Fluid-Logging-Kampagnen in 7 Tiefbohrungen geben ein aufschlussreiches Gesamtbild der hydraulischen Verhältnisse in den Helvetischen Mergeln am Wellenberg (Nagra 1997, Lavanchy & Marschall 1997).

Die Mergel sind als geklüftetes Medium mit extrem gering durchlässiger Matrix zu betrachten. Die Wasserführung ist ausschliesslich an Strukturen der spröden Deformation und an spröd überprägte (reaktivierte) duktile Strukturen gebunden (Kap. 2.7.4). Rein duktile Strukturen (z.B. Überschiebungen) zeigen keine bevorzugte Wasserwegsamkeit. Innerhalb der kataklastischen Störungen und im System der drusigen Calcitadern in Kalkbankabfolgen ist ein ausgeprägtes *Channeling* des Wasserflusses vorhanden (Kap. 2.7.4).

Auf Basis zahlreicher Packertests wurden Transmissivitäten bestimmt und daraus hydraulische Durchlässigkeiten berechnet (Fig. 2.5-5).

Unterhalb eines 500 – 600 m mächtigen Bereichs mit erhöhten Durchlässigkeiten im Bereich von 10^{-10} – 10^{-7} m/s) liegen die Werte im Bereich von 10^{-13} bis 10^{-10} m/s. Die Intensität der Spröddeformation bzw. die Häufigkeit kataklastischer Scherzonen zeigt hingegen keine systematische Tiefenabhängigkeit (Nagra 1997). Daraus wird geschlossen, dass diese Strukturen erst durch die sinkende Auflast im Zuge der Hebung und Erosion erhöhte Durchlässigkeiten erhalten haben und unterhalb der Dekompaktionszone hydraulisch wenig bis gar nicht wirksam sind. Die beobachteten hydraulischen Unterdrücke (Nagra 1997, Vinard et al. 1993, 2001) belegen die grossräumig sehr geringe Durchlässigkeit in diesem Bereich.

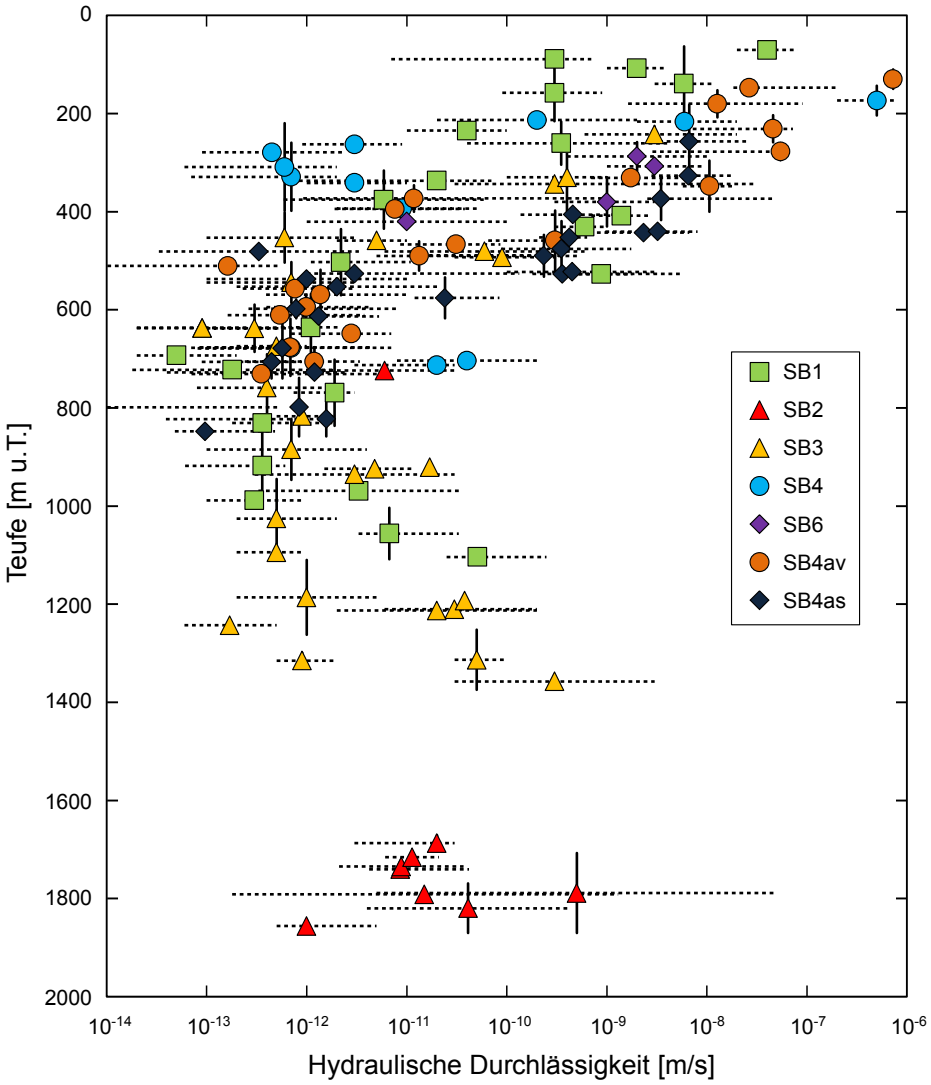


Fig. 2.5-5: Hydraulische Durchlässigkeit der Helvetischen Mergel in Abhängigkeit der Tiefe (wahrscheinlichste Werte und Bandbreiten).

Daten aus 7 Tiefbohrungen am Wellenberg. Die K-Werte sind im Wesentlichen durch Trennflächennetzwerke (Störungen, Klüfte) bestimmt.

Die Abschätzung der effektiven hydraulischen Durchlässigkeit, in welcher auch die unvollständige Vernetzung der wasserführenden Systeme berücksichtig wurde, erfolgte auf Basis von Kluftnetzwerk- (bzw. Trennflächennetzwerk-) Modellierungen (Fig. 2.5-6; Details s. Kapitel 7.4-4 in Nagra 1997). Unterhalb der Dekompaktionszone liegen die effektiven hydraulischen Durchlässigkeiten der modellierten Gesteinsblöcke im Bereich von 10^{-13} bis 10^{-11} m/s (Fig. 2.5-6), d.h. die höchsten in Fig. 2.5-5 abgebildeten einzelnen Messwerte sind aufgrund einer beschränkten Vernetzung nicht über den ganzen Fliesspfad wirksam.

Die Tiefenabhängigkeit der Durchlässigkeit äussert sich auch in der hydrochemischen Zusammensetzung der Grundwässer, mit schwach mineralisierten Ca-HCO_3- und Na-HCO_3-Wässeren im oberen durchlässigen Bereich und Na-Cl-Wässer im tieferen Bereich; dazwischen liegt eine Übergangszone (Details s. Dossier V, Kapitel 7.3).

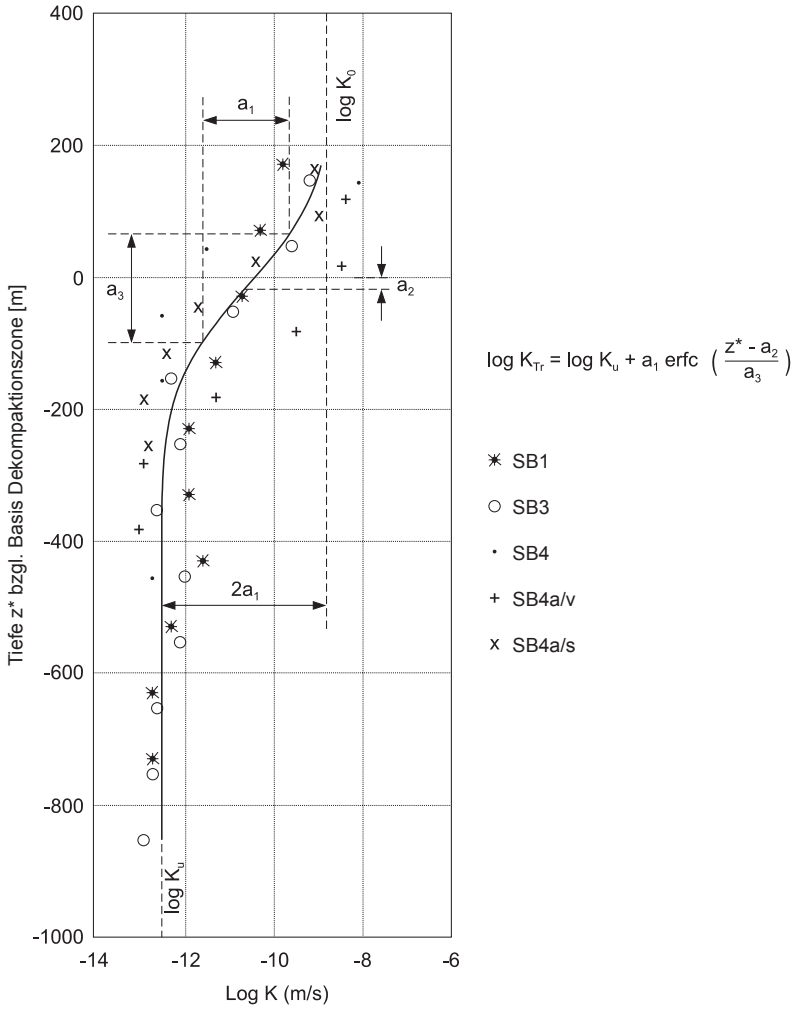


Fig. 2.5-6: Grösserräumige (effektive) hydraulische Durchlässigkeit der Helvetischen Mergel im Standortgebiet Wellenberg (Nagra 1997).

K-Werte für kubische Gesteinsblöcke mit 100 m Kantenlänge aus Kluftnetzwerkmodellen (Figur 7.4-3 in Nagra 1997). Detaillierte Angaben zur Kluftnetzwerk-Modellierung siehe Nagra (1997, Kapitel 7.4.4). Für diese Darstellung wurden die etwas höheren Werte aus der Bohrung SB2 wegen grösseren Ungewissheiten bei der Testauswertung nicht berücksichtigt.

Im früher untersuchten, später nicht mehr weiter verfolgten potenziellen Standortgebiet Oberbauenstock zeigen die wenigen hydraulischen Tests zum Teil deutlich höhere Transmissivitäten bei gleicher Überdeckung. Es ist aber unklar, inwieweit dort die Nähe zur steilen Talflanke eine Rolle spielt. In Zusammenhang mit der Interpretation der Tests wird auf eine möglicherweise beschränkte Vernetzung der durchlässigen Störungen hingewiesen (Nagra 1988).

Hydraulische Laboruntersuchungen an Bohrkernen

Es wurden keine hydraulischen Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus den Helvetischen Mergeln durchgeführt. In gestörten Bereichen mit Trennflächen ist eine Probenahme ohne signifikante Dekompaktionseffekte nicht möglich. Die ungestörte Gesteinsmatrix weist aufgrund der Versenkungsgeschichte und der starken diagenetischen Zementation durch Karbonat

sehr geringe Porositäten im Bereich weniger Vol.-% und demzufolge auch eine sehr geringe Durchlässigkeit auf. Eine Bestätigung dieser kleinen Werte durch hydraulische Laborversuche wurde als nicht notwendig erachtet.

Hydrogeologische Beobachtungen in Untertagebauwerken

In den Helvetischen Mergeln existieren zahlreiche hydrogeologische Beobachtungen aus Untertagebauwerken, wenn auch mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad.

Es gibt Hinweise, dass die dekompaktionsbedingte Auflockerung und Durchlässigkeitserhöhung nicht in allen Gebieten so tiefgreifend ausgebildet ist wie im Standortgebiet Wellenberg. So wurden Na-Cl-Grundwässer am Oberbauenstock und im Pilotstollen von Sachseln schon in weniger als hundert Meter Tiefe unter der Oberfläche angetroffen (Kapitel 6.3.10 in Nagra 1997). Diese salinen Grundwässer sind an ^{18}O angereichert und ihre $\delta^{2}H$- und $\delta\ ^{18}O$-Werte liegen praktisch auf derselben Geraden wie die Na-Cl-Grundwässer und die tiefen Porenwässer vom Wellenberg. Sowohl am Oberbauenstock als auch in Sachseln ist zudem dieselbe hydrochemische Zonierung von oberflächennahen Na-HCO_3- zu tiefen Na-Cl-Grundwässern zu beobachten.

Detaillierte Angaben zur Wasserführung der Helvetischen Mergel sind aus dem Seelisbergtunnel, dem Tunnel Engelberg sowie den Untertagebauwerken des Lötschberg-Basistunnels erhältlich.

Seelisbergtunnel (Schneider & Kappeler 1984)

Beim Bau des Seelisbergtunnels erwies sich das Wirtgestein in dem rund 2 km langen, damals als Valanginienmergel bezeichneten Abschnitt der Palfris-Formation *aus bergmännischer Sicht als weitgehend trocken bis höchstens bergfeucht*. In beiden Tunnelröhren waren mehrere hundert Meter lange vollständig trockene Abschnitte zu verzeichnen. Generell zeigte die seeseitige Röhre mehr Zufluss als die bergseitige Röhre, was vermutlich auf die geringere Gesteinsüberdeckung im Bereich der seeseitigen Röhre und damit in Zusammenhang stehende Dekompaktionseffekte zurückgeführt werden kann. Die Wasserzutritte sind auf lokal vorhandene, nicht vollständig verheilte Störungen[14], in denen vor allem der grobspätige Calcit in zerbrochenem Zustand eine gewisse Wasserwegsamkeit besitzen kann, beschränkt. Die statistische Auszählung ergab, dass nur 1 – 2 % aller Störungen eine eigentliche Wasserführung in Form von Tropfstellen oder Quellen und nur 14 % Anzeichen von Feuchtigkeit oder Nässe aufweisen. In der seeseitigen Röhre wurden insgesamt mehr Feucht- und Tropfstellen registriert als in der bergseitigen Röhre und in der seeseitigen Röhre wurde zudem auch eine kleinere Quelle mit einem Zufluss < 0.1 l/s registriert (Schneider & Kappeler 1984).

Tunnel Engelberg (Schneider, Kellerhals & Haefeli AG 2006)

In diesem Tunnel wird die Palfris-Formation bei einer Überdeckung von 300 – 400 m durchfahren. Durch die Nähe des Tunnels zur Talflanke des Engelberger Tals kann auch eine zusätzliche seitliche Entlastung des Untergrunds (Talklüftung) nicht ausgeschlossen werden. In der Palfris-Formation wurden zahlreiche Tropfstellen und kleinere fliessende Wasserzutritte kartiert, die Wasserzuflüsse in einzelnen Vorauserkundungsbohrungen stabilisierten sich nach anfänglich hohen Werten von bis zu 4 l/s auf 0.5 l/s. Die elektrischen Leitfähigkeiten liegen im

[14] Von Schneider & Kappeler (1984) oft als 'Ruschelzonen' bezeichnet.

Bereich zwischen 300 und 800 µS/cm, mit Chloridgehalten von 5 mg/l. Insgesamt ergibt sich ein Bild, das vergleichbar ist mit der oberen dekompaktierten Zone am Wellenberg mit erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten und gering mineralisierten Wässern.

Lötschberg-Basistunnel (Emch & Berger 2001/2012, Ziegler & Isler 2013)

Die Palfris-Formation der Drusberg-Decke ist im Bereich des Lötschberg-Basistunnels stark verschuppt. Die Gesteinsüberdeckung beträgt meist mehr als 700 m. Im Gegensatz zum Standortgebiet Wellenberg bildet die Palfris-Formation aber keinen bis an die Oberfläche reichenden Gesteinskörper, sondern wird von mächtigen Kieselkalk-Abfolgen und -Schuppen sowie anderen Einheiten überlagert.

In Emch & Berger (2001/2012) sind sämtliche Feucht- und Tropfstellen in der Palfris-Formation detailliert kartiert, auch solche, die sich erst nach Anbringen der Spritzbetonauskleidung entwickelt haben. Rund 50 % der kartierten Abschnitte in der Palfris-Formation haben keine sichtbaren Wasserzutritte im ventilierten Tunnel gezeigt. Quellzuflüsse wurden nur in einer Schuppe beobachtet. Aus den auf 14 Tunnelmetern verteilten Zuflüssen von insgesamt 12 l/min berechnen Emch & Berger eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von 4×10^{-8} m/s. Die übrigen Wasserzutritte sind sehr gering; die Summe aller Zuflüsse (Tropfstellen) betrug 2001 rund 0.1 l/min. Die in einer Palfris-Schuppe beobachteten hohen Zuflüsse lassen sich nach Emch & Berger tektonisch interpretieren. Die kartierten duktilen und später spröd reaktivierten Störungen verbinden verschiedene tektonische Einheiten (Wildhorn-Decke und Mélange) und daher auch verschiedene lithologische Formationen untereinander.

Die Wässer aus den Abschnitten der Palfris-Formation haben elektrische Leitfähigkeiten im Bereich von 300 – 900 µS/cm, sind also schwach mineralisiert. An einer Probe aus der Zone mit dem grössten Zufluss wurden neben der chemischen Zusammensetzung auch die Wasserisotope analysiert. Das Wasser wird als Mischung einer jüngeren Komponente und einer älteren Hauptkomponente vom Na-HCO_3-Typ interpretiert. Die Isotope weisen auf eine Infiltration unter heutigen klimatischen Bedingungen mit einer Infiltrationshöhe von 1300 – 1400 m hin. Die im Gegensatz zum Standortgebiet Wellenberg in vergleichbarer Tiefe viel jüngeren Wässer im Lötschberg-Basistunnel können durch die grosse Wasserwegsamkeit der geklüfteten kalkigen Formationen über den Palfris-Schuppen (v.a. Kieselkalk) erklärt werden.

Eine wichtige Beobachtung hinsichtlich Erfahrungen mit tertiären Mergeln und Schiefern, welche am Wellenberg ebenfalls zur Wirtgesteinseinheit gehören, ist ein starker Wasserzufluss von anfänglich 20 – 30 l/s aus einer Störungszone mitten in einer grösseren Schuppe von Globigerinenschiefern (Ziegler & Isler 2013). Detailliertere Informationen (schriftl. Mitt. Kellerhals & Haefeli AG, 12.08.2014) zeigen, dass der Zufluss in einer Vorausbohrung im Bereich der Hohgant-Schiefer (früher/andernorts auch als Schimberg-Schiefer bezeichnet) erfolgte. Der Zufluss nahm nach dem Anbohren rasch ab und fiel nach einer Woche weit unter 1 l/s. An der Zuflussstelle beträgt die Gesteinsüberdeckung rund 600 m. Diese Beobachtung muss bei der Bewertung des tertiären Anteils der Wirtgesteinseinheit am Wellenberg berücksichtigt werden.

2.5.2 Selbstabdichtung in Sedimentgesteinen

Die beobachtete oder potenzielle Wasserführung in den Wirtgesteinen hängt stets mit spröden Diskontinuitäten zusammen (s. Kap. 2.7). Die hydraulischen Eigenschaften von Brüchen und Störungen bzw. deren Vermögen zur Selbstabdichtung hängen u.a. vom Grad der Überkonsolidierung, vom Quelldruck und der Quellhebung (somit von der Mineralogie), der Plastizitätszahl

und von weiteren geomechanischen Eigenschaften ab (s. Dossier IV, Kapitel 5.4). Bock et al. (2010) haben die folgenden Prozesse identifiziert, welche bedeutend zur Selbstabdichtung in tonmineralreichen Formationen beitragen können:

- Mechanisches Schliessen infolge einer Erhöhung der effektiven Normalspannung auf der Bruchfläche oder infolge kontraktanter Scherdeformation bzw. zeitabhängiger Deformation ('Kriechen') im Nebengestein der Diskontinuität.
- Quellung und Desaggregation von Tonmineralen in der Diskontinuität und im Nebengestein. Hierzu zählt auch das sogenannte *Slaking,* bei dem durch Desintegration des Materials aus einer grösseren eine Vielzahl kleiner Diskontinuitäten entsteht, was zu einer Verschmierung und Homogenisierung führt.
- Verstopfen der Diskontinuität durch Sedimentation/Filtration von kolloidalen Phasen.
- Ausfällung von Mineralen in Diskontinuitäten.

2.5.2.1 Daten und Beobachtungen aus tonmineralreichen und tonmineralarmen Lithologien

Bock et al. (2010) haben eine Vielzahl von empirischen Daten und Beobachtungen bezüglich Selbstabdichtung in tonmineralreichen Lithologien zusammengetragen und die zugrunde liegenden Mechanismen diskutiert. Diese Evidenzen werden hier nicht im Detail wiederholt. Zahlreiche Laborexperimente sowie Daten aus Tiefbohrungen und aus Felslaboratorien im Opalinuston, dem Callovo-Oxfordien von Bure (Frankreich), dem Boom Clay von Mol (Belgien) und anderen tonmineralreichen Formationen zeigen, dass Selbstabdichtung in diesen Einheiten die Transmissivität von Sprödstrukturen reduziert, oft auf Werte, die von denjenigen der undeformierten Matrix nicht unterscheidbar sind. Dies ist der Fall für natürliche Strukturen wie auch diejenigen in der Auflockerungszone (EDZ, *Excavation Damaged Zone*).

Sowohl in den von der Nagra untersuchten Gesteinseinheiten in der Nordschweiz und am Wellenberg (Nagra 2009) wie auch in von der Ölindustrie untersuchten Formationen (z.B. Fisher & Knipe 2001, Jolley et al. 2007) lässt sich eine deutliche Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit mit zunehmendem Tonmineralgehalt feststellen. Aus Fig. 2.5-7 ergibt sich, dass die Selbstabdichtung in den Gesteinseinheiten, welche in den Sondierbohrungen der Nagra in der Nordschweiz und am Wellenberg untersucht wurden, ab Tonmineralgehalten > 40 % sehr effektiv ist[15]. In diese Gruppe gehören der Opalinuston (Tonmineralgehalt 59 ± 12 Gew.-%, s. Tab. 2.2-2) und die tonmineralreichen Abfolgen des 'Braunen Doggers' (43 ± 16 Gew.-% einschliesslich sandig-kalkiger Abfolgen). In mergelig-kalkigen Gesteinen wie den Effinger Schichten (22 ± 11 Gew.-%) oder den Helvetischen Mergeln (31 ± 14 Gew.-%) ist eine reduzierte Selbstabdichtung zu erwarten. Die starke Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit vom Tonmineralgehalt belegen auch zahlreiche Daten aus der Ölindustrie, auch wenn sich diese mehrheitlich auf grössere Tiefen beziehen. Fig. 2.5-8 zeigt ein Beispiel aus der Nordsee, kompiliert von Jolley et al. (2007).

In der Zusammenstellung hydraulischer Durchlässigkeiten verschiedener Gesteinstypen haben Appel & Habler (2002) für die Kategorie "Ton/Tonstein" bei einer Überdeckung von > 200 m stets Durchlässigkeiten < 3.3×10^{-11} m/s festgestellt (mit einer Ausnahme von 2.1×10^{-10} m/s auf 480 m). Für die Kategorie "Mergelstein", in welcher auch die Daten der Helvetischen

[15] In Fig. 2.5-7 sind nur Tests aus Bereichen unterhalb der Dekompaktionszone (> 200 m Tiefe für die Nordschweiz, > 600 m für die Helvetischen Mergel) dargestellt, in seichteren Bereichen sind höhere Durchlässigkeiten möglich.

Mergel am Wellenberg eingeschlossen sind, ist das Bild komplexer und es gibt auch in grosser Tiefe stark erhöhte Durchlässigkeiten. Während die grosse Mehrheit der K-Werte bei einer Überdeckung > 600 m unterhalb 1×10^{-10} m/s liegt, gibt es bis ca. 1000 m Tiefe auch hohe Einzelwerte. Die höchsten Werte (bis 1×10^{-7} m/s) stammen aus der Bohrung SB2 im Standortgebiet Wellenberg, allerdings nicht aus den Wirtgesteinen. Ausserdem muss in Bezug auf das Standortgebiet Wellenberg eingeschränkt werden, dass in diesen stark überkonsolidierten Gesteinen die Dekompaktionszone ca. 600 m mächtig ist und in diesem Bereich auch in den Wirtgesteinen erhöhte Werte zu beobachten sind (vgl. Kap. 2.5.1.5 und 2.7).

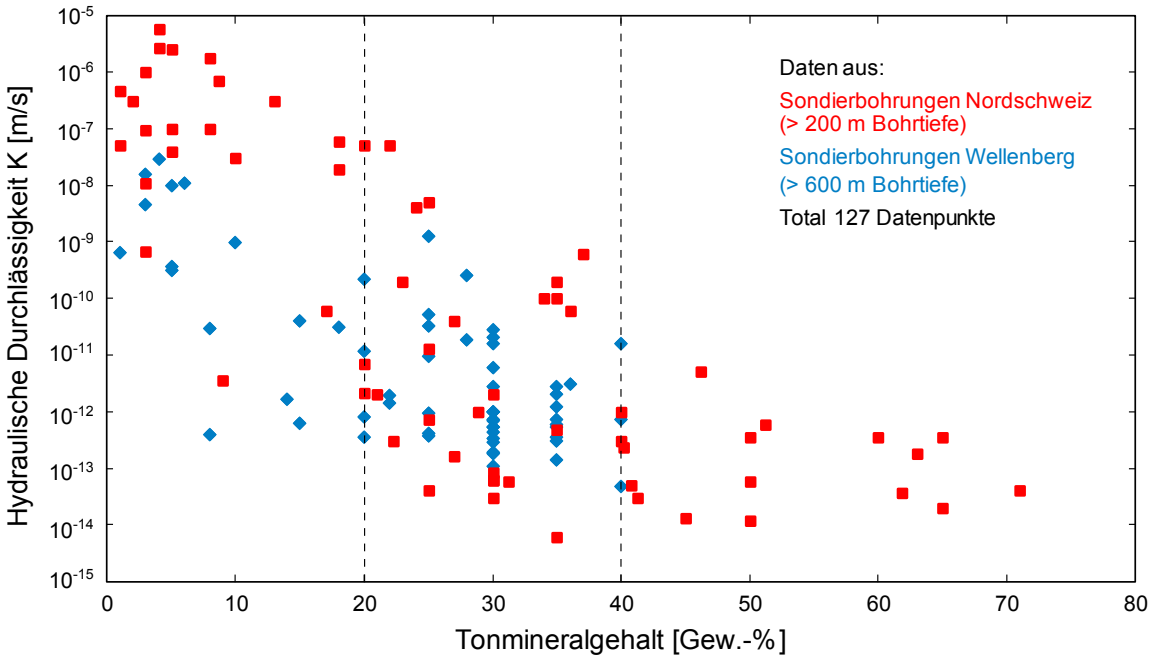


Fig. 2.5-7: Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit vom Tonmineralgehalt in Bohrungen der Nordschweiz und des Wellenbergs.

Nach Nagra (2009). Für Tonmineralgehalte > 40 % ist $K < 1 \times 10^{-11}$ m/s. Es sind nur Daten aus Packertests unterhalb der Dekompaktionszone (> 200 m Tiefe für die Nordschweiz, > 600 m für die Helvetischen Mergel) dargestellt. Tonmineralgehalte stellen Mittelwerte des für den K-Wert massgeblichen Intervalls im jeweiligen Packertest dar (z.B. Rinnensandstein in einem Test in der Unteren Süsswassermolasse).

Die gestrichelten vertikalen Linien grenzen die 3 Kategorien von lithofaziellen Einheiten mit unterschiedlichem Tonmineralgehalt resp. Selbstabdichtungsvermögen ab (Kap. 4.2).

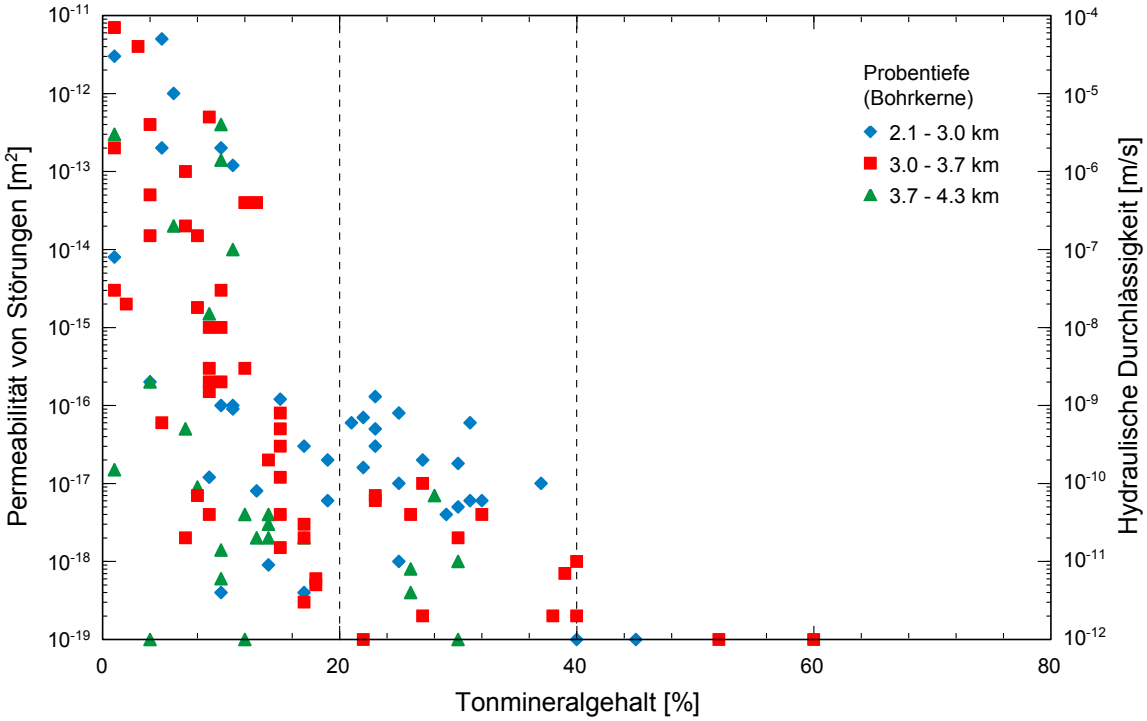


Fig. 2.5-8: Permeabilität von Störungen (*Fault rocks*) in verschiedenen Tiefenbereichen der Brent Province (Nordsee) als Funktion des Tonmineralgehalts (nach Jolley et al. 2007).

In Jolley et al. (2007) werden als Permeabilitätseinheiten mD verwendet, welche hier zu m^2 umgerechnet sind (1 mD = 10^{-15} m^2). Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Daten der Nordschweiz (Fig. 2.5-7) werden auf der rechten y-Achse berechnete hydraulische Durchlässigkeiten angegeben (eine Permeabilität von 10^{-15} m^2 entspricht bei 20 °C und geringer Salinität einer hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-8} m/s).

Die gestrichelten vertikalen Linien grenzen die 3 Kategorien von lithofaziellen Einheiten mit unterschiedlichem Tonmineralgehalt, resp. Selbstabdichtungsvermögen ab (Kap. 4.2)

In der Figur von Jolley et al. (2007) handelt es sich um volumetrische Anteile von Tonmineralen. Angesichts der ähnlichen Dichten von Tonmineralen und den anderen Hauptgemengteilen von Tonsteinen (Quarz, Calcit) sind diese Angaben nur unwesentlich verschieden von denjenigen in Gew.-%.

2.5.2.2 Paläo-Selbstabdichtung durch Aderbildung

Im Opalinuston des Felslabors Mont Terri sind Aderbildungen im Verhältnis zur oft starken Deformation des Gesteins selten und volumetrisch unbedeutend. Sie lassen sich als Produkt einer einzigen Mineralisierungsphase in Sprödstrukturen erklären, welche während der Jurafaltung aktiv waren (De Haller et al. 2014). Aufgrund isotopenhydrogeologischer Argumente wird die Mineralisierung als Mischung lokaler Porenwässer mit aus der Trias aufgestiegenen SO_4-reichen Wässern interpretiert. Geochemische Signaturen, welche auf Zirkulationen nach Abschluss der Jurafaltung hinweisen würden, fehlen auch in grösseren Strukturen wie dem *Main fault*, was auf Selbstabdichtung hinweist, die im Übrigen durch heutige Messungen der hydraulischen Durchlässigkeit bestätigt wird (Details in Bock et al. 2010).

In den Effinger Schichten der Bohrung Oftringen kommen aus Calcit und Cölestin bestehende Adern häufig vor (De Haller et al. 2011, Mazurek et al. 2012). Die Adermineralisationen unterscheiden sich in ihrer Isotopenzusammensetzung (z.B. $\delta^{18}O$ und $\delta^{13}C$ von Calcit, $^{87}Sr/^{86}Sr$ von Cölestin) deutlich von derjenigen des Nebengesteins und sind nicht Produkte ausschliesslich lokalen Stofftransports. Aufgrund isotopenhydrogeologischer Argumente haben De Haller et al. (2011) miozänes Meerwasser der Oberen Meeresmolasse als Herkunft der mineralisierten Wässer vorgeschlagen, welches entlang von Brüchen in die Effinger Schichten eingedrungen ist. Zu jener Zeit muss eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit bestanden haben, welche advektiven Transport in Sprödstrukturen erlaubt hat. Die tektonische Ursache der Bruchbildung und anschliessender Wasserzirkulation ist nicht restlos geklärt. Heute sind die Effinger Schichten von Oftringen hingegen sehr gering durchlässig (mit Ausnahme der mächtigen Kalkbank der Gerstenhübel-Schichten; s. Kap. 2.7), was auf Selbstabdichtung durch die Ausfällung von Adermaterial und/oder andere Prozesse hinweist.

In der Bohrung Schlattingen-1 ist der 'Braune Dogger' relativ aderreich, was in diesem Fall mit Bewegungen im nahen Hegau-Bodensee-Grabensystem in Zusammenhang gebracht wird (Wersin et al. 2013a). Bemerkenswerterweise weist der Opalinuston dieser Bohrung wesentlich weniger Adern auf.

Die obigen Fallbeispiele zeigen, dass jeweils eine Phase von Spröddeformation Fliesswege geschaffen hat, was anschliessend zu advektivem Transport geführt hat. Dabei haben über eine gewisse Zeit hydraulische Verbindungen mit Einheiten im Liegenden bzw. Hangenden der Wirtgesteinseinheiten bestanden. Als Folge dieses Transports wurden Adern ausgefällt, womit das System wieder abgedichtet wurde. In den Effinger Schichten von Oftringen und im 'Braunen Dogger' von Schlattingen wurden die verheilten Strukturen durch jüngere Bewegungen teilweise wieder reaktiviert und stellen heute potenzielle Fliesswege dar (s. Kap. 2.7). Im Opalinuston des Felslabors Mont Terri ist eine solche Reaktivierung nicht evident.

Selbstabdichtung durch Mineralausfällung in einem Ausmass wie in der Bohrung Oftringen ist in einer Tiefenlagersituation über den betrachteten Zeitmassstab (1 Million Jahre) sehr unwahrscheinlich, zumal keine tektonische Aktivität, die zu grösserräumigem Wasserfluss führen würde, zu erwarten ist.

2.5.2.3 Erfahrungen aus der Öl- und Erdgasindustrie

Fisher et al. (2013) haben Daten und Beobachtungen zur Selbstabdichtung aus der Öl- und Gasindustrie kompiliert. Obwohl diese sehr reichhaltig sind, bestehen Einschränkungen bei der Übertragbarkeit auf die Situation in den Wirtgesteinseinheiten:

- In der Öl- und Gasindustrie werden mehrheitlich tektonisch komplexe Gebiete untersucht. Die Wirtgesteinsformationen in den Standortgebieten der Nordschweiz (nicht aber diejenige im Standortgebiet Wellenberg) weisen nur geringe tektonische Einflüsse auf, und bei der Platzierung eines Tiefenlagers werden grössere Störungen nach Möglichkeit vermieden.
- Die Information aus der Ölindustrie bezieht sich vor allem auf grosse, auch seismisch kartierbare Störungen, welche eine Vielzahl von Lithologien durchschlagen. Die für die Exfiltrationspfade aus einem Tiefenlager potenziell relevanten Strukturen sind kleiner und betreffen zumindest im Fall von Opalinuston und 'Braunem Dogger' weitgehend tonreiche Lithologien. Am ehesten übertragbar sind Daten und Beobachtungen aus tonmineralreichen *Top seals*.

- Zumindest die als *Gas shales* bezeichneten Formationen, aus welchen vor allem in den USA Erdgas gewonnen wird, sind nach der Nomenklatur von Füchtbauer (s. Fig. 2.2-1) Mergel, Kalke und Sandsteine, aber nur zu einem sehr kleinen Teil Tonsteine. Zudem weisen sie infolge wesentlich grösserer Maximalversenkung kleinere Porositäten auf und reagieren bei Deformation spröder. Auch die Maximaltemperatur war meist höher, was wegen der fortgeschrittenen Illitisierung von Smektit zu einer Reduktion des Selbstabdichtungsvermögens führt.
- Die Daten aus der Ölindustrie stammen meist aus grösserer Tiefe als derjenigen eines geologischen Tiefenlagers.

Top seals und Überdrücke

- Die Tatsache, dass Öl und Gas über Jahrmillionen in Reservoirs mit tonreichen *Top seals* akkumuliert werden, kann als grossräumiges und langzeitliches Naturexperiment betrachtet werden, welches Informationen über die hydraulischen Eigenschaften der *Caprocks* liefert. Es ist aus zahlreichen Fallbeispielen belegt, dass durch tonreiche *Caprocks*, teilweise < 50 m mächtig und stark von Störungen durchsetzt, keine Migration von Öl und Gas stattgefunden hat. Dies zeigt, dass die Störungen zumindest für nicht benetzende Fluide nicht durchlässig waren.
- Überdrücke wurden u.a. beobachtet in Reservoirs unter stark gestörten tonreichen *Top seals*, was auf deren Abdichtungsfähigkeit über geologische Zeiträume hinweist.
- Es gibt auch Hinweise auf einen episodischen Verlust von Öl oder Gas durch *Top seals* (z.B. Ölspuren in Störungen, in der Seismik erkennbare *Gas chimneys*). Dies ist insbesondere der Fall, wenn Überdrücke zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Grenzwert überschreiten, der typischerweise im Bereich der kleinsten kompressiven Hauptspannung σ_3 liegt. Solche episodischen Verluste sind z.B. an Ölspuren in heute dichten Störungen nachweisbar.
- Die Wahrscheinlichkeit für episodische Flussereignisse (*Top seal leakage*) steigt mit der Überkonsolidierung.

Selbstabdichtung von Störungen

- Daten und Beobachtungen zur hydraulischen Relevanz von Störungen in siliziklastischen Abfolgen (Tonstein – Sandstein), wie sie in der Ölindustrie hauptsächlich untersucht werden, sind teilweise nicht schlüssig. Die Fähigkeit von Störungen in solchen lithologisch heterogenen Abfolgen, über geologische Zeiträume abdichtend zu wirken, ist daher umstritten und die Interpretation von Fallbeispielen ist oft mehrdeutig. Der häufigste Typ von Barriere ist die direkte seitliche Nebeneinanderstellung (*Juxtaposition*) eines Reservoirs mit einer gering permeablen Einheit. Es gibt zahlreiche Beispiele von Störungen in siliziklastischen Abfolgen, die über den Zeitraum der Ölförderung Fliesswege waren. Störungen in spröden Gesteinen (z.B. zementierte Sandsteine oder Karbonate) und/oder in stark überkonsolidierten Tonsteinen (Ton-/Mergelschiefer) sind am ehesten durchlässig.
- Störungen in spröden, karbonatzementierten Lithologien sind nicht abdichtend, weder in grösserer Tiefe noch auf Tiefenlagerniveau.
- In Bezug auf die hydraulischen Eigenschaften von Bruchfüllungen (Bruchbrekzien, *Fault gouges*) wurden verschiedene Konzepte erarbeitet (Übersicht in Giger et al. 2013, Çiftçi et al. 2013 und Yielding et al. 1997). Unter den wichtigsten Konzepten sind SSF (*Shale smear factor*) und SGR (*Shale gouge ratio*). Im Fall von SSF wird von einem Einschleppen und einer Ausdünnung diskreter tonmineralreicher Lagen im Bruch ausgegangen (*Clay smears*),

wobei die Lagen erst ab einem kritischen Versatzbetrag ihre Kontinuität verlieren. Bei SGR wird eine mehr oder weniger vollständige Durchmischung der verschiedenen Gesteinstypen entlang des Bruchs angenommen. Nach Fisher et al. (2013) sind in Karbonat-Tonstein-Abfolgen die eingeschleppten tonreichen Lagen weniger kontinuierlich ausgebildet als in rein siliziklastischen (Sandstein – Tonstein) Abfolgen, weil sich die tonigen Lagen aufgrund einer frühdiagenetischen Karbonatzementation eher spröd verhalten. Somit wäre das SGR-Konzept zumindest auf die kalkigeren Wirtgesteine (Effinger Schichten, Helvetische Mergel) der bevorzugte Ansatz. Yielding (2002) hat gezeigt, dass ab einem SGR von 15 – 20 % (d.h. Anteil von 15 – 20 % Tonmineralen in Bruchbrekzien) auf beiden Seiten des Bruchs unterschiedliche Fluiddrücke beobachtet werden und die Bruchfüllungen somit abdichtend wirken können. Dennoch warnen Fisher et al. (2013) vor Verallgemeinerungen und halten Bruchbrekzien und *Fault gouges* für sich allein genommen nicht notwendigerweise für Barrieren für den Fluss eines benetzenden Fluids quer zur Störung, v.a. wegen ihrer beschränkten Mächtigkeit.

Erfahrungen aus der *Shale gas*-Förderung

- *Gas shales* mit Tonmineralgehalten, die mit denjenigen von Opalinuston und 'Braunem Dogger' vergleichbar sind, werden von der Industrie als problematisch für die Förderung von Gas mittels *Fracking* betrachtet, weil es schwierig ist, ein hydraulisch verbundenes Netzwerk von Brüchen zu erzeugen und über die Produktionsperiode offen zu halten (Fisher et al. 2013).

2.6 Diffusionseigenschaften

2.6.1 Datenbasis und Methodik

2.6.1.1 Direkte Messdaten

Aus Durchdiffusionsexperimenten abgeleitete Diffusionskoeffizienten für alle potenziellen Wirtgesteine sind u.a. in Van Loon (2014) und Van Loon & Soler (2003) dokumentiert. Ein Teil dieser Daten sowie weitere Werte sind in Van Loon et al. (2003, 2005a, 2005b, 2007) und Van Loon & Eikenberg (2005) publiziert. Daten bestehen für HTO (Tritium-haltiges Wasser), $^{36}Cl^-$, $^{125}I^-$, $^{22}Na^+$, $^{85}Sr^{2+}$ und $^{134}Cs^+$ und beziehen sich mehrheitlich auf den Transport senkrecht zur Schichtung, mit einigen Angaben zum Transport parallel zur Schichtung. Nebst Werten für effektive Diffusionskoeffizienten D_e lässt sich aus den Experimenten mit konservativen Spezies auch die für die jeweilige Spezies zugängliche Porosität ε ableiten.

In situ-Diffusionskoeffizienten für HTO, $^{125}I^-$, $^{22}Na^+$ und einige andere Spezies wurden im Rahmen von Experimenten im Felslabor Mont Terri bestimmt (Van Loon et al. 2004b, Wersin et al. 2006, 2008, Soler et al. 2008, 2013); diese beziehen sich auf den Transport parallel zur Schichtung. In einem neueren Experiment (Gimmi et al. 2014) wurden auch Anisotropieverhältnisse anhand der Felddaten ermittelt.

Ausserdem haben Mazurek et al. (2012) an Proben der Effinger Schichten der Bohrung Oftringen Diffusionskoeffizienten für Cl^- parallel zur Schichtung abgeleitet. Im Gegensatz zu obigen Daten, welche Tracer-Diffusion repräsentieren (radioaktive Isotope, die in sehr kleiner Konzentration vorkommen), handelt es sich dabei um Salzdiffusionskoeffizienten.

An einer Probe aus dem Opalinuston der Bohrung Schlattingen-1 haben Jacops et al. (2013) den Durchdiffusionskoeffizienten für gelöstes He senkrecht zur Schichtung bestimmt.

Für Proben der Bohrung Schlattingen-1 haben Wersin et al. (2013a) Diffusionsexperimente für I^- mittels Röntgen-Radiographie (Cavé et al. 2009) dokumentiert. Wegen Quellung der Proben während der Experimente können die Resultate aber nicht als repräsentativ für In situ-Bedingungen betrachtet werden und bleiben hier unberücksichtigt.

2.6.1.2 Indirekte Daten

Zwischen Porosität und Diffusionskoeffizienten besteht ein empirischer Zusammenhang. Das Archie-Gesetz beschreibt die Beziehung zwischen dem effektiven Diffusionskoeffizienten für eine im Porenwasser eines Gesteins gelöste Spezies (D_e), dem Diffusionskoeffizienten dieser Spezies in freiem Wasser (D_w) und der für die betreffende Spezies zugänglichen Porosität (ε) gemäss:

$$D_e = D_w \cdot \varepsilon^m$$

wobei m ein empirischer Exponent ist (Boving & Gratwohl 2001) und D_e als Produkt von ε und dem Porendiffusionskoeffizienten D_p definiert ist. Van Loon (2014) hat festgestellt, dass die weltweit verfügbaren Daten für tonmineralreiche Gesteine nicht mit einem einzigen Wert für m beschrieben werden können und hat daher eine erweiterte Form der Beziehung mit den empirischen Parametern $m1$, $m2$ und B formuliert und mit Parameterwerten versehen:

$$D_e = D_w \cdot \varepsilon^{m1} + B \cdot \varepsilon^{m2}$$

Diese Gleichung kann auch auf die Wirtgesteinsformationen angewendet werden und ermöglicht eine Abschätzung von Diffusionskoeffizienten, falls lediglich Porositätsdaten einer Formation zur Verfügung stehen. Werte für D_w verschiedener gelöster Spezies können Li & Gregory (1974) und Flury & Gimmi (2002) entnommen werden; für gelöste Edelgase haben Jähne et al. (1987) Daten publiziert.

Kationen werden von den negativ geladenen Tonmineraloberflächen angezogen, so dass ihre Konzentration in unmittelbarer Nähe der Oberflächen höher ist als im freien Wasser. Dies bedeutet, dass auch die Konzentrationsgradienten, also die treibende Kraft der Diffusion, entlang der Diffusionspfade von Kationen in einem tonmineralreichen Gestein in diesen Bereichen erhöht sind. Falls die Mobilität von sorbierten Kationen nicht vollständig vernachlässigbar ist (was bei Ionenaustausch der Fall ist, aber eher nicht bei spezifischer Sorption), trägt die Diffusion der sorbierten Kationen entlang der Tonoberflächen u.U. wesentlich zum Transport von Kationen durch das Gestein bei. Je kleiner die Apertur, desto stärker ist der Effekt der Oberflächendiffusion. Gimmi & Kosakowski (2011) haben diesen Prozess quantifiziert und ionenspezifische relative Mobilitäten μ_s abgeleitet, die in erster Näherung unabhängig von Ionenstärke oder Gesteinsdichte sind. Der Effekt hängt, neben den ionenspezifischen Mobilitäten, auch vom Verhältnis von sorbierten Kationen zu Kationen in Lösung ab, welches als Kapazitätsverhältnis κ definiert werden kann:

$$\kappa = \frac{\rho_b \cdot K_d}{\varepsilon}$$

mit ρ_b = Trockendichte und K_d = ionenspezifischer Sorptionskoeffizient. Aus μ_s und κ lässt sich der Beitrag von Oberflächendiffusion zum totalen diffusiven Transport beschreiben. Es lassen sich Korrekturfaktoren CF berechnen, mit welchen die aus dem erweiterten Archie-Gesetz berechneten Diffusionskoeffizienten für Kationentransport unter Berücksichtigung der Oberflächendiffusion korrigiert werden können, gemäss:

$$CF = 1 + \kappa \cdot \mu_s$$

Diese Beziehungen zeigen, dass der Beitrag der Oberflächendiffusion für ein gegebenes Kation bei sehr kleinen Porositäten und kleiner Ionenstärke (und somit grossem K_d) stark ins Gewicht fällt. Beim Vergleich verschiedener Kationen hat sich gezeigt, dass vergleichsweise stärker sorbierende Kationen (höhere Selektivität, grösserer K_d) tendenziell geringere Mobilitäten μ_s aufweisen, was den Einfluss der Oberflächendiffusion bei einer gegebenen Ionenstärke für diese Kationen vermindert.

Mithilfe des erweiterten Archie-Gesetzes und der Korrektur für Oberflächendiffusion lassen sich auch Diffusionskoeffizienten für gelöste Spezies ableiten, für welche keine direkten Messungen vorliegen. Van Loon (2014) hat dies für die relevanten Radionuklide dokumentiert, unter Verwendung bekannter Diffusionskoeffizienten dieser Spezies in freiem Wasser (D_w) sowie gesteinsspezifischen Werten für Sorptionskoeffizienten (K_d) nach Baeyens et al. (2014) und Gesteinsdichten (ρ_b) und Porositäten (ε).

2.6.2 Resultate und Diskussion

Die vorhandenen Daten sind in Tab. 2.6-1 zusammengestellt und in Fig. 2.6-1 bis 2.6-3 illustriert. Es lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Im Labor gemessene Werte für effektive Diffusionskoeffizienten senkrecht zur Schichtung im Opalinuston, im 'Braunen Dogger' und in den Effinger Schichten decken für HTO ($5.4 \times 10^{-12} – 2.7 \times 10^{-11}$ m^2/s), $^{36}Cl^-$ ($6.7 \times 10^{-13} – 8.3 \times 10^{-12}$ m^2/s) und $^{22}Na^+$ ($7.2 \times 10^{-12} – 3.5 \times 10^{-11}$ m^2/s) jeweils ähnliche Bereiche ab, wobei der Opalinuston der Bohrung Benken für HTO und $^{36}Cl^-$ eher im unteren Bereich der Bandbreite liegt. Diffusionskoeffizienten für $^{125}I^-$ sind etwas kleiner als diejenigen von $^{36}Cl^-$ (Faktor 0.7, Bandbreite 0.63 – 0.84). Daten für die Helvetischen Mergel unterscheiden sich wesentlich und liefern kleinere Diffusionskoeffizienten für HTO ($1.0 \times 10^{-12} – 1.6 \times 10^{-12}$ m^2/s), $^{36}Cl^-$ ($2.6 \times 10^{-14} – 3.9 \times 10^{-14}$ m^2/s) und $^{22}Na^+$ ($3.7 \times 10^{-12} – 8.6 \times 10^{-12}$ m^2/s).
- Die aus den Diffusionsexperimenten abgeleiteten zugänglichen Porositäten zeigen analog den Diffusionskoeffizienten, dass sich die Proben der Helvetischen Mergel mit ihren niedrigeren Werten deutlich von den Wirtgesteinen der Nordschweiz unterscheiden.
- Mit Ausnahme von HTO im Opalinuston der Bohrung Benken liegen die Messwerte für D_e innerhalb der Bandbreite, welche aus dem erweiterten Archie-Gesetz (und der Korrektur für Oberflächendiffusion im Fall von Na) abgeleitet wurde (Fig. 2.6-1 – 2.6-3).
- Das Verhältnis der für $^{36}Cl^-$ und HTO bestimmten Porositäten charakterisiert den anionenzugänglichen Teil der Porosität. Dieser liegt für den Opalinuston, den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten im Bereich von 0.28 – 0.73. Für die Helvetischen Mergel ist der entsprechende Bereich 0.12 – 0.14, was auf einen wesentlich stärkeren Anionenausschluss in dieser Einheit schliessen lässt. Dies liegt vermutlich an der Porenstruktur, welche wegen der tieferen Versenkung noch kleinere Porenaperturen aufweist.
- Die aus den Diffusionsexperimenten abgeleiteten Porositäten für HTO liegen ungefähr im Bereich der aus dem Wassergehalt bzw. den Dichten berechneten Werte (Kap. 2.3; Fig. 2.6-1), wobei die Diffusionsporositäten für den Opalinuston in Benken tendenziell etwas grösser sind und bei den Werten für den Opalinuston im Felslabor Mont Terri vergleichsweise niedrig sind.

Tab. 2.6-1: Diffusionskoeffizienten D_e und diffusionszugängliche Porositäten ε an Proben der Wirtgesteine gemäss Durch- und Ausdiffusionsexperimenten im Labor sowie In situ-Experimenten im Felslabor Mont Terri.

Daten beziehen sich auf eine Referenztemperatur von 25 °C; In situ-Daten aus dem Felslabor Mont Terri sind temperaturkorrigiert. Analytische Fehler zu den tabellierten Parameterwerten sind in der zitierten Originalliteratur zu finden. ⊥ = senkrecht zur Schichtung, || = parallel zur Schichtung. Porosität ist eine skalare Grösse; die Angaben ⊥ bzw. || dokumentieren, aus welchem Diffusionsexperiment der Wert abgeleitet wurde. Besonderheiten für die In situ-Experimente am Mont Terri: Werte in Kolonne D_e ($^{125}I^-$) beziehen sich auf I^-, nicht auf das radioaktive Isotop; Werte in Kolonne ε ($^{36}Cl^-$) beziehen sich auf Porositäten, die aus den I^--Profilen abgeleitet wurden. BEN = Benken, GOS = Gösgen KB5a, MT = Felslabor Mont Terri, OFT = Oftringen, SLA = Schlattingen-1, SB4a/v = Wellenberg-Bohrung SB4a/v.

1) Van Loon & Soler (2003)
2) Van Loon et al. (2005b)
3) Van Loon et al. (2005a)
4) Jacops et al. (2013)
5) Van Loon & Eikenberg (2005)
6) Van Loon et al. (2004b)
7) Wersin et al. (2006)
8) Wersin et al. (2008)
9) Soler et al. (2013)
10) Soler et al. (2008)
11) Van Loon (2014)
12) Mazurek et al. (2012)

Tab. 2.6-1: (Fortsetzung)

Bohrung	Tiefe [m] bzw. Probe	Methode	D_e (HTO) [m^2/s]		D_e ($^{36}Cl^-$) [m^2/s]		D_e ($^{125}I^-$) [m^2/s]		D_e (Cl^-) [m^2/s]		D_e ($^{22}Na^+$) [m^2/s]		D_e ($^{134}Cs^+$) [m^2/s]		D_e ($^{85}Sr^{2+}$) [m^2/s]		D_e (He) [m^2/s]	Anisotropie: D_e ($\|$ / $\perp$) [-]			ε (HTO) [-]		ε ($^{36}Cl^-$) [-]		ε (^{36}Cl) / ε (HTO)	Referenz
			⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	HTO	$^{36}Cl^-$	$^{22}Na^+$	⊥	∥	⊥	∥		
Opalinuston Benken, Schlattingen-1																										
BEN	563.70/15		8.78×10^{-12}	3.31×10^{-11}														3.77			0.160	0.170				1)
BEN	589.46/15		7.26×10^{-12}	3.31×10^{-11}														4.56			0.160	0.170				1)
BEN	636.75/4	Durchdiffusion (Labor)	6.71×10^{-12}		9.11×10^{-13}		6.57×10^{-13}				1.49×10^{-11}				2.40×10^{-11}						0.150		0.044		0.29	1), 2)
BEN	636.75/8		5.92×10^{-12}		7.92×10^{-13}		5.02×10^{-13}				1.25×10^{-11}				2.40×10^{-11}						0.140		0.039		0.28	1), 2)
BEN	636.75/15		5.60×10^{-12}		7.12×10^{-13}		4.47×10^{-13}				1.23×10^{-11}				1.80×10^{-11}						0.130		0.039		0.30	1), 2)
BEN	636.75/5		5.59×10^{-12}		7.36×10^{-13}						7.23×10^{-12}										0.120		0.051		0.43	3)
BEN	636.75/5		7.91×10^{-12}		1.01×10^{-12}						1.58×10^{-11}										0.150		0.050		0.33	3)
BEN	636.79/15		5.42×10^{-12}	3.10×10^{-11}	6.74×10^{-13}	3.38×10^{-12}					1.33×10^{-11}	7.75×10^{-11}						5.72	5.01	5.83	0.140	0.150	0.041	0.045	0.29	1)
BEN	636.79/15		5.41×10^{-12}	3.20×10^{-11}														5.91			0.130	0.130				1)
BEN	651.11/15		5.83×10^{-12}																		0.170					1)
SLA	860.32																6.50×10^{-11}									4)
BEN	636.75	In-Diffusion (Labor)									2.00×10^{-11}		3.10×10^{-11}													5)

Tab. 2.6-1: (Fortsetzung)

Bohrung	Tiefe [m] bzw. Probe	Methode	D_e (HTO) [m^2/s]		D_e ($^{36}Cl^-$) [m^2/s]		D_e ($^{125}I^-$) [m^2/s]		D_e (Cl^-) [m^2/s]		D_e ($^{22}Na^+$) [m^2/s]		D_e ($^{134}Cs^+$) [m^2/s]		D_e ($^{85}Sr^{2+}$) [m^2/s]	D_e (He) [m^2/s]	Anisotropie: D_e (‖ /⊥) [-]			ε (HTO) [-]		ε ($^{36}Cl^-$) [-]		ε ($^{36}Cl^-$) / ε (HTO)	Referenz
			⊥	‖	⊥	‖	⊥	‖	⊥	‖	⊥	‖	⊥	‖	⊥	⊥	HTO	$^{36}Cl^-$	$^{22}Na^+$	⊥	‖	⊥	‖		
Opalinuston Mont Terri																									
MT	BDI-2/8	Durchdiffusion (Labor)	1.49×10^{-11}		5.70×10^{-12}		4.76×10^{-12}				1.64×10^{-11}				1.70×10^{-11}					0.100		0.073		0.73	1), 2)
MT	BDI-2/8		1.18×10^{-11}		4.11×10^{-12}		3.37×10^{-12}				1.36×10^{-11}				1.40×10^{-11}					0.100		0.072		0.72	1), 2)
MT	DI A0/6		1.42×10^{-11}	5.39×10^{-11}	4.13×10^{-12}	1.59×10^{-11}					1.52×10^{-11}	7.20×10^{-11}					3.80	3.85	4.74	0.170	0.150	0.075	0.082	0.44	1)
MT	DI A0/6		1.37×10^{-11}	5.42×10^{-11}													3.96			0.140	0.170				1)
MT	DI-A		1.44×10^{-11}		5.61×10^{-12}						1.59×10^{-11}									0.090		0.058		0.64	3)
MT	DI-A		1.43×10^{-11}		4.92×10^{-12}						1.83×10^{-11}									0.130		0.077		0.59	3)
MT	MT	In-Diff. (Labor)									1.50×10^{-11}		3.00×10^{-11}												5)
MT	DI-A1	In situ-Test		5.36×10^{-11}				1.31×10^{-11}				8.04×10^{-11}		2.68×10^{-10}							0.150				6)
MT	DI-A1			7.60×10^{-11}				2.00×10^{-11}				1.00×10^{-10}		3.90×10^{-10}							0.183		0.110	0.60	7)
MT	DI-A2			8.04×10^{-11}				3.93×10^{-11}						3.00×10^{-10}							0.150				8), 9)
MT	DI-B			5.85×10^{-11}				1.35×10^{-11}													0.155		0.085	0.55	10)
'Brauner Dogger'																									
BEN	482.00	Durchdiffusion (Labor)	1.86×10^{-11}		4.92×10^{-12}						3.07×10^{-11}									0.096		0.061		0.64	11)
BEN	482.00		1.73×10^{-11}		4.29×10^{-12}						2.04×10^{-11}									0.106		0.050		0.47	11)
BEN	525.45		2.60×10^{-11}		8.32×10^{-12}						3.50×10^{-11}									0.138		0.082		0.59	11)
BEN	525.45		2.65×10^{-11}		7.84×10^{-12}						3.22×10^{-11}									0.139		0.074		0.53	11)

Tab. 2.6-1: (Fortsetzung)

Bohrung	Tiefe [m] bzw. Probe	Methode	D_e (HTO) [m^2/s]		D_e ($^{36}Cl^-$) [m^2/s]		D_e ($^{125}I^-$) [m^2/s]		D_e (Cl^-) [m^2/s]	D_e ($^{22}Na^+$) [m^2/s]		D_e ($^{134}Cs^+$) [m^2/s]		D_e ($^{85}Sr^{2+}$) [m^2/s]	D_e (He) [m^2/s]	Anisotropie: D_e ($\|$ /⊥) [-]			ε (HTO) [-]		ε ($^{36}Cl^-$) [-]		ε ($^{36}Cl^-$) / ε (HTO)	Referenz
			⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	⊥	HTO	$^{36}Cl^-$	$^{22}Na^+$	⊥	∥	⊥	∥		
Effinger Schichten																								
OFT	619.07	Durchdiffusion (Labor)	1.24×10^{-12}		3.04×10^{-12}					1.31×10^{-11}									0.100		0.047		0.47	11)
OFT	619.07		1.30×10^{-11}		3.10×10^{-12}					1.41×10^{-11}									0.100		0.048		0.48	11)
GOS	122.89		9.59×10^{-12}		3.15×10^{-12}					8.54×10^{-12}									0.082		0.038		0.46	11)
GOS	122.89		9.65×10^{-12}		3.08×10^{-12}					8.36×10^{-12}									0.083		0.038		0.46	11)
OFT	438.59	Ausdiffusion (Labor)							1.46×10^{-12}														12)
OFT	501.23								4.28×10^{-12}														12)
OFT	560.74								5.04×10^{-12}														12)
OFT	619.07								4.07×10^{-12}														12)
Helvetische Mergel																								
SB4a/v	334.06	Durchdiffusion (Labor)	1.03×10^{-12}		2.62×10^{-14}					3.69×10^{-12}									0.028		0.0033		0.12	11)
SB4a/v	334.06		1.06×10^{-12}		2.78×10^{-14}					4.53×10^{-12}									0.026		0.0035		0.13	11)
SB4a/v	579.87		1.56×10^{-12}		3.93×10^{-14}					8.60×10^{-12}									0.034		0.0042		0.12	11)
SB4a/v	579.87		1.45×10^{-12}		3.54×10^{-14}					6.48×10^{-12}									0.030		0.0042		0.14	11)

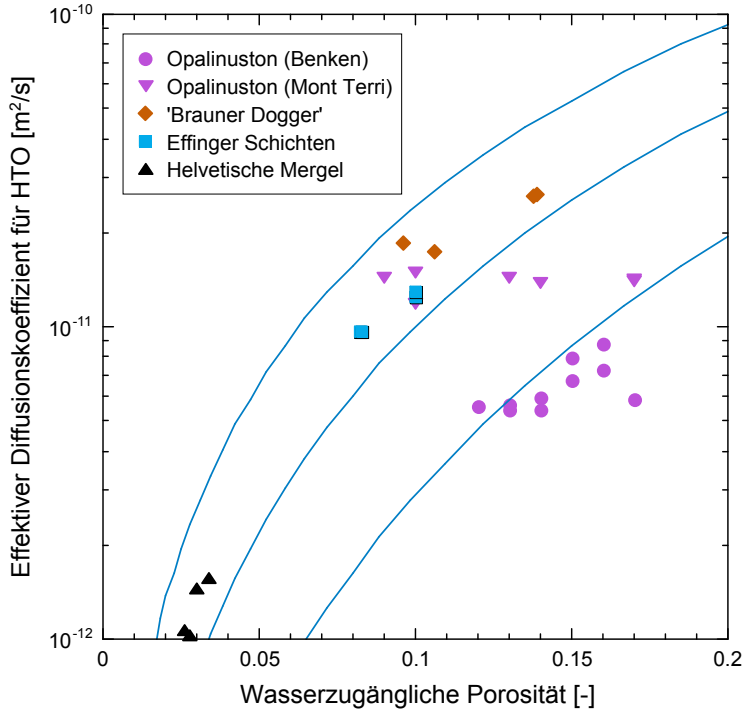


Fig. 2.6-1: Diffusionskoeffizienten für HTO und wasserzugängliche Porosität gemäss Durchdiffusionsexperimenten senkrecht zur Schichtung.

Blaue Kurven bezeichnen die Beziehung (Referenzkurve und Bereich) nach dem erweiterten Archie-Gesetz nach Van Loon (2014).

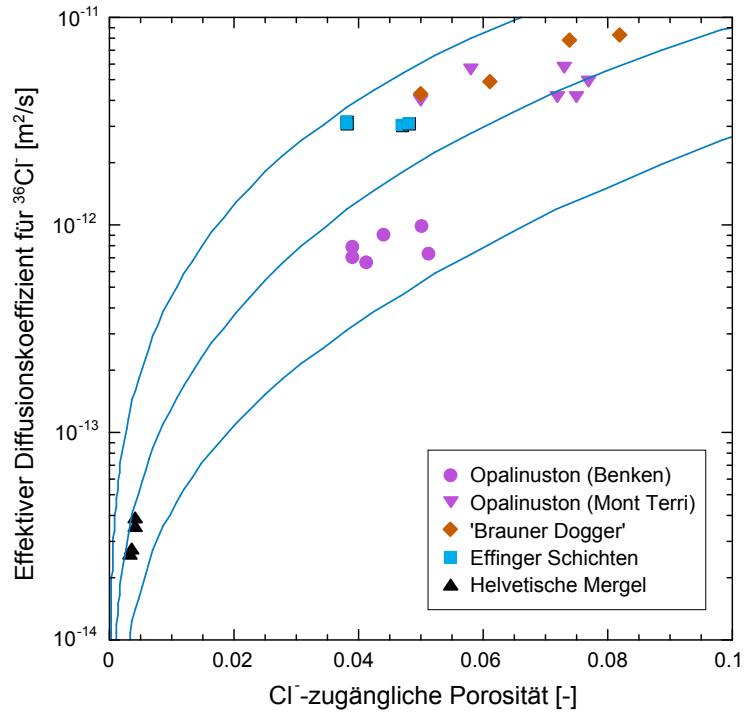


Fig. 2.6-2: Diffusionskoeffizienten für $^{36}Cl^-$ und Cl^--zugängliche Porosität gemäss Durchdiffusionsexperimenten senkrecht zur Schichtung.

Blaue Kurven bezeichnen die Beziehung (Referenzkurve und Bereich) nach dem erweiterten Archie-Gesetz nach Van Loon (2014).

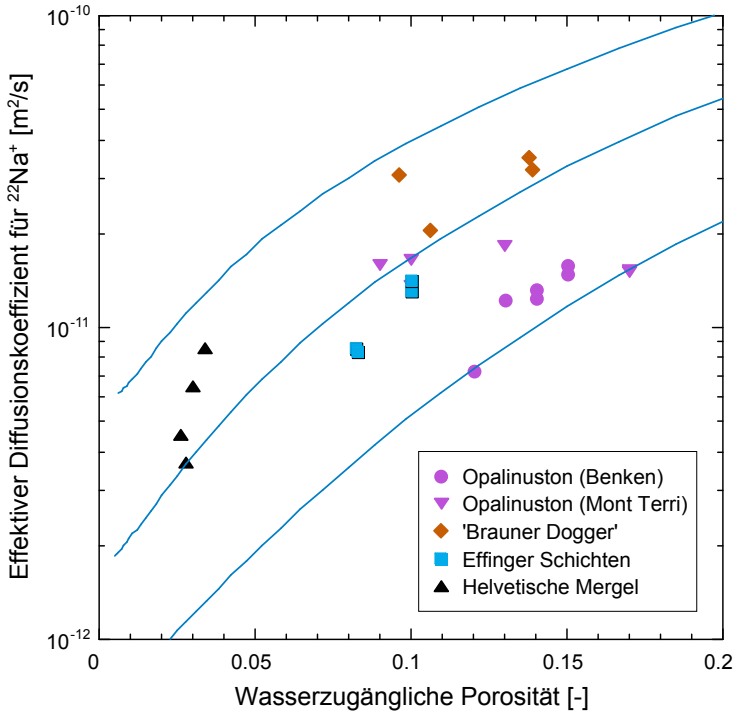


Fig. 2.6-3: Diffusionskoeffizienten für $^{22}Na^+$ und wasserzugängliche Porosität gemäss Durchdiffusionsexperimenten senkrecht zur Schichtung.

Blaue Kurven bezeichnen die Beziehung (Referenzkurve und Bereich) nach dem erweiterten Archie-Gesetz nach Van Loon (2014). Parameterwerte zur Berechnung: K_d *(Na)* = 1.5 × 10^{-4} m^3/kg (Mittelwert verfügbarer Daten für Opalinuston im Felslabor Mont Terri nach Van Loon et al. 2004b und Wersin et al. 2006, Appendix D), μ_s *(Na)* = 0.45 (Gimmi & Kosakowski 2011), D_w = 1.334 × 10^{-9} m^2/s (Flury & Gimmi 2002), ρ_b = 2410 kg/m^3 (Referenzwert für Opalinuston gemäss Van Loon 2014).

2.6.3 Anisotropie von Diffusionskoeffizienten

Angesichts des anisotropen Gefüges tonmineralreicher Gesteine ist auch eine Anisotropie der Tortuosität und somit des diffusiven Transports zu erwarten. Van Loon & Soler (2003), Van Loon et al. (2004a) und Van Loon (2014) haben an Proben von Opalinuston der Bohrung Benken und des Felslabors Mont Terri die Anisotropie der Diffusionskoeffizienten experimentell untersucht und Anisotropiefaktoren um 4 – 5 (Mont Terri) bzw. 5 – 6 (Benken) abgeleitet (Übersicht in Tab. 2.6-1). Direkt aus Daten eines Mont Terri-Feldexperiments ermittelte Anisotropiefaktoren (~ 3 – 4 für Anionen, ~ 5 für HTO und ^{22}Na; Gimmi et al. 2014) bestätigen die Laborwerte. Angesichts der Ähnlichkeit von Mineralogie und Gefüge werden diese Werte auch für die tonreichen Abschnitte im 'Braunen Dogger' als repräsentativ betrachtet.

Für die Effinger Schichten kann ein Ausdiffusionsexperiment von Mazurek et al. (2012), welches Diffusion parallel zur Schichtung repräsentiert, mit einem Durchdiffusionsexperiment senkrecht zur Schichtung von Van Loon (2014) verglichen werden. Dies ergibt einen Anisotropiefaktor von 1.3. Angesichts des niedrigeren Tonmineralgehalts und des somit schwächeren Planargefüges ist dieser Wert plausibel. Da die beiden Datensätze aber nicht an der identischen Probe bestimmt wurden und auch methodische Unterschiede bestehen, ist diese Zahl mit Ungewissheiten behaftet.

Für die Helvetischen Mergel des Standortgebiets Wellenberg bestehen keine Angaben zur Anisotropie. Aufgrund der Tonmineralgehalte ist am ehesten ein Anisotropiefaktor zu erwarten, welcher zwischen demjenigen für Opalinuston und Effinger Schichten liegt (Massstab Handstück bis Meter).

2.6.4 Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von der Temperatur

Mit steigender Temperatur erhöht sich die Mobilität gelöster Substanzen, hauptsächlich wegen der Abnahme der Viskosität von Wasser. Für Opalinuston haben Van Loon et al. (2005a) die Temperaturabhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von HTO, $^{36}Cl^-$ und $^{22}Na^+$ im Intervall 5 – 65 °C experimentell untersucht und quantifiziert. Der Temperatureffekt ist nicht vernachlässigbar; wenn z.B. die In situ-Diffusionskoeffizienten vom Felslabor Mont Terri (14 – 16 °C) auf die Labor-Referenztemperatur von 25 °C umgerechnet werden, beträgt der Korrekturfaktor 1.3 – 1.4. In einem geologischen Tiefenlager sind die Diffusionskoeffizienten entsprechend der höheren Temperatur noch etwas höher.

2.6.5 Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von der Ionenstärke des Porenwassers

Experimente mit reinen Tonmineralen (Illit, Montmorillonit, Kaolinit) haben gezeigt, dass sich Diffusionskoeffizienten von Anionen und Kationen mit der Ionenstärke ändern (z.B. Van Loon et al. 2007, Glaus et al. 2010). Für Kationen nehmen sie mit der Ionenstärke ab, für Anionen zu, was sich mit der Verteilung von Ionen im nanometrischen Porenraum und einer gewissen Mobilität von sorbierten Kationen (Gimmi & Kosakowski 2011) erklären lässt. Für Montmorillonit mit seiner grossen Oberflächenladung sind diese Effekte besonders stark, während sie für Kaolinit (keine Oberflächenladung) vernachlässigbar sind.

In der gering durchlässigen Sequenz zwischen den Malm- und Triasaquiferen der Nordschweiz wie auch im Standortgebiet Wellenberg liegt die Ionenstärke von Porenwässern zwischen niedrigen Werten (Frischwasser) und maximal 0.7 mol/L (Meerwasser). Diffusionsexperimente im Labor wurden jeweils mit Wässern durchgeführt, deren Zusammensetzung nahe am In situ-Porenwasser der jeweiligen Probe liegt.

Van Loon (2014) hat den Effekt der Ionenstärke auf Diffusionseigenschaften an Proben aus dem Opalinuston vom Felslabor Mont Terri im Bereich von 0.17 – 1.07 mol/L experimentell untersucht. Die Änderung der Diffusionskoeffizienten mit zunehmender Ionenstärke hat sich hierbei als klein erwiesen (Zunahme um einen Faktor 1.26 für $^{36}Cl^-$, Abnahme um einen Faktor 1.48 für $^{22}Na^+$), was durch den eher kleinen Anteil Smektit (v.a. in Form Illit-reicher Illit-Smektit-Wechsellagerungen) im Gestein zu erklären ist. Kein signifikanter Einfluss der Ionenstärke auf die Diffusion und die zugängliche Porosität von Anionen ergab sich aus einem Vergleich von Resultaten aus Feldexperimenten, welche an Orten mit unterschiedlichen Salinitäten (0.22 M und 0.39 M) im Felslabor Mont Terri durchgeführt wurden (Gimmi et al. 2014). Ein unterschiedlich starker Einfluss der Ionenstärke auf die Diffusion von Anionen und Kationen, wie im Labor beobachtet, lässt sich dadurch erklären, dass bei Anionen primär geometrische Faktoren (die zugängliche Porosität und die Tortuosität) von der Ionenstärke abhängen, währenddem es bei den Kationen vor allem der K_d-Wert ist. Die Diffusion von Kationen wie Cs^+ kann zudem stark von der Cs-Hintergrundkonzentration abhängen, wie ein Vergleich von Laborwerten (bei sehr geringer Hintergrundkonzentration gemessen) und von In situ-Werten (bei etwas höherer Hintergrundkonzentration gemessen) zeigt. Die Unterschiede können durch das Auftreten von verschiedenen Sorptionsplätzen erklärt werden, welche unterschiedliche Oberflächenmobilitäten aufweisen und je nach Hintergrundkonzentration dominieren.

Die Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von der Ionenstärke hängt hauptsächlich mit den elektrostatischen Eigenschaften von Tonmineraloberflächen und der Porenstruktur zusammen. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass die Befunde aus dem Felslabor Mont Terri auf Opalinuston in der ganzen Nordschweiz wie auch den 'Braunen Dogger' übertragen werden können. Angesichts des geringeren Tonmineralgehalts ist in den Effinger Schichten eine eher noch kleinere Abhängigkeit zu erwarten. Für die Helvetischen Mergel am Wellenberg sind Aussagen hingegen schwierig, da dort die Porenstruktur angesichts der wesentlich tieferen Versenkung verschieden ist, was sich auch in den kleineren Diffusionskoeffizienten und dem geringen Anteil anionenzugänglicher Porosität äussert.

2.6.6 Skalenabhängigkeit des diffusiven Stofftransports

Durchdiffusionskoeffizienten wurden im Labor an 0.8 – 2 cm dicken Gesteinsproben bestimmt. In situ-Diffusionsexperimente im Felslabor Mont Terri beziehen sich auf Diffusionsdistanzen bis ca. 10 – 30 cm (je nach Spezies), also etwa 1 Grössenordnung mehr als im Labor, und ergeben Diffusionskoeffizienten für HTO parallel zur Schichtung von 5.4×10^{-11} – 8.0×10^{-11} m^2/s (Tab. 2.6-1; Van Loon et al. 2004b, Wersin et al. 2006, 2008; In situ-Werte korrigiert auf die Referenztemperatur von 25 °C). Im Labor gemessene Werte parallel zur Schichtung ergeben 5.4×10^{-11} m^2/s. Aus den zahlreicheren Messungen senkrecht zur Schichtung kann mit dem Anisotropiefaktor 4 ein Bereich von 4.7×10^{-11} – 6.0×10^{-11} m^2/s parallel zur Schichtung abgeleitet werden. Die Labor- und In situ-Werte liegen also nahe beieinander und lassen keine Skalenabhängigkeit im Bereich von 1 – 10 cm erkennen.

Aus der räumlichen Verteilung von Porenwasser-Tracern (z.B. $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, Cl^-, He) in tonmineralreichen Aquitarden (u.a. Opalinuston und Rahmengesteine in Benken, im Felslabor Mont Terri und am Mont Russelin) haben Gimmi et al. (2007), Mazurek et al. (2009b, 2011) und Koroleva et al. (2011a) mittels Modellrechnungen die Diffusionszeiten berechnet, welche zu den heute beobachteten Tracerprofilen geführt haben. Für diese Rechnungen wurden Diffusionskoeffizienten aus den kleinskaligen Laborexperimenten verwendet. Die berechneten Aufbauzeiten für die beobachteten Profile waren jeweils konsistent mit unabhängigen paläohydrogeologischen Evidenzen wie z.B. der Aktivierung eines angrenzenden Aquifers durch erosive Freilegung. Obwohl die paläohydrogeologische Information ihrerseits mit Ungewissheiten behaftet ist, wird aus der Konsistenz der berechneten Aufbauzeiten und der unabhängigen Evidenzen geschlossen, dass die kleinskaligen Diffusionskoeffizienten zumindest grössenordnungsmässig auch auf der Formationsskala anwendbar sind.

2.6.7 Vergleich mit anderen tonmineralreichen Formationen

Wie Fig. 2.6-4 und 2.6-5 zeigen, liegen die Diffusionskoeffizienten und die diffusionszugänglichen Porositäten der Nordschweizer Wirtgesteine im Bereich anderer kompaktierter Tonformationen wie z.B. dem Callovo-Oxfordien in Bure (F). Hingegen fallen die Helvetischen Mergel des Standortgebiets Wellenberg mit deutlich kleineren Werten für beide Parameter auf, was auf die grössere maximale Versenkung dieser Gesteine zurückzuführen ist.

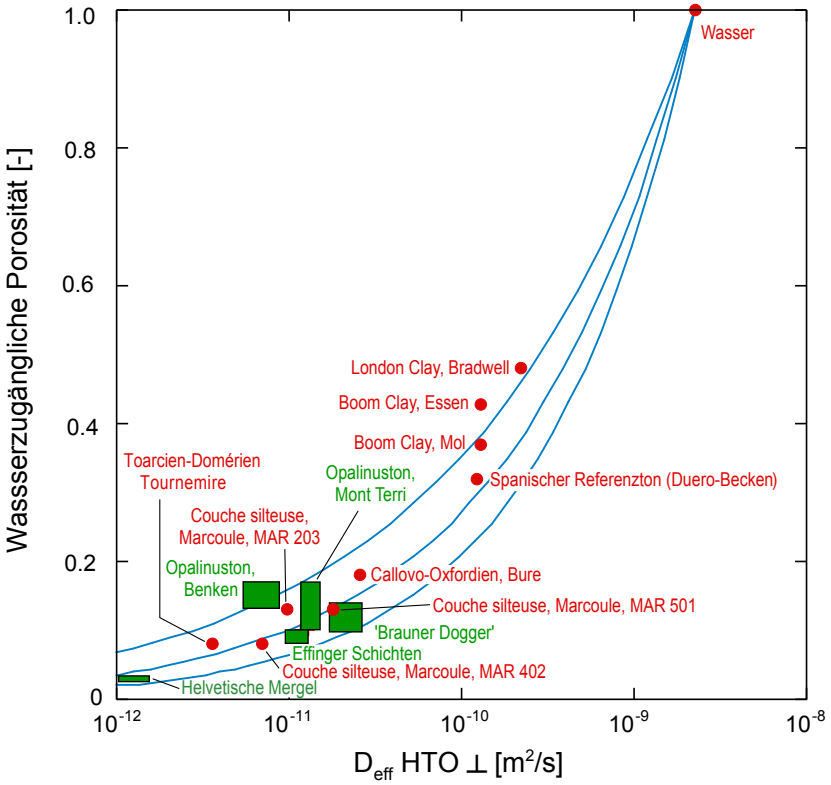


Fig. 2.6-4: Beziehung zwischen dem effektiven Diffusionskoeffizienten für HTO senkrecht zur Schichtung und der wasserzugänglichen Porosität für eine Reihe von tonmineralreichen Formationen.

Daten für die Wirtgesteine sind in grün eingetragen (Bereiche der aus Durchdiffusionsexperimenten erhaltenen Werte). Blaue Kurven bezeichnen die Beziehung (Referenzkurve und Bereich) nach dem erweiterten Archie-Gesetz nach Van Loon (2014). Selbstdiffusionskoeffizient nach Atkins (1990). Ergänzt aus Mazurek et al. (2009b).

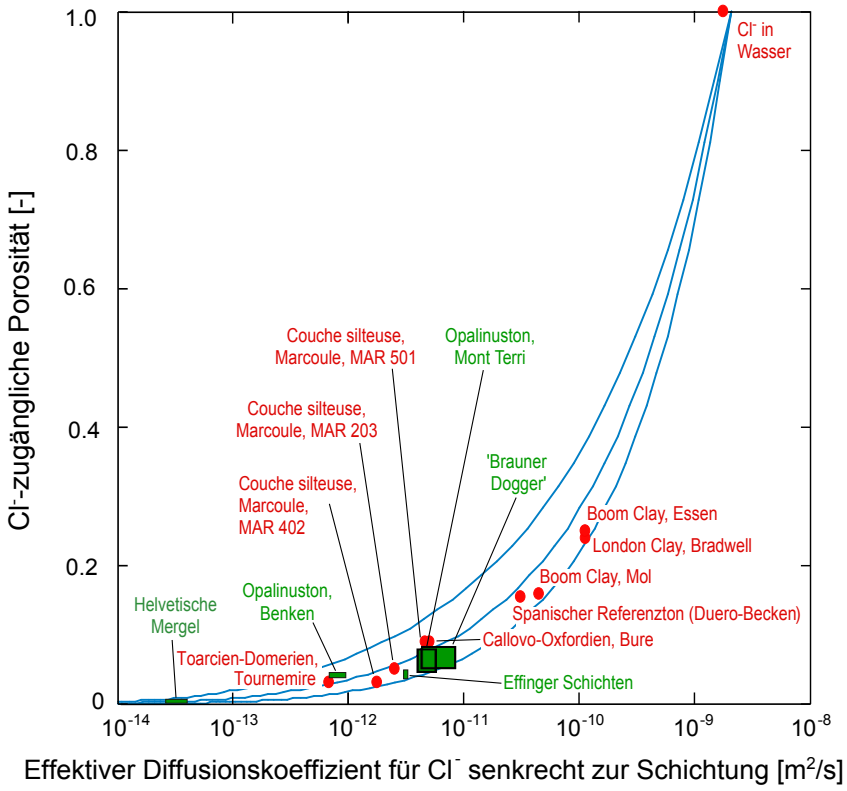


Fig. 2.6-5: Beziehung zwischen dem effektiven Diffusionskoeffizienten für Cl^- senkrecht zur Schichtung und der Cl^--zugänglichen Porosität für eine Reihe von tonmineralreichen Formationen.

Daten für die Wirtgesteine sind in grün eingetragen (Bereiche der aus Durchdiffusionsexperimenten erhaltenen Werte). Blaue Kurven bezeichnen die Beziehung (Referenzkurve und Bereich) nach dem erweiterten Archie-Gesetz nach Van Loon (2014). Diffusionskoeffizient von Cl^- in Wasser nach Flury & Gimmi (2002). Ergänzt aus Mazurek et al. (2009b).

2.7 Wasserführende Systeme in den Wirtgesteinen

2.7.1 Opalinuston

2.7.1.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen

Im Opalinuston wurden in Tiefbohrungen keine erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten oder diskrete Wasserzuflüsse identifiziert. Nur in der Dekompaktionszone, in den obersten Dekametern, sind erhöhte Werte festzustellen (Hekel 1994, Nagra 2008). In Untertagebauwerken des Faltenjuras hat Gautschi (2001) in den Archiven der jeweiligen Bauphasen keine Erwähnung von Feuchtstellen im Opalinuston gefunden, solange die Überdeckung 200 m überschreitet.

Der Opalinuston der Bohrung Benken ist sehr arm an Sprödstrukturen (einige Verschiebungsflächen und eine 10 cm mächtige Störung; vgl. Nagra 2002a). In der Bohrung Schlattingen-1 ist das Inventar etwas reichhaltiger (aufgrund der Nähe zum Bonndorf-Hegau-Bodensee-Graben) und umfasst Klüfte, Haarrisse, Rutschharnische, einige Adern und eine Verschiebungsfläche (Albert et al. 2012). Diese Strukturen werden aber allesamt als in situ geschlossen interpretiert. Gegen Westen, in den Bohrungen Riniken und vor allem Schafisheim, ist insbesondere der

untere Teil des Opalinustons stark gestört (Ebert 2014) und enthält bis m-mächtige Bruchzonen mit *Fault gouges/breccias*. Diese Deformation steht vermutlich in Zusammenhang mit dem Fernschub der Jurafaltung, der gegen Westen bedeutender wird. Auch diese Bereiche sind aber gering durchlässig (vgl Packertests Schafisheim in Fig. 2.5-1).

2.7.1.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von Bruchstrukturen

Die Geometrie von beobachteten Sprödstrukturen im Opalinuston ist in Nagra (2002a, Kapitel 5.5) beschrieben und in Fig. 2.7-1 in Konzeptbildern illustriert. In Anlehnung an die Klassifikation von Caine et al. (1996) wird unterschieden zwischen einzelnen Scherbrüchen (bzw. Verschiebungsflächen), lokalisierten und komplex zusammengesetzten Bruchzonen, wobei letztere im Gegensatz zu den anderen Typen eine Auflockerungszone aufweisen. Die Strukturen sind aber wegen der effizienten Selbstabdichtung (vgl. Kap. 2.5.2) hydraulisch nicht wirksam und somit keine präferenziellen Fliesspfade. Rechnungen zum Radionuklidtransport durch diese Strukturen (z.B. Kapitel 9.4 in Nagra 2002a, b) gehören somit zu den *"What if"*-Fällen, da für die Transmissivität Werte angenommen werden müssen, die ausserhalb des beobachteten Spektrums liegen.

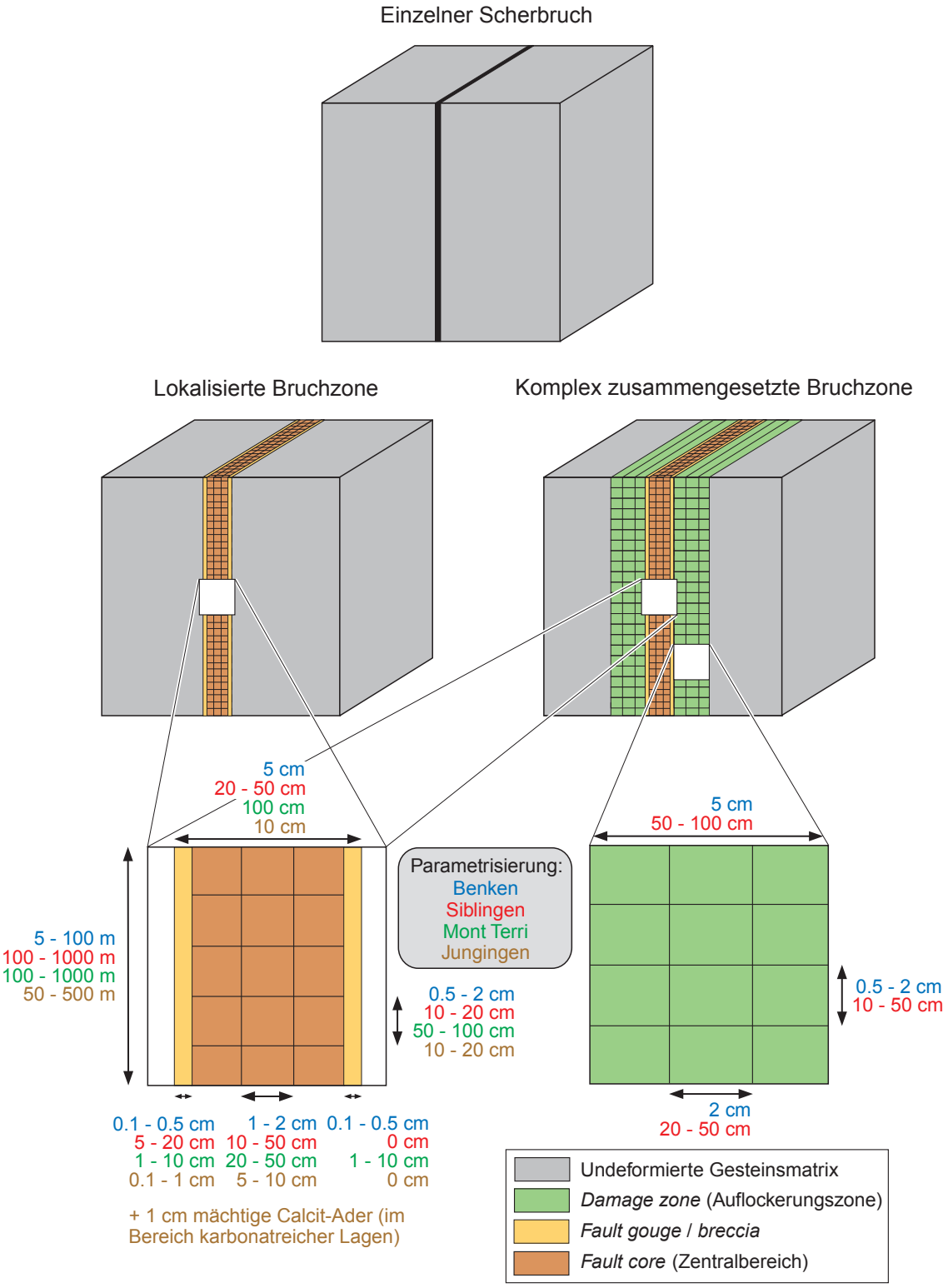


Fig. 2.7-1: Geometrische Konzeptualisierung von beobachteten Brucharchitekturen im Opalinuston.

Die Parametrisierung beruht auf Beobachtungen an Bohrkenen der Bohrung Benken, der Tongrube Siblingen, des Felslabors Mont Terri und Oberflächenaufschlüssen bei Jungingen (D). Weitere Details in Nagra (2002a).

2.7.1.3 *Wet spots* im Felslabor Mont Terri

Im Opalinuston des Felslabors Mont Terri wurden bereits während des Ausbruchs der 'Gallery 98', vor allem aber während des Vortriebs der 'Gallery 08' an den Wänden sowie in verschiedenen Bohrungen Feucht- bis schwache Tropfstellen (*Wet spots*) identifiziert und im Rahmen des WS-H-Experiments untersucht (Müller & Leupin 2012). Hierbei wurde Folgendes festgestellt:

- In den 2008 eigens für die Charakterisierung der *Wet spots* abgeteuften Bohrungen BWS-H1 und BWS-H2 (sandige Fazies) sind Feuchtstellen jeweils über mehrere Meter verteilt (Fig. 2.7-2). Ein gezieltes Laborprogramm hat zum Schluss geführt, dass kein klarer Zusammenhang zwischen den optisch an der Bohrlochwand identifizierten Feuchtstellen und strukturellen oder lithologischen Parametern feststellbar ist. Die einzige Stelle, an welcher nicht nur die Bohrlochwand, sondern auch der Bohrkern feucht war, entspricht hingegen einem stark deformierten, tonmineralarmen (Gehalt 21 – 27 Gew.-%) und porösen Bereich mit postdeformativ entstandenem Cölestin (Mazurek et al. 2009a). Erhöhte Porositäten im Bereich von *Wet spots* haben auch Minon et al. (2010) festgestellt. Die in diesen Bohrungen mit Hilfe von Packertests ermittelten hydraulischen Durchlässigkeiten gehören zu den höchsten im Felslabor Mont Terri bestimmten Werten.
- Während des Baus der 'Gallery 08' wurden *Wet spots* im Stollen identifiziert und das entsprechende Gesteinsmaterial beprobt. Alle Proben kamen aus dem Bereich spröder Scherzonen in der tonigen Fazies, waren somit stark deformiert und wiesen erhöhte Porositäten auf (Mazurek et al. 2010a).
- In der Bohrung BHG-B11, welche die tonige Fazies durchteuft, wurde über 2 Jahre (bis zur Überbohrung) ein tropfender Zufluss von salinem Wasser (insgesamt ca. 10 L) beobachtet. Diese Bohrung wurde anschliessend mit Epoxidharz imprägniert und überbohrt. Mazurek et al. (2010b) haben festgestellt, dass zwar Bruchstrukturen die Bohrung durchschlagen, diese ausserhalb der BDZ (*Borehole Disturbed Zone*) aber nur zu einem kleinen Teil harzimprägniert sind und somit eher keine Fliesspfade zum Bohrloch hin darstellen.
- Zuflussraten in Bohrungen in unterschiedlichen Faziestypen des Opalinustons, welche *Wet spots* durchteufen, liegen oft im Bereich von 10 – 20 mL/Tag, können aber bis 500 mL/Tag erreichen. Zuflüsse liefern Porenwasser über Monate bis Jahre.
- Zuflussraten können sich über die Zeit ändern, insbesondere im Verlauf von Exkavationsarbeiten im Felslabor. Dies lässt auf Spannungsumlagerung und damit verbundene poromechanische Effekte (z.B. Auspressen von Wasser wegen Kompaktion) schliessen.
- In der Bohrung BWS-H2 wurde das Porenwasser chemisch analysiert und dessen Zusammensetzung liegt im Trend der lokalen Porenwässer, stellt also keine chemische Anomalie dar. Die festgestellten geringen Gehalte an ^{14}C und evtl. Tritium sind mit grosser Wahrscheinlichkeit Artefakte der Beprobung (Kontamination durch verschiedene Materialien der In situ-Installationen). Auch im Bereich von *Wet spots* anderer Bohrungen liegen die Cl^--Gehalte von Porenwässern im allgemeinen Trend des Felslabors Mont Terri (s. z.B. Mazurek et al. 2010a, b).
- Die Tatsache, dass *Wet spots* räumlich unregelmässig verteilt sind und dass verschiedene Bohrungen deutlich unterschiedliche Flussraten aufweisen, lässt auf eine räumliche Heterogenität der Porendrücke und/oder der hydraulischen Durchlässigkeiten schliessen.

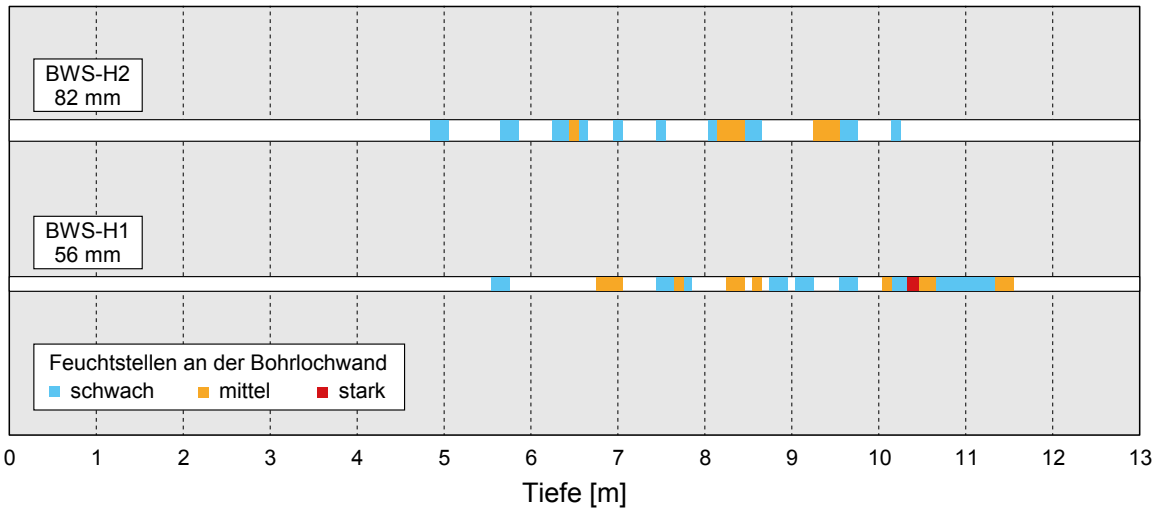


Fig. 2.7-2: Lokalisierung von *Wet spots* in den Bohrungen BWS-H1 und BWS-H2 (nach Mazurek et al. 2009a).

Informationen aus Experimenten zur In situ-Beprobung von Porenwasser im Felslabor Mont Terri

Im Felslabor Mont Terri wurden im Rahmen des WS-Experiments vier 20 – 28 m lange Bohrungen abgeteuft und die tiefsten Intervalle abgepackert, um über Zeiträume von Monaten bis Jahren ins Bohrloch strömendes Porenwasser zu beproben (Pearson et al. 2003). 3 Bohrungen lieferten zeitlich variable Fliessraten bis max. 65 mL/Tag, während die vierte Bohrung trocken blieb. Eine weitere Bohrung zur Beprobung von Porenwasser wurde im Rahmen des PC-C-Experiments untersucht (Vinsot et al. 2006, 2008). Aus den Flussraten wurde die hydraulische Durchlässigkeit abgeschätzt und liegt im Bereich der aus Packertests erhaltenen Werte. Auch hier konnte ein Zusammenhang von Änderungen der Flussraten mit Sprengarbeiten im Felslabor beobachtet werden.

Informationen aus geologischen und hydrogeologischen Kartierungen in der *Galérie Pilote* des Mont Russelin-Strassentunnels

Im Mont Russelin-Strassentunnel, in welchem mehr als 1000 m Opalinuston mit zahlreichen Störungen bei einer Überdeckung von 300 – 400 m durchfahren wird, wurde während des Auffahrens eine gezielte hydrogeologische Detailkartierung im Massstab 1:100 durchgeführt (Bureau Technique Norbert 1992); Tropfstellen oder *Wet spots* wurden im Bereich des Opalinustons nirgends beobachtet.

Informationen aus Experimenten zur In situ-Beprobung von Porenwasser im Felslabor Bure

In gas- oder wassergefüllten Bohrungen im Callovo-Oxfordien des Felslabors Bure, welche über Monate bis Jahre bei Drücken deutlich unterhalb der In situ-Porendrücke gehalten wurden, lagen die Zuflussraten von Porenwasser im Mittel bei 10 – 20 mL/d (Vinsot et al. 2011). Die Porendrücke des ungestörten Gebirges wurden in benachbarten Bohrungen gemessen. Mit einem numerischen Modell wurde aus diesen Daten die hydraulische Durchlässigkeit bestimmt und lag im Bereich der mit Packertests erhaltenen Werte. Zudem wurden hydraulische Gradien-

ten abgeleitet, deren Werte in unmittelbarer Umgebung der Bohrungen Werte > 1000 erreichen können. Zusätzlich zu dieser lokalen Advektion zur Drucksenke wurden auch poromechanische Effekte auf die Porendrücke infolge Spannungsumlagerungen beim Stollenvortrieb festgestellt.

Schlussfolgerungen

Die einzigen Hinweise auf eine lokalisierte Wasserführung in Opalinuston bei einer Überdeckung von > 200 m sind die *Wet spots* im Felslabor Mont Terri. Deren Lokalisierung lässt keinen Zusammenhang mit Mineralogie, Lithologie oder Fazies des Opalinustons erkennen und nur teilweise konnte ein Zusammenhang mit Sprödstrukturen festgestellt werden.

Wet spots sind durch Advektion von Porenwasser zur Drucksenke (Bohrung oder Stollen) verursacht. Die aus den Flussraten abgeschätzten hydraulischen Durchlässigkeiten sind vergleichbar mit denjenigen, welche aus Packertests erhalten wurden. Die Änderung der Flussraten im Verlauf von Exkavationsarbeiten im Felslabor wird als Folge von Spannungsumlagerungen, welche die Porendrücke beeinflussen, interpretiert (poromechanische Effekte). Das nur lokale Auftreten von *Wet spots* deutet auf eine heterogene Verteilung von hydraulischer Durchlässigkeit und/ oder Porendrücken im stollennahen Gebirge hin.

2.7.2 'Brauner Dogger'

Die Wasserführung sowie die Eigenschaften (potenziell) wasserführender Systeme im 'Braunen Dogger' sind in Mazurek (2013a) dokumentiert. Der Grossteil der Daten und Beobachtungen stammt aus den Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1, ergänzt durch Evidenzen aus Oberflächenaufschlüssen im Wutachtal (D). Die Stratigraphie und der interne lithologische Aufbau sind in Bläsi et al. (2013) behandelt.

2.7.2.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen

Der 'Braune Dogger' ist grossenteils tonreich ausgebildet, mit einem Tonmineralgehalt von generell deutlich über 25 Gew.-%. Die einzigen bedeutenden Heterogenitäten sind Eisenoolithe und sandig-kalkige Bänke (vgl. Fig. 2.2-4). Nebst den lithologischen Heterogenitäten gibt es tektonisch bedingte Strukturen. Aufgrund von Struktur-Logging am Bohrkern von Benken wurde allerdings keine einzige Sprödstruktur im Kernmaterial als in situ offen klassifiziert. In Weiach ist eine Anzahl flach liegender Einzelstrukturen dokumentiert, wobei es sich vermutlich um künstliche Kernbrüche handelt. In Schlattingen-1 wurden verschiedene potenziell offene Strukturen festgestellt. Die erhöhte Anzahl von spröden Scherstrukturen hängt wohl mit der Nähe zur Randen-Störung bzw. dem Bonndorf-Bodensee-Hegau-Graben zusammen. Aufschlüsse der Wedelsandstein-Formation im Wutachtal zeigen in den dort mächtigen sandig-kalkigen Bänken zwei bankrechte Bruchsysteme, welche vermutlich ein verbundenes Netzwerk darstellen. Zudem wurden einige steil stehende Störungen mit Versätzen von max. 15 cm beobachtet. Die Übertragbarkeit der Beobachtungen an der Oberfläche in die potenziellen Standortgebiete ist zweifelhaft, insbesondere wegen der lateralen Heterogenität der sedimentären Fazies (sandig-kalkige Bänke sind in den Bohrungen in den Standortgebieten weniger mächtig) sowie der Tatsache, dass sich die Aufschlüsse in steil stehendem Gelände mit rezenten Hangrutschungen befinden, wo auch Dekompaktion und Hangtektonik zum strukturellen Inventar beitragen.

Direkte Hinweise auf eine Wasserführung aufgrund von hydraulischen Packertests, Fluid-Logs und hydrochemischen Anomalien sind spärlich bzw. nicht vorhanden. Hydraulische Durchlässigkeiten sind meist sehr gering ($< 1.3 \times 10^{-11}$ m/s; vgl. Beauheim 2013). Die einzige Ausnahme ist die Wedelsandstein-Formation und die darüber liegende Humphriesioolith-Formation in Schlattingen-1 mit einer Durchlässigkeit von 1.4×10^{-9} m/s. Im Bereich dieses Packerintervalls wurden zwei potenziell offene Strukturen festgestellt.

2.7.2.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen

Aufgrund der verfügbaren Daten lassen sich für den Raum Weiach – Benken – Schlattingen die folgenden Typen (potenziell) wasserführender Strukturen ableiten (Diskussion vgl. Mazurek 2013a):

- Geklüftete sandig-kalkige Bänke
- Verschiebungsflächen
- Störungen
- Adern

Hierbei wurde eine Wasserführung einzig in Verschiebungsflächen tatsächlich beobachtet. Die anderen Typen werden aufgrund lithologisch-struktureller Beobachtungen als potenziell wasserführend betrachtet, da es für eine Wasserführung keine hydraulischen oder hydrochemischen Hinweise gibt. Eisenoolithe werden angesichts der nur lokal erhöhten Karbonatgehalte und der knolligen, lateral beschränkt verbundenen Struktur der kalkigen Bereiche nicht als potenzielle grösserräumige Fliesspfade betrachtet, kleinerräumige Fliesspfade können aber nicht ausgeschlossen werden (Details vgl. Bläsi et al. 2013 und Mazurek 2013a). In Fig. 2.7-3 sind geometrische Konzeptualisierungen aller Typen wasserführender Strukturen im dm-Massstab abgebildet.

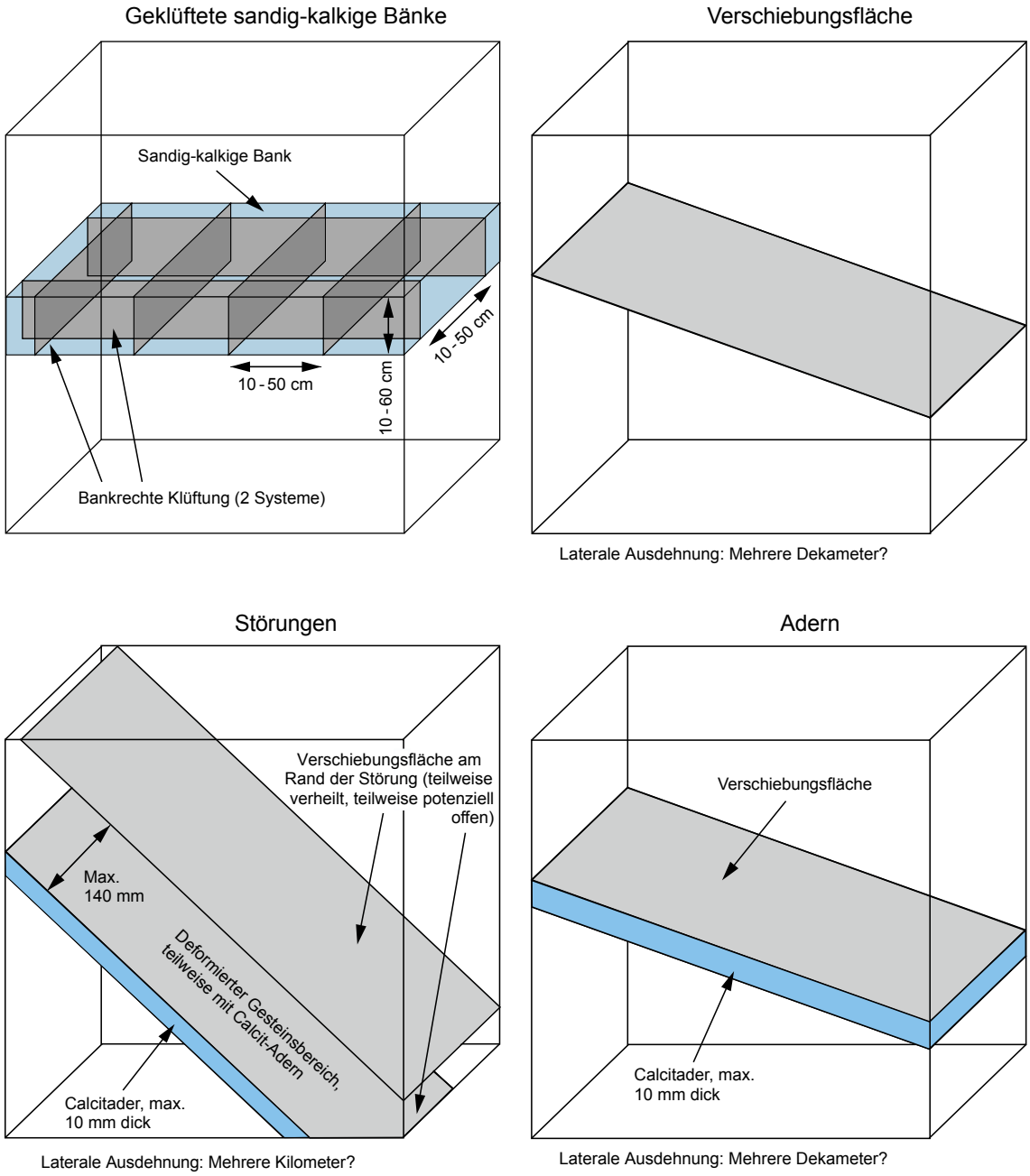


Fig. 2.7-3: Geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen im 'Braunen Dogger' (aus Mazurek 2013a).

2.7.2.3 Grösserräumige Betrachtung von Wasserfliesswegen

Sandig-kalkige Bänke sind die einzigen potenziell wasserführenden Heterogenitäten im Gestein, in welchen ein lateraler Fluss stattfinden könnte. Solche Bänke können gehäuft als Bankabfolgen auftreten. Zur lateralen Ausdehnung dieser Bänke (max. Mächtigkeit 60 cm) bzw. Bankabfolgen gibt es keine direkten Beobachtungen, aber mehrere km wären denkbar.

Alle anderen hypothetischen Exfiltrationspfade sind diskordant verlaufende tektonische Strukturen. Diese durchschlagen die ganze Sequenz, verlaufen also zu einem grossen Teil in den tonmineralreichen Lithologien und zu einem kleinen Teil in den "harten Bänken". Während es Strukturen, welche den gesamten 'Braunen Dogger' diskordant durchschlagen, tatsächlich geben dürfte, ist es sehr unwahrscheinlich, dass sie auch grösserräumig transmissiv sind. In den tonmineralreicheren Lagen ist eine effiziente hydraulische Selbstabdichtung zu erwarten, wofür eine umfangreiche Grundlage empirischer Beobachtungen in Felslabors sowie aus der Ölindustrie besteht (vgl. Kap. 2.5.2 sowie Bock et al. 2010, Fisher et al. 2013).

2.7.2.4 Gültigkeitsbereich der Charakterisierung von Wasserfliesswegen

Die Informationsdichte, die der obigen Charakterisierung zugrunde liegt, erscheint befriedigend für das Standortgebiet Zürich Nordost. Hingegen ist das Standortgebiet Nördlich Lägern einzig durch die Bohrung Weiach repräsentiert, welche sich im nordöstlichen Teil befindet. Meier & Deplazes (2014a) haben aufgrund der Interpretation reflexionsseismischer Daten eine Gliederung des 'Braunen Doggers' in eine Anzahl seismischer Fazies erarbeitet. Die lateralen Grenzen dieser Fazies verlaufen NE-SW bis N-S, können aber nicht klar mit Strukturen im Sockel korreliert werden. Insbesondere erwähnenswert ist eine 'Schwellenfazies', welche den östlichsten Teil des Standortgebiets Nördlich Lägern umfasst und bisher nicht erbohrt worden ist. Die Zuordnung von Lithologien zu dieser seismischen Fazies ist daher mit Ungewissheiten behaftet, aber es werden Sandbarren (küstenparallele, durch Meeresströmungen transportierte Ablagerungen) vermutet. Diese Barren können Quarzsand, Kalkanteile und/oder Eisenoolithe aber auch tonigere Abfolgen dazwischen enthalten. Ausgehend von den eher tonreichen Lithologien in der Bohrung Weiach wird insbesondere der untere Teil des 'Braunen Doggers' gegen Westen kalkiger, was anhand von Oberflächenaufschlüssen (z.B. Acheberg, Dangstetten) wie auch einer lateralen Änderung der seismischen Fazies evident wird. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der 'Braune Dogger' im Standortgebiet Nördlich Lägern laterale Fazieswechsel aufweist, so dass die Information aus der Bohrung Weiach allein nicht als repräsentativ für das gesamte Gebiet betrachtet werden kann. Insofern sind die hier gemachten Schlussfolgerungen bezüglich Wasserführung nur beschränkt lateral extrapolierbar. Zusätzliche Evidenzen aus der Bohrung Riniken, bereits westlich der Aare, sind in Mazurek (2013a) diskutiert.

2.7.3 Effinger Schichten

Die wichtigsten Informationsquellen für das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss – das einzige, in welchem die Effinger Schichten als potenzielles Wirtgestein in Betracht gezogen werden – sind die Bohrungen Oftringen, Gösgen (SB2, KB5a) und Küttigen (-1, -2) sowie die Aufschlüsse im ca. 10 km weit entfernten Steinbruch Jakobsberg. Ergänzende Informationen kommen aus anderen Tiefbohrungen der Nagra sowie aus Erdwärmesondenbohrungen (EWS-Bohrungen). Die Wasserführung sowie die Eigenschaften (potenziell) wasserführender Systeme in den Effinger Schichten sind in Mazurek (2013b) dokumentiert. Die Stratigraphie und der interne lithologische Aufbau sind in Deplazes et al. (2013) behandelt.

2.7.3.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen

Die Effinger Schichten bestehen weitgehend aus Kalkmergeln mit eingelagerten Kalkbänken. Diese sind nicht regelmässig über die Formation verteilt, sondern kommen in bestimmten Bereichen gehäuft vor (Fig. 2.7-4). Kalkbankabfolgen wurden von Deplazes et al. (2013) aufgrund von lithostratigraphischen Aufnahmen und bohrlochgeophysikalischen Tonmineralgehalts-Logs in den Profilen ausgeschieden. In den Kalkbankabfolgen der Bohrungen Oftringen und Gösgen KB5a machen die in Bohrkernen ausgeschiedenen Kalkbänke einen Anteil von ca. einem Drittel oder mehr aus.

In den Bohrungen Oftringen und Gösgen KB5a bzw. SB2 lassen sich die Effinger Schichten wie folgt gliedern (Fig. 2.7-4):

- Die *Kalkmergelabfolgen* (in Oftringen 62 % der Effinger Schichten) enthalten nur untergeordnet Kalkbänke (in Oftringen 0.5 %).
- 5 *Kalkbankabfolgen* kommen in den Bohrungen in ähnlicher Ausbildung vor und enthalten einen Anteil von 35 – 66 % an Kalkbänken mit einer Mächtigkeit > 10 cm. Die unterste Kalkbankabfolge (KBA 6 in Fig. 2.7-4) ist in Oftringen und vor allem in Gösgen eher schwach ausgeprägt.
- Im oberen Teil der Effinger Schichten kommt eine *Wechsellagerung von Kalkmergel- und Kalkbänken* vor, mit einem Anteil der Kalkbänke von 16 – 24 %.
- Die '*Gerstenhübel-Schichten'*, eine besonders kalkige Einschaltung im unteren Teil der Effinger Schichten, sind in den Bohrungen Oftringen, Gösgen und Schönenwerd ca. 2 m mächtig und bestehen in Oftringen aus einer einzigen massiven Kalkbank (Fig. 2.7-5). Gegen Osten findet sich in entsprechender stratigraphischer Position die deutlich mächtigere Kalbankabfolge der Gerstenhübel-Schichten (max. 30.5 m in der Bohrung Schafisheim). An ihrer Typlokalität im Steinbruch Jakobsberg bestehen sie aus zahlreichen Kalkbänken, welche durch dünne mergelige Horizonte getrennt sind.
- Bei der *massiven Kalkbank* am Top der Effinger Schichten bestehen Ungewissheiten bei der Zuordnung bzw. der Definition der Formationsgrenze (vgl. Diskussion in Deplazes et al. 2013). Die Zuordnung dieser Bank zu den Geissberg- oder den Effinger Schichten variiert vermutlich bei den verschiedenen Bohrungen und/oder die Kalkbank ist lateral unterschiedlich ausgeprägt.

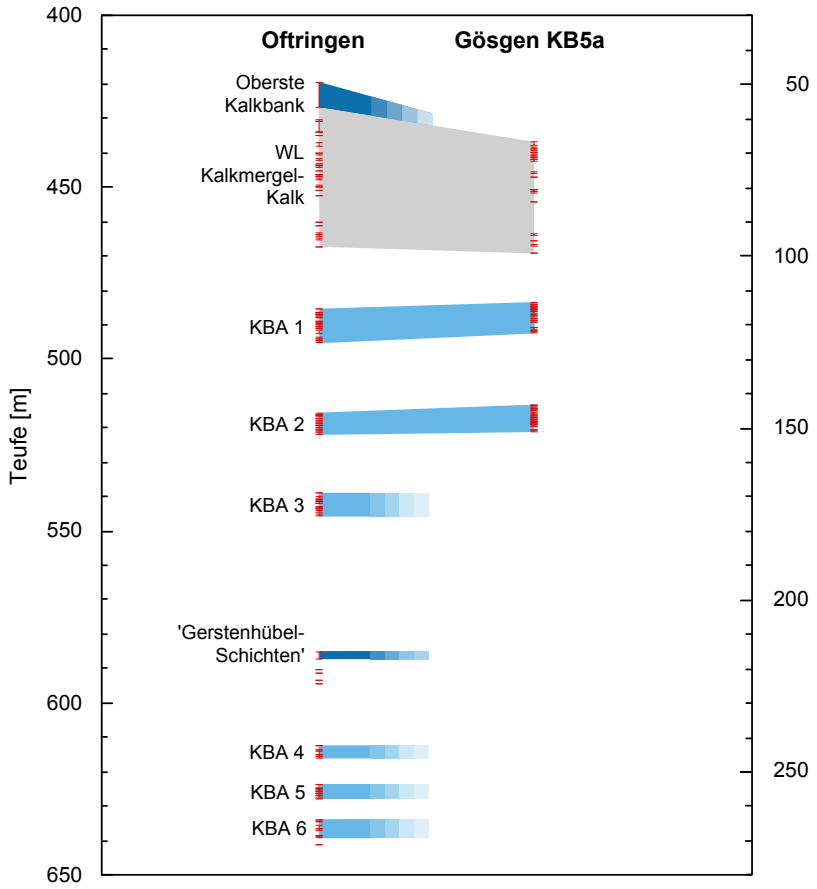


Fig. 2.7-4: Vorkommen von Kalkbänken (rot), Kalkbankabfolgen (KBA, hellblau) sowie weiteren lithologischen Elementen (dunkelblau, grau) in den Kernbohrungen Oftringen (linke Skala) und Gösgen KB5a (rechte Skala) (aus Mazurek 2013b).

Die Bohrung Gösgen KB5a endet bei 156 m. Die Nummerierung der KBA entspricht jener in Mazurek (2013b), welche jedoch für die Konzeptprofile für die Sicherheitsanalyse angepasst wurde (vgl. Fig. 4.3-6).

Tektonische Strukturen in den Bohrungen wurden mittels Kern- und Televiewer-Logging erfasst (Mazurek 2013b). Die Effinger Schichten der Bohrung Oftringen enthalten zahlreiche Sprödstrukturen, welche im Verlauf mehrerer Phasen aktiv waren. Teilweise sind diese Strukturen durch die sehr häufig vorkommenden Calcit-Cölestin-Adern versiegelt, später aber oft wieder reaktiviert. Im Bohrkern lassen sich als potenziell offene Sprödstrukturen zwei verschieden orientierte Systeme von Verschiebungsflächen sowie 2 – 20 cm mächtige Störungen unterscheiden. Die Bohrungen in Gösgen sind ausgesprochen arm an Sprödstrukturen, welche hauptsächlich einzelne Verschiebungsflächen und untergeordnet Klüfte umfassen. Eine Verheilung mit Calcit ist nur vereinzelt feststellbar. In der Meisselbohrung Küttigen-2 ist die Dichte der mittels Televiewer festgestellten Diskontinuitäten drei- bis viermal höher als in den Bohrungen Oftringen und Gösgen. Zudem sind diese Diskontinuitäten wesentlich stärker in kalkreichen Einheiten innerhalb der Effinger Schichten konzentriert (48 % innerhalb von Kalkbankabfolgen, 20 % innerhalb der Gerstenhübel-Schichten). Im Steinbruch Jakobsberg ist das Strukturinventar in den Effinger Schichten eher klein (abgesehen von den Kluftsystemen, die als durch Dekompaktion beeinflusste Strukturelemente interpretiert werden) und umfasst Über-, Ab- und Blattverschiebungen. Im Bohrkern würden diese als Störungen oder Verschiebungsflächen angesprochen. Sie enthalten Aderfüllungen aus Calcit. Die Adern sind grossenteils später wieder aufgebrochen.

Hydrogeologische Daten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In der Bohrung Oftringen sind die hydraulischen Durchlässigkeiten im unteren, stark deformierten Teil der Effinger Schichten (Testintervall 590 – 640 m) etwas erhöht (1×10^{-12} m/s, vgl. Beauheim 2013). Noch höher sind sie in Intervallen, welche die Gerstenhübel-Schichten beinhalten (bis 9×10^{-12} m/s). In letzteren erkennt man auch in Fluid-Logs (Albert & Bläsi 2008) einen diskreten Zufluss, der im Bohrkern einer steilen, offenen Verschiebungsfläche zugeordnet werden kann (Fig. 2.7-5). Ausserhalb dieser Bereiche sind die Durchlässigkeiten in den Effinger Schichten sehr gering ($\leq 6 \times 10^{-14}$ m/s).
- In den Effinger Schichten der Bohrung Gösgen SB2 ist die hydraulische Durchlässigkeit durchwegs $\leq 3 \times 10^{-14}$ m/s. Diese sehr geringen Werte lassen sich durch die Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix erklären, d.h. ein Beitrag diskreter Elemente (Störungen, Klüfte) ist nicht erkennbar. Die Irrelevanz diskreter Elemente wird weiter unterstützt durch die Abwesenheit von Peaks oder Diskontinuitäten der elektrischen Durchlässigkeit in Fluid-Logs (Albert et al. 2009).
- Die weitaus höchste hydraulische Durchlässigkeit (4×10^{-9} m/s) haben Tests in der Bohrung Küttigen-2 ergeben, welche die 27 m mächtigen Gerstenhübel-Schichten beinhalten. In Fluid-Logs (Klump et al. 2008) sieht man einen ausgeprägten Peak im obersten Teil dieses Schichtglieds (nicht aber in der 10 m entfernten Bohrung Küttigen-1).
- In weiteren EWS-Bohrungen sind im Bereich der Gerstenhübel-Schichten teilweise Zuflüsse identifiziert worden (Details in Mazurek 2013b). Ausserdem sind zahlreiche EWS-Bohrungen im Raum Aarau dokumentiert, welche die Effinger Schichten im Tiefenbereich 0 – 300 m durchteufen. In diesen Bohrungen wurden zahlreiche Wasserzutritte festgestellt, wobei deren Zuordnung zu bestimmten Lithologien mit Ungewissheiten behaftet ist.

Aus diesen Daten folgt, dass die Kalke der Gerstenhübel-Schichten unabhängig von ihrer Mächtigkeit einen möglichen horizontalen Fliesspfad darstellen. Die Kalke dieser Einheit sind äusserst tonmineralarm (vgl. Kap. 2.2), so dass kein relevantes Selbstabdichtungsvermögen zu erwarten ist. Ausserhalb der Gerstenhübel-Schichten wurden etwas erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten nur im untersten, stark deformierten Teil der Bohrung Oftringen festgestellt.

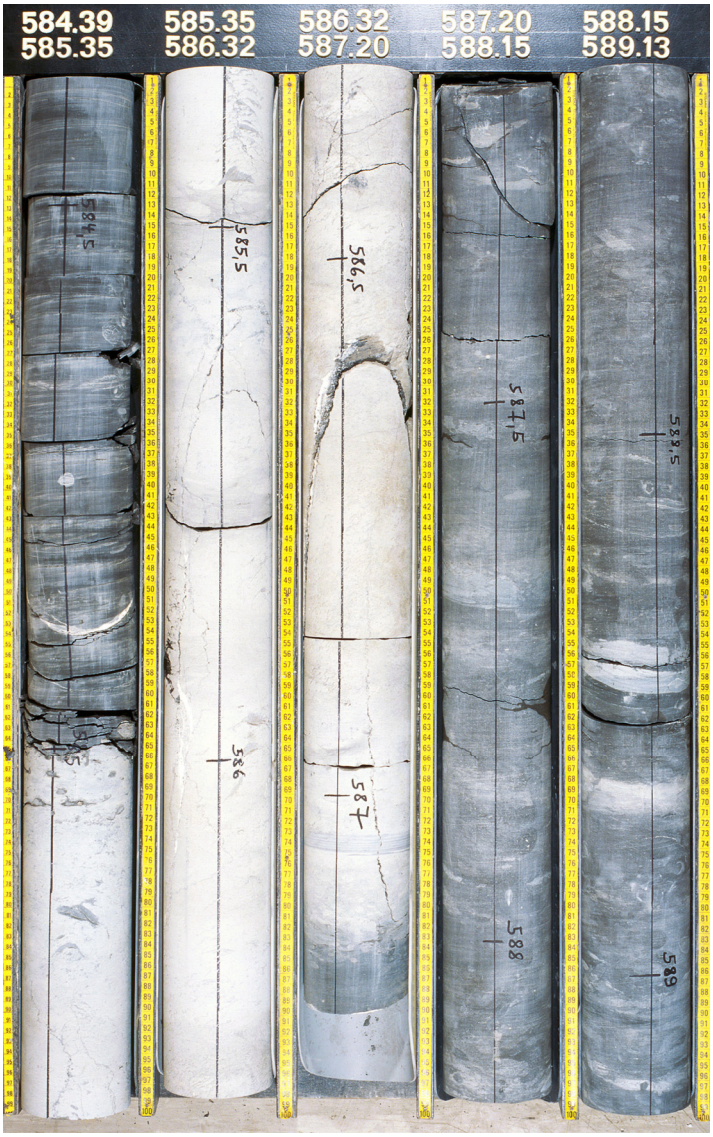


Fig. 2.7-5: Kernfotos im Bereich der Gerstenhübel-Schichten (585.00 – 587.14 m) in der Bohrung Oftringen.

Gut erkennbar ist die wasserführende, steile Verschiebungsfläche bei 586.81 m.

2.7.3.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen

Aufgrund des Kernbefunds wurden auf dem dm-m-Massstab in den Bohrungen Oftringen und Gösgen KB5a folgende Typen von Strukturen unterschieden, welche potenzielle Fliesspfade darstellen (Diskussion vgl. Mazurek 2013b):

- Verschiebungsflächen (2 Untergruppen: SE-fallend und NW- bis W-fallend)
- Störungen
- Klüfte

Verschiebungsflächen und Störungen kommen in allen Lithologien vor, sind aber in Oftringen und vor allem in Küttigen-2 überproportional in Kalkbankabfolgen und in den Gerstenhübel-Schichten vorhanden. In Oftringen kann der Zufluss in den Gerstenhübel-Schichten eindeutig einer Verschiebungsfläche zugeordnet werden (Fig. 2.7-5). Klüfte wurden (nebst dem Steinbruch Jakobsberg) nur in Gösgen KB5a beobachtet. Angesichts der sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten in dieser Bohrung sind sie nicht wasserführend. Möglicherweise sind sie durch oberflächennahe Dekompaktion entstanden und daher in grösseren Tiefen nicht vorhanden. In Fig. 2.7-6 sind geometrische Konzeptualisierungen aller Typen wasserführender Strukturen im dm-Massstab abgebildet.

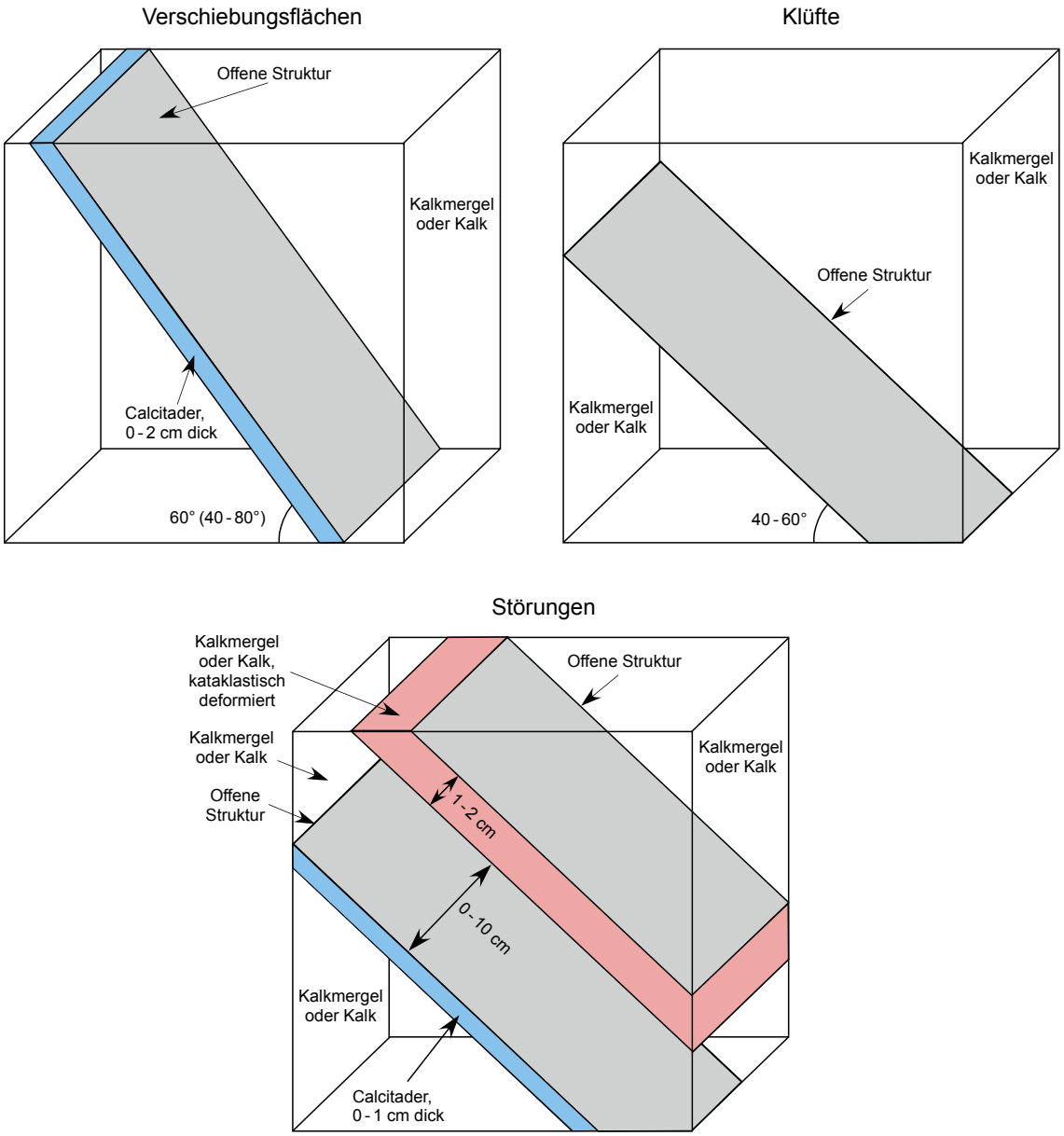


Fig. 2.7-6: Geometrische Konzeptualisierung von (potenziell) wasserführenden Strukturen in den Effinger Schichten (aus Mazurek 2013b).

Im Gegensatz zu den geometrisch einfach aufgebauten Verschiebungsflächen bestehen Störungen aus Netzwerken von Einzelstrukturen und/oder enthalten kataklastisch deformierte Gesteinspartien.

2.7.3.3 Grösserräumige Betrachtung von Wasserfliesswegen

Aufgrund des geologischen Befunds ist grösserräumiger Wasserfluss in lateraler Richtung in den kalkreichen Schichtgliedern der Effinger Schichten denkbar. Sowohl die Gerstenhübel-Schichten wie auch die Kalkbankabfolgen haben laterale Ausdehnungen von vielen km (Deplazes et al. 2013). Die laterale Kontinuität dieser Einheiten wird auch durch reflexionsseismische Daten und Interpretationen unterstützt (Meier & Deplazes 2014b). Insbesondere die Gerstenhübel-Schichten weisen ungeachtet ihrer stark schwankenden Mächtigkeit vielerorts (aber nicht überall) eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit auf, so dass auf ein Netzwerk höher durchlässiger Strukturen geschlossen werden kann, welches trotz Heterogenität grossräumig verbunden ist. Gemäss den Televiewer-Daten liegt in den Bohrungen Oftringen und Küttigen-2 die Frequenz von Diskontinuitäten (Verschiebungsflächen und Störungen) im Bereich von 1/m.

Auch die anderen Kalkbankabfolgen sind prinzipiell als Fliesswege denkbar, auch wenn dies aufgrund der verfügbaren hydraulischen Daten nicht evident ist. Allerdings bestehen sie zu 34 – 80 % aus Kalkmergeln, so dass eine hydraulische Verbindung in der Vertikalen nicht zu erwarten ist. Für geschichtete Gesteinspakete mit Lagen verschiedener Kompetenz gibt es Beobachtungen und Konzepte, die bei Normalbrüchen eine Dilatanz in den Kalkbänken erwarten lassen, was zu einem horizontalem Fluss führen kann (Fig. 2.7-7; Details in Mazurek 2013b). Die einzelnen Kalkbänke in den Effinger Schichten sind aber gering mächtig und die in der Bohrung Oftringen beobachteten Versatzbeträge sind im Bereich von cm, was auf eine beschränkte räumliche Ausdehnung der Scherstrukturen schliessen lässt (Bereich von Metern – wenigen Dekametern). Ob dies zu einem Netzwerk durchlässiger Strukturen innerhalb der Kalkbänke führen kann, ist wenig wahrscheinlich, kann aber nicht völlig ausgeschlossen werden.

Störungen, welche die gesamten Effinger Schichten diskordant durchschlagen, sind nicht auszuschliessen. Im Steinbruch Jakobsberg wurde eine Abschiebung mit einem Versatz von ca. 0.5 m und einer Ausdehnung von ≥ 70 m beobachtet. Da diskordante Strukturen aber zum grösseren Teil in Kalkmergeln verlaufen, in welchen Selbstabdichtung zu erwarten ist, sind sie als Fliesspfade in der Vertikalen wenig wahrscheinlich.

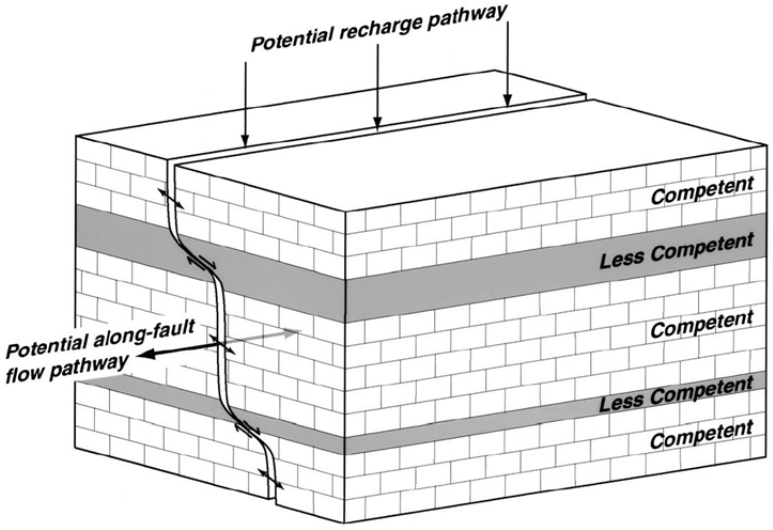


Fig. 2.7-7: Geometrisches Konzept für Spröddeformation in geschichteten Medien nach Ferrill & Morris (2003).

Durch progressive Abschiebung entstehen innerhalb der kompetenten Lagen dilatante Öffnungen, welche laterale Wasserfliesswege darstellen können.

2.7.3.4 Fliesswege infolge Verkarstung

In den Effinger Schichten sind zahlreiche Karstphänomene bekannt und in Laws & Deplazes (2007) beschrieben. Weitere Beobachtungen und Argumente sind in Mazurek (2013b) dokumentiert. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Karstphänomene in den Effinger Schichten in Oberflächennähe, bis zu einer Tiefe von max. 200 m, beobachtet worden sind. In grösserer Tiefe sind solche Phänomene nicht bekannt[16]. Zusätzlich wären auch Karsterscheinungen, die mit der alttertiären Erosion zusammenhängen, denkbar. Ein solcher Paläokarst kann heute prinzipiell auch in grösserer Tiefe vorkommen. In der Umgebung des Standortgebiets Jura-Südfuss wurde Paläokarst einzig in den Geissberg-Schichten beobachtet (Mazurek et al. 2012), nicht aber in den Effinger Schichten.

Hypogener, also vom infiltrierenden Oberflächenwasser unabhängiger Karst (Klimchouk 2007) wurde in der Schweiz bis heute noch nie eindeutig nachgewiesen (pers. Mitt. P.-Y. Jeannin), er kann aber in den Kalkbankabfolgen der Effinger Schichten nicht ausgeschlossen werden. Dies insbesondere, weil im Standortgebiet Jura-Südfuss die dafür nötigen Verhältnisse möglich sind (Mischzonen von Tiefengrundwässern unterschiedlicher hydrochemischer Zusammensetzung, z.B. aus dem Molassebecken, dem Faltenjura, der Born-Engelberg-Struktur).

2.7.4 Helvetische Mergel

Die Datenbasis zur Charakterisierung der wasserführenden Strukturen bilden das Kernmaterial und die hydrogeologischen Untersuchungen in den Bohrungen im Standortgebiet Wellenberg (Nagra 1997, Mazurek 1996, Mazurek et al. 1998). Methodisch unterscheiden sich die Untersuchungen von denjenigen in der Nordschweiz insofern, als in den Fluid-Logs zahlreiche diskrete Zuflusspunkte identifiziert werden konnten (116 – 119 in den Wirtgesteinen), was die Basis für die geologische Charakterisierung anhand des Kernmaterials bildete. Es konnten also tatsächlich wasserführende Strukturen betrachtet werden, wogegen in der Nordschweiz die Charakterisierung zum grossen Teil auf *potenziell* wasserführende Strukturen beschränkt blieb, da hydrogeologische Anzeichen erhöhter Durchlässigkeit selten sind. Grösserräumige Aspekte der Wasserführung wurden unterstützt durch Kartierungen an der Oberfläche (Möri & Bossart 1996).

2.7.4.1 Geologische und hydrogeologische Grundlagen

Ähnlich den Effinger Schichten werden die Helvetischen Mergel von mergeligen Lithologien dominiert (vgl. Kap. 2.2), und ebenso beinhalten sie zahlreiche Kalkbänke und Kalkbankabfolgen. Ihre tektonische Geschichte ist wesentlich komplexer, zumal die Palfris-Formation ein bedeutender Abscherhorizont bei der helvetischen Deckenbildung war (Hänni & Pfiffner 2014). Die tertiären Wirtgesteinseinheiten der Axen-Decke sind intern weniger stark deformiert, möglicherweise wegen der geringeren Transportdistanz bei der Bildung des Deckenstapels. Die maximale Versenkungstiefe von ca. 10 km und eine Temperatur von 200 – 250 °C (Nagra 1997, Diamond 1998) haben zu einer duktilen Deformation, einer wesentlich stärkeren Kompaktion und Überkonsolidierung der Gesteine geführt.

---

[16] In Gebieten mit steil stehenden Effinger Schichten und erhöhtem topographischem Relief (Faltenjura) geben linear angeordnete Dolinenreihen an der Oberfläche (vgl. Figur 4.2-3 in Nagra 2008) Hinweise, dass die Verkarstung entlang Kalkbankabfolgen möglicherweise auch in grössere Tiefen reichen könnte.

Heute wasserführende Strukturen sind allesamt bei späteren Deformationen im spröden Bereich entstanden. Das derart entstandene Netzwerk ist in den obersten Hunderten von Metern hydraulisch verbunden. Der mittlere Abstand zwischen Zuflusspunkten nimmt mit der Tiefe zu, und in grösserer Tiefe hat ein grosser Teil der Strukturen keine Bedeutung für die Wasserführung. Karst ist in den Helvetischen Mergeln am Wellenberg nicht beobachtet worden und wird auf Grund der beschränkten Kontinuität auch in den Kalkbankabfolgen in relevanter Tiefenlage nicht erwartet[17].

Auf der Basis zahlreicher Packertests und Fluid-Logs wurden Transmissivitäten bestimmt und daraus mit Modellansätzen effektive hydraulische Durchlässigkeiten berechnet (Fig. 2.5-6; Nagra 1997). Unterhalb eines mehrere 100 m mächtigen Bereichs mit erhöhten Durchlässigkeiten sind die Werte konstant im Bereich von 1×10^{-11} bis 1×10^{-13} m/s. Die Intensität der Spröddeformation bzw. die Häufigkeit von Störungen zeigt hingegen keine systematische Tiefenabhängigkeit. Daraus wird geschlossen, dass diese Strukturen erst durch die sinkende Auflast im Zuge der Hebung und Erosion erhöhte Durchlässigkeiten erhalten haben und unterhalb der Dekompaktionszone hydraulisch wenig bis gar nicht wirksam sind. Die beobachteten hydraulischen Unterdrücke (Vinard et al. 1993) belegen die grossräumig sehr geringe Durchlässigkeit in diesem Bereich.

2.7.4.2 Klassifikation und geometrische Konzeptualisierung von wasserführenden Strukturen

Aufgrund der hydrogeologischen Informationen wurden Bohrkerne im Bereich von diskreten Zuflusspunkten strukturell und mineralogisch charakterisiert. Im Wirtgestein lassen sich die folgenden Typen wasserführender Strukturen definieren (relative Häufigkeit in %):

- Typ 1 (55 %): Störungen (in Nagra 1997 als kataklastische Scherzonen bezeichnet)
- Typ 2 (7 %): Dünne diskrete Scherzonen
- Typ 3 (31 %): Kalkmergel-/Kalkbänke mit drusigen Adern
- Typ 4 (6 %): Klüfte in Tonmergeln und Mergeln.

Geometrische Konzeptbilder dieser Strukturtypen sind in Fig. 2.7-8 wiedergegeben. Weitere Illustrationen finden sich in Nagra (1997) und Mazurek (1996).

Typ 1: Störungen (kataklastische Scherzonen)

Störungen kommen hauptsächlich in den tonmergeligen Partien des Wirtgesteins vor. Sie sind charakterisiert durch das Vorkommen von *Fault breccias* oder *Fault gouges* (Störungsbrekzien oder Gesteinsmehl), die auf eine bedeutende Scherbewegung hinweisen. Des Weiteren ist das Gestein in der Nähe von Störungen in verschiedenem Ausmass aufgelockert (Auflockerungszone, *Damage zone*). Im Wirtgestein sind Störungen der häufigste Zuflusstyp. Aufgrund der variablen, teilweise beträchtlichen Mächtigkeit solcher Bruchstrukturen (bis 12 m) ist darauf zu schliessen, dass ihre Grösse (definiert durch Länge, Mächtigkeit und Versatz) über mehrere Grössenordnungen variieren kann.

---

[17] Karstbildung wäre theoretisch denkbar im Fall einer grösseren, kalkigen Fremdgesteinsschuppe, welche bis in den oberflächennahen Bereich reicht.

Typ 2: Dünne diskrete Scherzonen

Bei diesen Strukturen handelt es sich um ca. 0.5 – 2 cm mächtige, streng planare Schervenen, die in späten Phasen der neoalpinen Deformation entstanden sind. Oft bilden sie die Begrenzung duktiler Scherzonen oder sie sind ganz innerhalb duktiler Scherzonen anzutreffen. Der interne Aufbau beinhaltet die gebänderte, calcitdominierte Schervene mit tonmineralreichen Zwischenlagen. Die grosse Mehrheit der dünnen diskreten Scherzonen enthält keine offenen Trennflächen und ist somit als Wasserfliessweg nicht relevant. Eine Minderheit wurde hingegen spröd reaktiviert und offene Bruchflächen mit Striemungen zeigen eine spröde Scherbewegung an. Die wasserführende Diskontinuität liegt meist am Kontakt zwischen Schervene und Gesteinsmatrix. Dünne diskrete Scherzonen wurden vor allem in der Palfris-Formation beobachtet, und nur dort sind sie auch transmissiv.

Typ 3: Kalkmergel-/Kalkbänke mit drusigen Adern

Kalkmergel-/Kalkbänke mit drusigen Adern zeigen meist wenig Anzeichen von spröder Scherdeformation (mit Ausnahme von allfälligen Rutschharnischen), d.h. es fehlen *Fault gouges*, eine aufgelockerte Wirtgesteinsmatrix wie auch das den Scherzonen eigene Muster oft unregelmässig verlaufender verästelter Scherflächen. Durch lokale, drucklösungsbedingte Stofftransporte wurden die bankrechten Zerrstrukturen zumindest teilweise von Calcit verfüllt, es kam also zu Aderbildungen. Die Adern setzen sich nicht in die inkompetenten Tonmergel fort, d.h. ihr Vorkommen ist weitgehend auf die kompetenten Schichtglieder beschränkt. Da sich solche Strukturen nur in einem geschichteten Medium mit Kompetenzkontrasten zwischen den einzelnen Lagen ausbilden, ist ihr Vorkommen im Wirtgestein auf die kretazischen Einheiten (Palfris-Formation, Vitznau-Mergel) beschränkt, während sie in den eher homogenen tertiären Einheiten (Stad-Formation / 'Globigerinenmergel', ein Teil der Hohgant-Formation / 'Schimberg-Schiefer') kaum vorkommen. In den meisten Fällen sind die drusigen Hohlräume nicht über mehr als einige dm vernetzt und somit nicht transmissiv. Eine Minderheit der drusigen Adern kann hingegen mit Zuflusspunkten korreliert werden, wahrscheinlich durch Verbindung mit anderen wasserführenden Strukturen in der näheren Umgebung.

Typ 4: Klüfte in Tonmergeln und Mergeln

Wenn auch quantitativ sehr untergeordnet, wurden in den tonmergeligen und mergeligen Lithologien aller Wirtgesteinsformationen Klüfte ohne erkennbare Scherbewegung beobachtet. Solche Klüfte sind im Gegensatz zu den verästelten Störungen einfach aufgebaut und bestehen meist aus einer einzigen, oft steil stehenden, recht planaren Fläche, die das Gestein durchschlägt. Teilweise kann man auch eine subparallele Kluftschar mit Kluftabständen im dm-Bereich feststellen. Diese Klüfte haben keine Kluftbeläge aus neoalpinen Calcitgenerationen (es sei denn, sie reaktivieren eine bestehende Ader) und sind vermutlich jünger (möglicherweise syngenetisch mit der oben beschriebenen Kataklase). Nur an wenigen Stellen konnte ein Zufluss eindeutig solchen Strukturen zugeordnet werden.

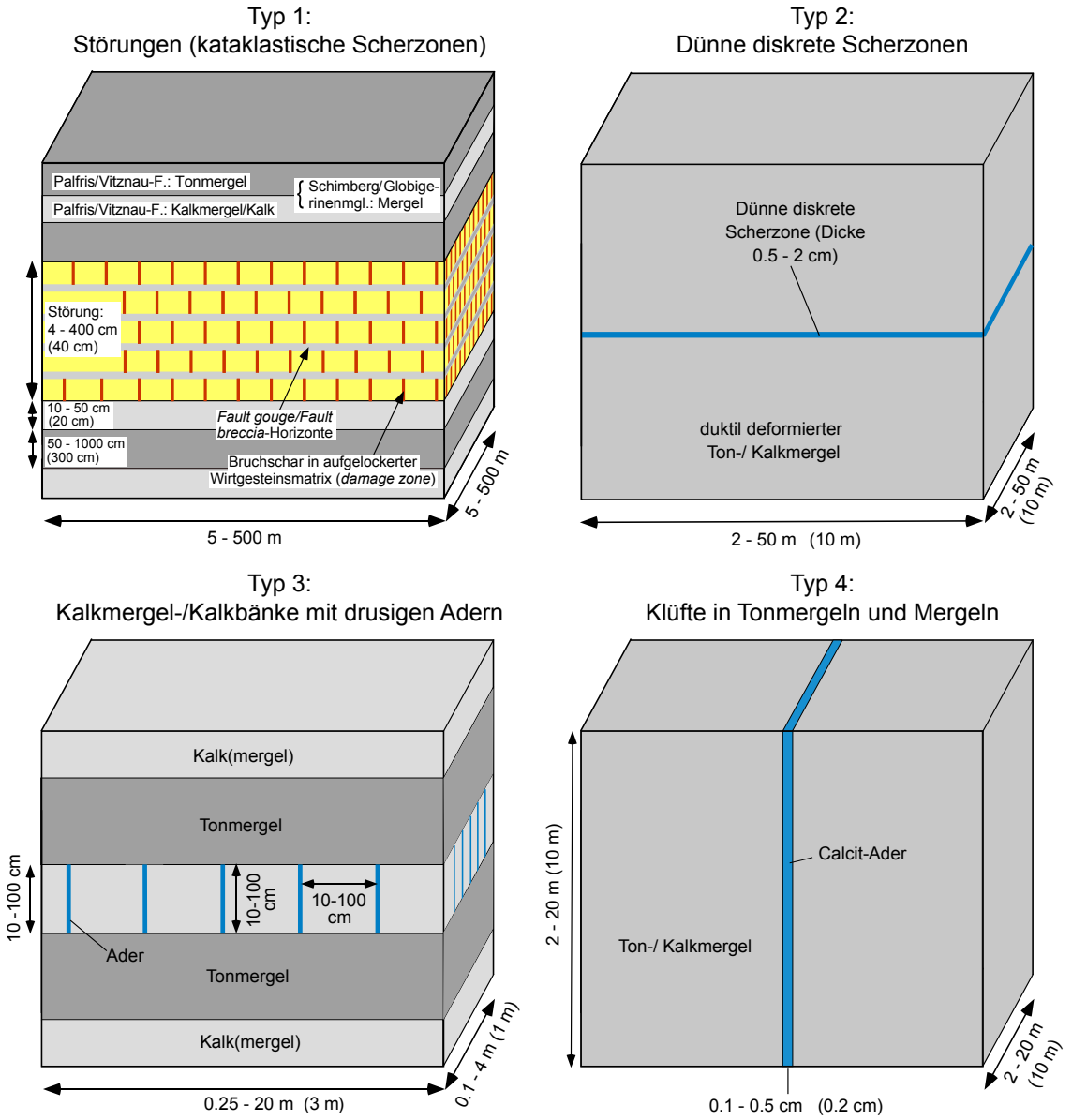


Fig. 2.7-8: Geometrische Konzeptualisierung von wasserführenden Strukturen in den Helvetischen Mergeln (Nagra 1997).

2.7.4.3 Grösserräumige Betrachtung von Wasserfliesswegen

Im Bereich der Dekompaktionszone bilden die wasserführenden Strukturen ein verbundenes Netzwerk. Dieses wird dominiert von Störungen, deren Skalen vermutlich über Grössenordnungen variieren und deren Transmissivität intern sehr variabel sein kann (Beispiele in Fig. 2.7-9 und 2.7-10). Für die Kluftnetzwerkmodellierung wurden verschiedene Konzeptualisierungen von Störungen verwendet (mit und ohne lineare, durchlässige Bereiche entlang von *Fault steps*; vgl. Fig. 2.7-10). Es hat sich aber gezeigt, dass die berechneten effektiven hydraulischen Durchlässigkeiten weitgehend unabhängig von den Annahmen zur kleinräumigen Geometrie der Einzelstrukturen sind (Mazurek et al 1998).

Die Ausdehnungen aller anderen Typen wasserführender Strukturen sind eher klein. Mit der Tiefe sinken die Transmissivitäten aller Strukturen, und die Existenz der Unterdruckzone zeigt die Abwesenheit eines hydraulisch verbundenen Netzwerks in grösserer Tiefe.

Wie in den Effinger Schichten kommen die Kalkbankabfolgen als grösserräumige Fliesspfade in Betracht. Allerdings ist ihre laterale Kontinuität angesichts der alpinen Deformation beschränkt, und Korrelationen von Kalkbankabfolgen zwischen den Bohrungen sind nur teilweise machbar (vgl. Fig. 2.7-11 links). Dennoch sind sie als Fliesspfade über Hunderte von Metern nicht auszuschliessen, zumal die Mächtigkeit der einzelnen Kalkbänke beträchtlich sein kann (vgl. Fig. 2.7-11 rechts).

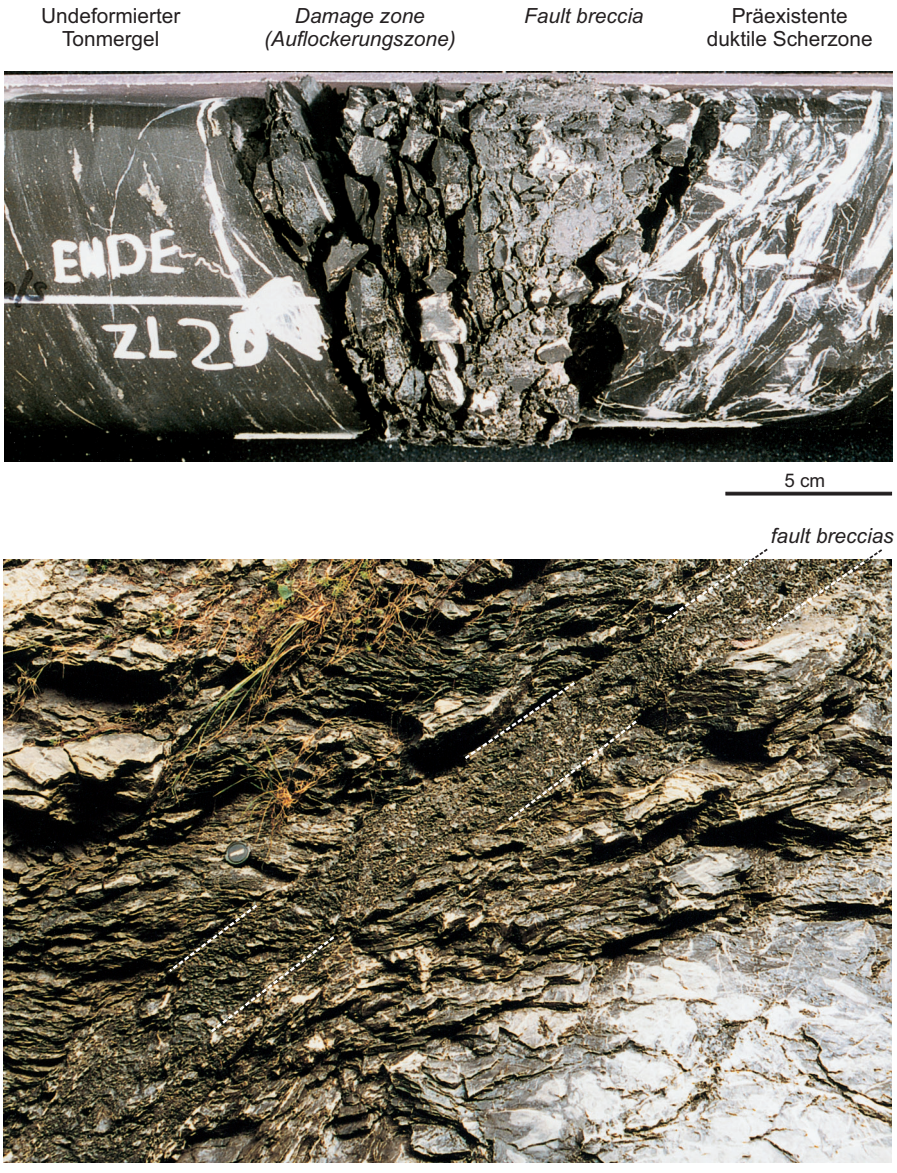


Fig. 2.7-9: Geometrie von Störungen in der Palfris-Formation (Nagra 1997).

Oben: Störung entlang der Grenze einer älteren duktilen Scherzone. Die mehrere cm mächtige *Fault breccia* ist einseitig von einer Auflockerungszone umgeben. Kernprobe SB4a/s 304.40 m. Unten: Mächtige Störung in einem Aufschluss der Palfris-Formation im Sulzbachgraben (Haldibach). Bildbreite 2.5 m.

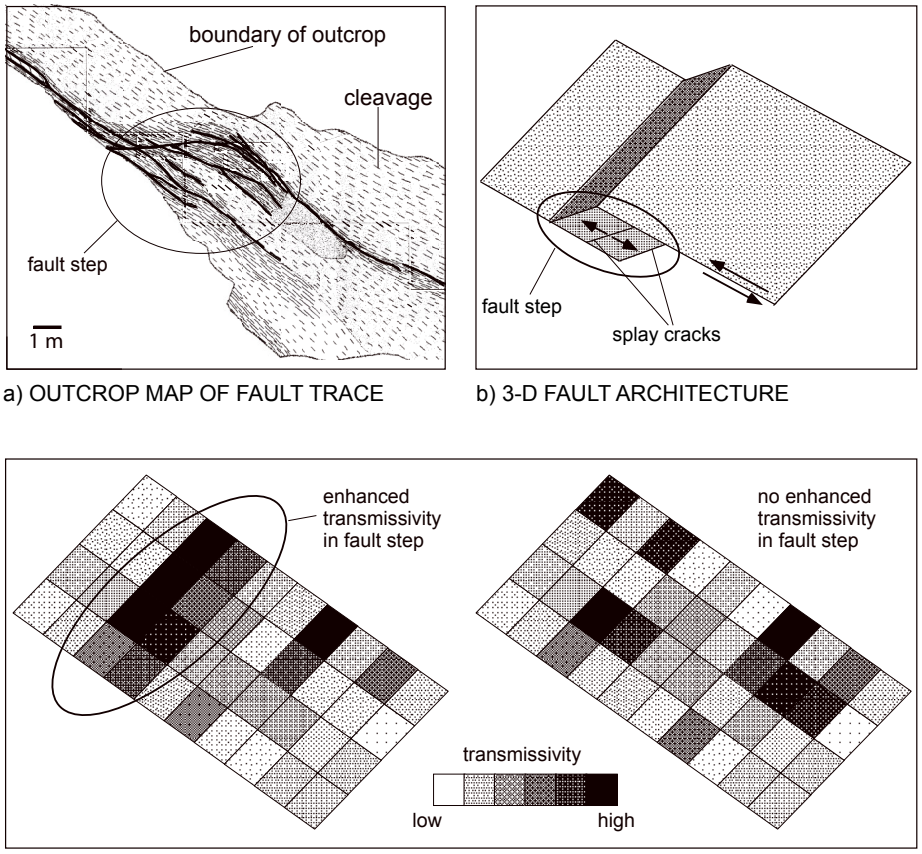


Fig. 2.7-10: Strukturelle Karte, mechanistische Interpretation und mögliche modellhafte Konzeptualisierungen einer Störung in der Palfris-Formation.

Aus Mazurek et al. (1998).

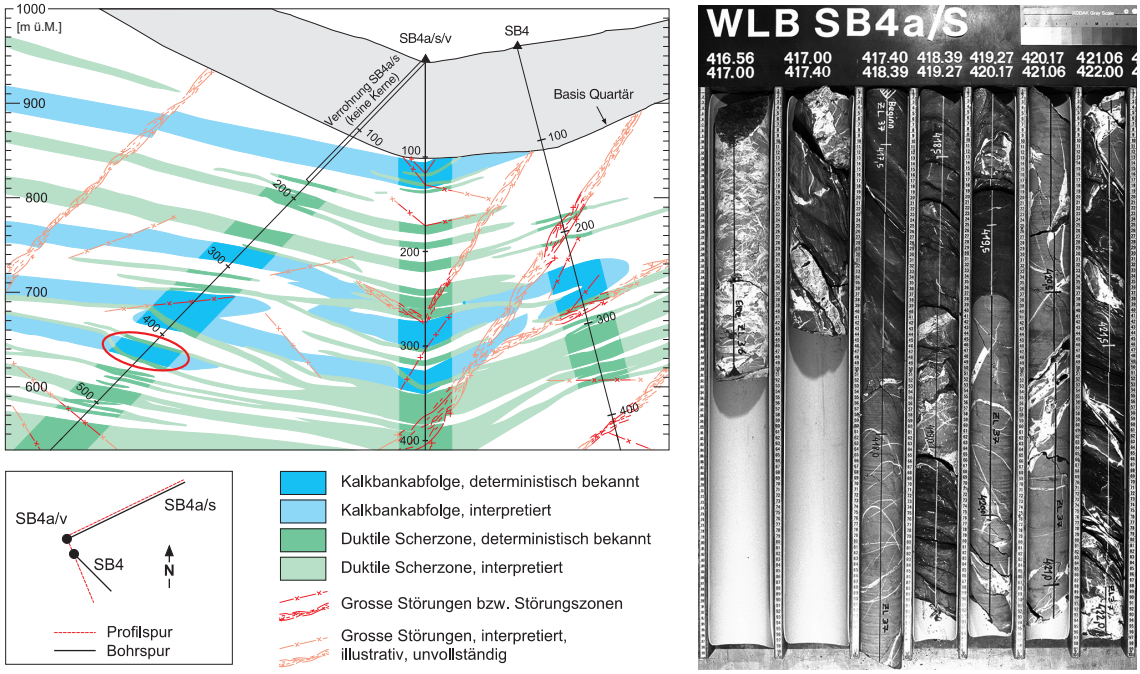


Fig. 2.7-11: Korrelationsversuch im Bereich der Bohrungen SB4 – SB4a/v – SB4a/s mit Kalkbankabfolgen sowie duktilen und spröden Grossstrukturen (Nagra 1997).

Rechts ein Beispiel einer Kalkbankabfolge mit z.T. mächtigen, durchaderten und drusigen Kalkbänken (Bohrkern-Fotoarchiv der Nagra). Die Position des rechts gezeigten Kernabschnitts ist im Profil rot markiert.

2.8 Unabhängige Evidenzen

Die Charakterisierung der Wasserführung und der Exfiltrationspfade in den Wirtgesteinseinheiten stützt sich weitestgehend auf hydraulische Tests und geologische Beobachtungen am Bohrkern (Kap. 2.5.1) und im Aufschluss (Kap. 2.7). Hier werden weitere Systemeigenschaften diskutiert, welche zusätzliche, unabhängige Informationen zur Wasserführung und den hydrogeologischen Eigenschaften liefern.

2.8.1 Tracerprofile in Porenwässern

Untersuchungen an Porenwässern gering durchlässiger Sequenzen, welche auch potenzielle Wirtgesteine beinhalten, bestehen für zahlreiche Tiefbohrungen und Tunnelprofile. Profile von Porenwasser-Tracern durch gering permeable Einheiten können als Naturanaloga verstanden werden, welche Informationen über Transportprozesse und -raten über grosse räumliche und zeitliche Massstäbe liefern. Da sie in den potenziellen Standortgebieten selbst erhoben werden können, bestehen keine Einschränkungen bezüglich Übertragbarkeit, wie sie für andere Naturanaloga typisch sind.

Gimmi & Waber (2004) und Gimmi et al. (2007) haben die Profile für Cl^- und Wasserisotope der Bohrung Benken interpretiert und gefolgert, dass die räumliche Verteilung dieser Tracer als Folge rein diffusiven Transports erklärt werden kann. Mazurek et al. (2009b, 2011) und Koroleva et al. (2011a) haben eine Vielzahl von Tracerprofilen in Mitteleuropa kompiliert und mittels Modellrechnungen den Stofftransport quantifiziert. Unter den untersuchten Standorten

waren u.a. die Bohrung Benken, das Felslabor Mont Terri sowie das Tunnelprofil des Mont Russelin (jeweils Gesteinsabfolgen im Dogger ± Lias, Keuper). All diese Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die beobachteten Tracerprofile am besten durch reine Diffusion erklären lassen, wogegen eine angenommene (und noch so kleine) advektive Komponente in vertikaler Richtung die Beobachtungen schlechter reproduziert (Beispiel in Fig. 2.8-1). Zudem lagen die aus den Rechnungen erhaltenen Aufbauzeiten der Profile jeweils innerhalb der paläohydrogeologisch plausiblen Zeitfenster. Daraus kann geschlossen werden, dass die im Labor an kleinen Proben bestimmten Diffusionskoeffizienten, welche die Aufbauzeiten mitbestimmen, auch auf der Formationsskala gültig sind. In der neueren Bohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a, b) wurden für Cl^- und Wasserisotope Tracerprofile vorgefunden, welche denjenigen in der ca. 10 km westlich gelegenen Bohrung Benken sehr ähnlich sind, so dass in diesem Gebiet auf ein lateral weit erstrecktes System mit ähnlicher Entwicklungsgeschichte geschlossen werden kann.

Ausserdem wurden Cl^--Gehalte in den Einheiten zwischen dem Malm- und dem Muschelkalk-Aquifer der Bohrungen Weiach, Riniken und Schafisheim bestimmt, um weitere Daten zu Tracerprofilen zu erhalten (Meier & Mazurek 2011). Angesichts der Schwierigkeit, verlässliche Porositätswerte an den Jahrzehnte alten Bohrkernen zu erhalten, sind die Resultate dieser Untersuchungen mit beträchtlichen analytischen Fehlern behaftet. Dennoch konnten die Salinitätsbereiche, die für die anderen Bohrungen abgeleitet wurden, bestätigt werden, und es wurden keine Hinweise gefunden, welche der Interpretation bezüglich Dominanz von diffusivem Transport widersprechen würden.

Systematische Verläufe von Tracerprofilen wurden auch in den Effinger Schichten der Bohrungen Oftringen und Gösgen KB5a beobachtet (Cl, $^{18}O/^{2}H$, He; Mazurek et al. 2012), auch wenn diese wegen unvollständiger Information über die Verhältnisse in den einbettenden Aquiferen nicht quantifiziert werden konnten.

Für die Helvetischen Mergel im Standortgebiet Wellenberg haben Waber et al. (2013) ein Profil der Cl^--Gehalte sowie von $\delta^{37}Cl$ in Poren- und Grundwässern der Bohrung SB1 untersucht und aus den Profilformen geschlossen, dass Cl^--Transport durch Diffusion dominiert wird. Die Ähnlichkeit der $\delta^{37}Cl$-Werte von neoalpinen Fluideinschlüssen in Calcit, von Poren- und von Grundwässern deutet auf eine gemeinsame Herkunft aller Wässer, welche sich seit der neoalpinen Orogenese in einem bis auf diffusiven Stofftransport geschlossenen System entwickelt haben. Aufgrund der Ähnlichkeit der chemischen und isotopischen Zusammensetzung von Fluideinschlüssen und tiefen Grundwässern (Diamond 1998, Mazurek 1999) können die heute in tieferen Bereichen des Standortgebiets Wellenberg vorgefundenen Na-Cl-Wässer als Relikte neoalpiner Fluids interpretiert werden, Anzeichen für Beimischungen allochthoner Wässer fehlen.

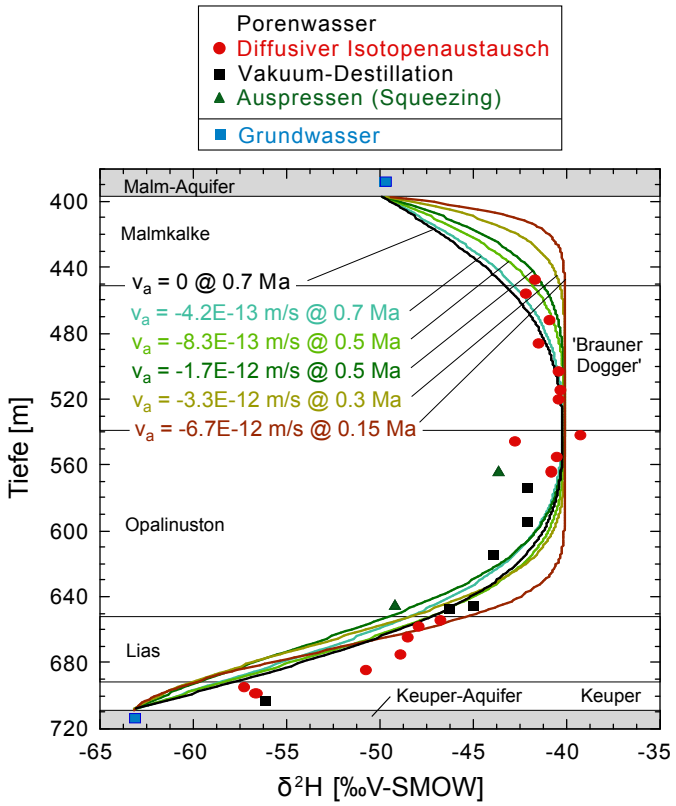


Fig. 2.8-1: Profil von δ^2H in der Bohrung Benken und Resultate von advektiv-diffusiven Modellrechnungen (farbige Kurven).

v_a sind im Modell angenommene, gegen oben gerichtete Advektionsgeschwindigkeiten, gefolgt von den Aufbauzeiten, um den besten Fit auf die Daten zu erhalten. Nach Mazurek et al. (2011).

2.8.2 Stockwerkbau der Aquifere

Das Tertiär und das Mesozoikum der Nordschweiz enthalten mehrere Aquifer-Schichten, welche durch gering permeable, tonmineral- und/oder evaporitreiche Abfolgen getrennt werden. Die Grundwässer dieser Aquifere unterscheiden sich in ihren chemischen und isotopischen Zusammensetzungen und zeigen formationsspezifische Charakteristika (Waber et al. 2014, Kapitel 4.7 in Dossier V). Aus diesem Grund lässt sich die Herkunft allfälliger Mischungen von Wässern aus verschiedenen Aquiferen gut bestimmen. Waber et al. (2014) kommen aufgrund hydrochemischer und isotopenhydrogeologischer Argumente zum Schluss, dass zwischen dem nordöstlichen Rand des Faltenjuras und dem Bonndorf-Hegau-Bodensee-Graben der Stockwerkbau der Aquifere ungestört ist, d.h. es wurden keine Hinweise auf hydraulisch aktive Verbindungen zwischen den Aquiferen identifiziert, welche zu Mischungen von Wässern verschiedener Provenienz geführt hätten. Opalinuston und 'Brauner Dogger' bilden somit zusammen mit dem Lias in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Zürich Nordost und Südranden eine effiziente hydraulische Barriere zwischen den Aquiferen im Hangenden (Malm) und im Liegenden (Muschelkalk). Innerhalb des Falten- und Tafeljuras ist die Situation komplexer und es bestehen zumindest lokale Verbindungen zwischen den Aquiferen.

2.8.3 Anomale Drücke

In den Wirtgesteinen der Nordschweiz wurden gemäss Packertests und Langzeitbeobachtung oft Über- oder Unterdrücke festgestellt (Beauheim 2013). Allerdings ist es in vielen Fällen nicht klar, ob diese Beobachtungen den natürlichen Zustand widerspiegeln oder von Artefakten beeinflusst sind (z.B. Bohrlochinstabilität, Quellung, Osmose, thermisches Ungleichgewicht). Insofern ist eine weitergehende Interpretation der Unterdrücke schwierig und oft nicht belastbar.

Im Standortgebiet Wellenberg ist die dort beobachtete Unterdruckzone derart stark ausgeprägt, dass ihr natürlicher Ursprung ausser Zweifel steht (Nagra 1997, Beauheim 2013). Sie korreliert räumlich mit dem Bereich der Na-Cl-Wässer, deren unterirdische Verweilzeiten im Bereich von Millionen von Jahren liegen und sie liefert ein weiteres Argument für die grossräumig sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit in diesem Bereich. Diese Schlussfolgerung behält ihre Gültigkeit, auch wenn die Mechanismen, welche zu diesem Zustand geführt haben, nicht abschliessend geklärt sind. Vinard et al. (2001) erklären die Unterdrücke hauptsächlich mit dem Entfernen der Gletscherauflast im späten Pleistozän, wogegen Diamond (1998) aufgrund der Analogie zu Unterdrücken, welche in neoalpinen Flüssigkeitseinschlüssen beobachtet worden sind, eine wesentlich längere Entstehungsgeschichte vorschlägt.

3 Barriereneigenschaften der Rahmengesteine

Dieses Kapitel enthält Beschreibungen und Ergebnisse von Feld- und Labormessungen in den oberen und unteren Rahmengesteinen, die nicht gleichzeitig eine Wirtgesteinsfunktion haben und deshalb in Kap. 2 beschrieben sind. Gegenüber den Wirtgesteinen sind die Rahmengesteine projektbedingt weniger detailliert charakterisiert; das Schwergewicht liegt auf der Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine. Die abgeleiteten Referenz- und Eckwerte der Eingabeparameter für die Dosisberechnungen sind in Kap. 4 zu finden.

3.1 Lithofazielle Einheiten der Rahmengesteine

In diesem Kapitel werden die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss, d.h. die Passwang-Formation und die Unteren Acuminata-Schichten sowie die unteren Rahmengesteine des Opalinustons in allen Standortgebieten der Nordschweiz erläutert. Die lithofaziellen Einheiten der restlichen als obere Rahmengesteine ausgeschiedenen Gesteine in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern (Opalinuston, 'Brauner Dogger', Wildegg-Formation bzw. Effinger Schichten und Birmenstorfer Schichten) wurden bereits in Kap. 2 charakterisiert (vgl. Fig. 1.2-1)[18]. Die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg haben keine Rahmengesteine; diese Wirtgesteine entsprechen dem gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Die **Rahmengesteine unterhalb des Opalinustons** werden in der Nordschweiz in fünf lithofazielle Einheiten Toniger/Kalkiger Lias, 'Arietenkalk', Toniger Keuper, Keuper-Aquifer und 'Gipskeuper' gemäss Traber (2013) unterteilt[19]:

- Der Tonige Lias (TL) reicht von der Basis des Opalinustons bis zum Top des 'Arietenkalks' und beinhaltet hauptsächlich tonige und mergelige Gesteine. Er besteht aus den Obtusus-Schichten, den Numismalis-Amaltheen-Schichten, Posidonienschiefer und Jurensis-Mergel (vgl. Kapitel 3.3 in Dossier II). Die Abfolgen im Tonigen Lias weisen meist mittlere Tonmineralgehalte von > 40 Gew.-% auf. Im Standortgebiet Jura-Südfuss ist der oberste, unter dem Opalinuston liegende Bereich des Lias kalkig-sandig ausgebildet (Kalkiger Lias, KL) und weist mittlere Tonmineralgehalte von < 20 Gew.-% auf (Beilage 3-1 in Dossier II).
- Beim 'Arietenkalk' (AK) handelt es sich um teilweise tonige und sandige Kalke, welche oft mittlere Tonmineralgehalte < 20 Gew.-% aufweisen.
- Der Tonige Keuper (TK) besteht hauptsächlich aus tonreichen Mergeln. Er wird v.a. aus den Psiloceras-Schichten, Knollenmergel und teilweise den Oberen Bunten Mergel aufgebaut und besteht deshalb lithostratigraphisch nicht nur aus Keuper-Sedimenten (vgl. Kapitel 3.3 in Dossier II). Der Tonige Keuper weist meist mittlere Tonmineralgehalte > 40 Gew.-% auf.

---

[18] Die Birmenstorfer Schichten werden im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen gleich wie die Kalkbankabfolgen der Effinger Schichten klassiert.

[19] Die lithofaziellen Einheiten 'Arietenkalk' und 'Gipskeuper' sind mit Anführungszeichen geschrieben, weil sie nicht 1:1 den gleichnamigen lithostratigraphischen Einheiten entsprechen (vgl. Traber 2013).

- Der Keuper-Aquifer (KA) umfasst die Einheiten des Oberen Mittelkeupers mit erhöhter Durchlässigkeit. In der Nordschweiz wird er vor allem durch Stubensandstein-Formation, den Gansinger Dolomit und die Schilfsandstein-Formation aufgebaut. Der Name 'Stubensandstein-Formation' kann dabei irreführend sein, in der Bohrung Benken ist die Stubensandstein-Formation als Dolomitbrekzie aufgebaut. Die Tonmineralgehalte weisen meist mittlere Tonmineralgehalte von < 20 Gew.-% auf.
- Der 'Gipskeuper' (GK) reicht von der Basis des Keuper- bis zum Top des Muschelkalk-Aquifers, d.h. bis Top Lettenkohle. Er umfasst den lithostratigraphischen Gipskeuper und weitere, geringmächtige Einheiten im Liegenden des Keuper-Aquifers (Kapitel 3.3 in Dossier II). Der 'Gipskeuper' besteht v.a. aus sulfatreichen und tonigen Schichten, massiver Anhydrit findet sich v.a. an der Basis. Diese evaporitischen Formationen haben – unabhängig von ihrem Tonmineralgehalt – in grösserer Tiefe, d.h. unterhalb der potenziellen Verkarstungszone, eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit.

Die **oberen Rahmengesteine** des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss werden durch die Passwang-Formation und die Unteren Acuminata-Schichten gebildet. Die Passwang-Formation kann in mehrere 'shallowing-upward'-Parasequenzen (Abfolgen von tonmineralreichen Gesteinen, Sandkalken, biodetritischen Kalken und Eisenoolithen) unterteilt werden (Burkhalter 1996, Bläsi et al. 2013, Kapitel 3.3 in Dossier II). Die einzelnen Parasequenzen zeigen eine grosse Variabilität in ihrer Mächtigkeit und Zusammensetzung und können lokal fehlen. Die Unteren Acuminata-Schichten werden zur Hauptrogenstein-Formation gezählt und bestehen hauptsächlich aus Kalkmergeln (Bläsi et al. 2013, Kapitel 3.3 in Dossier II). Es lassen sich die beiden lithofaziellen Einheiten Sandig-tonige Abfolgen (STA) und Sandkalkabfolgen (SKA) wie im Wirtgestein 'Brauner Dogger' unterscheiden (vgl. Kap. 2.1). Generell spielen die Sandkalkabfolgen eine grössere Rolle, v.a. die basale Sandkalkabfolge (Sissach-Member) kann über 10 m mächtig ausgebildet sein, und die tonreichen Abfolgen eine kleinere Rolle als im 'Braunen Dogger' (Bläsi et al. 2013).

3.2 Eigenschaften der unteren Rahmengesteine des Opalinustons

3.2.1 Gesteinsparameter (Mineralogie, Porosität)

Die unteren Rahmengesteine des Opalinustons werden durch Lias (Staffelegg-Formation nach Reisdorf et al. 2011) und Keuper gebildet. Die Definition von lithofaziellen Einheiten finden sich im vorhergehenden Kapitel[20]. Die für die Sicherheitsbetrachtung für SGT Etappe 2 relevanten Gesteinparameter sind in Traber (2013) zusammengestellt, die daraus abgeleiteten Referenz- und Eckwerte für die Dosisberechnungen sind in Kap. 4.4 und 4.5 zu finden.

3.2.2 Hydraulische Eigenschaften

3.2.2.1 Toniger Lias

Packertests wurden über die gesamte Mächtigkeit des Lias (einschliesslich 'Arietenkalk') in den Bohrungen Schafisheim, Riniken und Benken durchgeführt und ergaben bei Tiefen von > 450 m Durchlässigkeiten von $\leq 10^{-13}$ m/s (Nagra 2002a).

[20] Die hydrogeologischen Einheiten in Traber (2013) werden hier als lithofazielle Einheiten bezeichnet.

Der Tonige Lias fasst die tonreichen Lithologien über dem 'Arietenkalk' zusammen, die typischen Tonmineralgehalte liegen im Bereich von 40 Gew.-% und lassen auf ein bedeutendes Selbstabdichtungsvermögen schliessen (vgl. Kap. 2.5.2). Aufgrund der lithologischen Vergleichbarkeit wird eine ähnliche Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeit wie beim Opalinuston erwartet (d.h. Faktor 5). Die Packertests mit Werten von $\leq 10^{-13}$ m/s liegen im gleichen Bereich wie beim Opalinuston (Kap. 2.5.1) und bestätigen das hohe Selbstabdichtungsvermögen dieser Einheit.

3.2.2.2 'Arietenkalk' und Kalkiger Lias

In der Bohrung Weiach wurde ein Intervall von ca. Top 'Arietenkalk' bis Basis Lias hydraulisch getestet und ergab eine Durchlässigkeit von 3×10^{-12} m/s (Bereich 1×10^{-12} bis 7×10^{-12} m/s; Klemenz et al. 2000). In den anderen Sondierbohrungen der zentralen Nordschweiz ist die mittlere Intervalldurchlässigkeit noch geringer (Fig. 3.2-1). Erst mit dem Einsetzen von sandigeren Einheiten im basalen Lias (Lias-α-Sandstein) im Osten werden höhere Durchlässigkeiten beobachtet (Kreuzlingen-1: 3×10^{-8} m/s; Nagra 2002a).

Der Term Kalkiger Lias wurde definiert, um eine bisher nur im Standortgebiet Jura-Südfuss beobachtete Situation abdecken zu können, bei der nahe an der Basis des Opalinustons wahrscheinlich eine durchlässige, tonmineralarme, z.T. sehr kalkige, z.T. sehr sandige lithofazielle Einheit existiert (vgl. Ergebnisse der neuen Bohrung Gösgen SB4 in Bläsi et al. 2014).

Aus oberflächennahen Bereichen und Tunneln gibt es diverse Evidenzen, dass der 'Arietenkalk' in Zusammenhang mit einer verstärkten Klüftung Aquifercharakter aufweisen kann (Dossier V und Beispiele in Traber 2013). Vom Bau des Belchen-Autobahntunnels gibt es Beobachtungen von zahlreichen Wasserzutritten im obersten, dort sehr kalkig ausgebildeten oberen Bereich des Lias (Fig. 5 in Gautschi 2001).

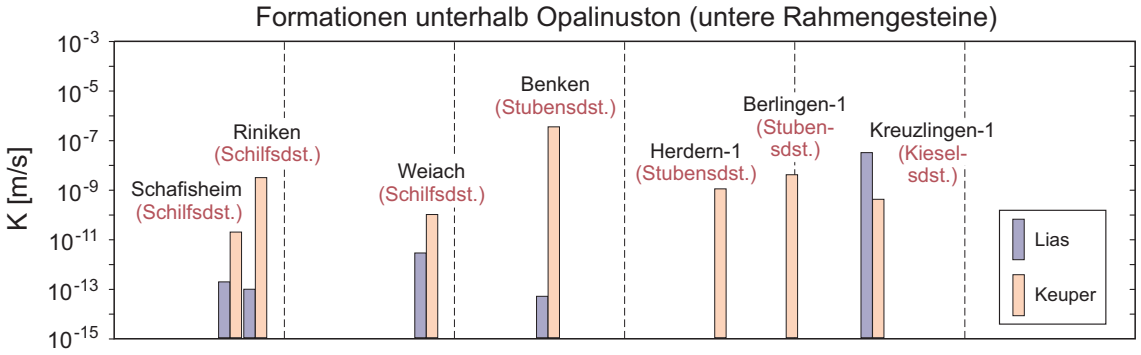


Fig. 3.2-1: West-Ost-Profil der hydraulischen Durchlässigkeit von potenziell durchlässigen Formationen der unteren Rahmengesteine des Opalinustons beobachtet in Tiefbohrungen (aus Nagra 2002a).

Die betrachteten Intervalle liegen dabei zwischen rund 450 und 2300 m Tiefe (s. Klemenz et al. 2000). Im Keuper umfassen die Intervalle insbesondere die folgenden Einheiten: Schafisheim: Gansinger Dolomit, Schilfsandstein-Formation; Riniken: Gansinger Dolomit, Schilfsandstein-Formation; Weiach: Stubensandstein-Formation, Schilfsandstein-Formation, Gansinger Dolomit; Benken: Stubensandstein-Formation, Gansinger Dolomit (nach Klemenz et al. 2000).

3.2.2.3 Toniger Keuper

Die lithofazielle Einheit Toniger Keuper umfasst den Lias unter dem 'Arietenkalk' und den Keuper über dem Keuper-Aquifer. Der Tonmineralgehalt liegt bei typischerweise 50 Gew.-% (Tab. 3.2-1).

Zumindest Teile des Tonigen Keupers wurden zusammen mit den lithofaziellen Einheiten Toniger Lias und 'Arietenkalk' hydraulisch getestet (siehe oben; Datensatz Klemenz et al. 2000), dies ergab sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten.

3.2.2.4 Keuper-Aquifer

Im Mittleren Keuper existieren lithologische Einheiten mit gegenüber dem Lias teilweise deutlich höheren hydraulischen Durchlässigkeiten (Fig. 3.2-1). Aus diesen Einheiten liegen auch einige Wasserproben aus Tiefbohrungen vor (Dossier V, Kapitel 4). Zusätzlich deuten die Tracerprofile der Bohrung Benken (Gimmi & Waber 2004) darauf hin, dass zumindest im Standortgebiet Zürich Nordost der Keuper-Aquifer und nicht der 'Arietenkalk' für die Porenwässer die relevante Randbedingung liefern.

Unter dem Term Keuper-Aquifer werden die transmissiven Abschnitte des Oberen Mittelkeupers zusammengefasst. Dabei kann es sich um die Stubensandstein-Formation, den Gansinger Dolomit oder auch die Schilfsandstein-Formation handeln (Traber 2013). Hydraulische Tests liegen von diversen Bohrungen vor (Fig. 3.2-1), besonders hoch war die Durchlässigkeit in der Bohrung Benken mit einem Bestwert von 7×10^{-7} m/s (Nagra 2001, Nusch et al. 2013). Das geometrische Mittel der Packertests der Bohrungen Benken, Weiach, Riniken und Schafisheim liegt bei rund 10^{-9} m/s und ist damit deutlich tiefer. Ob der hohe Wert aus der Bohrung Benken repräsentativ ist für das ganze Verbreitungsgebiet der Stubensandstein-Formation in Form von Sandsteinen mit Dolomitbrekzien (Fazieskarten in Albert & Bläsi 2001), kann nicht beurteilt werden, dies würde die Standortgebiete Südranden und Zürich Nordost betreffen. Entsprechend der lokal durchlässigen Lithologie dürfte der Charakter des Keuper-Aquifers einem geklüfteten oder einem porösen Medium entsprechen. Letzteres wird aufgrund der Kernbeschreibung der Bohrung Benken als wahrscheinlicher betrachtet.

3.2.2.5 'Gipskeuper'

Die lithofazielle Einheit 'Gipskeuper' umfasst den lithostratigraphischen Gipskeuper und geringmächtige Einheiten im Liegenden des Keuper-Aquifers (vgl Traber 2013, Kapitel 3.3 in Dossier II).

In der Bohrung Benken ergab ein Packertest im 'Gipskeuper' einen Bestwert von 1×10^{-13} m/s.

Der 'Gipskeuper' besteht in relevanter Tiefenlage insbesondere auch aus Anhydrit, weshalb von einem guten Selbstabdichtungsvermögen auszugehen ist.

3.2.3 Diffusionskoeffizienten

Aus den unteren Rahmengesteinen liegen keine Diffusionsmessungen vor. Die Diffusionskoeffizienten für die unteren Rahmengesteine des Opalinustons wurden basierend auf dem erweiterten Archie-Gesetz hergeleitet (s. Kap. 2.6).

3.3 Obere Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss

3.3.1 Gesteinsparameter

Die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den westlichen Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss bestehen aus den Gesteinen der Passwang-Formation und den Unteren Acuminata-Schichten. In den Bohrungen Riniken und Schafisheim wurden diese Lithologien durchfahren, geologisch beschrieben (z.B. Bläsi et al. 2013) und es liegen aus den geophysikalischen Logs berechnete Tonmineralgehalte vor (Albert & Schwab 2012). In Riniken wurden lediglich 6 m über dem Opalinuston gekernt, in Schafisheim rund 40 m. Es ist deshalb keine systematische Auswertung basierend auf Kernanalysen möglich.

Die oberen Rahmengesteine der Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss wurden in Analogie zum 'Braunen Dogger' in die lithofaziellen Einheiten Tonige Abfolgen, Sandig-tonige Abfolgen und Sandkalkabfolgen, gegliedert (Kap. 2.1). Dadurch können die für die lithofaziellen Einheiten des 'Braunen Doggers' hergeleiteten Gesteinsparameter entsprechend auch für die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss verwendet werden (mit höheren relativen Anteilen, bzw grösseren Mächtigkeiten der sandigeren und kalkigeren lithofaziellen Einheiten).

3.3.2 Hydraulische Durchlässigkeit

In der Bohrung Schafisheim wurden die oberen Rahmengesteine mit zwei Tests untersucht (siehe Klemenz et al. 2000). Einer liegt vollständig in der Passwang-Formation und reicht vom Brüggli- bis ins Hauenstein-Member und ergab eine hydraulische Durchlässigkeit von maximal 1×10^{-14} m/s (961.37 – 987.70 m). Der zweite Test umfasst das ganze Sissach-Member sowie 16.5 m Opalinuston und ergab eine hydraulische Durchlässigkeit von maximal 5×10^{-13} m/s (989.30 – 1017.16 m).

In der Bohrung Riniken wurden in einem Intervall rund 18 m der Passwang-Formation sowie rund 6 m Opalinuston getestet. Der beste Schätzwert der Durchlässigkeit liegt bei 5×10^{-14} m/s (313.41 – 337.28 m; Klemenz et al. 2000).

Insgesamt erwies sich die Passwang-Formation in diesen beiden Bohrungen als sehr gering durchlässig. Die Passwang-Formation weist jedoch mit dem Sissach-Member eine lokal sehr markante, rund 10 m mächtige Kalkbank direkt über dem Opalinuston auf (s. auch Kapitel 5.3 in Dossier V), welche in Bereichen mit einer stärkeren Klüftung resp. im Bereich von kleineren Störungen mit geringen Versätzen auch deutlich höhere Durchlässigkeiten aufweisen könnte. Messwerte einer solchen Situation liegen nicht vor. Für Sicherheitsbetrachtungen werden deshalb Werte unter Einbezug von lithologischen Überlegungen festgelegt (vgl. Kap. 4.7.4).

3.3.3 Diffusionskoeffizienten

In den östlichen Standortgebieten bilden die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten die oberen Rahmengesteine. Diffusionsmessungen an diesen Gesteinen sind in Kap. 2.6 dokumentiert. Für die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss werden die Werte der entsprechenden lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' verwendet.

4 Standortbezogene Modellkonzepte und Parameter für den Radionuklidtransport in den Wirt- und Rahmengesteinen bzw. in den einschlusswirksamen Gebirgsbereichen

4.1 Allgemeines Vorgehen bei der Herleitung der Modellkonzepte für den Radionuklidtransport und die Eingabeparameter für die Dosisberechnungen

Für die Festlegung der Eingabeparameter für die Dosisberechnungen werden vereinfachte Modellkonzepte für den Radionuklidtransport benötigt, in welchen der lithologische Aufbau, die tektonisch-strukturellen Elemente und die kombinierte Wirkung dieser Elemente berücksichtigt werden und mit denen die vorhandenen Ungewissheiten bezüglich Radionuklidtransport ausgewiesen werden.

Der potenziell einschlusswirksame Gebirgsbereich (Wirt- und Rahmengesteine) wird dazu in verschiedene *lithofazielle Einheiten* mit unterschiedlichem Radionuklidrückhaltevermögen, bzw. Selbstabdichtungsvermögen gegliedert. (Kap. 2.1 und 3.1). Diese lithofaziellen Einheiten haben unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Mineralogie, Porosität, hydraulischer Durchlässigkeit, Diffusionseigenschaften und wasserführender Systeme. Für die Radionuklidtransport-Modellrechungen werden für all diese Eigenschaften entsprechende Eingabeparameter mit Referenz- und Eckwerten benötigt. Die geochemischen Bedingungen sind in den tonigen Systemen sehr ähnlich (weitgehend reguliert durch die sehr ähnliche Mineralogie), die grösste Variabilität besteht in der Salinität, welche unabhängig von der Mineralogie ist.

Als Folge einer tektonischen Überprägung können diese lithofaziellen Einheiten von *tektonisch-strukturellen Elementen* durchschlagen werden. Je nach Selbstabdichtungsvermögen der lithofaziellen Einheiten kann dies einen vernachlässigbaren oder einen sehr grossen Einfluss auf die Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine, insbesonder auf die hydraulische Durchlässigkeit bzw die Transmissivität der Freisetzuingspfade haben.

Im Rahmen der Charakterisierung der wasserführenden Systeme in den vier Wirtgesteinen wurden – je nach Datenlage und Verwendungszweck – konzeptuelle Modelle unterschiedlicher Komplexität entwickelt (Kap. 2.7). Für die Dosisberechnungen (Nagra 2014b) werden in SGT-Etappe 2 Netzwerke von eindimensionalen Transportpfaden (sogenannte PICNIC-*legs*) verwendet (Nagra 2014c). Für die Dosisberechnungen und für den sicherheitstechnischen Vergleich (Nagra 2014a) ist es deshalb zweckmässig, vereinfachte konzeptuelle Modelle für die wasserführenden Systeme zu verwenden, um die wichtigsten Unterschiede bei den standortspezifischen Radionuklidtransport-Modellrechungen transparent darzustellen (vgl Kap. 4.2, Fig. 4.2-1).

4.2 Wechselwirkung von lithofaziellen Einheiten und tektonisch-strukturellen Elementen, vereinfachte konzeptuelle Modelle für die Modellierung des Radionuklidtransports

Die tektonische Überprägung der lithofaziellen Einheiten kann bereits früh nach der Sedimentation beginnen. Im Lauf der geologischen Entwicklungsgeschichte können sich verschiedene Klassen von Trennflächen bzw. Trennflächensystemen bilden, welche potenziell einen direkten Einfluss auf den Radionuklidtransport haben. Die wichtigsten tektonisch-strukturellen Elemente sind:

- bankrechte, inhärente Kluftsysteme, welche sich während der Diagenese bilden (sog. fundamentales Kluftsystem; vgl. z.B. Bock 1980, Meier & Kronberg 1989, Price & Cosgrove 1990)
- weitere, tektonisch bedingte, bankrechte oder nicht bankrechte Kluftsysteme (Meier & Kronberg 1989)
- Störungen unterschiedlicher Genese (Aufschiebungen, Abschiebungen, Transversalverschiebungen) und Grösse (Versatzbetrag)

Für die Radionuklidtransport-Modellrechnungen wird nur zwischen Kluftsystemen und Störungen unterschieden. Letztere können nach Bedarf in kleinere vernetzte Störungen oder grössere durchschlagende Störungen unterteilt werden (Bsp. Wellenberg)

Kleinräumige tektonisch-strukturelle Elemente (Kluftsysteme) sind meistens an einzelne lithofazielle Einheiten gebunden. Ihre hydraulische Wirksamkeit hängt stark von der Lithologie der betroffenen Einheit ab und ist in der Regel tiefenabhängig. Die gleichen Abhängigkeiten bestehen auch bei den Eigenschaften von Störungen. Dies bedeutet, dass eine Störung, die verschiedene lithofazielle Einheiten durchschlägt, über entsprechend variable hydraulische Eigenschaften verfügt.

Aufgrund der Erfahrungen betreffend Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine vom Tonmineralgehalt (vgl. diverse Unterkapitel betreffend hydraulische Eigenschaften der Wirtgesteine und dort zitierte Literatur) werden die lithofaziellen Einheiten für die konzeptuellen Modelle in 3 Kategorien eingeteilt[21]:

1. Lithofazielle Einheiten mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten > 40 Gew.-% haben ein hohes Selbstabdichtungsvermögen (Bock et al. 2010). In diesen Einheiten werden allfällige Trennflächensysteme als hydraulisch nicht wirksam betrachtet (Bsp. Opalinuston, Parkinsoni-Württembergica-Schichten des 'Braunen Doggers'). In diese Kategorie fallen auch – unabhängig von ihrem Tonmineralgehalt – die evaporitischen Formationen, welche in grösserer Tiefe, d.h. unterhalb der potenziellen Verkarstungszone, ebenfalls ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen besitzen (Bsp. Gipskeuper). In den geologischen Konzeptprofilen für die Sicherheitsanalyse (vgl. Kap. 4.3) werden diese lithofaziellen Einheiten als "im Allgemeinen sehr gering durchlässig" klassiert.

[21] Bei den angegebenen Grenzwerten betreffend Tonmineralgehalt handelt es sich um Richtwerte, welche nicht streng angewandt werden können; fallspezifische Beobachtungen und Erfahrungen müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

2. Lithofazielle Einheiten mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten im Bereich 20[22] – 40 Gew.-% haben ein mässig gutes Selbstabdichtungsvermögen. In diesen Einheiten kann eine gewisse hydraulische Wirksamkeit von allfälligen Trennflächen nicht ausgeschlossen werden (Bsp. Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten, lithofazielle Einheit 'Mergel' der Helvetischen Mergel). In den geologischen Konzeptprofilen für die Sicherheitsanalyse wird diesen lithofaziellen Einheiten ein "Potenzial für mässig erhöhte Durchlässigkeit" zugeordnet.
3. Lithofazielle Einheiten mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten < 20 Gew.-% besitzen ein geringes Selbstabdichtungsvermögen. In diesen Einheiten haben allfällige Trennflächensysteme ein Potenzial[23] für eine stark erhöhte hydraulische Wirksamkeit (Bsp. Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten, Abfolgen Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger'). Basierend auf den Erfahrungen in den Tiefbohrungen der Nordschweiz werden Trennflächen in vereinzelt auftretenden sandig-kalkigen Bänken mit Mächtigkeiten im Bereich weniger Dezimeter wegen ungenügender lateraler Kontinuität als hydraulisch nicht wirksam eingestuft. In den geologischen Konzeptprofilen für die Sicherheitsanalyse wird diesen lithofaziellen Einheiten ein "Potenzial für stärker erhöhte Durchlässigkeit" zugeordnet.

Die Wechselwirkung von Störungen mit lithofaziellen Einheiten hängt stark vom vertikalen Versatzbetrag ab. Störungen mit Versatzbeträgen, die grösser sind als die Mächtigkeit einer potenziell wasserführenden Einheit (z.B. harte sandig-kalkige Bankabfolgen), können den horizontalen Transport der Radionuklide innerhalb dieser Einheit unterbinden und dadurch zur Barrierenwirkung beitragen. Bei kleinen Versetzungbeträgen ist in lithofaziellen Einheiten mit schlechtem Selbstabdichtungsvermögen von der Bildung eines bevorzugten Fliesspfads im Schnittbereich der Störung und der potenziell wasserführenden lithofaziellen Einheit auszugehen (Fig. 4.2-1).

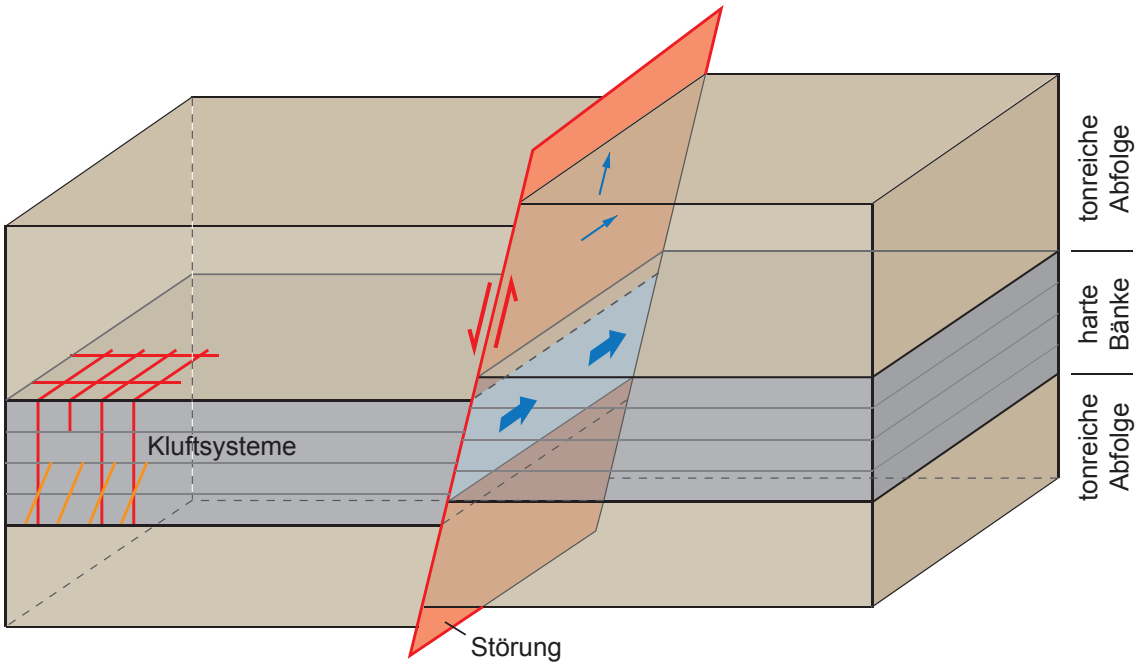
Neben einem lithologisch bedingten, vom Tonmineralgehalt abhängigen Selbstabdichtungsvermögen können im Verlauf der geologischen Geschichte auch Mineralausfällungen (Mineraladern) eine Abdichtung von Klüften und Störungen bewirken, unabhängig von der Lithologie des Nebengesteins. In solchen Fällen gibt es allerdings inhärente Ungewissheiten, sei es ob die Abdichtung räumlich überall (penetrativ) erfolgt ist, oder ob sie nachträglich aufgrund einer tektonischen Reaktivierung wieder aufgebrochen wurde oder zukünftig aufgebrochen wird (vgl. Kap. 2.7). Diesen Ungewissheiten muss in der Sicherheitsanalyse Rechnung getragen werden.

Die Platzierung eines geologischen Tiefenlagers bzw. einzelner Lagerkammern wird aufgrund von 3D-seismischen Untersuchungen in Gebirgsbereichen möglichst ohne seismisch erkennbare Störungen erfolgen, wobei – wegen der begrenzten Auflösung der Seismik – Störungen mit kleinem Versatz nicht vollständig ausgeschlossen werden können. In der Sicherheitsanalyse muss man also davon ausgehen, dass mit den Lagerkammern Störungen mit Versatzbeträgen bis zu einigen Metern durchfahren werden oder nahe an den Lagerkammern liegen, bzw. dass diesen nicht ausgewichen werden kann. Ob die durchfahrenen Störungen hydraulisch wirksam sind oder nicht hängt vom Selbstabdichtungsvermögen bzw. der Verheilung durch Calcit ab, welche durch die Lithologie der entsprechenden lithofaziellen Einheit im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bestimmt wird.

---

[22] Für SGT Etappe 2 wird ein Grenzwert von 20 Gew.-% gewählt. Dieser entspricht dem unteren Eckwert für die Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten bzw. der tonreichen Abfolgen des 'Braunen Doggers' (Traber & Blaser 2013). In späteren Phasen des SGT kann der Grenzwert aufgrund einer breiteren hydrogeologischen Datenbasis angepasst werden.

[23] Die hydraulische Wirksamkeit kommt nicht immer zum Ausdruck; sie kann beispielsweise durch Mineralausfällungen blockiert sein.



Bereich mit Potenzial für stark erhöhten Wasserfluss
(harte Bänke mit Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%)

Bereich mit Potenzial für mässig erhöhten Wasserfluss
(tonreiche Abfolge mit Tonmineralgehalt 20 - 40 Gew.-%)
oder kein erhöhter Wasserfluss (tonreiche Abfolge mit Tonmineralgehalt > 40 Gew.-%)

Fig. 4.2-1: Schematische Darstellung potenziell wasserführender Systeme in einer Abfolge von "harten Bänken" (Kalke, Sandkalke, Sandsteine) mit schlechtem Selbstabdichtungsvermögen, eingebettet in einer geringer durchlässigen tonreicheren Gesteinseinheit.

Die bankrechten Kluftsysteme sind oft nur in Oberflächennähe (Dekompaktionszone) hydraulisch wirksam, eine Wasserführung in grösserer Tiefe kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Bei Störungen sind – je nach Versatzbetrag – verschiedene Situation zu berücksichtigen (s. Text). Diese Figur zeigt eine Situation mit kleinem Versatzbetrag. Im Fall von Normalbrüchen können sich dilatante Öffnungen bilden, welche einen lateralen Wassertransport begünstigen (Fig. 2.7-7).

4.3 Modellkonzepte für die Wirt- und Rahmengesteine in den geologischen Standortgebieten

4.3.1 Modellkonzepte für die geologischen Standortgebiete der Nordschweiz und Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten (Referenzwerte, Bandbreiten)

Die Konzeptualisierung der lithofaziellen Einheiten in den potenziell einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (EG) erfolgt schrittweise. Für die Standortgebiete in der Nordschweiz werden in einem ersten Schritt die lithostratigraphischen und bohrlochgeophysikalischen Logs im Umfeld der Standortgebiete zusammengestellt (vgl. Beilagen A1-3, A1-5, A2-3, A3-3 und A4-3 in Dossier II). Ausgehend von diesen Aufnahmen und basierend auf den bereits bestehenden Sammelprofilen von SGT Etappe 1 (Nagra 2010) werden neue schematische stratigraphisch-hydrogeologische Sammelprofile (vgl. Beilagen A1-4, A1-6, A2-4, A3-4, A4-4 in Dossier II) und vereinfachte geologische Modellkonzepte erstellt (Fig. 4.3-1 bis 4.3-7). Zusätzlich fliessen Erkenntnisse aus der seismischen Faziesanalyse ein (Meier & Deplazes 2014a, b). Die geologische Konzeptualisierung orientiert sich in der Regel am stärksten am Befund der nächst gelegenen Tiefbohrung. Beispielsweise basiert die Konzeptualisierung für das Standortgebiet Nördlich Lägern hauptsächlich auf der Bohrung Weiach, es wurden aber auch Befunde z.B. der Bohrung Benken berücksichtigt (Geo-Konz. 'Weiach' in Fig. 4.3-3). Für das Standortgebiet Nördlich Lägern wurden alternative geologische Konzeptprofile entwickelt. Im diesem Standortgebiet könnten im westlichsten Teil noch Ausläufer der Passwang-Formation bzw. des Sissach-Members vorkommen (Geo-Konz 'NL West' in Fig. 4.3-3) und im östlichen Teil könnten aufgrund einer reflexionsseismischen Analyse (Meier & Deplazes 2014a) auch mächtigere sandig-kalkige Einheiten auftreten (Geo-Konz. 'NL Ost').

Aus den geologischen Konzeptprofilen wurde Konzeptprofile für die provisorische Sicherheitsanalyse hergeleitet (Fig. 4.3-1 bis 4.3-7, Beil. 6-1). Die Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten wurden aufgrund der gemessenen Mächtigkeiten in Bohrungen und Aufschlüssen innerhalb und in der weiteren Umgebung der Standortgebiete (vgl. Anhang im Dossier II) und aufgrund von geologischen Überlegungen abgeschätzt (vgl. Tab. 4.3-1 bis 4.3-6). Dabei wurden auch die standortspezifischen Mächtigkeitskarten (vgl. Dossier II), welche v.a. auf reflexionsseismischen Analysen beruhen, konsultiert. Innerhalb der Konzeptprofile für die provisorische Sicherheitsanalyse lassen sich zwei Gruppen unterscheiden, welche sich v.a. durch die Ablagerung oberhalb des Tops des Opalinustons unterscheiden. Die erste Gruppe besteht aus den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern. In dieser Gruppe von Gebieten östlich des unteren Aarelaufs wurde oberhalb des Opalinustons der 'Braune Dogger' im Faziesraum Ost abgelagert (Figur 3.3-1 in Dossier II). Die zweite Gruppe besteht aus den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss, welche ebenfalls innerhalb der Gruppe eine generell ähnliche Sedimentabfolge oberhalb des Tops des Opalinustons zeigen. Hier wurden oberhalb des Opalinustons im Faziesraum West die Sedimente der Passwang-Formation und die Unteren Acuminata-Schichten abgelagert.

Die Konzeptprofile für die provisorische Sicherheitsanalyse stellen nur schematisch eine mögliche Sedimentabfolge dar. So kann beispielsweise die Lage und Ausbildung der Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger' und in der Passwang-Formation vertikal stark variieren. Unterschiede in der Mächtigkeit und Zusammensetzung der lithofaziellen Einheiten werden als Parameterungewissheiten betrachtet und in der provisorischen Sicherheitsanalyse mit einer Parametervariation berücksichtigt.

Aufgrund der Erfahrungen betreffend die Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine vom Tonmineralgehalt (vgl. div. Unterkapitel zu den hydraulischen Eigenschaften der Wirtgesteine und dort zitierte Literatur) werden die lithofaziellen Einheiten für die konzeptuellen Modelle in drei Kategorien eingeteilt (vgl. Kap. 4.2):

1. Lithofazielle Einheiten mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten > 40 Gew.-% mit hohem Selbstabdichtungsvermögen. In den Konzeptprofilen für die provisorische Sicherheitsanalyse weisen die entsprechenden Elemente keine Übersignatur auf (Fig. 4.3-7), d.h. sie sind im Allgemeinen sehr gering durchlässig.
2. Lithofazielle Einheiten mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten im Bereich 20 – 40 Gew.-% mit mässig gutem Selbstabdichtungsvermögen. In den Konzeptprofilen für die provisorische Sicherheitsanalyse weisen die entsprechenden Elemente eine horizontal gestrichelte Übersignatur auf (Fig. 4.3-7), d.h. sie haben ein Potenzial für eine mässig erhöhte Durchlässigkeit.
3. Lithofazielle Einheiten mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten < 20 Gew.-% mit geringem Selbstabdichtungsvermögen. In den Konzeptprofilen für die provisorische Sicherheitsanalyse weisen die entsprechenden Elemente eine vertikale Schraffur als Übersignatur auf (Fig. 4.3-7), d.h. sie haben Potenzial für stärker erhöhte Durchlässigkeit.

Aus der Wechselwirkung der lithofaziellen Einheiten und tektonisch-strukturellen Elementen ergibt sich das Potenzial für eine Wasserführung (Fig. 4.2-1). Das heisst, die Lithologie der entsprechenden lithofaziellen Einheit im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bestimmt das Selbstabdichtungsvermögen bzw. die Verheilung durch Calcit und damit, ob durchfahrene Störungen hydraulisch wirksam sind oder nicht. Die konzeptuelle Ungewissheit bezüglich der lithofaziellen Einheiten wie auch der tektonisch-strukturellen Elemente wird in der provisorischen Sicherheitsanalyse über die betrachteten Situationen abgedeckt (vgl. Nagra 2014a, b, Beilage 6-1).

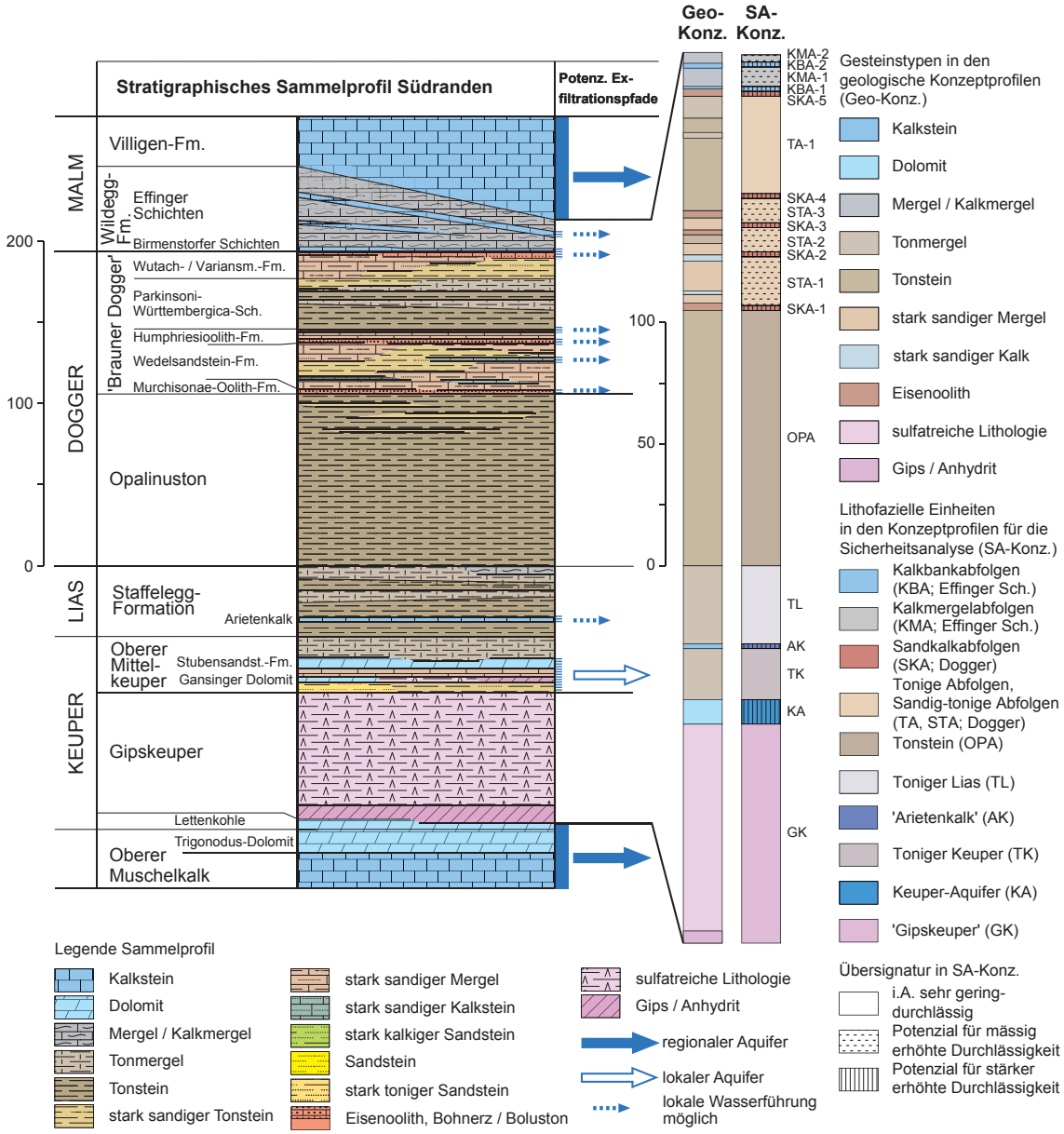


Fig. 4.3-1: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Südranden (vgl. Beilage A1-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und seiner Rahmengesteine.

Das Konzeptprofil SA-Konz. dient als Grundlage für die Modellkonzepte für den Radionuklidtransport.

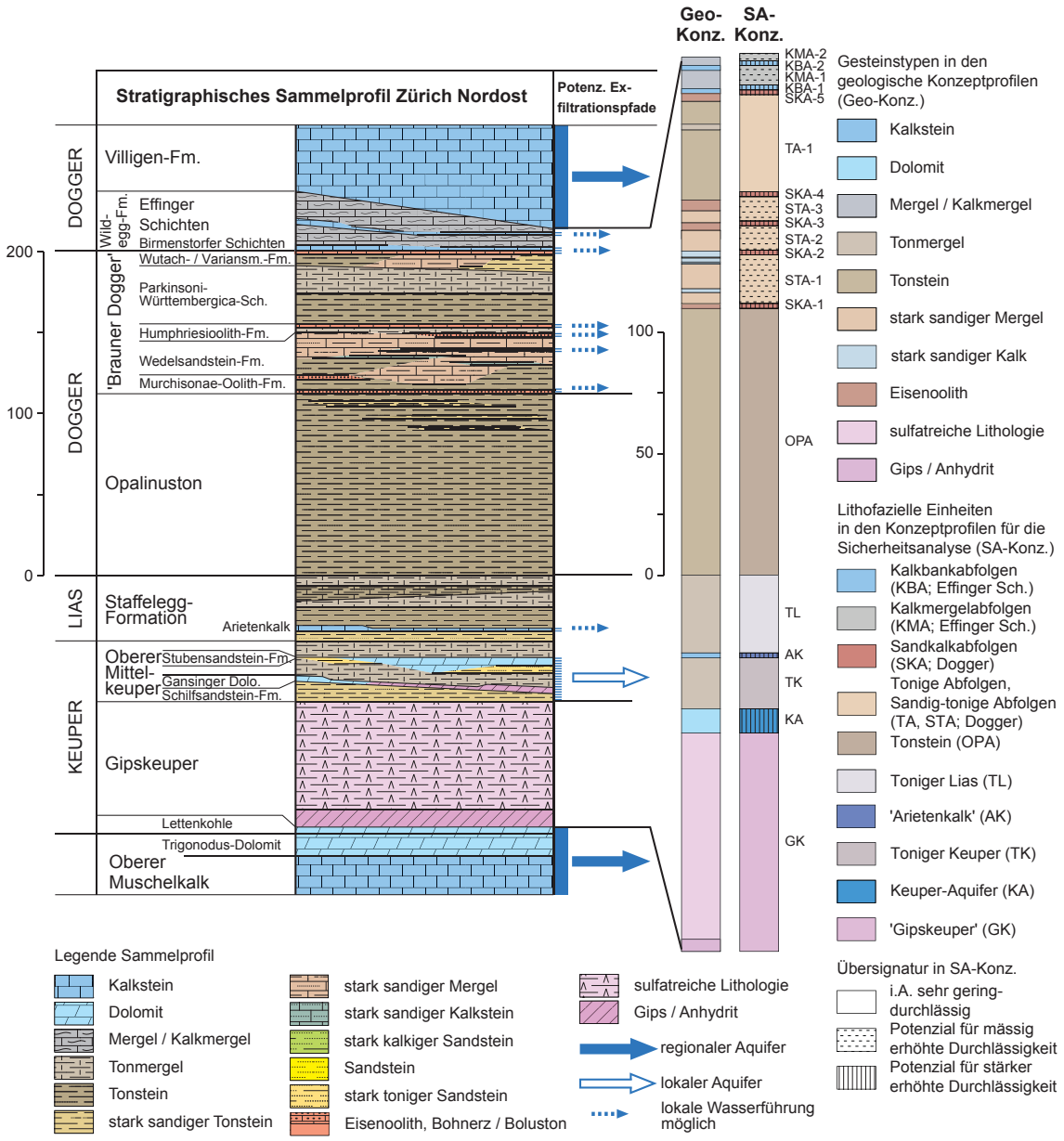


Fig. 4.3-2: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Zürich Nordost (vgl. Beilage A1-6 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und des 'Braunen Doggers' und ihrer Rahmengesteine.

Das Konzeptprofil SA-Konz. dient als Grundlage für die Modellkonzepte für den Radionuklidtransport.

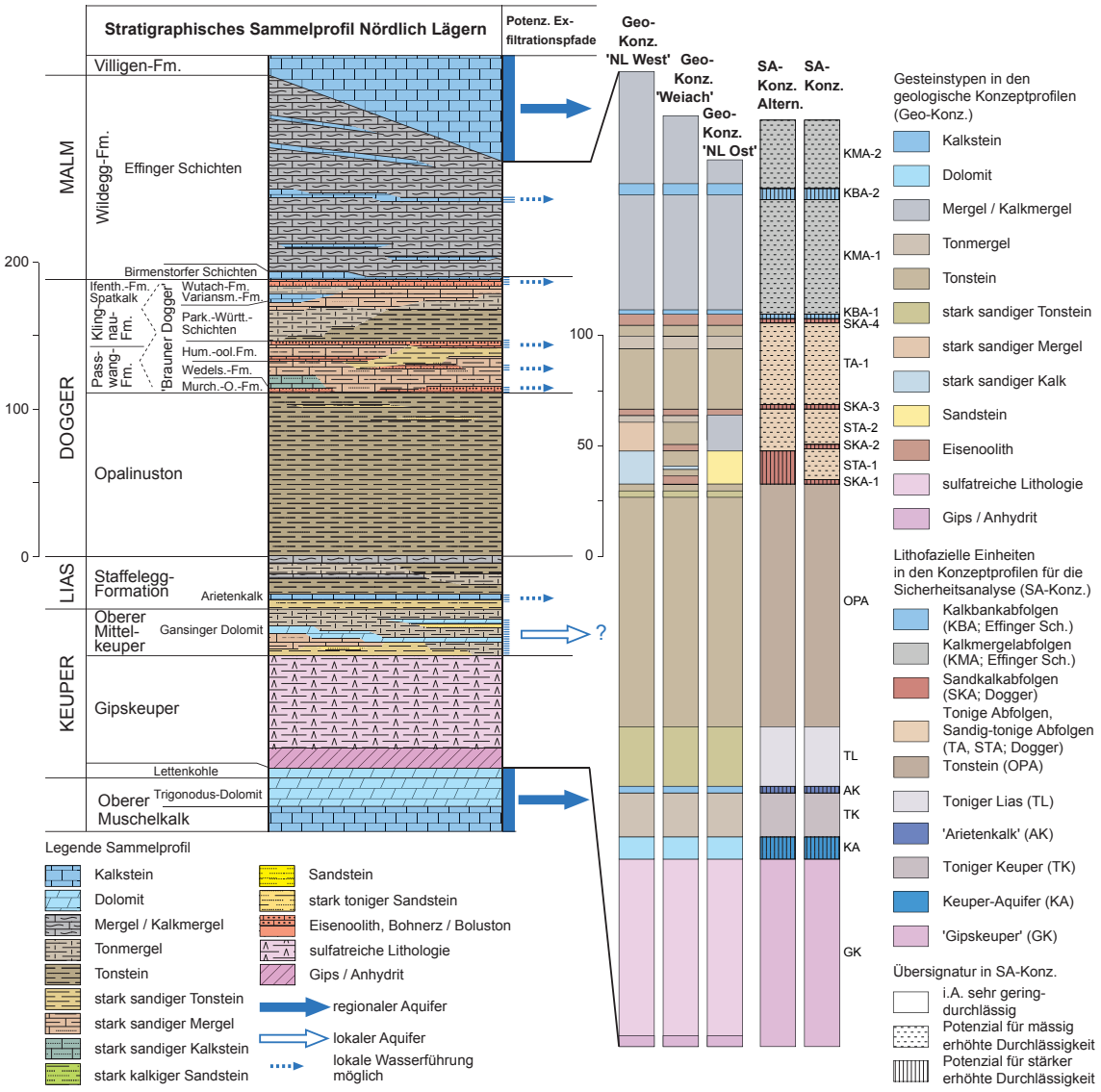


Fig. 4.3-3: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Nördlich Lägern (vgl. Beilage A2-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und des 'Braunen Doggers' und ihrer Rahmengesteine.

Das Konzeptprofil SA-Konz. dient als Grundlage für die Modellkonzepte für den Radionuklidtransport.

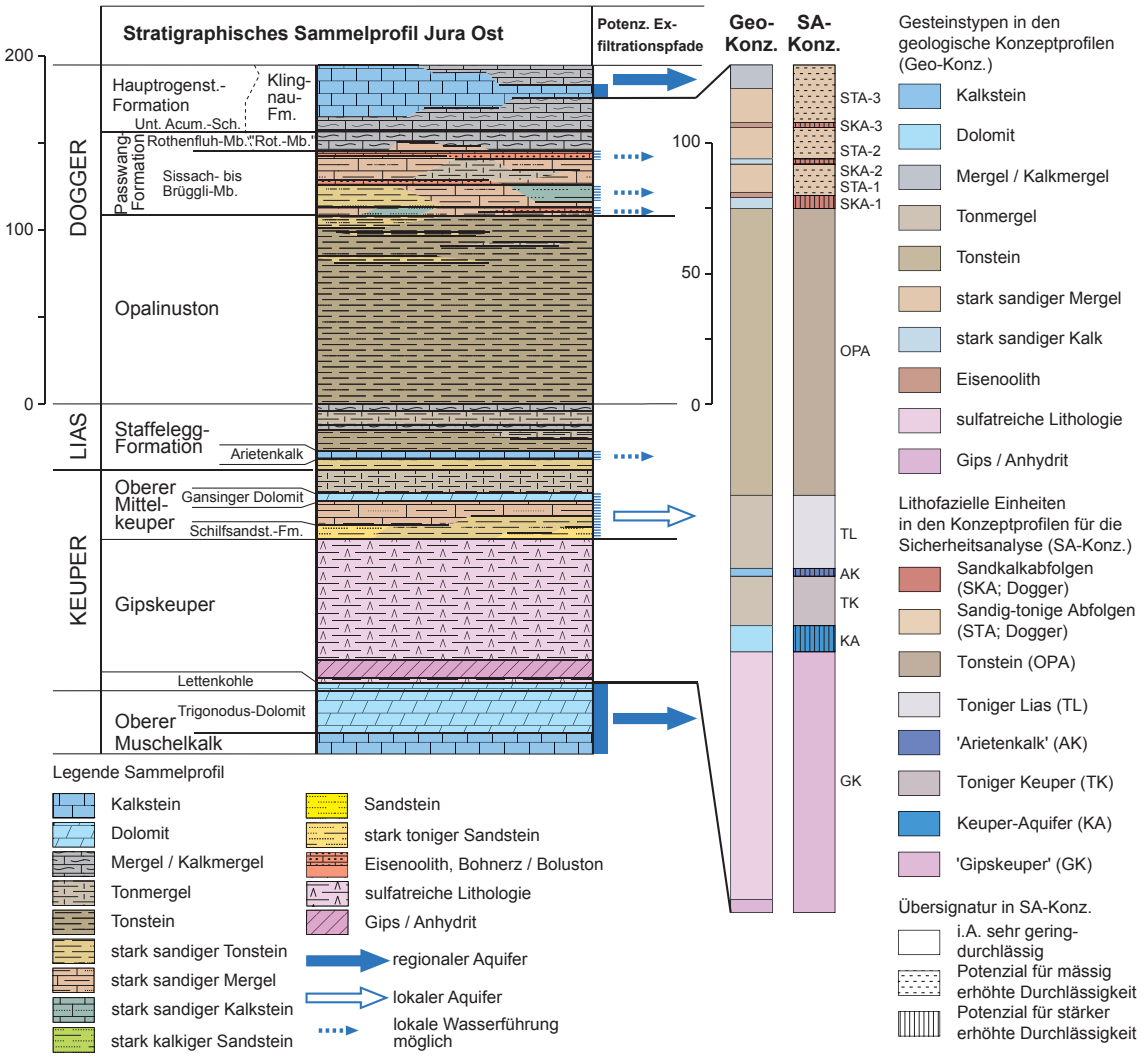


Fig. 4.3-4: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Jura Ost (vgl. Beilage A3-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und seiner Rahmengesteine.

Das Konzeptprofil SA-Konz. dient als Grundlage für die Modellkonzepte für den Radionuklidtransport.

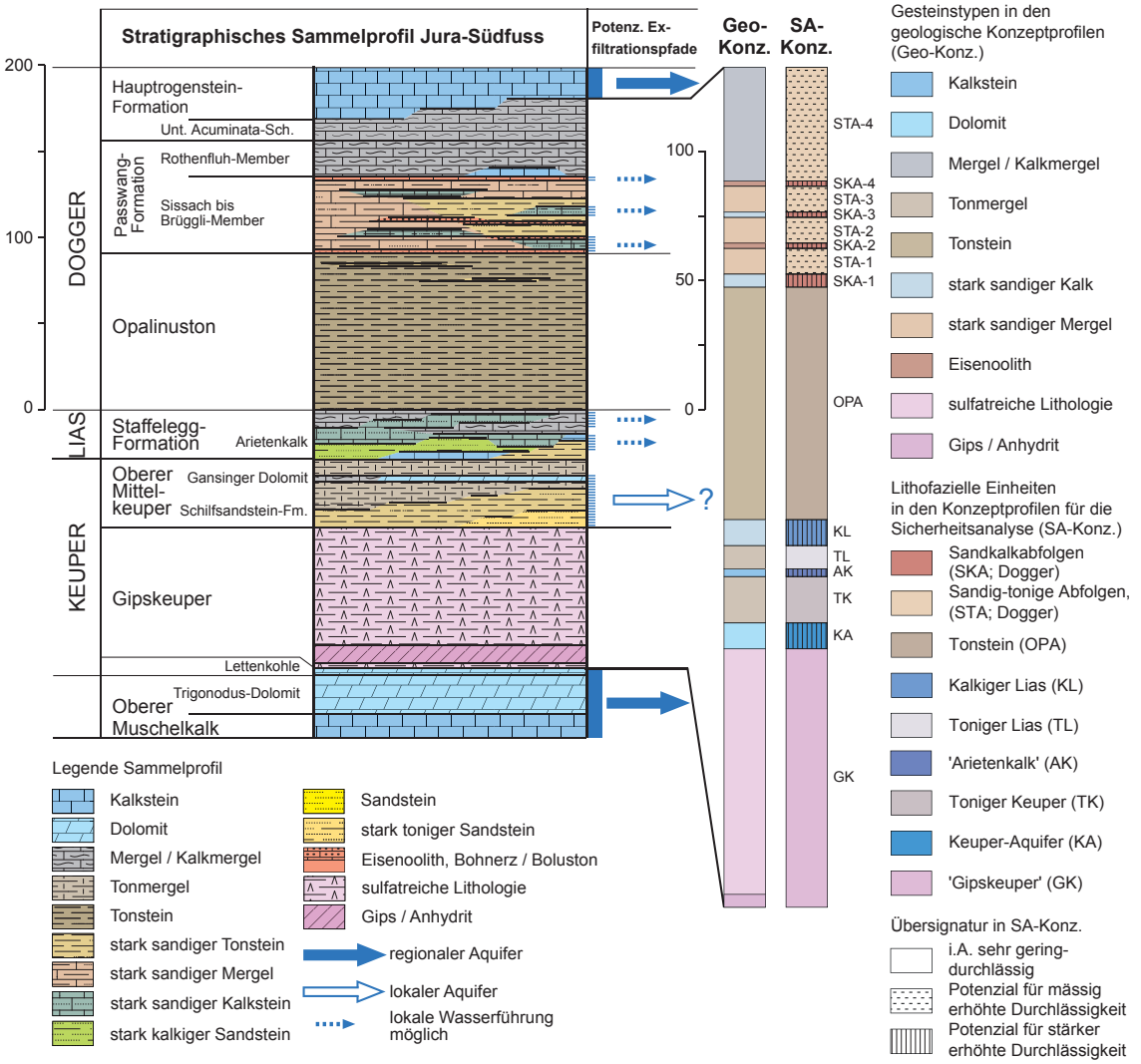


Fig. 4.3-5: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Jura-Südfuss (vgl. Beilage A4-4 in Dossier II) mit Konzeptualisierung des Opalinustons und seiner Rahmengesteine.

Das Konzeptprofil SA-Konz. dient als Grundlage für die Modellkonzepte für den Radionuklidtransport.

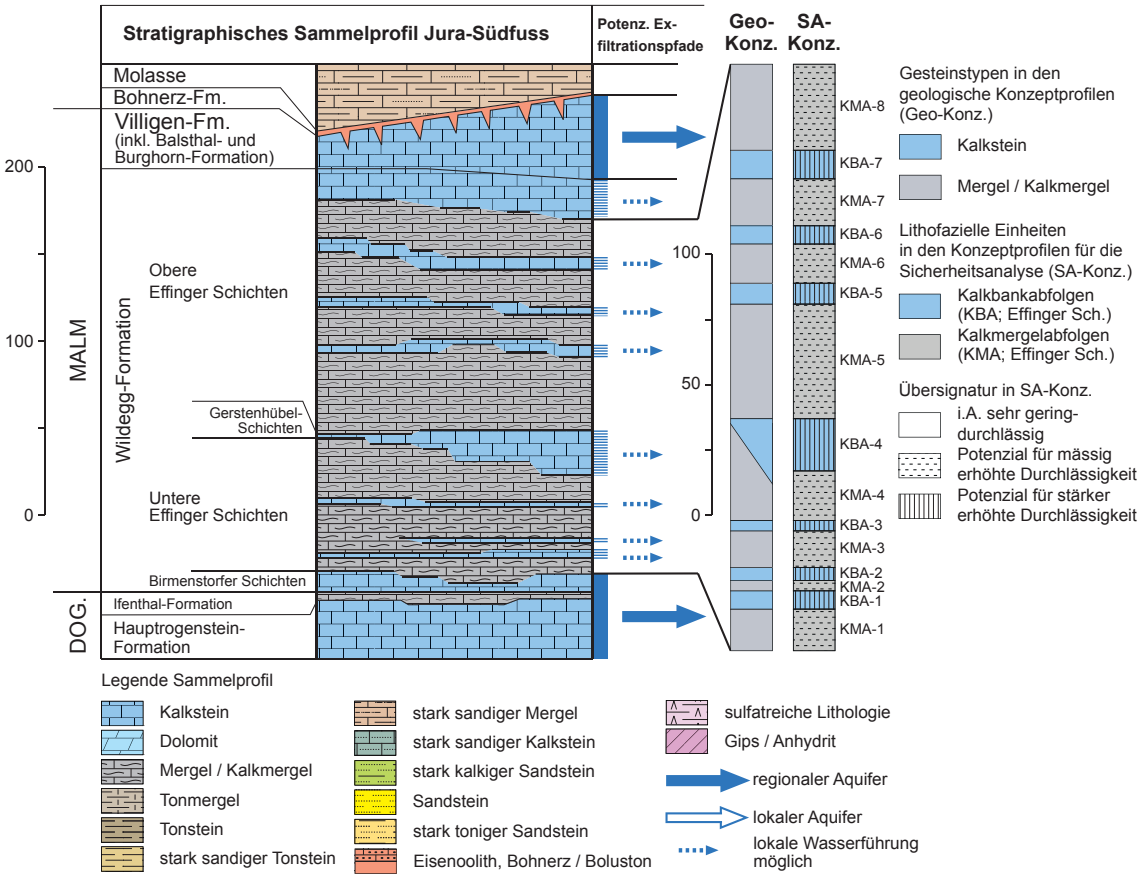


Fig. 4.3-6: Stratigraphisches Sammelprofil des Standortgebiets Jura-Südfuss (vgl. Figur 3.3-16 in Dossier II) mit Konzeptualisierung der Effinger Schichten.

Das Konzeptprofil SA-Konz. dient als Grundlage für die Modellkonzepte für den Radionuklidtransport.

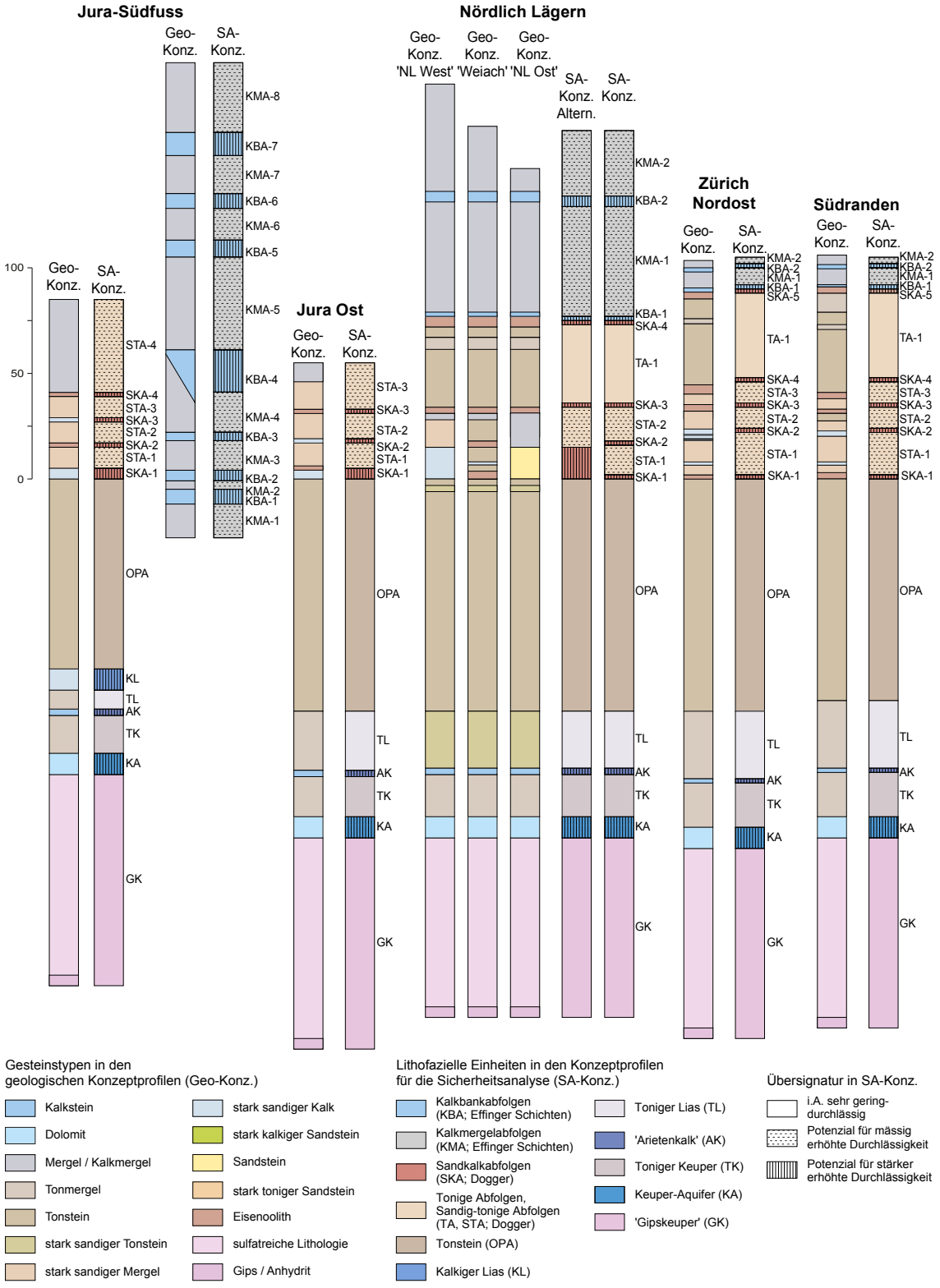


Fig. 4.3-7: Geologische Konzeptprofile und Konzeptprofile für die provisorische Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich für die geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz.

Tab. 4.3-1: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Südranden.

Obere Rahmengesteine: Für den Anteil der Kalkmergelabfolgen (KMA) an der Gesamtmächtigkeit der oberen Rahmengesteine wurde ein unterer Eckwert von 60 % und ein oberer Eckwert von 95 % abgeschätzt (Referenzwert: 73 %).

'Brauner Dogger': Für den Anteil der Tonigen und Sandig-tonigen Abfolgen (TA+STA) an der Gesamtmächtigkeit des 'Braunen Doggers' wurde ein unterer Eckwert von 70 % und ein oberer Eckwert von 95 % abgeschätzt (Referenzwert: 89 %).

Lithofazielle Einheit	**Referenzwert** [m]	**Unterer Eckwert** [m]	**Oberer Eckwert** [m]
Obere Rahmengesteine	**15**	**5**	**50**
KMA-2	3		
KBA-2	2		
KMA-1	8		
KBA-1	2		
'Brauner Dogger'	**90**	**60**	**120**
SKA-5	2		
TA-1	40	30	60
SKA-4	2		
STA-3	10		
SKA-3	2		
STA-2	10		
SKA-2	2		
STA-1	20		
SKA-1	2		
Opalinuston OPA	**105**	**70**	**130**
Untere Rahmengesteine	**155**	**140**	**180**
TL	32		
AK	2		
TK	21		
KA	10		
GK	90		

Tab. 4.3-2: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Zürich Nordost.

Obere Rahmengesteine: Für den Anteil der Kalkmergelabfolgen (KMA) an der Gesamtmächtigkeit der oberen Rahmengesteine wurde ein unterer Eckwert von 60 % und ein oberer Eckwert von 95 % abgeschätzt (Referenzwert: 73 %).

'Brauner Dogger': Für den Anteil der Tonigen und Sandig-tonigen Abfolgen (TA+STA) an der Gesamtmächtigkeit des 'Braunen Doggers' wurde ein unterer Eckwert von 70 % und ein oberer Eckwert von 95 % abgeschätzt (Referenzwert: 89 %).

Lithofazielle Einheit	**Referenzwert** [m]	**Unterer Eckwert** [m]	**Oberer Eckwert** [m]
Obere Rahmengesteine	**15**	**5**	**40**
KMA-2	3		
KBA-2	2		
KMA-1	8		
KBA-1	2		
'Brauner Dogger'	**90**	**60**	**120**
SKA-5	2		
TA-1	40	30	60
SKA-4	2		
STA-3	10		
SKA-3	2		
STA-2	10		
SKA-2	2		
STA-1	20		
SKA-1	2		
Opalinuston OPA	**110**	**80**	**130**
Untere Rahmengesteine	**155**	**140**	**180**
TL	32		
AK	2		
TK	21		
KA	10		
GK	90		

Tab. 4.3-3: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Nördlich Lägern.

Obere Rahmengesteine: Für den Anteil der Kalkmergelabfolgen (KMA) an der Gesamtmächtigkeit der oberen Rahmengesteine wurde ein unterer Eckwert von 60 % und ein oberer Eckwert von 95 % abgeschätzt (Referenzwert: 92 %).

'Brauner Dogger': Für den Anteil der Tonigen und Sandig-tonigen Abfolgen (TA+STA) an der Gesamtmächtigkeit des 'Braunen Doggers' wurde ein unterer Eckwert von 60 % und ein oberer Eckwert von 95 % abgeschätzt (Referenzwert: 89/75 % *).

Die mit einem * gekennzeichneten Werte stehen für eine alternative Situation mit grösserer Mächtigkeit der lithofaziellen Einheit SKA-1 und kleinerer Mächtigkeit von SKA-2 und STA-1.

Lithofazielle Einheit	**Referenzwert** [m]	**Unterer Eckwert** [m]	**Oberer Eckwert** [m]
Obere Rahmengesteine	**90**	**40**	**130**
KMA-2	31		
KBA-2	5		
KMA-1	52		
KBA-1	2		
'Brauner Dogger'	**75**	**60**	**120**
SKA-4	2		
TA-1	37	25	60
SKA-3	2		
STA-2	16		
SKA-2	2/0 *		
STA-1	14/3 *		
SKA-1	2/15 *		
Opalinuston OPA	**110**	**80**	**130**
Untere Rahmengesteine	**145**	**130**	**180**
TL	27		
AK	3		
TK	20		
KA	10		
GK	85		

Tab. 4.3-4: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine im Standortgebiet Jura Ost.

Obere Rahmengesteine: Für den Anteil der Sandig-tonigen Abfolgen (STA) an der Gesamtmächtigkeit der oberen Rahmengesteine wurde ein unterer Eckwert von 60 % und ein oberer Eckwert von 95 % abgeschätzt (Referenzwert: 84 %).

Lithofazielle Einheit	**Referenzwert** [m]	**Unterer Eckwert** [m]	**Oberer Eckwert** [m]
Obere Rahmengesteine	**55**	**30**	**90**
STA-3	22		
SKA-3	2		
STA-2	12		
SKA-2	2		
STA-1	12		
SKA-1	5		
Opalinuston OPA	**110**	**85**	**130**
Untere Rahmengesteine	**160**	**140**	**180**
TL	28		
AK	3		
TK	19		
KA	10		
GK	100		

Tab. 4.3-5: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins Opalinuston und seiner Rahmengesteine im Standortgebiet Jura-Südfuss.

Obere Rahmengesteine: Für den Anteil der Sandig-tonigen Abfolgen (STA) an der Gesamtmächtigkeit der oberen Rahmengesteine wurde ein unterer Eckwert von 50 % und ein oberer Eckwert von 90 % abgeschätzt (Referenzwert: 87 %).

Lithofazielle Einheit	**Referenzwert** [m]	**Unterer Eckwert** [m]	**Oberer Eckwert** [m]
Obere Rahmengesteine	**85**	**50**	**110**
STA-4	44		
SKA-4	2		
STA-3	10		
SKA-3	2		
STA-2	10		
SKA-2	2		
STA-1	10		
SKA-1	5		
Opalinuston OPA	**90**	**65**	**130**
Untere Rahmengesteine	**150**	**120**	**180**
KL	10		
TL	9		
AK	3		
TK	18		
KA	10		
GK	100		

Tab. 4.3-6: Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss.

Effinger Schichten: Für den Anteil der Kalkmergelabfolgen (KMA) an der Gesamtmächtigkeit des Wirtgesteins Effinger Schichten wurde ein unterer Eckwert von 60 % und ein oberer Eckwert von 90 % abgeschätzt (Referenzwert: 72 %).

Lithofazielle Einheit	**Referenzwert** [m]	**Unterer Eckwert** [m]	**Oberer Eckwert** [m]
Effinger Schichten	**225**	**170**	**250**
KMA-8	33		
KBA-7	11		
KMA-7	18		
KBA-6	7		
KMA-6	15		
KBA-5	8		
KMA-5	44	30	55
KBA-4	20		
KMA-4	19		
KBA-3	4		
KMA-3	14		
KBA-2	5		
KMA-2	4		
KBA-1	7		
KMA-1	16		

4.3.2 Modellkonzepte für das Standortgebiet Wellenberg und Länge der Fliesspfade in verschiedenen lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins

Die lithofazielle Einheit 'Mergel' (MGL) bildet die Hauptmasse des Wirtgesteins Helvetische Mergel bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Fig. 4.3-8). Diese Gesteinsmasse ist von spröden tektonisch-strukturellen Elementen durchschlagen. Ob einzelne Kalkbankabfolgen (KBA) eine genügende Kontinuität aufweisen, dass sie einen bedeutenden Anteil am Transportpfad für Radionuklide haben, ist eine konzeptuelle Ungewissheit, deren Auswirkung anhand von Dosisberechnungen in der provisorischen Sicherheitsanalyse (Nagra 2014b) untersucht wird (vgl. Fig. 4.3-8).

Als potenziell wasserführende Systeme (tektonisch-strukturelle Elemente) kommen in den Mergeln in erster Linie spröde Strukturen in Betracht, welche die duktil deformierten Mergel-Formationen durchschlagen. Neben Störungen gibt es ein engerständiges Netzwerk weiterer spröder Elemente mit geringerer Längserstreckung (kleinere Scherzonen, Verschiebungsflächen und Klüfte; Kap. 2.7.4). In einzelnen Kalkbänken können auch offene Klüfte mit drusigen Calcitadern wasserführend sein. Karstphänomene sind aus den Wirtgesteinseinheiten nicht bekannt.

Bei der Konzeptualisierung der wasserführenden Systeme wird davon ausgegangen, dass die gleichen Systeme, welche in der bis zu 600 m mächtigen Dekompationsszone hydraulisch wirksam sind, auch in grösserer Tiefe diskrete Transportpfade darstellen, nur mit entsprechend geringeren Transmissivitäten. Die Gesteinsmatrix zeigt aufgrund der Temperatur- und Versenkungsgeschichte ($T_{max.}$ bis 250 °C, Versenkungstiefe bis 10 km, Nagra 1997) sehr geringe Porositäten (wenige Prozent) und ist extrem gering durchlässig, sodass der advektive Wasserfluss dort vernachlässigt werden kann.

Die spröden Störungen sind intern sehr komplex aufgebaut (Kap. 2.7.4, Fig. 2.7-9 und 2.7-10). Aufgrund der Beobachtungen und hydraulischen Tests in den Bohrungen am Wellenberg wird geschlossen, dass die Transmissivität innerhalb einer Störung sehr variabel ist, und es bestehen konzeptuelle Ungewissheiten, ob es bevorzugte lineare Fliessbereiche gibt oder eher isolierte durchlässige Bereiche.

Für den sicherheitstechnischen Vergleich in SGT Etappe 2 wird angestrebt, für alle Wirtgesteine Modellkonzepte von vergleichbarer Komplexität zu verwenden (vgl. Kap. 4.1 und 4.2). Für die wasserführenden Systeme in den Helvetischen Mergeln werden deshalb etwas einfachere Konzepte verwendet als in den früheren Sicherheitsanalysen für den Wellenberg (Nagra 1994, 1997):

- Ganzflächig, innerhalb einer lithofaziellen Einheit uniform durchlässige spröde Störungen in den Mergeln oder – wo vorhanden – in Kalkbankabfolgen (Annahme: die transmissivsten Bereiche innerhalb einer Störung sind zumindest linear miteinander verbunden).
- Ganzflächig uniform sehr gering durchlässige Störungen in den Mergeln und – wo vorhanden – in Kalkbankabfolgen (Annahme: die Störung ist weitgehend mit Calcit und/oder tonreichem *Fault gouge*-Material abgedichtet (lokal offene Bereiche treten nur sehr isoliert auf und sind über grössere Distanzen hydraulisch nicht wirksam)).
- Netzwerke teilweise miteinander verbundener kleinräumiger Scherzonen und Verschiebungsflächen (Klüfte werden wie Verschiebungsflächen behandelt).

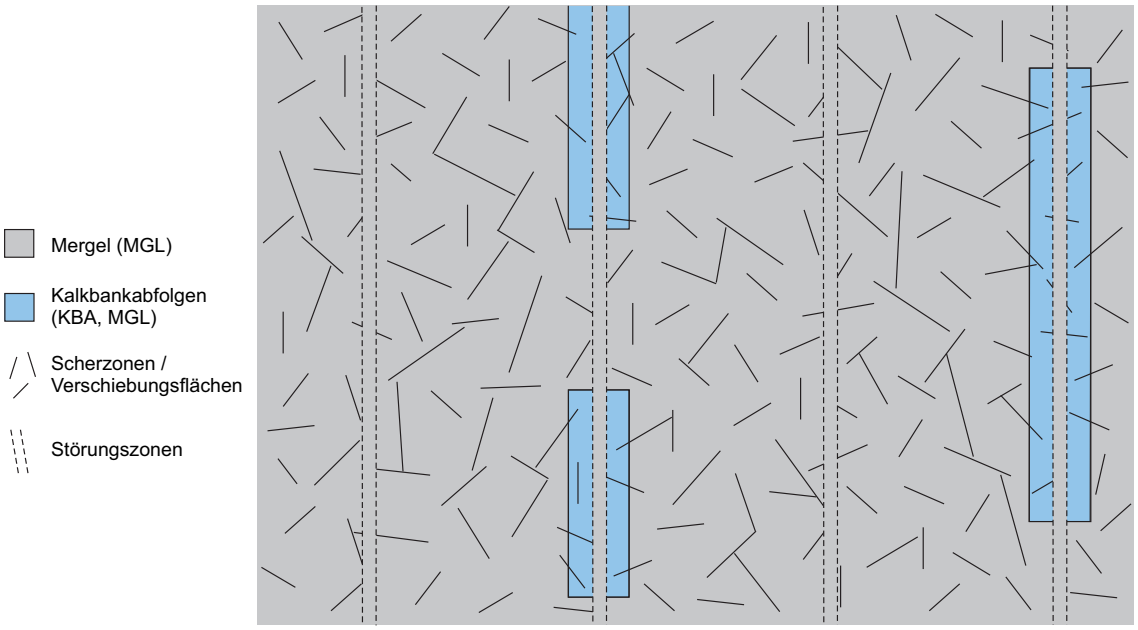


Fig. 4.3-8: Geologisches Konzeptbild für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Standortgebiet Wellenberg.

Aufgrund von Korrelationen von Kalkbankabfolgen in den vertikalen und geneigten Bohrungen SB4, SB4a/v und SB4a/s (Fig. 2.7-11) können Fliesspfade, welche zu einem grossen Teil in Kalkbankabfolgen verlaufen, nicht ausgeschlossen werden. Weil die Kalkbankabfolgen selbst auch Mergelzwischenlagen enthalten und aufgrund der starken Tektonisierung zerschert sind, ist ein ausschliesslicher Verlauf in Kalkbankabfolgen unwahrscheinlich. Für die provisorische Sicherheitsanalyse wird deshalb ein oberer Eckwert eines Verlaufs 80 % Kalk / 20 % Mergel festgelegt.

4.4 Mineralogische Zusammensetzung der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine (Referenzwerte, Bandbreiten)

4.4.1 Wirtgesteine

Die Datenbasis für die Herleitung der Referenz- und Eckwerte der mineralogischen Zusammensetzung ist in Kap. 2.2 dokumentiert. Für die Dosisberechnungen sind nur die Tonmineralgehalte massgebend.

Die Referenz- und Eckwerte der Mineralogie der lithofaziellen Einheiten der Wirtgesteine sind in Traber & Blaser (2013) dokumentiert und begründet. Tab. 4.4-1 und 4.4-2 geben einen Überblick über die Tonmineralgehalte.

Beim 'Braunen Dogger' ist zu beachten, dass die tonreiche Abfolge nach Traber & Blaser (2013) die Tonigen Abfolgen (TA) und die Sandig-tonige Abfolge (STA) abdeckt.

Tab. 4.4-1: Tonmineralgehalte der Wirtgesteine der Nordschweiz: Referenz- und Eckwerte der lithofaziellen Einheiten.

TA: Tonige Abfolgen, STA: Sandig-tonige Abfolgen, SKA: Sandkalkabfolgen, KMA: Kalkmergelabfolgen, KBA: Kalkbankabfolgen.

Wirtgestein	**Opalinuston**	**'Brauner Dogger'**		**Effinger Schichten**	
Lithofazielle Einheit		TA und STA	SKA	KMA	KBA
Referenzwert [Gew.-%]	60	46	11	27	12
Eckwerte [Gew.-%]	40 / 75	20 / 65	5 / 15	20 / 40	0 / 20

Tab. 4.4-2: Tonmineralgehalte der Helvetischen Mergel: Referenz- und Eckwerte der lithofaziellen Einheiten.

MGL: Mergel, KBA: Kalkbankabfolgen.

Wirtgestein	**Helvetische Mergel**					
Lithofazielle Einheit	Mergel MGL	Kalkbänke der KBA	Fault Gouge	Auflockerungs zone MA	Auflockerungs zone Kalkbänke	Ader-füllung
Referenzwert [Gew.-%]	30	5	30	30	5	0
Eckwerte [Gew.-%]	10 / 50	-	-	-	-	-

4.4.2 Untere Rahmengesteine

Die Referenz- und Eckwerte der Tonmineralgehalte der lithofaziellen Einheiten der Unteren Rahmengesteine sind in Traber (2013) dokumentiert und begründet. Die Tonmineralgehalte der einzelnen Einheiten sind in Tab. 4.4-3 zusammengestellt. In den Dosisberechnungen für SGT Etappe 2 (Nagra 2014a) wird Sorption nur bis zum Top des Keuper-Aquifers betrachtet, deshalb wurde nur für die darüber liegenden Einheiten der Tonmineralgehalt hergeleitet.

Tab. 4.4-3: Tonmineralgehalte der lithofaziellen Einheiten der unteren Rahmengesteine des Opalinustons in denen Sorption berücksichtigt wird.

uE: unterer Eckwert.

	Toniger Lias	**'Arietenkalk' Kalkiger Lias**	**Toniger Keuper**
Tonmineralgehalt [Gew.-%]			
Referenzwert (uE)	40 (20)	10 (0)	50 (25)

4.4.2 Obere Rahmengesteine

Die Referenz- und Eckwerte der mineralogischen Zusammensetzung der Oberen Rahmengesteine in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern entsprechen denjenigen der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten. Für die Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss können die Werte aus den lithofaziellen Einheiten des 'Braunen Doggers' verwendet werden (Kap. 3.3.1).

4.5 Porositäten der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine (Referenzwerte, Bandbreiten)

4.5.1 Wirtgesteine

Die Datenbasis für die Herleitung der Referenz- und Eckwerte der Porositäten ist in Kap. 2.3 dokumentiert.

Referenz- und Eckwerte der physikalischen Porosität wurden für die verschiedenen lithofaziellen Einheiten der Wirtgesteine als Grundlagen für die Dosisberechnungen im Rahmen der Sicherheitsanalysen festgelegt (Tab. 4.5-1 und 4.5-2) und werden insbesondere in Traber & Blaser (2013) begründet. Zum Datensatz gehören auch die mit diesen Porositäten kompatiblen Gesteinsdichten (siehe Traber & Blaser 2013).

Für die Wirtgesteine der Nordschweiz werden die Pyknometerporositäten als Grundlage für die Festlegung der Werte der Porosität verwendet, weil damit die breiteste Datenbasis vorliegt (Tab. 4.5-1).

Tab. 4.5-1: Porosität der Wirtgesteine der Nordschweiz: Referenz- und Eckwerte der lithofaziellen Einheiten.

TA: Tonige Abfolgen, STA: Sandig-tonige Abfolgen, SKA: sandig-kalkige Abfolgen, KMA: Kalkmergelabfolgen, KBA: Kalkbankabfolgen.

Wirtgestein	**OPA**	**'Brauner Dogger'**		**Effinger Schichten**	
Lithofazielle Einheit		TA und STA	SKA	KMA	KBA
Physikalische Porosität [Vol.-%]					
Referenzwert	11	12	10	9	4.5
Eckwerte	13 / 17 6	15 5	15 5	12 6	9 3
Anionenzugängliche Porosität [Vol.-%]					
Referenzwert	5.5	6	5	5	3
Eckwerte	6.5 / 11 3	10 2	10 2	6 3	5 2

Beim Opalinuston liegt der Referenzwert der physikalischen Porosität bei 11 Vol.-% und entspricht einer typischen Situation in der Nordschweiz (Fig. 4.5-1). Die Pyknometerporositäten der Proben aus den Bohrungen der Nordschweiz sind allgemein kleiner als 15 Vol.-%: Die höchsten Werte stammen aus der Bohrung Beznau, wo der Opalinuston direkt unter dem

Quartär ansteht und damit durch Druckentlastung und wohl zumindest teilweise auch durch Quellung beeinflusst ist (Wasser im Lockergestein vom generellen Ca-HCO_3-Typ). Gegenüber den Proben aus der Nordschweiz r liegen die Porositäten der Proben vom Felslabor Mont Terri deutlich höher (Fig. 4.5-1). Wenn auch ein Trend zu geringerer Porosität mit zunehmender Tiefenlage erkennbar ist (Fig. 4.5-1), so zeigt der Datensatz auch, dass weitere Einflussfaktoren von Bedeutung sein müssen: Beispielsweise unterscheiden sich die Datensätze von Riniken und Schlattingen-1, trotz einem Unterschied in der Tiefe von rund 550 m, nur wenig und zeigen im Detail ein komplexes Bild. Die Porosität tonmineralreicher Gesteine wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, so der Versenkungsgeschichte (Mazurek et al. 2006), der Mineralogie und dem Gefüge (insbesondere dem Grad der diagenetischen Zementation) sowie der Deformationsgeschichte. Die Druckentlastung bei der Beckeninversion scheint hingegen nur eine eher untergeordnete Rolle zu spielen, solange das Gestein nicht in unmittelbare Oberflächennähe kommt.

Aus diesen Überlegungen heraus und um die Ungewissheit bezüglich der Standortgebiete abzudecken, von denen uns keine Proben vorliegen, werden zwei alternative obere Eckwerte definiert. Der obere Eckwert von 13 Vol.-% basiert auf den Pyknometerporositäten der Nordschweiz (Fig. 4.5-1) exklusiv dem Datensatz der als nicht repräsentativ beurteilten Bohrung Beznau, in welcher der Opalinuston direkt unter dem Quartär ansteht und teilweise verwittert ist. Um auch in den Standortgebieten eine hypothetische Situation wie im Felslabor Mont Terri abdecken zu können, wird zudem ein oberer Eckwert von 17 Vol.-% festgelegt (Traber & Blaser 2013). Dieser Eckwert könnte eine Bedeutung für die untiefsten Lagerperimeter haben, und für solche die aufgrund ihrer peripheren Lage im Molassebecken wohl eine vergleichsweise geringe Versenkungstiefe erreicht haben. Im Vordergrund steht hier der Südranden, wo auch keine Datensätze direkt aus dem Standortgebiet vorliegen,

Die anionenzugängliche Porosität des Opalinustons orientiert sich an einem zugänglichen Anteil von 0.5 (Tab. 4.5-1). Auch hier werden zwei alternative obere Eckwerte betrachtet. Der höhere Wert von 11 Vol.-% orientiert sich am Datensatz Mont Terri, wo in einzelnen Experimenten hohe Werte beobachtet wurden (Pearson et al. 2003, Figur A10.8).

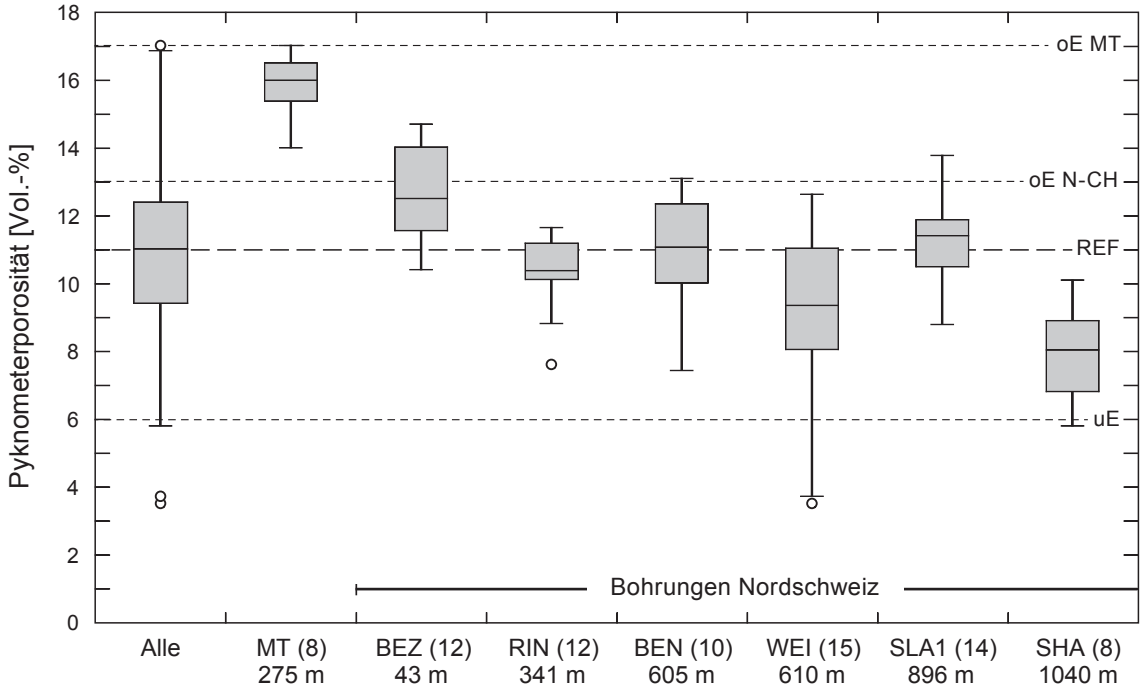


Fig. 4.5-1 Boxplot-Darstellung der Pyknometerporositäten des Opalinustons in Bohrungen der Nordschweiz und im Felslabor Mont Terri (MT).

Die Bohrungen sind nach aufsteigender mittlerer Formationsteufe dargestellt. Die horizontalen Linien zeigen den Referenzwert (REF), den unteren (uE) und die oberen Eckwerte basierend auf dem Datensatz Nordschweiz (oE N-CH) und basierend auf dem Datensatz inklusive Felslabor Mont Terri (oE MT).

Die Werte in Klammern bezeichnen die Anzahl Analysenwerte. MT: Felslabor Mont Terri, BEZ: Beznau, RIN: Riniken, BEN: Benken, WEI: Weiach, SLA1: Schlattingen-1, SHA: Schafisheim.

Beim 'Braunen Dogger' werden bezüglich der Porosität die tonreiche Abfolge, welche die lithofaziellen Einheiten Tonige Abfolgen (TA) und Sandig-tonige Abfolge (STA) umfasst, sowie die Sandkalkabfolgen unterschieden (Tab. 4.5-1). Der Datensatz aus der Bohrung Schlattingen-1 (Wersin et al. 2013a) war zum Zeitpunkt der Festlegung der Werte in Traber & Blaser (2013) noch nicht verfügbar, die auffallend niedrigen Werte der Porosität der tonreichen Abfolge der Proben aus Weiach wurden aber schon diskutiert. Aufgrund der Ähnlichkeit des Datensatzes Schlattingen-1 mit dem Datensatz Benken wurde entschieden, den Referenzwert der Tonreichen Abfolge von 10 auf 12 Vol.-% zu ändern, der (unveränderte) untere Eckwert deckt den Datensatz Weiach ab (Fig. 4.5-2). Bezüglich der anionenzugänglichen Porosität basiert der Referenzwert (Tab. 4.5-1) auf einem zugänglichen Anteil von 0.5. Der obere Eckwert von 10 Vol.-% resultiert aus einem zugänglichen Anteil von 0.65 und dem basierend auf der Pyknometerporosität abgeschätzten oberen Eckwert der Porosität.

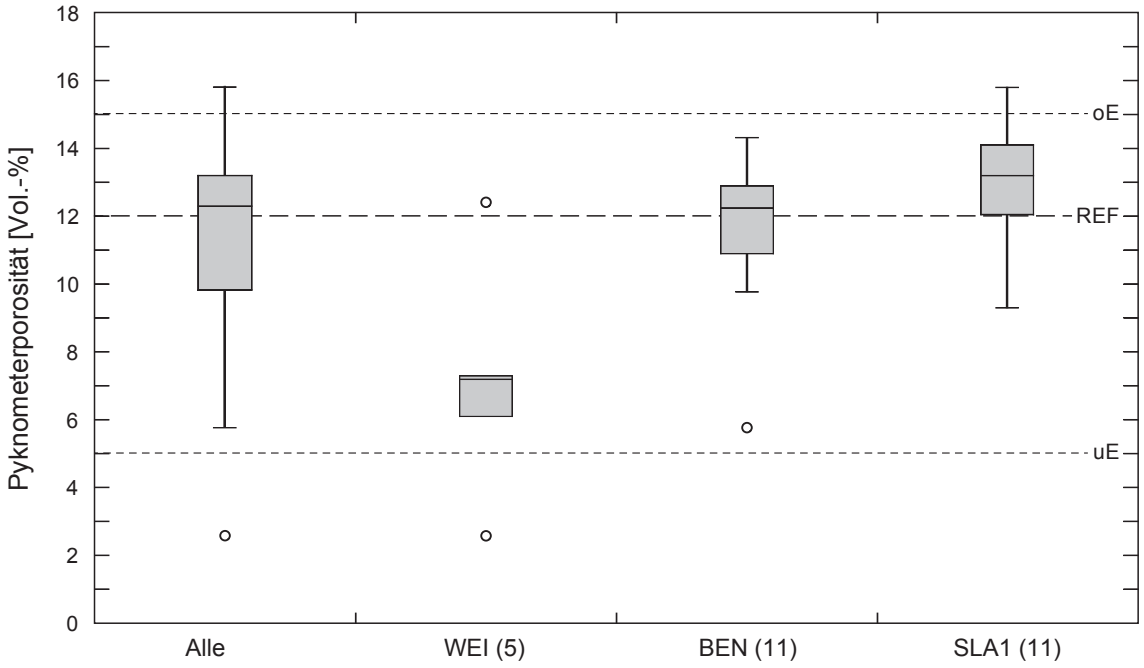


Fig. 4.5-2: Tonreiche Abfolge des 'Braunen Doggers': Boxplot-Darstellung der Pyknometerporosität.

Die horizontalen Linien bezeichnen Referenz- und Eckwerte (vgl. Tab. 4.5-1).

WEI: Weiach, BEN: Benken, SLA1: Schlattingen-1. Die Werte in Klammern bezeichnen die Anzahl der Proben.

Die Referenz- und Eckwerte der Kalkmergelabfolgen (KMA) und Kalkbankabfolgen (KBA) der Effinger Schichten sind ebenfalls in Tab. 4.5-1 aufgelistet und werden in Traber & Blaser (2013) hergeleitet. Die anionenzugängliche Porosität basiert auf einem zugänglichen Anteil von 0.5. Bei den tonarmen KBA wurden die Werte so gewählt, dass auch ein vollständig zugänglicher Porenraum in den teilweise beobachteten reinen Kalkbänken abgedeckt werden kann.

Bei den Helvetischen Mergeln umfasst der Datensatz die Mergel und die Kalkbänke der Kalkbankabfolgen (Tab. 4.5-2). Die Festlegung der Referenz- und Eckwerte basiert bei diesem Wirtgestein auf der mit der Hg-Injektionsmethode bestimmten Porosität. Weil mit dieser Methode nicht der gesamte Porenraum erfasst wird (Kap. 2.3) wurde der obere Eckwert so gewählt, dass er den Datensatz der Pyknometer- und Wasserverlustporosität sowie der diffusionszugänglichen Porosität für HTO weitgehend abdeckt (Fig. 2.3-1). Die Werte der anionenzugänglichen Porosität der tonreichen Einheiten orientieren sich am Anteil von 0.3 gemäss Pearson (1999), der Wertebereich deckt aber auch die in den Diffusionsexperimenten mit wiederaufgesättigten Proben beobachteten niedrigen anionenzugänglichen Porositäten ab (Kap. 2.3).

Tab. 4.5-2: Helvetische Mergel: Referenz- und Eckwerte der Porositäten der lithofaziellen Einheiten.

Wirtgestein	**Helvetische Mergel**	
Lithofazielle Einheit	Mergel	Kalkbänke der Kalkbankabfolgen
Porosität [Vol.-%]		
Referenzwert	1.4	0.3
Eckwerte	0.3 / 4	-
Anionenzugängliche Porosität [Vol.-%]		
Referenzwert	0.4	0.3
Eckwerte	1.2 0.1	-

4.5.2 Untere Rahmengesteine

Die Referenz- und Eckwerte der Porositäten der lithofaziellen Einheiten der Unteren Rahmengesteine sind in Traber (2013) dokumentiert und begründet. Die Porositäten der einzelnen lithofaziellen Einheiten finden sich in Tab. 4.5-3.

Zur Anionen-zugänglichen Porosität liegen keine systematischen Untersuchungen vor. Für die Einheiten Toniger Lias, Toniger Keuper und 'Gipskeuper' wird der Anionen-zugängliche Anteil auf 0.5 geschätzt, für 'Arietenkalk', Kalkiger Lias und Keuper-Aquifer auf 1.0.

Tab. 4.5-3: Porositäten der lithofaziellen Einheiten der unteren Rahmengesteine des Opalinustons.

uE: unterer Eckwert; oE: oberer Eckwert.

	Toniger Lias	**'Arietenkalk' Kalkiger Lias**	**Toniger Keuper**	**Keuper-Aquifer**	**'Gipskeuper'**
Physikalische Porosität [Vol.-%]					
Referenzwert (uE/oE)	10 (4/14)	5 (1/15)	11 (7/15)	8 (1/15)	4 (2/12)

4.5.3 Obere Rahmengesteine

Die Referenz- und Eckwerte der Porositäten der Oberen Rahmengesteine in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern entsprechen denjenigen der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten. Für die Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss können die Werte der entsprechenden lithofaziellen Einheiten des 'Braunen Doggers' verwendet werden (Kap. 3.3.1).

4.6 Geochemische Bedingungen (Porenwasser, Mikrobiologie, Kolloidfiltration)

Die Indikatoren *'pH', 'Redox-Bedingungen', 'Salinität', 'mikrobielle Prozesse', 'Kolloide'* des Kriteriums 'Geochemische Bedingungen' werden im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs bewertet, fliessen aber nur indirekt in die Dosisberechnungen der Sicherheitsanalyse ein (via Sorptionsdatenbank, Löslichkeiten). Einzig die reduzierte Kolloidfiltration in geklüfteten lithofaziellen Einheiten im Lagerumfeld (Effinger Schichten, Helvetische Mergel) wird durch spezifische Rechenfälle abgedeckt (Nagra 2014b). Die Referenzwerte für pH, Redox-Bedingungen und Salinität sind nicht an einzelne lithofazielle Einheiten gebunden, sondern gelten jeweils für das gesamte Wirtgestein. Aus diesem Grund werden die geochemischen Bedingungen in diesem Kapitel nicht weiter diskutiert; alle relevanten Angaben sind in Kap. 2.4 zu finden.

4.7 Hydraulischen Durchlässigkeit der lithofaziellen Einheiten und Transmissivitäten von Störungen in den Wirt- und Rahmengesteinen

Für die provisorische Sicherheitsanalyse für SGT Etappe 2 verlangt das ENSI (2010) für alle Wirtgesteine die Betrachtung eines Falls mit erhöhtem Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (ENSI-Fall a), d.h. die Durchführung von Dosisberechnungen mit hydraulischen Durchlässigkeiten und/oder hydraulischen Gradienten, die höher sind, als aufgrund der durchschnittlich gemessenen und erwarteten besten Schätzwerte. Für die tonreichen lithofaziellen Einheiten mit hohem Selbstabdichtungsvermögen wurden dazu die K-Werte des Gesamtgesteins erhöht, für tonärmeren Einheiten wurde in den Dosisberechnungen die Auswirkung von möglicherweise vorhandenen Störungen mit erhöhter Transmissivität, welche mit den bisherigen Bohrungen möglicherweise nicht erfasst worden sind, betrachtet.

4.7.1 Durchlässigkeitsmessungen in den vier Wirtgesteinseinheiten im Vergleich mit Messungen in ähnlichen Gesteinen

Empirische Feld- und Labordaten von Sedimentgesteinen (Appel & Habler 2002, Jolley et al. 2007, Nagra 2009, Bock et al. 2010) zeigen, dass Sedimentgesteine mit Tonmineralgehalten > 40 Gew.-% ausnahmslos sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten und ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen aufweisen (Kap. 2.5.2). Die K-Werte liegen – je nach Studie – fast ausnahmlos unter 10^{-11} bzw. unter 10^{-12} m/s. Die zahlreichen direkten Messungen im Opalinuston und die daraus abgeleiteten, nachstehend aufgeführten Referenzwerte und oberen Eckwerte sind mit diesen Erfahrungen konsistent. Auch die tonreichen Abfolgen im 'Braunen Dogger' fallen in diese Kategorie.

Für Gesteine mit Tonmineralgehalten zwischen 40 und 20 Gew.-% zeigen die empirischen Feld- und Labordaten (Appel & Habler 2002, Jolley et al. 2007, Nagra 2009, Bock et al 2010), dass das Selbstabdichtungsvermögen reduziert ist und dass geklüftete bzw. von Störungen durchsetzte Abfolgen um 2 – 3 Grössenordnungen höhere Durchlässigkeiten aufweisen können als die tonreichen Gesteine. In diese Kategorie fallen die Sandig-tonigen Abfolgen des 'Braunen Doggers', die Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten und die Helvetischen Mergel ohne die Kalkbankabfolgen. In den hydraulischen Test in diesen lithofaziellen Einheiten wurden meist sehr geringe Durchlässigkeiten < 10^{-11} m/s gemessen (Kap. 2.5.1). Weil die Anzahl der Tests im relevanten Tiefenbereich in dieser Kategorie bedeutend geringer ist als im Opalinuston, bestehen grössere Ungewissheiten darüber, ob die sehr geringen gemessenen Durchlässigkeiten darauf zurückzuführen sind, dass die Störungen weitgehend mit Calcit zementiert sind (Beispiel Effinger Schichten, Helvetische Mergel), dass keine grösseren Störungen durchbohrt wurden (Beispiel 'Brauner Dogger') oder dass nur gering durchlässige Bereiche innerhalb von Störungen

mit variablen Transmissivitäten (*flow channeling*) erfasst wurden. Bei der Festlegung der Referenzwerte und der ungünstigeren massgebenden Werte für die Einengung müssen diese Ungewissheiten berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass auch Modellrechnungen mit höheren Durchlässigkeitsbeiwerten und Transmissivitäten durchgeführt werden, als in den Bohrungen in der Nordschweiz und im Standortgebiet Wellenberg gemessen wurden (vgl. unten).

Gesteinsabfolgen mit Tonmineralgehalten unter 20 Gew.-% (oft auch als "harte Bänke" bezeichnet) zeigen bei einer tektonischen Überprägung häufig noch höhere Durchlässigkeiten als die mergeligen und sandig-tonigen Abfolgen (Nagra 2009, Jolley et al. 2007). Sie können Werte erreichen, die so hoch sind, dass keine signifikante Radionuklidrückhaltung mehr stattfinden kann. Erfahrungen in den Tiefbohrungen der Nordschweiz haben gezeigt, dass aus einzelnen isolierten gering mächtigen "harten Bänken" (Mächtigkeit im Bereich < 1 m) in tonigen Formationen noch nie bedeutende Wasserzutritte festgestellt wurden. Signifikant erhöhte Durchlässigkeiten stammen typischerweise aus mehreren Metern mächtigen Abfolgen wie Arietenkalk / Lias α, Gansinger Dolomit, Stubensandstein-Formation etc. Die Gründe dazu sind nicht klar; möglich ist, dass sich bei einzelnen gering mächtigen Bänken aufgrund der rheologischen Kontraste zwischen der "harten Bank" und dem tonigen Nebengestein keine Kluftsysteme mit einer weiträumigen Konnektivität entwickeln können. In der Nordschweiz wurden oft mehrere Meter mächtige Abfolgen von "harten Bänken" durchbohrt, die eine sehr geringe Durchlässigkeit zeigten. Diese Erfahrungen werden dahingehend interpretiert, dass die tektonische Überprägung dieser Abfolgen nur sehr lokal ist (weitständige Störungen) oder dass Kluftsysteme unter den gegebenen Spannungsverhältnissen in grösseren Tiefen hydraulisch nicht oder nur lokal wirksam sind. In den Modellrechnungen für die Sicherheitsanalyse muss berücksichtigt werden, dass die "harten Bänke" lokal von kleinen Störungen durchschlagen werden und im Schnittbereich mit der Störung als Freisetzungspfad mit erhöhter Transmissivität wirken können (Fig. 4.2-1); ein Freisetzungspfad in einem Kluftsystem ist wenig wahrscheinlich, kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Die nachfolgende Festlegung der Referenzwerte und oberen Eckwerte basiert auf einer kombinierten Einschätzung von direkten Messungen im Wirtgestein und Erfahrungen aus lithologisch ähnlichen Gesteinen.

4.7.2 Wirtgesteine

4.7.2.1 Datensatz Opalinuston

Mechanismen des Transports gelöster Stoffe im relevanten Tiefenbereich:

- Das Wirtgestein wird als homogener Gesteinkörper (äquivalent-poröses Medium) betrachtet, mit advektiv-dispersivem und diffusivem Transport durch die sehr gering durchlässige Gesteinsmatrix. Störungen und Klüfte wirken aufgrund des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens nicht als präferenzielle Fliesspfade.

Hydraulische Durchlässigkeit:

- Es wird zwischen einem Datensatz 'untief' (Top OPA < 400 m) und einem Datensatz 'mittel/tief' (Top OPA > 400 m) unterschieden.
- Anisotropie in beiden Fällen $K_h = 5 \times K_v$ (Schätzwert basierend auf Laborexperimenten an Bohrkernen, insbesondere aus der Bohrung Benken, s. Kap. 2.5.1.2).

Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen:

- Die Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen sind konsistent mit den Messungen im Opalinuston. Die Messungen im Opalinuston werden als repräsentativ betrachtet und direkt für die Festlegung der Modellparameter verwendet.

Datensatz Opalinuston 'mittel/tief'

- Referenzwerte: $K_h = 10^{-13}$ m/s, $\mathbf{K_v = 2 \times 10^{-14}}$ **m/s**
- Obere Eckwerte: $K_h = 5 \times 10^{-13}$ m/s, $\mathbf{K_v = 10^{-13}}$ **m/s**
- Die Referenzwerte entsprechen den Maximalwerten der Messungen in der Sondierbohrung Benken. Die Gesteinsüberdeckung von Top Opalinuston beträgt dort rund 540 m (Nagra 2002a). Der Datensatz der Bohrung Benken ist der zuverlässigste aller Tiefbohrungen in der Nordschweiz (neue Bohrungen mit speziellen Massnahmen betreffend Bohrspülung und Testsequenzen).
- Die oberen Eckwerte entsprechen dem Referenzwert des Datensatzes 'untief' (s. unten). Der obere Eckwert K_h für Standortgebiete mit einer Überdeckung von mehr als 400 m deckt die besten Schätzwerte sämtlicher gültiger Tests im Opalinuston der Nordschweiz ab (Tab. 2.5-1: Höchster K_h-Wert von Test 1065.6D, 4×10^{-13} m/s).

Datensatz Opalinuston 'untief'

- Referenzwerte: $K_h = 5 \times 10^{-13}$ m/s, $\mathbf{K_v = 10^{-13}}$ **m/s**
- Obere Eckwerte: $K_h = 1.5 \times 10^{-12}$ m/s, $\mathbf{K_v = 3 \times 10^{-13}}$ **m/s**
- Der gerundete K_h-Referenzwert liegt im Bereich der Durchschnittswerte aus dem Felslabor Mont Terri (Bandbreite K_h: $2 \times 10^{-14} – 6 \times 10^{-12}$ m/s, bester Schätzwert K_h: 2×10^{-13} m/s; Tabelle 8.2 in Bossart & Thury 2008), das eine Gesteinsüberdeckung von 250 – 300 m aufweist. Der obere Eckwert ist ca. 10-mal höher als der beste Schätzwert und liegt im oberen Bereich der Ergebnisse der einzelnen Tests (Fig. 2.5-2). Als Anisotropie-Faktor wurde wie für Opalinsuton 'mittel/tief' ein Faktor 5 verwendet.
- Generell hat der Opalinuston in den Bohrungen der Nordschweiz in allen Tiefenlagen deutlich geringere Porositäten als der Opalinuston im Felslabor Mont Terri, auch in der sehr oberflächennahen Lage in der Bohrung Beznau (Traber & Blaser 2013). Es ist deshalb sehr fraglich, ob der Opalinuston in den Standortgebieten mit Opalinuston in Tiefen < 400 m (Südranden, nördliche Bereiche Jura Ost) signifikant höhere Durchlässigkeiten als in den übrigen Standortgebieten mit Opalinuston in grösserer Tiefe aufweist.
- Es ist möglich, dass die gegenüber den Werten in der Nordschweiz etwas erhöhten Werte im Felslabor Mont Terri nicht allein eine Funktion der unterschiedlichen Versenkungsgeschichte oder der heutigen Tiefenlage sind, sondern auch durch den allgemein hohen Deformationsgrad im Umfeld des Faltenjuras bestimmt sind (vgl. Giger & Marschall 2014). Wahrscheinlich ist es ein Zusammenwirken aller drei Aspekte.

4.7.2.2 Datensatz 'Brauner Dogger'

Mechanismen des Transports gelöster Stoffe im relevanten Tiefenbereich:

- Das Wirtgestein besteht mehrheitlich aus homogenen tonreichen Abfolgen mit Tonmineralgehalten > 40 Gew.-%, welche bezüglich Radionuklidtransport mit dem Opalinuston gut vergleichbar sind (äquivalent-poröses Medium). Die mächtigste tonreiche Abfolge bilden die Parkinsoni-Württembergica-Schichten.
- Darin eingeschaltet sind Sandig-tonige Abfolgen mit Tonmineralgehalten im Bereich 40 – 20 Gew.-% und Sandkalkabfolgen mit Gehalten < 20 Gew.-%. In diesen Einheiten können Störungen und Klüfte bevorzugte Transportwege (wasserführende Systeme, s. Kap. 2.7) für Radionuklide bilden, mit advektiv-dispersivem Transport innerhalb der Störung/Klüfte und diffusiver Wechselwirkung mit der Gesteinsmatrix (sog. Matrixdiffusion).
- Für Sandig-tonige Abfolgen und für Sandkalkabfolgen wird der Freisetzungspfad 'Störung' als wahrscheinlich betrachtet. Annahme für ruhig gelagerte Verhältnisse in einem Lagerperimeter: 1 Störung pro 100 m.
- Ein Freisetzungspfad 'geklüftetes Medium' wird für die Sandig-tonigen Abfolgen als unwahrscheinlich betrachtet, sie werden im Referenzfall als äquivalent-poröses Medium betrachtet. Für Sandkalkabfolgen ist der Freisetzungspfad 'geklüftetes Medium' eine konzeptuelle Ungewissheit, die aufgrund der heutigen Datenlage nicht ausgeschlossen werden kann.

Hydraulische Durchlässigkeit:

- Die Testintervalle umfassen immer mehrere lithofazielle Einheiten; sie sind zu gross, um direkt K-Werte für einzelne lithofazielle Einheiten abzuleiten.
- Für die Sandig-tonigen Abfolgen und für die Sandkalkabfolgen wird keine Anisotropie der ungestörten Matrix angenommen.

Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen:

- Für die tonigen Abfolgen im 'Braunen Dogger' werden bezüglich Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen die gleichen Schlussfolgerungen gezogen wie für den Opalinuston.
- Für die Sandig-tonigen Abfolgen sind die in den Bohrungen in der Nordschweiz gemessenen Werte niedriger als der obere Bereich der Werte von Tests in ähnlichen Gesteinen. Dies wird bei der Festlegung der oberen Eckwerte berücksichtigt.

Datensatz Tonige Abfolgen (TA)

- Referenzwerte: $K_h = 5 \times 10^{-13}$ m/s, $\mathbf{K_v = 10^{-13}}$ **m/s**
- Obere Eckwerte: $K_h = 2.5 \times 10^{-12}$ m/s, $\mathbf{K_v = 5 \times 10^{-13}}$ **m/s**
- Die Tonigen Abfolgen werden analog dem Opalinuston behandelt, wobei spezifische Tests im 'Braunen Dogger' berücksichtigt werden. In der Bohrung Benken wurden im Bereich der Parkinsoni-Württembergica-Schichten etwas höhere K-Werte gemessen als im Opalinuston, dies könnte aber auch durch einen Einfluss der darüber liegenden Schichten begründet sein, welche im gleichen Packerintervall liegen. Die Referenzwerte wurden vorsichtshalber entsprechend höher, d.h. gleich wie Opalinuston 'untief' gesetzt. Bezüglich der Anisotropie werden die Erfahrungen aus dem Opalinuston übernommen. Der obere Eckwert wird um Faktor 5 erhöht.

Datensatz Sandig-tonige Abfolgen (STA)

- Referenzwert ungestörtes Gestein oder Gestein mit hydraulisch nicht wirksamen Störungen (z.B. mit Calcit verheilte Störungen): $K_h = \mathbf{K_v = 10^{-12}\ m/s}$
- Referenzwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-10}\ m^2/s}$
- Oberer Eckwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-9}\ m^2/s}$
- Die Sandig-tonigen Abfolgen zeigen in allen Bohrungen in der Nordschweiz sehr geringe Durchlässigkeiten. Eine Ausnahme bildet der unterste Bereich des 'Braunen Doggers' der Bohrung Schlattingen-1 mit bestem Schätzwert 1.4×10^{-9} m/s, wobei es ungewiss ist, ob dieser Werte durch ein tektonisch-strukturelles Element in der Sandig-tonigen Abfolge oder in den "harten Bänken" (Sandkalke) in diesem Intervall bestimmt ist. Der Datensatz stützt sich deshalb auch auf den breiter abgestützten Vergleich mit Erfahrungen aus ähnlichen Gesteinen.
- Der Referenzwert für ungestörte Sandig-tonige Abfolgen wurde wegen der geringen Datenbasis und des geringeren Tonmineralgehalts vorsichtshalber etwas höher gewählt als für Opalinuston resp. für die Tonige Abfolge.
- Weil nur in einer besonders günstigen Situation mit sehr ruhiger Lagerung damit gerechnet werden werden kann, dass Sandig-tonige Abfolgen keine durch kleinere Störungen bedingte erhöhte Durchlässigkeit aufweisen, werden im Referenzfall transmissive Störungen berücksichtigt.
- Aufgrund der Datenbasis von Jolley et al (2007) können *Fault rocks* in Gesteinen mit Tonmineralgehalten von 20 – 40 Gew.-% K-Werte bis 10^{-9} m/s erreichen. Bei einer Mächtigkeit des gestörten Gesteinsmaterials von 10 cm (Annahme für die Mächtigkeit der *Fault rock* Zone in einer kleinen Störung) ergibt sich daraus eine maximale Transmissivität der Störung von 10^{-10} m^2/s.
- Falls eine Störung breiter ist oder falls mehrere hydraulisch wirksame Störungen pro 100 m auftreten, könnte die Gesamttransmissivität der Störungen auch bis zu einer Grössenordnung höhere Werte erreichen.

Datensatz Sandkalkabfolgen (SKA)

- Referenzwert ungestörtes Gestein oder Gestein mit hydraulisch nicht wirksamen Störungen (z.B. mit Calcit verheilte Störungen): $K_h = \mathbf{K_v = 10^{-12}\ m/s}$
- Referenzwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-7}\ m^2/s}$
- Oberer Eckwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-5}\ m^2/s}$
- Alternatives Konzept: Hydraulische Durchlässigkeit 'geklüftetes Medium', Kluftabstand 0.5 – 1 m: $\mathbf{K = 10^{-9}\ m/s}$ (gleiche Gesamtdurchlässigkeit wie obiges Szenarium mit 1 Störung / 100 m mit $T = 10^{-7}$ m^2/s)
- Wie bei den Sandig-tonigen Abfolgen zeigen auch die Sandkalkabfolgen (bzw. die "harten Bänke") in allen Bohrungen in der Nordschweiz sehr geringe Durchlässigkeiten. Auch die natürlichen Tracerprofile weisen keine Unstetigkeiten oder Anomalien im Bereich der Sandkalkabfolgen auf. Der einzige Hinweis auf eine möglicherweise stärker erhöhte Durchlässigkeit einer Sandkalkabfolge ist der unterste Bereich des 'Braunen Doggers' der Bohrung Schlattingen-1 mit bestem Schätzwert 1.4×10^{-9} m/s. Falls dieser Wert allein durch eine wenige Meter mächtige Sandkalkabfolge bestimmt wäre, könnte ihr K-Wert um eine Grössenordnung höher sein. Falls der Wert durch eine einzige Störung bestimmt ist, läge

ihre Transmissivität in einem Bereich > 10^{-8} m^2/s. Aus dem gleichen Grund wie bei den Sandig-tonigen Abfolgen werden auch bei den Sandkalkabfolgen im Referenzfall transmissive Störungen berücksichtigt.

- Aufgrund der Datenbasis von Nagra (2009) und Jolley et al. (2007) können *Fault rocks* in Gesteinen mit Tonmineralgehalten von < 20 Gew.-% noch höhere Durchlässigkeiten aufweisen als die in Schlattingen-1 gemessenen, was sich in der Wahl der oberen Eckwerte der Parameter niederschlägt.

4.7.2.3 Datensatz Effinger Schichten

Mechanismen des Transports gelöster Stoffe im relevanten Tiefenbereich:

- Das Wirtgestein besteht mehrheitlich aus Kalkmergelabfolgen mit einem mittleren Tonmineralgehalt von 27 Gew.-% (Traber & Blaser 2013). In dieser lithofaziellen Einheit können Störungen bevorzugte Freisetzungspfade für Radionuklide bilden (s. Kap. 2.7), mit advektiv-dispersivem Transport innerhalb der Störung und diffusiver Wechselwirkung mit der Gesteinsmatrix (Matrixdiffusion). Das Vorhandensein von hydraulisch wirksamen Kluftsystemen wird als unwahrscheinlich eingestuft (keine Hinweise aus Bohrungen).
- In den Kalkmergeln eingeschaltet sind Kalkbankabfolgen mit Tonmineralgehalten < 20 Gew.-% (Mittelwert 12 Gew.-%; Traber & Blaser 2013). In diesen Einheiten können Störungen oder Klüfte bevorzugte Freisetzungspfade für Radionuklide bilden (wasserführende Systeme s. Kap. 2.7), mit advektiv-dispersivem Transport innerhalb der Störung/ Klüfte und diffusiver Wechselwirkung mit der Gesteinsmatrix (Matrixdiffusion).

Hydraulische Durchlässigkeit:

- Mit Ausnahme der Gestenhübel-Schichten in der Bohrung Oftringen ist aus den Packertests im relevanten Tiefenbereich kein Unterschied zwischen Kalkmergel- und Kalkbankabfolgen ersichtlich. In den obersten 200 m sind die Kalkbankabfolgen tendenziell höher durchlässig als die Kalkmergelabfolgen (Laws & Deplazes 2007, Klump et al. 2008, vgl. auch Kap. 2.7), aber auch in den Kalkmergelabfolgen bilden Störungen lokal bevorzugte Fliesswege.
- Für die Kalkmergel- und die Kalkbankabfolgen wird keine Anisotropie der ungestörten Matrix angenommen.

Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen:

- Für die beiden lithofaziellen Einheiten der Effinger Schichte ist der obere Bereich der in ähnlichen Gesteinen gemessenen Werte deutlich höher als diejenigen in den Bohrungen der Nordschweiz. Dies wird bei der Festlegung der oberen Eckwerte berücksichtigt.

Datensatz Kalkmergelabfolgen (KMA)

- Referenzwert ungestörtes Gestein oder Gestein mit hydraulisch nicht wirksamen Störungen (z.B. mit Calcit verheilte Störungen): $\mathbf{K_h = K_v = 10^{-12}\ m/s}$
- Referenzwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-10}\ m^2/s}$
- Oberer Eckwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-9}\ m^2/s}$
- Die Kalkmergelabfolgen zeigen in allen Bohrungen in der Nordschweiz im Tiefenbereich > 300 m sehr geringe Durchlässigkeiten.

- Generell kann davon ausgegangen werden, dass völlig ungestörte Kalkmergelabfolgen aufgrund des Karbonatzements sogar eine extrem geringe hydraulische Durchlässigkeit < 10^{-13} m/s aufweisen. Trotzdem wurde der Referenzwert für 'ungestörte' Kalkmergelabfolgen aus folgenden Gründen vorsichtshalber etwas höher gewählt als derjenige für den Opalinuston: Die Effinger Schichten haben einen geringeren Tonmineralgehalt und damit zusammenhängend ein geringeres Selbstabdichtungsvermögen (kleinräumige Trennflächensysteme könnten zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit führen), zudem bestehen Ungewissheiten bezüglich der Rolle der Selbstabdichtung von Trennflächen durch Calcitadern in der Bohrung Oftringen.
- Aufgrund der Datenbasis von Jolley et al (2007) können *Fault rocks* in Gesteinen mit Tonmineralgehalten von 20 – 40 Gew.-% K-Werte bis 10^{-9} m/s erreichen. Bei einer Mächtigkeit des gestörten Gesteinsmaterials von 10 cm (Annahme für die Mächtigkeit der *Fault rock* Zone in einer kleinen Störung) ergibt sich daraus eine maximale Transmissivität der Störung von 10^{-10} m^2/s.
- Falls eine Störung breiter ist oder falls mehrere hydraulisch wirksame Störungen pro 100 m auftreten, könnte die Gesamttransmissivität der Störungen auch bis zu einer Grössenordnung höhere Werte erreichen.

Datensatz Kalkbankabfolgen (KBA)

- Referenzwert ungestörtes Gestein oder Gestein mit hydraulisch nicht wirksamen Störungen (z.B. mit Calcit verheilte Störungen): $K_h = \mathbf{K_v = 10^{-12}}$ **m/s**
- Referenzwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-7}}$ **m^2/s**
- Oberer Eckwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-5}}$ **m^2/s**
- Alternatives Konzept: Hydraulische Durchlässigkeit 'geklüftetes Medium', Kluftabstand 0.5 bis 1 m: $\mathbf{K = 10^{-9}}$ **m/s** (gleiche Gesamtdurchlässigkeit wie obiges Szenarium mit 1 Störung / 100 m mit $T = 10^{-7}$ m^2/s)
- Wie bei den Kalkmergelabfolgen zeigen auch die Kalkbankabfolgen in allen Bohrungen in der Bohrung Oftringen sehr geringe Durchlässigkeiten. Auch die natürlichen Tracerprofile weisen keine Unstetigkeiten oder Anomalien im Bereich der Kalkbankabfolgen auf. Der einzige Hinweis auf eine möglicherweise stärker erhöhte Durchlässigkeit einer Kalkbankabfolge ist ein Test in den Gerstenhübel-Schichten der Bohrung Otringen mit einem K-Wert von rund 10^{-11} m/s. Falls dieser Wert hauptsächlich durch eine Störung bestimmt wird, ergibt sich eine Transmissivität von knapp 10^{-10} m/s (der höchste in den Effinger Schichten gemessene Wert im Tiefenbereich > 300 m). Im Bohrkern ist im betreffenden Abschnitt eine steile Verschiebungsfläche erkennbar (Fig. 2.7-5), welche aber nicht die typischen Merkmale einer Störung mit einem *Fault gouge*-Kern und weitere Begleitstrukturen aufweist. In der Sicherheitsanalyse wird für Störungen ein höherer Wert angenommen als in Oftringen gemessen wurde. Aus dem Tiefenbereich 0 – 300 m gibt es mehrere Hinweise, dass die Gerstenhübel-Schichten aufgrund einer strukturellen Überprägung einen bevorzugten horizontalen Freisetzungspfad darstellen (Kap. 2.7.3.1).
- Aufgrund der Datenbasis von Nagra (2009) und Jolley et al. (2007) können *Fault rocks* in Gesteinen mit Tonmineralgehalten von < 20 Gew.-% noch bedeutend höhere Durchlässigkeiten aufweisen als Gesteine mit 20 – 40 Gew.-%, was sich in der Wahl der oberen Eckwerte der Parameter niederschlägt, welche diese Ungewissheiten abdecken. Dabei ist zu bemerken, dass sich die Datenbasis von Jolley et al. 2007 vorwiegend auf siliziklastische Sedimentgesteine bezieht, die Datenbasis Nagra (2009) beinhaltet hingegen auch Daten aus Karbonatgesteinen.

4.7.2.4 Datensatz Helvetische Mergel

Mechanismen des Transports gelöster Stoffe im relevanten Tiefenbereich:

- Wie die Effinger Schichten bestehen die Helvetischen Mergel vorwiegend aus mergeligen Lithologien mit Kalkbänken und Kalkbankabfolgen, wobei der durchschnittliche Tonmineralgehalt der Mergel mit 30 Gew.-% etwas höher ist als derjenige der Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten. Die tertiären Einheiten (Stad-Formation / 'Globigerinenmergel', ein Teil der Hohgant-Formation / 'Schimberg-Schiefer') sind deutlich sandiger als die kretazischen Einheiten (Palfris-Formation, Vitznau-Mergel; vgl. Fig. 2.2-6).
- Die tektonische Geschichte ist wesentlich komplexer als die der Effinger Schichten. Die wasserführenden Systeme bilden ein komplexes Netzwerk von diskreten wasserführenden Systemen (Kap. 2.7.4) in einer sehr gering durchlässigen Gesteinsmatrix, das vereinfacht als Netzwerk von ausgedehnten Störungen und kleinräumigeren Scherzonen/Verschiebungsflächen dargestellt werden kann, welche die Mergel und die Kalkbankabfolgen durchschlagen (vgl. Fig. 4.2-1).
- Die Störungen und die kleinräumigen Scherzonen/Verschiebungsflächen sind bevorzugte Freisetzungspfade für Radionuklide, mit advektiv-dispersivem Transport und diffusiver Wechselwirkung mit der Gesteinsmatrix (Matrixdiffusion).
- Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein bedeutender Teil des Freisetzungspfads (bis zu 80 %) entlang von Kalkbankabfolgen mit drusigen, mit Calcit belegten offenen Klüften verläuft (Fig. 4.3-8). In den Dosisberechnungen für die provisorische Sicherheitsanalyse wird für den Rechenfall, in welchem ein Teil des Transportpfads (80 %) in Kalkbänken der Kalkbankabfolgen mit viel schlechteren Sorptionseigenschaften erfolgt, mit einem auf 20 m verkürzter Transportpfad im Mergel und zusätzlich in Störungen gerechnet (Nagra 2014b), d.h. keine weitere Retardation in den Kalkbankabfolgen.

Hydraulische Durchlässigkeit:

- In den obersten 500 bis 600 m haben Dekompaktionseffekte zu einer starken Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit der tektonisch-strukturellen Elemente geführt (Kap. 2.5.1.5). Der Seelisbergtunnel und der Tunnel Engelberg liegen noch in der von Dekompaktionseffekten betroffenen Zone. Aus dem Lötschberg-Basistunnel gibt es einen Hinweis auf eine Störungszone mit erhöhter Transmissivität in den tertiären Schiefern bei eine Gesteinsüberdeckung von rund 600 m.
- Im Standortgebiet Wellenberg kommen aufgrund der grossen vertikalen Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers 2 Lagerebenen in Betracht. Für die Sicherheitsbetrachtung für SGT Etappe 2 wurde die obere Lagerebene 140 m tiefer gelegt als die Lagerebene im früheren Projekt (Nagra 1997) und ist deshalb etwas weiter vom unteren Ende der Dekompaktionszone entfernt (Dossier V, Figur 6.4-1). Als Folge von Erosions- und Dekompaktionsvorgängen kann längerfristig eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit in dieser Ebene nicht ausgeschlossen werden. In der 200 m tiefer gelegenen unteren Lagerebene werden die Verhältnisse auch langfristig als stabil beurteilt.
- Aus den Felddaten gibt es keine Hinweise für ein aberantes hydraulisches Verhalten der Kalkbankabfolgen. Die hydraulischen Durchlässigkeiten und die Transmissivitäten von Störungen in den Kalkbankabfolgen sind deshalb gleich wie in den Mergeln.

Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen:

- Hydraulische Parameter von Mergeln sind in Appel & Habler (2002) kompiliert. Diese Gesteine stammen (mit Ausnahme der Wellenberg-Daten) aus Sedimentbecken mit vergleichsweise einfacher Tektonik (blockartige, an Störungen versetzte Kompartimente). Hydraulische Daten aus Mergel-Formationen mit vergleichbarer Tektonisierung wie die Helvetischen Mergel im Alpenraum liegen zurzeit keine vor.

Datensätze Mergel (MGL) und Kalkbankabfolgen (KBA)

- Weil die obere Lagerebene 140 m tiefer gelegt wurde als im Projekt Nagra (1997) wird nicht zwischen einem Datensatz 'tief' und 'untief' unterschieden.
- Referenzwert Gesteinsmasse ausserhalb von Störungen: $\mathbf{K_h = K_v = 3 \times 10^{-13}\ m}$

  konzeptualisiert als kleinräumige planare transmissive Elemente (kleinräumige Scherzonen/ Verschiebungsflächen), Frequenz 1 / m, mit T = 3 × 10-13 m2/s (entspricht den effektiven K-Werten des Blockmodells im Tiefenbereich unterhalb der Sohle des Engelbergertals, vgl. Fig. 2.5-6 und Nagra 1997). Störungen werden als Teil der kleinräumigen transmissven Elemente betrachtet.

  Alternative Konzeptualisierung (bei gleichen grossräumigen K-Werten): Frequenz der kleinräumigen planaren transmissiven Elemente (Scherzonen) 1 / 10 m, aber mit 10-fach höherer Transmissivität.
- Referenzwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-10}\ m^2/s}$
- Oberer Eckwert Gesteinsmasse ausserhalb von Störungen: $\mathbf{K_h = K_v = 10^{-11}\ m/s}$

  deckt alle effektiven K-Werte mehrerer Realisierungen des Blockmodells (Nagra 1997) unterhalb der Dekompaktionszone ab. Die Transmissivitäten der kleinräumigen planaren transmissiven Elemente sind entsprechend erhöht.
- Oberer Eckwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-10}\ m^2/s}$ (wie Referenzfall)

  Für den ENSI-Fall a wird nur die Durchlässigkeit der Gesteinsmasse ausserhalb der Störungen erhöht, die Transmissivität der Störungen entspricht der des Referenzfalls. Die Untersuchungen am Wellenberg haben gezeigt, dass die transmissiven Elemente im Wirtgestein unterhalb der Dekompaktionszone nur unvollständig vernetzt sind, d.h. dass die effektiven Transmissivitäten der wasserführenden Systeme wahrscheinlich bedeutend geringer sind als in einzelnen Tests. Eine unabhängige Evidenz dafür sind, neben hydrochemischen Aspekten, die gemessenen Porenwasserunterdrücke (Nagra 1997).

4.7.3 Untere Rahmengesteine

Die Vorgaben des ENSI (2010) bezüglich Betrachtung eines erhöhten Wasserflusses (ENSI-Fall a) in den Dosisberechnungen betreffen das direkte Umfeld des Tiefenlagers, d.h. die Rahmengesteine sind davon nicht betroffen. Wegen der Ungewissheiten bezüglich der hydraulischen Eigenschaften einzelner lithofazieller Einheiten der unteren Rahmengesteine wurden aber auch dort Fälle mit erhöhtem Wasserfluss, bzw mit reduzierter Barrierenwirkung, betrachtet.

Für die tonreichen lithofaziellen Einheiten (inkl. 'Gipskeuper') wurden keine oberen Eckwerte definiert, die Referenzwerte wurden aber tendenziell vorsichtig festgelegt. Bei den anderen, tonärmeren Einheiten wurden ein erhöhter Wasserfluss entweder durch erhöhte Transmissivitäten von Störungen ('Arietenkalk') oder – im Fall des eher als poröses Medium wirkenden Keuper-Aquifers – durch erhöhte K-Werte des gesamten Aquifers betrachtet.

4.7.3.1 Datensatz Toniger Lias

Aufgrund der vorliegenden Messungen (Kap. 3.2.2.1) liegt es nahe, für den Tonigen Lias dieselben hydraulischen Durchlässigkeiten wie für den Opalinuston zu verwenden. In Anbetracht des kleineren Datensatzes und der tendenziell etwas niedrigeren Tonmineralgehalte wird ein leicht erhöhter, dem Opalinuston 'untief' entsprechender Datensatz verwendet:

- Referenzwerte Toniger Lias: $\mathbf{K_h = 5 \times 10^{-13}\ m/s}$, $\mathbf{K_v = 10^{-13}\ m/s}$ (kein oberer Eckwert, s. oben)

4.7.3.2 Datensatz 'Arietenkalk' und Kalkiger Lias

Weil die hydraulischen Eigenschaften des Kalkigen Lias nicht basierend auf einem spezifischen Datensatz abgeleitet werden können (es gibt keine quantitative hydraulische Tests aus der Bohrung Gösgen SB4), wird für den Kalkigen Lias derselbe Datensatz wie für den 'Arietenkalk' verwendet.

Insgesamt legen die bisherigen Daten nahe, dass der ungestörte Arietenkalk und der ungestörte Kalkige Lias unterhalb der Dekompaktionszone sehr geringe Durchlässigkeiten aufweisen.

Weil aber nur in einer besonders günstigen Situation mit sehr ruhiger Lagerung damit gerechnet werden werden kann, dass im 'Arietenkalk' oder im Kalkigen Lias keine transmissiven Störungen vorliegen, werden für den Referenzfall transmissive Störungen berücksichtigt. Der gewählte T-Wert berücksichtigt Erfahrungen in ähnlichen, z.T. gestörten Gesteinen (2.5.2).

Zur Untersuchung der Sensitivität des Gesamtsystems im Sinn von ENSI (2010) sollte auch der Effekt eines noch höheren Eckwerts mit den Dosisrechnungen geprüft werden.

- Referenzwerte 'Arietenkalk' / Kalkiger Lias, ungestört: $\mathbf{K_h = K_v = 10^{-12}\ m/s}$
- Referenzwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-7}\ m^2/s}$
- Oberer Eckwert hydraulisch wirksame Störung (Annahme 1 Störung / 100 m): $\mathbf{T = 10^{-5}\ m^2/s}$

4.7.3.3 Datensatz Toniger Keuper

Die Datenbasis für den Tonigen Keuper ist gering. Die hohen Tonmineralgehalte lassen ein bedeutendes Selbstabdichtungsvermögen erwarten. Zusammen mit den wenigen Packertestdaten ist es naheliegend, ähnlich niedrige hydraulische Durchlässigkeiten wie im Tonigen Lias festzulegen.

- Referenzwerte Toniger Keuper: $\mathbf{K_h = 5 \times 10^{-13}\ m/s}$, $\mathbf{K_v = 10^{-13}\ m/s}$ (kein oberer Eckwert)

4.7.3.4 Datensatz Keuper-Aquifer

Der Referenzwert für den Keuper-Aquifer orientiert sich am geometrischen Mittel der vorliegende hydraulischen Test in den Tiefbohrungen der Nordschweiz, der obere Eckwert am aufgerundeten Wert der Bohrung Benken (vgl. Kap. 3.3.2.3):

- Referenzwert Keuper-Aquifer (poröses Medium): $\mathbf{K_h = K_v = 10^{-9}\ m/s}$
- Oberer Eckwert Keuper-Aquifer (poröses Medium): $K_h = K_v = 10^{-6}$ m/s

4.7.3.5 Datensatz 'Gipskeuper'

Der 'Gipskeuper' besteht in relevanter Tiefenlage insbesondere auch aus Anhydrit, weshalb von einem guten Selbstabdichtungsvermögen auszugehen ist. Weil keine Informationen über eine allfällige Anisotropie vorliegen, wird auf eine Unterscheidung zwischen vertikaler und schichtparalleler Durchlässigkeit verzichtet.

- Referenzwert 'Gipskeuper': $\mathbf{K_h = K_v = 10^{-13}\ m/s}$ (kein oberer Eckwert)

4.7.4 Obere Rahmengesteine

Die oberen Rahmengesteine des Opalinustons der Standortgebiete Jura Ost und Jura-Südfuss werden analog zu den lithofaziellen Einheiten des 'Braunen Doggers' bzw der Effinger Schichten parametrisiert (Kap. 4.7.2.2 und 4.7.2.3), aber mit standortspezifischen Mächtigkeiten (Kap. 4.3.1).

4.8 Diffusionskoeffzienten der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine (Referenzwerte und Bandbreiten)

4.8.1 Wirtgesteine

Die Diffusionskoeffizienten für alle relevanten Radionuklide (Referenzwerte und Bandbreiten) wurden mit Hilfe des erweiterten Archie-Gesetzes hergeleitet (siehe Van Loon 2014). Grundlage dafür bilden die durch Messungen an Bohrkernproben ermittelten Porositäten (Kap. 4.5).

Als Grundlagen für die Sicherheitsanalysen werden sowohl Diffusionskoeffizienten senkrecht wie auch parallel zur Schichtung benötigt. Diffusionskoeffizienten parallel zur Schichtung sind insbesondere relevant für Matrixdiffusion in Szenarien mit advektivem Transport, dabei sind niedrige Diffusionskoeffizienten konservativer.

Diffusionskoeffizienten werden experimentell üblicherweise senkrecht zur Schichtung bestimmt (Kap. 2.6.2), einzig beim Opalinuston liegen auch einige Datensätze vor, die einen Anisotropiefaktor von 5 belegen (Kap. 2.6.3). Für die anderen Wirtgesteine muss für die Umrechnung zu Diffusionskoeffizienten parallel zur Schichtung ein Anisotropiefaktor abgeschätzt werden. Hierzu wurde davon ausgegangen, dass die Ausprägung der Anisotropie vom Tonmineralgehalt abhängt. Tonmineralreichen Lithologien wird ein Anisotropiefaktor wie im Opalinuston zugewiesen. Den durch massige "harte Bänke" charakterisierten Lithologien wird ein isotropes Verhalten zugewiesen (Anisotropiefaktor 1).

Tab. 4.8-1 zeigt die Anisotropiefaktoren, welche für Abschätzung der Diffusionskoeffizienten parallel zur Schichtung verwendet wurden. Folgende Überlegungen haben zu den Werten geführt:

- 'Brauner Dogger': Die tonreichen Abfolgen (TA und STA) sind lithologisch ähnlich dem Opalinuston, entsprechend wird ein Faktor 5 eingesetzt. Bezüglich der Sandkalkabfolgen SKA wird angenommen, dass horizontale Diffusion insbesondere in Szenarien mit advektivem Transport in den tonmineralarmen Bänken relevant ist, und es wurde deshalb ein Faktor 1 gewählt.
- Effinger Schichten: Für die Kalkmergelabfolgen KMA wird angenommen, dass die Anisotropie ähnlich ausgeprägt ist wie beim Opalinuston und deshalb ein Faktor 5 gewählt. Die KBA sind ebenfalls durch eine Wechsellagerung charakterisiert, nur in den Gerstenhübel-Schichten wurden tonmineralfreie Kalkbänke beobachtet. Unter Berücksichtigung von Überlegungen wie bei den SKA des 'Braunen Doggers' wird der Anisotropiefaktor auf 1 geschätzt.
- Helvetische Mergel: Im Massstab 'Handstück' ist eine Anisotropie offensichtlich, jedoch ist zu beachten, dass für die Charakterisierung von Transportpfaden im Dekametermassstab hier die Orientierung parallel resp. senkrecht zur Schichtung nicht adäquat ist. Aufgrund der tektonischen Überprägung wird in diesem Massstab eher ein isotropes Verhalten erwartet, die Ungewissheit bezüglich der relevanten Diffusionskoeffizienten muss mit Eckwerten erfasst werden.

Tab. 4.8-1: Eigenschaften und geschätzte Anisotropiefaktoren der Diffusionskoeffizienten der lithofaziellen Einheiten der Wirtgesteine.

Die Tonmineralgehalte entsprechen den Referenzwerten nach Kap. 4.4. TA: Tonige Abfolgen, STA: Sandig-tonige Abfolgen, SKA: Sandkalkabfolgen, KMA: Kalkmergelabfolgen, KBA: Kalkbankabfolgen, MGL: Mergel.

Wirtgestein / Lithofazielle Einheit	**Tonmineralgehalt** [Gew.-%]	**Gefüge / Lagerung**	**Anisotropiefaktor** $D_{e\parallel} / D_{e\perp}$
Opalinuston	60	Geschichtet	5
'Brauner Dogger' TA und STA	46	Geschichtet	5
'Brauner Dogger' SKA	11	Wechsellagerung sandig-kalkiger Bänke (massig) und tonmineralreicher Lagen	1
Effinger Schichten KMA	27	Geschichtet	5
Effinger Schichten KBA	12	Wechsellagerung geschichteter mergeliger und massiger kalkiger Lagen	1
Helvetische Mergel MGL	30	Geschichtet, mit Foliation, aber tektonisch überprägt	1
Helvetische Mergel Kalkbänke der KBA	5	Massig	1

4.8.2 Untere Rahmengesteine

Die Diffusionskoeffizienten der Unteren Rahmengesteine des Opalinustons (Referenzwerte und Bandbreiten) für alle relevanten Radionuklide wie bei den Wirtgesteinen basierend auf dem erweiterten Archie-Gesetzes hergeleitet (siehe Van Loon 2014).

Analog zu den Wirtgesteinen (siehe Kap. 4.8.1) wurden auch für die Rahmengesteine Anisotropiefaktoren zur Umrechnung in Diffusionskoeffizienten parallel zur Schichtung abgeschätzt (Tab. 4.8-2).

Tab. 4.8-2: Eigenschaften und geschätzte Anisotropiefaktoren der Diffusionskoeffizienten der unteren Rahmengesteine des Opalinustons.

Lithofazielle Einheit	**Tonmineralgehalt** [Gew.-%]	**Gefüge / Lagerung**	**Anisotropiefaktor** $D_{e\parallel} / D_{e\perp}$
Toniger Lias	40	Geschichtet	5
'Arietenkalk' Kalkiger Lias	10	Kalkbänke	1
Toniger Keuper	50	Geschichtet	5
Keuper-Aquifer	niedrig	Karbonatbänke und poröse Lithologien	1
'Gipskeuper'	variabel	Geschichtet, teilweise massiver Anhydrit.	5

4.8.3 Obere Rahmengesteine

In den östlichen Standortgebieten bilden die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten die oberen Rahmengesteine (Kap. 4.8.1). Für die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss werden die Werte der entsprechenden lithofaziellen Einheiten des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' verwendet.

4.9 Bezug zum Bericht Nagra (2014b): Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme

Die in diesem Kapitel präsentierten und begründeten Referenz- und Eckwerte der geologischen, geochemischen und hydrogeologischen Eingabeparameter für die Dosisberechnungen der provisorischen Sicherheitsanalyse sind in folgenden Anhängen von Nagra (2014b) tabellarisch zusammengestellt:

- Anhang 4 (Geodatensatz für die provisorische Sicherheitsanalyse): Mächtigkeiten und hydraulische Parameter der lithofaziellen Einheiten in den verschiedenen Standortgebieten
- Anhang 3.5 (Geosphäre: Konzeptuelle Annahmen, Inputdaten): Diffusionskoeffizienten und Porositäten der Wirtgesteine

5 Literaturverzeichnis

AFC (2012): HA-Experiment: Hydraulic Database Phases 1-16. Mont Terri Project, Technical Note TN 2010-74.

Albert, W. & Bläsi, H.R. (2001): Stratigraphie Nordschweiz. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Albert, W. & Bläsi, H.R. (2008): NOK EWS-Bohrung Oftringen: Geologische, mineralogische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht). Nagra Arbeitsber. NAB 08-02.

Albert, W. & Schwab K. (2013): Analyse des Tonmineralgehalts anhand von Bohrlochmessungen in Bohrungen der Nordschweiz. Nagra Arbeitsber. NAB 12-56.

Albert, W., Bläsi, H.R. & Weber, H.P. (2009): Geologische und geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen am Standort Gösgen / Niederamt (Rohdatenbericht). Unpubl. Nagra Projektber.

Albert, W., Bläsi, H.R., Madritsch, H., Vogt, T. & Weber, H.P. (2012): Geologie, Stratigraphie, Strukturgeologie, bohrlochgeophysikalisches Logging und Wasserproben der Geothermiebohrung Schlattingen SLA-1 (Rohdaten). Unpubl. Nagra Projektber.

Altmann, S., Tournassat, C., Goutelard, F., Parneix, J.-C., Gimmi, T. & Maes, N. (2012): Diffusion-driven transport in clayrock formations. Applied Geochemistry 27, 463-478.

Appel, D. & Habler, W. (2002): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien für die Grundwasserbewegung. Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Hannover.

Appelo, C.A.J. & Wersin, P. (2007): Multicomponent diffusion modelling in clay systems with application to the diffusion of tritium, iodide and sodium in Opalinus Clay. Environmental Science and Technology, 41, 5002-5007.

Atkins, P.W. (1990): Physical chemistry. Oxford University Press, 4th ed.

Baeyens, B. & Bradbury, M.H. (1994): Physico-chemical characterisation and calculated in situ porewater chemistries for a low permeability Palfris marl sample from Wellenberg. Nagra Tech. Ber. NTB 94-22.

Baeyens, B., Thoenen, T., Bradbury, M.H. & Marques Fernandes, M. (2014): Sorption data bases for argillaceous rocks and bentonite for the provisional safety analyses for SGT-E2. Nagra Tech. Ber. NTB 12-04.

Beauheim, R. (2013): Hydraulic conductivity and head distributions in the host rock formations of the proposed siting regions. Nagra Arbeitsber. NAB 13-13.

BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bundesamt für Energie BFE, Bern.

Bläsi, H.R., Peters, T. & Mazurek, M. (1991): Der Opalinus-Ton des Mt. Terri (Kanton Jura): Lithologie, Mineralogie und physiko-chemische Gesteinsparameter. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Bläsi, H.R., Deplazes, G., Schnellmann, M. & Traber, D. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie des 'Braunen Doggers' und seiner westlichen Äquivalente. Nagra Arbeitsber. NAB 12-51.

Bläsi, H.R., Hertrich, M, Kiefer, L. & Madritsch, H. (2014): Geologie, Stratigraphie und bohrlochgeophysikalisches Logging der Bohrung Gösgen SB4 (Rohdaten). Nagra Arbeitsber. NAB 14-101.

Bock, H. (1980): Das Fundamentale Kluftsystem. Z. dt. geol. Ges. 131, 627-650.

Bock, H., Dehandschutter, B., Martin, C.D., Mazurek, M., de Haller, A., Skoczylas, F. & Davy, C. (2010): Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste – review and synthesis. OECD/NEA 6184, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 310 pp.

Bossart, P. & Thury, M. (eds) (2008): Mont Terri Rock Laboratory – Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Reports of the Swiss Geological Survey No. 3 – Swiss Geological Survey, Wabern, 2008.

Boving, T.B. & Gratwohl, P. (2001): Tracer diffusion in sedimentary rocks: correlation to porosity and hydraulic conductivity. Journal of Contaminant Hydrology 53, 85-100.

Brunauer, S., Emmett, P.H. & Teller, E. (1938): Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Amer. Chem. Soc. 60, 309-319.

Çiftçi, N.B., Giger, S.B. & Clennell, M.B. (2013): Three-dimensional structure of experimentally produced clay smears: Implications for fault seal analysis. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 97, 733-757.

Cloet,V., Schwyn, B., Baeyens, B., Curti, E., Diomidis, N., Johnson, L.H., Leupin, O.X., Mibus, J., Van Loon, L.R.& Wieland, E. (2014): Einfluss der Salinität des Porenwassers der Wirtgesteine auf die Langzeitsicherheit der Tiefenlager. Nagra Arbeitsber. NAB 14-09

Bureau Technique Norbert (1992): Marnes Aaléniennes – étude géologique et hydrogéologique dans la galerie pilote du Mont Russelin. Relevée 1:100. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Burkhalter, R.M. (1996): Die Passwang-Alloformation (unteres Aalenien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Schweizer Jura. Eclogae geol. Helv. 89/3, 875-934.

Burkhalter, R.M., Bläsi, H.-R. & Feist-Burkhardt, S. (1997): Der "Dogger ß" (oberes Alénien) in den Bohrungen Herdern-1, Berlingen-1 und Kreuzlingen-1 (Nordschweiz) und seine Beziehung zu den gleichaltrigen Schichten im Nordjura. Eclogae geol. Helv. 90, 269-291.

Caine, J.S., Evans, J.P. & Forster, C.B. (1996): Fault zone architecture and permeability structure. Geology 24, 1025-1028.

Cavé, L.C., Al, T.A., Xiang, Y. & Vilks, P. (2009): A technique for estimating one-dimensional diffusion coefficients in low permeability sedimentary rock using X-ray radiography: Comparison with through-diffusion measurements. Journal of Contaminant Hydrology 103, 1-12.

De Marsily, G. (1986): Quantitative hydrogeology. Academic Press, New York.

De Haller, A., Tarantola, A., Mazurek, M. & Spangenberg, J. (2011): Fluid flow through the sedimentary cover in northern Switzerland recorded by calcite–celestite veins (Oftringen borehole, Olten). Swiss J. Geosci.104, 493-506.

De Haller, A., Mazurek, M., Spangenberg, J. & Möri, A. (2014): SF (Self sealing of fault and paleo-fluid flow): Synthesis report. Mont Terri Technical Report TR 2008-02.

Deplazes, G., Bläsi, H.R., Traber, D. & Schnellmann, M. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie der Effinger Schichten. Nagra Arbeitsber. NAB 13-16.

Diamond, L.W. (1998): Underpressured paleofluids and future fluid flow in the host rocks of a planned radioactive waste repository. *In:* Arehart, G.B. & Hulston, J.R. (eds): Proceedings Water-Rock Interaction Symposium IX, Balkema, Rotterdam, 769-771.

Eberhard & Partner AG (2010): Bohrungen in die Effinger Schichten im Raum Aarau und Umgebung. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Ebert, A. (2014): Strukturgeologische Kernaufnahmen der Wirtgesteinsabfolgen aus Tiefbohrungen der Nordschweiz. Nagra Arbeitsber. NAB 13-89.

Emch & Berger AG (2001/2012): HSK Auschlusskriterien: Lötschberg-Basistunnel: Palfris-Schiefer Abschnitte in der Wildhorn-Decke: Geologisch-hydrogelogische Dokumentation. Emch & Berger AG, Bern.

ENSI (2010): Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. ENSI 33/075 (April 2010). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

Esteban, L., Sarout, J., Josh, M., Delle Piane, C., Burgar, I., Marschall, P., Dewhurst, D., Clennell, Raven, M. (2013): Opalinus Clay - Rock properties and shales mineralogy-permeability. Compilation of SHARC JIP and NAGRA contracting dataset. Nagra Project Report NPB 13-20.

Eugster, S. & Senger, R.K. (1994): Nachweisgrenze von Transmissivität eines transmissiven Elements (TE) an der ventilierten Stollenwand. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Ferrari, A., Favero, V., Manca, D. & Laloui, L. (2013): Geotechnical characterization of core samples from the geothermal well Schlattingen SLA-1 by LMS/EPFL. Nagra Arbeitsber. NAB 12-50.

Ferrill, D.A. & Morris, A.P. (2003): Dilational normal faults. J. Struct. Geol. 25, 183-196.

Fisher, Q.J. & Knipe, R.J. (2001): The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf. Marine and Petroleum Geology, 18, 1063-1081.

Fisher, Q., Kets, F. & Crook, A. (2013): Self-sealing of faults and fractures in argillaceous formations: Evidence from the petroleum industry. Nagra Arbeitsber. NAB 13-06.

Flury, M. & Gimmi, T. (2002): Solute diffusion. *In:* Dane, J.H. & G.C. Topp (eds.): Methods of soil analysis, Part 4 – Physical Methods. SSSA Book Series 5, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, 1323-1351.

Füchtbauer, H. (ed.) (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. Schweizerbart, Stuttgart, 1141 p.

Gaucher, E., Tournassat, C., Pearson, F.J., Blanc, P., Crouzet, C., Lerouge, C. & Altmann, S. (2009): A robust model for pore-water chemistry of clayrock. Geochim. Cosmochim. Acta 73, 6470-6487.

Gautschi, A. (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay): Implications for the deep disposal of radioactive wastes. Hydrogeol. J. 9, 97-107.

Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns (2008): EWS Bohrung Oftringen – Felsmechanische Tests. Nagra Arbeitsber. NAB 08-25.

Gimmi, T. (2003): Porosity, pore structure and energy state of porewater of Opalinus Clay from Benken. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Gimmi, T. & Kosakowski, G. (2011): How mobile are sorbed cations in clays and clay rocks? Environmental Science and Technology 45, 1443-1449.

Gimmi, T. & Waber, H.N. (2004): Modelling of tracer profiles in pore water of argillaceous rocks in the Benken borehole: stable water isotopes, chloride, and chlorine isotopes. Nagra Tech. Ber. NTB 04-05.

Gimmi, T., Waber, H.N., Gautschi, A. & Rübel, A. (2007): Stable water isotopes in pore water of Jurassic argillaceous rocks as tracers for solute transport over large spatial and temporal scales. Water Resources Research 43, W04410.

Gimmi, T., Leupin, O.X., Eikenberg, J., Glaus, M.A., Van Loon, L.R., Waber, H.N., Wersin, P., Wang, H.A.O., Grolimund, D., Borca, C.N., Dewonck, S. & Wittebroodt, C. (2014): Anisotropic diffusion at the field scale in a 4-year multi-tracer diffusion and retention experiment – I: Insights from the experimental data. Geochim. Cosmochim. Acta 125, 373-393.

Giger, S. & Marschall, P. (2014): Geomechanical properties, rock models and in-situ stress conditions for Opalinus Clay in Northern Switzerland. Nagra Arbeitsber. NAB 14-01.

Giger, S.B., Clennell, M.B., Çiftçi, N.B., Harbers, C., Clark, P. & Ricchetti, M. (2013): Fault transmissibility in clastic-argillaceous sequences controlled by clay smear evolution. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 97, 705-731.

Glaus, M.A., Frick, S., Rossé, R. & Van Loon, L.R. (2010): Comparative study of tracer diffusion of HTO, $^{22}Na^{+}$ and $^{36}Cl^{-}$ in compacted kaolinite, illite and montmorillonite. Geochim. Cosmochim. Acta 74, 1999-2010.

Hänni, R. & Pfiffner, O. A. (2014): Geologische Profile Wellenberg 2012. Nagra Arbeitsber. NAB 12-04 Rev. 1.

Hartmann, P., Gilbert, M.-J. & Traber, D. (2013): Hydrogeologische Beobachtungen in den Bözbergtunnels. Nagra Arbeitsber. NAB 13-15.

Hekel, U. (1994): Hydrogeologische Erkundung am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). Tübinger geowiss. Arb. C18, Univ. Tübingen.

Horseman, S.T. & Harrington, J.F. (2002): Laboratory experiments on gas migration in Opalinus Clay samples from the Benken borehole, Switzerland. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Houben, M.E., Desbois, G. & Urai, J.L. (2013): Pore morphology and distribution in the shaly facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland): insights from representative 2D BIB-SEM investigations on mm to nm scale. Applied Clay Science 71, 82-97.

Houben, M.E., Desbois, G. & Urai, J.L. (2014): A comparative study of representative 2D microstructures in Shaly and Sandy facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland) inferred from BIB-SEM and MIP methods. Marine and Petroleum Geology 49, 143-161.

Hummel, W.H., Berner, U., Curti, E., Pearson, F.J. & Thoenen, T. (2002): Nagra/PSI Thermochemical Databes 01/01. Nagra Tech. Ber. NTB 02-16.

IUPAC (1997): Compendium of Chemical Terminology, The Gold Book, Second Edition, A. D. McNaught and A. Wilkinson, Blackwell Science, London.

Jacops, E., Grade, A., Govaerts, J. & Maes, N. (2013): Measuring the diffusion coefficient for He in Opalinus Clay. SCK•CEN External Report SCK•CEN-ER-238, SCK•CEN, Mol.

Jähne, B., Heinz, G. & Dietrich, W. (1987): Measurement of the diffusion-coefficients of sparingly soluble gases in water. Journal of Geophysical Research – Oceans 92, 10767-10776.

Jolley, S.J., Dijk, H., Lamens, J.H., Fisher, Q.J., Manzocchi, T., Eikmans, H. & Huang, Y. (2007): Faulting and fault sealing in production simulation models. Brent Province, northern North Sea. Petroleum Geoscience 13, 321-340.

Keller, L.M., Holzer, L., Wepf, R., Gasser, P., Münch, B. & Marschall, P. (2011a): On the application of focused ion beam nanotomography in characterizing the 3D pore space geometry of Opalinus clay. Physics and Chemistry of the Earth 36, 1539-1544.

Keller, L.M., Holzer, L., Wepf, R. & Gasser, P. (2011b): 3D geometry and topology of pore pathways in Opalinus clay: Implications for mass transport. Applied Clay Science 52, 85-95.

Keller, L.M., Schuetz, P., Erni, R., Rossell, M.D., Lucas, F., Gasser, P. & Holzer, L. (2013a): Characterization of multi-scale microstructural features in Opalinus Clay. Microporous and Mesoporous Materials 170, 83-94.

Keller, L.M., Holzer, L., Schuetz, P. & Gasser, P. (2013b): Pore space relevant for gas permeability in Opalinus clay: Statistical analysis of homogeneity, percolation and representative volume element. Journal of Geophysical Research Solid Earth 118, 1-14.

Klemenz, W., Blaser, P. & Küpfer, T. (2000): Hydrogeologie des Gebietes Lägern – Zürcher Weinland. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Klimchouk, A.B. (2007): Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. Special Paper no. 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM, 106 pp.

Klump, S., Waber, H.N., Koroleva, M., Eichinger, L., Lorenz, G., Albert, W., Frieg, B. & Gautschi, A. (2008): EWS-Bohrung Küttigen – Synthese der geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen. Nagra Arbeitsber. NAB 08-12.

Koroleva, M. & Mazurek, M. (2009): Natural Tracer Profile Mont Russlin (NT) Experiment: natural tracer profiles in the Mont Russlin anticline. Mont Terri Project, Technical Note TN 2006-24.

Koroleva, M., Alt-Epping, P. & Mazurek, M. (2011a): Large-scale tracer profiles in a deep claystone formation (Opalinus Clay at Mont Russelin, Switzerland): implications for solute transport processes and transport properties of the rock. Chem. Geol. 280, 284-296.

Koroleva, M., Lerouge, C., Mäder, U., Claret, F., Gaucher, E.C. (2011b). Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part B – Results from overcoring and evidence of strong buffering by the rock formation. Applied Geochemistry, 26, 954-966.

Langer, V.W., Bläsi, H.R., Mazurek, M. & Waber, H.N. (2001): Sondierbohrung Benken: Geological and mineralogical investigations. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Lavanchy, J.-M. & Marschall, P. (1997): WLB: Hydrogeological interpretation of the Wellenberg borehole data (SB1, SB2, SB3, SB4, SB6, SM4a/v and SB4a/s). Unpubl. Nagra Interner Ber.

Laws, S. & Deplazes, G. (2007): Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuss. Nagra Arbeitsber. NAB 07-28.

Li, Y.H. & Gregory, S. (1974): Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments. Geochim. Cosmochim. Acta 38, 703-714.

Lippmann, J., Osenbrück, K., Rübel, A., Sonntag, C., Lehmann, B., Purtschert, R., Loosli, H. & Tolstikhin, I. (1998): Stabile Isotope und Edelgasgehalte von Porenwässern und Gesteinen aus Bohrkernen der SB4a/S am Wellenberg. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Mäder, U. (2009a): Reference pore water for the Effingen Member (Standortregion Südjura) for the provisional safety-analysis in the framework of sectoral plan – interim results (SGT-ZE). Nagra Arbeitsber. NAB 09-13.

Mäder, U. (2009b): Reference pore water for the Opalinus Clay and 'Brown Dogger' for the provisional safety-analysis in the framework of sectoral plan – interim results (SGT-ZE). Nagra Arbeitsber. NAB 09-14.

Mäder, U. (2010): Reference pore water for the Helvetic marls for the provisional safety-analysis in the framework of sectoral plan – interim results (SGT-ZE). Nagra Arbeitsber. NAB 09-15.

Marschall, P., Croisé, J., Schlickenrieder, L., Boisson, J.Y., Vogel, P. & Yamamoto, S. (2003): Synthesis of hydrogeological investigations at the Mont Terri site (Phases 1 – 5). Mont Terri Project, Technical Report TR 2001-02.

Matter, A., Peters, T., Isenschmid, C., Bläsi, H.R. & Ziegler, H.J. (1987): Sondierbohrung Riniken – Geologie. Nagra Tech. Ber. NTB 86-02.

Matter, A., Peters, T., Bläsi, H.R., Meyer, J., Ischi, H. & Meyer, C. (1988a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. Nagra Tech. Ber. NTB 86-01.

Matter, A., Peters, T., Bläsi, H.R., Weiss, H.P. & Schenker, F. (1988b): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. Nagra Tech. Ber. NTB 86-03.

Mazurek, M. (1996): WLB: Geologische Eigenschaften der wasserführenden Systeme. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Mazurek, M. (1999): Evolution of gas and aqueous fluid in low-permeability argillaceous rocks during uplift and exhumation of the central Swiss Alps. Applied Geochemistry 15, 211-234.

Mazurek, M. (2011): Auswertung der Gesteinsparameter-Datenbank für Opalinuston, den 'Braunen Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums. Nagra Arbeitsber. NAB 11-20.

Mazurek, M. (2013a): Wasserführende Systeme im 'Braunen Dogger'. Nagra Arbeitsber. NAB 13-12.

Mazurek, M. (2013b): Wasserführende Systeme in den Effinger Schichten. Nagra Arbeitsber. NAB 13-50.

Mazurek, M., Waber, H.N. & Bläsi, H.R. (1994): Geology, mineralogy and geochemistry of the Wellenberg. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Mazurek, M., Lanyon, G.W., Vomvoris, S. & Gautschi, A. (1998): Derivation and application of a geologic dataset for flow modelling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks. Journal of Contaminant Hydrology 35, 1-17.

Mazurek, M., Hurford, A.J. & Leu, W. (2006): Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: Integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. Basin Research 18, 27-50.

Mazurek, M., Koroleva, M. & Müller, H. (2009a): WS-H Experiment: Boreholes BWS-H1 and BWS-H2: Results of the laboratory programme. Mont Terri Project, Technical Note TN 2009-14.

Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T. & Waber, H.N. (2009b): Natural tracer profiles across argillaceous formations: the CLAYTRAC project. OECD Nuclear Energy Agency, NEA No. 6253. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 358 pp.

Mazurek, M., Koroleva, M., Vietor, T. & Müller, H. (2010a): WS-H experiment: Petrophysical properties and anion contents in samples of deformed Opalinus Clay from the Galerie 08. Mont Terri Project, Technical Note TN 2009-60.

Mazurek, M., Meier, D. & Müller, H. (2010b): WS-H experiment: Geological, petrophysical and geochemical characterisation of drillcores from borehole BHG-B11. Mont Terri Project, Technical Note TN 2010-22.

Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Waber, H.N., Buschaert, S., De Cannière, P., De Craen, M., Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I. & Wouters, L. (2011): Natural tracer profiles across argillaceous formations. Applied Geochemistry 26, 1035-1064.

Mazurek, M., Waber, H.N., Mäder, U.K., Gimmi, T., De Haller, A. & Koroleva, M. (2012): Geochemical synthesis for the Effingen Member in boreholes at Oftringen, Gösgen and Küttigen. Nagra Tech. Ber. NTB 12-07.

Meier, B. & Deplazes, G. (2014a): Reflexionsseismische Analyse des 'Braunen Doggers'. Nagra Arbeitsber. NAB 14-58.

Meier, B. & Deplazes, G. (2014b): Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten. Nagra Arbeitsber. NAB 14-57.

Meier, D. & Kronberg, P. (1989): Klüftung in Sedimentgesteinen. Enke, Stuttgart, 116 p.

Meier, D. & Mazurek, M. (2011): Ancillary rock and pore-water studies on drillcores from northern Switzerland. Nagra Arbeitsber. NAB 10-21.

Minon, S., Salager, S. & Laloui, L. (2010): WS-H Experiment: Identification tests and rheological analysis of Opalinus Clay: Shaly facies, Sandy facies and Wet Spot material. Mont Terri Project, Technical Note TN 2010-61.

Möri, A. & Bossart, P. (1996): WLB: Strukturgeologische Detailuntersuchungen am Haldibach. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Müller, H. & Leupin, O. (2012): WS-H (Investigation of *Wet spots*): Observation, first experimental results, and a short presentation of possible hypotheses regarding the origin of these waters. Mont Terri Project, Technical Note TN 2012-96.

Nagra (1988): Untersuchungen zur Standorteignung im Hinblick auf die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle: Berichterstattung über die Untersuchungen der Phase I am potentiellen Standort Oberbauenstock (Gemeinde Bauen, UR). Nagra Tech. Ber. NTB 88-18.

Nagra (1994): Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW). Nagra Tech. Ber. NTB 94-06.

Nagra (1997): Geosynthese Wellenberg 1996 - Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. Text- und Beilagenband. Nagra Tech. Ber. NTB 96-01.

Nagra (2001): Sondierbohrung Benken: Untersuchungsbericht. Nagra Tech. Ber. NTB 00-01.

Nagra (2002a): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Tech. Ber. NTB 02-03.

Nagra (2002b): Project Opalinus Clay: Safety report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Tech. Ber. NTB 02-05.

Nagra (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiet für das SMA- und das HAA-Lager – Geologische Grundlagen. Nagra Tech. Ber. NTB 08-04.

Nagra (2009): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Darstellung der hydraulischen Durchlässigkeit versus Tongehalt in Sedimentgesteinen aus Tiefbohrungen in der Nordschweiz und am Wellenberg im Hinblick auf die Beurteilung der SGT-Kriterien "Hydraulische Barrierenwirkung" und "Freisetzungspfade". Nagra Arbeitsber. NAB 09-28.

Nagra (2010): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. Nagra Tech. Ber. NTB 10-01.

Nagra (2014a): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Nagra Tech. Ber. NTB 14-01.

Nagra (2014b): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme. Nagra Tech. Ber. NTB 14-03.

Nagra (2014c): Provisional Safety Analyses for SGT Stage 2: Models, Codes and General Modelling Approach. Nagra Tech. Rep. NTB 14 09.

Nusch, S., Gmünder, C. & Traber, D. (2013): Hydrogeologische Daten der Tiefenaquifere als Grundlage für die hydrogeologischen Modelle. Nagra Arbeitsber. NAB 13-43.

Pearson, F.J. (1999): What is the porosity of a mudrock? In: Aplin, A.C., Fleet, A.J. & Macquaker, J.H.S., (eds.): Muds and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties. London, Geol. Soc. Spec. Publ. 158, 9-21.

Pearson, F.J. (2002): Benken – Reference water chemistry. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Pearson, F.J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J.-Y., Fernández, A.M., Gaebler, H.E., Gaucher, E.C., Gautschi, A., Griffault, L., Hernan, P. & Waber, H.N. (2003): Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory – Synthesis Report. Reports of the Federal Office of Water and Geology (FOWG), Geology Series No. 5.

Pearson, F.J., Tournassat, C. & Gaucher, E. (2011): Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part E – equilibrium controls on chemistry of pore water from the Opalinus Clay, Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. Applied Geochemistry 26, 990-1008.

Peters, T. & Matter, A. (1981): Sedimentologische, mineralogische und geochemische Untersuchungen an Bohrkernen der Bohrung Nr. 7904 der NOK beim KKW Beznau. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Price, N.J. & Cosgrove, J.W. (1990): Analysis of Geological Structures, Cambridge Univ. Press, 502 p.

Reisdorf, A.G., Wetzel, A., Schlatter, R. & Jordan, P. (2011): The Staffelegg Formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland. Swiss Journal of Geosciences 104/1, 97-146.

Romero, E. & Gómez, R. (2013): Water and air permeability tests on deep core samples from Schlattingen SLA-1 borehole. Nagra Arbeitsber. NAB 13-51.

Sammartino, S., Bouchet, A., Prêt, D., Parneix, J.C. & Tevissen, E. (2003). Spatial distribution of porosity and minerals in clay rocks from the Callovo-Oxfordian formation (Meuse/ Haute-Marne, Eastern France) – Implications on ionic species diffusion and rock sorption capability. Applied Clay Science 23, 157-166.

Sarout, J., Esteban, L. & Josh, M. (2013): Laboratory Characterisation of Cores (Geothermal Well Schlattingen SLA-1, Switzerland): Petrophysics and rock mechanics / physics. Nagra Arbeitsber. NAB 12-47.

Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde (16. Auflage). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Schneider, T.R. & Kappeler, S.W. (1984): Geowissenschaftliche Grundlagen des Sondierstandortes Oberbauen Stock (2 Bände). Nagra Tech. Ber. NTB 84-20.

Schneider, Kellerhals & Haefeli AG (2006): Tunnel Engelberg, Geologie, Schlussdokumentation). Zentralbahn AG, Stanstad.

Soler, J.M., Samper, J., Yllera, A., Hernández, A., Quejido, A., Fernández, A., Yang, C., Naves, A., Hernán, P. & Wersin, P (2008): The DI-B in situ diffusion experiment at Mont Terri: Results and modeling. Physics and Chemistry of the Earth 33, S196-S207.

Soler, J.M., Wersin, P. & Leupin, O.X. (2013): Modeling of Cs^+ diffusion and retention in the DI-A2 experiment (Mont Terri). Uncertainties in sorption and diffusion parameters. Applied Geochemistry 33, 191-198.

Stroes-Gascoyne, S., Schippers, A., Schwyn, B., Poulain, S., Sergeant, C., Simonoff, M., LeMarrec, C., Altmann, S., Nagaoka, T., Mauclaire, L., McKenzie, J., Daumas, S., Vinsot, A., Beaucaire, C. & Matray, J.-M. (2007): Microbial Community Analysis of Opalinus Clay Drill Core Samples from the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. Geomicrobiology Journal 24, 1-17.

Stroes-Gascoyne, S., Sergeant, C., Schippers, A., Hamon, C.J., Nèble, S., Vesvres, M.-H., Barsotti, V., Poulain, S. & Le Marrec, C. (2011): Biogeochemical processes in a clay formation in-situ experiment: Part D – Microbial analyses – synthesis of results. Applied Geochemistry 26, 980-989.

Traber (2004): Hydrogeologie des unteren Malm (Oxfordian): Renggeri-Ton, Terrain à Chailles und Effinger Schichten. Nagra Arbeitsber. NAB 04-07.

Traber, D. (2013): Untere Rahmengesteine des Opalinustons: Hydrogeologische Einheiten, Gesteinsparameter und Mächtigkeiten. Nagra Arbeitsber. NAB 12-40.

Traber, D. & Blaser, P. (2013): Gesteinsparameter der Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Helvetische Mergel als Grundlage für die Sorptionsdatenbank. Nagra Arbeitsber. NAB 12-39.

Van Loon, L. (2014): Effective diffusion coefficients and porosity values for argillaceous rocks and bentonite: Measured and estimated values for the provisional safety analyses for SGT-E2. Nagra Tech. Ber. NTB 12-03.

Van Loon, L.R. & Soler, J.M. (2003): Diffusion of HTO, $^{36}Cl^-$, $^{125}I^-$ and $^{22}Na^+$ in Opalinus Clay: Effect of confining pressure, sample orientation, sample depth and temperature. Nagra Tech. Ber. NTB 03-07.

Van Loon, L.R. & Eikenberg, J. (2005): A high-resolution abrasive method for determining diffusion profiles of sorbing radionuclides in dense argillaceous rocks. Applied Radiation and Isotopes 63, 11-21.

Van Loon, L.R., Soler, J.M., Jakob, A. & Bradbury, M.H. (2003): Effect of confining pressure on the diffusion of HTO, Cl-36(-) and I-125(-) in a layered argillaceous rock (Opalinus Clay): diffusion perpendicular to the fabric. Applied Geochemistry 18, 1653-1662.

Van Loon, L.R., Soler, J.M., Müller, W. & Bradbury, M.H. (2004a): Anisotropic diffusion in layered argillaceous rocks: A case study with Opalinus Clay. Environmental Science & Technology 38, 5721-5728.

Van Loon, L.R., Wersin, P. , Soler, J.M., Eikenberg, J., Gimmi, T., Hernan, P., Dewonck, S. & Savoye, S. (2004b): In situ diffusion of HTO, $^{22}Na^{+}$, Cs^{+} and I^{-} in Opalinus Clay at the Mont Terri underground rock laboratory. Radiochimica Acta 92, 757-763.

Van Loon, L.R., Müller, W. & Iijima, K. (2005a): Activation energies of the self-diffusion of HTO, $^{22}Na^{+}$ and $^{36}Cl^{-}$ in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay). Applied Geochemistry 20, 961-972.

Van Loon, L.R., Baeyens, B. & Bradbury, M.H. (2005b): Diffusion and retention of sodium and strontium in Opalinus clay: Comparison of sorption data from diffusion and batch sorption measurements, and geochemical calculations. Applied Geochemistry 20, 2351-2363.

Van Loon, L.R., Glaus, M.A. & Müller, W. (2007): Anion exclusion effects in compacted bentonites: Towards a better understanding of anion diffusion. Applied Geochemistry 22, 2536-2552.

Vinard, P., Blümling, P., McCord, J.P. & Aristotenas, G. (1993): Evaluation of hydraulic under-pressures at Wellenberg. J. Rock Mech. Mining Sci. 30, 1143-1150.

Vinard, P., Bobet, A. & Einstein, H.H. (2001): Generation and evolution of hydraulic under-pressures hat Wellenberg, Switzerland, J. Geophys.Res., 106 (B12), 30593-30605.

Vinsot, A., Fierz, T., Feuillatre, L. & Blin, V. (2006): PC-C experiment: gas circulation and water sampling. Mont Terri Project, Technical Note 2004-35rev.

Vinsot, A., Appelo, C.A.J., Cailteau, C., Wechner, S., Pironon, J., De Donato, P., De Cannière, P., Mettler, S., Wersin, P. & Gäbler, H.E. (2008): CO_2 data on gas and pore water sampled in situ in the Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory. Physics and Chemistry of the Earth 33, S54-S60.

Vinsot, A., Delay, J., De la Vaissière, R. & Cruchaudet, M. (2011): Pumping tests in a low permeability rock: Results and interpretation of a four-year long monitoring of water production flow rates in the Callovo-Oxfordian argillaceous rock. Physics and Chemistry of the Earth 36, 1679-1687.

Voegelin, A. & Kretzschmar, R. (2002): Stability and mobility of colloids in Opalinus Clay. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Waber, H.N., Pearson, F.J., Hobbs, M.Y. & Oyama, T. (2003): Sondierbohrung Benken: Characterisation of pore water from argillaceous rocks. Unpubl. Nagra Interner Ber.

Waber, H.N., Mäder, U., Mazurek, M. & Koroleva, M. (2012): Borehole Gösgen KB5a: Mineralogy, porosimetry, pore water chemistry of the Effingen Member. Nagra Arbeitsber. NAB 09-20.

Waber, H.N., Hobbs, M.Y. & Frape, S.K. (2013): Assessing initial conditions for chloride transport across lowpermeability argillaceous rocks, Wellenberg, Switzerland. Procedia Earth and Planetary Science 7, 875-879.

Waber, H.N., Heidinger, M., Lorenz, G. & Traber, D. (2014). Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. Nagra Arbeitsber. NAB 13-63.

Wersin, P., Baeyens, B., Bossart, P., Cartalade, A., Dewonck, S., Eikenberg, J., Fierz, T., Fisch, H.R., Gimmi, T., Grolimund, D., Hernan, P., Möri, A., Savoye, S., Soler, J., Van Dorp, F. & Van Loon, L. (2006): Long-term diffusion experiment (DI-A): Diffusion of HTO, I^-, $^{22}Na^+$ and Cs^+: Field activities, data and modelling. Mont Terri Technical Report TR 2003-06.

Wersin, P., Soler, J.M., Van Loon, L., Eikenberg, J., Baeyens, B., Grolimund, D., Gimmi, T. & Dewonck, S. (2008): Diffusion of HTO, Br^-, I^-, Cs^+, $^{85}Sr^{2+}$ and $^{60}Co^{2+}$ in a clay formation: Results and modelling from an in situ experiment in Opalinus Clay. Applied Geochemistry 23, 678-691.

Wersin, P., Leupin, O.X., Mettler, S.,. Gaucher, E.C., Mäder, U., De Cannière, P., Vinsot, A., Gäbler, H.E., Kunimaro, T., Kiho, K. & L. Eichinger, L. (2011): Biogeochemical processes in a clay formation in situ experiment: Part A – Overview, experimental design and water data of an experiment in the Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. Applied Geochemistry 26, 931-953.

Wersin, P., Mazurek, M., Waber, H.N., Mäder, U.K., Gimmi, T., Rufer, D. & De Haller, A. (2013a): Rock and porewater characterisation on drillcores from the Schlattingen borehole. Nagra Arbeitsber. NAB 12-54.

Wersin, P., Waber, H.N., Mazurek, M., Mäder, U.K., Gimmi, T., Rufer, D. & Traber, D. (2013b): Resolving Cl and SO_4 profiles in a clay-rich rock sequence. Water-Rock Interaction 14. Procedia Earth and Planetary Science 7, 892-895.

Yielding, G. (2002): Shale Gouge Ratio – calibration by geohistory. In: Hydrocarbon Seal Quantification (eds. A.G. Koestler & R. Hunsdale). Norwegian Petroleum Society (NPF) Special Publication 11, 1-15.

Yielding, G., Freeman, B. & Needham, D.T. (1997): Quantitative Fault Seal Prediction. American Association of Petroleum Geologists 81, 897-917.

Yven, B., Sammartino, S., Géraud, Y., Homand, F. & Villiéras, F. (2007): Mineralogy, texture and porosity of Callovo-Oxfordian argillites of the Meuse/Haute-Marne region (eastern Paris Basin). Mém. Soc. géol. France 178, 73-90.

Ziegler, H.-J. & Isler, A. (2013): Lötschberg-Basistunnel – zusammenfassender geologischer Schlussbericht. Ber. Landesgeol 4.