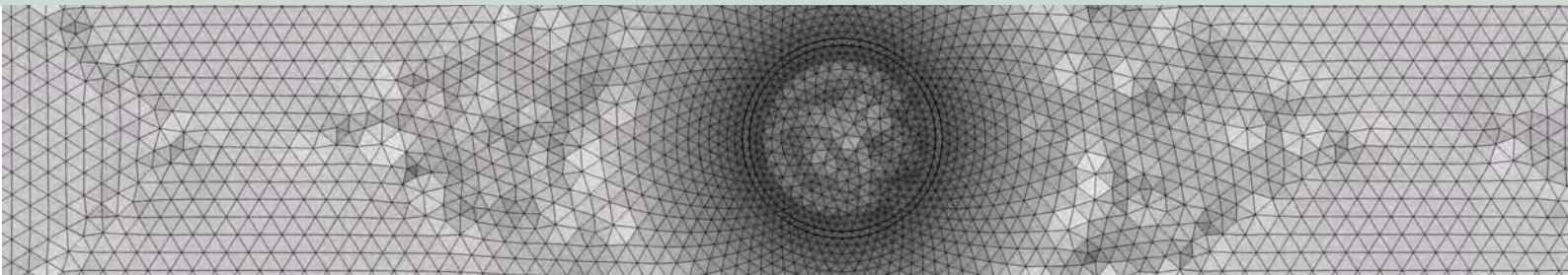




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Kompilation der lithologischen Variabilität und Eigenschaften des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager

D. Jaeggi
P. Bossart
L. Wymann

swisstopo

September 2014

Disclaimer:

Die im Bericht dokumentierten Ansichten und Schlussfolgerungen sind diejenigen der Autoren und stimmen nicht notwendigerweise mit denen des ENSI überein.



Expertenbericht

Expertenbericht von swisstopo, Landesgeologie zu Handen des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorates ENSI

27. September 2014

Kompilation der lithologischen Variabilität und Eigenschaften des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri

Beurteilung der sicherheitsrelevanten Gesteinsparameter aus dem Felslabor und ihre Übertragbarkeit auf die Standortgebiete



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Landestopografie swisstopo
Office fédéral de topographie swisstopo
Ufficio federale di topografia swisstopo
Uffizi federal da topografia swisstopo**

SQS-Zertifikat ISO 9001:2000



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Verteidigung,
Bevölkerungsschutz und Sport VBS

armasuisse

Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Landesgeologie

Redaktion:

P. Bossart, Projektleitung

D. Jaeggi, P. Bossart, L. Wymann, Projektbearbeitung

© 2014 **swisstopo**
Bundesamt für Landestopografie
Office fédéral de topographie
Ufficio federale di topografia
Uffizi federal da topografia
Federal Office of Topography
www.swisstopo.ch

Landesgeologie
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern
Tel: +41 79 583 96 51



E-mail:
david.jaeggi@swisstopo.ch

Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	1
1.2	Rolle der Landesgeologie im Sachplanverfahren	1
1.3	Auftrag der Landesgeologie, Etappe 2 des Sachplanverfahrens	2
1.4	Gliederung des Gutachtens	3
1.5	Von swisstopo für das Gutachten verwendete Dokumente	3
2	Die lithologische Variabilität im Opalinus-Ton	5
2.1	Variabilität am Standort Felslabor Mont Terri	5
2.2	Übertragbarkeit der lithologischen Variabilität auf die potentiellen Standortgebiete	22
3	Schlüsselkennwerte aus dem Opalinus-Ton des Felslabors Mont Terri	25
3.1	Abgrenzung	25
3.1.1	Themenbereich petrophysikalische Kennwerte	25
3.1.2	Themenbereich hydrogeologische Kennwerte	26
3.1.3	Themenbereich felsmechanische Kennwerte	27
3.1.4	Themenbereich thermische Kennwerte	28
3.1.5	Themenbereich geochemische Kennwerte	29
3.1.6	Themenbereich geochemische Zusammensetzung der Porenwässer	29
3.1.7	Themenbereich Gaseintrittsdrucke	29
3.2	Tabelle der Schlüsselkennwerte	30
3.3	Methodik und Kriterien zur Berücksichtigung von Daten	31
3.3.1	Methoden und Kriterien Petrophysik	32
3.3.2	Methoden und Kriterien Hydraulik	32
3.3.3	Methoden und Kriterien Felsmechanik	33
3.3.4	Methoden und Kriterien thermische Kennwerte	35
3.3.5	Methoden und Kriterien Geochemie	36
3.3.6	Methoden und Kriterien Zusammensetzung Porenwässer	36
3.3.7	Methoden und Kriterien Gaseintrittsdrucke	37
3.4	Resultate und Beziehungen zwischen den Kennwerten	37
3.4.1	Beziehungen zwischen den Kennwerten Petrophysik (siehe auch Appendix 4)	37
3.4.2	Beziehungen zwischen den Kennwerten Hydrogeologie (siehe auch Appendix 5)	39
3.4.3	Beziehungen zwischen den Kennwerten Felsmechanik (siehe auch Appendix 6)	42
3.4.4	Resultate thermische Kennwerte	49
3.4.5	Beziehungen zwischen den Kennwerten Geochemie	51
3.4.6	Resultate geochemische Zusammensetzung der Porenwässer	52
3.4.7	Resultate Gaseintrittsdrucke	55
4	Beurteilung des gegenwärtigen Wissensstandes und Vorschläge für weiterführende Arbeiten und Untersuchungen	57
4.1	Beurteilung Wissensstand	57
4.2	Vorschläge für weiterführende Arbeiten und Untersuchungen	58
	Literaturverzeichnis	61

Appendix

Appendix 1: Stratigrafisches Profil der Bohrung BDB-1

Appendix 2: Kleinskalige Kartierung der sandigen Fazies in der TT-Nische

Appendix 3: Strukturkarte des Mont Terri Felslabors

Appendix 4: Petrophysikalische Parameter

Appendix 5: Hydraulische Parameter

Appendix 6: Felsmechanische Parameter

Figurenverzeichnis

- Figur 1:** Vereinfachtes stratigrafisches Profil der BDB-1 Bohrung mit lithostratigrafischen Daten aus Bläsi et al. (1996) und biostratigrafischen Daten aus Reisdorf et al. (2014). Die Lage der Bohrung BDB-1 ist im Profil (Appendix 1) angegeben. Der Opalinus-Ton weist eine Mächtigkeit senkrecht zur Schichtung von 131 Meter auf. Die Logs Gamma, Leitfähigkeit (short spaced) und Leitfähigkeit (long spaced) fehlen für den mittleren Bereich der Passwang-Formation, weil das Bohrloch verstürzt war..... 7
- Figur 2:** Geologischer Horizontalschnitt durch das Felslabor Mont Terri. Der Horizontalschnitt zeigt die Verteilung der drei Haupt-Lithofaziestypen im Opalinus-Ton, tonige Fazies, sandige Fazies und sandig-karbonatreiche Fazies. Die Fragezeichen sollen die Unsicherheiten bei der Extrapolation verdeutlichen. Die gestrichelten Linien markieren den vermuteten ungefähren Verlauf der Grenze Aalenium – Toarcium, sowie die vermutete Grenze zwischen Opalinus-Ton und Passwang-Formation (siehe auch Tabelle 1). Zudem sind die wichtigsten im Kapitel erwähnten Bohrungen und Nischen angegeben.10
- Figur 3:** Die vier Subfaziestypen der sandigen Fazies aus der TT-Nische (Peters et. al., 2011; Müller & Jaeggi, 2012). Der rote Balken rechts gibt die Grenzen der vier Subfaziestypen wieder. Die farbige Fläche wurde grob kartiert und die nummerierten Quadrate (40x40 cm) wurden feinkartiert. Die weiss umrahmten Quadrate markieren repräsentative Ausschnitte aus den verschiedenen Subfaziestypen und werden unten im Text detailliert beschrieben. Die Subfaziestypen A und D verlaufen ausserhalb des kartierten Bereichs weiter. Die Kreise bezeichnen Probennahmestandorte.....13
- Figur 4:** Detailkartierung No4 (siehe Figur 3), Bildbreite ist 40 cm, bioklastischer Kalk (blau), dunkler, sandarmer Ton (braun) und Siltlagen und Siltlinsen (gelb) (Müller & Jaeggi, 2012). Die erwähnte auffällige Siltlage ist auf der Detailkartierung in diesem Abschnitt nicht kontinuierlich und daher nicht erkennbar.15
- Figur 5:** Detailkartierung No2 (siehe Figur 3), Bildbreite ist 40 cm, bioklastischer Kalk (blau), dunkler, sandarmer Ton (braun), Siltlagen und Siltlinsen (gelb), sandreicher Ton (grün) und dunkle, graphitische Tone (grau). Der Kreis markiert den Umriss einer Bohrung und die Rechtecke zeigen die Entnahmepunkte von Dünnschliffen an (Müller & Jaeggi, 2012).16
- Figur 6:** Detailkartierung No5 (siehe Figur 3), Bildbreite ist 40 cm, Siltlagen und Siltlinsen (gelb), sandreicher Ton (grün) und dunkle, graphitische Tone (grau) (Müller & Jaeggi, 2012).16
- Figur 7:** Detailkartierung No10 (siehe Figur 3), Bildbreite ist 40 cm, Siltlagen und Siltlinsen (gelb), sandreicher Ton (grün) und dunkle, graphitische Tone (grau) (Müller & Jaeggi, 2012).17
- Figur 8:** Die drei verschiedenen Lithofaziestypen im Opalinus-Ton des Felslabors Mont Terri. In der tonigen Fazies dominieren die Tonmineralien und eingeregelter Biodetritus. In der sandigen Fazies sind Quarzkörner in Siltfraktion dominierend. In der sandig-karbonatreichen Fazies sind neben viel Quarz und Kalzit auch Millimeter-grosse Bruchstücke von Echinodermen, hauptsächlich Crinoiden vorhanden.20
- Figur 9:** Probennahmestellen für die Ermittlung petrophysikalischer Kennwerte. Es handelt sich hier nur um die neuesten und wichtigsten Daten ab 2007, welche jünger sind als der Gesamtbericht von Bossart und Thury (2008).26
- Figur 10:** Standorte der durchgeführten belastbaren hydraulischen Tests im Felslabor Mont Terri (ausserhalb der EDZ). Die Punkte repräsentieren jeweils mehrere hydraulische Tests in unterschiedlichen Intervalltiefen entlang einer Bohrung.....27
- Figur 11:** Probenentnahmestellen für die Ermittlung felsmechanischer Kennwerte. Es handelt sich hier nur um die neuesten Daten ab 2007, welche jünger sind als der

Gesamtbericht von Bossart und Thury (2008). Zur besseren Abdeckung und Vergleichbarkeit wurden auch noch die Daten aus Rummel & Weber (2004) beigezogen.	28
Figur 12: Mögliche Beeinflussungen der mechanischen Variabilität.	34
Figur 13: Die 4 Stadien des bruchhaften Gesteinsversagens bis zur Maximallast (UCS) in einaxialer Kompression (aus Amann et al., 2011). Die Indizes bezeichnen "crack closure" (CC), "crack initiation" (CI) und "crack damage threshold" (CD).	35
Figur 14: Vp-Daten parallel zur Schichtung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), Grün: Tonige Fazies (Toarcium). Die Daten „Wymann 2013 at failure“ sind bereits von Mikrorissen durchsetzt (Verändert nach Thoeny, 2013).	38
Figur 15: Vp-Daten senkrecht zur Schichtung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), Grün: Tonige Fazies (Toarcium). Die Daten „Wymann 2013 at failure“ sind bereits von Mikrorissen durchsetzt (Verändert nach Thoeny, 2013).	39
Figur 16: Verteilung aller hydraulischen Tests auf die verschiedenen Faziestypen. Es wurden nur Daten ausserhalb der Auflockerungszone (EDZ) berücksichtigt (verändert und ergänzt nach Lavanchy & Mettier, 2012). Sandige und sandig-karbonatreiche Fazies wurden aufgrund der geringen Anzahl Daten zusammengefasst.	39
Figur 17: Histogramme der hydraulischen Durchlässigkeiten K. Es wurden nur Daten ausserhalb der EDZ berücksichtigt. Sandige und sandig-karbonatreiche Fazies wurden aufgrund der geringen Anzahl Daten ausserhalb der EDZ zusammengefasst.	41
Figur 18: Zusammengesetztes Histogramm der hydraulischen Durchlässigkeiten K. Es wurden nur Daten ausserhalb der EDZ berücksichtigt. Sandige und sandig-karbonatreiche Fazies wurden aufgrund der geringen Anzahl Daten ausserhalb der EDZ zusammengefasst.	42
Figur 19: Daten einaxialer Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Millimeterangabe gibt den Probendurchmesser an. (Verändert nach Thoeny, 2013).	43
Figur 20: Daten einaxialer Druckfestigkeit parallel zur Schichtung. Grün: Tonige Fazies (Toarcium), Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Millimeterangabe gibt den Probendurchmesser an. (Verändert nach Thoeny, 2013).	44
Figur 21: Elastizitätsmodul für S-Proben aus einaxialen (UCS) und triaxialen (Triax) Tests bei der Erstbelastung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 100 mm für Gräsle (2010), 90 mm für Amann (2011), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).	45
Figur 22: Elastizitätsmodul für P-Proben aus einaxialen (UCS) und triaxialen (Triax) Tests bei der Erstbelastung. Grün: Tonige Fazies (Toarcium), Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 100 mm für Gräsle (2010), 60 mm für Wymann (2013), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).	46
Figur 23: Querdehnungszahl für S-Proben aus einaxialen Tests (UCS) bei der Erstbelastung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 90 mm für Amann (2011), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).	47
Figur 24: Querdehnungszahl für P-Proben aus einaxialen Tests (UCS) bei der Erstbelastung. Grün: Tonige Fazies (Toarcium), Blau: Sandige Fazies. Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 60 mm für Wymann (2013), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).	48
Figur 25: Thermische Leitfähigkeit von 9 P- (rot) und 9 S- (blau) Proben aus den beiden Bohrungen BHE-D6 und BHE-D26 in Funktion der Bohrtiefe (verändert aus Wileveau &	

Rothfuchs, 2007). Die Proben aus BHE-D6 wurden mit Alufolie einvakuiert und die Proben aus BHE-D26 in Harz eingegossen.	49
Figur 26: Thermische Leitfähigkeit für zwei Proben (5.1 Meter und 5.3 Meter) aus der Bohrung BHE-D26 in Funktion der Wassersättigung (aus Wileveau & Rothfuchs, 2007). Die Probe in blau weist einen höheren Quarzgehalt auf (Akkumulation von Quarz in Siltfraction innerhalb der tonigen Fazies).	50
Figur 27: Kationenaustauschkapazität (CEC) aus der sandigen Fazies der Bohrung BPC-C2 (Daten aus Lerouge et al., 2011). Die ausgezogene Linie markiert den Mittelwert aus diesen Daten und die gestrichelte Linie den Mittelwert aus Daten der tonigen Fazies (Bossart & Thury, 2008).	51
Figur 28: Belegung der Kationenaustauschplätze von Proben der sandigen Fazies aus der Bohrung BPC-C2 (blau) (Lerouge et al., 2011) im Vergleich mit der tonigen Fazies (orange) (Pearson et al., 2003). Die oberen dunkleren Farben auf der Säule geben die Variabilität der Belegung an. Es wurden 24 Proben aus der tonigen und 13 Proben aus der sandigen Fazies gemessen.	52
Figur 29: Verteilung der Chloridkonzentration entlang der Sicherheitsgalerie des Felslabors Mont Terri. Es werden Proben aus Bohrlöchern/Zuflüssen, Auspressen aus Gestein und Auslaugung unterschieden (Figur aus Pearson et al., 2003, angepasst nach Wersin et al., 2011). Dem Profil liegen Daten aus über 40 Bohrungen entlang der Sicherheitsgalerie und der Galerie 98 zugrunde.	53
Figur 30: Schoeller-Diagramm vom Mittelwert diverser Wasserproben aus den Bohrungen BWS-A1, BWS-A2 und BWS-A3. Die Standorte dieser 3 Bohrungen sind auf Figur 2 eingezeichnet (Figur aus Pearson et al., 2003).	54
Figur 31: Gaseintrittsdrucke vs. scheinbare Gaspermeabilität aus in-situ Versuchen in den BET Bohrungen im Bereich der SB-Nische des Felslabors Mont Terri. Die Daten stammen alle aus der tonigen Fazies (Daten aus Miehe et al, 2010). Der rote Pfeil gibt die Bildung eines Gasfracks an.	56
Figur 32: Entwicklungsstadien des Endlagers mit sicherheitsrelevanten Prozessen und den 45 Experimenten der Phase 20 (1. Juli 2014 – 30. Juni 2015) des Mont Terri Projektes. Rote Flächen stehen für kurzfristige-, grüne Flächen für mittelfristige- und blaue Flächen für Langzeitprozesse.	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gliederung des Opalinus-Ton und der angrenzenden Formationen im Felslabor Mont Terri verändert gemäss neuesten Daten (Hostettler et al., 2014 in Vorbereitung) aus der Bohrung BDB-1 und aus Aufnahmen von Schaeren & Norbert, 1989 und Bläsi et al., 1996. Die drei Haupt-Lithofaziestypen (gelb, grau, blau) können weiter unterteilt werden. Dies ergibt schliesslich sechs lithologisch unterscheidbare Faziestypen. Die untere tonige Fazies ist dabei biostratigrafisch in einen oberen Teil Aalenium, bzw. einen unteren Teil Toarcium unterteilt. Die Galerie-Meter (GM) entlang der Sicherheitsgalerie (SG) sind zwischen 50° im Dach und 35° an der Basis zur Schichtung orientiert. Die Mächtigkeiten senkrecht zur Schichtung ergeben sich aus der Bohrung BDB-1 und beträgt für den Opalinus-Ton 131 Meter. In der Passwang-Formation konnten nur das Sissach-Member und das Brüggli-Member klar identifiziert werden. Dazwischen liegen Gesteine, welche nicht der Aufteilung in Member gemäss Burkhalter (1996) entsprechen..... 9

Tabelle 2: Die mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Lithofaziestypen in Gewichts-%, (beste Schätzungen), nach 1) Thury & Bossart (1999), Bossart & Thury (2008), ergänzt mit Daten von 2) Peters et al. (2011) für die sandige Fazies und Daten aus 3) Nagra (2001) für die Bohrung Benken. Die Anzahl der Messwerte ist, wo vorhanden, in Klammern angegeben.19

Tabelle 3: Vergleich ausgewählter Parameter aus der tonigen Fazies zwischen der Bohrung Benken ⁽¹⁾ aus Mazurek et al., 2008) und dem Felslabor Mont Terri ⁽²⁾ aus Bossart & Thury, 2008; ⁽³⁾ aus Amann et al., 2011a,b). Es ist dabei zu beachten, dass die heutige Überlagerung bei Benken 550 – 650 Meter (Mazurek et al., 2008) und beim Felslabor Mont Terri 320 Meter beträgt. Verglichen werden nur Werte aus der tonigen Fazies und senkrecht zur Schichtung. Es handelt sich bei allen Angabe in der Tabelle um Mittelwerte oder empfohlene Werte. Genauere Angaben zu den Werten aus toniger und sandiger Fazies des Opalinus-Ton am Mont Terri werden im nachfolgenden Kapitel 3 gemacht. Die Anzahl der Messwerte ist, wo vorhanden, in Klammern angegeben.24

Tabelle 4: Vergleich ausgewählter Parameter aus der tonigen und der sandigen Fazies des Opalinus-Ton am Mont Terri für S-Proben (senkrecht zur Schichtung) und P-Proben (parallel zur Schichtung). Die Werte für die tonige Fazies stammen aus ⁽¹⁾ Bossart & Thury (2008). Bei der einaxialen Druckfestigkeit wurden Werte aus ⁽²⁾ Amann et al. (2011a,b) genommen. Die Tabelle wurde ergänzt mit petrophysikalischen und felsmechanischen Daten aus der sandigen Fazies von ⁽³⁾ Gschwind (2013), ⁽⁴⁾ Peters et al. (2011) und hydraulischen Daten aus ⁽⁵⁾ Lavanchy & Mettier (2008). Die totale Kationenaustauschkapazität wurde für die sandige Fazies in ⁽⁶⁾ Lerouge et al. (2011) ermittelt. Die Gaseintrittsdrucke stammen aus ⁽⁶⁾ Mische et al. (2010). Die Anzahl der Messwerte ist, wo vorhanden in Klammern angegeben. Die verschiedenen Parametergruppen sind zur Veranschaulichung unterschiedlich eingefärbt: petrophysikalisch = orange, hydraulisch = blau, felsmechanisch = grau, thermisch = rot, Porenwasserzusammensetzung = gelb, CEC = grün und Gaseintrittsdruck = weiss.30

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Aufgrund der faziellen Verhältnisse im Opalinus-Ton des Felslabors Mont Terri stellt swisstopo eine Kompilation diverser für die geologische Tiefenlagerung relevanter Gesteinskennwerte in Abhängigkeit der lithologischen Parameter zusammen. Dabei bezieht sich swisstopo auf die Sammlung aller erhobenen Daten und die Ermittlung von Kennwerten seit Beginn der Arbeiten im Felslabor. Bei der Datenerhebung sollen Einflüsse aus der tektonischen Beanspruchung des Opalinus-Ton berücksichtigt werden.

Das Ziel dieser Kompilation ist das Aufzeigen der Bandbreiten sicherheitsrelevanter Gesteinsparameter im Opalinus-Ton, welcher im Liegenden durch die Staffelegg-Formation und im Hangenden durch die Passwang-Formation begrenzt wird. Bis etwa 2010 wurde das Gewicht vor allem auf die tonige Fazies im unteren Teil des Opalinus-Ton gelegt. Erst in den letzten Jahren ist die sandige Fazies im oberen Teil des Opalinus-Ton vermehrt in den Fokus gerückt und in die Experimente einbezogen worden. Ein weiteres Ziel ist deshalb die neueren Daten und die Variabilität der Kennwerte aus der sandigen Fazies darzustellen und mit der tonigen Fazies zu vergleichen. Daraus kann dann auch eine Aussage über notwendige zusätzliche Datenerhebungen abgeleitet werden.

Aufgrund der laufenden Untersuchungen am Mont Terri werden nur Daten und Kennwerte bis Anfang 2014 berücksichtigt. Dabei sind auch die ersten Auswertungen aus der Tiefbohrung BDB-1, welche Ende Januar 2014 fertiggestellt wurde, in dieses Gutachten eingeflossen.

1.2 Rolle der Landesgeologie im Sachplanverfahren

Die Landesgeologie bei swisstopo ist die Fachstelle des Bundes für Geologie. Die Landesgeologie stellt gemäss Geoinformationsgesetz (GeolG) und Landesgeologieverordnung (LGeoIV) dem Bund, den kantonalen Fachstellen sowie Dritten geologische Informationen im Hinblick auf die nachhaltige Nutzung des geologischen Untergrunds zur Verfügung. Zu den geologischen Daten von nationalem Interesse gehören insbesondere Vorkommen und Beschaffenheit von geeigneten Gesteinsformationen zur Lagerung von Stoffen und Abfällen (LGeoIV Art. 5). Seit 2013 ist auch die Forschung in der LGeoIV besser verankert. Gemäss Art. 7.2 leitet und betreibt die Landesgeologie das Felslabor Mont Terri.

Die Landesgeologie hat unter anderem den Auftrag, die Bundesverwaltung sowie Dritte, denen Aufgaben des Bundes übertragen sind, in geologischen Fragen zu beraten und geologische Untersuchungen bei Projekten der Bundesverwaltung zu begleiten (LGeoIV Art.6). In diesem Kontext ist die Landesgeologie bei swisstopo in Organisation, Konzept und Umsetzung des Sachplans Geologische Tiefenlager (SGT) involviert worden. Gemäss Pflichtenheft im Konzeptteil des SGT hat swisstopo folgende Aufgaben:

- swisstopo berät und unterstützt das ENSI im Sachplan- und Rahmenbewilligungsverfahren in geologischen Fragen.
- swisstopo ist Mitglied des Technischen Forums Sicherheit. Dieses Forum setzt sich aus Expertinnen und Experten des Bundes, der Standortkantone und Standortgebiete, der Bundesrepublik Deutschland sowie der Entsorgungspflichtigen zusammen.

Das Forum diskutiert und beantwortet technische und wissenschaftliche Fragen zu Sicherheit und Geologie.

- Nach der behördlichen Überprüfung und vor der Vororientierung und Aufnahme der geologischen Standortgebiete in den Sachplan findet eine Anhörung und Mitwirkung, unter anderem durch Konsultation der betroffenen Bundesstellen, statt. In diesem Rahmen (RVOG Art. 62, LGeol Art. 17) wird swisstopo einbezogen, jeweils über den gesamten Inhalt der jeweiligen Sachplanetappe Stellung zu nehmen.

1.3 Auftrag der Landesgeologie, Etappe 2 des Sachplanverfahrens

In der ersten Etappe SGT hat swisstopo das ENSI bereits unterstützt. Dabei ging es um die Beurteilung der Sammelprofile und der hergeleiteten Wirtgesteine sowie der Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten. Die Resultate sind in einem Expertenbericht der swisstopo zusammengefasst (swisstopo, 2010).

Mandatsgrundlage des vorliegenden Expertenberichtes der Etappe 2 im SGT ist der Vertrag zwischen dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI und swisstopo vom April 2013. Dieser Vertrag gliedert sich in drei Teile: 1) Lithologische und zeitliche Entwicklung des „Braunen Doggers“ der Nordschweiz, 2) Überprüfung und kinematische Interpretation der tektonischen Elemente der Nordschweiz und 3) Kompilation der lithologischen Variabilität und Eigenschaften des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri. Im vorliegenden Gutachten ist nur der dritte Teil behandelt (die ersten beiden Teile bilden separate Gutachten) und gliedert sich in folgende Teile I und II:

- I. Swisstopo erstellt eine Kompilation diverser für die geologische Tiefenlagerung relevanter Gesteinsparameter in Abhängigkeit der Variabilität der lithologischen Parameter:
 - Basis für den Auftrag ist die Sammlung aller erhobenen Daten seit Beginn der Arbeiten im Felslabor im Jahre 1996 bis Anfang 2014.
 - Bei der Datenerhebung sollen Einflüsse aus Tektonisierung mitberücksichtigt werden.
 - Die Bandbreiten aller sicherheitsrelevanten Gesteinsparameter sind aufzuzeigen und daraus abgeleitet eine Übersicht über notwendige zusätzliche Datenerhebungen zu erstellen.
- II. Im Rahmen des Auftrags sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:
 - Welche für die geologische Tiefenlagerung relevanten Parameter bezüglich Sicherheit und bautechnischer Machbarkeit wurden im Felslabor Mont Terri in den unterschiedlichen Lithologien des Opalinus-Ton ermittelt?
 - Welche Abhängigkeiten zwischen diesen relevanten Parametern und der Lithologie des Opalinus-Ton lassen sich aufzeigen?
 - Welche weiterführenden Arbeiten wären aus Sicht von swisstopo allenfalls notwendig, um die Abhängigkeiten dieser relevanten Prozesse besser zu verstehen?

1.4 Gliederung des Gutachtens

Das vorliegende Gutachten ist in drei Hauptkapitel gegliedert, womit die in Kapitel 1.3 formulierten Fragen beantwortet werden:

- Kapitel 2: Die lithologische Variabilität im Opalinus-Ton
- Kapitel 3: Schlüsselkennwerte aus dem Opalinus-Ton des Felslabors Mont Terri
- Kapitel 4: Beurteilung des gegenwärtigen Wissensstandes und Vorschläge für weiterführende Arbeiten und Untersuchungen

In Kapitel 2 wird die Situation der lithologischen Variabilität am Mont Terri vorgestellt und die Übertragbarkeit zu den bekannten stratigrafischen Profilen in den potentiellen Standortgebieten diskutiert. In Kapitel 3 wird die Relevanz der am Felslabor Mont Terri erfassten Parametergruppen und deren einzelnen Kennwerte bezüglich Sicherheit und bautechnischer Machbarkeit diskutiert. Zudem wird eine Bestandesaufnahme der erhobenen Daten durchgeführt und die wichtigsten Resultate aus den Untersuchungen und die Abhängigkeiten zwischen den Kennwerten und der Lithologie des Opalinus-Ton diskutiert. Insbesondere wird die räumliche Verteilung der Daten und die betroffenen Faziestypen näher beleuchtet. In Kapitel 4 wird auf den gegenwärtigen Wissensstand aber auch auf Wissenslücken eingegangen.

1.5 Von swisstopo für das Gutachten verwendete Dokumente

Für die Kompilation der Variabilität der Gesteine und deren petrophysikalischer Parameter wurden die aus den Forschungsphasen 1-19 (1996 bis Anfangs 2014) des Mont Terri Forschungsprojekts hervorgegangenen Technical Notes und Technical Reports und daraus hervorgegangene wissenschaftliche Publikationen verwendet. Insbesondere die Syntheseberichte waren für die vorliegende Beurteilung sehr wertvoll. Untenstehend sind die wichtigsten und umfassendsten Berichte und Arbeiten aufgeführt. Eine vollständige Referenzliste findet sich hinten im Literaturverzeichnis.

Sedimentologie, Variabilität:

- Blaesi, H.-R., Moeri, A. & Bossart, P. (1996): Results of the Phase 1 drilling campaign. – Mont Terri Technical Report TR96-01
- Reisdorf, A., Hostettler, B., Waltschew, A., Jaeggi, D. & Menkveld-Gfeller, U. (2014): SO (Sedimentology of Opalinus-Ton), Biostratigraphy of the Basal Part of the Opalinus-Ton at the Mont Terri rock laboratory, Switzerland, Technical Report Mont Terri Project, TR2014-07

Petrophysik:

- Bossart, P. & Thury, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. – Rep. Swiss geol. Survey, 3
- Peters, M., Mazurek, M., Jaeggi, D. & Müller, H. R. (2011): WS-H Experiment: Heterogeneities in the sandy facies of Opalinus Clay on a scale of millimeters to centimeters, pp. 18, University of Bern, Mont Terri Technical Note TN2010-76

Hydrogeologie:

- Lavanchy, J. M. & Mettier, R. (2012): HA (Hydrogeological analysis) Experiment: Hydraulic database, Phases 1-16, Version 1.0, Mont Terri Technical Note TN2010-74
- Nussbaum, C. & Bossart, P. (2004): Compilation of K-values from packer tests in the Mont Terri rock laboratory, Mont Terri Technical Note TN2005-10

Felsmechanik:

- Bock, H. (2009): RA Experiment: Updated Review of the Rock Mechanics Properties of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field Testing, Mont Terri Technical Report TR2008-04
- Thoeny, R. (2013): Geomechanical Analysis of Excavation-Induced Rock Mass Behavior of Faulted Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Rock Laboratory (Switzerland). In Engineering Geology, 194. Zürich: ETH Zürich

Thermische Kennwerte:

- Bossart, P. & Thury, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. – Rep. Swiss geol. Survey, 3
- Wileveau, Y. & Rothfuchs, T. (2007): THM behaviour of host rock (HE-D) Experiment: Study of Thermal effects on Opalinus Clay, Synthesis, Mont Terri Technical Report TR2006-01

Geochemie/Porenwasserzusammensetzung:

- Lerouge, C., Blanc, P., Gaboreau, S., Decouchon, E., Guerrot, C., Wille, C., Jean-Prost, E. & Haas, H. (2011): PC-C Experiment: Mineralogy and geochemistry of cores of the BPC-C2 borehole Mont Terri Rock Laboratory – phase II, Final report, Mont Terri Technical Note TN2010-05rev
- Pearson, F. J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J.-Y., Fernandez, A. M., Gabler, H.-E., Gaucher, E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernan, P. & Waber, H. N. (2003): Mont Terri Project – Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory, Berichte des BWG, Serie Geologie No.5 – Bern 2003

Gaseintrittsdrucke:

- Miehe, R., Czaikowsik, O. & Wieczorek, K. (2010): Barrier Integrity of the Isolation Rock Zone in Clay Formations. Mont Terri Technical Note TN 2010-82

2 Die lithologische Variabilität im Opalinus-Ton

2.1 Variabilität am Standort Felslabor Mont Terri

Abgrenzung des Opalinus-Ton und Mächtigkeit:

Als Opalinus-Ton wird lithostratigrafisch die Toneinheit zwischen den Sandkalkstein-Abfolgen des Sissach-Members (Burkhalter, 1996) im Hangenden und den Kalkmergel-Ton-Wechselagerungen des Gross Wolf-Members (Reisdorf et al., 2011) im Liegenden bezeichnet. Im Gebiet des Mont Terri weisen diese Gesteine gemäss neuesten Untersuchungen Toarcium- und Aalenium-Alter auf. Diese Untersuchungen laufen gegenwärtig im Rahmen der SO (Sedimentology of Opalinus Clay) und DB (Deep Borehole) Experimente in Zusammenarbeit mit dem Naturhistorischen Museum Bern (Reisdorf et al., 2014). Die neuesten Resultate wurden in dieses Gutachten integriert. Bereits Contini (1970) vermutete die Liass/Dogger-Grenze im Opalinus-Ton. In späteren Arbeiten von Bläsi et al. (1991, 1996) wurde diese Möglichkeit zwar erwähnt, jedoch nicht weiter untersucht. Die Präzisierung der Altersverhältnisse des Opalinus-Ton am Standort Mont Terri ist insbesondere auch für die Korrelation mit den vorhandenen Nagra-Bohrungen an den potentiellen Standortgebieten von grosser Wichtigkeit.

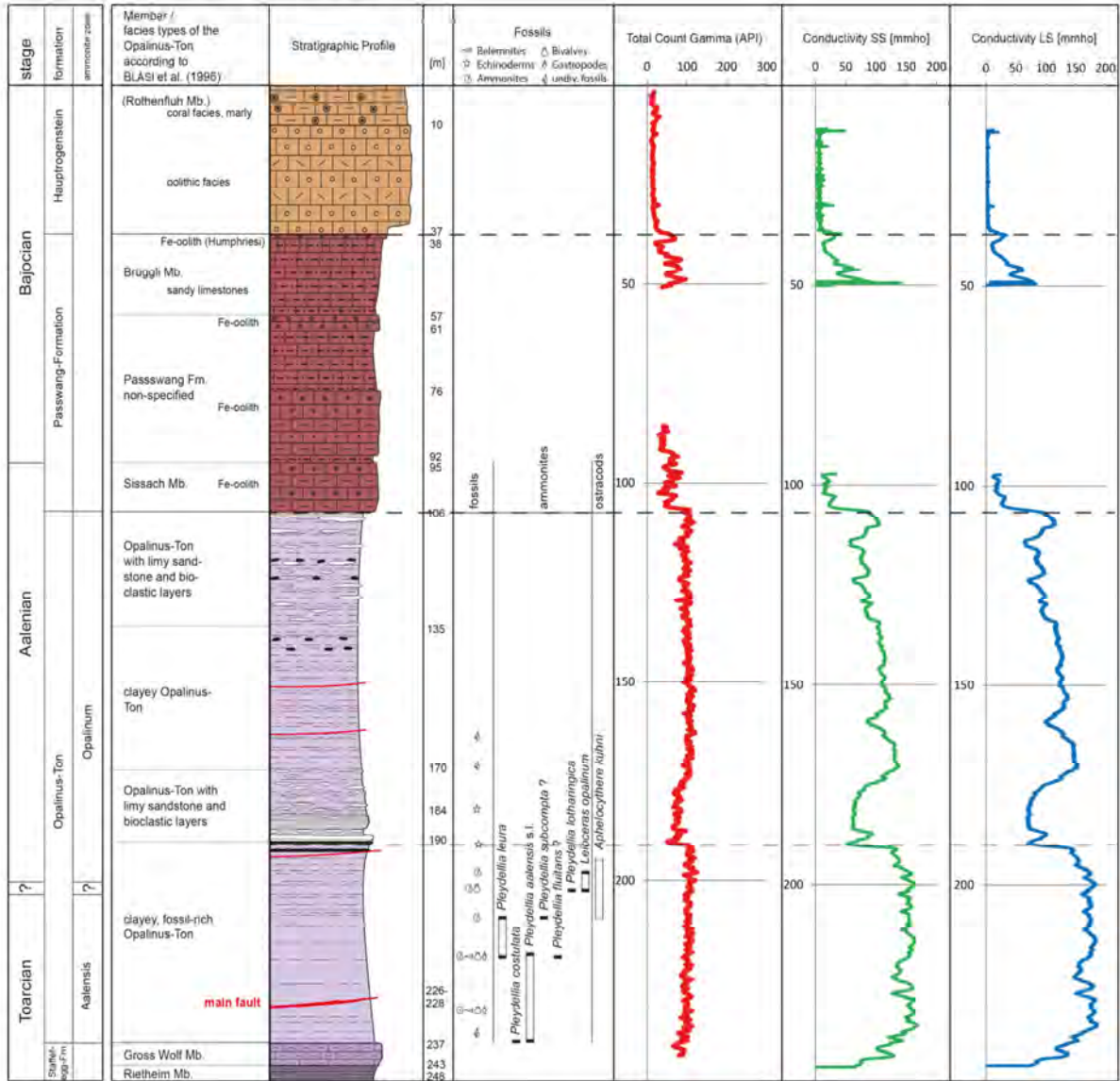
Im vorliegenden Bericht beziehen wir uns auf den Opalinus-Ton als lithostratigrafische Einheit, bzw. als Formation. Jedoch werden die neuesten biostratigrafischen Erkenntnisse über die Toarcium-Aalenium-Grenze bereits in die Beurteilung und Interpretation der Daten miteinbezogen.

Gemäss Definition handelt es sich beim Opalinus-Ton um die Tonserien des Aalenium und des späten Toarcium, welche im Dach von den spätigen eisenoolithischen Serien des Sissach Members und an der Basis von den Ton- und Mergelwechsellagerungen des Gross Wolf-Members unterlagert werden. Regionale Mächtigkeitsangaben sind infolge der schlechten Aufschlussverhältnisse rar und weisen eine sehr grosse Bandbreite auf. So gab Laubacher (1948) für das Mont Terri Gebiet lediglich Mächtigkeiten von 80 Meter an. Bei Tschopp (1960) werden 80 – 100 Meter und bei Keltenborn (1944) gar 150 Meter angegeben. In der Meisselbohrung Buix wurden 157.5 Meter Opalinus-Ton angetroffen (Schmidt et al., 1924). Bläsi et al. (1991) gab aufgrund der Aufnahmen aus der Sicherheitsgalerie des Mont Terri Autobahntunnels eine Mächtigkeit von 150 Meter an und hielt fest, dass der stark von schichtparallelen Brüchen und Bruchzonen durchzogene Opalinus-Ton im Bereich der Mont Terri Antiklinale tektonisch verdickt oder gar repetiert sein könnte. Wir definieren den Begriff „wahre Mächtigkeit“ als die Mächtigkeit senkrecht zur Schichtung. Diese kann insbesondere am Mont Terri aufgrund von tektonischen Überschiebungen von der ursprünglich zur Ablagerung gelangten „sedimentären Mächtigkeit“ abweichen. Bei den Abschätzungen der Mächtigkeit kann davon ausgegangen werden, dass bei allen Autoren lithostratigrafische Kriterien zur Anwendung kamen und das Gestein nicht in einen unteren Teil Toarcium und einen oberen Teil Aalenium unterteilt worden ist.

Auch wenn gewisse tektonische Verdickungen nicht ausgeschlossen werden können, so weisen doch auch neueste Daten aus der von Dezember 2013 bis Januar 2014 abgeteuften BDB-1 Bohrung (Hostettler et al., 2014 in Vorbereitung) auf eine ausserordentlich hohe wahre Mächtigkeit von 131 Meter hin (**Figur 1**; **Appendix 1**). Die sedimentäre Mächtigkeit dürfte, nach Abwicklung und Korrektur der tektonischen Überschiebungen, zwischen 118 und 130 Meter betragen (**Appendix 1**).

Der Übergang vom Opalinus-Ton zum Sissach-Member im Hangenden ist nicht sehr scharf ausgebildet. Der Opalinus-Ton liegt dort in der sandigen Fazies vor, mit Siltsteinlinsen von maximal einigen Zentimetern Länge, zusätzlich Linsen aus Siderit und Biodetritus, bestehend aus Echinodermenspäten und Muschelschill. Eine Lamination ist bereits gut erkennbar. Oberhalb von 106 Meter in der Bohrung BDB-1 treten vermehrt sandig-spätige, teils sehr fossilführende Kalkbänke mit limonitischen Intraklasten auf. Bei 106 Meter wurde in der Bohrung ein letzter Aufarbeitungshorizont mit limonitischen Intraklasten angetroffen. Biostratigrafisch liegt die Grenze innerhalb der Comptum Subzone, späte Opalinum Zone (Burkhalter, 1996). In Südwestdeutschland markiert das Dach der Comptum-Bank die Obergrenze des Opalinus-Ton (Franz & Villinger, 2001). Der Übergang Opalinus-Ton zur Staffelegg-Formation an der Basis ist mit dem Einsetzen der Kalkmergel-Tonmergel-Wechselagerung des Gross Wolf-Members klarer ausgebildet. Es handelt sich bei der Grenze vor allem um einen scharfen farblichen Wechsel von grauen Mergeln im Gross Wolf-Member zu dunkelgrauen bis schwarzen glimmerführenden, leicht siltigen Tonsteinen des Opalinus-Ton (Wetzel & Allia, 2003, Reisdorf et al., 2011). Das Auftreten von geometrischen Ammoniten mit phosphoritischer Schalenerhaltung gilt als Markerhorizont, ca. 7 Meter über der Basis des Opalinus-Ton. Die genaue biostratigrafische Abgrenzung ist gegenwärtig in Untersuchung (Experimente SO und DB). Es zeichnet sich bereits jetzt ab, dass die Definition für SW-Deutschland, wo der Übergang „Jurensis Mergel“ – Opalinus-Ton dem Dach der Torulosum Subzone entspricht, im Gebiet des Mont Terri nicht gültig ist (**Appendix 1**). In der Bohrung BDB-1 wurde die Untergrenze des Opalinus-Ton bei 237 Meter festgelegt, die Obergrenze bei 106 Meter (**Figur 1**). Es ergibt sich somit für den Opalinus-Ton im Bereich des Felslabors Mont Terri eine wahre Mächtigkeit von 131 Meter.

Stratigraphic sequence BDB-1



Figur 1: Vereinfachtes stratigrafisches Profil der BDB-1 Bohrung mit lithostratigrafischen Daten aus Bläsi et al. (1996) und biostratigrafischen Daten aus Reisdorf et al. (2014). Die Lage der Bohrung BDB-1 ist im Profil (Appendix 1) angegeben. Der Opalinus-Ton weist eine Mächtigkeit senkrecht zur Schichtung von 131 Meter auf. Die Logs Gamma, Leitfähigkeit (short spaced) und Leitfähigkeit (long spaced) fehlen für den mittleren Bereich der Passwang-Formation, weil das Bohrloch verstürzt war.

Faziesverteilung und Ausbildung:

Bereits bei den frühen Detailaufnahmen im Rahmen des Mont Terri Autobahntunnelbaus der A16 im Jahre 1989 wurde eine Studie über die regional kaum aufgeschlossene Ton-Serie des Opalinus-Ton durchgeführt (Schaeren & Norbert, 1989, Bläsi et al., 1991). Dabei hat sich die heterogene Ausbildung des Opalinus-Ton in der Region des Mont Terri gezeigt und aufgrund sedimentologischer Kriterien konnten vier Untereinheiten ausgeschieden werden. Dabei wurden entlang der Sicherheitsgalerie (SG) des Mont Terri Autobahntunnels die folgenden Untereinheiten unterschieden:

1. Opalinus-Ton mit kalkigen Sandstein- und Biodetrituslagen (SG781 – 835 m)
2. Toniger Opalinus-Ton (SG835 – 869 m)
3. Opalinus-Ton mit kalkigen Sandstein- und Biodetrituslagen (SG869 – 900 m)
4. Toniger, fossilreicher Opalinus-Ton (SG900 – 1024 m)

Diese ursprüngliche Unterteilung wurde später beim Anfahren des Felslabors Mont Terri 1996 in einem Mont Terri Technischen Bericht über die Resultate aus der ersten Bohrkampagne noch weiter verfeinert (Bläsi et al., 1996).

Neuere Daten, welche einen besseren Einblick in die Stratigrafie des Opalinus-Ton erlauben wurden im Rahmen der drei Mont Terri Experimente SO (Sedimentology of Opalinus Clay), VA (Investigation of spatial variability within Opalinus Clay) und WS-H (Investigation of wet spots) gewonnen. Das Experiment WS-H wurde 2013 durch das Nachfolgeexperiment WS-I abgelöst (Bossart & Nussbaum, 2013).

Neuere Erkenntnisse über die Faziesverteilung wurden vor allem aus den 40 – 55 Meter tiefen Bohrungen BVA-0, BVA-1 und BDS-4 gewonnen (Becker & Müller, 2012) (**Figur 2**). Umfangreiche Untersuchungen in der TT-Nische (Peters et al., 2011, Jaeggi et al., 2012) haben das Verständnis der sandigen Fazies verbessert. Im Moment wird im Rahmen des SO Experiments in Zusammenarbeit mit dem Naturhistorischen Museum Bern und S. Feist-Burkhardt mit Hilfe von bio- und palynostratigrafischen Methoden eine Studie zur Überprüfung der biostratigrafischen Gliederung durchgeführt. Zudem liegen seit Ende Januar 2014 neueste stratigrafische Daten aus der BDB-1 Tiefbohrung des DB (Deep borehole) Experiments vor, welche neue Erkenntnisse über Mächtigkeiten ergaben und die Verteilung und Ausbildung der verschiedenen Lithofaziestypen in Richtung normal zur Schichtung aufzeigen (Hostettler et al., 2014 in Vorbereitung).

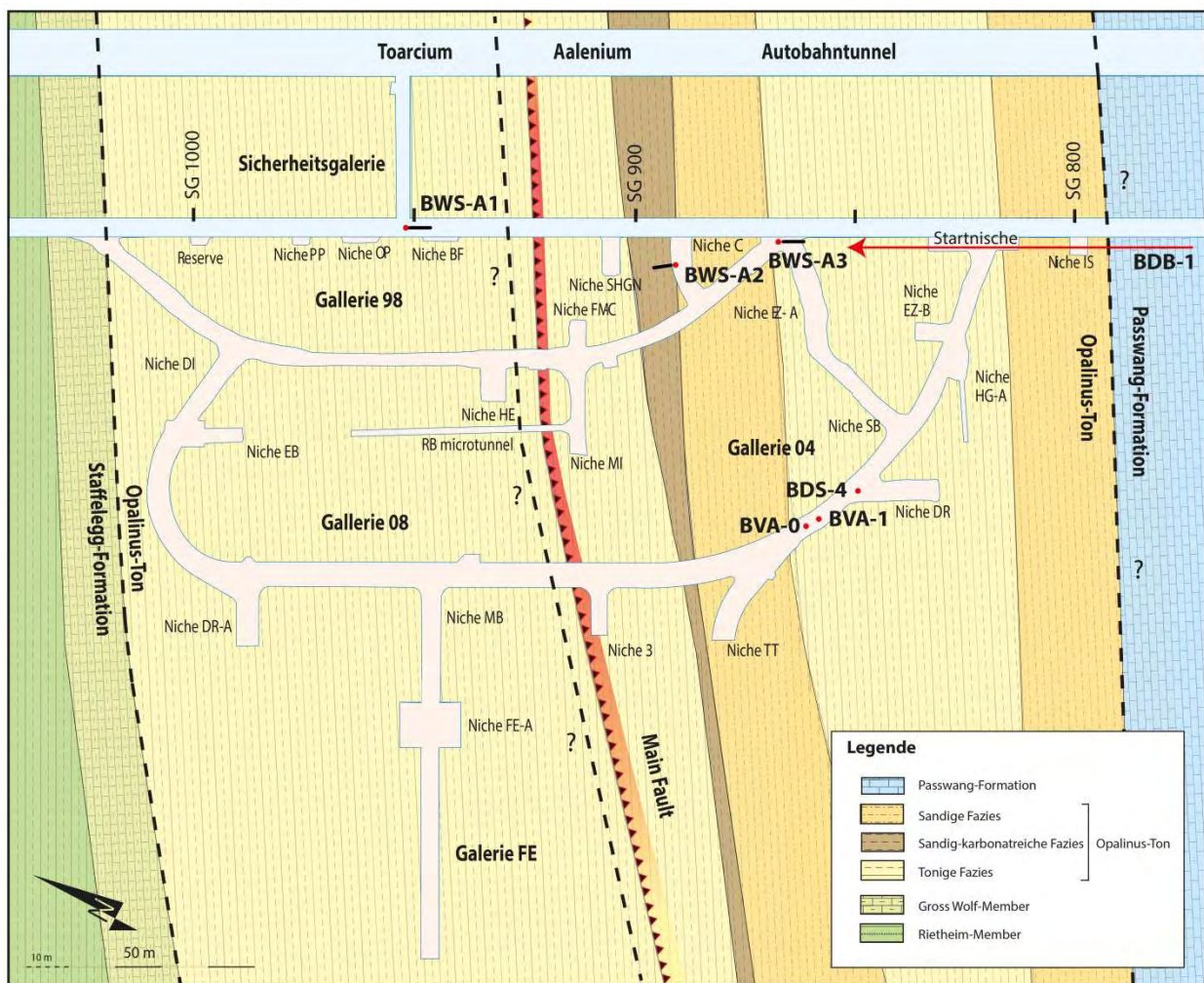
Durch diese neuesten Untersuchungen konnte die obige Unterteilung noch weiter verfeinert werden (**Tabelle 1**). Beim sandigen Abschnitt SG869 – 900 Meter lässt sich an der Basis eine karbonatreiche Fazies von SG890 – 900 Meter ausscheiden. Zudem lässt sich aufgrund biostratigrafischer Kriterien der tonige fossilreiche Abschnitt von SG900 – 1024 Meter bei etwa SG930 in einen ammonitenreichen oberen Teil (Aalenian) und einen biodetritusreichen unteren Teil (Toarcium) gliedern. Damit sind total 6 lithologisch unterscheidbare Faziestypen vorhanden.

Tabelle 1: Gliederung des Opalinus-Ton und der angrenzenden Formationen im Felslabor Mont Terri verändert gemäss neuesten Daten (Hostettler et al., 2014 in Vorbereitung) aus der Bohrung BDB-1 und aus Aufnahmen von Schaeren & Norbert, 1989 und Bläsi et al., 1996. Die drei Haupt-Lithofaziestypen (gelb, grau, blau) können weiter unterteilt werden. Dies ergibt schliesslich sechs lithologisch unterscheidbare Faziestypen. Die untere tonige Fazies ist dabei biostratigrafisch in einen oberen Teil Aalenium, bzw. einen unteren Teil Toarcium unterteilt. Die Galerie-Meter (GM) entlang der Sicherheitsgalerie (SG) sind zwischen 50° im Dach und 35° an der Basis zur Schichtung orientiert. Die Mächtigkeiten senkrecht zur Schichtung ergeben sich aus der Bohrung BDB-1 und beträgt für den Opalinus-Ton 131 Meter. In der Passwang-Formation konnten nur das Sissach-Member und das Brüggli-Member klar identifiziert werden. Dazwischen liegen Gesteine, welche nicht der Aufteilung in Member gemäss Burkhalter (1996) entsprechen.

Stufe	Formation	Member/Faziestyp im Opalinus-Ton (Hostettler et al., 2014 in Vorbereitung)	GM entlang SG (Bläsi et al., 1996)	Tiefenlage/ Mächtigkeit BDB-1 (Hostettler et al., 2014 in Vorbereitung)	Beschreibung
Bajocium	Hauptrogenstein	(oben mit Rothenfluh-Mb.?) Fazies mit Ooiden und Onkoiden	-	0-37 m	Korallenführende, oolithische Kalke mit fossilreichen mergeligen Abschnitten im oberen Teil
		Brüggli-Mb.	-	37-57 m	Sandkalke, oben eisenoolithisch
	Passwang-Formation	Passwang-Formation nicht spezifiziert	-	57-95 m	Sandkalke/Mergel-Wechselagerung mit Eisenoolithen
Sissach-Mb.		781-ca. 795 m	95-106 m	Siltige Tonsteine und Mergel mit Lagen von Siltstein, Kalk und Eisenoolith	
Aalenium	Opalinus-Ton	Sandige Fazies	ca. 795-835 m	106-135 m 29 m	Siltige Tone und Mergel mit Siltsteinlinsen
		Tonige Fazies	835-869 m	135-170 m 35 m	Tonsteine
		Sandige Fazies	869-890 m	170-184 m 14 m	Mergelige Siltsteine und siltige Tone mit Siltsteinlinsen und -lagen
		Sandige karbonatreiche Fazies	890-900 m	184-190 m 6 m	Siltige Kalke, mergelige Siltsteine und siltige Tonmergel
		Tonige Fazies (Aalenium?)	900-930 m	190-(202?) m 12 m ?	Siltige Tonsteine und siltige Tonmergel, reich an Ammoniten
		Tonige Fazies (Toarcium)	930-1024.5 m	(202?)-237 m 35 m ?	Leicht siltige Tonsteine und Tonmergel, reich an Muschelschill
Toarcium	Staffellegg-Formation	Gross Wolf-Mb.		237-243 m 6 m	Wechselagerung aus Kalkmergel und Ton
		Rietheim-Mb.		243-248 m	Schwarze bituminöse Schiefer

Die Unterscheidung in drei Haupt-Lithofaziestypen wurde bis heute beibehalten und ist auch in den Horizontalschnitt des Felslabors eingeflossen (**Figur 2**). Jüngste Schwierigkeiten bei der Abgrenzung der Lithofaziestypen im Labor haben deutlich gemacht, dass i) im Opalinus-Ton nicht nur eine vertikale, sondern auch eine laterale Heterogenität zu verzeichnen ist und ii) die teils fliessenden Übergänge zwischen den einzelnen Lithofaziestypen in Übergangsbereichen zu Schwierigkeiten in der lithostratigrafischen Ansprache des Gesteins führen.

Ein Teil, von GM781-795 mit Kalken und Eisenoolithen, welche Bläsi et al. (1996) dem Opalinus-Ton zugeschlagen hat, ist vermutlich noch dem Sissach-Member der Passwang-Formation zuzuordnen. Zudem kann im unteren Teil der unteren sandigen Fazies von GM890-900 zusätzlich eine karbonatreiche Fazies ausgeschieden werden. Die genauen Mächtigkeiten der Member oberhalb und unterhalb des Opalinus-Ton, sowie die exakte Grenzziehung Toarcium-Aalenium in der Bohrung BDB-1 sind noch in Untersuchung (Hostettler et al., 2014 in Vorbereitung). Auf dem Horizontalschnitt des Labors wurde die Grenze Aalenium-Toarcium wenige Meter unterhalb, im Liegenden der Main Fault festgestellt. Der Verschiebungsbetrag der Main Fault wird auf einige Meter geschätzt und hat somit auf den Verlauf der stratigrafischen Grenzen nur einen geringfügigen Einfluss.



Figur 2: Geologischer Horizontalschnitt durch das Felslabor Mont Terri. Der Horizontalschnitt zeigt die Verteilung der drei Haupt-Lithofaziestypen im Opalinus-Ton, tonige Fazies, sandige Fazies und sandig-karbonatreiche Fazies. Die Fragezeichen sollen die Unsicherheiten bei der Extrapolation verdeutlichen. Die gestrichelten Linien markieren den vermuteten ungefähren Verlauf der Grenze Aalenium – Toarcium, sowie die vermutete Grenze zwischen Opalinus-Ton und Passwang-Formation (siehe auch **Tabelle 1**). Zudem sind die wichtigsten im Kapitel erwähnten Bohrungen und Nischen angegeben.

Über die stratigrafische Kolonne verteilt können am Mont Terri ca. 63% der tonigen, 33% der sandigen und ca. 4% der sandig-karbonatreichen Fazies zugeordnet werden. Die Mächtigkeiten der einzelnen Abschnitte können der zweitletzten Spalte der **Tabelle 1** entnommen werden. Während der Übergang zwischen der sandig-karbonatreichen Fazies zur tonigen Fazies sehr scharf ist und auch durch einen typischen Hartgrund mit Zentimeter-grossen Pyritkonkretionen ausgebildet ist, sind die Übergänge zwischen sandiger und sandig-karbonatreicher und auch sandiger und toniger Fazies gradueller Natur und daher weniger eindeutig abgrenzbar. Generell wird am Handstück der Übergang von der tonigen zur sandigen Fazies mit dem gehäuftem Auftreten von Siltlinsen und Siltlagen und einem muscheligen Bruch definiert. Der Übergang von der sandig-karbonatreichen zur sandigen Fazies wird mit dem Erstauftreten von Zentimeter bis Dezimeter dicken durchgehenden biodetritischen Karbonatbänken definiert. Generell handelt es sich bei der so definierten sandig-karbonatreichen Fazies um eine nur wenige Meter mächtige Einheit, welche im Osten des Labors etwas mächtiger ist als im Westen. Diese Mächtigkeitschwankung dürften jedoch aufgrund der neuesten Daten aus den Bohrungen BVA-1, BDS-4 und der BDB-1 auf die schwierige Abgrenzung zwischen sandiger und karbonatreicher Fazies zurück zu führen sein. Geringe tektonische oder auch sedimentäre Einflüsse auf Verlauf und Mächtigkeit der Faziestypen können dennoch nicht ganz ausgeschlossen werden. Auf Laborskala (Dekameter bis Hektometer) ist die laterale Variabilität jedoch gering. Hingegen werden auf kleineren Skalenbereichen klare Einflüsse tektonischer und sedimentärer Natur festgestellt. So z.B. Variationen der Schichtneigung, Linsen aus Silt- und Karbonatknollen und Linsen aus biodetritischem Material. Dabei haben die Variationen der Schichtneigung mutmasslich den grössten Einfluss. Solche wurden in mehreren Bohrungen festgestellt (BVA-0, BVA-1 und BDS-4), sowie in einem Aufschluss im Übergang Sicherheitsgalerie/Galerie 98, wo die Schichtungsneigungen sich lokal um teils bis zu 45° geändert haben. Aufgrund der Geometrie könnte es sich dabei um frühe postsedimentäre Deformationen im noch jungen, unverfestigten Sediment handeln. Die Neigungsänderungen in den benachbarten Bohrungen BDS-4 und BVA-1 scheinen sich korrelieren zu lassen und würden auf ursprünglich steil stehende Abschiebungen hindeuten. Synsedimentäre differenzielle Subsidenz bei der Entstehung des Opalinus-Ton wurde auch in Wetzler & Allia (2003) postuliert. Dabei wurden während der Sedimentation des Opalinus-Ton präexistierende Verwerfungen im Untergrund reaktiviert, was zur Entstehung einer leichten Topografie des Meeresbodens in flache Senken und Hochzonen führte. Eine weitere Möglichkeit wären Z-Vergenzen im Südschenkel der Mont Terri Antiklinale. Aufgrund der momentanen Aufschlussverhältnisse und des vorhandenen Kernmaterials sind keine definitiven Schlussfolgerungen möglich.

Auf der Laborskala können die drei Haupt-Lithofaziestypen seitlich ziemlich gut korreliert werden. So scheint sich für die grösseren kartierbaren Einheiten auf Meter- bis Dekameterskala die schichtparallele Variabilität in Grenzen zu halten. Aus dem Horizontalschnitt in **Figur 2** ist jedoch ersichtlich, dass die Mächtigkeit, insbesondere der karbonatreichen Fazies gegen Westen hin abnimmt. Diese Abnahme ist mutmasslich das Resultat unterschiedlicher Abgrenzungen der oben erwähnten graduellen Übergänge.

Nachfolgend werden die drei Lithofaziestypen kurz beschrieben (siehe auch **Tabelle 1** und **Tabelle 2**, sowie **Figur 2** und **Figur 8**).

Tonige Fazies

(diverse Aufschlüsse im Labor, ca. 63% Anteil am Opalinus-Ton Mont Terri):

Bei der tonigen Fazies handelt es sich generell um eine sehr homogene Fazies mit ausgeprägter Schichtungsanisotropie und mit einem hohen Anteil an Tonmineralien (28-93%) sowie geringeren Anteilen von Quarz (10-32%) und Kalzit (4-29%) (**Tabelle 2**). Pyrit macht im Gestein ca. 1.1% aus und ca. 0.8% beträgt der Anteil an organischem Kohlenstoff (Bossart & Thury, 2008). Sporadisch ist das Gestein von elongierten Linsen mit höherem Silt- oder Biodetritusanteil (v.a. Akkumulationen von Bivalven-Schalen) durchzogen. Diese Linsen sind

generell nur schwach ausgebildet und maximal über wenige Meter verfolgbar. Die tonige Fazies über der karbonatreichen Fazies ist von den Fossilien her ziemlich steril. Der mächtigere untere Abschnitt stammt vorwiegend aus dem Toarcium und ist fossilreicher ausgebildet, mit vielen Muschelschalen, v.a. Bositra Buchi (Reisdorf et al, 2014). Der Karbonatgehalt ist daher geringfügig höher. Die Homogenität der tonigen Fazies zeigt sich auch in den sehr konstanten Werten bei Gamma- und Widerstandslogs (Brauch, 2014). Im Übergangsbereich zur sandig-karbonatreichen Fazies können auf der Laborskala zwei knollige Markerhorizonte aus Pyrit beobachtet werden. Der obere, meist linsig ausgebildete Markerhorizont liegt direkt an der markanten Grenze zur karbonatreichen Fazies. Der untere Horizont liegt ca. 5 Meter darunter in der tonigen Fazies. Er wurde vor allem bei diversen Bohrungen aus der MI-Nische jeweils angetroffen. Es handelt sich dort um eine ca. 1 Zentimeter dicke Pyritlage mit einer knolligen Oberfläche. Es muss an jenen Stellen während der Sedimentation zu einer verstärkten Akkumulation von organischem Material gekommen sein, welches dann frühdiagenetisch die Bildung von Pyriten ermöglichte.

Fazit:

Die Homogenbereiche in der tonigen Fazies liegen im Meter- bis Dekameterbereich. Die Abgrenzung zu den sandigen Lithofaziestypen ist hingegen unscharf.

Sandige Fazies

(Aufschluss in der TT-Nische, ca. 33% Anteil am Opalinus-Ton Mont Terri):

Bei der sandigen Fazies handelt es sich um eine sehr heterogene Fazies mit sehr hohen Anteilen an Quarz (bis 52%) und Karbonat (bis 66%) (**Tabelle 2**) (Peters et al., 2011). Generell zeugt das Gestein von erhöhtem kontinentalem Einfluss. Gemäss Müller & Jaeggi (2012) handelt es sich um ein stark bioturbirtes Sediment, wo die ursprüngliche Lamination nur an wenigen Stellen noch vorhanden ist. Rippelmarken zeugen von einem energetischen Milieu an der Sturmwellenbasis oder knapp darunter. Durch die erhöhte Wellenenergie ist es zu einer Sortierung und Aufarbeitung gekommen, was generell trotz Bioturbation zu einer deutlichen Anisotropie führte. Meist handelt es sich bei den Rippeln um sogenannte Hungerrippeln, ein deutliches Zeichen für ein beschränktes Angebot an Siliziklastika. Die ursprüngliche Hypothese, dass es sich beim Aufschlussprofil in der TT-Nische um einen Dachbankzyklus gemäss Wetzel & Allia (2003) handelt, konnte nicht bestätigt werden. Ein Trend von nach oben gröber werdenden Zyklen im 4-8 Meter Bereich konnte am Mont Terri bisher nicht nachgewiesen werden. Generell beschränken sich die sandigen Abschnitte des Opalinus-Ton am Mont Terri aber auf die obere Hälfte der Formation. Im Dekameterbereich ist somit ein Trend hin zu nach oben gröber werdendem Sediment feststellbar.

Müller & Jaeggi (2012) haben aufgrund von detaillierten Kartierungen und Dünnschliffanalysen in der TT-Nische des Felslabors Mont Terri die sandige Fazies in vier weitere Subfaziestypen unterteilt (**Figur 3**). Bei der sandigen Fazies aus der TT-Nische handelt es sich um die untere sandige Fazies von GM869-890, bzw. in Bohrung BDB-1 von 170-184 Meter (**Tabelle 1**). Die Detailkartierung in der TT-Nische ist in **Appendix 2** enthalten.



Figur 3: Die vier Subfaziestypen der sandigen Fazies aus der TT-Nische (Peters et. al., 2011; Müller¹ & Jaeggi, 2012). Der rote Balken rechts gibt die Grenzen der vier Subfaziestypen wieder. Die farbige Fläche wurde grob kartiert und die nummerierten Quadrate (40x40 cm) wurden feinkartiert. Die weiss umrahmten Quadrate markieren repräsentative Ausschnitte aus den verschiedenen Subfaziestypen und werden unten im Text detailliert beschrieben. Die Subfaziestypen A und D verlaufen ausserhalb des kartierten Bereichs weiter. Die Kreise bezeichnen Probennahmestandorte.

A: Sandige Fazies mit Lamination aus Silt- und Tonlagen

Dieser Subfaziestyp besteht aus dunklen laminierten Tonlagen mit meist nicht kontinuierlichen Siltlinsen, die bis einige Millimeter dick sind (**Figur 4**). Dünnere Hungerrippeln folgen aufeinander und bilden daher keine durchgehenden Lagen. Vereinzelt sind in Linsen grössere Echinodermenfragmente vorhanden. Die Matrix besteht hauptsächlich aus Ton, ist fein laminiert und daher stark anisotrop. Gegen oben hin nehmen stark elongierte karbonatische Linsen aus Echinodermenfragmenten zu. Diese können teils über die ganze Aufschlussbreite von ca. 2 Meter verfolgt werden. Zu erwähnen ist eine bis zu 8 Millimeter dicke Siltlage, wel-

¹

che mit wenigen Unterbrüchen über die ganze Breite des Aufschlusses kartierbar ist. Die Lamination deutet auf relativ ruhige Ablagerungsverhältnisse hin, eine leichte Strömung muss jedoch immer vorhanden gewesen sein. Schieber (2011) konnte zeigen, dass die Lamination von Silt- und Tonlagen im Labor reproduzierbar ist und durch Flokkulierung der Tonminerale (Bildung von Aggregaten) erklärt werden kann. Durch die Bildung von Aggregaten verhält sich der Ton hydraulisch ähnlich, wie die Siltkörner, was zu den beobachteten Sedimentstrukturen führt.

B: Sandige Fazies mit Lagen aus bioklastischen Karbonaten

Bei diesem Subfaziestyp handelt es sich um einen Abschnitt mit bis zu mehreren Zentimeter dicken Bänken oder elongierten Linsen (grösser als 4 Meter Länge) aus bioklastischem Kalkstein (**Figur 5**). Diese unregelmässigen, teils knolligen Karbonatlagen sind sehr grobkörnig, bestehen hauptsächlich aus Bruchstücken von Echinodermen und Bivalven bis 5 Millimeter Grösse und lassen sich über den gesamten Aufschluss hinweg korrelieren. Hingegen ist die Korrelation zu den 30-40 Meter entfernten Bohrungen BVA-0, BVA-1 und BDS-4 nicht möglich. Die Korrelationslänge für diese Karbonatlagen beträgt einige Meter bis maximal 20 Meter. An der Unterseite solcher Karbonatlagen sind Strömungsmarken beobachtbar, welche ein Energiemilieu innerhalb der Sturmwellenbasis anzeigen. Die scharfen Übergänge an der Basis von solchen Karbonatlagen deuten auf Erosion hin. Die groben Echinodermenbruchstücke stammen von nahegelegenen Hochzonen, welche bei Sturmereignissen in flache Becken transportiert worden sind (Wetzel & Meyer, 2006). Dort wurden diese Bioklastika weiter aufgearbeitet und sortiert. Dieser Subfaziestyp repräsentiert daher das höchste energetische Milieu innerhalb der sandigen Fazies. Generell ist dieser Subfaziestyp sehr heterogen ausgebildet und die Entnahme von repräsentativen Proben auch infolge der akzentuierten Kompetenzunterschiede zwischen karbonatischen und tonigen Lagen nur bedingt möglich.

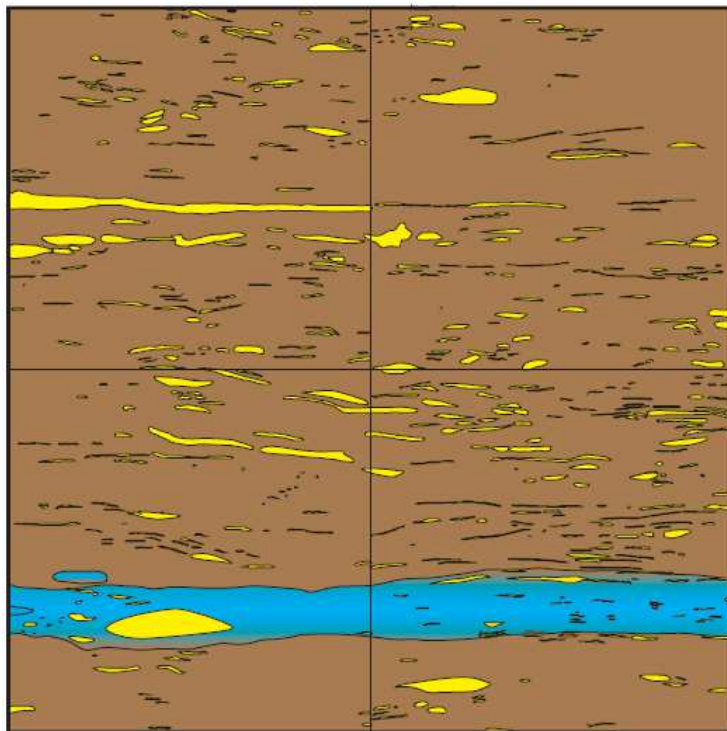
C: Sandige Fazies, bioturbierter toniger Siltstein bis siltiger Tonstein

Dieser Subfaziestyp kann in der TT-Nische auf einer Länge von 2.2 Meter beobachtet werden. Die Grenze zum Typ D ist graduell. Generell handelt es sich um einen relativ homogenen grauen Ton mit hohem Siltgehalt in der Matrix. Dieser hohe Siltgehalt in der Matrix bei verringerter Anisotropie führt zu einer grösseren Festigkeit verglichen mit dem Subfaziestyp A. Auf den ersten Blick ist das Gestein homogen und isotrop. Bei genauerem Hinsehen kann man hingegen eine klare Zyklizität von sandreicheren und sandärmeren Lagen alle 15-20 Zentimeter feststellen (**Figur 6**). Selbst innerhalb von tonigen Lagen sind kleine Rippeln aus reinem Silt vorhanden, welche offenbar aufgrund der Flokkulierung der Tonminerale (Schieber, 2011) im gleichen energetischen Milieu koexistieren können. Dickere Linsen treten eher im sandreicheren Ton auf und sind meist das Resultat von Sortierungseffekten durch Bioturbation. Die ursprüngliche Lamination ist dort oft nur noch reliktsch sichtbar. Die Grenzflächen zwischen tonigen und siltreichen Abschnitten sind oft unregelmässig geformt und unduliert. Dieser Subfaziestyp repräsentiert ein ruhiges Milieu mit geringer Energie und liegt klar unterhalb der Sturmwellenbasis. Bioturbation hat die ursprüngliche Lamination grösstenteils verwischt.

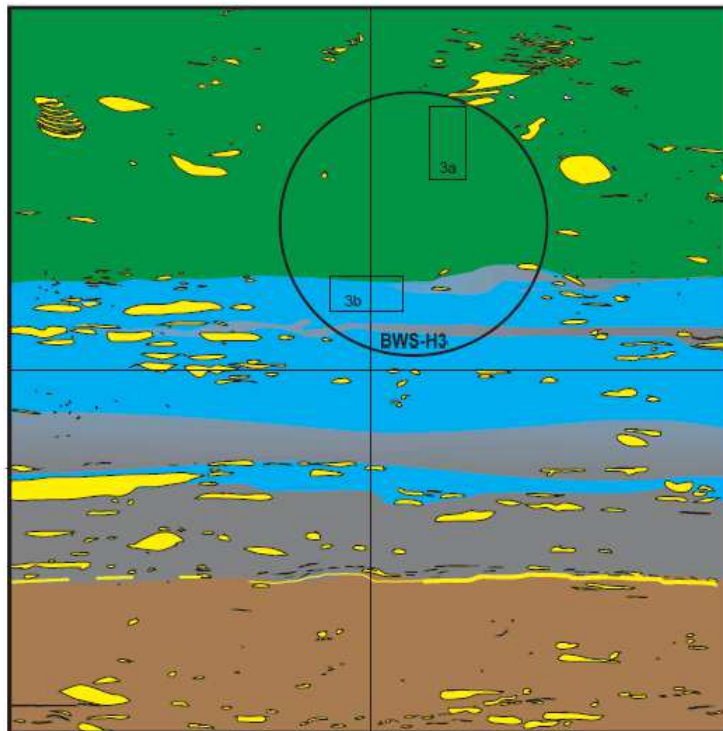
D: Sandige Fazies, Ton-Silt Wechsellagerung

Bei diesem Subfaziestyp ist eine stark ausgeprägte Zyklizität vorhanden (**Figur 7**). Diese zeigt sich in einer Wechsellagerung aus siltigem Ton oder tonigem Siltstein mit durchgehenden dunklen, tonreichen, bzw. quarzarmen Lagen von 1-3 Zentimetern Dicke. Innerhalb eines Zyklus von 5-20 Zentimeter Mächtigkeit nimmt der Siltgehalt nach oben hin zu, das Sediment wird nach oben hin gröber. Belastungsmarken, nicht zu verwechseln mit Rippeln, sind

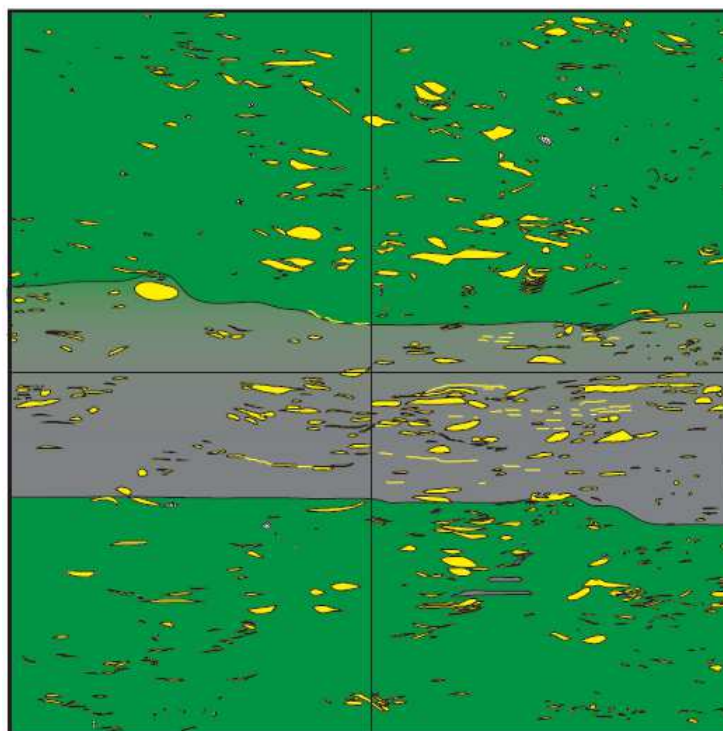
häufig. Zwischen den quarzarmen, dunklen Lagen liegen quarzreiche, bioturbirte Tone. Die Bioturbation führt zu charakteristischen dicken Linsen, welche dem Gestein eine knötchenartige Textur geben. Die Schichtung ist klar erkennbar und das Gestein weist eine deutliche Schichtungsanisotropie auf. Die tonreichen Schichten lassen sich über die gesamte Aufschlussbreite von 4 Meter verfolgen. Im siltigen Ton sind millimeterdicke Lagen (stark elongierte Linsen) aus reinem Silt häufig. Diese Siltlinsen erreichen jedoch maximal 1 Meter Länge. Der Übergang zum Subfaziestyp C ist graduell. Generell dürften sich die beiden Subfaziesbereiche C und D beim energetischen Milieu nicht gross unterscheiden, jedoch ist die Zyklizität von sandigeren und tonreicheren Sedimenteinträgen beim Subfaziestyp D ausgeprägter. Dies könnte auf zyklisch wechselnde Strömungsrichtungen zwischen kontinentalem und marinem Sedimenteintrag hindeuten. Diese Zyklizitäten und deren Interpretation werden momentan von einem MSc-Studenten der Universität Fribourg anhand von Bohrkernen aus dem Felslabor Mont Terri genauer untersucht.



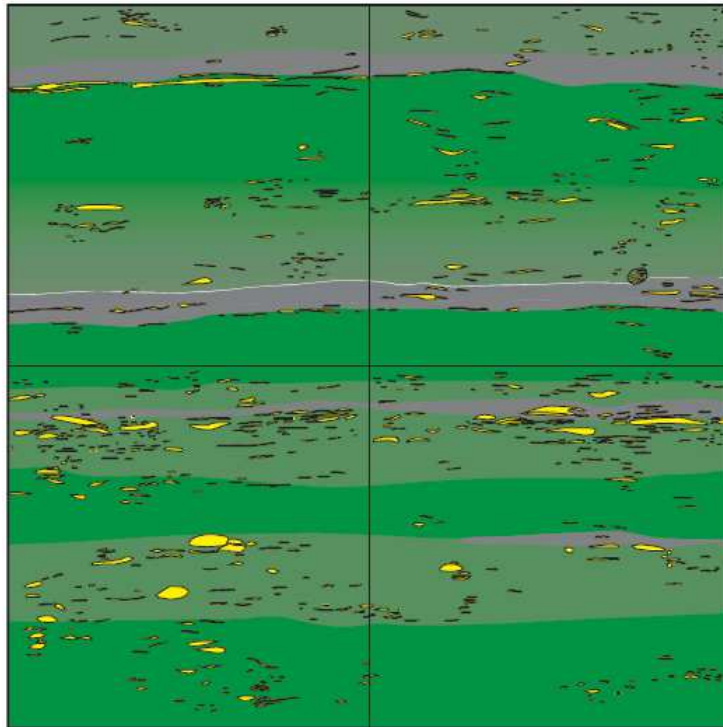
Figur 4: Detailkartierung No4 (siehe **Figur 3**), Bildbreite ist 40 cm, bioklastischer Kalk (blau), dunkler, sandarmer Ton (braun) und Siltlagen und Siltlinsen (gelb) (Müller & Jaeggi, 2012). Die erwähnte auffällige Siltlage ist auf der Detailkartierung in diesem Abschnitt nicht kontinuierlich und daher nicht erkennbar.



Figur 5: Detailkartierung No2 (siehe **Figur 3**), Bildbreite ist 40 cm, bioklastischer Kalk (blau), dunkler, sandarmer Ton (braun), Siltlagen und Siltlinsen (gelb), sandreicher Ton (grün) und dunkle, graphitische Tone (grau). Der Kreis markiert den Umriss einer Bohrung und die Rechtecke zeigen die Entnahmepunkte von Dünnschliffen an (Müller & Jaeggi, 2012).



Figur 6: Detailkartierung No5 (siehe **Figur 3**), Bildbreite ist 40 cm, Siltlagen und Siltlinsen (gelb), sandreicher Ton (grün) und dunkle, graphitische Tone (grau) (Müller & Jaeggi, 2012).



Figur 7: Detailkartierung No10 (siehe **Figur 3**), Bildbreite ist 40 cm, Siltlagen und Siltlinsen (gelb), sandreicher Ton (grün) und dunkle, graphitische Tone (grau) (Müller & Jaeggi, 2012).

In der sandigen Fazies sind auf Dünnschliffskala (2x3.5 cm) Quarzgehalte von bis zu 50% keine Seltenheit, jedoch sind die Quarz- und auch die Karbonatgehalte auf der Dünnschliffskala sehr heterogen verteilt und konzentrieren sich auf bestimmte Lagen und Zonen. Gemäss Gschwind (2013) lassen sich mit Dünnschliffen und selbst mit Probenzylindern von 51 Millimeter Durchmesser und 120 Millimeter Länge kaum repräsentative Proben entnehmen, da die repräsentativen Skalenbereiche (Homogenbereiche) im Dezimeter bis Meter-Bereich liegen. Zudem ist auch die laterale Variabilität in der sandigen Fazies beträchtlich. Eine Korrelation der Subfaziestypen aus der TT-Nische und den Bohrungen BVA-1, resp. BDS-4 mit Abständen von 30 bzw. 40 Meter erwies sich als sehr schwierig bis unmöglich.

Kurz & Buckley (2012) führten eine Reihe von Hyperspektral-Scans im Felslabor Mont Terri durch. So auch in der sandigen Fazies der TT-Nische mit dem Resultat, dass sowohl die von Auge kartierbaren mineralogischen Variabilitäten als auch die sehr heterogene Verteilung von karbonatischen Zementen abgebildet wird. Jedoch ist bei der Methode die Kalibration des reflektierten Lichtspektrums mit der Mineralogie nicht ganz einfach und insbesondere bei rauen Oberflächen, welche mit Staub und Spritzbetonresten verunreinigt sind, mit grossen Unsicherheiten behaftet. Ein Vergleich mit der Detailkartierung (Müller & Jaeggi, 2012) zeigte nur eine mässige Übereinstimmung. Eine fleckenhafte Ausbildung von karbonatischen Zementen aus den Scans scheint von der Genese her wenig wahrscheinlich. Die Methode zur Abschätzung der Variabilität an Aufschlüssen und Bohrkernen mittels Hyperspektral-Scans wird im Moment im Rahmen des VA (Variability of Opalinus Clay) Experiments weiterentwickelt und verbessert.

Fazit:

Die Homogenbereiche liegen in der sandigen Fazies im Dezimeter- bis Meterbereich. Daher ist es bei dieser Fazies schwierig, repräsentative und vor allem vergleichbare Proben zu gewinnen. Bereits auf diesen Skalen können unterschiedliche Subfaziestypen abgegrenzt werden.

Die Abgrenzung zu den tonigen Abschnitten und insbesondere zur sandig-karbonatreichen Fazies ist unscharf.

Sandig-karbonatreiche Fazies**(Aufgeschlossen in Fenstern der Galerie 98, diverse Bohrungen, ca. 4% Anteil am Opalinus-Ton Mont Terri):**

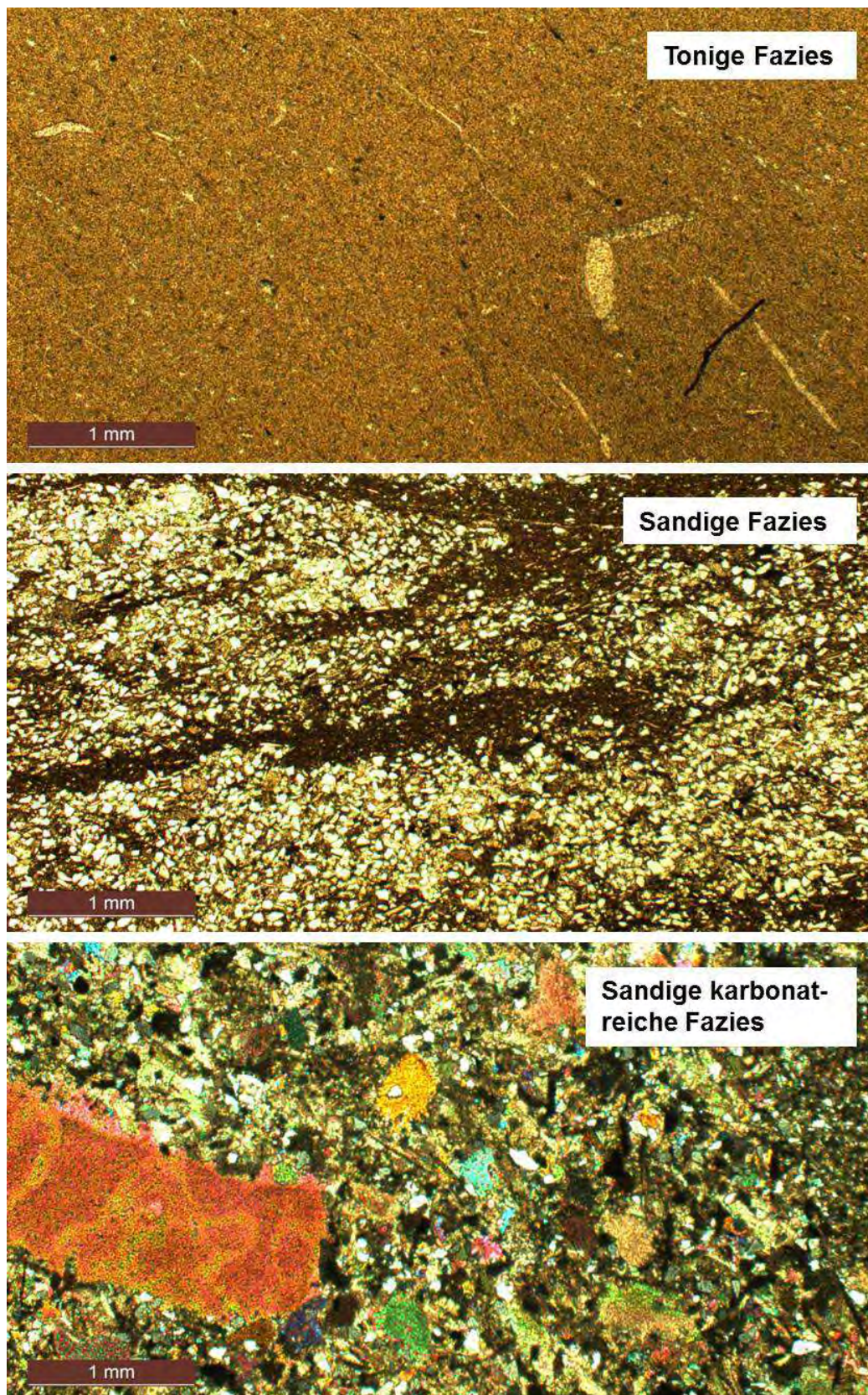
Aus dieser Fazies gibt es nur wenige Untersuchungen. Dies dürfte insbesondere an der schwierigen Entnahme von repräsentativen Proben aus dieser eher „exotischen“ Fazies liegen. Zudem macht diese Fazies am Mont Terri nur ca. 4% der gesamten stratigrafischen Kolonne des Opalinus-Ton aus und in den potentiellen Standortgebieten der Nordschweiz ist diese Fazies nicht dokumentiert. Die sandig-karbonatreiche Fazies zeichnet sich am Mont Terri durch hohe bis sehr hohe Karbonatgehalte und hohe Quarzgehalte aus. So wird der ca. 4-5 Meter mächtige basale Abschnitt von mehreren biotritischen Karbonatbänken von 10 Zentimeter Mächtigkeit durchzogen. An der Basis bildet ein markanter Kondensationshorizont mit Pyritknollen oder einer Zentimeter-dicken Pyritlage den Abschluss zur tonigen Fazies. Gegen oben hin ist die Abgrenzung unscharf. So gehen nach ca. 4-5 Meter die Karbonatbänke in biotritische Linsen über. Der Karbonatgehalt bleibt aber insgesamt hoch, was auch durch jüngste Untersuchungen an der BDB-1 Bohrung belegt wird. Dort bleibt der API (American Petroleum Index) beim Gamma-Log konstant tief auf 70 API zwischen 175 und 190 Meter Tiefe (**Figur 1**), währendem in der sandigen hangenden Fazies und in der tonigen liegenden Fazies konstant Werte von 100 API gemessen werden (Brauch, 2014). Die Resultate aus der BDB-1 Bohrung werden voraussichtlich zu einer Zweiteilung der sandig-karbonatreichen Fazies in einen oberen Teil, mit erhöhtem Karbonatanteil in Zentimetermächtigen Linsen, und einem unteren Teil mit bis zu 10 Zentimeter dicken kontinuierlichen Lagen führen. Neben der vertikalen Heterogenität ist auch eine laterale Heterogenität feststellbar. Eine Korrelation der intrafaziellen Grenzen zwischen den beiden benachbarten Bohrungen BVA-1 und BDS-4 erwies sich auch über eine Distanz von nur 10 Meter als nicht machbar.

Fazit:

Die Homogenbereiche liegen bei der sandig-karbonatreichen Fazies im Zentimeter- bis Dezimeterbereich. Da auch die Bankung in diesem Bereich liegt, ist es schwierig, bei diesem Faziestyp repräsentative Proben zu entnehmen. Die Abgrenzung zur sandigen Fazies im Hangenden ist unscharf.

Tabelle 2: Die mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Lithofaziestypen in Gewichts-%, (beste Schätzungen), nach 1) Thury & Bossart (1999), Bossart & Thury (2008), ergänzt mit Daten von 2) Peters et al. (2011) für die sandige Fazies und Daten aus 3) Nagra (2001) für die Bohrung Benken. Die Anzahl der Messwerte ist, wo vorhanden, in Klammern angegeben.

Mineralfraktion	Mont Terri			Bohrung Benken	
	Tonige Fazies ¹⁾ (16)	Sandige Fazies ²⁾ (23)	Sandig-karbonat-reiche Fazies ¹⁾ (4)	Tonige Fazies ³⁾ (13)	Karbonatische Fazies ³⁾ (3)
Tonmineralien	28-93	6-62	8-30	52-67	23-41
Quarz	10-32	21-52	22-36	12-25	19-27
Kalzit	4-29	7-66	33-49	9-17	21-52
Tonmineralphasen	Illit, Illit-Smektit-Mixed Layers, Chlorit, Kaolinit				
Karbonatphasen	Kalzit, Dolomit, Ankerit, Siderit				
Weitere Mineralien	Feldspat, Coelestin, Barit, Pyrit und organisches Material				



Figur 8: Die drei verschiedenen Lithofaziestypen im Opalinus-Ton des Felslabors Mont Terri. In der tonigen Fazies dominieren die Tonmineralien und eingeregelter Biodetritus. In der sandigen Fazies sind Quarzkörner in Siltfraktion dominierend. In der sandig-karbonatreichen Fazies sind neben viel Quarz und Kalzit auch Millimeter-grosse Bruchstücke von Echinodermen, hauptsächlich Crinoiden vorhanden.

Tektonische Variabilität:

Das Felslabor Mont Terri liegt im nach SSE einfallenden Südschenkel der Mont Terri Antiklinale. Während im Süden des Labors das Schichteinfallen ca. 50° beträgt, nimmt es gegen Norden und im Kern der Antiklinale hin auf ca. 30° ab. Aufgrund der tektonischen Situation am Mont Terri, wo die Hauptphase der Jurafaltung im mittleren Miozän vor ca. 12 Ma eingesetzt hat (Kälin, 1993; Bollinger et al., 1993), ist der Opalinus-Ton hier von zahlreichen Brüchen durchzogen. Es werden am Mont Terri drei Hauptbruchsysteme beobachtet (Nussbaum et al., 2011; siehe auch **Appendix 3**). Es sind dies:

i) SSE-einfallende Brüche, welche generell parallel oder sub-parallel zur Schichtung verlaufen: Diese Brüche sind sehr häufig und können in gewissen Abschnitten alle 10 Zentimeter beobachtet werden. Jedoch ist gemäss Nussbaum et al. (2011) nur mit geringen Bewegungen im Zentimeter-Bereich zu rechnen. Brüche mit grösseren Bewegungen treten ca. alle 10 Meter auf. Insbesondere diese Brüche können auch steiler einfallen als die Schichtung. Es wurden Neigungen bis 70° beobachtet, es handelt sich dabei um sogenannte „ramp-flat“ Strukturen. Bei der Main Fault, welche ebenfalls zu dieser Gruppe gehört, wird ein Verschiebungsbetrag von zwei bis maximal zehn Meter angenommen. Bruchzonen wurden in der BDB-1 Bohrung mehrere angetroffen, jedoch nur eine, welche mit der „Main Fault“ vergleichbar ist. Das Gestein ist dort stark tektonisiert und es treten S-C Strukturen auf. Zudem sind insbesondere die felsmechanische Festigkeit und die Kohäsion stark reduziert.

ii) Flach nach SW-einfallende Brüche: Diese weniger häufig auftretenden Brüche sind flach bis sub-horizontal orientiert und insbesondere bei Tunnelexkavationen wegen Niederbrüchen besonders zu beachten. Ihre Oberflächen weisen oft millimeterdicke Mineralbeläge aus Kalzit auf (Nussbaum et al., 2011). In den Kartierungen zur FE-Nische (Jaeggi et al., 2012) und des FE-Tunnels (Jaeggi et al., 2013) wurden mittlere Abstände dieser Diskontinuitäten von 1 Meter und mehr festgestellt. Auch bei diesen Brüchen werden Offsets im Bereich von nur wenigen Zentimetern angenommen (Nussbaum et al., 2011).

iii) Steile, N-NNE-streichende Brüche: Solche Brüche werden bei Exkavationen und in Bohrungen nur selten angetroffen. Im Felslabor Mont Terri werden sie nur auf Laborskala und damit im Dekameterbereich angetroffen. Über die Verschiebungsbeträge dieser ursprünglichen Abschiebungen, welche später in einem transpressiven System zu Blatterverschiebungen reaktiviert worden sind, werden in Nussbaum et al. (2011) keine Angaben gemacht. Es handelt sich dabei vermutlich um ältere rheintalische Brüche, welche später bei der Jurafaltung reaktiviert worden sind. Die Ausdehnung dieser Systeme liegt jedoch im Meter bis Dekameter-Bereich.

Im Felslabor Mont Terri wurden diese Bruchstrukturen neben der strukturellen Analyse auch auf Mineralisierungen und Porenräume hin untersucht. Die Strukturen sind aufgrund der Mineralisierungen und Füllungen mit Kalzit und Coelestin (SrSO_4) abgedichtet. Untersuchungen der Nanostruktur haben ergeben, dass die Brüche vor allem während der Faltung der Mont Terri Antiklinale mit diesen Mineralien abgedichtet worden sind (Laurich et al., 2014 in Vorbereitung). Dünne lokalisierte Scherzonen mit eingeregelteten, umhüllten Partikeln und nanometrischen Illiten weisen eine Porosität nahe bei Null auf. Zudem führen die quellfähigen Tonmineral-Anteile, wie Illit-Smectit-mixed layers im Opalinus-Ton zur Selbstabdichtung von Diskontinuitäten, so z.B. auch bei der nachfolgend kurz diskutierten Auflockerungszone.

Ausbildung und Ausdehnung der Auflockerungszone (EDZ)

Neben der tektonischen Variabilität muss auch der Einfluss der Auflockerungszone im Felslabor Mont Terri mitberücksichtigt werden. Gemäss Bossart et al. (2002, 2004) kann die Auflockerungszone in eine innere und eine äussere Zone unterteilt werden. Die innere Zone

ist charakterisiert durch Extensionsklüfte parallel zur Tunnelwand und kleinere Scherklüfte, welche gemeinsam ein verbundenes Kluftnetzwerk bis ca. $\frac{1}{2}$ Radius ins Gebirge hinein bilden. Diese Extensionsklüfte entstehen, weil die Tangentialspannungen die Festigkeiten infolge Spannungsumlagerung beim Ausbruch einer Galerie überschreiten. Die äussere Zone ist charakterisiert durch individuelle nicht verbundene Extensionsklüfte, welche bis ca. 1 Radius ins Gebirge angetroffen werden. Bossart & Wermeille (2003b) und Martin et al. (2004) unterscheiden folgende Hauptmechanismen für die Entstehung von induzierten Brüchen: i) mechanisch kontrollierte diskrete Extensionsklüfte oder Entlastungsklüfte entlang der Gesteinsanisotropie, ii) spannungsinduzierte Ausbrüche, wo die Tangentialspannungen entlang einer Galerie oder Bohrung die Festigkeit des Gesteins übersteigen, iii) Gleiten entlang von Schichtflächen und schichtparallelen Brüchen, wenn die Scherfestigkeit überschritten ist.

Je nach Orientierung der Galerie zur Anisotropie ändert die Geometrie und auch Ausdehnung der Auflockerungszone. Gemäss Bossart & Wermeille (2003b) weisen horizontale Galerien oder Bohrungen entlang dem Streichen der Schichtung eine ausgeprägte Auflockerungszone auf. Neben spannungsinduzierten Ausbrüchen sind dort vor allem auch mechanisch induzierte Klüfte vorhanden. Horizontale Galerien senkrecht zum Streichen der Schichtung sind generell sehr stabil. Es treten nur spannungsinduzierte Klüfte an der Sohle und im Firstbereich auf. Bei vertikalen Schächten oder Bohrungen nach unten entstehen dort, wo die Schichtung tangential die Öffnung schneidet, spannungs- und mechanisch induzierte Ausbrüche.

Die Ausdehnung der Auflockerungszone ist skalenabhängig. Bossart et al. (2002) geben die Ausdehnung der Auflockerungszone mit ca. 1 Radius an. So wird in den Galerien mit 4.5 Meter Durchmesser im Labor generell eine Ausdehnung von ca. 2 Meter festgestellt. Jaeggi et al. (2013) haben bei der Kartierung der FE-Galerie eine von der grossen FE-A Nische her stammende mächtige Auflockerungszone bis in eine Tiefe von 7 Meter festgestellt.

Die systematische Kartierung von Galerien hat gezeigt, dass die räumliche Verteilung der Klüfte von natürlichen Brüchen und Bruchzonen beeinflusst wird (Yong et al., 2010), zudem können natürliche Diskontinuitäten durch Spannungsumlagerungen reaktiviert werden (Nussbaum et al., 2011). Neueste Untersuchungen (Thöni, 2013) aus der Galerie 2008 im Mont Terri Felslabor haben gezeigt, dass die Auflockerungszone durch den Einfluss von Bruchzonen stark asymmetrisch ausgebildet sein kann. In Bruchzonen wurde 4-5 Meter in das Gebirge hinein eine Auflockerungszone festgestellt, in der Nähe von Brüchen 2-3 Meter und im intakten Gestein bis in eine Tiefe von ca. 1 Meter.

Generell ist die Berücksichtigung der Auflockerungszone insbesondere bei der Qualifizierung von Labordaten entscheidend. So können Versuche mit Probenmaterial aus der Auflockerungszone beeinflusst sein und somit nicht die Eigenschaften des ungestörten Gesteins wiedergeben. Festigkeiten und auch seismische P-Wellengeschwindigkeiten V_p können stark herabgesetzt und hydraulische Durchlässigkeiten erhöht sein. Es wurde bei der Erfassung der Kennwerte darauf geachtet, nur Versuche mit unbeeinflussten Proben oder Intervallen und damit mit Bohrtiefen grösser als 2 Meter zu berücksichtigen.

2.2 Übertragbarkeit der lithologischen Variabilität auf die potentiellen Standortgebiete

Generell lassen sich die Prozesse aus den Untersuchungen am Mont Terri auf die potentiellen Standortgebiete übertragen. Die Kennwerte aus den Untersuchungen am Mont Terri hingegen lassen im Vergleich zu den Nagra-Bohrungen aus den Standortgebieten nur eine bedingte Übertragbarkeit zu (**Tabelle 3**). Während der Opalinus-Ton an den potentiellen Standortgebieten weitgehend undeformiert ist, sind die Gesteine in der Mont Terri Antiklinale tektonisch deformiert. In Nussbaum et al. (2011) werden die verschiedenen vorhandenen

Bruchsysteme, deren Evolution und Einfluss auf die Ausbildung der Auflockerungszone behandelt. Am Mont Terri werden vor allem in der tonigen Fazies zahlreiche schichtparallele oder subparallele Brüche angetroffen, welche die Festigkeit des Gesteinsverbandes herabsetzen. Aufgrund der Beobachtungen und Erfahrungen aus zahlreichen Bohrungen ist in der sandigen Fazies aufgrund der höheren Gesteinsfestigkeit faktisch keine spannungsinduzierte Auflockerungszone vorhanden und schichtparallele Brüche treten nur sehr sporadisch auf. Es treten dort jedoch ebenfalls mechanisch kontrollierte Ausbrüche, bei Schichtung tangential zur Galerie auf.

Aufgrund der starken Tektonisierung des Opalinus-Ton am Standort Mont Terri sind die Werte bezüglich felsmechanischen und hydraulischen Kennwerten als eher konservativ einzustufen. Man ist daher für Prognoserechnungen bezogen auf die potentiellen Standortgebiete eher auf der sicheren Seite. Zudem werden die genauen standortspezifischen Kennwerte im Rahmen des Sachplanverfahrens sowieso in einem Felslabor mit Testbereich direkt am Standort nochmals genau überprüft. Auch die lithologische Variabilität des Opalinus-Ton am Mont Terri ist mit gewissen Einschränkungen übertragbar. So ist z.B. aus den bekannten Nagra-Bohrungen Riniken, Schafisheim, Weiach (Bläsi, 1987) und Benken (Nagra, 2001) keine exakte biostratigrafische Abgrenzung bekannt und daher kann das Profil am Mont Terri nicht direkt mit den Profilen der potentiellen Standortgebiete korreliert werden. Rein lithostratigrafisch betrachtet ist der Opalinus-Ton am Mont Terri mit 131 Meter mächtiger ausgebildet als an den potentiellen Standortgebieten. Dies gilt auch noch nach Berücksichtigung der tektonischen Verdickungen, welche je nach Annahme eine hypothetische sedimentäre Mächtigkeit zwischen 120 und 130 Meter am Mont Terri ergibt (**Appendix 1**). In den Profilen von Riniken, Weiach und Benken (Nagra, 2001) wird an der Basis von sandarmen, fossilreichen Tonen gesprochen, in welchen viele Ammoniten beobachtet worden sind. Es ist nicht bekannt, dass diese Ammoniten je biostratigrafisch bearbeitet worden wären. Es könnte sich dabei, wie am Mont Terri, ebenfalls um Ammoniten aus dem späten Toarcium handeln.

Lithostratigrafisch sind in allen vier Profilen Mont Terri, Riniken, Weiach und Benken in der oberen Hälfte sandige und teils karbonatreiche Tonserien auszumachen. Im Mont Terri Profil beschränken sich die Karbonatlagen auf die obersten Teile und einen sehr stark ausgeprägten mittleren Teil, die sogenannte karbonatreiche Fazies. Letztere wird weiter im Osten nicht mehr angetroffen. Weiter im Osten sind in der oberen Hälfte des Opalinus-Ton hingegen vereinzelte dünne, meist knollige Karbonatbänke vorhanden. Die jeweilige Mineralogie der tonigen Fazies und auch die der karbonatreichen Fazies ist an den Standorten Mont Terri und der Bohrung Benken vergleichbar (**Tabelle 2**).

Ganz wichtig für die Übertragbarkeit von Daten aus dem generischen Felslabor Mont Terri auf die potentiellen Standortgebiete in den Kantonen Aargau, Solothurn, Schaffhausen und Zürich ist nebst der faziellen Variabilität und tektonischen Situation auch die unterschiedliche Konsolidierung. Mazurek et al. (2008) postulieren für das Zürcher Weinland eine komplexe Versenkungsgeschichte bis maximal 1650 Meter Tiefe und Temperaturen von 85°C. Am Mont Terri zum Vergleich betrug die maximale Temperatur ebenfalls 85°, es werden jedoch zwei Versenkungsstadien angenommen, mit maximalen Tiefen bis zu 1350 Meter (Bossart & Wermeille, 2003a; Mazurek et al., 2006). Die heutigen Tiefenlagen sind zudem mit 550 – 650 Meter am Beispiel Benken (Mazurek et al., 2008) und maximal 320 Meter am Mont Terri auch grundlegend anders. Dies hat einen starken Einfluss auf wichtige petrophysikalische Parameter. So ist an den potentiellen Standortgebieten (Beispiel Bohrung Benken) gegenüber dem Mont Terri beispielsweise die Dichte höher, der Wassergehalt tiefer, die physikalische Porosität tiefer und die hydraulische Durchlässigkeit ebenfalls um eine Zehnerpotenz tiefer (**Tabelle 3**).

Tabelle 3: Vergleich ausgewählter Parameter aus der tonigen Fazies zwischen der Bohrung Benken ⁽¹⁾ aus Mazurek et al., 2008) und dem Felslabor Mont Terri ⁽²⁾ aus Bossart & Thury, 2008; ⁽³⁾ aus Amann et al., 2011a,b). Es ist dabei zu beachten, dass die heutige Überlagerung bei Benken 550 – 650 Meter (Mazurek et al., 2008) und beim Felslabor Mont Terri 320 Meter beträgt. Verglichen werden nur Werte aus der tonigen Fazies und senkrecht zur Schichtung. Es handelt sich bei allen Angabe in der Tabelle um Mittelwerte oder empfohlene Werte. Genauere Angaben zu den Werten aus toniger und sandiger Fazies des Opalinus-Ton am Mont Terri werden im nachfolgenden Kapitel 3 gemacht. Die Anzahl der Messwerte ist, wo vorhanden, in Klammern angegeben.

Parameter	Einheit	Bohrung Benken ¹⁾	Felslabor Mont Terri ²⁾
Wassergehalt (Gewichts%)	%	4 (52)	6.6 (22)
Dichte (feucht)	g/cm ³	2.52 (281)	2.45 (239)
Physikalische Porosität (total)	-	0.12 (9)	0.18 (17)
Hydraulische Leitfähigkeit (senkrecht zur Schichtung)	m/s	2.4E-14 (2)	2E-13 (57)
Einaxiale Druckfestigkeit, UCS (senkrecht zur Schichtung)	MPa	30 (2)	7 ³⁾ (19)
Seismische P-Wellengeschwindigkeit V_p (senkrecht zur Schichtung)	m/s	3030 (68)	2620 (48)

Für eine klare Vergleichbarkeit von Parametern unterschiedlicher Standorte ist also, wie oben beschrieben, die Kenntnis der Diagenese (Versenkungs- und thermische Geschichte) sowie die tektonische Geschichte wichtig. Bei Diagenese und tektonischer Geschichte handelt es sich um stark standortspezifische Eigenschaften, welche nicht über grössere Distanzen korreliert oder extrapoliert werden können. Mineralogie, Sedimentstruktur und Porenstruktur sind weitere wichtige Eigenschaften des Gesteins, welche wie Diagenese und tektonische Geschichte einen direkten Einfluss auf Advektion-Diffusion von Wasser und Gas, felsmechanische und petrophysikalische Eigenschaften haben. Währendem die Sedimentstruktur während der Ablagerung des Gesteins entstanden ist und uns über die damaligen Ablagerungsbedingungen Auskunft geben kann, sind Mineralogie und Porenstruktur das Produkt aus ursprünglichen Ablagerungsprozessen, der Diagenese und der Tektonik. Auch wenn das Gestein also unter sehr vergleichbaren Ablagerungsbedingungen entstanden ist und die ursprüngliche Mineralogie und Porenstruktur ähnlich war, können sich durch sekundäre Prozesse im Verlaufe der Zeit signifikante Unterschiede entwickelt haben. Zudem spielt auch die gegenwärtige Tiefenlage (Überlagerung) des Opalinus-Ton eine grosse Rolle, was sich in den ausgewählten Parametern der **Tabelle 3** widerspiegelt.

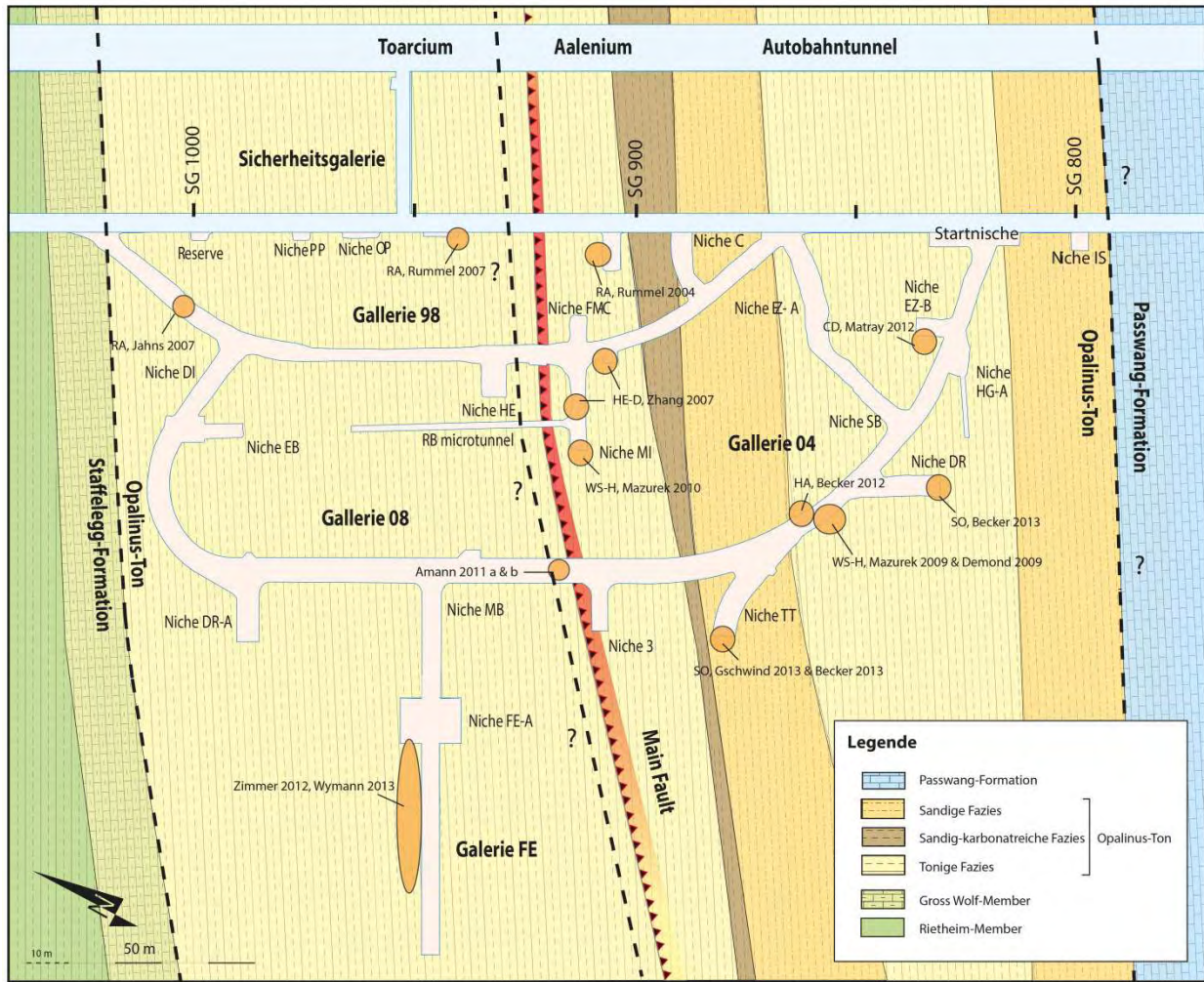
3 Schlüsselkennwerte aus dem Opalinus-Ton des Felslabors Mont Terri

3.1 Abgrenzung

Generell ist aus dem Mont Terri Felslabor eine Vielzahl von Daten vorhanden. Umfassende Arbeiten, welche die Charakteristika des Opalinus-Ton behandeln sind Hohner & Bossart (1998) und der Gesamtbericht der Resultate von 1996 bis 2007 (Bossart & Thury, 2008). Eine Zusammenstellung aller vorhandenen Daten ist zudem im „Clay Club Catalogue“ (Boisson, 2005) vorhanden. Für felsmechanische Parameter und Untersuchungen wird insbesondere auf Bock (2009) verwiesen. Die Porenwasser-Opalinus-Ton Wechselwirkungen und die Porenwasserzusammensetzung werden ausführlich in Pearson et al. (2003) behandelt. Es handelt sich bei all diesen Zusammenstellungen um Kompilationen aus vielen verschiedenen „Technical Notes“, „Technical Reports“ und Publikationen. Für die detaillierten Referenzlisten und Tabellen verweisen wir auf diese Gesamtberichte. Im vorliegenden Gutachten konzentrieren wir uns auf die neuen Daten aus der sandigen Fazies und insbesondere die Unterschiede zu den Kennwerten aus der tonigen Fazies sollen herausgearbeitet werden. In der Literaturliste finden sich daher einerseits die wichtigsten Gesamtberichte und Zusammenfassungen der Daten ab 1996, welche vorwiegend die tonige Fazies behandeln, sowie die neuesten Berichte und Publikationen von 2008 bis heute, mit einem Hauptfokus auf die Arbeiten und Resultate aus der sandigen Fazies.

3.1.1 Themenbereich petrophysikalische Kennwerte

Eine grosse Anzahl an petrophysikalischen Daten wurde im Rahmen von felsmechanischen Labortests vor allem aus der tonigen Fazies eruiert (Bossart & Thury, 2008). So gehören die Messung von seismischer P-Wellengeschwindigkeit V_p , Dichte, Porosität und Wassergehalt zu den Standardmessungen während solchen Messreihen. Der Wassergehalt ist eine stark von der Konditionierung abhängige Grösse. Zudem ist er auch zeitabhängig. Auch die seismische P-Wellengeschwindigkeit V_p ist eine Grösse, welche die temporale Degradierung einer Probe sehr schön aufzeigen kann. Seit dem Gesamtbericht von Bossart & Thury 2008, sind Daten vor allem aus Jahns (2007), Zimmer (2012), Wymann (2013) und Becker (2012, 2013) aus der tonigen Fazies erhoben worden (**Figur 9**). Daten aus der sandigen Fazies der TT-Nische stammen ausschliesslich von Gschwind (2013), Becker (2012b, 2013), Gräsle & Plichke (2011) und Kaufhold et al. (2013). Grössere Kompilationen der neuesten petrophysikalischen Werte finden sich in Thoeni (2013).



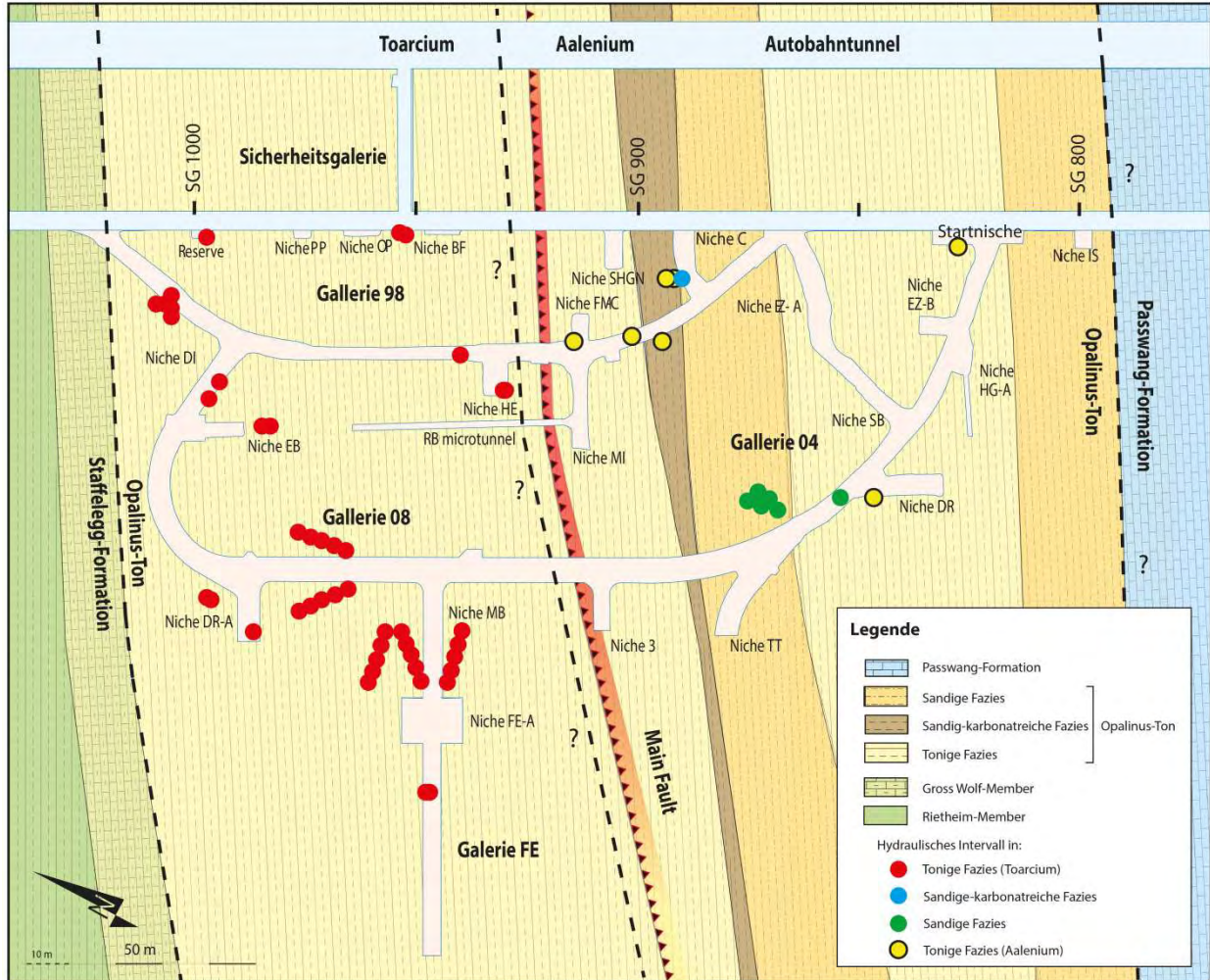
Figur 9: Probennahmestellen für die Ermittlung petrophysikalischer Kennwerte. Es handelt sich hier nur um die neuesten und wichtigsten Daten ab 2007, welche jünger sind als der Gesamtbericht von Bossart und Thury (2008).

3.1.2 Themenbereich hydrogeologische Kennwerte

Es gibt aus dem Felslabor Mont Terri eine grosse Zahl von Berichten, welche Daten für die hydraulische Bestandsaufnahme liefern. Aus den ca. 80 vorhandenen Berichten sind untenstehend die für die Kompilation wichtigsten Schlüsselberichte aufgelistet. Insbesondere die Kompilation von K-Werten aus in-situ hydraulischen Tests (Nussbaum & Bossart, 2004) und die hydraulische Datenbank der Phasen 1-16 (Lavanchy & Mettier, 2012) liefern dabei wertvolle Informationen. Weitere wichtige Infos lieferten die konzeptuellen Abhandlungen von Schlickerrieder & Croisé (2001, 2004) und die beiden Analyse- und Syntheserichte von Rohs & Mrugalla (2009) und Rohs (2010). Diese Datenbank wurde mit neuesten Daten von Rösli (2010), Achtziger & Rösli (2012), Trick & Kontar (2013), Trick et al. (2013), Ferrari & Dubay (2013) ergänzt und auf den neuesten Stand gebracht. Zudem wurde eine Unterteilung in tonige Fazies (Toarcium), tonige Fazies (Aalenium) und sandig-karbonatreichen Fazies vorgenommen.

Die hydraulischen Teststandorte sind ziemlich gleichmässig über das Labor verteilt (**Figur 10**). Jedoch fällt auf, dass der grösste Teil der Daten aus dem Bereich nördlich des Main Fault und damit aus dem Toarcium des Opalinus-Ton stammt. Von den insgesamt 225 Da-

tenpunkten stammen nur gerade mal 15% aus der tonigen Fazies des Aalenium und ca. 9% aus der karbonatreichen und sandigen Fazies. Nur gerade etwa 1/3 der Tests ist mit ziemlicher Sicherheit ausserhalb der EDZ (grösser als 2 Meter von Galerien entfernt) und damit mutmasslich unbeeinflusst.

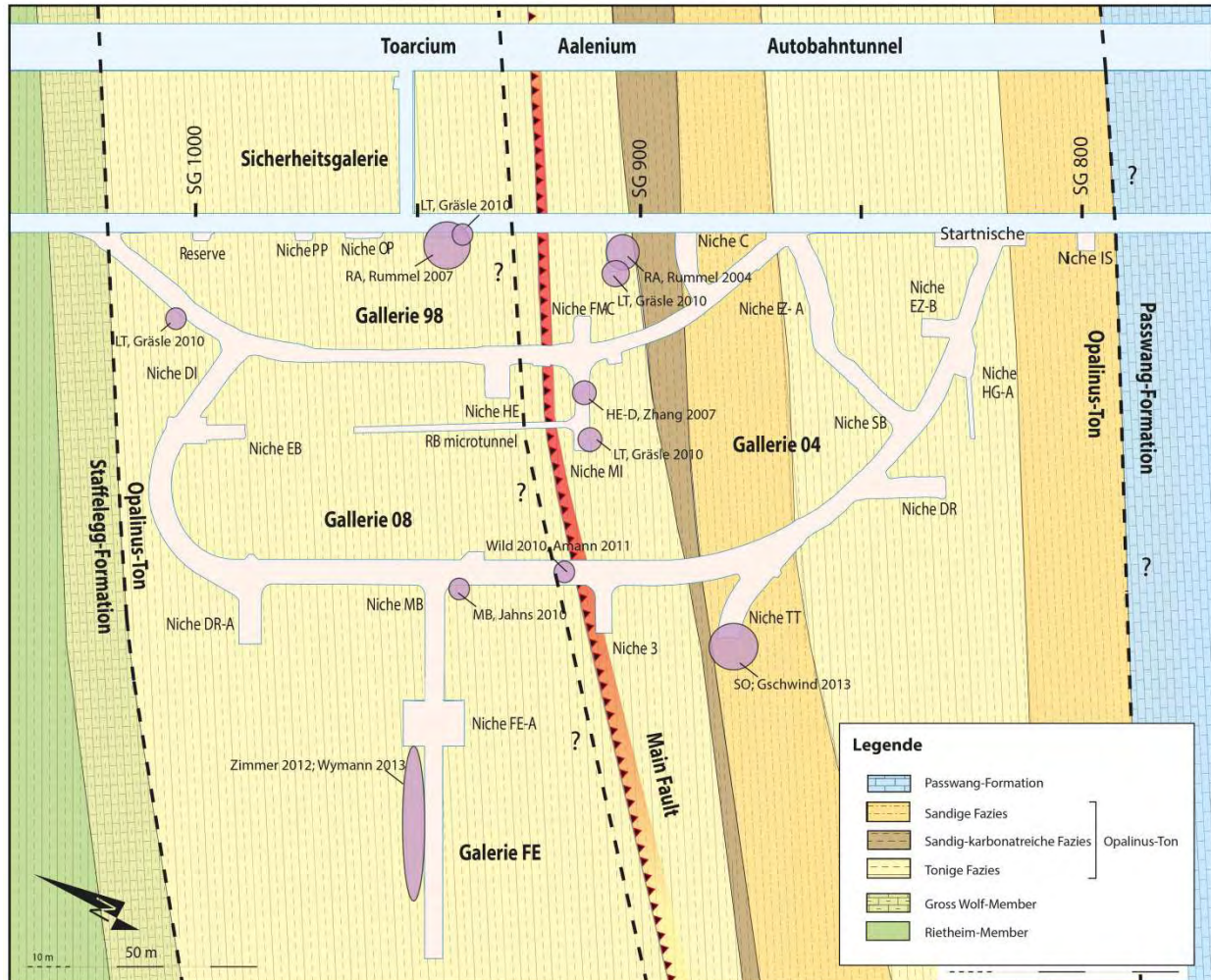


Figur 10: Standorte der durchgeführten belastbaren hydraulischen Tests im Felslabor Mont Terri (ausserhalb der EDZ). Die Punkte repräsentieren jeweils mehrere hydraulische Tests in unterschiedlichen Intervalltiefen entlang einer Bohrung.

3.1.3 Themenbereich felsmechanische Kennwerte

Die Daten stammen mit wenigen Ausnahmen alle aus der tonigen Fazies des Opalinus-Ton. Jedoch sind keine neueren Daten aus der tonigen Fazies im Hangenden des Main Fault vorhanden (**Figur 11**). Das Aalenium ist somit untervertreten. Es gibt momentan drei Studien aus der sandigen Fazies der TT-Nische. Von diesen Studien wurden jedoch nur die Werte von Gschwind (2013) für die Plots miteinbezogen, da bei den Daten aus dem LT-A Experiment (Gräsle & Plischke, 2011 und Kaufhold et al., 2013) keine Konditionierung der Proben stattgefunden hat. Es ist daher nicht klar, bei welchen Wassergehalten oder Saugspannungen diese Tests durchgeführt worden sind. Aufgrund der dünnen Datenlage in der sandigen Fazies wird im Text trotzdem Bezug auf die Daten aus dem LT-A Experiment genommen. Die Arbeit von Gschwind (2013) ist in einem 5 Meter breiten Bereich der sandigen Fazies in der TT-Nische durchgeführt worden. Es wurden dort Proben in grosser Anzahl aus verschiedensten Subfaziesbereichen der sandigen Fazies entnommen. Wichtige Datenreihen für einaxiale Druckfestigkeiten aus der tonigen Fazies stammen aus Rummel & Weber

(2004, 2007), Jahns (2010), Gräsle & Plischke (2010), Amann et al. (2011a) und Wymann (2013). Kompilationen der Daten und Bewertungen wurden vorgenommen in Bossart & Thury (2008), Bock (2009) und Thöni (2013). Nach Möglichkeit wurde die Unterscheidung in tonige Fazies Aalenium, tonige Fazies Toarcium und sandige Fazies vorgenommen.



Figur 11: Probenentnahmestellen für die Ermittlung felsmechanischer Kennwerte. Es handelt sich hier nur um die neuesten Daten ab 2007, welche jünger sind als der Gesamtbericht von Bossart und Thury (2008). Zur besseren Abdeckung und Vergleichbarkeit wurden auch noch die Daten aus Rummel & Weber (2004) beigezogen.

3.1.4 Themenbereich thermische Kennwerte

Die thermischen Kennwerte werden in Bossart & Thury (2008) für die tonige Fazies behandelt und sind aufgrund der laufenden THM-Experimente am Mont Terri ausreichend bekannt. Jedoch sind keine Daten für die sandige Fazies vorhanden und daher werden die thermischen Kennwerte im vorliegenden Bericht nur kurz behandelt. Hier wäre für zukünftige Untersuchungen sicherlich Handlungsbedarf angesagt.

In den Jahren 2001 bis 2008 wurden am Mont Terri in der tonigen Fazies mehrere in-situ Heizexperimente durchgeführt, bei denen die thermischen Eigenschaften des Opalinus-Ton genauer erforscht wurden. Für die Ermittlung der thermischen Kennwerte, wie thermische Leitfähigkeit parallel (P) oder senkrecht (S) zur Schichtung, sowie die Ermittlung der Wärmekapazität des Opalinus-Ton waren vor allem die beiden Experimente HE-C (Heater Experiment) und HE-D (THM Behaviour of Host Rock) wichtig. Diese Experimente sind im Über-

gang MI-Nische und Galerie 98 (**Figur 2**) und damit in der tonigen Fazies durchgeführt worden. Bei beiden Experimenten war ein zentrales geheiztes Bohrloch von diversen instrumentierten Beobachtungsbohrungen umgeben. Während bei HE-C vor allem die in-situ thermischen Eigenschaften des Gesteins untersucht wurden, war es bei HE-D das THM-Verhalten des Gesteins. Die wichtigsten Resultate sind detailliert in Wilevaeau (2005), Wileveau & Rothfuchs (2007) dargestellt; eine gute Zusammenfassung geben Bossart & Thury (2008). Die in-situ Heizexperimente werden im Moment mit den Experimenten HE-E (In-situ Heater Experiment on Key THM Processes and Parameters) und FE (Full-Scale Emplacement Experiment) im Massstab 1:2, resp. 1:1 weitergeführt. Hier sind in den nächsten Jahren weitere Resultate zu erwarten, jedoch nur aus dem tonigen Faziestyp des Opalinus-Ton.

3.1.5 Themenbereich geochemische Kennwerte

Geochemische Kennwerte aus der sandigen Fazies werden in Lerouge et al. (2011) behandelt. Als gesteinspezifischer Parameter sei hier insbesondere die totale Kationenaustauschkapazität (CEC) erwähnt. Die Werte stammen aus den ersten 30 Meter der Bohrung BPC-C2, welche im südlichsten Teil des Mont Terri Felslabors, aus der Startnische hinaus in das Hangende des Opalinus-Ton gebohrt worden ist (**Figur 2**). Werte aus der tonigen Fazies zum Vergleich finden sich in Bossart & Thury (2008), in Pearson et al. (2003) und auch in Thury & Bossart (1999).

3.1.6 Themenbereich geochemische Zusammensetzung der Porenwässer

Da die Zusammensetzung des Porenwassers stark von der geologischen Geschichte und der heutigen Lage innerhalb der tektonischen Struktur der Mont Terri Antiklinale abhängig ist, ist ein direkter Vergleich mit Daten aus den Nagra-Bohrungen nicht möglich. Zudem ist die Zusammensetzung des Porenwassers im Opalinus-Ton nur in geringem Masse vom jeweiligen Lithofaziestyp abhängig. Die Einflüsse aus den Aquiferen in den Rahmengesteinen sind entscheidend für die Zusammensetzung des Porenwassers und ändern sich im Felslabor in Nord-Süd-Richtung stark. Eine gute Zusammenfassung der Porenwasserzusammensetzung geben Bossart & Thury (2008). Detaillierte Zusammenstellungen der Daten werden in Pearson et al. (2003) gegeben, in Vinsot et al. (2007) und Leupin et al. (2012) nochmals mit Daten aus den neusten Experimenten ergänzt. Von diesen Untersuchungen sollen hier nur die wichtigsten Aussagen über die Zusammensetzung des Porenwassers rekapituliert werden. Die Daten stammen aus über 40 Bohrungen entlang der Sicherheitsgalerie und der Galerie 98. Die für die geochemische Zusammensetzung der Porenwässer relevante Lage der entnommenen Proben ist aus dem Diffusionsprofil (**Figur 29**) ersichtlich.

3.1.7 Themenbereich Gaseintrittsdrucke

Die Gaseintrittsdrucke sind ein für die Beurteilung der Barrierewirkung des Opalinus-Ton wichtiges Kriterium. Wenn man ein Tongestein mit Gas unter Druck setzt beginnt das Gas beim sogenannten Gaseintrittsdruck in das Gesteinsmaterial zu dringen und verdrängt das Porenwasser. Experimentell sind Gaseintrittsdrucke schwierig zu bestimmen, weil sie eine hohe Variabilität aufweisen. Wichtige Parameter, welche den Gaseintrittsdruck bestimmen sind die intrinsische Gaspermeabilität und die effektiven Spannungen durch Überlast und Tektonik. Eine kurze Zusammenfassung über Gastests am Mont Terri wird in Bossart & Thury (2008) gegeben. Detaillierte Untersuchungen wurden vor allem im Rahmen des HG-A (Gas Path through Host Rock and along Seals) Experiments (Marschall et al., 2006) und des HG-C (Long-term Gas Migration) Experiments (Miehe et al., 2010) durchgeführt. Beim HG-C-Experiment wurden neben in-situ Gastests im Felslabor Mont Terri auch Versuche mit einer Triaxialzelle an Bohrkernmaterial durchgeführt.

3.2 Tabelle der Schlüsselkennwerte

Tabelle 4: Vergleich ausgewählter Parameter aus der tonigen und der sandigen Fazies des Opalinus-Ton am Mont Terri für S-Proben (senkrecht zur Schichtung) und P-Proben (parallel zur Schichtung). Die Werte für die tonige Fazies stammen aus ¹⁾ Bossart & Thury (2008). Bei der einaxialen Druckfestigkeit wurden Werte aus ²⁾ Amann et al. (2011a,b) genommen. Die Tabelle wurde ergänzt mit petrophysikalischen und felsmechanischen Daten aus der sandigen Fazies von ³⁾ Gschwind (2013), ⁴⁾ Peters et al. (2011) und hydraulischen Daten aus ⁵⁾ Lavanchy & Mettier (2008). Die totale Kationenaustauschkapazität wurde für die sandige Fazies in ⁶⁾ Lerouge et al. (2011) ermittelt. Die Gaseintrittsdrucke stammen aus ⁶⁾ Miehe et al. (2010). Die Anzahl der Messwerte ist, wo vorhanden in Klammern angegeben. Die verschiedenen Parametergruppen sind zur Veranschaulichung unterschiedlich eingefärbt: petrophysikalisch = orange, hydraulisch = blau, felsmechanisch = grau, thermisch = rot, Porenwasserzusammensetzung = gelb, CEC = grün und Gaseintrittsdruck = weiss.

Parameter	Tonige Fazies ¹⁾		Sandige Fazies	
	Spannbreite	Beste Schätzung	Spannbreite	Beste Schätzung
Wassergehalt [Gew %]	5.0-8.9 (22)	6.6	2-6 ³⁾ (112)	4
Dichte (feucht) [g/cm ³]	2.40-2.53 (239)	2.45	2.42-2.63 ⁴⁾ (65)	2.52
Totale (physikalische) Porosität [Vol %]	14-25 (17)	18	5.3-17.7 ⁴⁾ (17)	11.1
Wasserverlust Porosität [Vol %]	13-21	16	4.9-17.5 ⁴⁾ (19)	10.5
Seismische P-Wellengeschwindigkeit Vp (S) [m/s]	2220-3020 (48)	2620	1470-4610 ³⁾ (61)	3280
Seismische P-Wellengeschwindigkeit Vp (P) [m/s]	3170-3650 (111)	3410	2870-5940 ³⁾ (112)	3860
Hydraulische Leitfähigkeit (S) [m/s]	2E-14-1E-12 (57)	2E-13	1E-13-5E-12 ⁵⁾ (10)	1E-12 ⁵⁾
Spezifischer Speicherkoeffizient [m ⁻¹]	1E-7-1E-4 (6)	2E-6	-	-
Einaxiale Druckfestigkeit, UCS (S) [MPa]	5-10 ²⁾ (19)	7	6-37 ³⁾ (51)	16
Einaxiale Druckfestigkeit, UCS (P) [MPa]	4-17 (22)	10.5	4-37 ³⁾ (60)	18.0
Elastizitätsmodul, E-Modul (S) [GPa]	2.1-3.5 (34)	2.8	0.4-19.0 ³⁾ (51)	6.0
Elastizitätsmodul, E-Modul (P) [GPa]	6.3-8.1 (39)	7.2	2.0-36.7 ³⁾ (60)	13.8
Querdehnungszahl (S) [-]	0.28-0.38 (73)	0.33	0.06-0.42 ³⁾ (51)	0.22
Querdehnungszahl (P) [-]	0.16-0.32 (73)	0.24	0.13-1.23 ³⁾ (59)	0.44
Thermische Leitfähigkeit (S) [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	1.0-3.1 (9)	1.2	-	-
Thermische Leitfähigkeit (P) [Wm ⁻¹ K ⁻¹]		2.1	-	-
Wärmekapazität [JKg ⁻¹ K ⁻¹]	-	860	-	-
Porenwasserzusammensetzung	NaCl-Porenwassertyp mit einer maximalen TDS von 18.3 g/l			
Totale Kationenaustauschkapazität CEC (Co-Hexammin, Ni-en in Fett) [meq/100 g Gestein]	9.4-13.4 (24)	11.1 16 (24)	7.3-21.9 ⁶⁾ (13)	14.4
Gaseintrittsdruck [MPa]	1.2-3.2 ⁷⁾ (11)	1.8-2.5	-	-

In der **Tabelle 4** sind die wichtigsten Schlüsselkennwerte aus dem Opalinus-Ton des Mont Terri aufgelistet, welche in der Folge genauer betrachtet und vor allem bezüglich den Unterschieden tonige Fazies - sandige Fazies diskutiert werden. Die Tabelle entstammt Bossart & Thury (2008) und wurde mit den bekannten Daten für die sandige Fazies ergänzt (Gschwind, 2013, Peters et al., 2011 und Lavanchy & Mettier, 2008). Die Spalte „beste Schätzung“ in der Tabelle entspricht dem „expert judgement“.

Die Tabelle wurde in petrophysikalische, hydraulische, felsmechanische und thermische Parameter gegliedert. Dabei gibt es bei den thermischen Werten aus der sandigen Fazies Lücken. Thermische Kennwerte wurden ausschliesslich in der tonigen Fazies erfasst. Auch sonst ist die Datenlage bei allen anderen Parametergruppen für die sandige Fazies vergleichsweise schwach. Trotzdem werden der Vollständigkeit halber zusätzlich das Porenwasser, die totale Kationenaustauschkapazität und die Gaseintrittsdrucke aufgeführt und im Text kurz behandelt.

3.3 Methodik und Kriterien zur Berücksichtigung von Daten

Das Einhalten von Standards ist für die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Datensets von grösster Wichtigkeit. So wurden z.B. bei den felsmechanischen Daten auf die Einhaltung der ISRM (International Standards for Rock Mechanics) - Standards oder der ASTM (American Society for Testing and Materials) - Standards für den Testaufbau und die Testauswertung geachtet.

Der Konditionierung der Proben kommt eine grosse Bedeutung zu. Insbesondere bei felsmechanischen Versuchen ist die richtige Konditionierung für die Resultate entscheidend. Bei den Versuchen gilt: Lieber einfache Versuche und Versuchsanordnungen in grosser Anzahl als wenige hoch komplexe Versuche unter schwer definierbaren Bedingungen. Für die Evaluation der Variabilität sind vor allem viele Daten aus leicht vergleichbaren, einfachen Versuchen wichtig. Wichtig ist bei allen Versuchen und Tests die klare Lokalisierung der in-situ Versuche und der Proben für die Labortests. Die Tests und Versuche müssen vollständig und von den Laborbedingungen und den Testabläufen her klar nachvollziehbar sein.

Skaleneffekte sind generell ein wichtiges Thema. Sind hydraulische Versuche aus unterschiedlichen Intervalllängen und unterschiedlichen Bohrlochdurchmessern untereinander vergleichbar. Wie steht es mit dem Vergleichen von felsmechanischen Kennwerten aus Versuchen mit unterschiedlichen Grössen der Probenkörper? Der Einfluss der Skala muss von Fall zu Fall entschieden werden.

Generell wurden unqualifizierte Rohdaten in unbereinigter Form mit Vorsicht behandelt. Im Allgemeinen kann die Person, welche die Tests selbst durchgeführt hat, die Qualifizierung und Beurteilung der Resultate am besten selbst vornehmen. Selbst bei sehr gut dokumentierten Versuchsabläufen ist auch für unbeteiligte Personen eine spätere Qualifizierung in seltenen Fällen möglich. Ansonsten muss man sich im Nachhinein auf die aus den Laborjournals verfügbaren Angaben stützen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bildet die Fehlerbetrachtung. Grundsätzlich sind alle aus den Rohdaten ermittelten Kennwerte mit einem Fehler behaftet. Nehmen wir als Beispiel die hydrogeologischen Kennwerte wie hydraulische Durchlässigkeit oder der spezifische Speicherkoeffizient, welche aus den Hydrotestdaten ermittelt werden. Hier unterscheiden wir zwischen drei Fehlerarten: i) Messwertfehler (z.B. beim gemessenen Fluss und den Druckdaten), ii) Fehler bei der Auswertung (z.B. inhärente Ungenauigkeiten bzw. Approximationen bei der Anwendung des Auswerteverfahrens, wie die Linearisierung von Funktionen, Regressionsverfahren und Unschärfebereiche von Typkurven), und iii) Fehler bei der Testinterpretation, bedingt durch die Diskrepanz zwischen dem Auswertemodell und effektiven Formationsverhältnissen.

Die Fehlerarten i) und ii) sind relativ klar ermittelbar und quantifizierbar. Der Messwertfehler

(i) bei den Druckdaten ist meistens kleiner $\pm 0.5\%$ des Messwertes, beim Fluss meist kleiner $\pm 1.5\%$, falls der Messwertbereich nicht über, bzw. unterschritten wurde. Die Fehler bei der Auswertung (Fehler ii) dürften in den meisten Fällen gering sein, falls bestimmte Auswertekriterien berücksichtigt wurden (z.B. zeitlich genügend lange Datenreihe, damit ein "straight-line"-Verfahren überhaupt sinnvoll angewandt werden kann und seine Gültigkeit hat). Aus unserer Sicht der wichtigste Fehler liegt bei der Testinterpretation (Fehler iii), welche sich aus der Abweichung vom theoretischen Auswertemodell zu den effektiven Formationsverhältnissen ergibt. Dabei handelt es sich meistens um effektive heterogene und anisotrope Verhältnisse (im Modell werden homogene und isotrope Verhältnisse angenommen) sowie um effektiv unklare Anfangs- und Randbedingungen. Beim Beispiel der Hydrotests ist oft auch nicht klar ersichtlich, welches Fliessmodell denn vorherrscht (z.B. radialer, linearer oder sphärischer Fluss, Doppelporosität, Speicherungs-Effekte, Skin-Effekte).

Bei den einzelnen Parametern haben wir auf eine Fehlerbetrachtung verzichtet, da der interpretative Fehler (Fehler iii) oft nicht quantifizierbar ist. Verschiedene Auswertmodelle ergeben verschiedene Kennwerte, dies bei gleichen Messdatensätzen. Anstelle einer Fehlerangabe haben wir deshalb versucht, die Bandbreiten der Kennwerte anzugeben. Diese Bandbreiten können am besten als Fehler um einen „best-estimate“ Kennwert betrachtet werden, sie geben aber auch eine natürliche Variabilität der Verhältnisse wieder.

3.3.1 Methoden und Kriterien Petrophysik

Als wichtigste petrophysikalische Parameter sind Wassergehalt, Dichte, totale Porosität und seismische P-Wellengeschwindigkeit V_p aufgeführt (**Tabelle 1**). Der Parameter V_p ist dabei aufgrund seiner Häufigkeit und Relevanz für die Beurteilung der Gesteinsstabilität (Dichte, Zementation, Rissbildung) besonders wichtig. Dichte und Porosität sind Grössen, welche sich direkte oder indirekt daraus ableiten lassen. Zudem ist V_p für die felsmechanischen Versuche eine wichtige Kenngrösse für die Integrität der Probenzylinder nach Probenentnahme, nach Konditionierung, während und nach den Testabläufen. Zudem lassen sich aus V_p die dynamischen Elastizitätsparameter berechnen.

Im Kapitel 3.4 werden die seismischen P-Wellengeschwindigkeiten V_p , sowie Dichte und Porosität, soweit vorhanden, auf Laborskala erfasst und beurteilt. Auch hier gibt es unterschiedliche Methoden (**Appendix A4**) zur Dichte- und Porositätsbestimmung. V_p wurde ausschliesslich mit einer Ultraschallsonde im Labor bestimmt. Werte aus Bohrlochdaten wurden aus Gründen der unterschiedlichen Skala und dem möglichen Einfluss einer Auflockerungszone um das Bohrloch herum nicht berücksichtigt. Bei V_p ist vor allem die Sättigung, resp. die Konditionierung ein wichtiger Einflussfaktor. Entstehen nämlich Trockenrisse in der Probe, so verringern diese die Geschwindigkeiten der V_p Wellen drastisch (nur senkrecht zur Schichtung). Deshalb ist die Orientierung der Probe relativ zu Sender und Empfänger der Messanlage wichtig. Die seismische P-Wellengeschwindigkeit V_p ist im Gegensatz zu Porosität und Dichte eine gerichtete Gesteinseigenschaft und stark von der Gesteinsanisotropie abhängig.

Bei den betrachteten Daten handelt es sich vor allem um solche aus Labortests, wobei seismische P-Wellengeschwindigkeit V_p , Dichte, totale Porosität und Wassergehalt mit unterschiedlichen Methoden erfasst wurden (siehe auch Bossart & Thury, 2008, **Appendix A4**).

3.3.2 Methoden und Kriterien Hydraulik

Hydraulische in-situ Tests ergeben belastbare Kennwerte innerhalb von natürlich zu erwartenden Schwankungen. Aus den Berichten von Nussbaum & Bossart (2004) und Lavanchy & Mettier (2012) wurden jeweils die „best estimate“-Daten berücksichtigt für die statistische Analyse. Es wurde bei der Bestandaufnahme klar unterschieden zwischen Werten aus der EDZ und Werten ausserhalb der EDZ. Generell wurden Intervalle mit Tiefen kleiner als

2 Meter als von der EDZ beeinflusst klassifiziert. Dort wo nur Transmissivität (T) und Intervalllänge (m) bekannt waren, wurde die hydraulische Durchlässigkeit $K_f = T/m$ berechnet.

Gemäss Nussbaum & Bossart (2004) konnten in rund 60 analysierten Packertests keine Skaleneffekte aufgrund von längeren oder kürzeren Intervalllängen festgestellt werden. Klar ist, dass kleinskalige hydraulische Unterschiede mit längeren Intervallen ausgemittelt werden. In der tonigen Fazies ist das im Aalenium und im Toarcium nicht entscheidend, da die Homogenbereiche sehr gross sind und diese Faziesräume eine grosse Homogenität aufweisen. Bei der sandigen und insbesondere bei der sandig-karbonatreichen Fazies hingegen kann die Wahl der Intervalllängen durchaus zu unterschiedlichen Resultaten führen, da dort Wechsellagerungen von siltigen, karbonatischen und tonigen Schichten mit unterschiedlichen Frequenzen und Mächtigkeiten vorliegen.

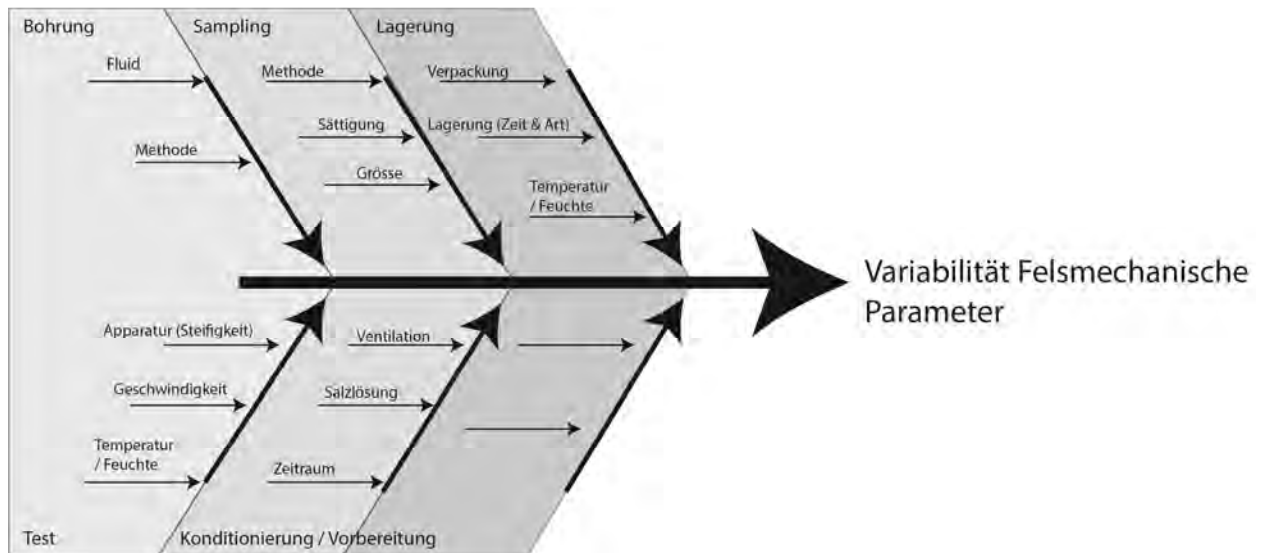
Als Hauptmethoden kamen bei den hydraulischen Tests vor allem „constant head injection“ und „pulse injection“-Tests zur Anwendung. Die Qualitätskontrolle der vorhandenen Tests wurde bereits umfangreich in Lavanchy & Mettier (2012) durchgeführt und entsprechend übernommen. Wegen der geringen Anzahl von Interferenztests sind kaum Daten über die Speichereigenschaften vorhanden. In Bossart & Thury (2008) werden die Speicherkoeffizienten aus der tonigen Fazies aufgeführt. In neueren Berichten und insbesondere aus der sandigen Fazies sind jedoch keine Speicherkoeffizienten vorhanden. Durchlässigkeiten mittels Messungen mit dem Bohrlochevaporimeter (z.B. Bossart et al., 2009) wurden meist in der EDZ und daher kleiner als 2 Meter Tiefe bestimmt und sind zudem mit den hydraulischen Tests aufgrund des Messprinzips nicht direkt vergleichbar. Diese Daten wurden daher im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt.

3.3.3 Methoden und Kriterien Felsmechanik

Grundsätzlich ist die Methodik für einaxiale Druckfestigkeit und triaxiale Druckfestigkeit vergleichbar, da auch oftmals dieselben Personen/Labors die Versuche durchgeführt haben. Die Versuche wurden jeweils nach ISRM (International Standards for Rock Mechanics) – oder ASTM (American Society for Testing and Materials) Standards durchgeführt. Es sind jedoch überwiegend Proben aus der tonigen Fazies verfügbar. Die verwendeten Werte stammen vor allem aus einaxialen Druckversuchen, Zugspannungsversuchen und weniger häufig aus triaxialen Druckversuchen. Bei den hier berücksichtigten felsmechanischen Parametern einaxiale Druckfestigkeit, E-Modul und Querdehnungs-Zahl handelt es sich um häufig ermittelte Parameter, welche aufgrund ihrer Anzahl einen Vergleich zwischen der tonigen und der sandigen Fazies zulassen.

Bei den felsmechanischen Kennwerten aus Laborversuchen kommt der Probenentnahme, Konditionierung und Weiterbearbeitung eine wichtige Rolle zu (z.B. Amann et al., 2010). Ausgeschlossen wurden ausgetrocknete, alte Bohrkern. Ausgetrocknete Bohrkern weisen nach kurzer Zeit Trocknungsrisse auf und haben somit nicht mehr die ursprünglichen Festigkeitseigenschaften. Zudem wurden Proben, welche mutmasslich aus der Auflockerungszone stammen ebenfalls ausgeschlossen. Proben mit zu tiefem Wassergehalt, resp. sehr hohen Saugspannungen sind generell für den gesättigten in-situ Zustand nicht repräsentativ. Bei S-Proben (senkrecht zur Schichtung) ist „discing“, resp. das scheibenförmige Aufreißen entlang der Schichtung ein weit verbreitetes Problem. Testreihen, bei welchen die zerbrochenen Proben wieder zusammengeklebt wurden, konnten ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Aus der sandigen Fazies ist für die felsmechanischen Kennwerte nur ein statistisch auswertbarer Datensatz vorhanden (Gschwind, 2013). Vergleiche mit anderen Proben aus derselben Fazies sind hier leider nicht möglich, da keine anderen Datensätze vorhanden sind. Ein grosses Problem ist, dass die verschiedenen Datensätze aufgrund unterschiedlicher Wassergehalte nur bedingt miteinander verglichen werden können. Daher wurden jeweiligen Parameter alle versus Wassergehalt geplottet. Die unterschiedlichen Datensätze aus teils unterschiedlichen Faziestypen wurden mittels eines Farbcodes markiert. Die Symbolgrösse auf den Plots gibt jeweils die Probengrösse an.

In der **Figur 12** werden mögliche Abhängigkeiten der felsmechanischen Variabilität mit Bohrung, Probennahme, Lagerung, Test und Konditionierung/Vorbereitung gezeigt. Alle diese Punkte können einen direkten oder indirekten Einfluss auf das felsmechanische Verhalten des Probenkörpers haben. Noch nicht aufgeführt sind hier die Fazies, Heterogenität, Orientierung der Probe zur Anisotropie, sowie Einfluss der EDZ.



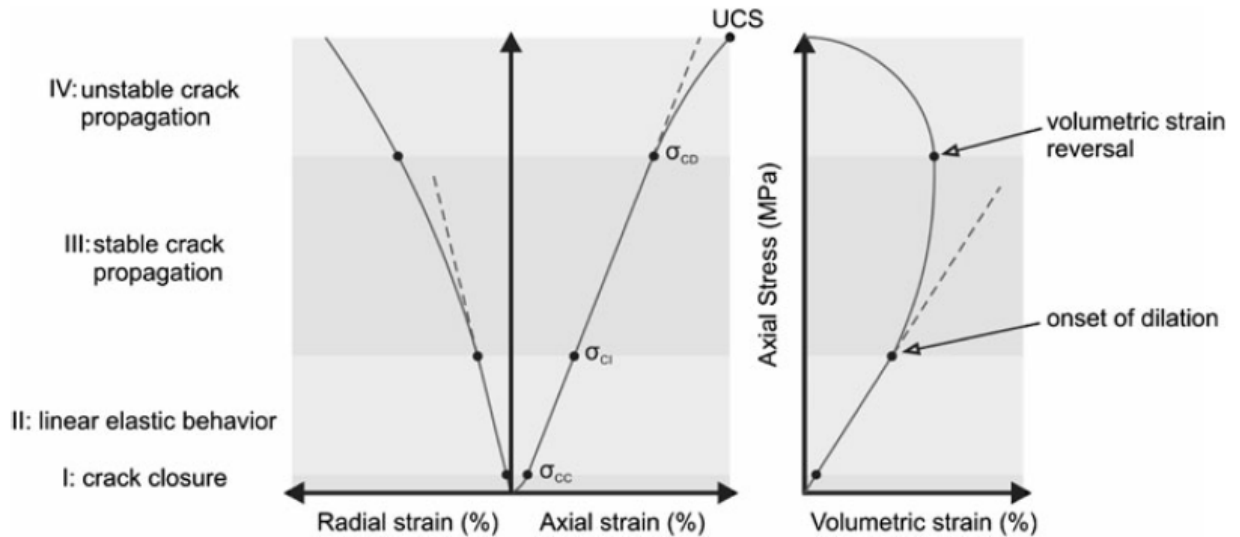
Figur 12: Mögliche Beeinflussungen der mechanischen Variabilität.

Die Skaleneffekte sind bei den Proben für die felsmechanischen Tests ein grosses Thema. Gemäss Bock (2009) sind die Skaleneffekte für den Opalinus-Ton vernachlässigbar, ein Nachweis steht jedoch bis heute aus. Momentan werden Effekte der Probengrösse auf die Versuchsergebnisse an der ETH untersucht. Neuere Untersuchungen in der sandigen Fazies zeigen jedoch, dass diese Annahme wenn überhaupt, so nur für die tonige Fazies gilt. In der sandigen und vor allem auch in der karbonatreichen Fazies sind Skaleneffekte sehr wohl ein Thema. Dieses Thema wird auch in Gschwind (2013), Peters et al. (2011) und Müller & Jaeggi (2012) genauer behandelt. Bei Gschwind (2013) hat es sich gezeigt, dass es bei der stark heterogenen sandigen Fazies, welche am Aufschluss der TT-Nische weiter in 4 Subfaziestypen unterteilt werden konnte, sehr schwierig ist, Homogenbereiche für die Probenahme auszuscheiden. Insbesondere in den Zonen A ganz unten und D ganz oben (vgl. **Figur 3** und **Appendix A3**) ist die Probengrösse mit 51x120 Millimeter Zylindern zu klein. Diese Grösse wird aber bei sehr vielen Untersuchungen eingesetzt. Zudem wurde bei dieser Arbeit die mineralogische Fraktionierung anhand von digitaler Bildanalyse an Dünnschliffen mit einer Grundfläche von 15x30 Millimeter bestimmt, was zu einer sehr grossen Streuung bei den Crossplots zwischen Mineralogie und felsmechanischen Kennwerten geführt hat. Eine Verbesserung der Genauigkeit bei der Mineralogie könnte dort mit XRD oder XRF-Analysen erreicht werden. Das Problem der Skala bleibt jedoch bestehen. Die getesteten Proben liegen von der Grösse her alle weit unter dem repräsentativen Elementarvolumen (REV) der stark heterogenen sandigen Fazies, welches für die Subfaziestypen im Meter-Bereich liegen kann (Jaeggi et al., 2011).

Alle Werte wurden aus der Erstbelastung der Druckversuche ermittelt (first loading). Gemäss **Figur 13** wurden die elastischen Parameter folgendermassen bestimmt:

- Einaxiale Druckfestigkeit (UCS) bei der Maximalkraft (100%)

- Das Elastizitätsmodul E (Youngs Modulus), sowie auch die Querdehnungszahl ν (Poisson Zahl) wurden im linearen Teil der Spannungs/Verformungs-Kurven bei geringer axialer Belastung unter der Bruchinitialisierung, also im Teil II mit linear elastischem Verhalten ermittelt.



Figur 13: Die 4 Stadien des bruchhaften Gesteinsversagens bis zur Maximallast (UCS) in einaxialer Kompression (aus Amann et al., 2011). Die Indizes bezeichnen “crack closure” (CC), “crack initiation” (CI) und “crack damage threshold” (CD).

Das Bruchverhalten des Opalinus-Ton ist komplex, zeigt er doch ab der Bruchinitialisierung ein nicht lineares „Hardening“-Verhalten (Amann et al., 2011). Das E-Modul kann daher nicht einfach bei 50% der maximalen Last bestimmt werden, wie dies in vielen älteren Arbeiten der Fall war, sondern müsste bei geringer axialer Belastung unter der Bruchinitialisierung bestimmt werden. In den neueren Untersuchungen der ETH wurde dem Rechnung getragen (z.B. Amann et al., 2011; Gschwind, 2013). Trotz den sehr geringen Belastungsraten von 0.02 mm/min (Gschwind, 2013) oder 0.04-0.08 mm/min (Amann et al., 2011) kann aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeit von einem undrainierten Verhalten während den Versuchen ausgegangen werden. Gemäss pers. Mitteilung von F. Amann (ETHZ) können solche Kennwerte ohne die genaue Messung des Porenwasserdruckes während dem Versuch nicht in effektive Kennwerte überführt werden, da sie eine Kombination aus dem Verhalten des Gesteins und des Porenwassers darstellen. Drainierte Kennwerte existieren jedoch bis dato kaum.

3.3.4 Methoden und Kriterien thermische Kennwerte

Für die Ermittlung der thermischen Kennwerte sind am Mont Terri unterschiedliche Typen von Labortests bei unterschiedlichen Temperaturniveaus angewandt worden. Generell wurden die thermische Leitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität mit der Laser-Flash-Methode bestimmt. Bei Messungen unter verschiedenen Sättigungen und mit unterschiedlichem Umgebungsdruck wurden die Proben in eine Triaxialzelle eingespannt und auf einer Seite aufgeheizt. Mittels seitlich angebrachten Temperatursensoren lässt sich die Wärmeausbreitung unter genau definierten Sättigungs- und Umgebungsdruckbedingungen aufzeichnen.

Gemäss Wileveau & Rothfuchs (2007) wurden die Proben auf 7% Wassergehalt aufgesättigt. Unterschiedliche Werte bei der thermischen Leitfähigkeit werden von Wileveau & Rothfuchs

(2007) mit der unterschiedlichen Konditionierung begründet. Aufgrund der geringen Anzahl an vorhandenen Daten wurden unterschiedliche Konditionierungen berücksichtigt. So wurden z.B. Proben aus der Bohrung BHE-D6 direkt nach der Entnahme in Aluminiumfolie eingepackt und vakuumiert. Die Proben aus der Bohrung BHE-D 26 hingegen wurden in Harz eingegossen. Die Autoren geben dabei an, dass bei der Harzmethode kein Porenwasser evaporieren kann. Auf Grund unserer Erfahrungen mit dem Einharzen von Proben ist jedoch die Wärmeentwicklung bei der Polymerisierung nicht zu vernachlässigen und kann die Probe dennoch negativ beeinflussen, indem das Wasser ausgast und teils im Harz in Blasen gefangen wird.

Bei den Proben aus der Bohrung Benken beruht die Messung der spezifischen Wärmekapazität an Gesteinsproben auf dem Prinzip der Mischung von zwei Stoffen mit unterschiedlichen Temperaturen (Nagra, 2001). Unter der Annahme, dass die Summe der internen Energien der beiden Stoffe vor und nach deren Vermischung konstant bleibt und die Wärmekapazität einer der beiden Stoffe bekannt ist, kann die Wärmekapazität des anderen Stoffes berechnet werden.

Am Mont Terri wurden die Tests generell im Rahmen eines in-situ Experiments durchgeführt, um die THM-Parameter für die konstitutiven Modelle, welche für die Testinterpretation verwendet wurden, zu bestimmen. Wegen der Anisotropie des Opalinus-Ton wurden die Tests für die thermische Leitfähigkeit jeweils senkrecht (S) und parallel (P) zur Schichtung durchgeführt. Die spezifische Wärmekapazität ist ein Skalar und daher Richtungsunabhängig.

3.3.5 Methoden und Kriterien Geochemie

Bei den geochemischen Parametern konzentrieren wir uns auf die totale Kationenaustauschkapazität, wo Vergleichswerte aus der sandigen Fazies vorhanden sind. Generell kann die Kationenaustauschkapazität mit verschiedenen Methoden ermittelt werden, welche aber alle etwas unterschiedliche Werte ergeben. In Bossart & Thury (2008) werden je nach verwendeter Lösung verschiedene Werte für die tonige Fazies angegeben. Dabei sind Werte für die Lösungen Ni-Ethylendiamin (Ni-en), Na-Azetat und Co-Hexamin vorhanden. Generell sind Werte aus Ni-en Lösungen tiefer als bei den anderen Lösungen. Lerouge et al. (2011) geben nur Werte aus Tests mit Co-Hexamin an, welche daher in der Folge für den Vergleich zwischen toniger und sandiger Fazies herangezogen werden. Die totale Kationenaustauschkapazität ist normalerweise höher als die Summe der austauschbaren Kationen (Ca, Mg, Na, K, Sr). Bei der totalen Kationenaustauschkapazität wurden H^+ und NH_4 mitberücksichtigt, bei der Summe der austauschbaren Kationen hingegen nicht.

3.3.6 Methoden und Kriterien Zusammensetzung Porenwässer

Die Entnahme von Wasserproben aus dem Opalinus-Ton ist am Mont Terri hauptsächlich mit drei unterschiedlichen Methoden erfolgt (Bossart & Thury, 2008). So wurde Wasser aus abgepackerten Bohrlochintervallen im Opalinus-Ton und aus Zuflüssen der umgebenden Formationen entlang der Sicherheitsgalerie entnommen. Es wurden nur Bohrungen berücksichtigt, welche mit Luft oder Stickstoff gebohrt worden sind. Die abgepackerten Intervalle wurden dabei mit einem inerten Gas, wie z.B. Stickstoff oder Argon gefüllt, um Pyritoxidation zu verhindern.

Zudem wurde das Formationswasser aus Probenmaterial ausgepresst (squeezing). Die in einem Zylinder eingespannten Proben wurden dabei in der Regel einem Druck von 60-200 MPa ausgesetzt. Dabei ergab sich für eine Probe von 500 bis 1500 g Gewicht eine Wassermenge von 1-5 ml. Im besten Fall kann so bis zu 35% vom ursprünglichen Wassergehalt einer Probe gewonnen werden.

Die Zusammensetzung des Porenwassers kann zudem aus zerkleinerten Proben durch Auslaugung derselben gewonnen werden. Dabei wurde mit reinem Wasser und mit Lösungen

aus starken Kationenaustauschern gearbeitet. Falls die geochemische Porosität (Cl-haltiger Wassergehalt) bekannt ist, können aus den Auslaugungsdaten die Porenwasser-Salzkonzentrationen bestimmt werden. Die Methoden, welche für die Ermittlung der Porenwasserzusammensetzung verwendet wurden, sind in Pearson et al. (2003) detailliert beschrieben und die Vor- und Nachteile diskutiert.

3.3.7 Methoden und Kriterien Gaseintrittsdrucke

Gaseintrittsdrucke wurden in-situ und an Kernproben im Labor bestimmt (Miehe et al., 2010). Für in-situ Messungen wurde das abgepackerte Intervall zuerst mit Stickstoff gereinigt und das Wasser im Intervall ersetzt. Die Gaseintrittsdrucke konnten dann durch die Injektion von Stickstoff mit schrittweisen Druckerhöhungen und der Messung des Gasflusses bestimmt werden. Für die Durchflussmessung wurde die Stickstoffflasche auf eine Präzisionswaage gestellt und so die Gewichtsabnahme der Flasche aufgezeichnet. Nach dem ersten Auftreten eines Gasflusses wurde der Druck erhöht, bis ein stabiler Gasfluss erreicht wurde. Anschliessend wurde der Gasdruck reduziert, bis der Gasfluss vollständig stoppte.

Zudem wurden Kernproben im Labor in der Triaxialzelle getestet. Dabei wurden zuerst Gasinjektionstests durchgeführt, um die Abhängigkeit der Gaspermeabilität vom Injektionsdruck unter Triaxial-Belastung der Probe zu untersuchen. Danach wurde die Probe durch Wasserinjektion mit künstlichem Porenwasser aufgesättigt. Anschliessend wurde mit einer schrittweisen Gasinjektion der Gaseintrittsdruck und anschliessend die effektive Gaspermeabilität bestimmt.

Gute Daten der Gaseintrittsdrucke sind vor allem aus den Bohrungen BET-1 bis BET-6 in der SB-Nische vorhanden (**Figur 2**). Sämtliche Daten stammen aus der tonigen Fazies des Opalinus-Ton.

3.4 Resultate und Beziehungen zwischen den Kennwerten

In diesem Abschnitt wird ausschliesslich auf die Unterschiede zwischen toniger und sandiger Fazies eingegangen. Diese werden mit den Daten aus den umfassenden Arbeiten von Bossart & Thury (2008) und Bock (2009) verglichen und bewertet (vgl. **Tabelle 4**)

3.4.1 Beziehungen zwischen den Kennwerten Petrophysik (siehe auch Appendix 4)

Die Wassergehalte in der sandigen Fazies sind mit 2-6% und einer besten Schätzung von 4% generell tiefer als bei der tonigen Fazies, wo die Spannweite von 5.0-8.9% reicht, bei einer besten Schätzung von 6.6% (**Tabelle 4**, Bossart & Thury, 2008). Zudem ist bei der sandigen Fazies in der TT-Nische auch die Dichte mit 2.52 g/cm^3 gegenüber 2.45 g/cm^3 in der tonigen Fazies erhöht. Die totale Porosität ist in der sandigen Fazies mit 11.1% gegenüber 18% in der tonigen Fazies klar tiefer. Tiefere Porosität, tieferer Wassergehalt und höhere Dichte der sandigen Fazies können mit der besseren Zementation erklärt werden (Peters et al., 2011). Houben et al. (2014) hat in sandig-karbonatreichen Bereichen totale Porositäten von 6-10% und in tonigen Bereichen solche von 12-25% festgestellt. Dabei sind den sandig-karbonatreichen Bereichen die Poren grösser als in den tonreichen Bereichen. In den tonigen Bereichen werden die höchsten Wassergehalte festgestellt.

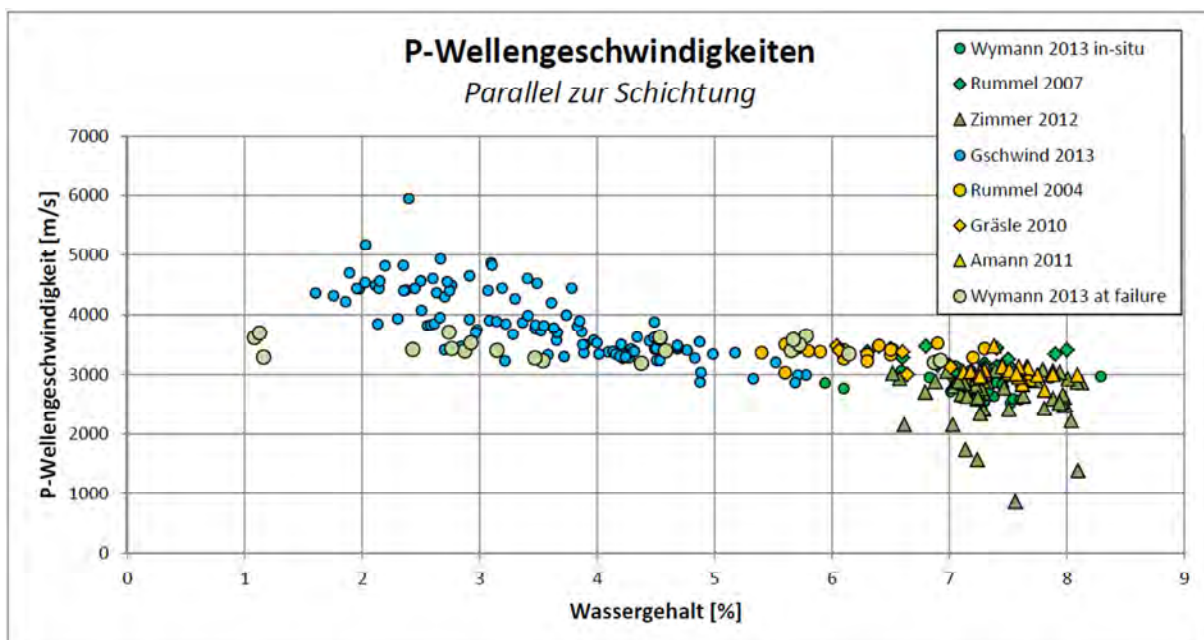
Bei den seismischen P-Wellengeschwindigkeiten V_p wurden in der sandigen Fazies 3280 m/s senkrecht zur Schichtung gemessen und damit rund 25% schneller als in der tonigen Fazies. Auch in Richtung parallel zur Schichtung liegen die Werte mit 3860 m/s um 13% hö-

her als in der tonigen Fazies. Zudem fällt auf, dass bei der sandigen Fazies die Spannbreiten viel höher sind. Diese starke Variabilität lässt sich mit der Heterogenität der sandigen Fazies erklären (siehe auch Kap. 2.1).

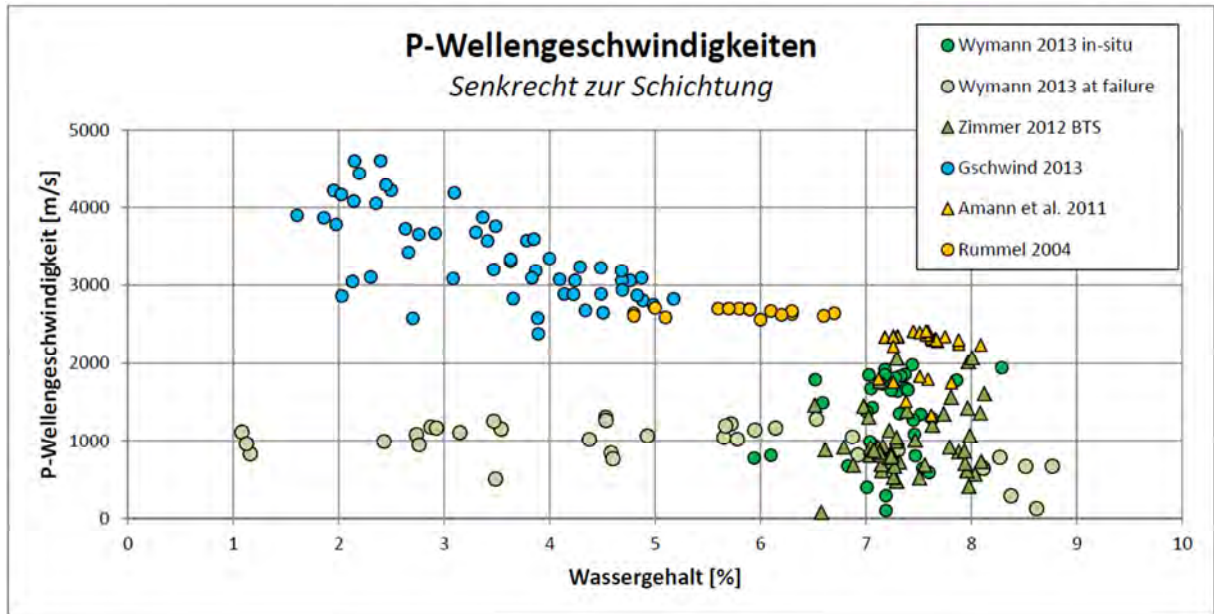
Generell werden parallel zur Schichtung die höchsten Geschwindigkeiten gemessen und es ist insbesondere auch bei den Proben von Gschwind (2013) aus der sandigen Fazies ein klarer Trend hin zu höheren Geschwindigkeiten bei höheren Saugspannungen auszumachen (**Figur 14 und Figur 15**).

Die Proben aus der sandigen Fazies zeigen deutliche höhere seismische P-Wellengeschwindigkeiten V_p an, während in der tonigen Fazies relativ konstante tiefe Werte registriert werden. Dies könnte auf die unterschiedliche Struktur der Proben zurückzuführen sein. Die Proben aus der TT-Nische sind weniger geschichtet und stärker bioturbiert, was einer Verringerung von V_p senkrecht zur Schichtung entgegenwirkt. Eine klare Homogenisierung der sandigen Fazies in der TT-Nische konnte jedoch nicht beobachtet werden. Im Gegenteil, die Heterogenität ist dort am höchsten (Müller & Jaeggi, 2012).

Sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung zeigt die sandige Fazies einen leicht anderen Trend an als die tonige Fazies (**Figur 14 und Figur 15**). Eine mögliche Erklärung ist die weniger stark ausgeprägte Schichtung in der sandigen Fazies. Trockenrisse haben einen geringen Einfluss auf V_p (Wymann, 2013). Wir weisen jedoch darauf hin, dass die unterschiedlichen Wassergehalte bei Gschwind (2013) alle bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 97-99% entstanden sind, während bei Wymann (2013) mit Luftfeuchtigkeiten von 20%-99% konditioniert wurde. Ein Wassergehalt von ca. 1% entstand im Exsikkator mit 20% relativer Feuchte, während bei Gschwind (2013) minimal höhere Wassergehalte unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 97% entstanden sind. Wahrscheinlich können die rein tonigen Proben das Wasser viel länger halten, sodass es höhere Saugspannungen benötigt, um solch tiefe Wassergehalte einzustellen. Ob dies ein faziespezifischer Effekt oder einfach ein systematischer Unterschied im Testsetup ist, bleibt abzuklären.

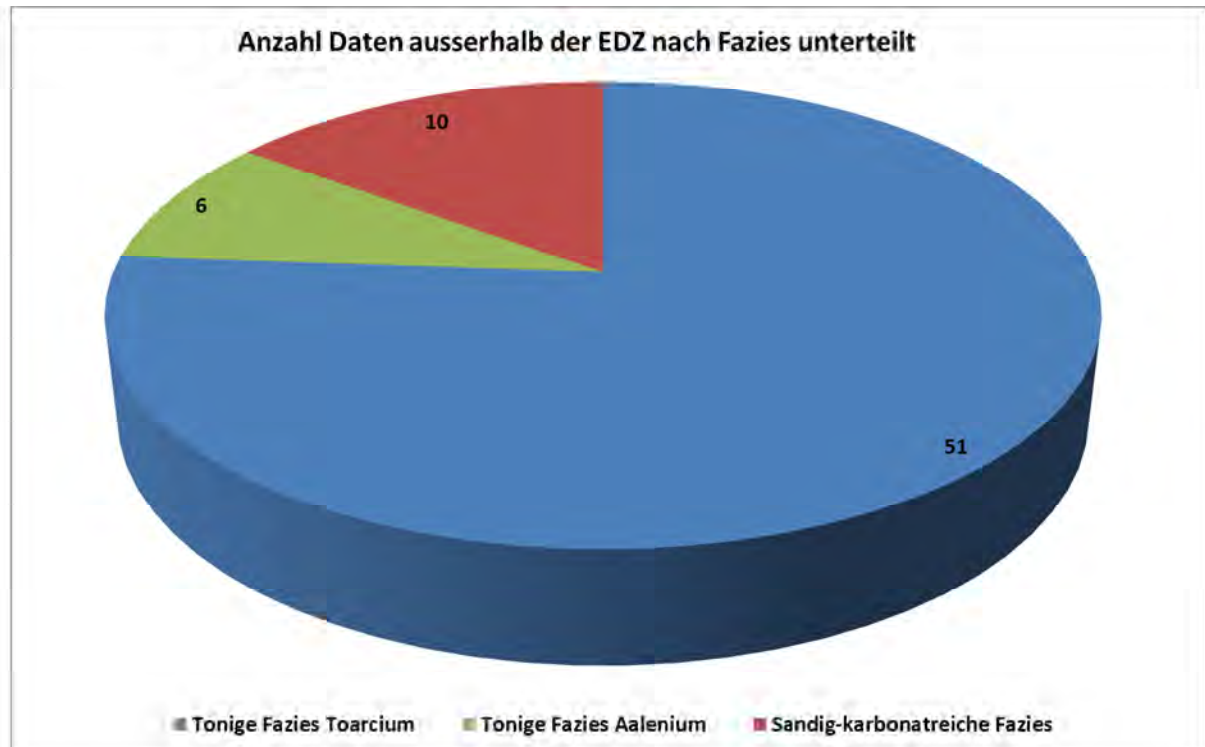


Figur 14: V_p -Daten parallel zur Schichtung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), Grün: Tonige Fazies (Toracium). Die Daten „Wymann 2013 at failure“ sind bereits von Mikrorissen durchsetzt (Verändert nach Thoeny, 2013).



Figur 15: Vp-Daten senkrecht zur Schichtung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), Grün: Tonige Fazies (Toarcium). Die Daten „Wymann 2013 at failure“ sind bereits von Mikrorissen durchsetzt (Verändert nach Thoeny, 2013).

3.4.2 Beziehungen zwischen den Kennwerten Hydrogeologie (siehe auch Appendix 5)

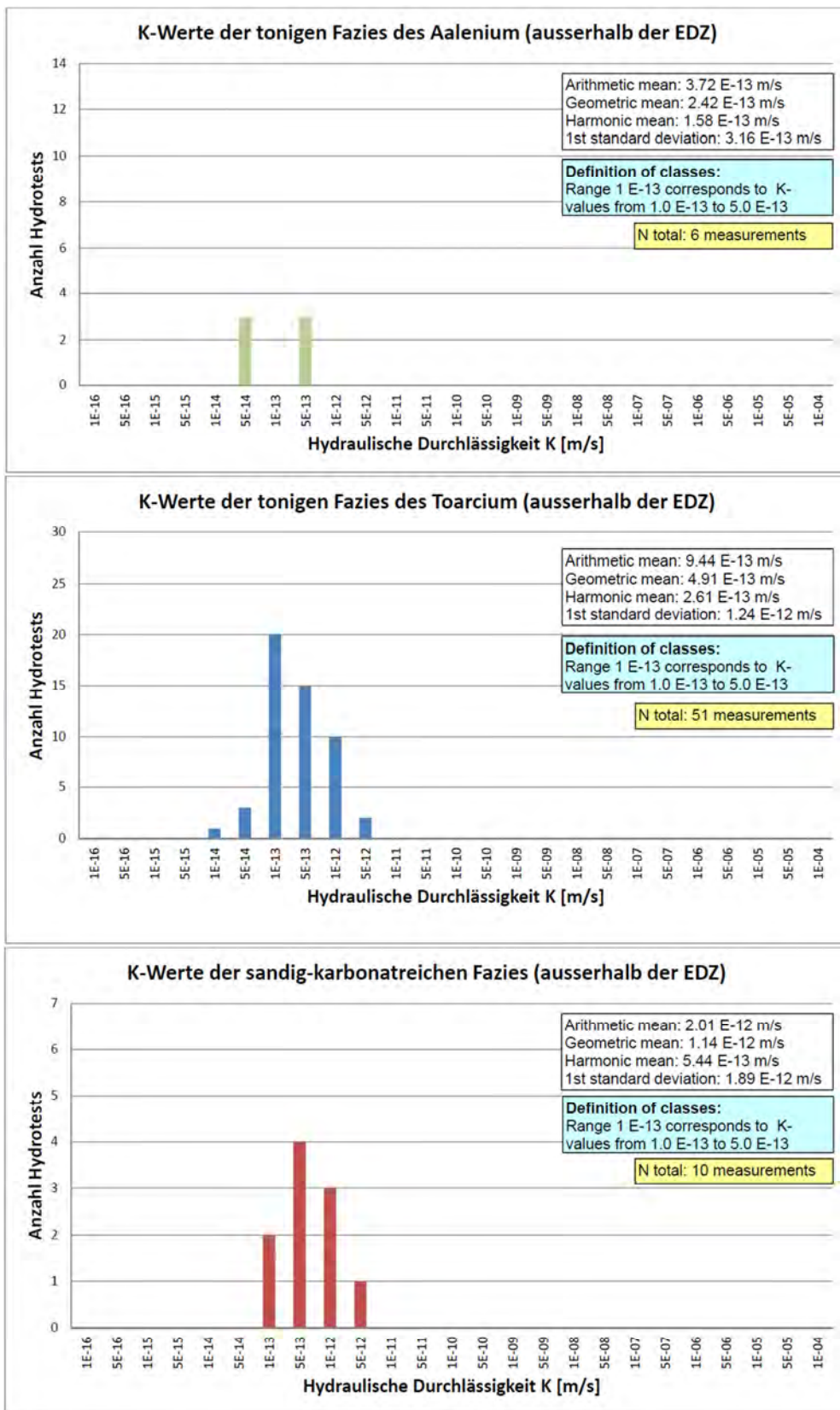


Figur 16: Verteilung aller hydraulischen Tests auf die verschiedenen Faziestypen. Es wurden nur Daten ausserhalb der Auflockerungszone (EDZ) berücksichtigt (verändert und ergänzt nach Lavanchy & Mettier, 2012). Sandige und sandig-karbonatreiche Fazies wurden aufgrund der geringen Anzahl Daten zusammengefasst.

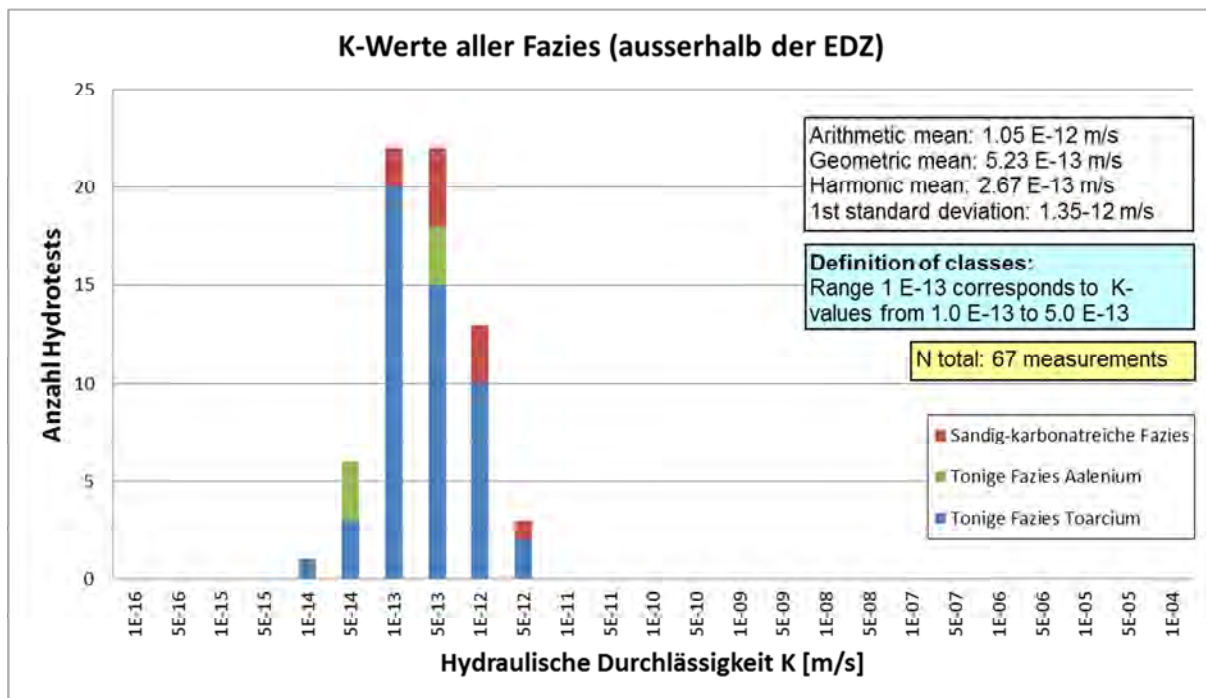
Der Blick auf Tabelle 4 zeigt bei der hydraulischen Leitfähigkeit für die tonige Fazies eine Bandbreite von $2\text{E-}14$ bis $1\text{E-}12$ m/s und einen Mittelwert von $2\text{E-}13$ m/s an (Bossart & Thury, 2008), was auch gut mit den Ergebnissen aus Lavanchy & Mettier (2012) übereinstimmt. Generell sind bei der Bandbreite die höheren Werte eher Intervallen parallel zur Anisotropie und die kleineren Werte eher Intervallen senkrecht zur Anisotropie zuzuordnen. Bei der sandigen Fazies zeigt die Kompilation aus Lavanchy & Mettier (2012) einen leicht höheren Wert für die sandige Fazies an und dies bei einer Bandbreite von $1\text{E-}13$ bis $5\text{E-}12$ m/s. Es handelt sich jedoch bei nur 10 verwendeten hydraulischen Tests um einen sehr kleinen Datensatz. **Figur 16** zeigt, dass von insgesamt 67 Testdaten aus hydraulischen Versuchen ausserhalb der EDZ nur gerade 10 (15%) der sandigen und der sandig-karbonatreichen Fazies zugeordnet werden können. 57 Werte sind aus der tonigen Fazies verfügbar, wobei nur 6 aus dem oberen Teil (Aalenium) und 51 Werte aus dem Toarcium stammen (**Figur 10**).

Mit Einbezug der Auflockerungszone (EDZ) zeigen die Histogramme eine viel grössere Bandbreite an hydraulischer Durchlässigkeit (**Appendix 5**). Die Durchlässigkeit schwankt von $1\text{E-}14$ bis $1\text{E-}5$ m/s. Die hohen Durchlässigkeiten sind typisch für geklüftete Gesteine. Ohne EDZ beträgt die Bandbreite nur gerade zwei Grössenordnungen. Die Datenlage wird bei Ausschluss der EDZ-Daten insbesondere bei den Daten aus der tonigen Fazies (Aalenium) und aus der sandigen und sandig-karbonatreichen Fazies sehr dürftig (**Figur 17 und Figur 18**). Dennoch lässt sich mit Vorsicht eine Aussage machen. Innerhalb der tonigen Fazies sind zwischen dem oberen Teil im Aalenium (geometrisches Mittel: $2.4\text{E-}13$ m/s, Bandbreite: $7.8\text{E-}14$ - $7.5\text{E-}13$ m/s) und dem unteren Teil im Toarcium (geometrisches Mittel: $4.9\text{E-}13$ m/s, Bandbreite: $3.1\text{E-}14$ – $6.3\text{E-}12$ m/s) keine signifikanten Unterschiede feststellbar, auch wenn von der Lithologie her geringfügige Unterschiede, z.B. im Gehalt an Biodetritus bestehen (siehe Kap. 2.1). Hingegen scheint die Durchlässigkeit in der sandig-karbonatreichen und sandigen Fazies (geometrisches Mittel: $1.1\text{E-}12$ m/s, Bandbreite: $1.2\text{E-}13$ – $5.4\text{E-}12$ m/s) geringfügig höher zu sein als in der tonigen Fazies.

Die Zusammenstellung der Daten inkl. EDZ (**Appendix 5**) zeigt klar, dass die hydraulischen Durchlässigkeiten in der EDZ erhöht sind. Die Durchlässigkeit der EDZ nimmt mit der Zeit wegen dem Prozess der Selbstabdichtung ab. Bei Experimenten im Felslabor Mont Terri konnte gezeigt werden, dass die Transmissivität innerhalb von 3 Jahren von $2\text{E-}7$ m²/s auf $2\text{E-}9$ m²/s abnimmt (Bossart et al., 2008). Bis die Durchlässigkeiten mit der Selbstabdichtung jedoch wieder Werte von „undeformiertem Gestein“ erreichen, dürften mehrere Zehner bis Hunderte von Jahren vergehen.



Figur 17: Histogramme der hydraulischen Durchlässigkeiten K. Es wurden nur Daten ausserhalb der EDZ berücksichtigt. Sandige und sandig-karbonatreiche Fazies wurden aufgrund der geringen Anzahl Daten ausserhalb der EDZ zusammengefasst.

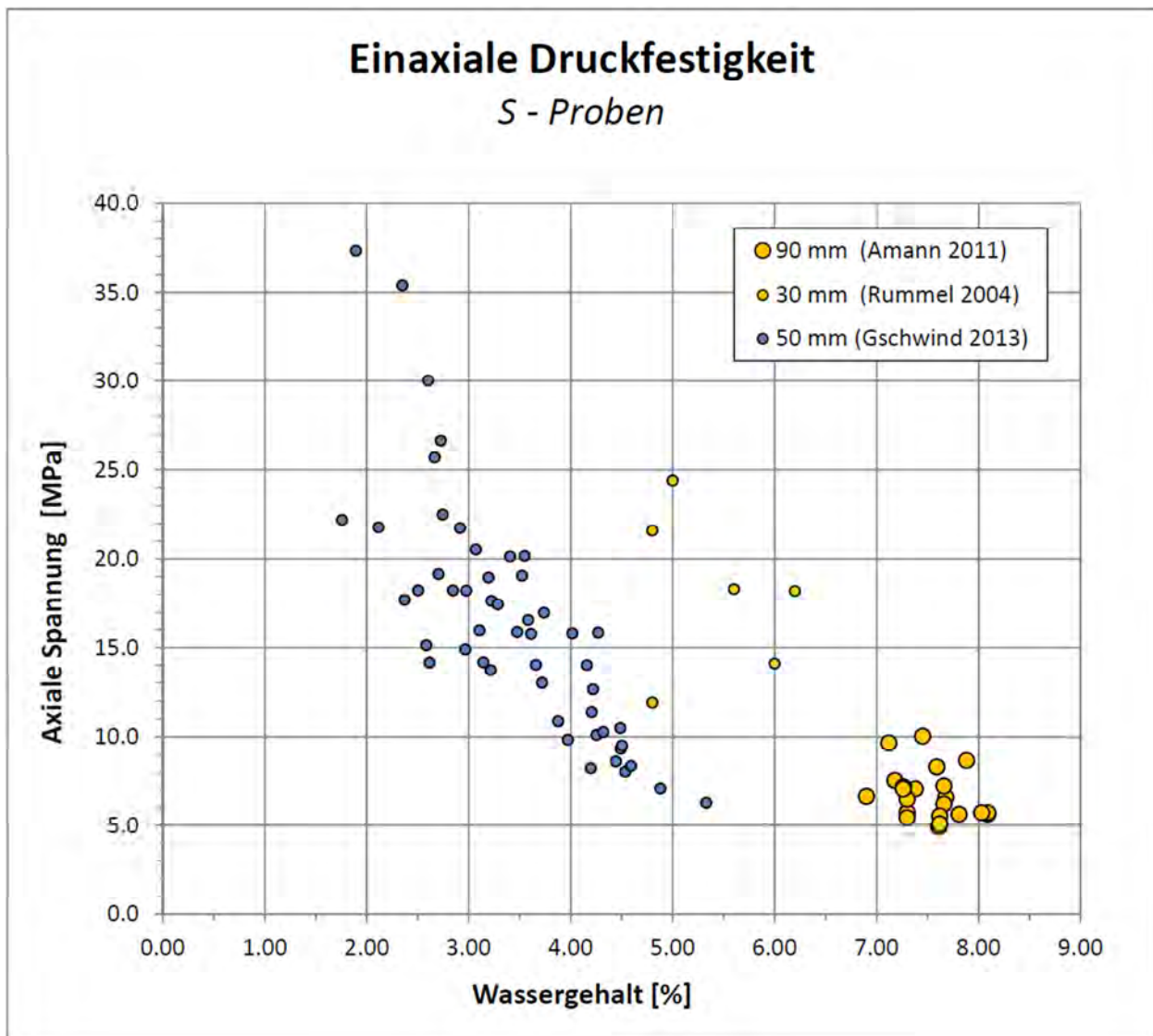


Figur 18: Zusammengesetztes Histogramm der hydraulischen Durchlässigkeiten K. Es wurden nur Daten ausserhalb der EDZ berücksichtigt. Sandige und sandig-karbonatreiche Fazies wurden aufgrund der geringen Anzahl Daten ausserhalb der EDZ zusammengefasst.

3.4.3 Beziehungen zwischen den Kennwerten Felsmechanik (siehe auch Appendix 6)

Die Spannbreiten für die sandige Fazies sind bei den felsmechanischen Parametern signifikant grösser als jene der tonigen Fazies (**Tabelle 4**). Diese grössere Variabilität stimmt mit der viel höheren Heterogenität in der sandigen Fazies überein. Die einaxiale Druckfestigkeit ist beim Datensatz aus der sandigen TT-Nische für Proben senkrecht zur Schichtung gar geringer als für die tonige Fazies. Bei der tonigen Fazies ist zwischen P- und S-Proben ein klarer Trend feststellbar, d.h. die Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtung ist mehr als doppelt so hoch. Allerdings stimmt der Wert aus Bossart & Thury (2008) von 25 MPa für S-Proben nicht mit dem Wert aus Bock (2009) von 15 MPa überein (Problematik der variablen Probensättigung bei den Tests). Bei der sandigen Fazies lässt sich hingegen kein Trend feststellen. Hier kommt vermutlich die Tragfähigkeit von karbonatischen oder siltigen und zementierten Lagen zur Wirkung, welche die Druckfestigkeit auch parallel zur Schichtung hoch halten.

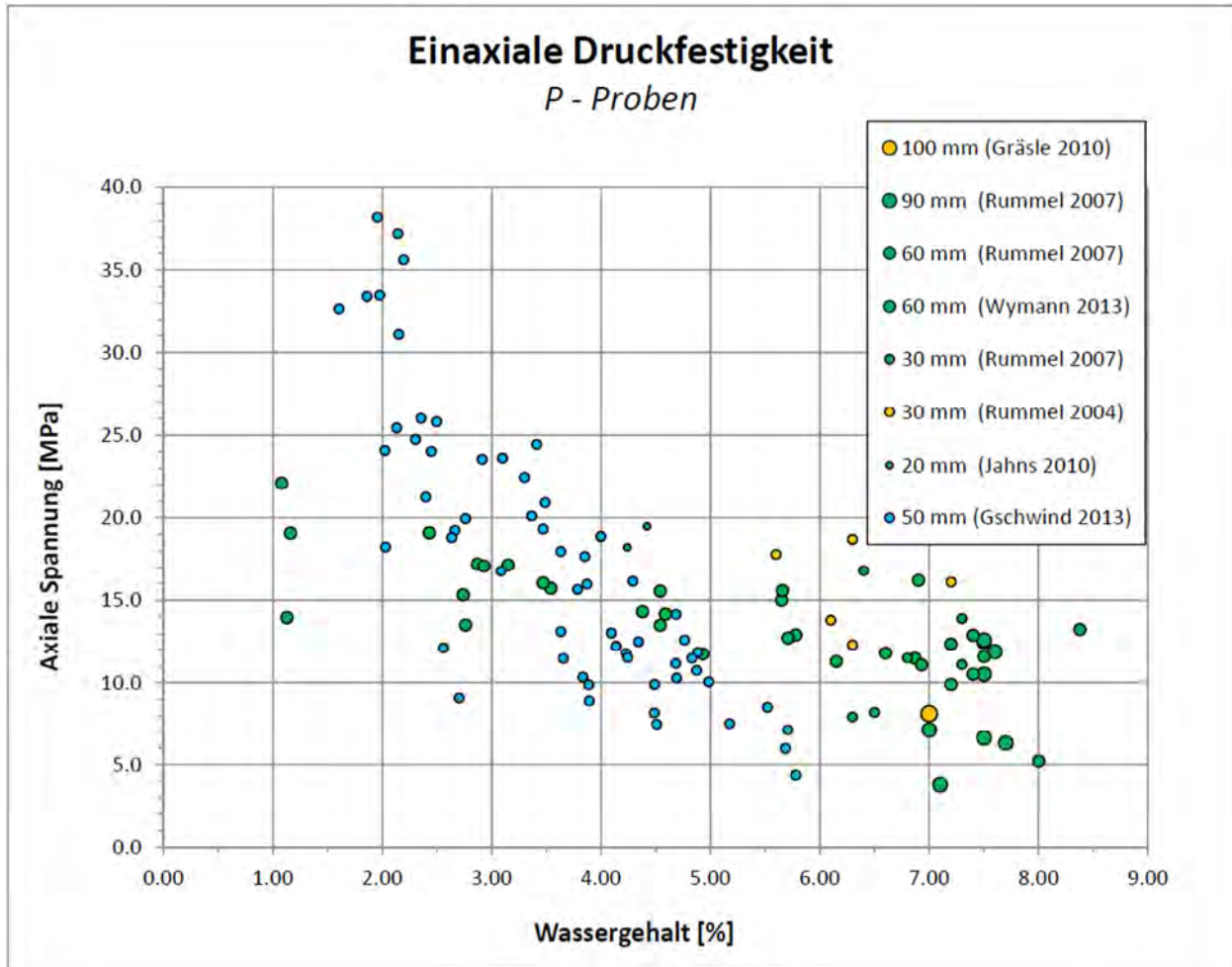
Beim Blick auf die Crossplots (**Figur 19 und Figur 20**) fällt sofort die starke Streuung der Datenpunkte auf. Proben aus der tonigen Fazies weisen generell eine geringere Streuung auf; dort sind insbesondere auch die Wassergehalte konstanter. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass den in den Plots dargestellten Werten (Proben aus sandiger Fazies und Proben aus toniger Fazies) unterschiedliche Prozesse zugrunde liegen. In der Arbeit von Wymann (2013) wurden die Proben explizit bei stark unterschiedlichen Wassergehalten getestet, um die Abhängigkeiten zu eruieren. Bei den Proben aus der sandigen Fazies (Gschwind, 2013) wurde mittels Exsikkatoren versucht, die Proben unter konstanter Feuchtigkeit bei 97% auf ein konstantes und möglichst natürliches Mass aufzusättigen. Die Kontrolle erfolgte über regelmässiges Wägen der Proben. Es wurde angenommen, dass wenn das Gewicht nicht mehr ändert die Saugspannung konstant ist und damit die Probe bei der vorgegebenen Luftfeuchtigkeit weder Wasser abgeben noch aufnehmen kann. Die Wassergehalte liegen bei diesem Datensatz zwischen 2 und 6%. Diese Variabilität des Wassergehaltes zeigt bei den Proben aus der sandigen Fazies so direkt die hohe Heterogenität an.



Figur 19: Daten einaxialer Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Millimeterangabe gibt den Probendurchmesser an. (Verändert nach Thoeny, 2013)

Es lassen sich also dennoch Aussagen machen; man muss sich aber klar vor Augen halten, wie die unterschiedlichen Wassergehalte der tonigen Proben zustande gekommen sind. Die Resultate von Gschwind (2013) entstammen aus Proben nach einer mehrwöchigen Konditionierung in einem Exsikkator bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 97-99%. Aufgrund der sedimentären Heterogenität der Proben ist auch die Streuung und somit der Wassergehalt sehr unterschiedlich. Die Daten von Amann (2011a) stammen aus der homogeneren tonigen Fazies. Zudem wurden die Proben nach der Extraktion hermetisch verpackt und nicht im Exsikkator konditioniert. So haben die Tests unter „natürlichen“ Bedingungen, also bei 100% Sättigung stattgefunden. Rummel & Weber (2004) haben Proben getestet, welche entweder in Aluminiumfolie verpackt oder in einer Druckkammer verschlossen waren. Es gab dabei keine Konditionierung. Die Daten zeigen eine klare Zunahme der Festigkeit mit abnehmendem Wassergehalt. Die grosse Heterogenität der sandigen Fazies führt zu einer sehr starken Streuung der Werte. Generell sind jedoch die Festigkeiten in der sandigen Fazies bei S-Proben (**Figur 19**) etwa doppelt so hoch wie in der tonigen Fazies. Dies gilt sowohl für P-Proben als auch für S-Proben. Diese Beobachtungen wurde auch von Gräsle & Plischke (2011) anhand von Triaxial-Tests bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken gemacht. In der

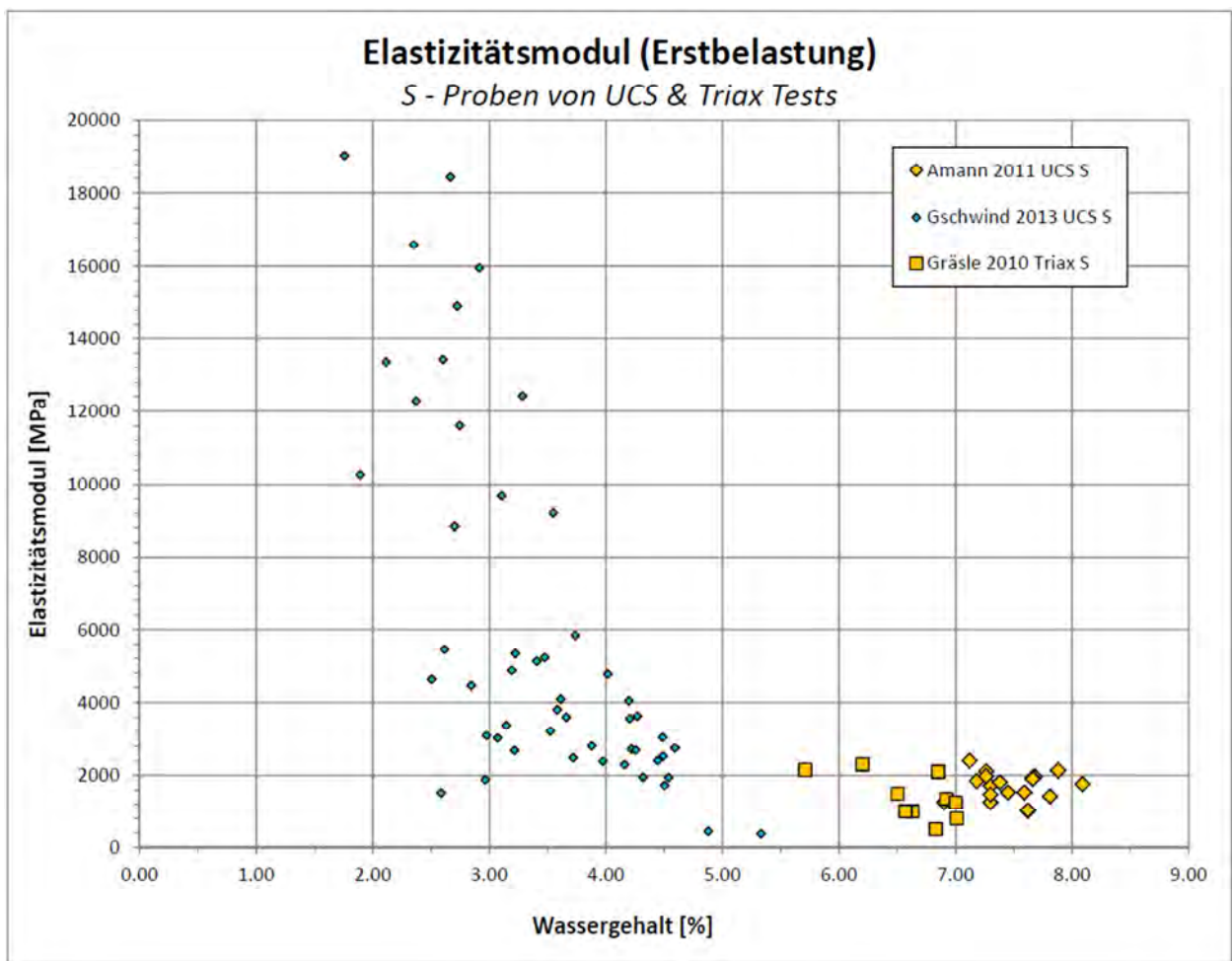
tonigen Fazies wurde für die Druckfestigkeit von S-Proben der Wert aus Amann et al. (2011a) genommen (**Tabelle 4**). Die Werte aus Bossart & Thury (2008) und auch von Bock (2009) sind mit 25 MPa, resp. 15 MPa zu hoch und wurden unter nicht klar definierten Sättigungsbedingungen ermittelt (ausgetrocknete Proben).



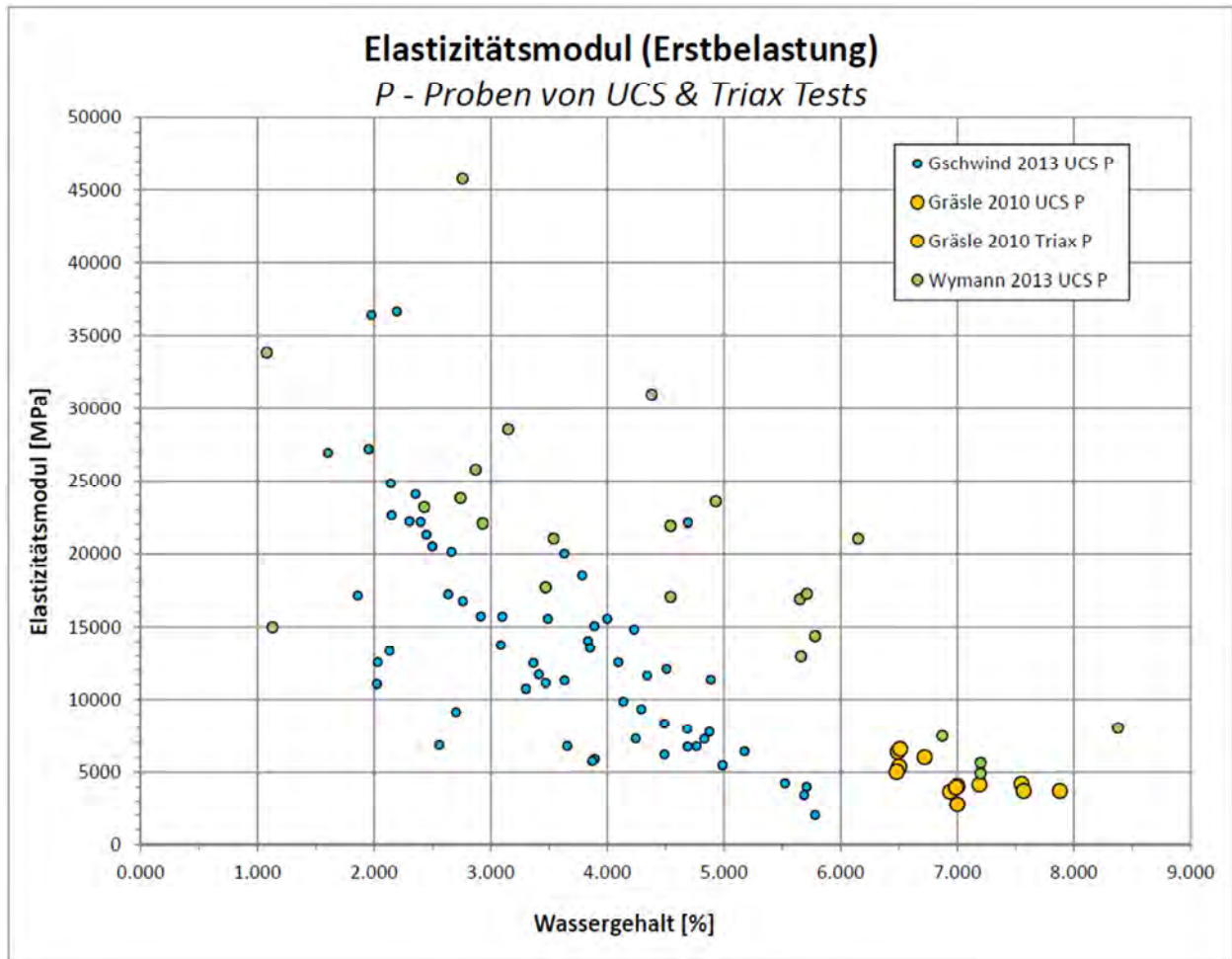
Figur 20: Daten einaxialer Druckfestigkeit parallel zur Schichtung. Grün: Tonige Fazies (Toarcium), Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Millimeterangabe gibt den Probendurchmesser an. (Verändert nach Thoeny, 2013).

Bei den P-Proben scheinen die Resultate aus der sandigen Fazies (Gschwind, 2013) mit abnehmendem Wassergehalt im Vergleich etwas steiler anzusteigen als in der tonigen Fazies (z.B. Wymann, 2013). Der Unterschied ist vermutlich lithologisch bedingt. Die Proben aus Gschwind (2013) wurden alle bei gleichen Sättigungsbedingungen getestet, bei geringen Saugspannungen von 0-4.1 MPa. Jedoch ist die sandige Fazies sehr heterogen ausgebildet. Kaufhold et al. (2013) haben bei sechs UCS-Tests aus der sandigen Fazies der TT-Nische Werte zwischen 21 bis 39 MPa mit einem Mittelwert von 30.5 MPa ermittelt. Diese Werte sind hoch und deuten auf einen geringen Wassergehalt von ca. 2% hin, welcher aber leider nicht bekannt ist. Bei Wymann (2013) wurde unter sehr unterschiedlichen Saugspannungen zwischen 0 und 220 MPa getestet. Die Daten sind daher zwischen den verschiedenen Faziestypen nur bedingt vergleichbar. Bock (2009) empfiehlt für die tonige Fazies einen Wert von 11 MPa für P-Proben. Ein ähnlicher Wert wird auch von Bossart & Thury (2008) angegeben. Dieser Wert für die einaxiale Druckfestigkeit toniger P-Proben stimmt gut mit den neuesten Daten überein.

Das Elastizitätsmodul ist in der sandigen Fazies generell höher als in der tonigen Fazies. Bossart & Thury (2008) geben für S-Proben ein E-Modul von 2'800 MPa und für P-Proben ein solches von 7'200 MPa an (**Tabelle 4**). Diese Werte entsprechen in etwa den Empfehlungen von Bock (2009), welche mit 4'000 bzw. 10'000 MPa nur geringfügig höher liegen. Auffallend ist bei den gegenüber von Bossart & Thury (2008) ca. doppelt so hohen Werte für die sandige Fazies vor allem die viel stärkere Streuung. Bei den Werten aus der sandigen Fazies der TT-Nische (Gschwind, 2013) schwanken die E-Module für S-Proben zwischen 400 – 19'000 MPa (**Figur 21**) und bei den P-Proben gar zwischen 2'000 – 36'700 MPa (**Figur 22**). Diese hohe Streuung ist wieder ein Ausdruck der starken Heterogenität in der sandigen Fazies. Gräsle & Plischke (2011) geben für die sandige Fazies in S-Orientierung 7'350 MPa und in P-Orientierung 12'600 MPa an. Jedoch ist aus den Daten nicht ersichtlich, bei welchen Wassergehalten die Tests durchgeführt worden sind.



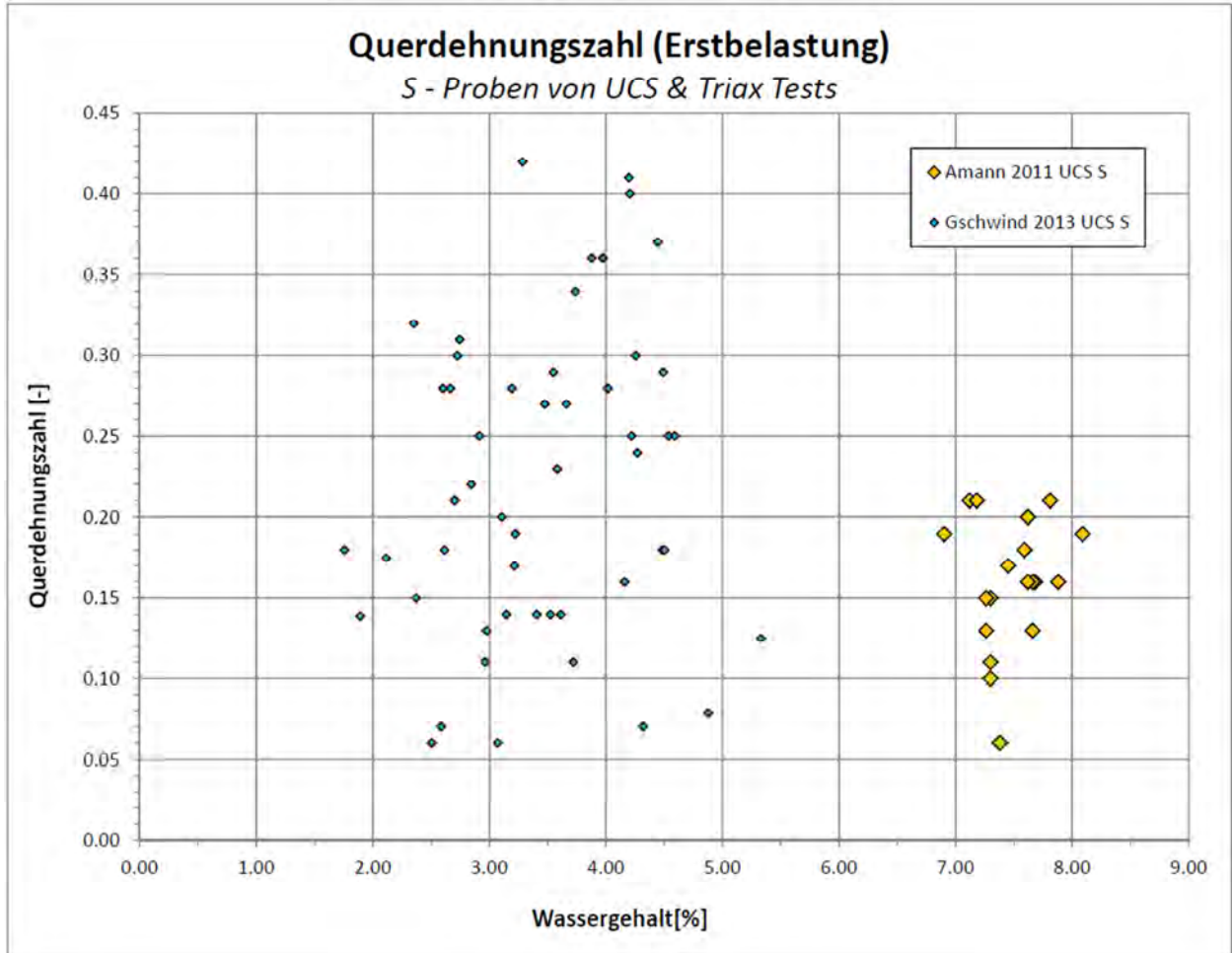
Figur 21: Elastizitätsmodul für S-Proben aus einaxialen (UCS) und triaxialen (Triax) Tests bei der Erstbelastung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 100 mm für Gräsle (2010), 90 mm für Amann (2011), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).



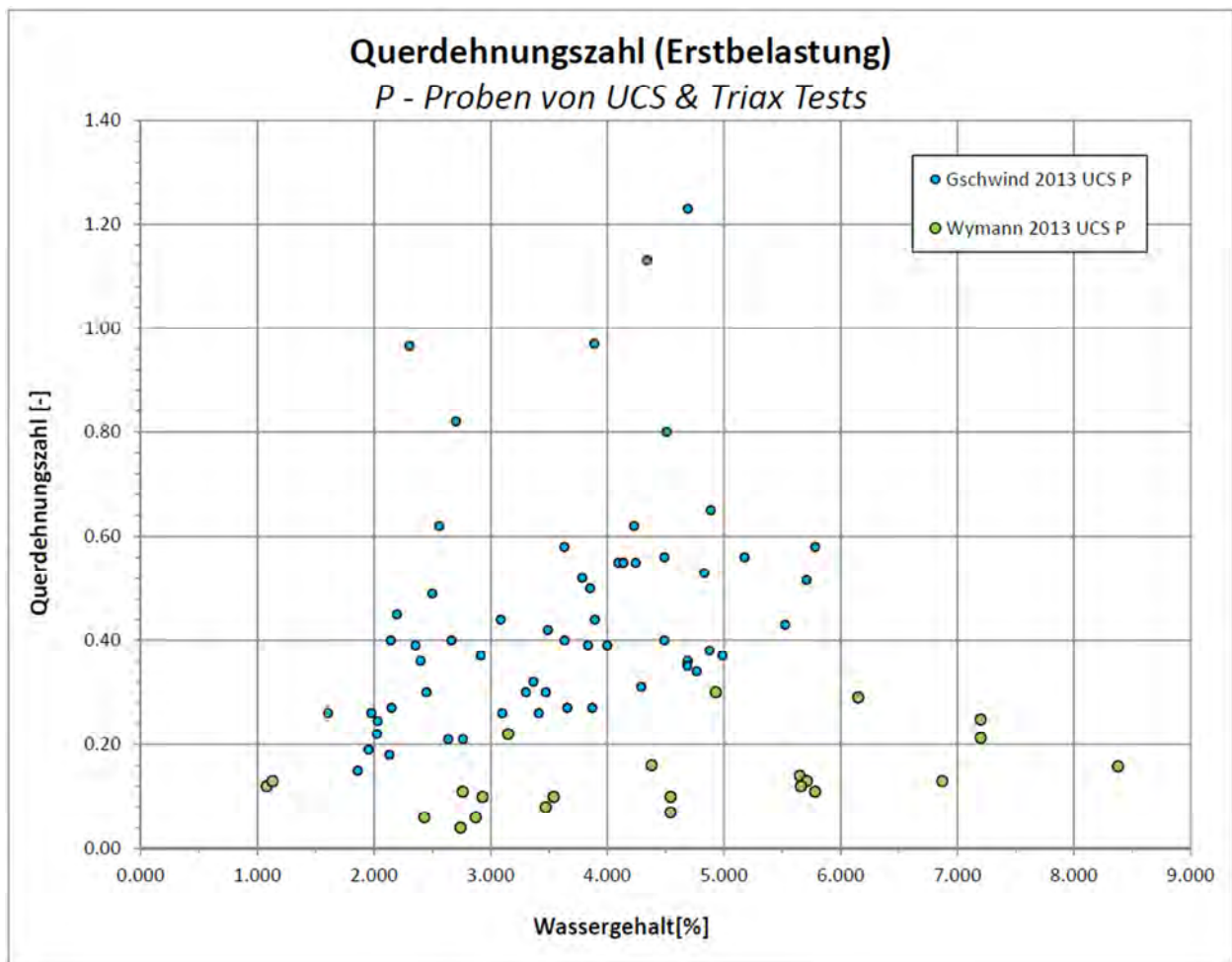
Figur 22: Elastizitätsmodul für P-Proben aus einaxialen (UCS) und triaxialen (Triax) Tests bei der Erstbelastung. Grün: Tonige Fazies (Toarcium), Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 100 mm für Gräsle (2010), 60 mm für Wymann (2013), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).

Figuren 21 und 22 zeigen, dass das Elastizitätsmodul mit zunehmendem Wassergehalt abnimmt. Dieser Trend konnte auch in Wild et al. (2014) nachgewiesen werden. Eine Unterscheidung nach P- und S-Proben scheint hier sinnvoll (vgl. **Figur 21** und **Figur 22**). Die S-Proben weisen vorwiegend Werte unterhalb von 6'000 MPa auf und dies für die tonige und die sandige Fazies. P-Proben weisen klar höhere Elastizitätsmodule auf, eine klare Unterscheidung zwischen Proben aus der tonigen und der sandigen Fazies scheint hier aber für geringe Wassergehalte mit den vorliegenden Daten kaum möglich. In der sehr heterogenen sandigen Fazies sind die E-Module generell höher, mit sehr hoher Streuung. Solche Werte werden bei der tonigen Fazies nur bei extrem hohen Saugspannungen erreicht. Die in Bock (2009) empfohlenen E-Module für die tonige Fazies liegen mit 4'000 MPa (S-Proben), resp. 10'000 MPa (P-Proben) um einen Faktor 2 höher als die Daten aus den neuesten Untersuchungen seit 2010 (z.B. Gräsle & Plischke, 2010, Amann et al., 2011a,b). Es liegt die Vermutung nahe, dass die Werte alle unter bereits sehr hohen Saugspannungen und daher nicht unter natürlichen Bedingungen bestimmt worden sind. Neueste Daten kommen bei P-Proben in der tonigen Fazies nicht über Werte von 6'000 MPa hinaus.

Die Werte für die Querdehnungszahl liegen bei der tonigen Fazies für S-Proben bei 0.33 und bei P-Proben bei 0.24 (Bossart & Thury, 2008) (**Tabelle 4**). Diese Werte stimmen für die tonige Fazies gut mit den Empfehlungen aus Bock (2009) überein. Bei der sandigen Fazies sind wie gewohnt die Streuungen viel höher (**Figur 23** und **Figur 24**). Es fällt auf, dass für die sandige Fazies die Querdehnungszahl bei P-Proben höher ist als bei S-Proben. Zudem sind die Werte teils über 0.5 und damit nicht realistisch (**Figur 24**).



Figur 23: Querdehnungszahl für S-Proben aus einaxialen Tests (UCS) bei der Erstbelastung. Blau: Sandige Fazies, Gelb: Tonige Fazies (Aalenium). Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 90 mm für Amann (2011), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).



Figur 24: Querdehnungszahl für P-Proben aus einaxialen Tests (UCS) bei der Erstbelastung. Grün: Tonige Fazies (Toarcium), Blau: Sandige Fazies. Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 60 mm für Wymann (2013), 50 mm für Gschwind (2013) (verändert nach Thoeni, 2013).

Die Querdehnungszahl liegt bei Amann et al. (2011a,b) und Wymann (2013) zwischen 0.05 und 0.3 für S- und P-Proben. Plottet man bei den P-Proben nur die Daten aus Wymann (2013), so ist eine leichte Zunahme von ν mit zunehmendem Wassergehalt auszumachen. Dies stimmt mit der Abnahme des E-Moduls mit zunehmendem Wassergehalt überein (Wild et al., 2014). Die Streuung der Werte aus der sandigen Fazies ist erneut gross. In der sandigen Fazies ist die höhere Querdehnungszahl bei P-Proben klar erkennbar. Die grosse Streuung der Daten ist vor allem bei stark anisotropen Proben beobachtet worden. Werte über 0.5 sind nicht realistisch, da dann die radiale Dehnung mehr als 50% der axialen Dehnung sein müsste, was nur durch in-elastische Verformungen erklärbar wäre. In der Literatur finden sich keine Werte grösser als 0.5. In den Versuchen von Gschwind (2013) kommen diese Werte vermutlich durch das frühe Wachstum von Mikrorissen entlang von tonig-sandiger Wechsellagerung zustande.

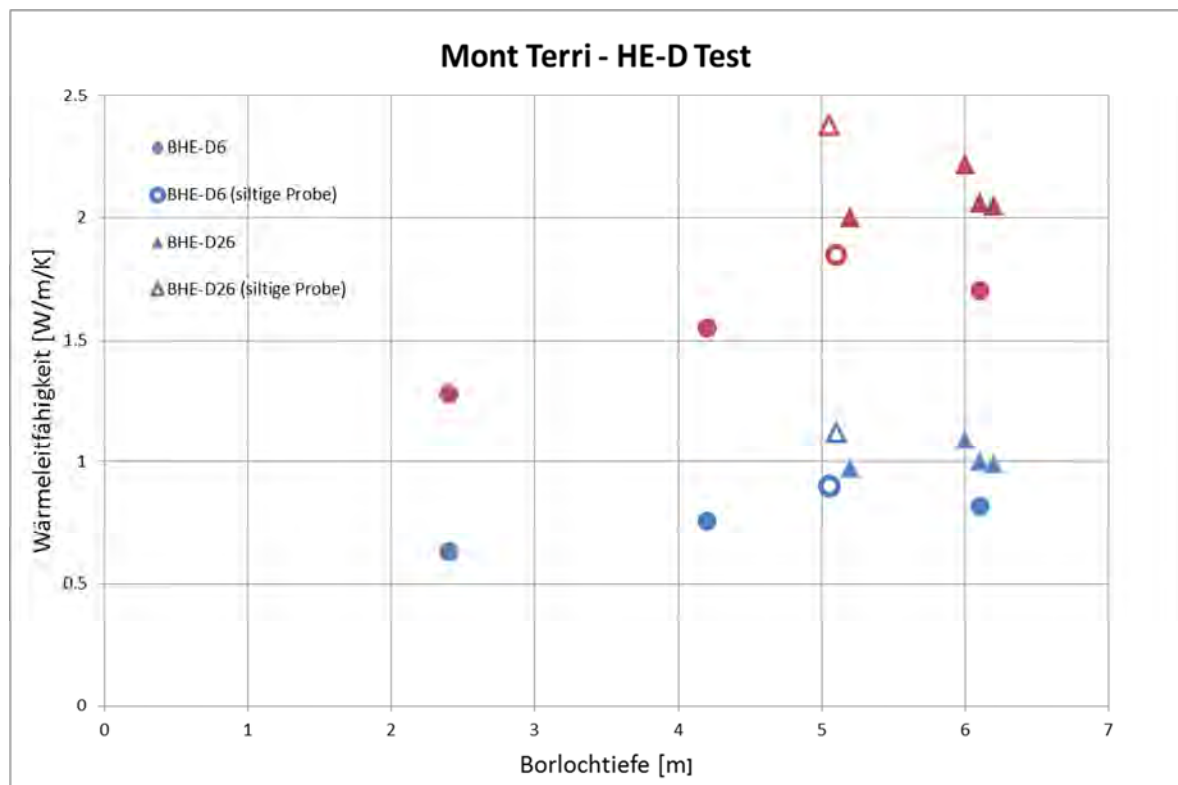
Gschwind (2013) hat 120 Proben aus der sandigen Fazies untersucht. Dies ist eine Menge, welche für diese Fazies durchaus als repräsentativ bezeichnet werden kann. Jedoch wurden die Proben alle aus einem kleinen Bereich der sandigen Fazies entnommen, entlang eines 5 Meter breiten Streifens (vgl. **Figur 3**). Proben aus den oberen Abschnitten der sandigen Fazies gegen die Passwang-Formation hin sind keine vorhanden. Zudem fehlen Vergleichswerte um die relativ grosse Streuung der Resultate, v.a. bei P-Proben zu minimieren. Die Werte aus Bock (2009) wurden für den Vergleich herangezogen. Insbesondere beim E-

Modul deuten die Werte bei Bock (2009) auf starke Austrocknung und somit Artefakte infolge fehlender oder unzureichender Konditionierung hin.

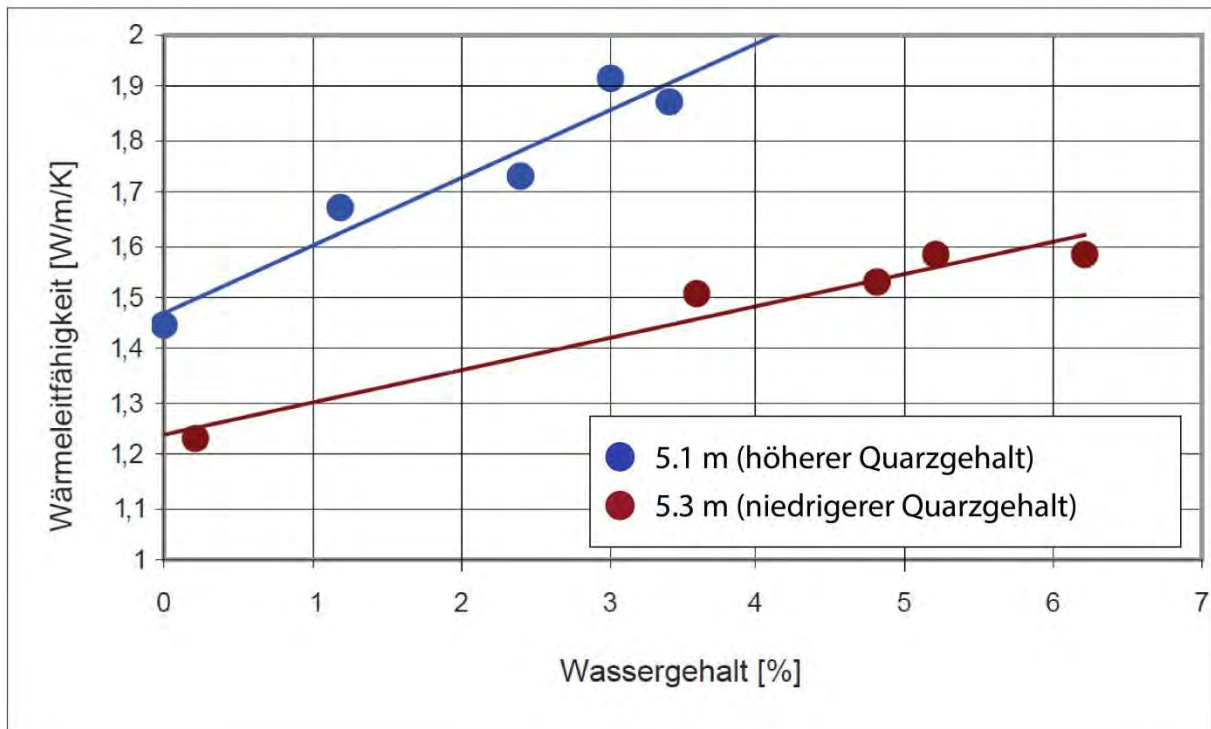
3.4.4 Resultate thermische Kennwerte

Laboranalysen für die thermische Leitfähigkeit an je 9 Proben in Richtung parallel und senkrecht zur Schichtung ergaben in der tonigen Fazies $2.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, resp. $1.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (**Figur 25**). Proben mit erhöhten Quarzgehalten erreichen dabei höhere Werte für die thermische Leitfähigkeit (Wileveau & Rothfuchs, 2007). Werden auch die quarzhaltigen Proben berücksichtigt, liegen die Werte etwas höher. Aus der sandigen Fazies liegen bis dato keine Werte vor. Es ist jedoch aus den Erfahrungen der Bohrung Benken (Nagra, 2001) und den Resultaten mit quarzhaltigen Proben aus der tonigen Fazies des Opalinus-Ton (Wileveau & Rothfuchs, 2007) mit signifikant höheren Werten in der sandigen Fazies zu rechnen.

Im Rahmen der bisherigen Heizexperimente wurden nur wenige thermische Kennwerte direkt an Probenmaterial ermittelt. Die Daten aus Bossart & Thury (2008) stammen aus Wileveau (2005). Dort wurden die Kennwerte aus Modellierung des HE-D Heizversuchs und wenigen Labortests ermittelt. Die Daten wurden mit verschiedenen Methoden ermittelt, jedoch weichen die Resultate sehr stark voneinander ab. Das Mittel aus in-situ Messungen und Laborproben ergibt als beste Schätzung am Mont Terri in der tonigen Fazies $2.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ parallel zur Schichtung (P), $1.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ senkrecht zur Schichtung (S) und $860 \text{ J/Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ für die Wärmekapazität.



Figur 25: Thermische Leitfähigkeit von 9 P- (rot) und 9 S- (blau) Proben aus den beiden Bohrungen BHE-D6 und BHE-D26 in Funktion der Bohrtiefe (verändert aus Wileveau & Rothfuchs, 2007). Die Proben aus BHE-D6 wurden mit Alufolie evakuiert und die Proben aus BHE-D26 in Harz eingegossen.



Figur 26: Thermische Leitfähigkeit für zwei Proben (5.1 Meter und 5.3 Meter) aus der Bohrung BHE-D26 in Funktion der Wassersättigung (aus Wileveau & Rothfuchs, 2007). Die Probe in blau weist einen höheren Quarzgehalt auf (Akkumulation von Quarz in Siltfraktion innerhalb der tonigen Fazies).

Gemäss frühen Untersuchungen (Buntebarth, 2004) ist die thermische Leitfähigkeit des Opalinus-Ton im Bereich von 20-100°C Felstemperatur kaum von der Temperatur abhängig. Auch die Abhängigkeit vom Umgebungsdruck ist gering. Anders verhält es sich beim Wassergehalt.

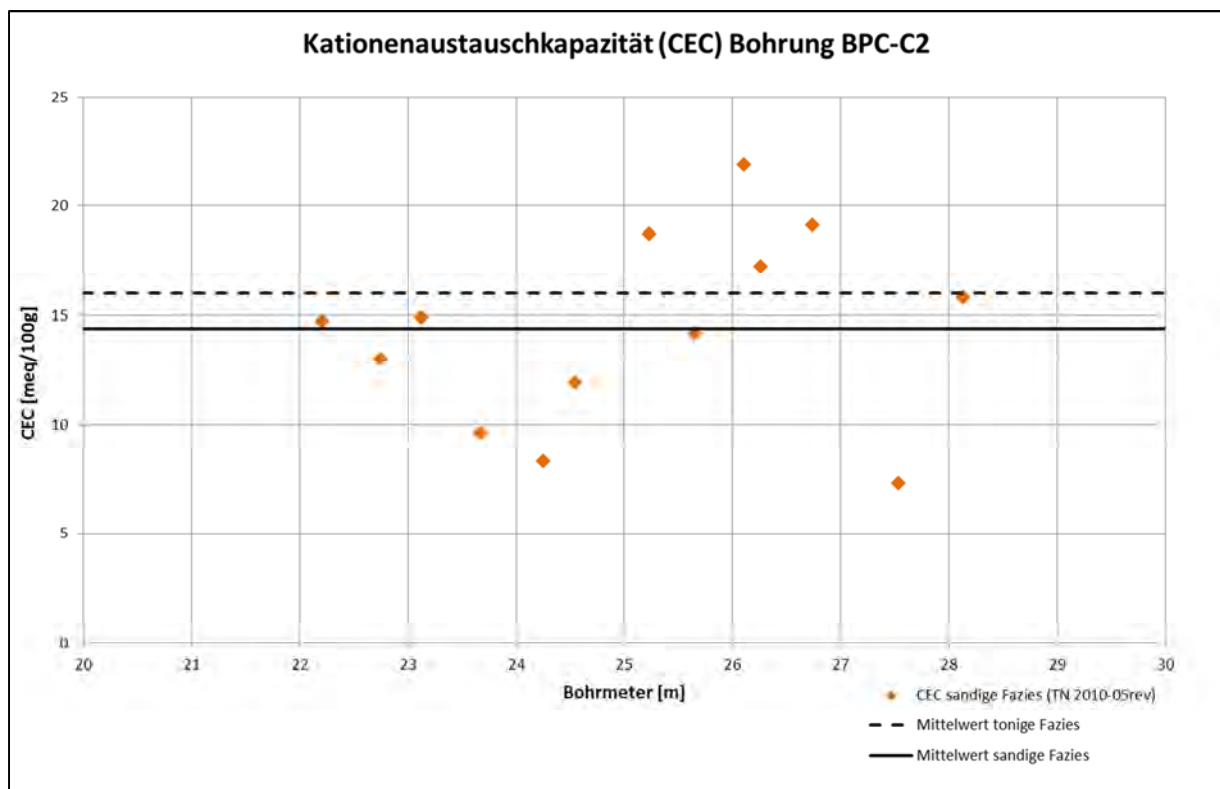
Wie in Wileveau & Rothfuchs (2007) für zwei Proben bei unterschiedlicher Sättigung dargestellt ist die thermische Leitfähigkeit im Opalinus-Ton klar vom Wassergehalt abhängig. Dabei ergibt sich eine lineare Beziehung (**Figur 26**). Bei der Probe mit höherem Siltgehalt nimmt die thermische Leitfähigkeit mit zunehmendem Wassergehalt stärker zu als in einer rein tonigen Probe; dies wurde auch bei den Opalinus-Ton Proben aus der Bohrung Benken beobachtet. Dieses Verhalten für Proben aus dem Felslabor Mont Terri müsste jedoch mit weiteren repräsentativen Proben aus der sandigen oder der sandig-karbonatreichen Fazies verifiziert werden.

In der Bohrung Benken wurde an 10 Proben aus dem Opalinus-Ton die spezifische Wärmekapazität bestimmt (Nagra, 2001). Diese Messungen ergaben einen Mittelwert von $920 \pm 80 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, was sehr gut mit dem Wert aus dem Felslabor Mont Terri übereinstimmt.

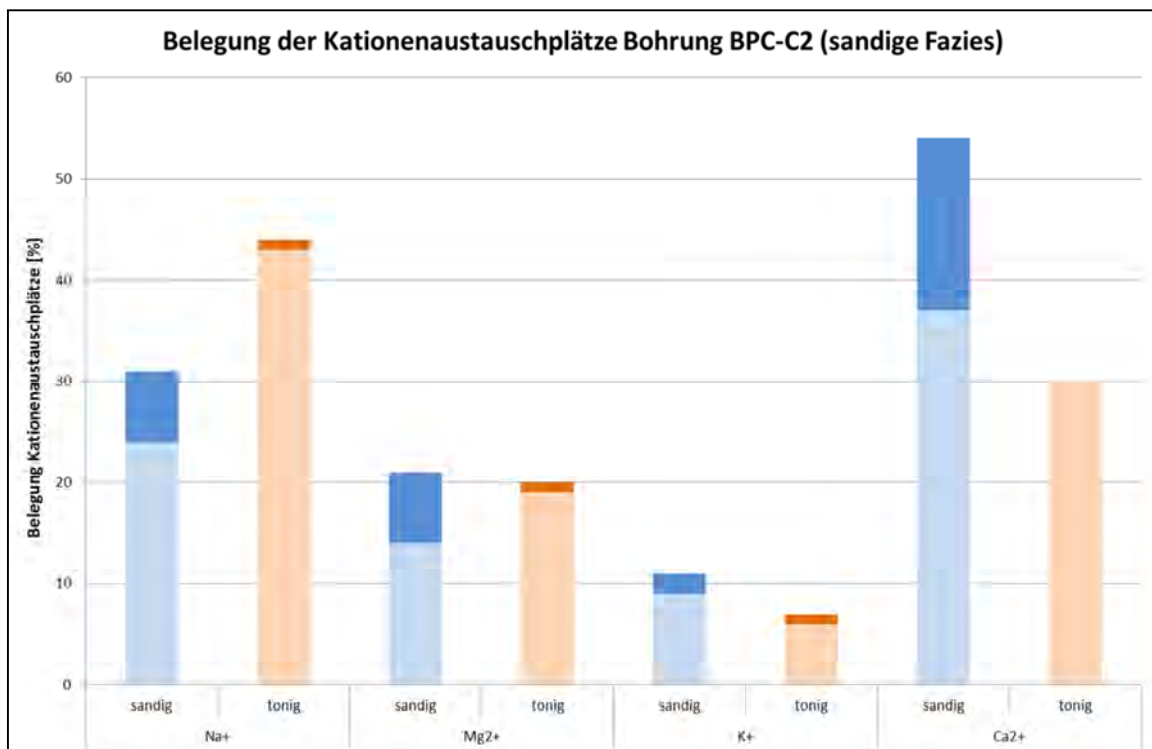
Für die thermische Leitfähigkeit wurde an 3 gesättigten Proben aus der Bohrung Benken aus einem sandigen, quarzreichen Abschnitt $3.23 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ für P-Proben, resp. $1.79 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ für S-Proben ermittelt (Nagra, 2001). In einem tonigen und quarzarmen unteren Abschnitt wurden an 3 Proben mit $2.04 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ für P-Proben, resp. $1.26 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ für S-Proben massiv tiefere Werte ermittelt. Diese Werte für den tonigen Abschnitt stimmen ziemlich gut mit den Werten aus dem Felslabor Mont Terri überein. Bei diesen Messungen zeigt sich ebenfalls klar der Einfluss vom Quarzgehalt. Je höher der Quarzgehalt, desto höher ist die thermische Leitfähigkeit.

3.4.5 Beziehungen zwischen den Kennwerten Geochemie

Für die totale Kationenaustauschkapazität (CEC) in der tonigen Fazies, bestimmt mit Hilfe der Ni-en Lösung, geben Bossart & Thury (2008) einen „best estimate“ von 11.10 meq/100 g Gestein bei einer Spannbreite von 9.44 bis 13.35 meq/100 g an. Bei der Co-Hexaminalösung ergibt sich ein höherer Mittelwert von 16 meq/100 g (**Tabelle 4**). Werden nun diese Werte mit den CEC-Werten (Cobalt-Hexamin-Trichlorid Kolorimetrie) aus der sandigen Fazies der BPC-C2 Bohrung verglichen (Lerouge et al., 2011), so fällt der etwas geringere Mittelwert von 14.4 meq/100 g bei einer sehr grossen Streuung von 7.3 bis 21.9 meq/100 g auf (**Figur 27**). Der Unterschied zur tonigen Fazies ist somit eher gering, jedoch ist die Streuung der Werte infolge der für die sandigen Fazies typischen Heterogenität gross. Schaut man hingegen auf die Belegung der austauschbaren Kationen in der sandigen Fazies, so sind klare Unterschiede zur tonigen Fazies erkennbar. Gemäss Lerouge et al. (2011) wird in der sandigen Fazies von Na 24-30% belegt (tonige Fazies: 43-44%), bei Mg sind es 14-21% (tonige Fazies: 19-20%), bei Ca sind es 37-41% (tonige Fazies: 30%) und bei K 9-11% (tonige Fazies 6-7%) (**Figur 28**).



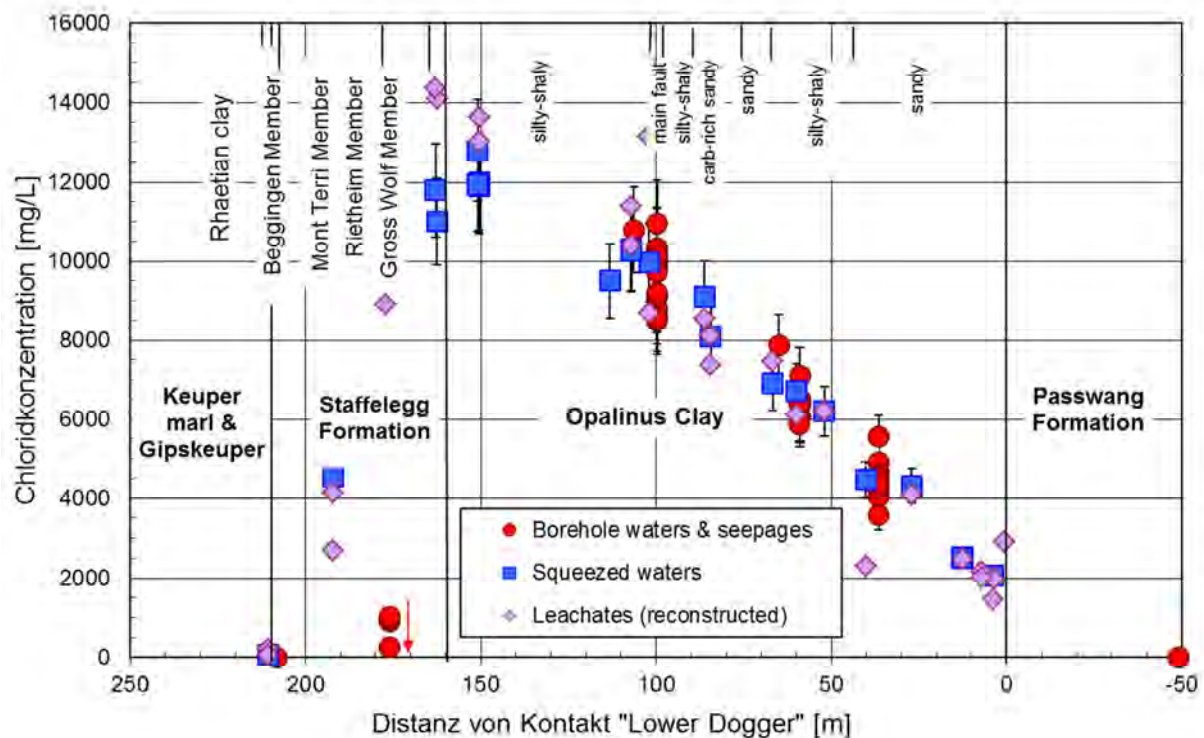
Figur 27: Kationenaustauschkapazität (CEC) aus der sandigen Fazies der Bohrung BPC-C2 (Daten aus Lerouge et al., 2011). Die ausgezogene Linie markiert den Mittelwert aus diesen Daten und die gestrichelte Linie den Mittelwert aus Daten der tonigen Fazies (Bossart & Thury, 2008).



Figur 28: Belegung der Kationenaustauschplätze von Proben der sandigen Fazies aus der Bohrung BPC-C2 (blau) (Lerouge et al., 2011) im Vergleich mit der tonigen Fazies (orange) (Pearson et al., 2003). Die oberen dunkleren Farben auf der Säule geben die Variabilität der Belegung an. Es wurden 24 Proben aus der tonigen und 13 Proben aus der sandigen Fazies gemessen.

3.4.6 Resultate geochemische Zusammensetzung der Porenwässer

In diesem Kapitel sind die Resultate aus Pearson et al. (2003) mit neuesten Daten aus Vinsot et al. (2007) und Bossart & Thury (2008) zusammengefasst. Dabei wird für die genauen umfassenden Wasseranalysen auf die jeweiligen Berichte verwiesen. Die Konzentrationen und Zusammensetzung der Porenwässer sind stark vom jeweiligen Probenstandort innerhalb der Mont Terri Antiklinale und der räumlichen Nähe zu den umgebenden Aquiferen in den Rahmengesteinen und damit von der Porenstruktur und den damit verbundenen Transportprozessen abhängig. Daher kann die Zusammensetzung der Porenwässer am besten mit Hilfe der Verteilung der Chloridkonzentrationen entlang der Sicherheitsgalerie diskutiert werden (Figur 29).



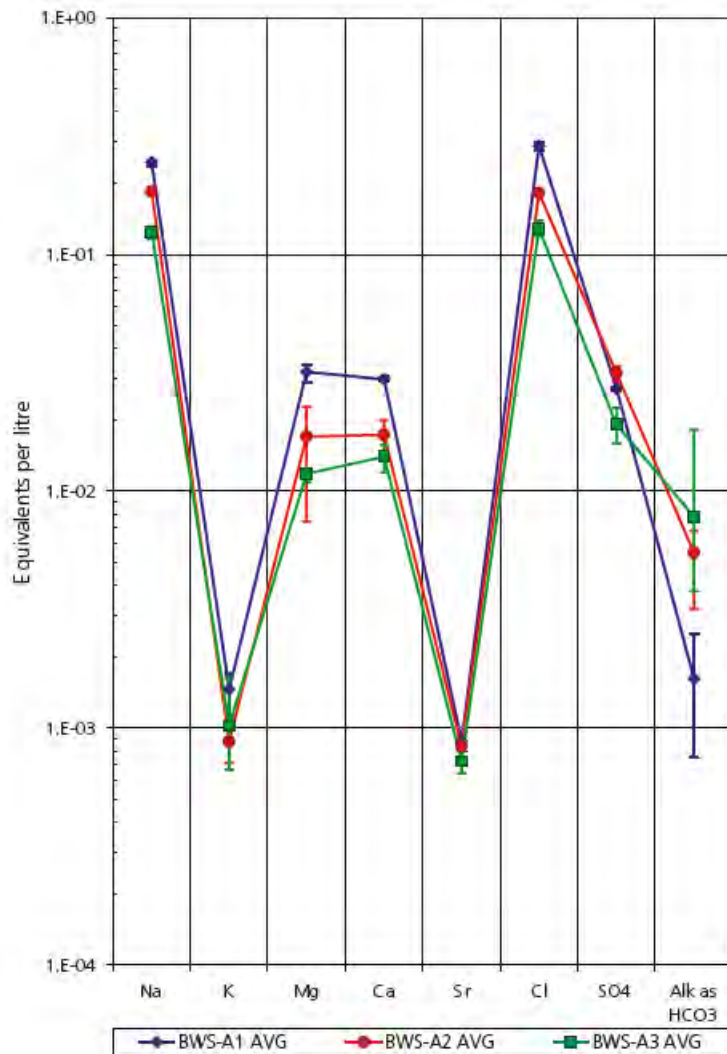
Figur 29: Verteilung der Chloridkonzentration entlang der Sicherheitsgalerie des Felslabors Mont Terri. Es werden Proben aus Bohrlöchern/Zuflüssen, Auspressen aus Gestein und Auslaugung unterschieden (Figur aus Pearson et al., 2003, angepasst nach Wersin et al., 2011). Dem Profil liegen Daten aus über 40 Bohrungen entlang der Sicherheitsgalerie und der Galerie 98 zugrunde.

An der Basis des Opalinus-Ton und im Gross-Wolf-Member der angrenzenden Staffelegg-Formation herrscht ein NaCl-Porenwassertyp (**Figur 29**) mit einer maximalen Chlorid-Konzentration von ca. 13'000 bis 14'000 mg/l vor. Die Salinität verringert sich nach oben gegen das Hangende im Opalinus-Ton, sowie auch gegen das Liegende in der Staffelegg-Formation hin (**Figur 29**). An der Grenze zur Passwang-Formation liegen die Konzentrationen nur noch gerade bei ca. 2'000 mg/l. Über den gesamten Opalinus-Ton hinweg werden sehr regelmässige Konzentrationsgradienten beobachtet, für Chlorid und natürliche stabile Wasserisotopen ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{37}\text{Cl}$) mit einem Maximum an der Basis des Opalinus-Ton und einer graduellen Verringerung gegen die umgebenden Aquifere hin. Die Modellierung der Konzentrationsprofile mit einem Diffusions-Modell zeigt, dass die gemessenen Konzentrationen konsistent sind mit einer sehr langsamen Diffusion der Ionen aus der Formation heraus (Mazurek, 2007). Diese Beobachtung zusammen mit den sehr tiefen hydraulischen Leitfähigkeiten zeigt, dass der Transport von gelösten Stoffen durch Advektion vernachlässigbar ist.

Die räumliche Verteilung der natürlichen Tracer (Chlorid, Helium, stabile Wasserisotopen: $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{37}\text{Cl}$) und die Langzeitentwicklung der Porenwässer wurde am Mont Terri eingehend untersucht. Daten aus natürlichen Tracer Profilen entlang des Opalinus-Ton zeigen, dass der Transport von diesen nicht verzögerten Elementen auf der Formations-Skala und in geologischen Zeiträumen vom Transportprozess der Diffusion dominiert ist. Auch diverse Diffusionsexperimente am Mont Terri haben ergeben, dass die molekulare Diffusion den Haupttransportprozess darstellt. Die Bromid/Chlorid-Verhältniss aller gewonnenen Proben sind sehr ähnlich und entsprechen dem für Meerwasser zu erwartenden Wert. Aus der chemischen Zusammensetzung der Porenwässer ergibt sich für die nicht-reaktiven gelösten Anteile klar eine marine Herkunft. Die maximal gemessene Ionen-Konzentration beträgt 18.3 g/l und wurde im unteren Teil des Opalinus-Ton in der tonigen Fazies (Toarcium) ge-

messen. Diese Konzentration entspricht immer noch etwa der halben Konzentration von heutigem Meerwasser.

Natrium (Na^+) ist das dominante Kation in allen Porenwässern und ändert sich systematisch mit dem Chloridgehalt (Cl^-). Eine Abnahme von Na^+ mit Abnahme von Cl^- ist verbunden mit abnehmenden Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}) Konzentrationen, wobei das Mg^{2+} etwas stärker abnimmt (**Figur 30**). Mit abnehmendem Cl^- nimmt zudem die Alkalinität zu. Das Kalium (K^+) verhält sich anders. Diese Konzentrationen scheinen durch den Kationenaustausch beeinflusst zu sein. Dieser Austausch ist jedoch gemäss Pearson et al. (2003) komplex und schwierig zu quantifizieren.



Figur 30: Schoeller-Diagramm vom Mittelwert diverser Wasserproben aus den Bohrungen BWS-A1, BWS-A2 und BWS-A3. Die Standorte dieser 3 Bohrungen sind auf **Figur 2** eingezeichnet (Figur aus Pearson et al., 2003).

Stärker saline Wässer haben tiefere Alkalinitäten (0.2 bis 2.5 mmol) und daher geringere pH-Pufferungskapazitäten als weniger saline Wässer (3.6 bis 5.1 mmol). Der Partialdruck für CO_2 ermittelt aus Feldmessungen des pH und der Alkalinität oder dem totalen anorganischen Kohlenstoff (TIC) variiert zwischen $10^{-3.0}$ bis $10^{-4.7}$ bar. Resultate von Vinsot et al. (2007) haben gezeigt, dass der Partialdruck für CO_2 nicht umgekehrt proportional zur Chlorid-Konzentration ist, wie es von Pearson et al. (2003) postuliert worden ist. Es wird nun ge-

nerell angenommen, dass der Partialdruck für CO₂ in der Formation in der Grössenordnung von 10⁻² bar liegt und unabhängig ist von den Chlorid-Konzentrationen, dies wegen der vergleichbaren Mineralogie über die gesamte Formation hinweg.

Organisches Material ist im Opalinus-Ton als DOC-Konzentration mit ca. 14 mg/l angegeben. Im Gestein ist das organische Material thermisch unreif, mit einem vernachlässigbaren Potential für Kohlenwasserstoffproduktion (Pearson et al., 2003). Nur ca. 0.15% vom totalen organischen Kohlenstoff (TOC) sind humoser Herkunft, der Rest ist vermutlich Kerogen oder uncharakterisiertes organisches Material.

Eine mikrobielle Aktivität mit autochthonen Bakterien-Populationen ist am Mont Terri belegt. Aufgrund des spärlichen Platzangebotes (mittlerer Porendurchmesser von 40 Nanometern) führen diese Bakterien ein eher harsches Dasein, können aber das geochemische Milieu (pH, Redoxpotential) über lange Zeiträume steuern. Mittels mikrobieller Analysen an unkontaminierten Opalinus-Ton Proben konnte die ribosomale RNA sequenziert werden. Die Resultate lassen auf zwei Sulfat-reduzierende indigene Bakterienarten schliessen (Poulain et al., 2008).

3.4.7 Resultate Gaseintrittsdrucke

In den Bestimmungen von Miehe et al. (2010) wird von einer scheinbaren Gaspermeabilität gesprochen. Diese ist scheinbar, weil sie unter Annahme des radialen Flusses der Darcy-Gleichung für kompressible Flüssigkeiten berechnet wurde. Da der Porenraum für den Gasfluss aber während der Injektion nicht konstant bleibt und der Fluss nicht laminar ist, sind die Bedingungen für Darcy-Fluss nicht gegeben. Die so gewonnenen Daten ergeben so eine scheinbare Gaspermeabilität.

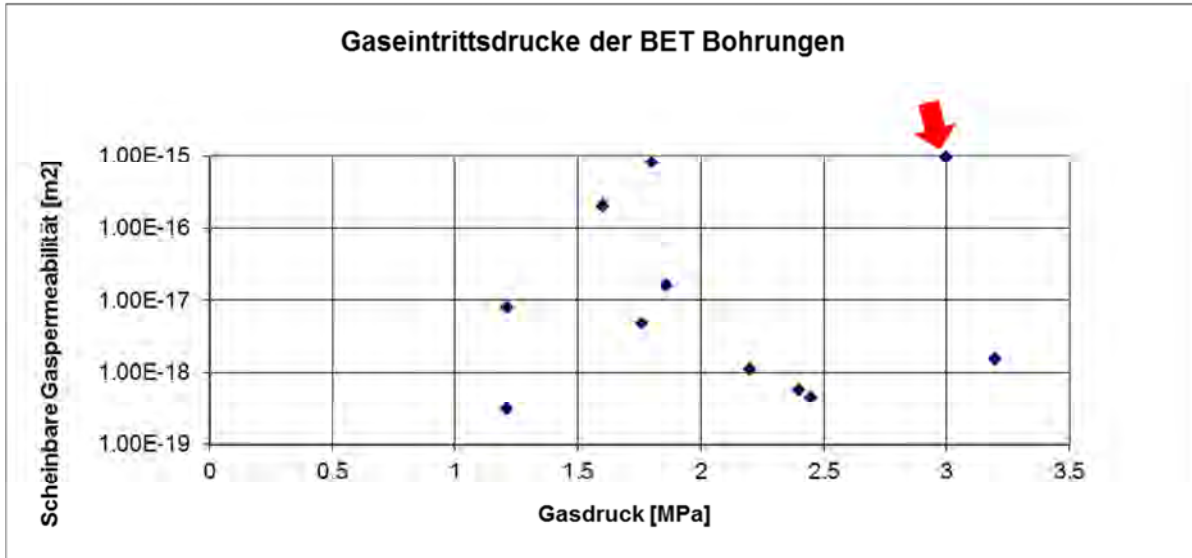
Im Felslabor Mont Terri wurden zahlreiche Gastests mit verschiedenen Gasen (Wasserstoff, Helium, Stickstoff, Argon) durchgeführt. Diese Tests ergaben relativ geringe Gaseintrittsdrucke von rund 2 MPa mit einer Bandbreite von 1.2 bis 3.2 MPa (Miehe et al., 2010) (**Figur 31**). Die intrinsische Gaspermeabilität variiert zwischen 2E-20 m² und 1E-14 m², wobei eine direkte Abhängigkeit von Injektionsdruck und Gaspermeabilität besteht (Marschall et al., 2002, Miehe et al., 2010).

In der Bohrung Benken wurden Gaseintrittsdrucke an drei Proben gemessen (Nagra, 2001). Diese liegen zwischen 5 und 9 MPa bei einer intrinsischen Permeabilität von 1E-20 m² bis 1E-21 m². Gemäss Marschall et al. (2002) können die höheren Werte gegenüber dem Mont Terri mit der geringeren intrinsischen Permeabilität und der geringeren effektiven Spannung aufgrund der geringeren Überlast am Mont Terri erklärt werden.

Im Felslabor Mont Terri wurden folgende Gastransportprozesse beobachtet:

- 1) Je nach Löslichkeit der Gase werden diese im Porenwasser gelöst.
Experimente am Mont Terri: PC-C (Gas and Porewater Equilibration) Experiment
- 2) Der Gasfluss kann mit einem klassischen Zwei-Phasenfluss beschrieben werden.
Experimente am Mont Terri: HG-A (Gas Path through Host Rock and along Seals) Experiment
- 3) Sobald sich der Gasdruck bei Gasinjektionsversuchen dem Wert der minimalen Hauptspannung annähert, beginnt die Dilatanz-gesteuerte Gasausbreitung. Dabei öffnen sich die Schichtflächen und die tektonischen Brüche.
Experimente am Mont Terri: HG-A, HG-C (Long-term Gas Migration) Experiment, HG-D (Reactive gas transport in argillaceous formations) Experiment
- 4) Gasfracking kann bei hohen und abrupt applizierten Gasinjektionsdrücken erzeugt werden.
Experimente am Mont Terri: HG-C, HG-D, GS (Gasfrac Self-Sealing) Experiment

- 5) Bei Wasserstoff wurde ein reaktiver Gastransport beobachtet, mit Sulfatreduktion und der Bildung von Sulfiden.
 Experimente am Mont Terri: MA (Microbial activity) Experiment, HT (Hydrogen Transfer in Opalinus Clay) Experiment



Figur 31: Gaseintrittsdrücke vs. scheinbare Gaspermeabilität aus in-situ Versuchen in den BET Bohrungen im Bereich der SB-Nische des Felslabors Mont Terri. Die Daten stammen alle aus der tonigen Fazies (Daten aus Miehe et al, 2010). Der rote Pfeil gibt die Bildung eines Gasfracks an.

4 Beurteilung des gegenwärtigen Wissensstandes und Vorschläge für weiterführende Arbeiten und Untersuchungen

4.1 Beurteilung Wissensstand

Generell ist aus dem Felslabor Mont Terri eine sehr umfangreiche Datengrundlage vorhanden. Jedoch finden sich bei genauerer Analyse einige Lücken. Diese gilt es in den kommenden Jahren noch zu schliessen.

Bei den Parametern aus der Petrophysik ist bereits eine grosse Datenfülle vorhanden. Die Skalare wurden in den letzten 18 Jahren ausreichend erfasst. Diese Daten können auch mit einigermaßen einfachen Gerätschaften von vielen Organisationen und Instituten selbständig bestimmt werden. Momentan werden Arbeiten über die Porenstruktur des Opalinus-Ton (z.B. Houben et al., 2014) und die Porenräume in tektonischen Überschiebungen (z.B. Laurich et al., 2014 submitted) vorangetrieben.

Für die Parameter aus der Hydraulik ist der Wissensstand insbesondere bei der sandig-karbonatreichen und der sandigen Fazies eher dürftig. Durchlässigkeiten sind sonst über das ganze Labor verteilt in grosser Anzahl vorhanden. Selbst nach Ausscheidung der von der EDZ beeinflussten Daten ist die Anzahl zumindest für die tonige Fazies immer noch ausreichend und aussagekräftig. Momentan sind nach Ausscheidung der EDZ-beeinflussten Daten 57 Datenpunkte aus der tonigen, 10 aus der sandigen und 0 aus der sandig-karbonatreichen Fazies vorhanden. Für den spezifischen Speicherkoefizient sind nur ganz wenige Daten aus der tonigen Fazies vorhanden. Vergleichswerte aus der sandigen oder sandig-karbonatreichen Fazies sind bis dato keine vorhanden.

Bei den Parametern der Felsmechanik ist die Datenlage trotz grösseren Datenmengen ziemlich heterogen. Insbesondere die unterschiedlichen Sättigungsbedingungen, bei denen die Testreihen durchgeführt worden sind, erschweren die Vergleichbarkeit der Testreihen untereinander. Zudem ist vor allem die tonige Fazies aus dem Toarcium umfassend getestet worden. Aus dem Aalenium und insbesondere dem obersten Teil der tonigen Fazies gibt es viel weniger Daten. Bislang gibt es erst einen statistisch relevanten Datensatz mit klar definierter Konditionierung aus der sandigen Fazies. Infolge der hohen Heterogenität und der Skaleneffekte sind diese Daten aber schwer mit den tonigen Proben vergleichbar. Es sind jedoch klare Trends hin zu höheren Festigkeiten feststellbar, die Streuung der Kennwerte ist aber sehr hoch und klare Vorhersagen für Festigkeiten aufgrund der angetroffenen Geologie lassen sich wegen dem Problem der repräsentativen Probenentnahme momentan noch nicht machen.

Bei den thermischen Parametern ist die Abhängigkeit vom Quarzgehalt erkannt worden, jedoch liegen keine grösseren Datensätze vor. Zudem müssten weitere Untersuchungen faziesspezifisch durchgeführt werden. Alle bisherigen Heizexperimente und auch die neuesten grossskaligen Experimente HE-E und FE wurden, resp. werden in der tonigen Fazies durchgeführt. Die tonige Fazies ist daher auch bei den thermischen Parametern gut untersucht. Genauere Daten über die Abhängigkeiten zur Mineralogie fehlen jedoch bis dato.

Bei den geochemischen Daten wurde das Augenmerk auf die Kationenaustauschkapazität (CEC) gelegt. Dort sind dank den jüngst durchgeführten Bohrungen (BPC-C2 und BDB-1) auch Daten aus der sandigen Fazies vorhanden. Die Unterschiede zwischen toniger und sandiger Fazies sind bei der CEC minimal, hingegen gibt es bei der Belegung der Kationenaustauschplätze doch gewisse Unterschiede. Der Datensatz für geochemische Parameter wird in den nächsten ein bis zwei Jahren mit den DB (Deep borehole) und DB-A (Porewater Characterization – Benchmarking and Investigation of Interface to adjacent Aquifer) Experimenten faziesspezifisch noch massiv erweitert werden. Bezüglich Porenwasserzusammensetzung wurden in den Anfangsjahren des Felslabors bereits viele Untersuchungen durchgeführt (z.B. Pearson et al., 2003). Momentan sind am Mont Terri vor allem Korrosionsexperi-

mente und Wasserstoffbildung, sowie die mikrobielle Aktivität grosse Themen, welche in mehreren aktuellen Experimenten erforscht werden.

Die geochemische Zusammensetzung der Porenwässer ist am Mont Terri sehr detailliert untersucht worden (Pearson et al., 2003). Weitere umfassende Untersuchungen diesbezüglich sind im Rahmen der Experimente DB und DB-A an der 250 Meter tiefen BDB-1 Bohrung am Laufen.

Daten für Gaseintrittsdrucke sind ausschliesslich aus der tonigen Fazies vorhanden. Hier wäre es durchaus wünschenswert, Vergleichsdaten aus der sandigen Fazies zu haben.

4.2 Vorschläge für weiterführende Arbeiten und Untersuchungen

Faziesspezifische Datenerhebungen

Der sandigen Fazies wird beim Bau eines zukünftigen Endlagers eine wichtige Bedeutung zukommen. Insbesondere die felsmechanische Festigkeit macht diesen Faziestyp für den Bau von Kavernen und Galerien interessant. Lithostratigrafisch werden in allen 4 Profilen Mont Terri, Riniken, Weiach und Benken sandige und teils karbonatische Tonserien angetroffen. Der Vergleich zu den potentiellen Standorten in der Nordschweiz ist also zumindest von der Lithostratigrafie her gültig.

Generell sollten verstärkt Daten aus der sandigen Fazies erhoben werden. Dabei sind die Einflüsse der Skala zu berücksichtigen. Es müssen Homogenbereiche definiert und diese geeignet beprobt werden. Die Untersuchungen aus der sandigen Fazies in der TT-Nische haben gezeigt, dass für felsmechanische Parameter Probenzylinder von 51x120 mm wenig repräsentativ sind. Zudem müssen in Zukunft bei allen felsmechanischen Untersuchungen von den Probenkörpern jeweils die Wassergehalte oder die Saugspannung angegeben werden. Eine klar definierte Konditionierung der Proben (z.B. bei 97% relativer Luftfeuchtigkeit) muss standartmässig durchgeführt werden, um die Vergleichbarkeit der Datensätze untereinander zu erhöhen.

Hydraulische und auch felsmechanische Kennwerte sollten vermehrt im Aalenium der tonigen Fazies, in der sandig-karbonatreichen Fazies und in der sandigen Fazies erhoben werden. Aus dem Aalenium des Opalinus-Ton sind im Gegensatz zum Toarcium nur wenige belastbare hydraulische Daten (ausserhalb der EDZ) vorhanden.

Es sollte versucht werden, mit einfachen Korrelationen (z.B. Tongehalt versus einaxiale Druckfestigkeit) die felsmechanische Variabilität in der sandigen Fazies mit Daten aus geophysikalischen Logs zu koppeln. Dazu muss die Beziehung zwischen felsmechanischen und geophysikalischen Eigenschaften über Kalibrationen hergestellt werden. Momentan läuft in dieser Richtung eine Erweiterung der Masterarbeit von S. Gschwind (ETHZ), wo mittels XRD-Analysen die Mineralogie genauer bestimmt und mit dem sehr umfangreichen Datensatz von einaxialen Druckfestigkeiten aus der sandigen Fazies korreliert werden soll. So sollte es später möglich sein, anhand von einfachen Gamma-Logs indirekt auf Festigkeitsparameter des Opalinus-Ton schliessen zu können.

Thermische Kennwerte, wie die thermische Leitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität sind bisher nur in der tonigen Fazies erhoben worden. Hier sollte bei zukünftigen Heizexperimenten oder Laborkampagnen unbedingt die sandige Fazies berücksichtigt werden.

Alle bisherigen und aktuellen Gasexperimente (HG-A, HG-D, HT, CS, CS-A), Korrosionsexperimente (IC, IC-A) und Diffusionsexperimente (DR, DR-A) sind in der tonigen Fazies durchgeführt worden (**Figur 32**). Zukünftige Nachfolgeexperimente sollten die sandige Fazies berücksichtigen.

Daten ausserhalb und innerhalb der Auflockerungszone (EDZ)

Hydraulische Versuche sollten wenn möglich ausserhalb der EDZ oder gar ausserhalb der um Galerien herum hydraulisch beeinflussten Zone ausgeführt werden. Diese Zone beträgt gemäss Erfahrungen aus dem LP (Long-term monitoring of pore pressures) Experiment im Felslabor ca. 30 m. Von den 225 vorhandenen hydraulischen Tests waren ca. 2/3 beeinflusst und daher für die Evaluierung der natürlichen Variabilität nicht geeignet. Zudem sollen vermehrt „Crosshole-Tests“ zum Einsatz kommen, damit die Variabilität der Speichereigenschaften des Opalinus-Ton noch genauer untersucht werden kann. Dies ist insbesondere auch wichtig im Hinblick auf die Verifizierung der aus Druckdaten bestimmten Speicherkoefizienten (Matray & Bailly, 2014).

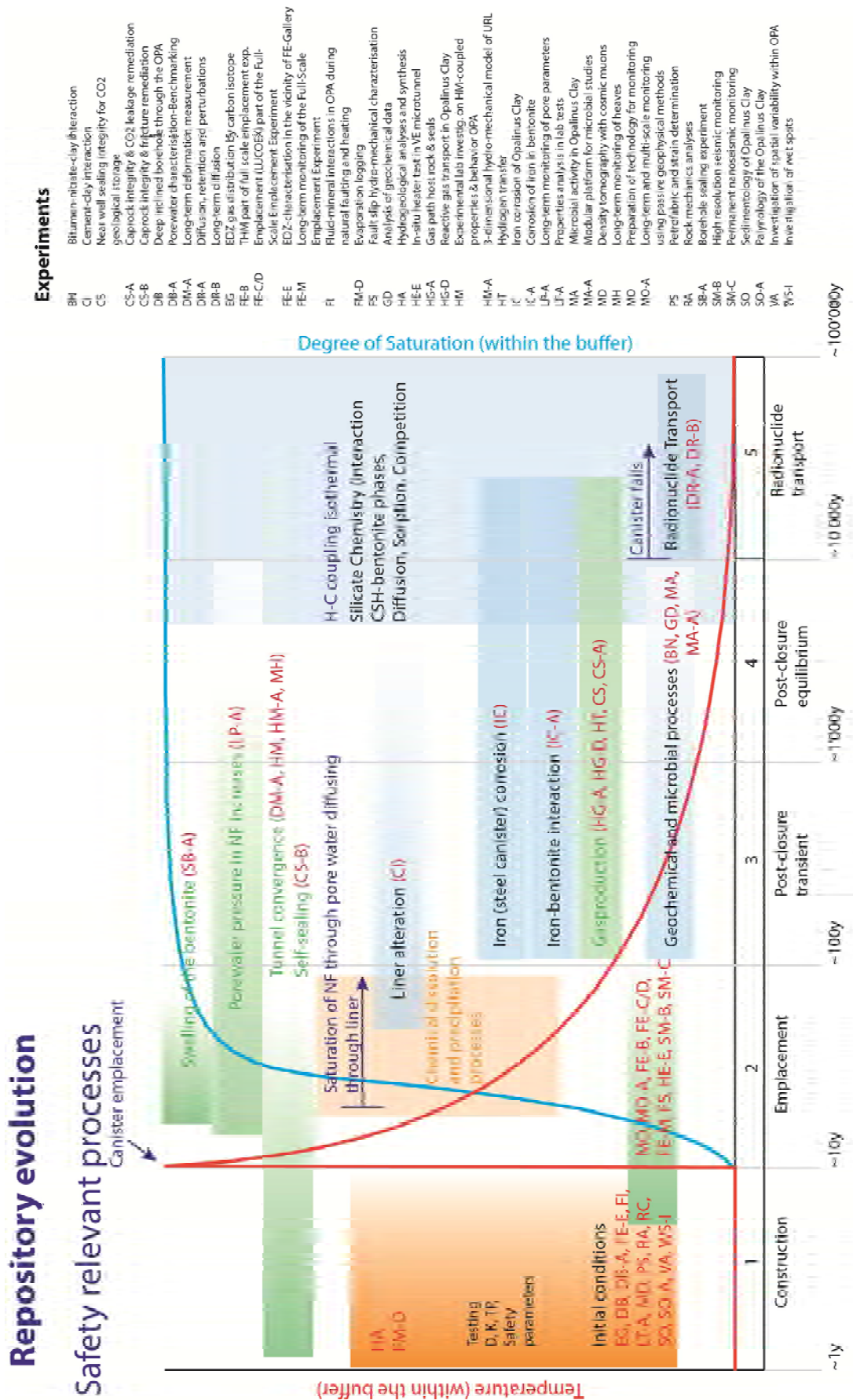
Über die Geometrie und die Ausdehnung der EDZ selbst gibt es keine Untersuchungen in der sandigen Fazies. Ausdehnung und Geometrie der EDZ sind bisher nur in der tonigen Fazies detailliert untersucht worden. Insbesondere sollten auch die Prozesse der Selbstheilung von künstlich induzierten Klüften in der sandigen Fazies untersucht werden.

Datenlücken bei den Entwicklungsstadien des Endlagers

Generell sind bei den Entwicklungsstadien des Endlagers (**Figur 32**) die Anfangsbedingungen (Phase 1 Konstruktion) auch für die sandige Fazies gut bekannt. In den Phasen 2 Einbau bis 5 Radionuklid-Transport wurde in der sandigen Fazies hingegen praktisch nichts gemacht. Dies betrifft dabei die Quelleigenschaften, Tunnelkonvergenzen, Liner-Alteration, Kanister-Korrosion mit Gasproduktion, thermischen Eigenschaften, die geochemischen und mikrobiellen Prozesse und den Radionuklidtransport. Bei all diesen wichtigen Teil-Prozessen der Entwicklung des Endlagers muss in Zukunft verstärkt die sandige Fazies miteinbezogen werden.

17. September 2014

**Bundesamt für Landestopographie swisstopo
Landesgeologie**



Figur 32: Entwicklungsstadien des Endlagers mit sicherheitsrelevanten Prozessen und den 45 Experimenten der Phase 20 (1. Juli 2014 – 30. Juni 2015) des Mont Terri Projektes. Rote Flächen stehen für kurzfristige-, grüne Flächen für mittelfristige- und blaue Flächen für Langzeitprozesse.

Literaturverzeichnis

- Achtziger, P. & Rösli, U. (2012): HA-Experiment: Hydraulic screening tests in BDS-4 borehole, Mont Terri Technical Note TN2012-39
- Amann, F., Button, E., Blümel, M. & Thoeny, R. (2010): Insight into the mechanical behavior of Opalinus Clay. *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*
- Amann, F., Button, E., Evans, K., Gischig, V. & Blümel, M. (2011a): Experimental Study of the Brittle Behavior of Clay shale in Rapid Unconfined Compression. *Rock Mech. Rock Eng.*
- Amann, F., Kaiser, P. & Button, E. (2011b): Experimental Study of Brittle Behavior of Clay Shale in Rapid Triaxial Compression. *Rock Mech. Rock Eng.*
- Becker, J. K. & Müller, H. R. (2012): VA Experiment: Investigation of spatial variability within Opalinus Clay, Short report on the logging campaign, Technical Note Mont Terri Project, TN2012-03
- Becker, J. K. (2012b): HA Experiment: Laboratory analyses-mineralogy and petrophysical properties on core material from the BVA boreholes, Technical Note Mont Terri Project, TN2012-38
- Becker, J. K. (2013): VA Experiment: Variability of Opalinus Clay – Mineralogical Analyses, Mont Terri Technical Note TN2013-73
- Blaesi, H.-R. (1987): Lithostratigraphie und Korrelation der Dogger Sedimente in den Bohrungen Weiach, Riniken und Schafisheim, *EclogaeGeol. Helv.* 80: 415-430
- Blaesi, H.-R., Peters, T. J. & Mazurek, M. (1991): Der Opalinus-Ton des Mt. Terri (Kanton Jura): Lithologie, Mineralogie und phyko-chemische Gesteinsparameter, Nagra interner Bericht, 90-60, Bern
- Blaesi, H.-R., Moeri, A. & Bossart, P. (1996): Results of the Phase 1 drilling campaign. – Mont Terri Technical Report TR96-01
- Bock, H. (2009): RA Experiment: Updated Review of the Rock Mechanics Properties of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field Testing, Mont Terri Technical Report TR2008-04
- Boisson, J.-Y. (2005): Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks. – NEA 4436 – OECD, Paris
- Bollinger, T., Engesser, B. & Weidmann, M. (1993): Première découverte de mammifères pliocènes dans le Jura neuchâtelois, *EclogaeGeol. Helv.* 86 : 1031-1068
- Bossart, P., Meier, P., Möri, A., Trick, T. & Mayor, J. C. (2002): Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Engineering Geology*, 66, 19-38
- Bossart, P. & Wermeille, S. (2003a): Paleohydrological Study on the Surroundings of the Mont Terri Rock Laboratory, in Mont Terri Project-Geology, Paleohydrology and Stress Field of the Mont Terri Region, *Berichte des BWG*, No. 4, 2003
- Bossart, P. & Wermeille, S. (2003b): The Stress Field in the Mont Terri Region, Data Compilation, in Mont Terri Project-Geology, Paleohydrology and Stress Field of the Mont Terri Region, *Berichte des BWG*, No. 4, 2003
- Bossart, P., Trick, T., Meier, P. M. & Mayor, J. C. (2004): Structural and hydrogeological characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland). *Applied Clay Science*, 26, 429-448
- Bossart, P. & Thury, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007

and Results. – Rep. Swiss geol. Survey, 3

- Bossart, P., Glur, L., Gysi, M., Herfort, M. & Meier, E. (2009): Ein neues Bohrloch-Evapometer zur Ermittlung der Evaporationsrate und der hydraulischen Leitfähigkeit in gering permeablen Formationen, Berichtsband zum CMM Workshop 2009, Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Bad Herrenalb
- Bossart, P. & Nussbaum, C. (2013): Mont Terri Rock Laboratory. Programme Overview and Work Programme of Phase 19 (July 2013-June 2014), Mont Terri internal report
- Brauch, K. (2014): Geophysical logging of borehole BDB-1, Mont Terri Technical Note TN2014-29
- Burkhalter, R. M. (1996): Die Passwang-Alloformation (unteres Aalénien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Jura. – *Eclogae geol. Helv.* 89/3, 875–934
- Contini, D. (1970): L'Aalénien et le Bajocien du Jura franc-comtois. – *Ann. Sci de l'Univ. Besancon*, 3/11: 1-204
- Ferrari, A. & Dubay, P. (2013): FE-B experiment: Identification of initial hydraulic properties of Opalinus Clay for gallery near-field instrumentation during ventilation phase of Gallery FE, Mont Terri Technical Note TN2013-37
- Franz, M. & Villinger, E. (2001): Koorrelationsschema Mitteljura Baden-Württemberg. http://www.lgrb.uni-freiburg.de/d/fr_prod.htm
- Freivogel, M., & Huggenberger, P. (2003): Modellierung bilanzierter Profile im Gebiet Mont Terri – La Croix (Kanton Jura). In P. Heitzmann & J.P. Tripet (Eds.), Mont Terri Project – geology, paleohydrology and stress field of the Mont Terri region. Bern: Rapparts de l'OFEF, Série Géologie, No. 4
- Gräsle, W. & Plischke, I. (2011): LT-A Experiment: Mechanical Behavior of Opalinus Clay, Data Report from Phase 15, Mont Terri Technical Note TN2010-86
- Gräsle, W. & Plischke, I. (2010): Laboratory Testing (LT) Experiment: Mechanical Behavior of Opalinus Clay, Final report from Phases 6-14. TR2009-07: BGR, Germany
- Gschwind, S. (2013): The Relationship between Failure Behavior and Sedimentary Subfacies Types in the Sandy Facies of Opalinus Clay. In *Engineering Geology*. Zürich: ETH Zürich
- Hohner, M. & Bossart, P. (1998): Geological, mineralogical, geochemical, geomechanical and hydraulic parameters of Opalinus Clay derived by in-situ and laboratory experiments (Phase 1, 2 and partly 3), Mont Terri Technical Note, TN98-49
- Hostettler, B., Reisdorf, A., Bläsi, H.-R. & Jaeggi, D. (2014 in Vorbereitung): SO (Sedimentology of Opalinus-Ton) experiment: Bio- and Lithostratigraphical investigation on the 250 m long borehole BDB-1, Mont Terri rock laboratory, St. Ursanne, Switzerland, Mont Terri Technical Note, TN2014-28
- 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, p. 143-161
- Jaeggi, D., Müller, P. & Müller, H. (2011): WS-H Experiment: Heterogeneity of sandy facies: Small scale mapping of the TT-niche face, Technical Note Mont Terri Project, TN2010-72
- Jaeggi, D., Müller, P., Dolder, F. & Nussbaum, C. (2012): FE-A Experiment: Site preparation for Full-Scale Emplacement Demonstration Experiment Geological and structural mapping of the FE-A niche (start niche), Mont Terri Technical Note TN2011-19

- Jaeggi, D., Lisjak, A., Gisiger, J. & Becker, J. (2013): FE-C Experiment: Engineering part of full-scale emplacement experiment – Geological and structural mapping of the FE-tunnel including a photogrammetric method, Mont Terri Technical Note, TN2012-82
- Jahns, E. (2007): Rock Mechanics Analysis (RA) Experiment: Rock Strength of Opalinus Clay Subjection to Time of Storage. TN2007-30: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns, DE
- Jahns, E. (2010): RA Experiment: Opalinus Clay Rock Characterization, Mont Terri Technical Note TN2008-55rev
- Kälin, D. (1993): Stratigraphie und Säugetierfaunen der obersten Süsswassermolasse der Nordwestschweiz. Ph.D. dissertation, ETH Zürich, Zürich, Switzerland
- Kaufhold, A., Vöbel, T., Gräsle, W. & Plischke, I. (2013): LT-A Experiment: Strength and Deformation of Opalinus Clay: Data report from Phase 18, Mont Terri Technical Note TN2013-59
- Keltenborn, P. (1944): Beobachtungen im Mont-Terri-Gebiet zwischen Courgenay und Assuel. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 37, 207-216
- Kurz, T. & Buckley, S. (2012): VA Experiment: Combined lidar scanning and hyperspectral imaging of the Opalinus Clay in the Mont Terri underground rock laboratory, Technical Note Mont Terri Project, TN2012-37
- Laubscher, H. (1948): Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt St-Ursanne. – Beitr. Geol. Karte Schweiz, N.F. 92
- Laurich, B., Urai, J. L., Desbois, G., Vollmer, C. & Nussbaum, C. (2014, submitted): Microstructural evolution of an incipient fault zone in Opalinus Clay: Insights from an optical and electron microscope study of ion-beam polished samples from the Main Fault in the Mont Terri Underground Research Laboratory, *Journal of Structural Geology*
- Lavanchy, J. M. & Mettier, R. (2012): HA (Hydrogeological analysis) Experiment: Hydraulic database, Phases 1-16, Version 1.0, Mont Terri Technical Note TN2010-74
- Lerouge, C., Blanc, P., Gaboreau, S., Decouchon, E., Guerrot, C., Wille, C., Jean-Prost, E. & Haas, H. (2011): PC-C Experiment : Mineralogy and geochemistry of cores of the BPC-C2 borehole Mont Terri Rock Laboratory – phase II, Final report, Mont Terri Technical Note TN2010-05rev
- Leupin, O., Wersin, P., Mettler, S., Mäder, U., Gaucher, E. C., Vinsot, A., De Cannière, P., Gäbler, H. E., Eichinger, L., Kunimaro, T. & Kiho, K. (2012): PC (Porewater chemistry) Experiment: synthesis report, Mont Terri Technical Report TR2009-06
- Martin, C. C., Lanyon, G. W., Bossart, P. & Blümling, P. (2004): Excavation Disturbed Zone (EZD) in Clay Shale: Mont Terri, Mont Terri Technical Report TR2001-01
- Marschall, P., Croisé, J., Schlickenrieder, L., Boisson, J.-Y., Vogel, P. & Yamamoto, S. (2002): Synthesis of hydrogeological investigations at the Mont Terri site. Mont Terri Technical Report TR 2001-02
- Marschall, P., Distinguin, M., Shao, H., Bossart, P., Enachescu, C. & Trick, T. (2006): Creation and Evolution of Damage Zones Around a Microtunnel in a Claystone Formation of the Swiss Jura Mountains. Proceedings of the SPE International Symposium and Exhibition on formation Damage Control in Lafayette, L.A., 15-17 February 2006. – Soc. Petrol. Eng. SPE-98537-PP
- Matray, J.-M. & Bailly, D. (2014): Use of semi-diurnal tides in pore-pressure time series for assessing undisturbed hydraulic conditions in the Opalinus clay and its surrounding formations at the Mont Terri rock laboratory, Mont Terri Technical Note TN2014-50
- 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., Alt-Epping, P., Gimmi, T., Waber, H.N., Bath, A., Buschaert, S. & Gautschi, A. (2007): Tracer profiles across argillaceous formations: A tool to constrain transport processes. In: Bullen, T.D. & Wang, Y. (eds): 12th International Symposium on Water-Rock Interaction - WRI-12, Kunming, Peoples R. China, A.A. Balkema Publisher, p. 767-771
- Mazurek, M., Gautschi, A., Marschall, P., Vigneron, G., Lebon, P. & Delay, J. (2008): Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations, *Physics and Chemistry of the Earth* 33 S. 95-105
- Miehe, R., Czaikowsik, O. & Wieczorek, K. (2010): Barrier Integrity of the Isolation Rock Zone in Clay Formations. *Mont Terri Technical Note TN 2010-82*
- Müller, P. & Jaeggi, D. (2012): SO Experiment: Sedimentology of Opalinus Clay, Sedimentary structure in the sandy facies of the Opalinus Clay of the Mont Terri rock laboratory, *Technical Note Mont Terri Project, TN2012-45*
- Nagra (2001): Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht, Textband, Technischer Bericht 00-01
- Nussbaum, C. & Bossart, P. (2004): Compilation of K-values from packer tests in the Mont Terri rock laboratory, *Mont Terri Technical Note TN2005-10*
- Nussbaum, C., Bossart, P., Amann, F. & Aubourg, C. (2011): Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland)
- Pearson, F. J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J.-Y., Fernandez, A. M., Gabler, H.-E., Gaucher, E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernan, P. & Waber, H. N. (2003): Mont Terri Project - Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory, *Berichte des BWG, Serie Geologie No.5 – Bern 2003*
- Peters, M., Mazurek, M., Jaeggi, D. & Müller, H. R. (2011): WS-H Experiment: Heterogeneities in the sandy facies of Opalinus Clay on a scale of millimeters to centimetres, pp. 18, University of Bern, *Mont Terri Technical Note TN2010-76*
- Poulain, S., Sergeant, C. & Simonoff, M. (2008): Microbial Investigations in Opalinus Clay, an Argillaceous Formation under Evaluation as a Potential Host Rock for a Radioactive Waste Repository, *Geomicrobiology Journal*, 25: 240–249
- Reisdorf, A. G., Wetzel, A., Schlatter, R. & Jordan, P.. (2011): The Stafflegg formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland. *Swiss Journal of Geosciences*, Vol. 104, Nr. 1. S. 97-146
- Reisdorf, A., Hostettler, B., Waltschew, A., Jaeggi, D. & Menkveld-Gfeller, U. (2014): SO (Sedimentology of Opalinus-Ton), Biostratigraphy of the Basal Part of the Opalinus-Ton at the Mont Terri rock laboratory, Switzerland, *Technical Report Mont Terri Project, TR2014-07*
- Rohs, S. & Mrugalla, S. (2009): HA Experiment: Hydraulic Data Evaluation Report, Golder Associates GmbH, *Mont Terri Technical Note TN2009-39*
- Rohs, S. (2010): HA Experiment; Test analysis and synthesis Report, Golder Associates GmbH, *Mont Terri Technical Note TN2010-16*
- Rösli, U. (2010): HG-D Experiment: (Reactive gas transport in OPA) Hydraulic HI tests in borehole BHG-D1 (interval 2), *Mont Terri Technical Note TN2010-46*
- Rummel, F. & Weber, U. (2004): RA Experiment (Rock Mechanics Analysis): *Rock Mechanical*

- Testing and Characterization on Drillcores of Boreholes BRA-1 and BRA-2, Mont Terri Technical Note TN2004-38: MeSy GmbH, DE
- Rummel, F. & Weber, U. (2007): Rock Mechanics Analyses (RA) Experiment: Mont Terri Project, Phase 10: Results of Uni-axial and Triaxial Tests on Opalinus Clay Samples, Mont Terri Technical Note TN2005-57
- Schaeren, G., & Norbert, J. (1989) : Tunnels du Mont Terri et du Mont Russelin. La Traverse des "Roches a Risques": Marnes et Marnes a` Anhydrite. Societé suisse des ingénieurs
- Schieber, J. (2011) : Reverse engineering mother nature – Shale sedimentology from an experimental perspective, *Sedimentary Geology*, p. 1-22
- Schlickenrieder, L. & Croisé, J. (2001): Hydrogeological Analyses (HA) Experiment Phase 5: Conceptual Hydrogeological Model of the Site – Part A – Review of the Hydrogeological Data Base, Colenco Power Engineering Ltd, Mont Terri Technical Note TN2000-22
- Schlickenrieder, L. & Croisé, J. (2004): Hydrogeologic Analyses and Synthesis (HA Experiment) Phase 9: Suitability Assessment Phases 5-8, Colenco Power Engineering Ltd, Mont Terri Technical Note TN2003-46
- Schmidt, C., Braun, L., Paltzer, G., Mühlberg, M., Christ, P. & Jacob, F. (1924): Die Bohrungen von Buix bei Pruntrut, und Allschwil bei Basel. – Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, X. Lieferung, 74 p.
- Swisstopo (2010): Beurteilung der Sammelprofile und der hergeleiteten Wirtgesteine sowie der Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten im Sachplan geologische Tiefenlager. Expertenbericht von swisstopo, Landesgeologie zu Händen des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorates ENSI
- Thury, M. & Bossart, P. (1999): Mont Terri Rock Laboratory – Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997, *Landeshydrologie und –geologie, Geologische Berichte Nr. 23*
- Thoeny, R. (2013): Geomechanical Analysis of Excavation-Induced Rock Mass Behavior of Faulted Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Rock Laboratory (Switzerland). In *Engineering Geology*, 194. Zürich: ETH Zürich
- Trick, T. & Kontar, K. (2013): HG-D experiment: Hydraulic and gas step HI tests performed in Phase 18, Mont Terri Technical Note TN2013-36
- Trick, T., Kontar, K., Rösli, U., Gräfe, K. & Müller, H. (2013): FE-B experiment: Hydraulic testing in borehole BFE-C19, Mont Terri Technical Note TN2013-100
- Tchopp, R. (1960): Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Miécourt, *Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz*, N.F. 110, 1-62
- Ulusay, R. & Hudson, J. A. (2007): The complete ISRM Suggested Methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. – 628 p., Ankara (ISRM Turkish National Group), ISBN 978-975-93675-4-1
- Vinsot, A., Appelo, C. A. J., Cailteau, C., De Cannière, P., Mettler, S., Wersin, P. & Gäbler, H.-E. (2007) : CO₂ data on gas and porewater sampled in situ in the Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory. – In: *Proceedings 3rd International Meeting on Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement*, Lille (France), 17-20 September 2007
- Wersin, P., Leupin, O. X., Mettler, S., Gaucher, E. C., Mäder, U., De Cannière, P., Vinsot, A., Gäbler, H. E., Kunimaro, T., Kiho, K. & Eichinger, L. (2011): Biogeochemical processes in a clay formation in situ experiment: Part A – Overview, experimental design and wa-

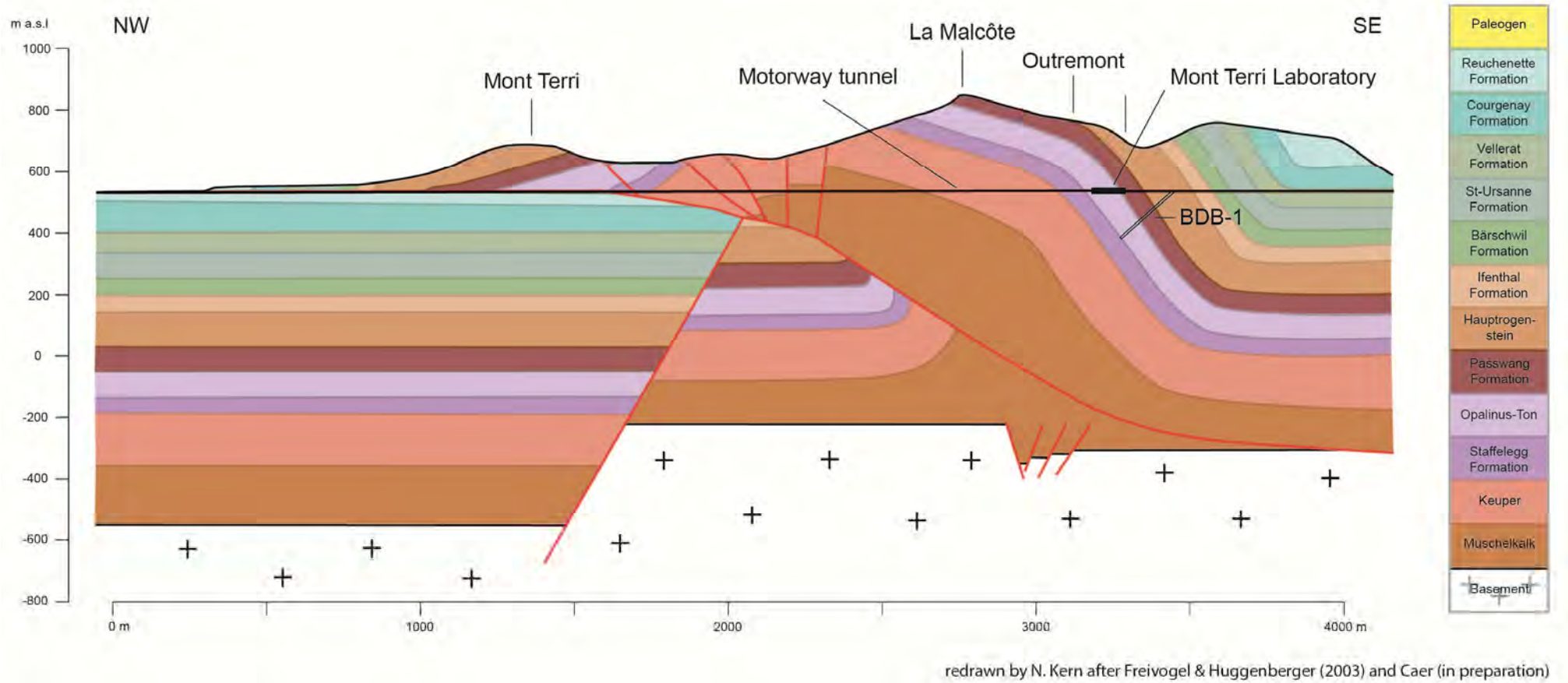
- ter data of an experiment in the Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. *Journal of applied geochemistry*, 26, 931-953
- Wetzel, A. & Allia, V. (2003): Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte.- *Eclogae geol. Helv.* Vol. 96 (2003) 451-469, Basel
- Wetzel, A. & Meyer, C. A. (2006): The Dangers of High-Rise Living on a Muddy Seafloor: An Example of Crinoids from Shallow-Water Mudstones (Aalenian, Northern Switzerland), *Palaios*, April 1, 21(2), p. 155-167
- Wild, K., Wymann, L., Zimmer, S., Thoeny, R. & Amann, F. (2014): Water retention characteristics and state-dependent mechanical and petro-physical properties of a clay shaly. *Rock Mech Rock Eng* DOI 10.1007/s00603-014-0565-1
- Wileveau, Y. & Rothfuchs, T. (2007): THM behaviour of host rock (HE-D) Experiment: Study of Thermal effects on Opalinus Clay, Synthesis, Mont Terri Technical Report TR2006-01
- Wymann, L. (2013): The Influence of Saturation of the Uniaxial Compressive Strength of Opalinus Clay. In *Engineering Geology*. Zürich: ETH Zürich
- Yong, S., Kaiser, P. K., Löw, S. (2010): Influence of tectonic shears on tunnel-induced fracturing, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47, 894-907
- Zhang, C.-L., Rothfuchs, T., Jockwer, N., Wieczorek, K., Dittrich, J., Müller, J., Hartwig, L. & Komischke, M. (2007): HE-D Experiment (Thermal Effects on the Opalinus Clay): A Joint Heating Experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terri URL. TN2007-02: GRS, DE
- Zimmer, S. (2012): Untersuchungen zur einaxialen Zugfestigkeit von Opalinuston in Abhängigkeit der Saugspannung. In *Engineering Geology*. Zürich: ETH Zürich

Appendix 1

Stratigrafisches Profil der Bohrung BDB-1

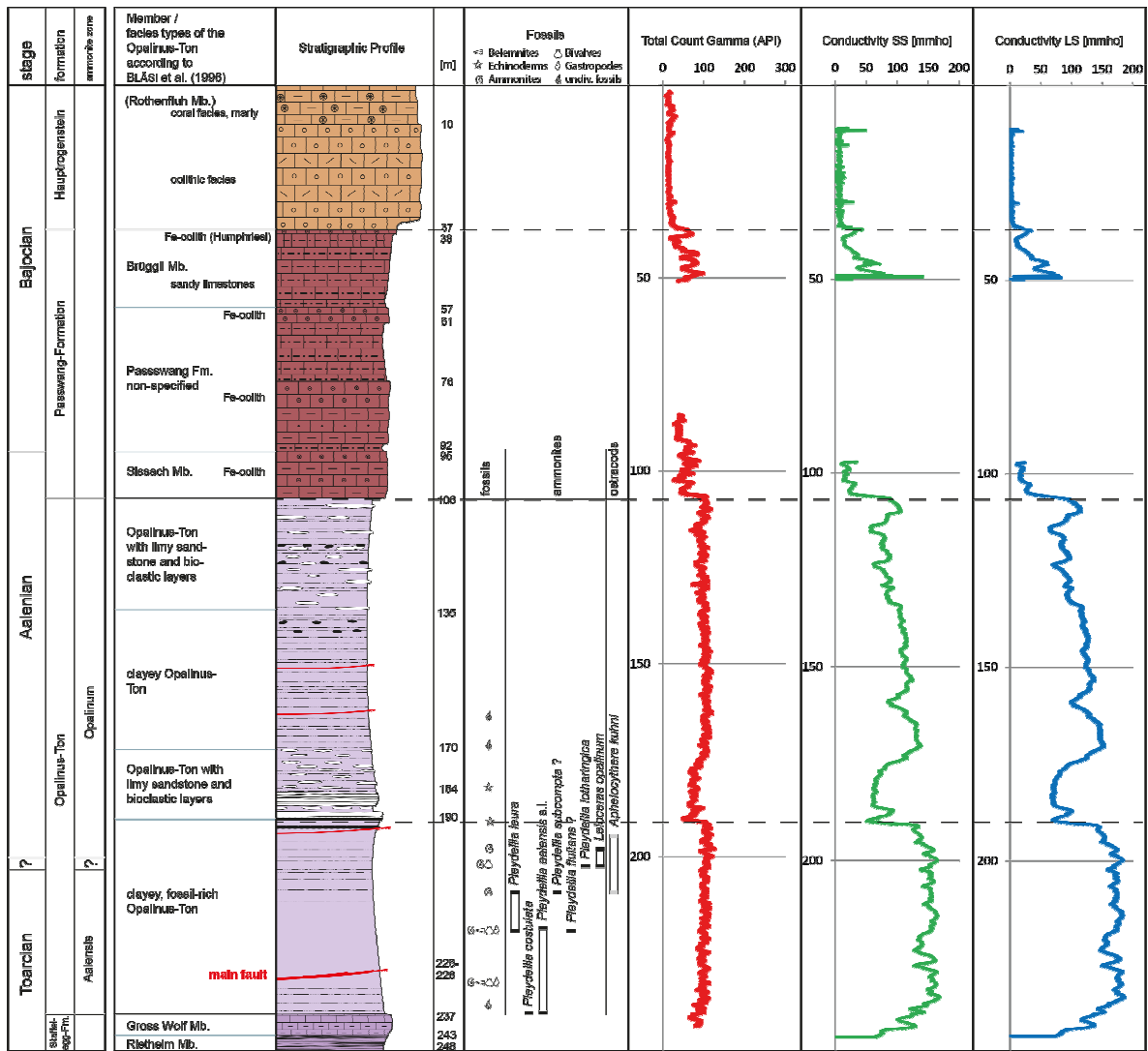
David Jaeggi, Achim Reisdorf, Nicola Kern

empty page



Figur A1-1: Vereinfachtes geologisches Profil der Mont Terri Antiklinale mit der eingezeichneten BDB-1 Bohrung im Südschenkel. Figur verändert nach Freivogel & Huggenberger (2003) und Caer et al. (2014, in Vorbereitung).

Stratigraphic sequence BDB-1



Figur A1-2: Vereinfachtes stratigrafisches Profil der BDB1 Bohrung mit lithostratigrafischen Daten aus Bläsi et al. (1996) und biostratigrafischen Daten aus Reisdorf et al. (2014).

Die Bohrung BDB-1, welche Ende Januar 2014 fertiggestellt wurde, durchfährt den Opalinus-Ton, inklusive die Rahmengesteine Hauptrogenstein, Passwang-Formation bis in den obersten Teil der Stafflegg-Formation hinein (**Figur A1-1** und **Figur A1-2**). In der Passwang-Formation wurden nur das Sissach-Member und das Brüggli-Member festgestellt. Im Tiefenbereich von 57 bis 95 m konnten keine Zuordnungen zu Member gemäss der Nomenklatur von Burkhalter (1996) gemacht werden. Fossilangaben sind für den Übergangsbereich Aalenium/Toarcium vorhanden (Reisdorf et al., 2014). Diese zeigen klar das Auftreten von Pleydellien im Basisbereich des Opalinus-Ton. Nur wenige Meter unterhalb der sandig-karbonatreichen Fazies zeigt das Erstauftreten von *Leioceras Opalinum* klar den Übergang vom Toarcium zum Aalenium. Gamma-Werte und Leitfähigkeit sind im Opalinus-Ton generell erhöht. Sandige und sandig-karbonatreiche Fazies zeigen deutlich tiefere Werte als in der tonigen Fazies. Eine Zyklizität gemäss den Dachbankzyklen (Wetzel & Allia, 2003) scheint nicht vorhanden zu sein. Aufgrund des instabilen Bohrlochs und der nachfolgenden einzementierten Verrohrung konnte ein Grossteil der Passwang-Formation nicht geloggt werden. Die Leitfähigkeit wird in Milliohm gemessen (mmho). Für geringe Eindringtiefe SS (short spaced) und hohe Eindringtiefe LS (long spaced) sind die Leitfähigkeiten vergleichbar und deuten nicht auf einen „Mudcake“ hin. Dieser wäre im mit Luft gebohrten unteren Teil so wieso nicht zu erwarten.

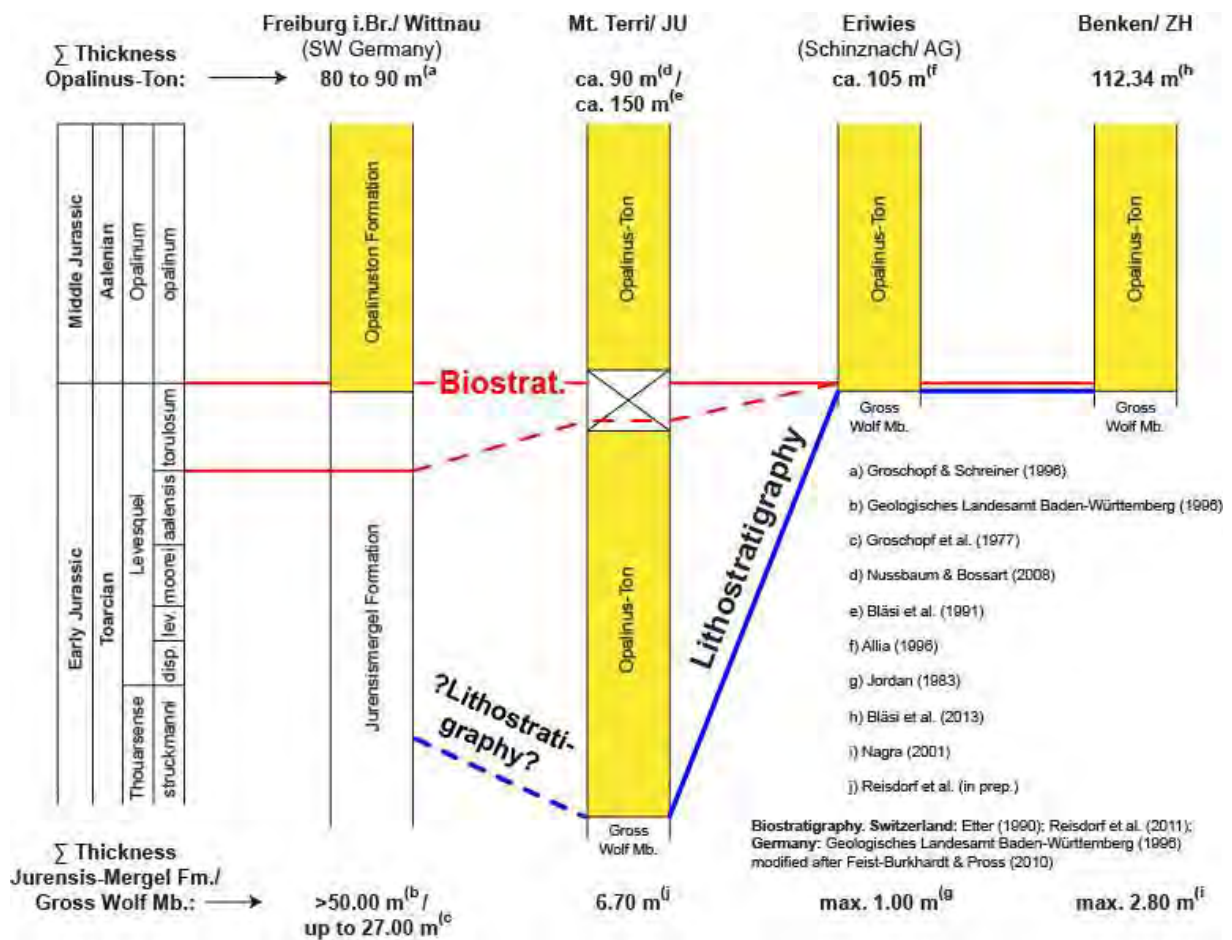


Cephalopoden-Species	<i>Pleydellia leura</i>	<i>P. costulata</i>	<i>P. aalensis</i> s.l.	<i>P. subcompta</i> ?	<i>P. fluitans</i> ?	<i>P. lotharingica</i>	<i>Leioceras opalinum</i>
Fundort im Felslabor Mt. Terri							
BCS5-Bohrung							
HE-Nische							
FE-Nische							
MFGWest							
MFGost							
MI-Nische							
FM-C21-Ost							
FM-C21-Süd							
Galerie 98 Fenster 1 West							

Figur A1-3: Die im Opalinus-Ton des Felslabors Mont Terri angetroffenen Ammonitenarten, Daten aus Reisdorf et al. (2014).

Die in der Arbeit von Reisdorf et al. (2014) angetroffenen Ammoniten zeigen klar eine Dominanz der Pleydellien im Liegenden des Opalinus-Ton (Fundorte: BCS-5-Bohrung, HE-Nische, FE-Nische) (**Figur A1-3**). Südlich davon, resp. stratigrafisch höher (Fundorte MFG-West, MFG Ost, MI-Nische, FM-C21-Ost, FM-C21-Süd, Galerie 98 Fenster 1 West) ist *Leioceras Opalinum* die dominante Spezies. Die Pleydellien sind generell grob gerippt, während die Leioceraten filigranere Rippen aufweisen.

Die Korrelation der biostratigrafischen Befunde aus dem Felslabor Mont Terri (Reisdorf et al., 2014) mit Bohrungen in der Nordwestschweiz oder der Bohrung Wittnau in SW-Deutschland erweist sich als schwierig (**Figur A1-4**). Die Jurensismergel Formation in SW-Deutschland ist rein biostratigrafisch definiert und endet mit der Torulosum-Subzone. Im Felslabor Mont Terri konnte diese Subzone nicht direkt nachgewiesen werden. Der Opalinus-Ton reicht jedoch bis in die Aalensis-Subzone hinunter und wird als Formation rein lithostratigrafisch definiert. Eine Korrelation zu den Bohrungen Eriwies und Benken ist aufgrund fehlender Ammonitenstratigrafie bisher nicht möglich.



Figur A1-4: Korrelation der Biostratigrafie an der Basis des Opalinus-Ton, inkl. Mächtigkeitsangaben des Gross-Wolf-Members von verschiedenen Standorten. Figur aus Reisdorf et al. (2014). Zuerst ist jeweils die geschätzte Gesamtmächtigkeit des Gross-Wolf-Members, resp. der Jurensismergel Formation angegeben. Im Felslabor Mont Terri ist insbesondere der untere Teil der Torulosum Subzone nicht aufgeschlossen. Die obere rote Linie gibt die obere Begrenzung der Torulosum Subzone an. Die untere Begrenzung ist am Mont Terri unbekannt (rot gestrichelt), da sie nicht aufgeschlossen ist. Die blaue Linie zeigt die lithostratigrafische Korrelation der Grenze Opalinus-Ton/Gross-Wolf-Member. Diese ist zu den Aufschlüssen Eriwies und Benken hin möglich, zur Bohrung Wittnau in SW Deutschland hingegen nicht.

Berechnung der sedimentären Mächtigkeit am Standort Mont Terri (Abschätzung der tektonischen Verdickung)

Gemäss den Erfahrungen aus dem Felslabor Mont Terri wird für die Sprunghöhen der grossen Bruchzonen ein Winkel von 15° (zwischen Schichtung und Überschiebungsrichtung) angenommen. Dies ergibt bei einem hypothetischen minimalen Überschiebungsbetrag von 1 m eine tektonische Verdickung von ca. 0.25 m. Bei einem hypothetischen maximalen Überschiebungsbetrag von 10 m ergibt sich entsprechend eine tektonische Verdickung von ca. 2.5 m.

Bei den kleinen Einzelbrüchen wurde eine Frequenz von 4 Brüchen pro m angenommen. Dies entspricht bezogen auf die ganze Formation (131 m mächtig in der Bohrung BDB-1) total ca. 500 Brüchen. Diese Zahl basiert auf Erfahrungen aus der Kartierung von Bohrungen und Aufnahmen von Galerien und Nischen. Dabei wird die tektonische Verdickung minimal 0.001 m und maximal 0.01 m angenommen. Aus all diesen Annahmen für den Einfluss der Tektonik auf die sedimentäre Mächtigkeit ergeben sich die in der untenstehenden Tabelle zusammengestellten Werte (**Tabelle A1-1**).

Tabelle A1-1: Abschätzung der sedimentären Mächtigkeit im Mont Terri Felslabor. Als wahre Mächtigkeit (senkrecht zur Schichtung) wurden dabei die 131 Meter aus der BDB1 Bohrung genommen (**Figur A1-1**) (Hostettler et al., 2014, in Vorbereitung).

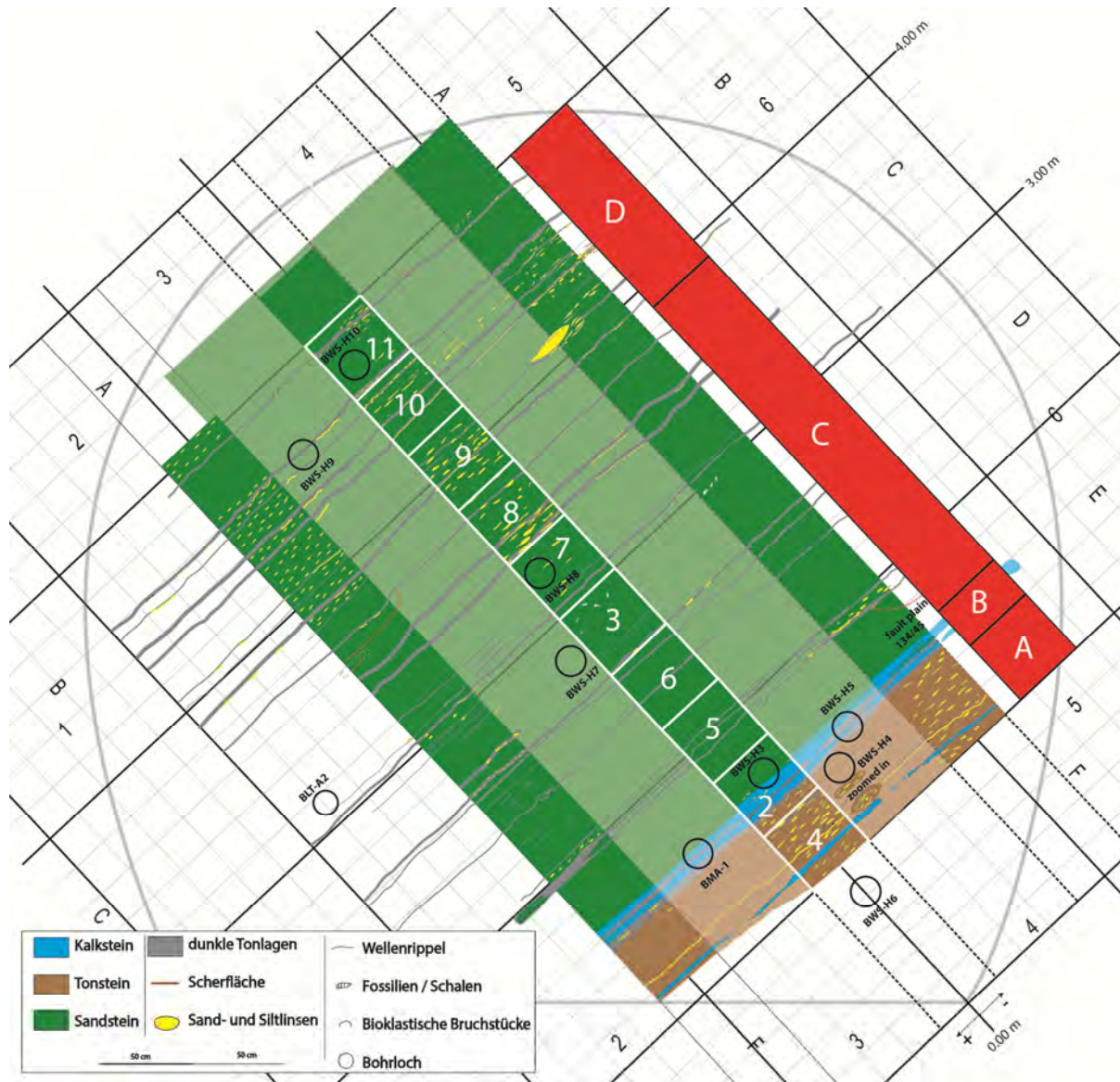
Strukturen	Anzahl	Verdickung pro tektonischer Bruch (min.)	Verdickung pro tektonischer Bruch (max.)	Minimale totale tektonische Verdickung	Maximale totale tektonische Verdickung
Bruchzonen (Main Fault, EZ-A, FE-Galerie)	3	0.25 m	2.50 m	3 x 0.25 m = 0.75 m	3 x 2.5 m = 7.5 m
Einzelbrüche (ca. alle 25 cm)	500	0.001 m	0.01 m	500 x 0.001 m = 0.5 m	500 x 0.01 m = 5.0 m
Totale tektonische Verdickung (Σ der Bruchzonen und Einzelbrüche)				0.75 + 0.5 m = 1.25 m	7.5 + 5.0 m = 12.5 m
Wahre (senkrecht zur Schichtung) gemessene Mächtigkeit, BDB-1				131 m	
Sedimentäre Mächtigkeit des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri				131 – 1.25 m maximal ca. 130 m	131 – 12.5 m minimal ca. 118 m

Appendix 2

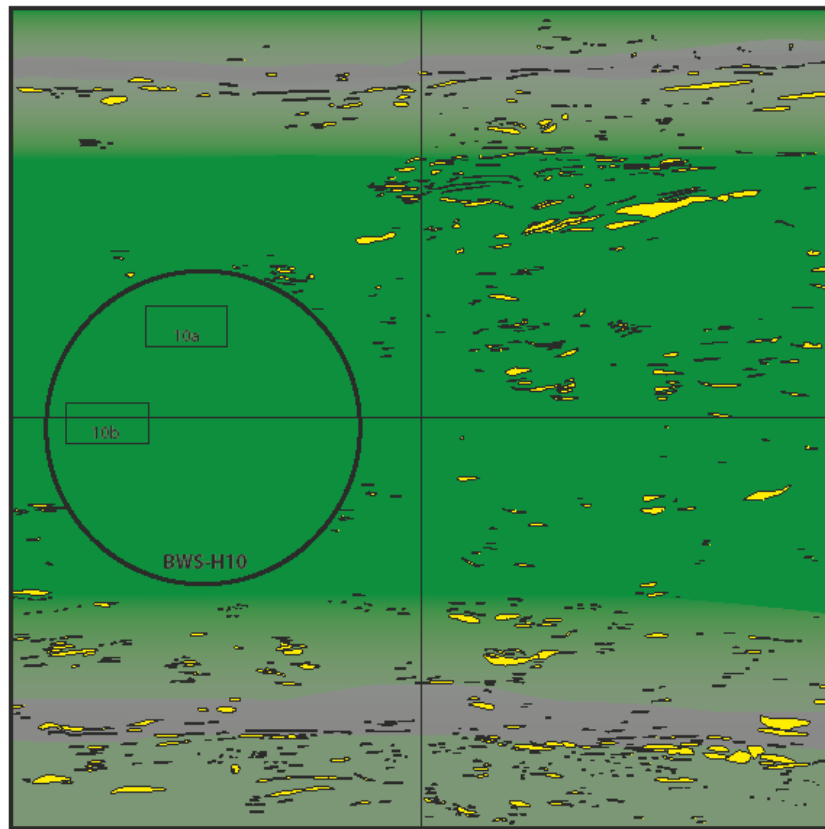
Kleinskalige Kartierung der sandigen Fazies in der TT-Nische

D. Jaeggi, P. Müller

empty page



Figur A2-1: Die vier Subfaziestypen der sandigen Fazies aus der TT-Nische (Peters et. al., 2011; Müller & Jaeggi, 2012). Der rote Balken rechts gibt die Grenzen der vier Subfaziestypen innerhalb der sandigen Fazies wieder. Die farbige Fläche wurde grob in 3 „scanlines“ kartiert, die Flächen dazwischen wurden nur auf die markanten Horizonte hin kartiert. Die mittlere „scanline“ dient als Referenz für den gesamten Aufschluss und wurde detailliert im Massstab 1:1 kartiert und anschliessend im Massstab 1:2 digitalisiert. Die Nummerierung der Quadrate (40x40 cm) bezieht sich auf die Nomenklatur in Müller & Jaeggi (2012). Die Detailkartierungen finden sich nachfolgend in den **Figuren A2-2 bis A2-11**.



continuously brighter and more silt/sand content on top
1 cm thick dark clay layer with silt lenses, elongated
lower boarder transitional

darker zone with more clay and more visible lenses

laminated part with lots of silt/clay laminae

quite homogenous silty clay, originally laminated, but strongly
bioturbated, high quartz content

continuously brighter/more silty

9a

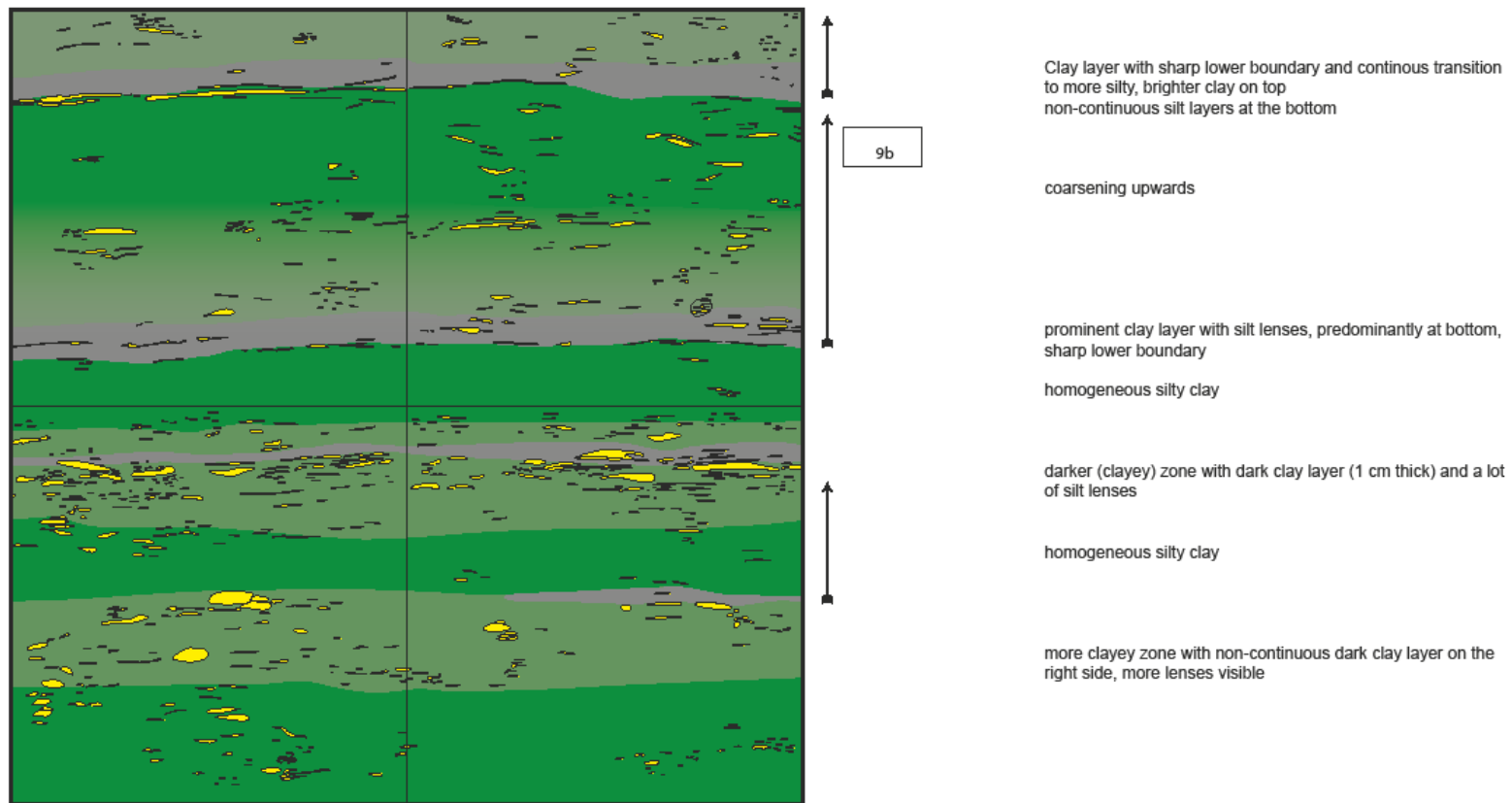
dark clay layer, 2 cm thick, internally lots of lenses, at bottom
nearly continuous

more silty zone between two dark clay layers



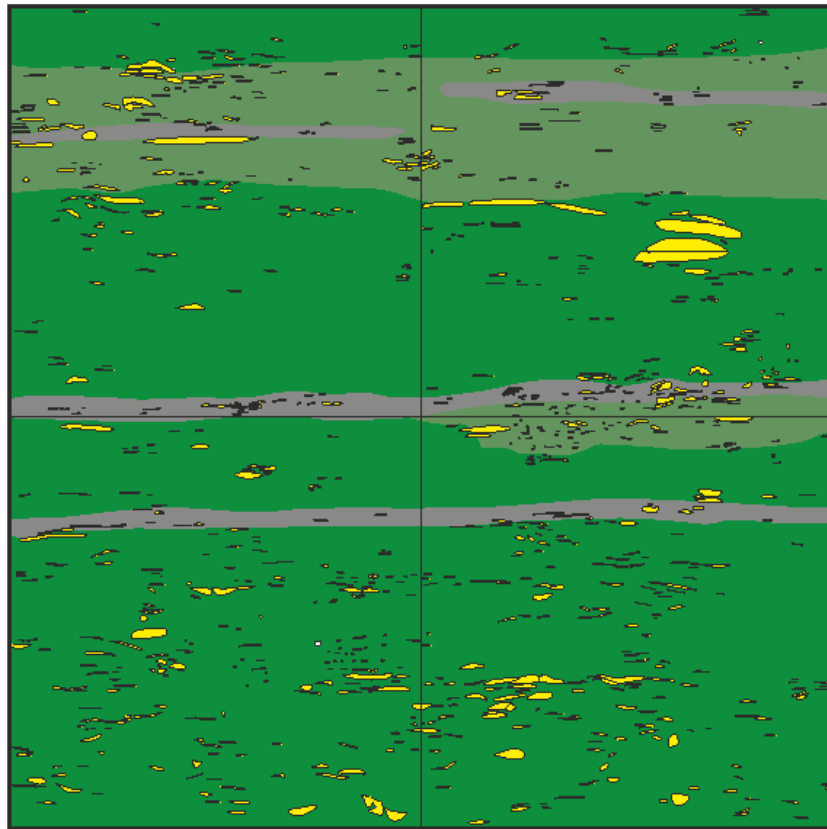
Bioklastische mergelige Kalksteine	Scherfläche	„coarsening upwards“
Tonstein, dunkel	Sand- und Siltlinsen	Bohrloch
Tonstein, sandig, hell	Wellenrippe	Dünnschliff
Tonsteinlagen, graphitisch, schwarz	Fossilien und Biotritrus	
Ausschnitt 11 - Massstab 1:2		
D. Jaeggi, P. Müller November 2011 swisstopo		

Figur A2-2: Kartierung No. 11 (Subfaziestyp D) (aus Müller & Jaeggi, 2012).

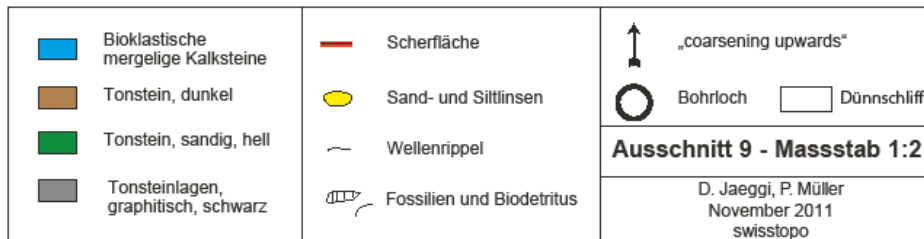


Bioklastische mergelige Kalksteine	Scherfläche	„coarsening upwards“
Tonstein, dunkel	Sand- und Siltlinsen	Bohrloch
Tonstein, sandig, hell	Wellenrippel	Dünnschliff
Tonsteinlagen, graphitisch, schwarz	Fossilien und Biodetritus	
Ausschnitt 10 - Masstab 1:2		
D. Jaeggi, P. Müller November 2011 swisstopo		

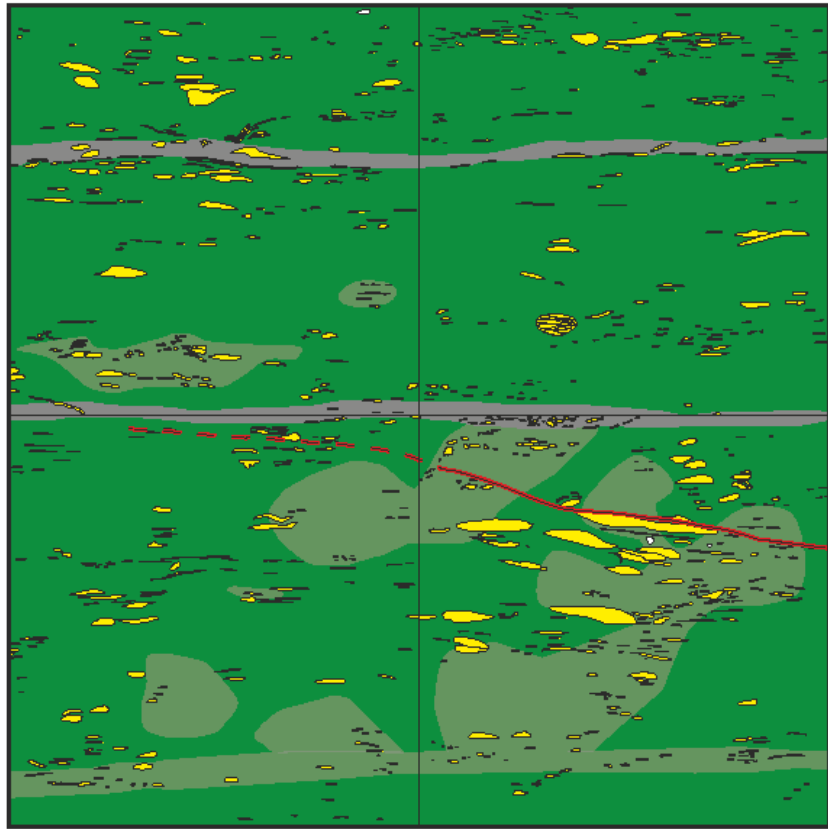
Figur A2-3: Kartierung No. 10 (Subfaziestyp D) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



- silt lenses with low contrast
- clay layer not continuous in a more clayey (darker) zone
- silty clay with a few lenses
- clay layer with sharp borders and internal very fine lenses of silt
- clay layer with silt lenses, 1 cm thick with sharp borders
- lots of small lenses, not clearly visible, probably starved ripples
- quite homogenous
bioturbation important



Figur A2-4: Kartierung No. 9 (Subfaziestyp C+D) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



silty clay with some silt lenses with only little contrast to the matrix, partly laminated, at bottom some ripples with steep inclination

dark clay layer (1-1.5cm) with long silt lenses/ not continuous silt layer at the base consisting of starved ripples

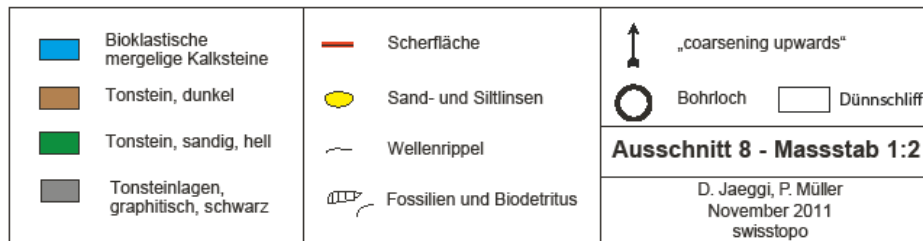
silty clay, darker (more clay) than below (Section 7) some isolated lenses

lots of small lenses, strongly bioturbated, structure completely blurred

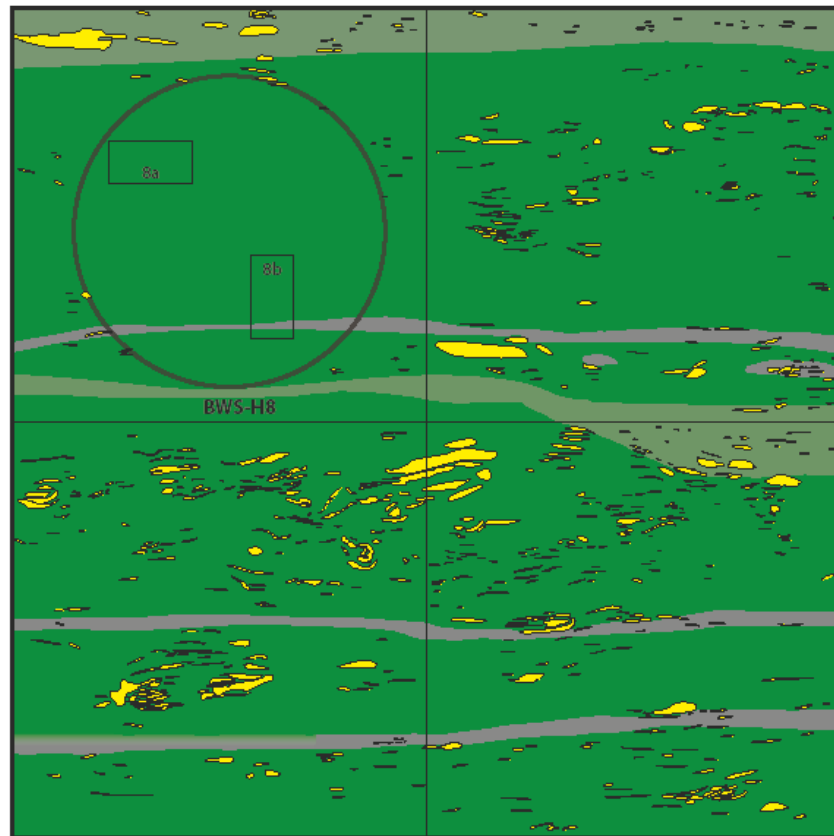
clay layer with only low contrast

shear plane

dark silty clay with a lot of small silt lenses, right part with a zone of larger visible lenses



Figur A2-5: Kartierung No. 8 (Subfaziestyp C) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



Transition to more clay rich part with more small silt lenses

homogeneous silty clay with only few small structures
some irregular, undulated lamination

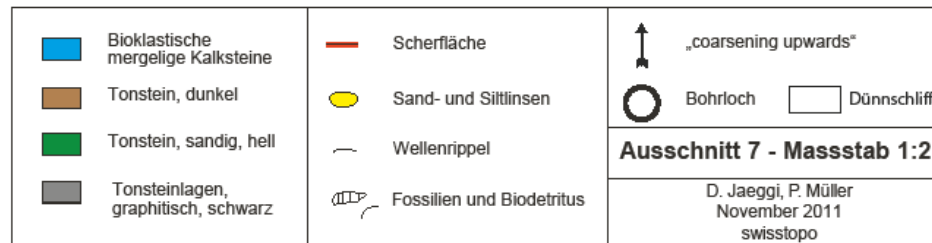
two clay layers with low contrast, more clayey in between

ripples present

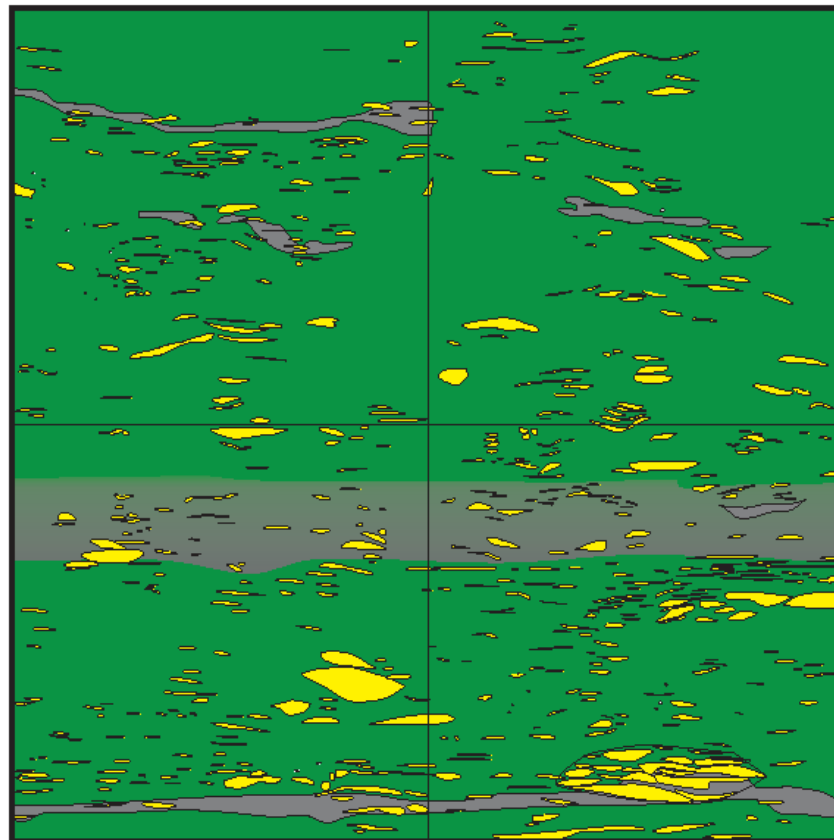
some fossils, shells of bivalves

thin clay band with some lenses on top

clay layer, 1.5 cm thick, with silt lenses in it, continuous



Figur A2-6: Kartierung No. 7 (Subfaziestyp C) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



7a

7b

silty clay, sandy, nodular, hard, with few silt lenses, small ripples in upper part, in between finely laminated sections, transitions to grey and dark clay horizons (up to 1 cm thick, extends over several dm), in lower part some bioclastic material (echinoderms, bivalves), more nodular appearance

dark clay layer with transitional upper and sharp lower boarder, numerous internal silt-lenses, locally even layers, at basis near-continuous sandy layer, thin, irregular undulated, implicating a buried erosional surface

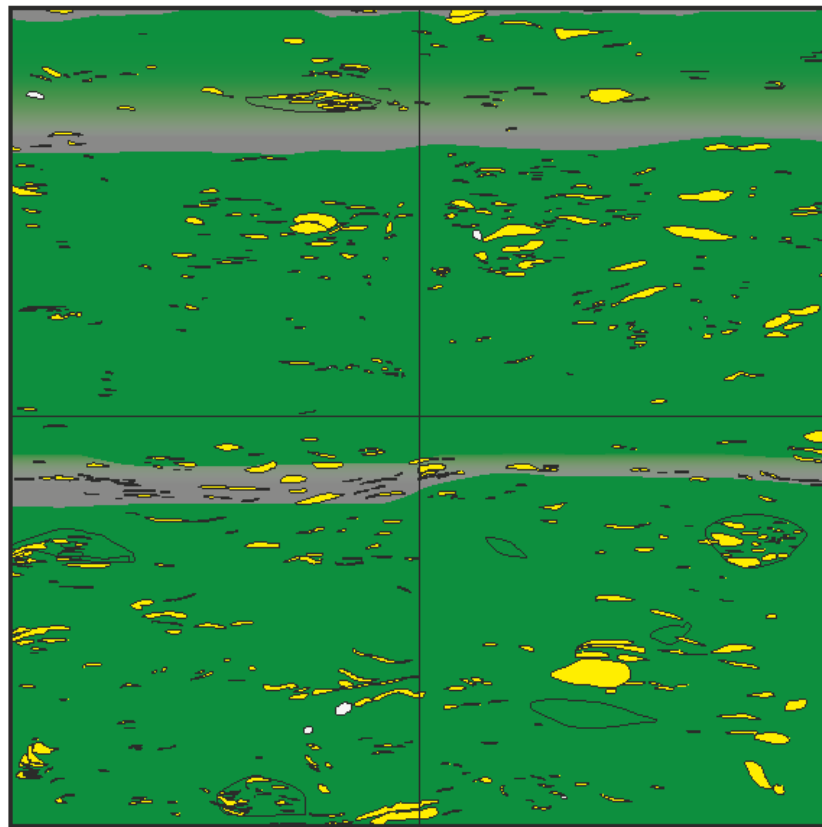
silty clay with a few large silt lenses, larger lenses with visible internal structure, ripples, large aggregate of sand lenses at bottom, 7 cm long, internal structure, such as lamination visible, bit brighter than surrounding matrix

dark clay, 1 - 1.5 cm thick, continuous, at basis partly non-continuous up to 5 mm thick sandlayer



Bioklastische mergelige Kalksteine	Scherfläche	„coarsening upwards“
Tonstein, dunkel	Sand- und Siltlinsen	Bohrloch
Tonstein, sandig, hell	Wellenrippel	Dünnschliff
Tonsteinlagen, graphitisch, schwarz	Fossilien und Biodetritus	
Ausschnitt 3 - Massstab 1:2		
D. Jaeggi, P. Müller November 2011 swisstopo		

Figur A2-7: Kartierung No. 3 (Subfaziestyp C) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



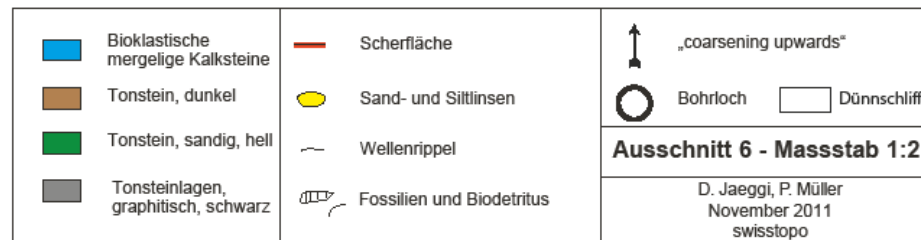
dark clay layer on top with silt lenses

dark clay layer (continuous over the whole wall) with sharp lower boundary, increasing silt fraction towards the top, thus coarsening upwards

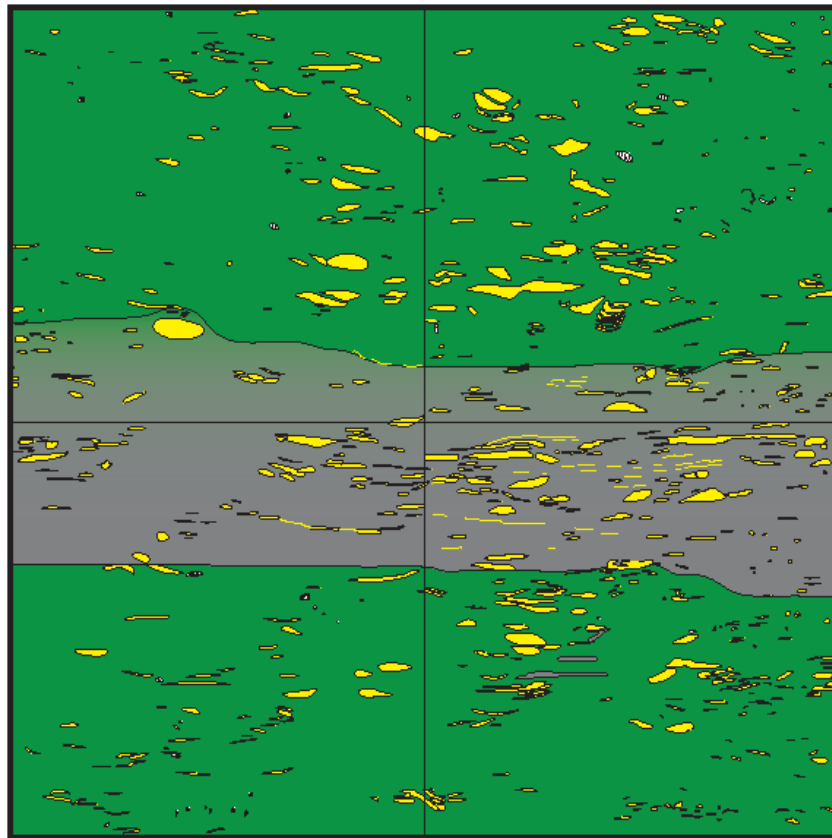
homogenous silty/sandy clay or clayey siltstone, hard, more silt lenses in upper part, biotrititic, slightly brownish, coarsening upwards visible

dark clay layer (with fine silt lenses/ not continuous layers, starved ripples) with sharp lower boundary and transitional boundary on the top

relatively homogeneous silty clay with some fossils, and lots of aggregates of small silt lenses, non-continuous, only few thick lenses present



Figur A2-8: Kartierung No. 6 (Subfaziestyp C) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



sandy clay of slightly brownish color, quite homogeneous with lots of small sand lenses, bioturbation visible, lots of fragments from bivalves
quite homogeneous, slightly brownish color

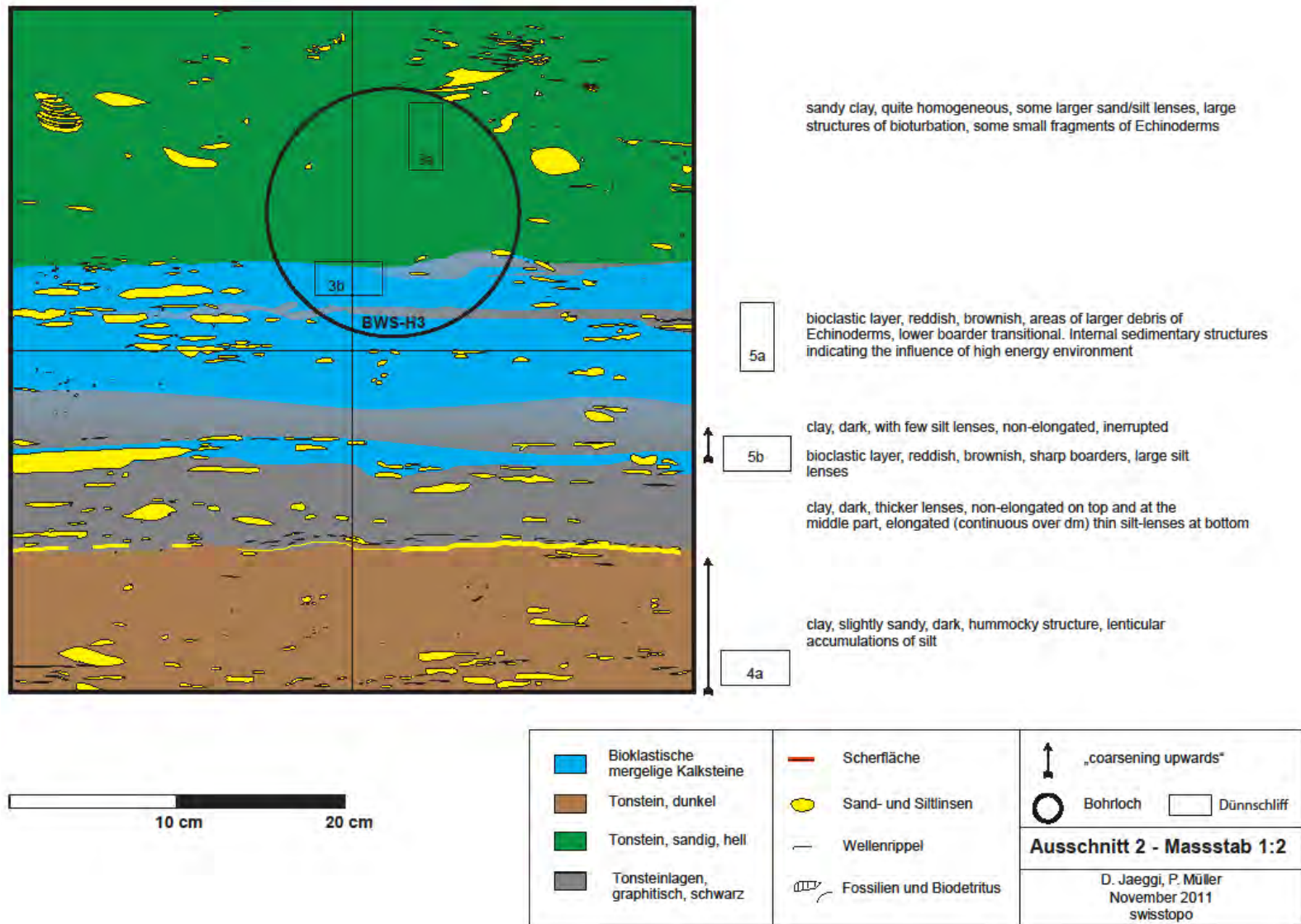
dark, 10 cm thick clay layer with thin silt lenses, upper border transitional, lower border sharp, both borders quite irregular shaped, bioturbated

homogeneous sandy clay, grey with silt lenses and shell debris of bivalves, partly darker clay sections, not continuous

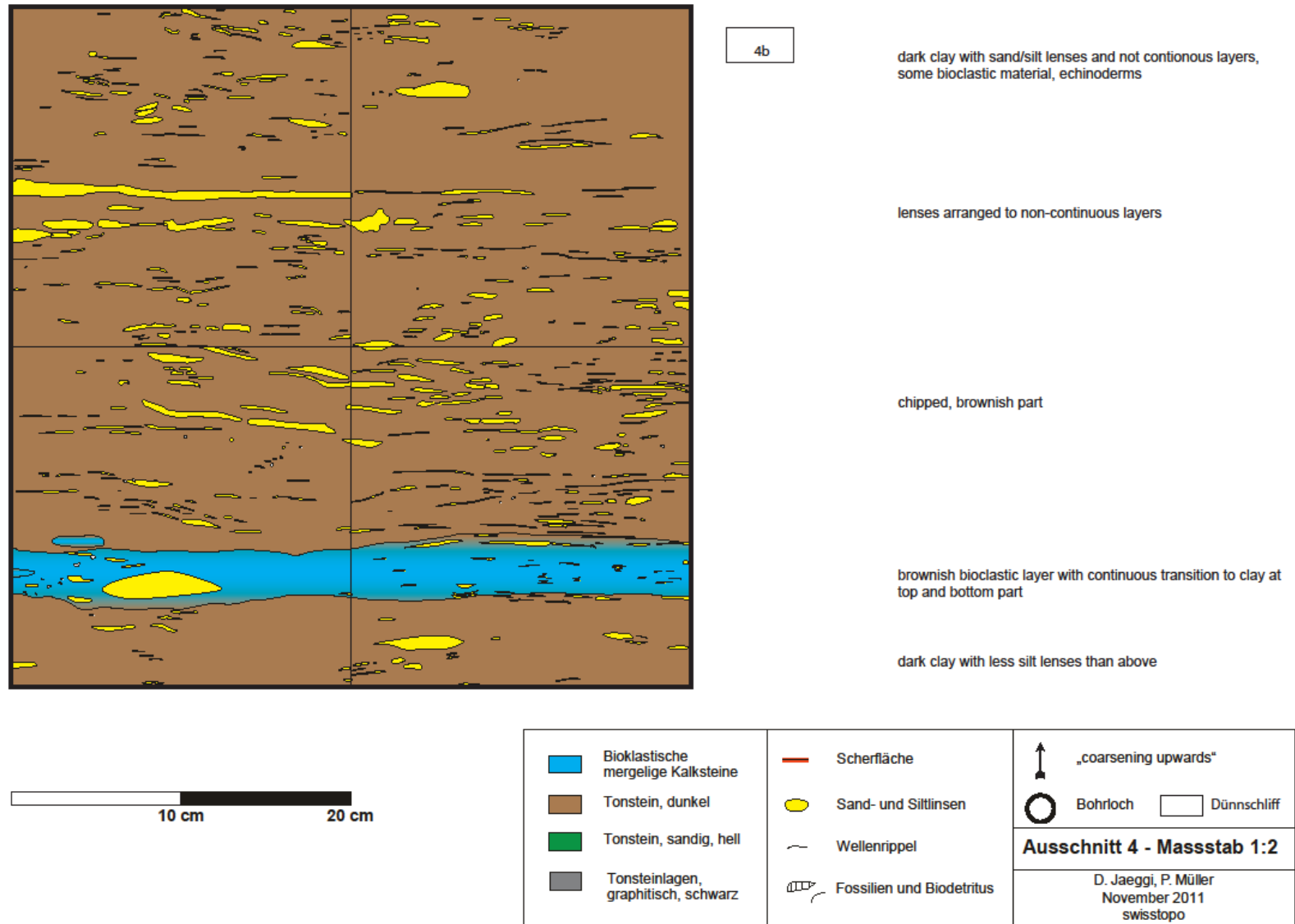


Bioklastische mergelige Kalksteine	Scherfläche	„coarsening upwards“
Tonstein, dunkel	Sand- und Siltlinsen	Bohrloch
Tonstein, sandig, hell	Wellenrippel	Dünnschliff
Tonsteinlagen, graphitisch, schwarz	Fossilien und Biodetritus	
Ausschnitt 5 - Massstab 1:2		
D. Jaeggi, P. Müller November 2011 swisstopo		

Figur A2-9: Kartierung No. 5 (Subfaziestyp C) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



Figur A2-10: Kartierung No. 2 (Subfaziestyp B) (aus Müller & Jaeggi, 2012).



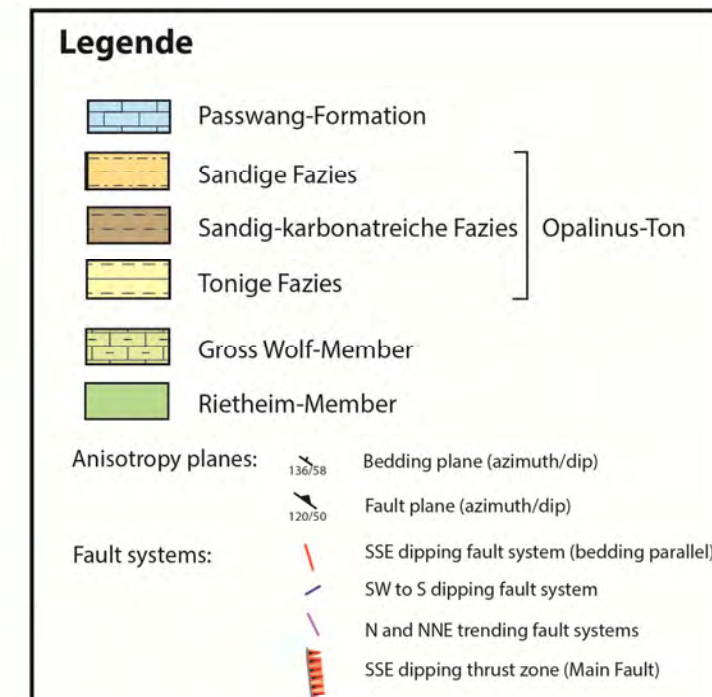
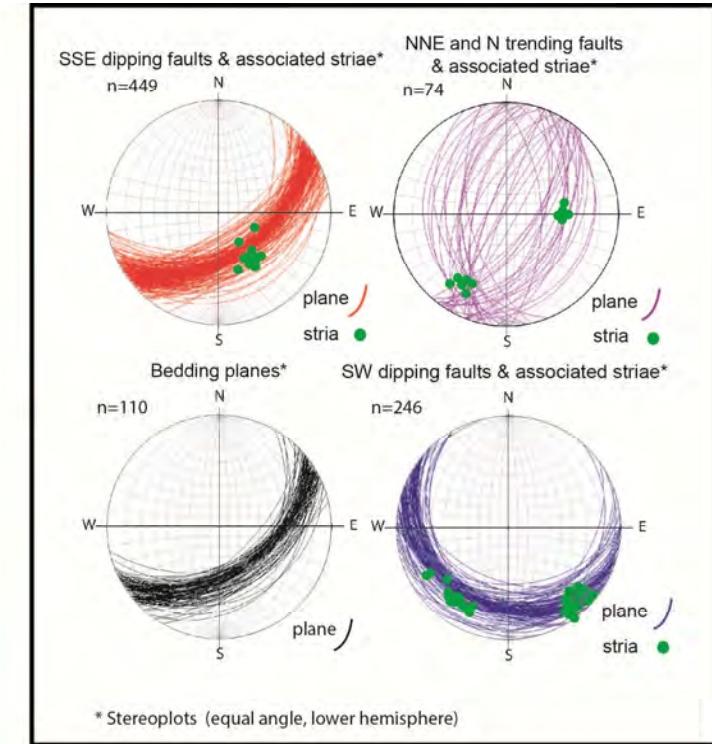
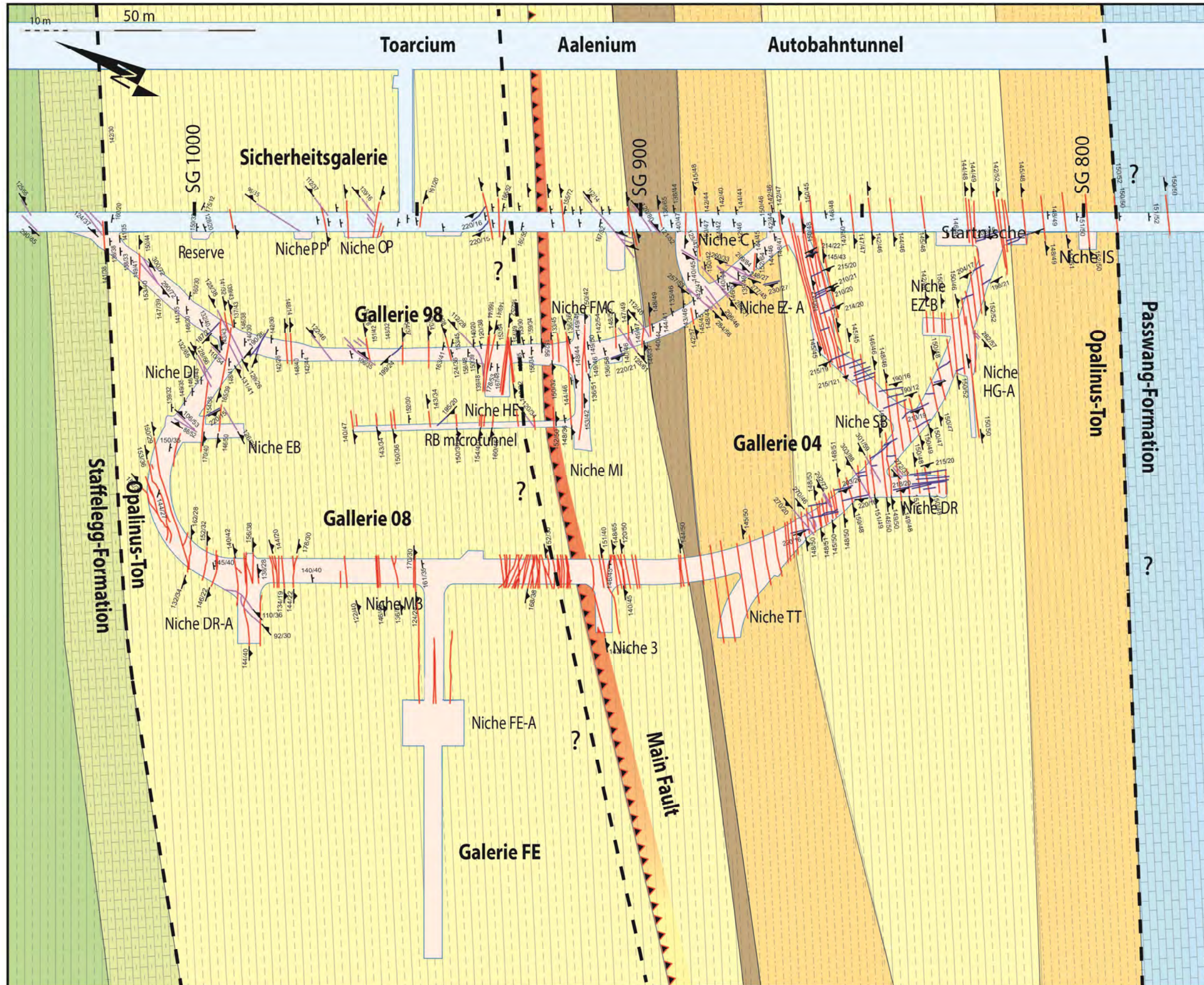
Figur A2-11: Kartierung No. 4 (Subfaziestyp A) (aus Müller & Jaeggi, 2012).

Appendix 3

Strukturkarte des Felslabors Mont Terri

Christophe Nussbaum, Paul Bossart

empty page



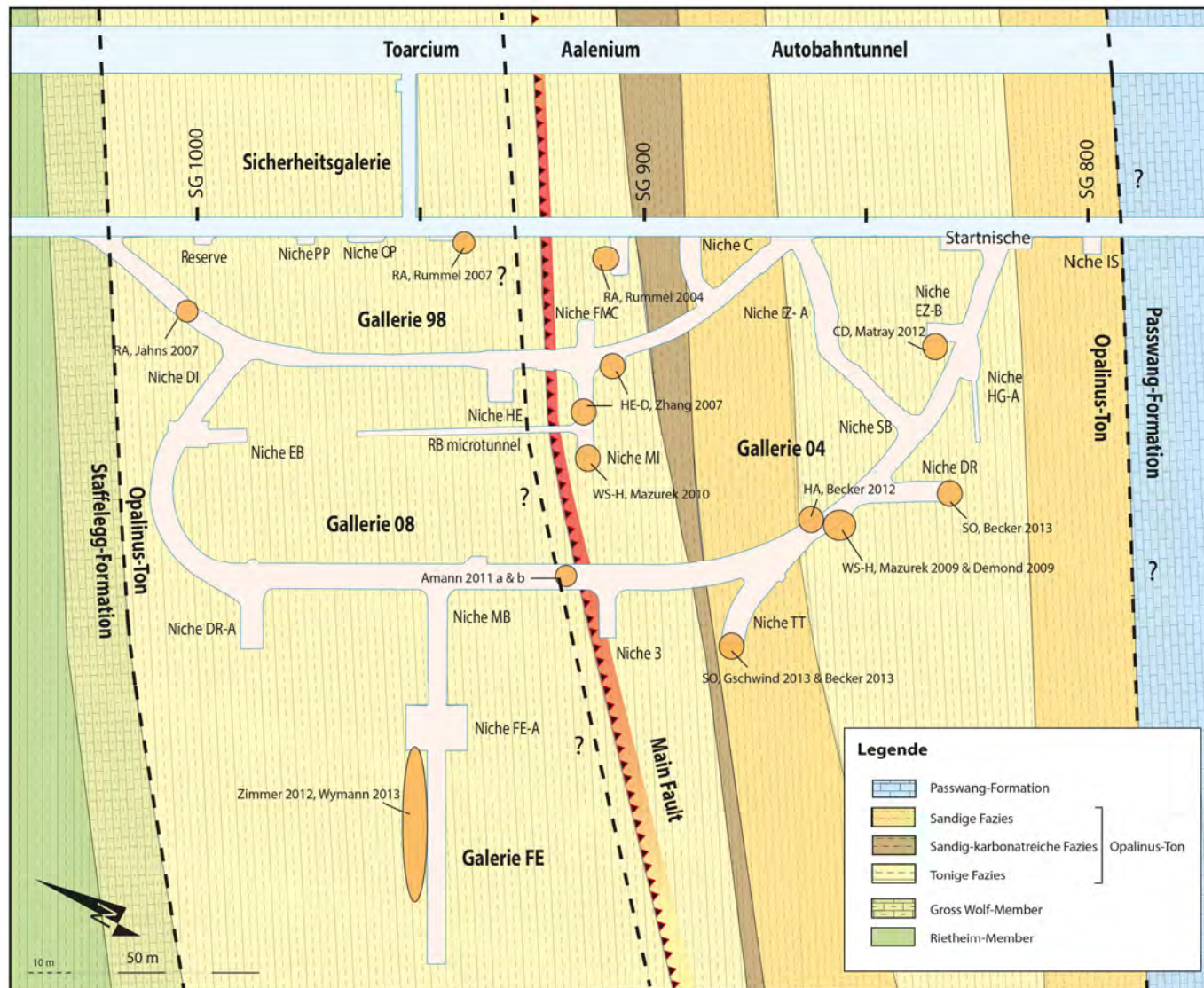
Figur A3-1: Strukturkarte des Felslabors Mont Terri mit angepasster Stratigrafie nach Nussbaum et al. (2011).

Appendix 4

Petrophysikalische Parameter

David Jaeggi, Linda Wymann

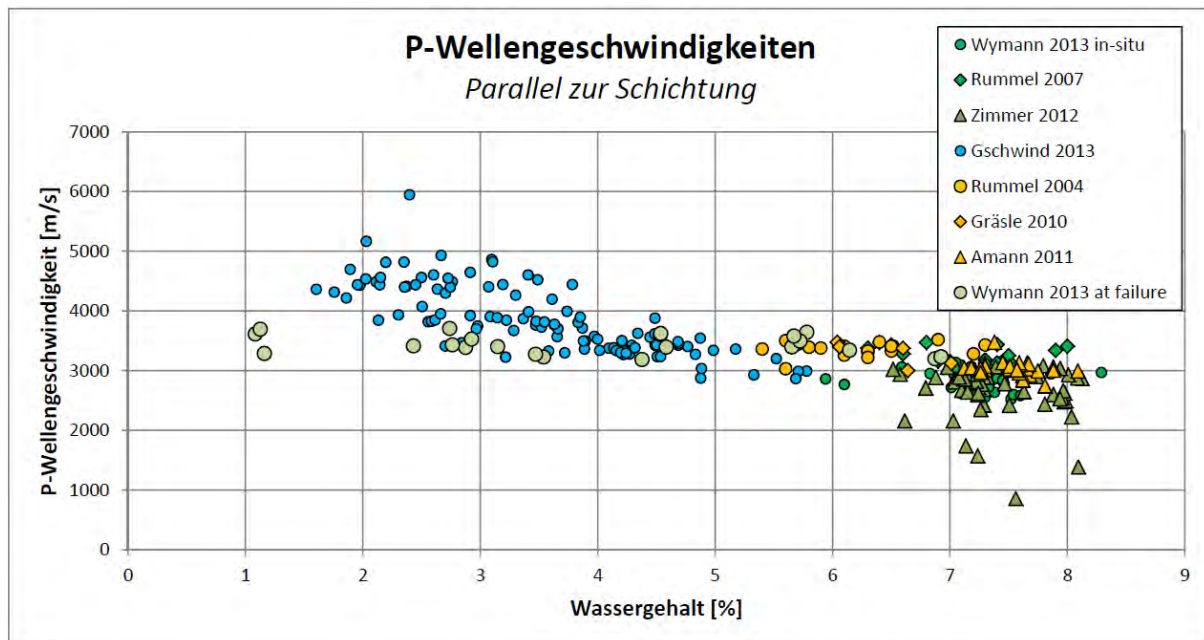
empty page



Figur A4-1: Probennahmestellen für die Ermittlung petrophysikalischer Kennwerte. Es handelt sich hier nur um die neuesten Daten ab 2007, welche jünger sind als der Gesamtbericht von Bossart und Thury (2008).

Petrophysikalische Kennwerte (P-Wellengeschwindigkeit)

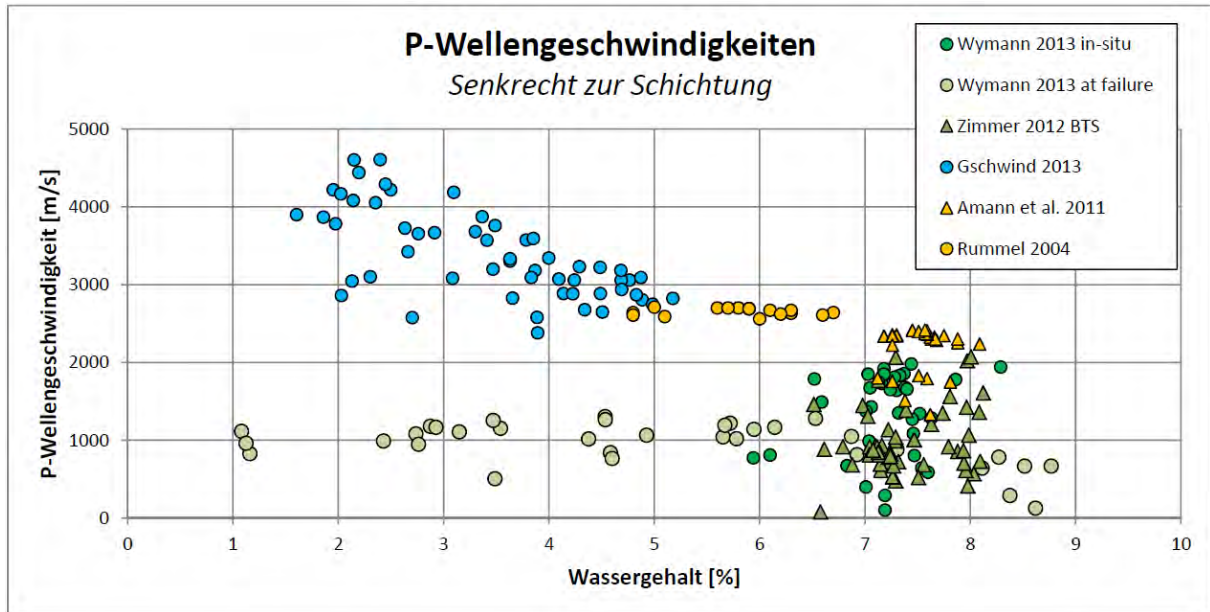
Bei den P-Wellengeschwindigkeiten V_p wurden Daten aus einaxialen und triaxialen Druckversuchen grafisch dargestellt. Die Plots wurden versus Wassergehalt erstellt. Die Daten aus der Auflockerungszone (EDZ) wurden ausgeschlossen. D.h. Daten aus einer Tiefe kleiner als 2 Meter wurden nicht berücksichtigt. Eine Ausnahme bilden die Daten aus der sandigen Fazies (Gschwind, 2013). Dort wurde keine EDZ festgestellt und daher wurden auch sehr oberflächennahe Proben berücksichtigt. Generell sind viele Daten aus der tonigen Fazies (Aalenium und Toarcium vorhanden). Von der sandigen Fazies gibt es nur Daten aus der Studie Gschwind (2013). Es wurden total ca. 120 triaxiale Tests und 200 uniaxiale Tests, bei welchen auch die P-Wellengeschwindigkeit V_p für die Überprüfung von Rissbildung und Probenzustand mitgemessen worden ist, berücksichtigt. Proben mit vielen Trockenrissen aufgrund der Bearbeitung und ungenügender Konditionierung ergeben eine hohe Streuung der Werte.



Figur A4-2: V_p -Daten parallel zur Schichtung. Blau: Sandig, Gelb: Tonig (Aalenium), Grün: Tonig (Toarcium). Die Daten „Wymann 2013 at failure“ sind bereits von Mikrorissen durchsetzt (Verändert nach Thoeny, 2013).

Kommentar zu Figur A4-2:

- V_p in sandiger Fazies ist mit 3000 bis 5000 m/s klar höher, als in toniger Fazies.
- Werte aus Wymann (at failure) zeigen parallel zur Schichtung hohe Werte im Vergleich zu den Messungen senkrecht zur Schichtung.
- Parallel zur Schichtung sind die Werte in der tonigen Fazies ca. 500 m/s höher, in der sandigen ca. 500-1000 m/s höher, als senkrecht zur Schichtung (**Figur A4-3**).



Figur A4-3: Vp-Daten senkrecht zur Schichtung. Blau: Sandig, Gelb: Tonig (Aalenium), Grün: Tonig (Toracium). Die Daten „Wymann 2013 at failure“ sind bereits von Mikrorissen durchsetzt (Verändert nach Thoeny, 2013).

Kommentar zu Figur A4-3:

- Vp in sandiger Fazies ist mit 3000 bis 4000 m/s klar höher, als in toniger Fazies, wo die Werte alle unterhalb von 3000 m/s liegen.
- Werte aus Wymann (at failure) sind nicht realistisch für die tonige Fazies. Die Proben waren bei der Messung bereits von Mikrorissen durchsetzt und damit nicht mehr repräsentativ für in-situ Werte.
- Werte von Amann und Rummel geben je nach Sättigung 2400-2700 m/s, was auch in etwa den im Labor gemessenen in-situ P-Wellengeschwindigkeiten Vp entspricht.
- Die grosse Streuung in der sandigen Fazies zeigt die Heterogenität an. Die unterschiedlichen Wassergehalte zeigen hier die unterschiedlichen Aufnahmekapazitäten an.

Tabelle A4-1: Im Bericht berücksichtigte Literatur, inkl. Bewertung.

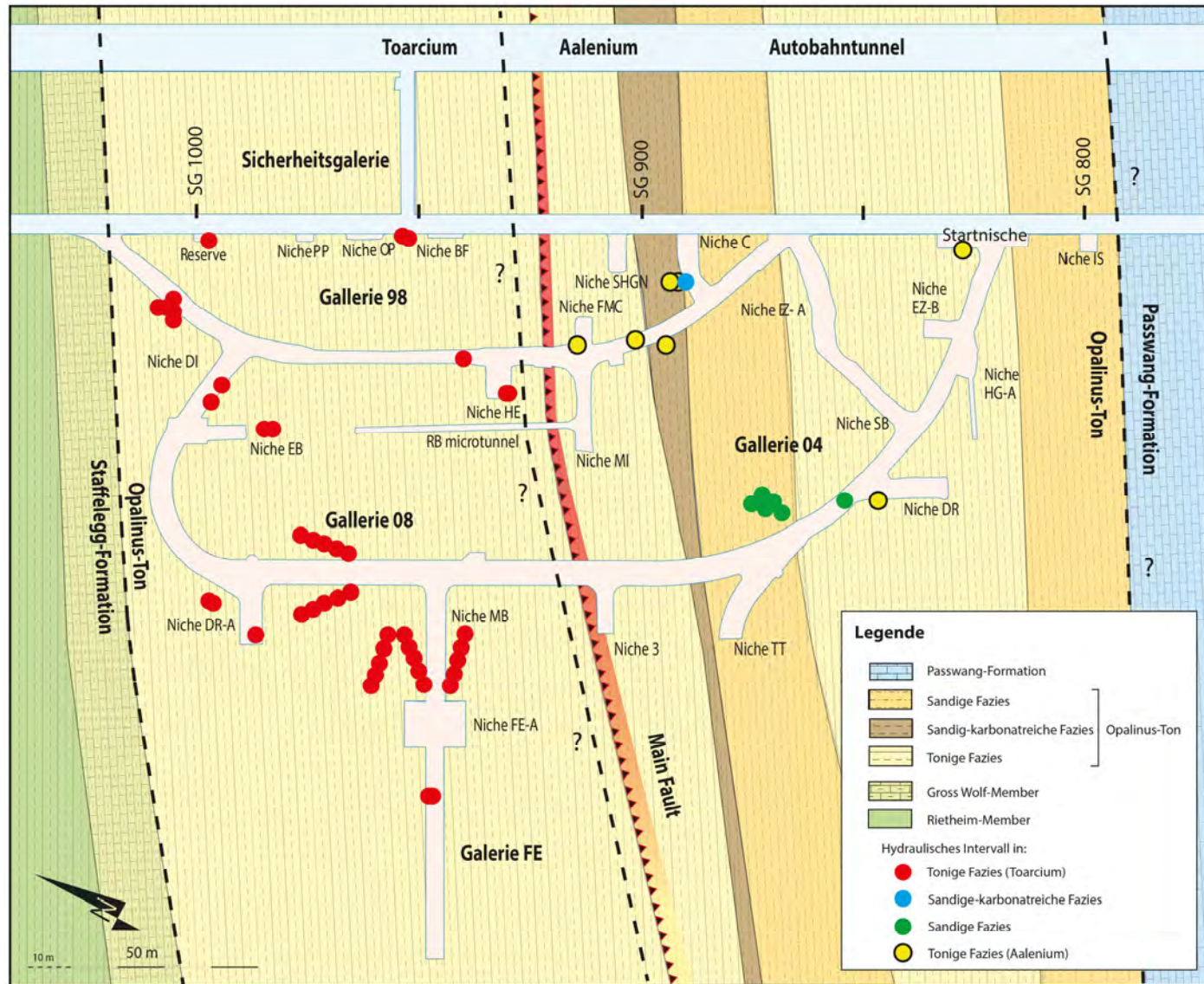
Experiment	Parameter	Methode	Literatur	Bewertung der Daten
HE-D	Water retention characteristics, densities, porosity	Weight/Volume measurements	Zhang et al., 2007 (TR2007-02)	BHE-D3,D4, D5,D6 und D0. Verwendung: Es wurden keine Geschwindigkeiten gemessen. Die Daten für Dichte und Porosität stammen von sehr grossen Proben. Sollten auf jeden Fall berücksichtigt werden.
HM	Vp, densities, porosities	Ultrasonic velocity measurements	Amann 2011 a & b	BRC-3 und -4. Verpackt in vakuumierter & beschichteter Aluminiumfolie Verwendung: (a) 19 S-Proben für Vp (+Dichte und Porosität) von 2011a(Uniaxial) und 11 Proben für Vp (+Dichte und Porosität) von 2011b (Triaxial).
HM	Vp, density, porosity	Ultrasonic velocity measurements	Wymann, 2013 (Master thesis)	BFE-A3. Verpackt in vakuumierter & beschichteter Aluminiumfolie.Verwendung: Alle P samples für Vp Ausschluss: Jene Proben aus der höchsten Sättigungsstufe (99% RH in Exikkator) + einzelne Proben aufgrund von Heterogenität oder hoher Vp Geschwindigkeit (deutet auf pre-damage hin).
HM	Vp, density, porosity	Ultrasonic velocity measurements	Zimmer, 2012 (Bachelor thesis)	BFE-A3. Verpackt in vakuumierter & beschichteter Aluminiumfolie. Verwendung: Alle zur Verfügung stehenden Daten. Ausschluss: Deutliche Ausreisser wurden nicht berücksichtigt.
LT-A	Vp, Vs, density	Ultrasonic velocity measurements	Kaufhold et al., 2013 (TN2013-59)	BLT-A4. Proben aus der sandigen Fazies der TT-Nische parallel zur Schichtung (P-Proben) ohne Konditionierung bei genau definiertem Wassergehalt. Proben wurden eingepackt in Aluminiumfolie und dann in Stickstoff-geflutete Behälter. Daten werden erwähnt, jedoch aufgrund der schwierigen Vergleichbarkeit (kein Wassergehalt) nicht geplottet.
	Vp, density, porosity	Ultrasonic velocity measurements	Gräsele & Plischke, 2011 (TN2010-86)	BLT-A1 und BLT-A2. Bohrungen aus der sandigen Fazies der TT-Nische senkrecht, bzw. parallel zur Schichtung ohne Konditionierung bei genau definiertem Wassergehalt. Proben wurden eingepackt in Aluminiumfolie und dann in Stickstoff-geflutete Behälter. Daten werden erwähnt, jedoch aufgrund der schwierigen Vergleichbarkeit (kein Wassergehalt) nicht geplottet.
RA	Vp, Anisotropy, water content	Anelastic Strain Recovery (ASR) and P-Wave Anisotropy Velocity (WVA)	Wolter, 2003 (TN2002-46)	BLT-9 und BHA-1. Vakuumverpackt in Aluminiumfolie. Die Methode ist anders als bei sonstigen Berichten. Proben wurden mit Epoxidharz verkleidet vor der Messung. Daten zu der p-Wellen Geschwindigkeit unter 0 MPa confining pressure gibt es leider nicht. Diese TN kann im Moment nicht verwendet werden.
	Density, water content, Edyn, vdyn, Vp,Vs	Ultrasonic velocity measurements nach ISRM bouancy und volum. Method	Rummel & Weber, 2007 (TN2005-57)	BRA-3. Von insgesamt 15 P-Proben konnten Daten zu Vp (&Vs) und den dynamischen Parametern Edyn und vdyn verwendet werden. Da nicht klar ist, ob die S-Proben zu diesem Zeitpunkt schon zusammengeklebt waren, scheint es besser, diese nicht zu berücksichtigen.
	Water content, Vp, Vs, Edyn, vdyn,	Ultrasonic velocity tests (in-vessel transducer during test)	Jahns, 2007 (TN2007-30)	BRA-10. Vakuumverpackt. Verwendung: Alle Proben (P,S&Z)sind von guter Qualität und können verwendet werden. Ausschluss: Aufgrund der Methode (in-vessel transducer) werden die Resultate vorläufig nicht mit den anderen verglichen.
	Vp, Vs, Edyn, vdyn, density, water content	Ultrasonic velocity measurements nach ISRM bouancy method	Rummel & Weber, 2004 (TN2004-38)	BRA-1 und BRA-2. BRA-1 (mit Luft gebohrt) und BRA-2 (mit Öl gebohrt), Lagerung in Folie oder Druckbehältern. Gute Qualität. Verwendung: Alle P&S Proben welche auf Vp (&Vs) untersucht wurden. Diese lieferten auch Edyn und vdyn Angaben (berechnet). Ausschluss: Proben mit tiefem Wassergehalt oder welche laut Autor gebrochen sind, alle Z-Proben.
SO	Vp, density, porosity	Ultrasonic velocity measurements	Gschwind, 2013 (Master thesis)	BSO-3 bis BSO-32. Proben aus der TT Nische. Verpackt in vakuumierter & beschichteter Aluminiumfolie. Verwendung: Alle P und S- Proben.
VA	Densities, porosities, specific surface		Becker, 2013 (TN2013-73)	BVA (DR-Nische) und BSO (TT-Nische).
WS-H	Densities, porosities		Mazurek et al., 2010 (TN2010-22)	BHG-B11. In aluminiumbeschichtete Plastikfolie verpackt.
	Densities, porosities	Kerosen pycnometrie Paraffin Verdrängung	Mazurek et al., 2009 (TN2009-14)	BWS-H1 und H2. Verpackt in vakuumierter & beschichteter Aluminiumfolie.
	Vp, densities, porosities, Edyn, vdyn	Ultrasonic velocity measurements weight/ volume measurements ethanol pycnometrie	Demond & Rummel, 2009 (TN2008-60)	BWS-H1 und H2. Verpackt in vakuumierter & beschichteter Aluminiumfolie.

Appendix 5

Hydraulische Parameter

David Jaeggi, Mauro Häusler

empty page



Figur A5-1: Standorte aller durchgeführten, belastbaren hydraulischen Tests im Felslabor Mont Terri (ausserhalb der EDZ).

Hydraulische Kennwerte (Durchlässigkeitsbeiwert K)

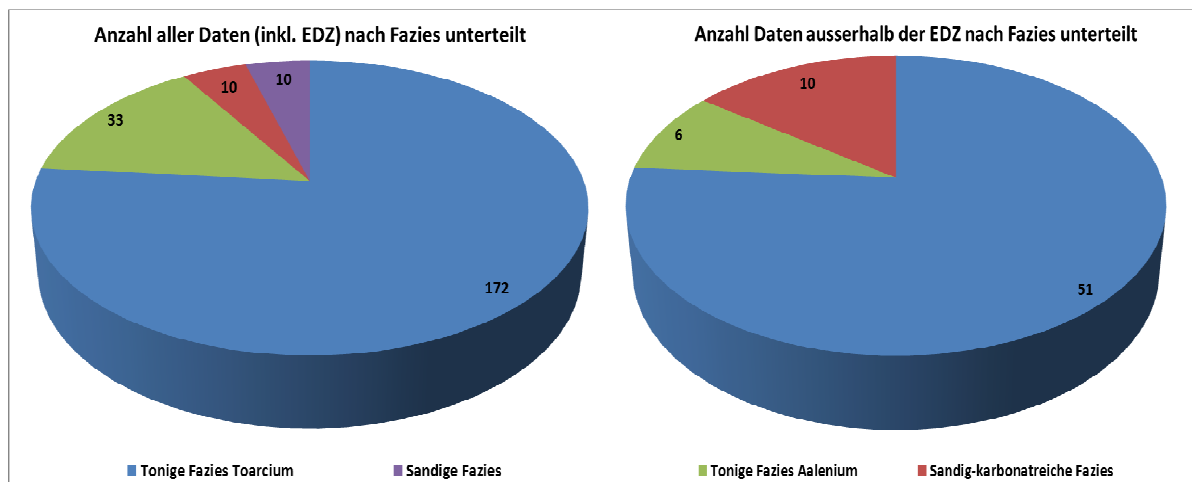
Aus den ca. 80 vorhandenen Berichten über hydraulische Tests sind vor allem die beiden Gesamtkompilationen von K-Werten aus in-situ hydraulischen Tests (Nussbaum & Bossart, 2004) und die hydraulische Datenbank der Phasen 1-16 (Lavanchy & Mettier, 2012) zu nennen. In diesen beiden Berichten wurden die vorhandenen Daten kompiliert und bewertet. Für Details zur Berücksichtigung von Daten aus Berichten wird auf die beiden Arbeiten verwiesen.

Weitere wichtige Infos lieferten die konzeptuellen Abhandlungen von Schlicker & Croisé (2001, 2004) und die beiden Analyse- und Syntheseberichte von Rohs & Mrugalla (2009) und Rohs (2010).

Diese Daten wurden mit den neuesten Daten von Rösli (2010), Achtziger & Rösli (2012), Trick & Kontar (2013), Trick et al. (2013), Ferrari & Dubay (2013) ergänzt. Zudem wurde eine Unterteilung in tonige Fazies (Toarcium), tonige Fazies (Aalenium) und sandig-karbonatreiche und sandige Fazies vorgenommen.

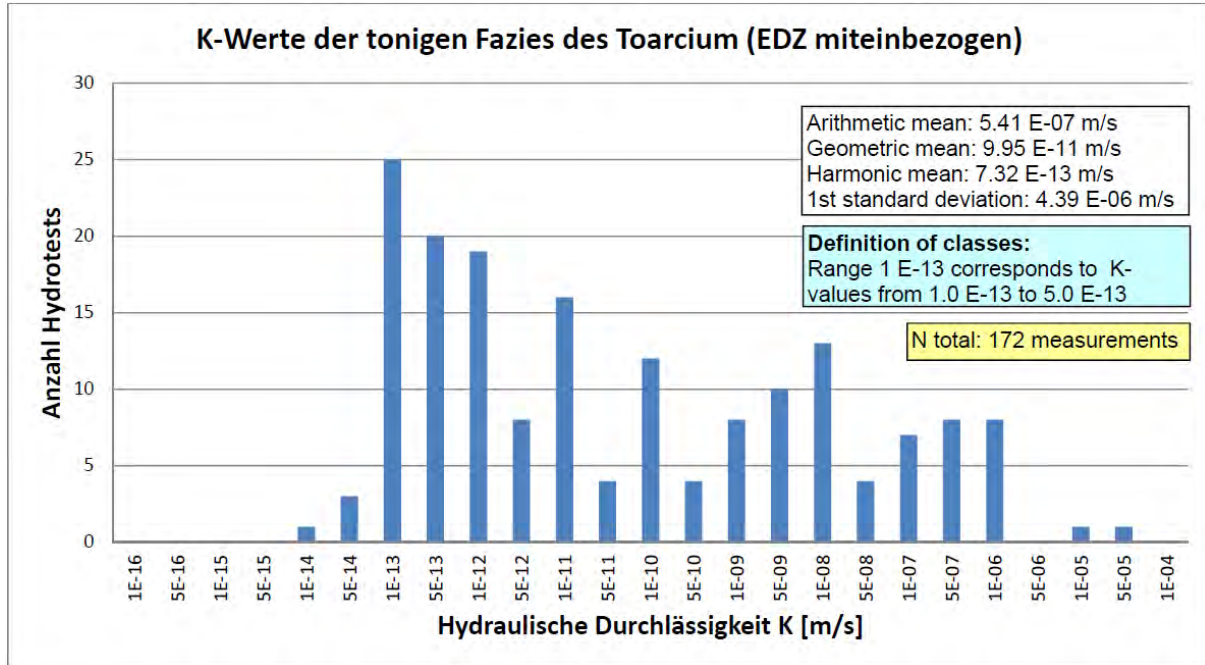
An hydraulischen Tests wurden vor allem HI (constant head injection) und PI (pulse injection) Tests durchgeführt. Für die Speichereigenschaften S (Speicherkoefizient) und Ss (Spezifischer Speicherkoefizient) gibt es kaum Daten, da die meisten hydraulischen Versuche single hole durchgeführt wurden. Für die Speichereigenschaften wären Daten aus cross hole Versuchen notwendig. Bei fehlender Angabe des hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerts (K) wurde dieser aus der Transmissivität (T) und der Intervalllänge (m) berechnet.

Es wurde eine Qualifizierung der Daten in Bezug auf die Beeinflussung der EDZ vorgenommen. Von total 225 erfassten Tests liegt nur gerade 1/3 ausserhalb der EDZ (**Figur A5-2**). Zudem sind aus der tonigen Fazies (Toarcium) viel mehr Daten vorhanden als aus der tonigen Fazies (Aalenium) oder der sandigen oder sandig-karbonatreichen Fazies. Die nachfolgenden **Figuren A5-3 bis A5-10** zeigen zudem die viel grössere Spannweite an hydraulischen Durchlässigkeiten, wenn Daten aus der EDZ mitberücksichtigt werden.

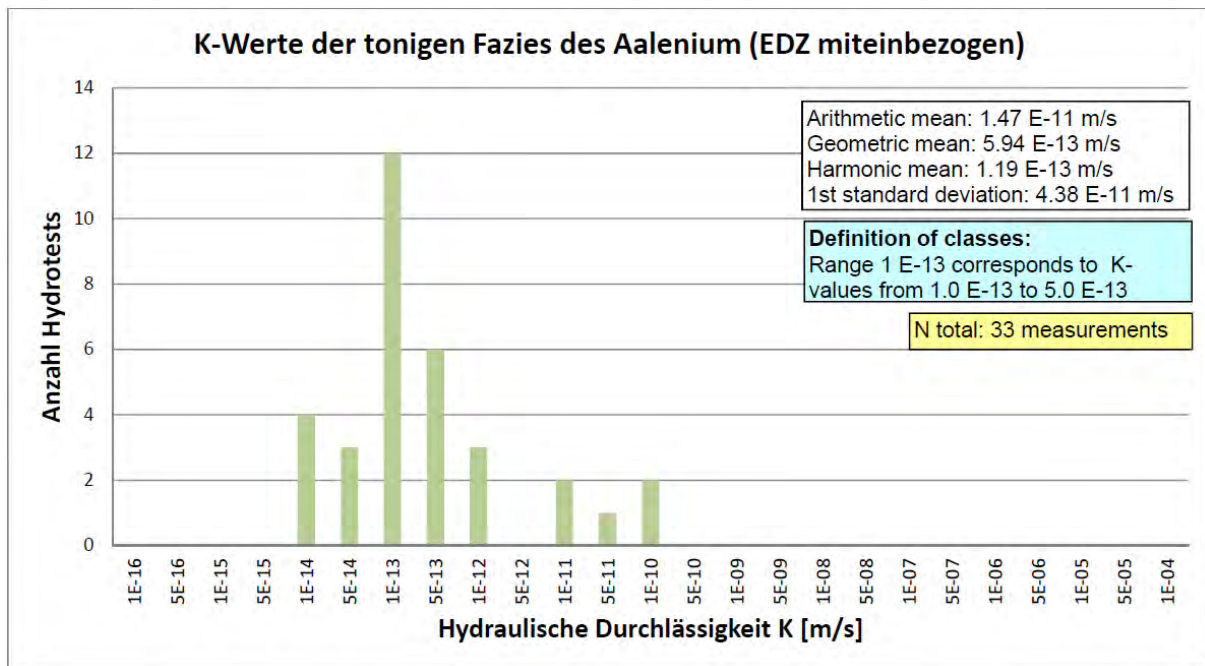


Figur A5-2: Verteilung aller hydraulischen Tests, inkl. Daten aus der Auflockerungszone (EDZ) (rechts) und der Daten ausserhalb der EDZ (links) auf die verschiedenen Faziestypen (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).

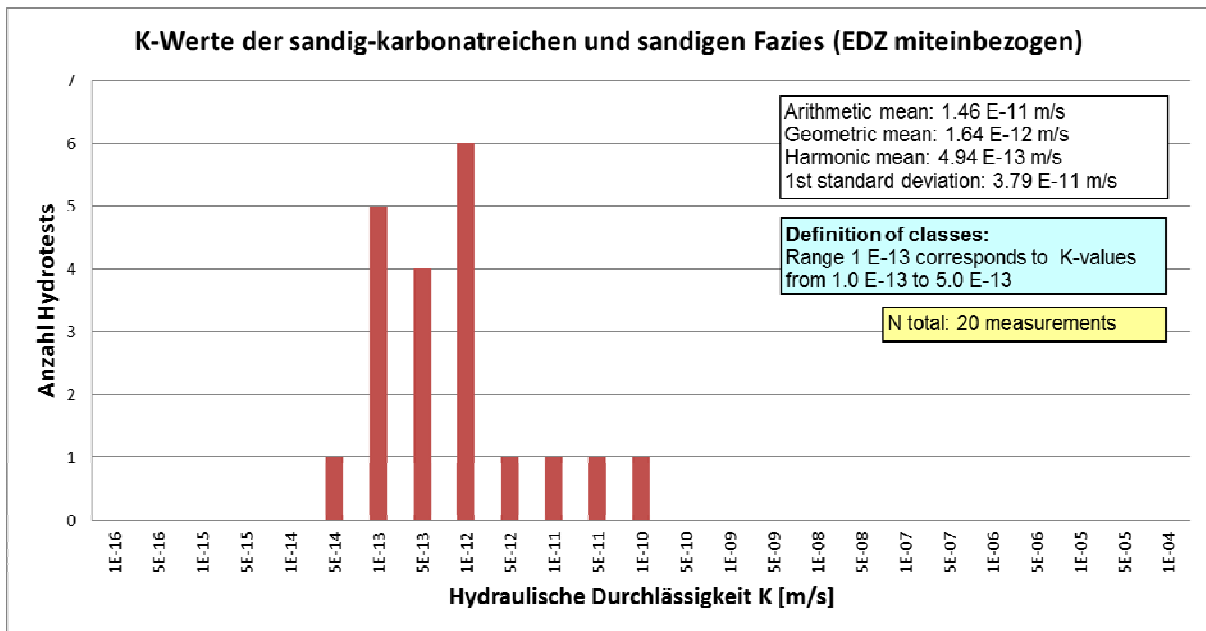
Durchlässigkeitsbeiwert mit EDZ



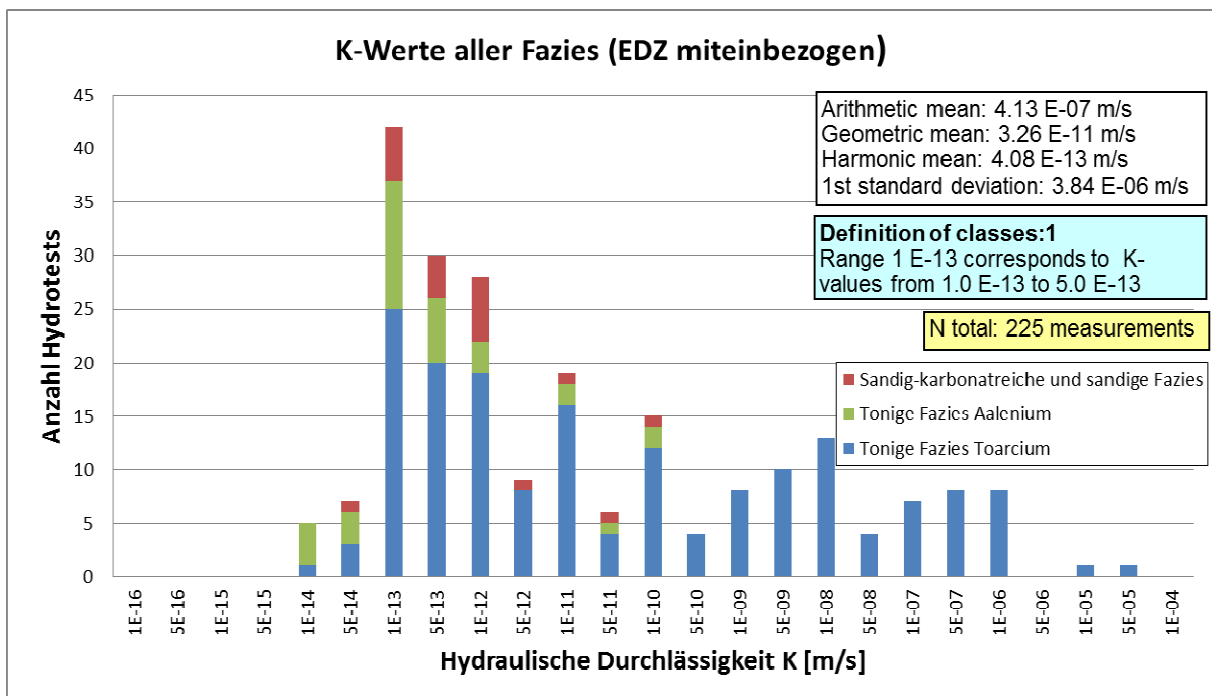
Figur A5-3: Durchlässigkeitsbeiwerte tonige Fazies Toarcium (inkl. EDZ) (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).



Figur A5-4: Durchlässigkeitsbeiwerte tonige Fazies Aalenium (inkl. EDZ) (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).



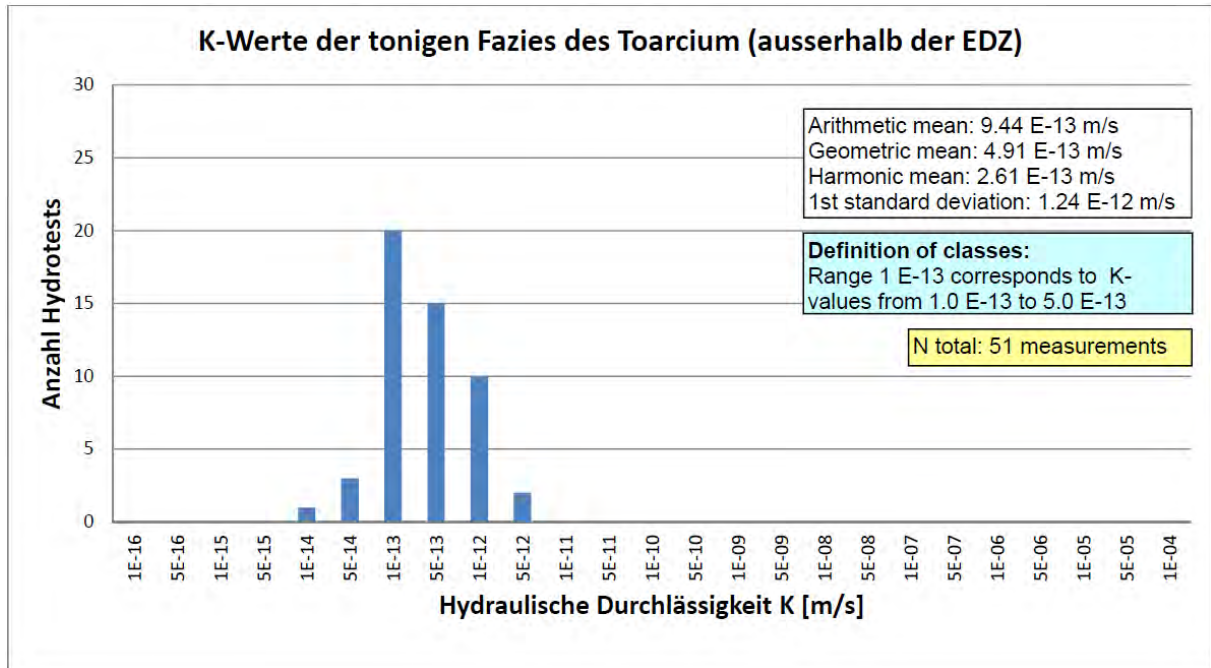
Figur A5-5: Durchlässigkeitsbeiwerte karbonat-reiche sandige und sandige Fazies (inkl. EDZ) (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).



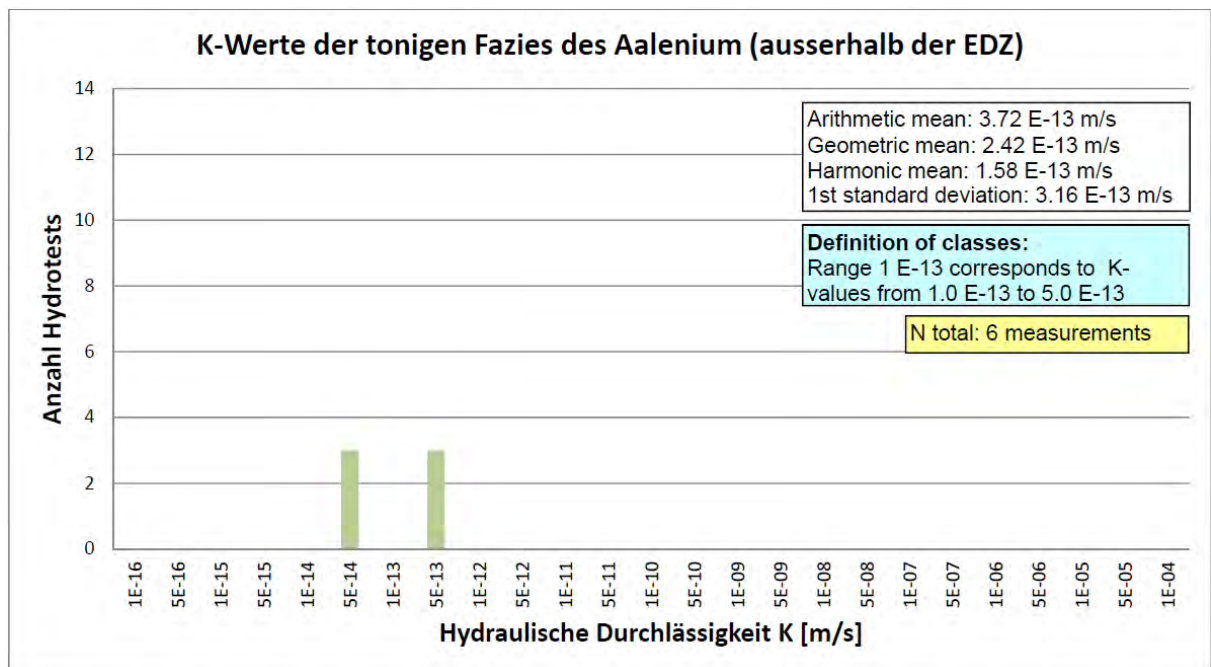
Figur A5-6: Durchlässigkeitsbeiwerte alle Daten (inkl. EDZ), zusammengesetztes Histogramm (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).

- Grosse Ranges mit EDZ
- Viel weniger Daten aus Aalenium und karbonat-reicher sandiger Fazies
- Kein klarer Trend bezüglich Kf erkennbar

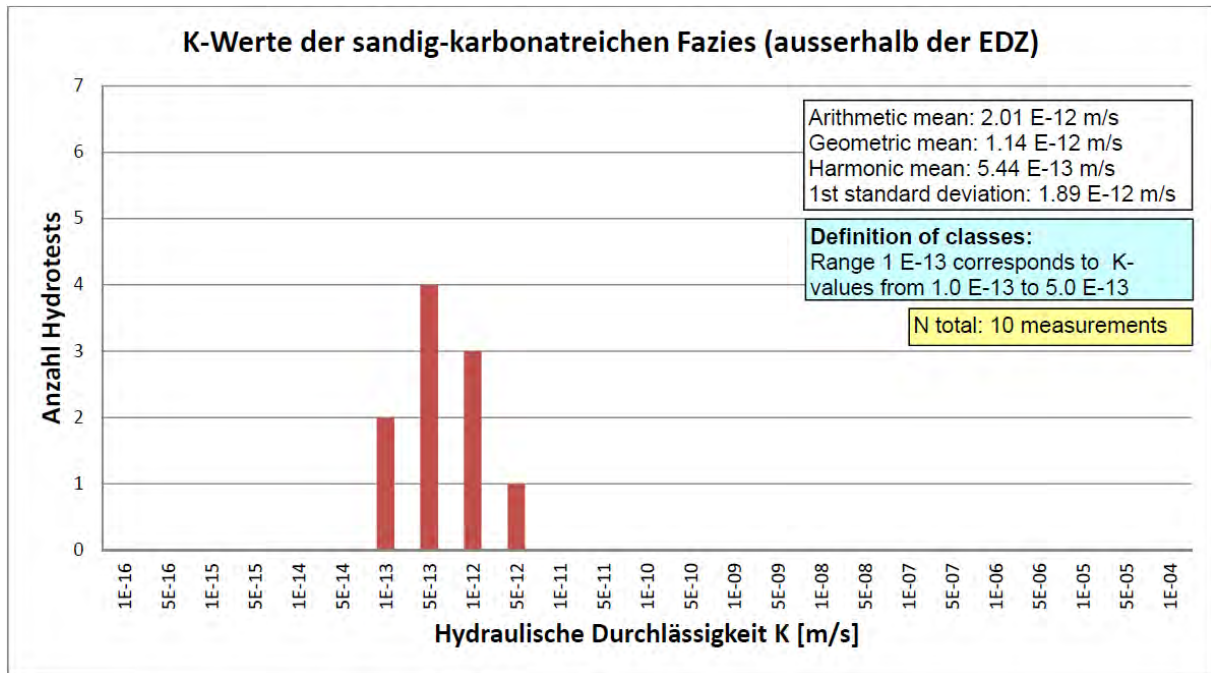
Durchlässigkeitsbeiwert ohne EDZ



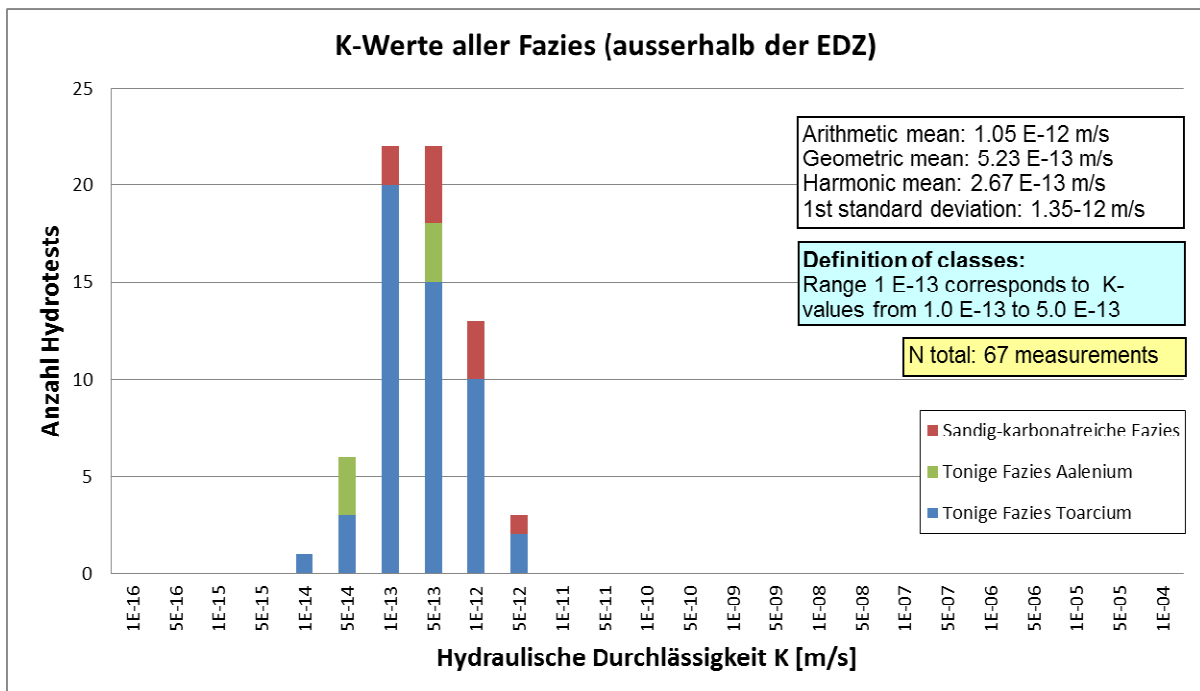
Figur A5-7: Durchlässigkeitsbeiwerte tonige Fazies Toarcium (ohne EDZ) (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).



Figur A5-8: Durchlässigkeitsbeiwerte tonige Fazies Aalenium (ohne EDZ) (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).



Figur A5-9: Durchlässigkeitsbeiwerte karbonat-reiche sandige und sandige Fazies (ohne EDZ) (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).



Figur A5-10: Durchlässigkeitsbeiwerte aller Daten (ohne EDZ), zusammengesetztes Histogramm (verändert nach Lavanchy & Mettier, 2012).

Kommentar zu Figur A5-10:

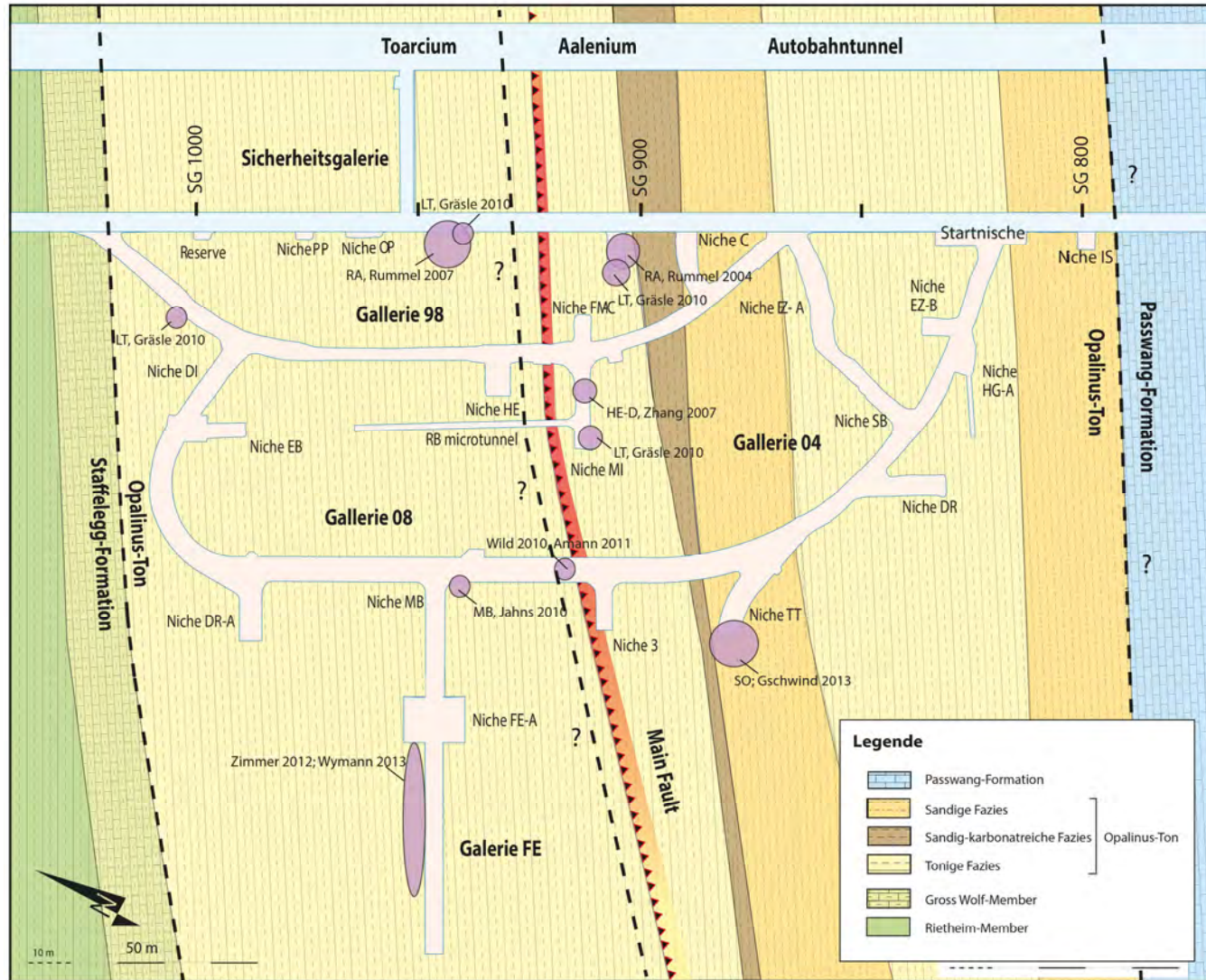
- Viel kleinere Ranges ohne EDZ
- Kaum Unterschied zwischen toniger Fazies Toarcium und Aalenium
- Leicht höhere Durchlässigkeitsbeiwerte in der karbonat-reichen sandigen und sandigen Fazies

Appendix 6

Felsmechanische Parameter

David Jaeggi, Linda Wymann

empty page

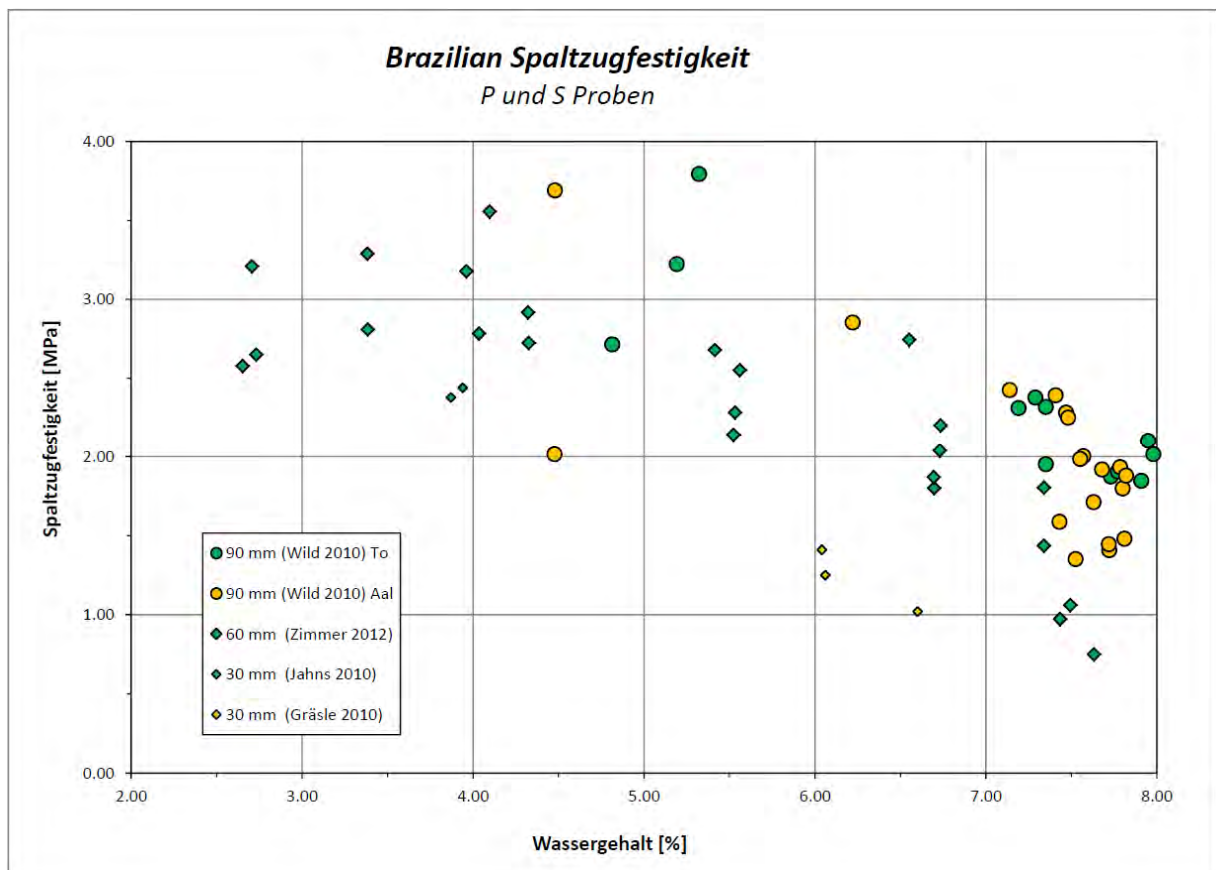


Figur A6-1: Probennahmestellen für die Ermittlung felsmechanischer Kennwerte

Felsmechanische Kennwerte (Brazilian Spaltzugfestigkeit, Einaxiale Druckfestigkeit (UCS) - Triaxial Tests, elastische Parameter E-Modul und Querdehnungszahl)

Für die nachfolgenden Grafiken wurden Daten aus einaxialen Druckversuchen (UCS) und triaxialen Druckversuchen (Triax) verwendet. Total handelt es sich dabei um Daten aus 120 triaxial Tests (Triax) und 200 einaxialen Tests (UCS). Die Daten wurden versus Wassergehalt geplottet. Daten aus der Auflockerungszone (EDZ) wurden ausgeschlossen (kleiner als 2 Meter tief) mit Ausnahme der sandigen Fazies, wo für den Datensatz von Gschwind (2013) keine EDZ festgestellt worden ist. Generell sind bei den felsmechanischen Parametern viele Daten aus der tonigen Fazies vorhanden und zwar für das Aalenium und auch das Toarcium. Bei der sandigen Fazies hingegen ist erst ein umfangreicher Datensatz von Gschwind (2013) vorhanden. Der Vergleich der unterschiedlichen Datensätze untereinander ist aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen oftmals schwierig:

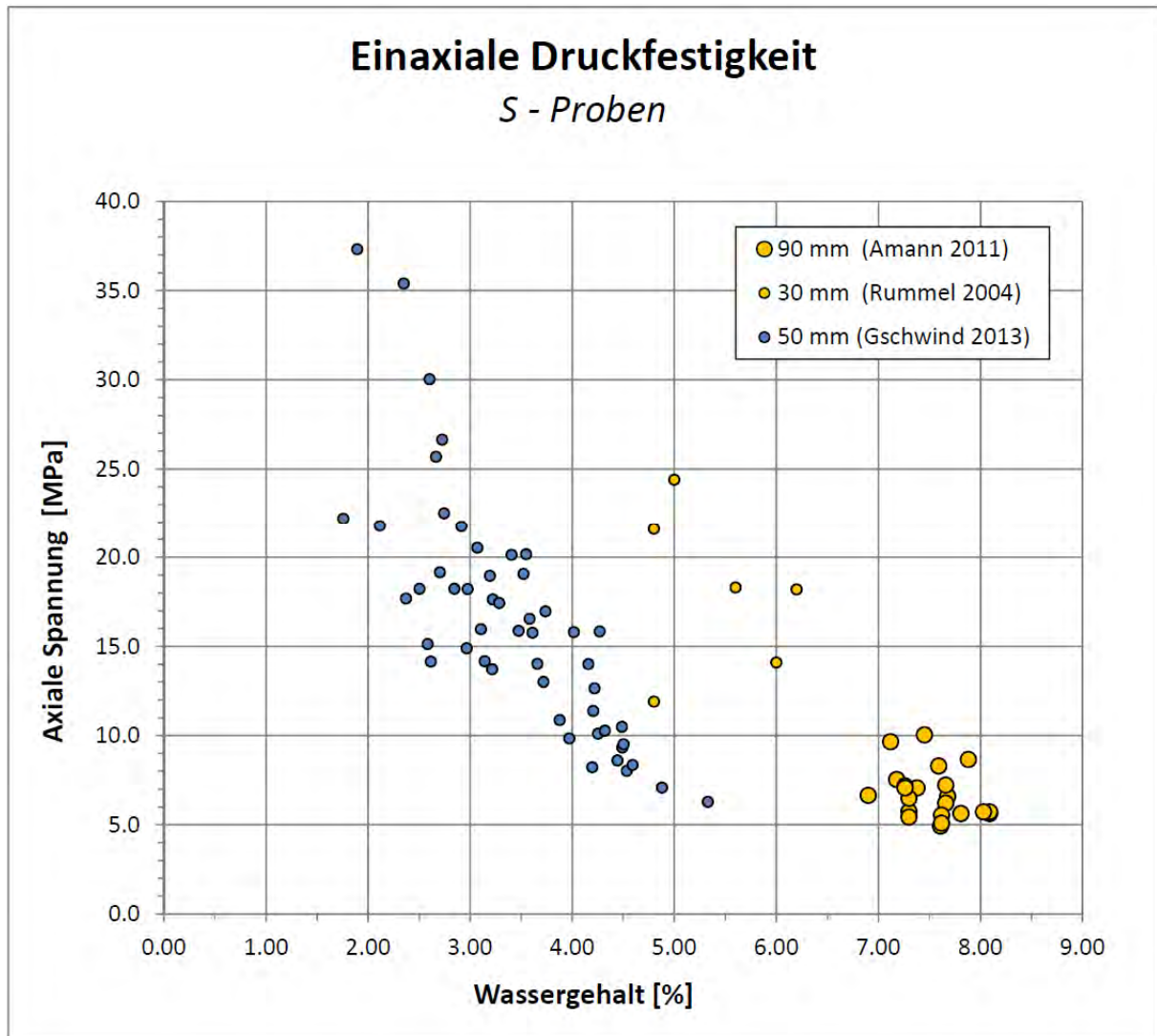
- Probenentnahme und Verpackung unterschiedlich
- Konditionierung (Sättigung/Saugspannung) zu uneinheitlich
- Nur 1 Studie mit Konditionierung aus der sehr heterogenen sandigen Fazies
- Selbst Datensätze aus der sehr homogenen tonigen Fazies ergeben grosse Streuungen auf den Crossplots



Figur A6-2: Wassergehalt versus Zugfestigkeit für P- und S-Proben. Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), grün: Tonige Fazies (Toarcium), eckig: S-Proben, rund: P-Proben. Die jeweiligen Probengrößen sind in Millimeter angegeben. Daten aufbereitet und ergänzt nach Thoeny (2013).

Kommentar zu Figur A6-2:

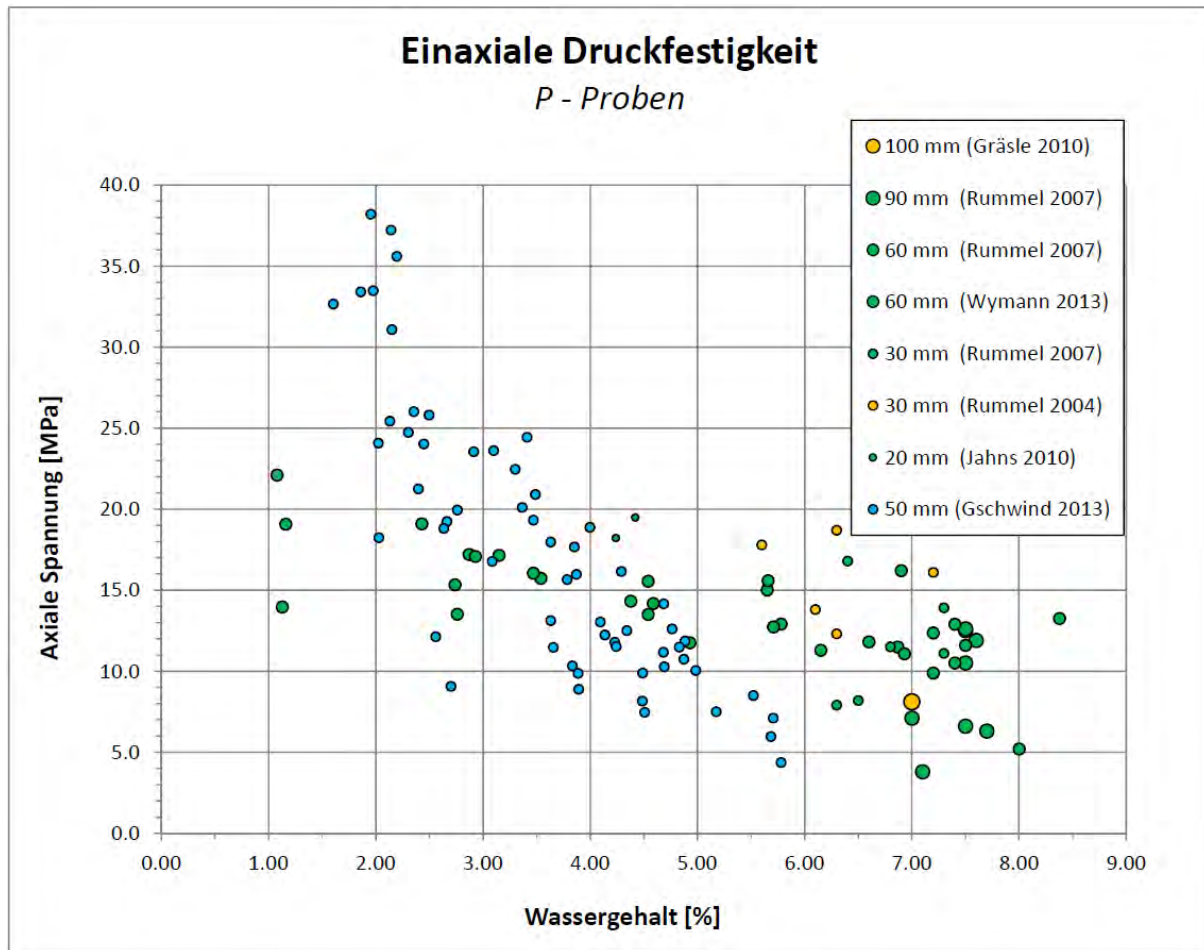
- Nur Werte aus toniger Fazies Aalenium und Toarcium
- Kein klarer Trend erkennbar bezüglich lithologischer Variabilität
- S-Proben haben erwartungsgemäss höhere Festigkeiten



Figur A6-3: Wassergehalt versus axiale Spannung für S-Proben. Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), blau: Sandige Fazies. Die jeweiligen Probengrössen sind in Millimeter angegeben. Daten aufbereitet und ergänzt nach Thoeny (2013).

Kommentar zu Figur A6-3:

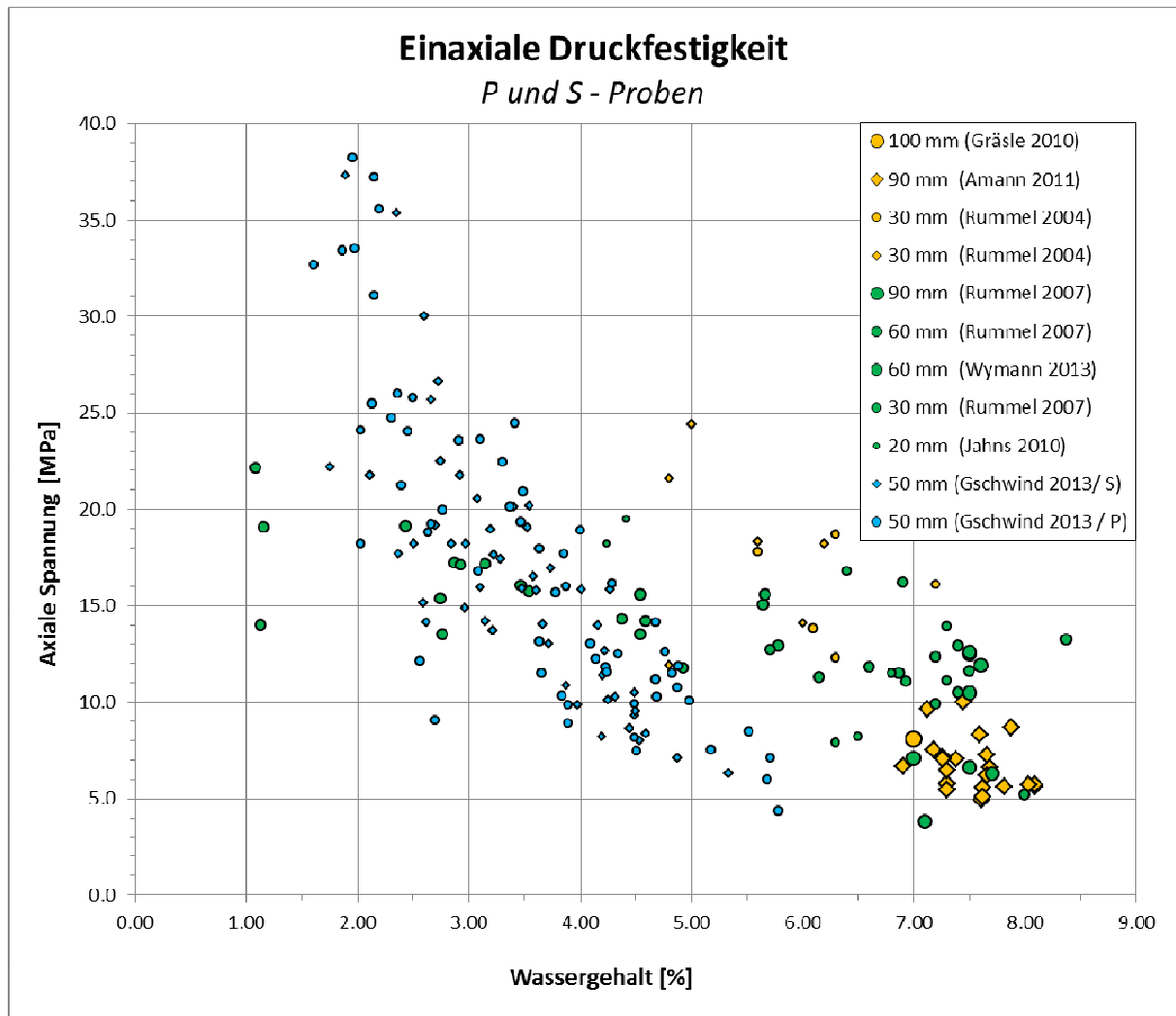
- Daten aus Amann (2011) sehr homogen
- Daten Gschwind (2013) aus sehr heterogener sandiger Fazies



Figur A6-4: Wassergehalt versus axiale Spannung für P-Proben. Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), grün: Tonige Fazies (Toarcium), blau: Sandige Fazies. Die jeweiligen Probengrößen sind in Millimeter angegeben. Daten aufbereitet und ergänzt nach Thoeny (2013).

Kommentar zu Figur A6-4:

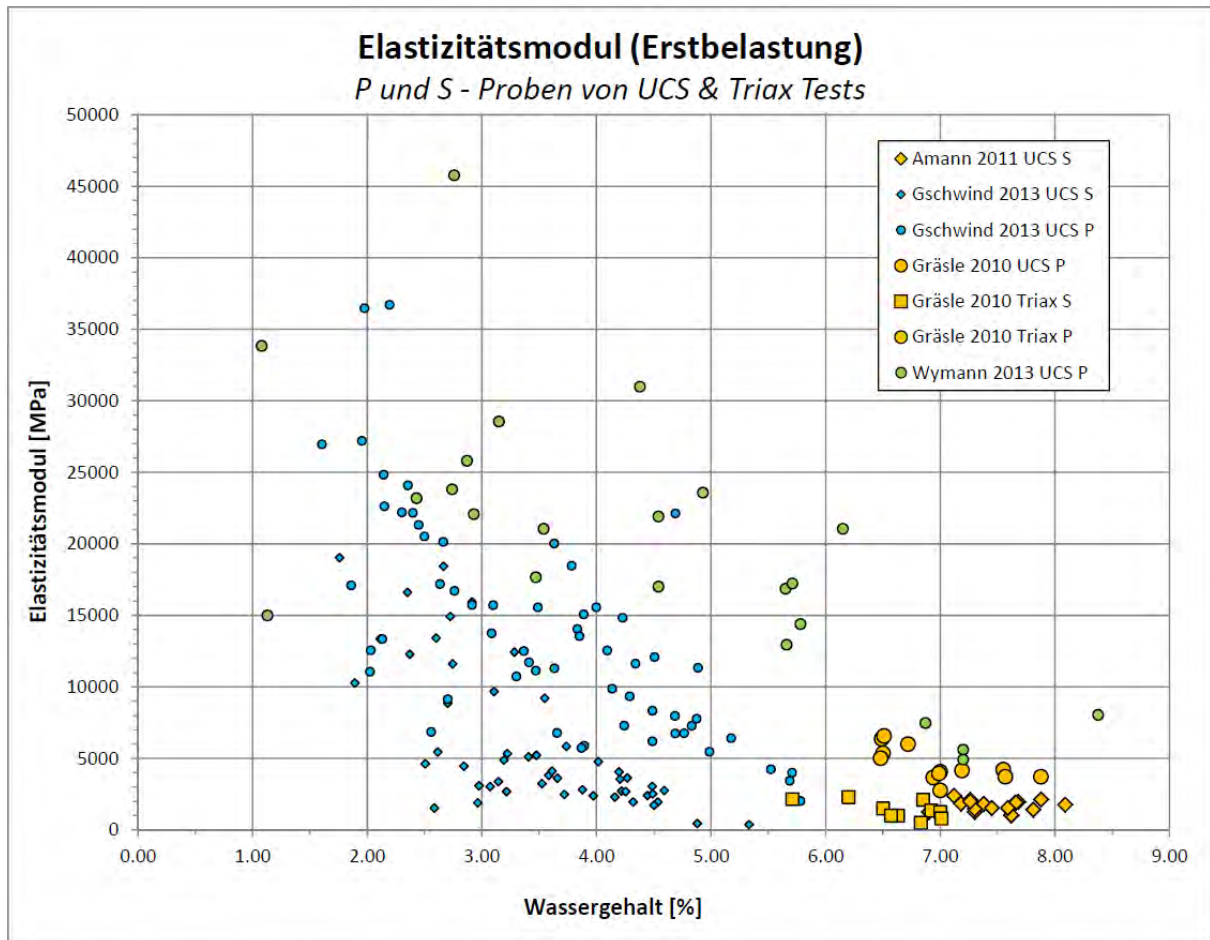
- Resultate aus Gschwind scheinen im Vergleich etwas steiler, einaxiale Druckfestigkeit (UCS) nimmt mit abnehmendem Wassergehalt steiler zu als bei tonigen Proben
- Heterogenität sandig-tonig sehr unterschiedlich
- Konditionierung unterschiedlich:
 - Saugspannung Gschwind (0-4.1 MPa)
 - Saugspannung Wymann (0-220 MPa)



Figur A6-5: Wassergehalt versus axiale Spannung für P- und S-Proben. Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), grün: Tonige Fazies (Toarcium), blau: Sandige Fazies, eckig: S-Proben, rund: P-Proben. Die jeweiligen Probengrößen sind in Millimeter angegeben. Daten aufbereitet und ergänzt nach Thoeny (2013).

Kommentar zu Figur A6-5:

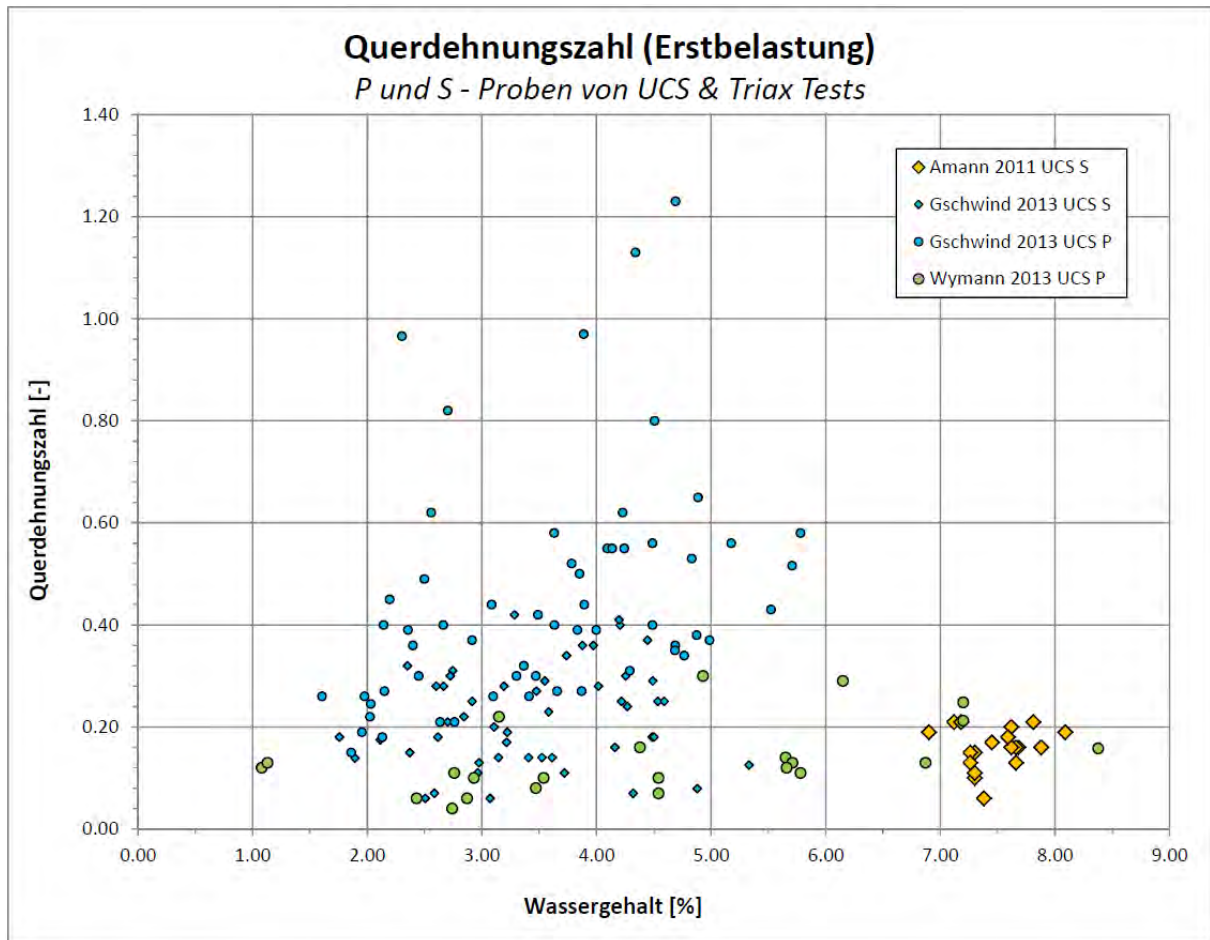
- Daten stammen alle aus UCS-Tests
- Grösse der Punkte entspricht Probendurchmesser
- Keine klaren Trends erkennbar, Streuungen zu hoch



Figur A6-6: Wassergehalt versus Elastizitätsmodul für P- und S-Proben. Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), grün: Tonige Fazies (Toarcium), blau: Sandige Fazies, eckig: S-Proben, rund: P-Proben. Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 100 mm für Gräsle (2010), 90 mm für Amann (2011), 60 mm für Wymann (2013), 50 mm für Gschwind (2013). Daten aufbereitet und ergänzt nach Thoeny (2013).

Kommentar zu Figur A6-6:

- Daten stammen aus UCS- und Triaxial Tests
- Grösse der Punkte entspricht Probendurchmesser
- Das E-Modul nimmt mit zunehmendem Wassergehalt ab
- Unterscheidung nach P- und S-Proben scheint machbar
- S-Proben bilden die Untergrenze des Plots



Figur A6-7: Wassergehalt versus Querdehnungszahl für P- und S-Proben. Gelb: Tonige Fazies (Aalenium), grün: Tonige Fazies Toarcium, blau: Sandige Fazies, eckig: S-Proben, rund: P-Proben. Die Grösse der Punkte zeigt die Probengrösse an; 100 mm für Amann (2011), 60 mm für Wymann (2013), 50 mm für Gschwind (2013). Daten aufbereitet und ergänzt nach Thoeny (2013).

Kommentar zu Figur A6-7:

- Daten stammen aus UCS- und Triaxial Tests
- Grösse der Punkte entspricht Probendurchmesser
- Poisson-Zahl liegt bei Amann und Wymann ca. bei 0.2
- Bei tonigen Proben (Wymann) nimmt Poisson-Zahl mit zunehmendem Wassergehalt zu

Tabelle A6-1a: Im Bericht berücksichtigte Literatur, inkl. Bewertung.

Experiment	Parameter	Methode	Literatur	Bewertung der Daten
HE-D	σ_1/σ_3 , long-term deformation, swelling/shrinking	Triaxial, Uniaxial creep tests, axial swelling/shrinking test	Zhang et al., 2007 (TR2007-02)	BHE-D3-D6. Die Bohrungen stammen aus der MI-Nische. Sie wurden vakuumverpackt, ohne genauere Angaben. Es wurden nur Z-Proben hergestellt. Verwendung: Alle Z-Proben, welche unter Raumtemperatur (20°C) getestet wurden (Triaxial). Dies entspricht 4 Stück. Es wurden keine weiteren Parameter (elastisch) aufgenommen.
HM	Youngs Modulus, Poisson's ratio, σ_p , CI, CD,	UCS (a)/ Triaxial (b)	Amann 2011a & b	BRC-3. (a) Vakuum verpackt in Alufolie. Verwendung: Alle 22 S-Proben für σ_p . 19 Tests für elastische Parameter. (b) Verwendung: 11 S-Proben für σ_1/σ_3 .
HM	Tensile strength	Brazilian tests, point load tests	Wild, 2010 (Bachelor thesis)	BRC3 & BRC4. Vakuumverpackt. Verwendung: 56 von 100 Proben, welche beim Brazilian Test verwendet wurden mit einem Wassergehalt zwischen 7.5 und 8.5 Gew.%. Ausschluss: Resultate, bei welchen Zugbruch nicht das einzige Bruchbild war, Proben mit einer abweichenden Größe, Proben aus einem eher sandigen oder kalkigen Bereich der Bohrung oder welche eine Störung aufwiesen.
HM	Youngs Modulus, Poisson's ratio, σ_p , CI, CD,	UCS	Wymann, 2013 (Master thesis)	BFE-A3. Verpackt in vakuumierter & beschichteter Aluminiumfolie. Verwendung: Alle P-Proben für UCS und el. Eigenschaften. Ausschluss: Jene Proben aus der höchsten Sättigungsstufe (99% RH in Exikkator) + Einzelne Proben aufgrund von Heterogenität oder hoher Vp Geschwindigkeit (deutet auf "pre-damage" hin)
HM	Tensile strength	Brazilian tests	Zimmer, 2012 (Bachelor thesis)	BFE-A7. Vakuumverpackt in beschichteter Aluminiumfolie. Verwendung: 30 S-Proben welche makroskopisch unversehrt aussahen und keine Anomalien (z. B. speziell tiefe Vp Geschwindigkeiten) aufwiesen.
LT	Creep Tensile Strength (σ_t) UCS (σ_{peak}), Tangent Modulus (Ev) Peak Strength (σ_{peak}), Residual Strength, Shear Strength, Residual Deformation Modulus, Tangent and Youngs-Modulus (Ev and E) Youngs-Modulus (E), Crack Initiation, Shear Strength, Residual Strength	Triaxial creep test Brazilian UCS Conventional Triax Multistep Triax	Gräsle & Plischke, 2010 (TR2009-07)	Diverse Bohrungen. Gute Qualität Verwendung: "Peak strength" von UCS- und Triax-Tests, Tensile strength von Brazilian tests, Youngs- und Tangent-Modulus. Ausschluss: Ausgetrocknete, alte Bohrkerne BED-C9 und C10 (unzuverlässige Resultate), vereinzelt Resultate von Proben, welche nahe an der Tunnelwand entnommen worden sind (EDZ-Einfluss).
LT-A	Residual strength, shear strength, Youngs-Modulus E	Multistep Triax at various strain rates and confining pressures	Kaufhold et al., 2013 (TN2013-59)	BLT-A4. Aus der sandigen Fazies der TT-Nische parallel zur Schichtung (P-Proben) ohne Konditionierung bei genau definiertem Wassergehalt. Proben wurden eingepackt in Aluminiumfolie und dann in Stickstoff-geflutete Behälter. Daten werden erwähnt, jedoch aufgrund der schwierigen Vergleichbarkeit (kein Wassergehalt) nicht geplottet.
	Residual strength, shear strength, Youngs-Modulus E	Multistep Triax at various strain rates and confining pressures	Gräsle & Plischke, 2011 (TN2010-86)	BLT-A1 und BLT-A2. Beide Bohrungen aus der sandigen Fazies der TT-Nische senkrecht, bzw. parallel zur Schichtung ohne Konditionierung bei genau definiertem Wassergehalt. Proben wurden eingepackt in Aluminiumfolie und dann in Stickstoff-geflutete Behälter. Daten werden erwähnt, jedoch aufgrund der schwierigen Vergleichbarkeit (kein Wassergehalt) nicht geplottet.

Tabelle A6-1b: Im Bericht berücksichtigte Literatur, inkl. Bewertung.

Experiment	Parameter	Methode	Literatur	Bewertung der Daten
RA	Youngs-Modulus (E), Possion's Ratio, σ_p , residual strength, fracture angle	UCS, Triax	Rummel & Weber, 2004 (TN2004-38)	BRA-1 und BRA-2. Mit Luft, resp. mit Öl gebohrt. Lagerung in Folie oder Druckbehältern. Scheint gute Qualität zu haben. Verwendung: Alle P- und S-Proben, welche "peak strength" von UCS liefern. "Peak strength" von Triax tests, Youngs-Modul. Ausschluss: Eine Probe (1-19-1p welche mit Öl verschmutzt wurde. Bei den Triax Tests sind einige Resultate nicht berücksichtigt worden.
	Youngs-Modulus (E), Possion's Ratio, σ_p , σ_t , residual strength, fracture angle	UCS, Triax, Brazilian (<i>Mohr-coulomb-evaluation</i>)	Jahns, 2010 (TN2008-55rev)	BMB-19. Verpackung, Lagerung: BMB-19, Vakuumevakuierte, beschichtete Aluminiumfolie, Tiefe >8m, homogen, gute Qualität, CT Scans um Rissbildung zu beurteilen. Verwendung: Peak Strength von UCS und Triax Tests (nur von P-Proben im Moment), Zugfestigkeit von Brazilian Tests (in beide Richtungen getestet). Ausschluss: 2 BTS-Proben, welche einen tiefen Wassergehalt aufwiesen wurden nicht berücksichtigt.
	σ_p , σ_1/σ_3 , Estatic, vstatic	Triax	Jahns, 2007 (TN2007-30)	BRA-10. Vakuumverpackt. Verwendung: Alle Proben (P,S & Z)sind von guter Qualität und können verwendet werden. Die Peak strength σ_p wurde basierend auf single-stage Triaxial Tests gewonnen und nicht anhand von UCS Tests. Ausschluss: -
	Youngs Modulus, σ_p , residual strength, fracture angle	UCS, Triax	Rummel & Weber, 2007 (TN2005-57)	BRA-3. Verwendung: Alle P-Proben für UCS und die el. Parameter dazu. Alle ausser eine Z-Probe aus der Triax-Serie. Ausschluss: Alle S-Proben wiesen beim Bohren "discing" auf. Darauf hin wurden die Proben mit UHU Sekundenkleber zusammen geklebt! Die Resultate der S-Proben werden nicht berücksichtigt
SO	Youngs Modulus, Poisson's ratio, σ_p , CI, CD,	UCS	Gschwind 2013 Master thesis	BSO-2 bis BSO-32. Proben aus der TT-Nische. Verwendung: Alle P und S-Proben für σ_p , E, Poisson's ratio. Ausschluss: Eine Probe (BSO-4-P2) welches eine markant abweichende Poisson's ratio aufweist. Es sei bemerkt, dass dies die einzige Testreihe aus der sandigen Fazies ist, welche felmechanische Parameter erfasst. Die Menge ist statistisch relevant. Vergleiche mit anderen Proben sind jedoch nicht möglich, da nicht vorhanden.

ENSI 33/489

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 56 460 84 00, E-Mail Info@ensi.ch, www.ensi.ch