



EVALUATION DER DURCHLÄSSIGKEIT DER EMSCHER-FORMATION

Prof. Dr. Ch. Melchers, Bochum (Projektleiter)

H. Jasnowski-Peters (wiss. Mitarbeiter)

L. Rose (stud. Mitarbeiterin)

T. Genth (stud. Mitarbeiter)

Projektdauer: 2019 – 2022

Teilprojekt „Bestimmung und Quantifizierung der Minerale, mit besonderem Fokus auf der Tonmineralogie, innerhalb der Emscher-Formation anhand der Bohrung „Waltrop 2“

Im Münsterländer Kreidebecken ist die Emscher-Formation als Teil des Deckgebirges eine wichtige Formation, wenn es um die Durchlässigkeit in Bezug auf den Grubenwasseranstiegsprozess geht. Es handelt sich dabei um die bis über 1000 m mächtigste Formation im Münsterländer Kreidebecken. Aufgrund lithofazieller Diversitäten und regionaler, tektonischer Einflüsse, ist die Formation als faziell heterogen einzustufen. Aus petrologischer Sichtweise ist die Evaluation der Mineralgehalte mit dem Schwerpunkt der Tonmineralogie und deren Verhältnisse untereinander ein wichtiger Faktor zur langzeitlichen Betrachtung der „Durchlässigkeit“. Die Tonminerale, und insbesondere die quellfähigen Tonminerale, haben aufgrund ihrer geringen Korngröße, der großen Oberfläche und der Wechselwirkungen auf molekularer Ebene einen Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit. Speziell die quellfähigen Tonminerale der Smektit-Gruppe haben das Potential zur Selbstabdichtung in Störungsbereichen.

METHODIK

Der Kernverlauf wurde anhand der gekernten Abschnitte aus den Bohrungen „Waltrop 1 und 2“ (Abbildung 1), nach makroskopischen Gesichtspunkten lithologisch-sedimentologisch analysiert. Bei den Proben handelt es sich um Bohrspülmateriale (Cuttings) aus der Bohrung „Waltrop 2“. Anhand dieser Proben wurde ein Workflow zur Klassifizierung und Quantifizierung der Mineralgehalte erarbeitet. Dabei wurde ein erstes Tiefenprofil (40 – 430 m) des Mineralbestands mit einer Auflösung von ca. 40 m pro Probe erstellt.

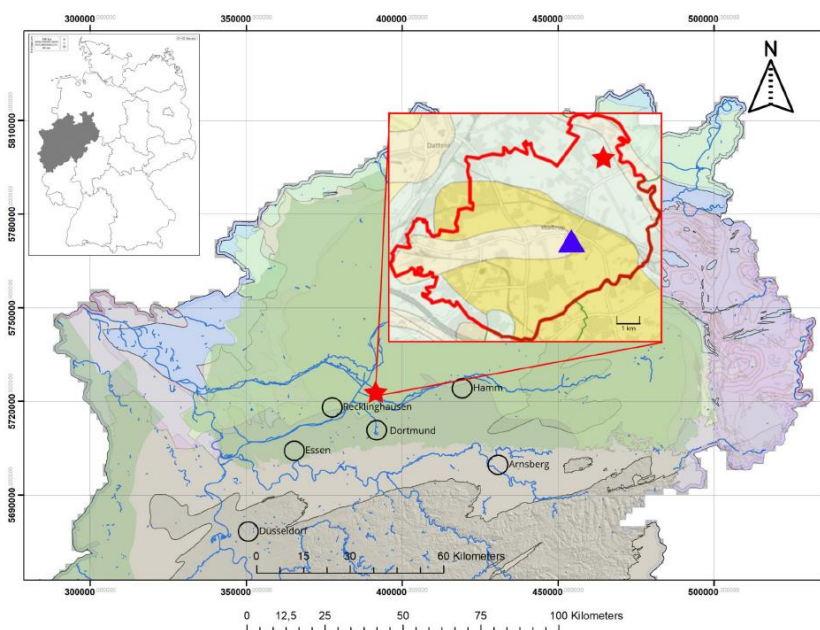


Abbildung 1: Abgedeckte geologische Karte des Münsterländer Kreidebecken; Quartäre und Tertiäre Schichten entfernt; Bohrpunkt der Bohrungen Waltrop 1 und 2 (roter Stern); Schacht „Waltrop 3“ (blaues Dreieck)

Die Untersuchungen wurden größtenteils mittels Röntgendiffraktometer (XRD) nach verschiedenen Präparationen des Probenmaterials durchgeführt. Begleitend wurden Analysen am Rasterelektronenmikroskop (REM) (Zeiss Supra 40 VP) kombiniert mit Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDAX), durchgeführt. Der Karbonatgehalt wurde mittels thermischem Differenzierungsverfahren (Elementar soliTOC Cube) nach DIN 19539 (2016) in den Laboren des Geologischen Dienst NRW bestimmt. Die Korngrößenverteilung bis $\geq 0,063$ mm wurde per Siebverfahren ermittelt. Die Schluff- und Tonfraktion wurde anhand des

Kernmaterials der Bohrung „Waltrop 1“ analysiert. Durch Pipettanalyse nach DIN ISO 11277 (2002) mittels vollautomatisierten Sedimaten (UGT Sedimat 4-12) und unter Berücksichtigung des zuvor, mit Salzsäure entfernten Karbonates wurde die Zusammensetzung nach DIN 22015 bestimmt. Die XRD-Analysen (Panalytical X'pert Pro) erfolgten im Labor des Deutschen Bergbaumuseum Bochum. Die Differenzierung der Minerale erfolgte durch Abgleich der Reflexe mittels der Software „Profex“ (Doebelin und Kleeberg, 2015), unter Verwendung der „COD“ Datenbank (Vaitkus, Merkys und Gražulis, 2021).

Um die Hauptreflexe der Tonminerale im Röntgendiffraktogramm zu verstärken, mussten die Tonminerale senkrecht zu ihrer C-Achse eingeregelt werden (Moore und Reynolds, 1997). Dafür wurde die <2 µm Fraktion in Suspension mittels Vakuum Filtration auf einen 0,45 µm Filter eingeregelt. Die eingeregelt Probe wurde auf einen Glasobjektträger übertragen.

Die Texturpräparate wurden im luftgetrockneten Zustand gemessen. Um eine Aufweitung/Quellung der Smektit-Gruppen Tonminerale zu erzeugen, wurden die Texturpräparate mit Glykol bedampft. Durch diesen Effekt „verschieben“ sich die Smektit-Reflexe im Röntgendiffraktogramm und machen eine Bewertung der Art und des Anteils innerhalb einer Wechsellagerung möglich. Im Anschluss wurden die Texturpräparate bei 550 °C erhitzt. Durch diesen Vorgang werden die Tonminerale der Kaolinit und Smektit-Gruppe amorph. Im Vergleich der Röntgendiffraktogramme bewirkt dies ein „Wegfallen“ von möglichen Kaolinit und Smektit-Gruppen Reflexen. Durch Überlagerungseffekte können so Tonminerale der Chlorit-Gruppe identifiziert werden.

ERGEBNISSE

Die Kernaufnahme zeigt eine Wechselfolge von grauen bis schwach grünlichen, pyritischen Ton-, Schluff- und Kalkmergelsteinen mit hohen Mikrit-Anteilen. Aus der Bohrung „Waltrop 2“ (bis 71 m) wurde das Gestein als fein-, blättrig oder flaserig-geschichtet eingestuft. Die Schichtungen alternieren mit bioturbaten Abschnitten. Viele Bioklasten, größtenteils Bivalven-Schalenreste, sind zu Pyrit umkristallisiert. Einzelne Inoceramen- und Ammoniten-Steinkerne wurden im Kernverlauf identifiziert.

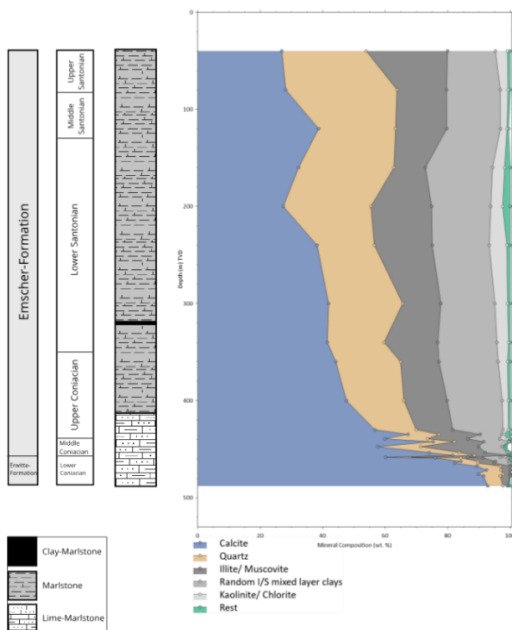


Abbildung 2: Mineralzusammensetzung der quantifizierten Pulverpräparate im Verhältnis zur Tiefe und Lithostratigraphie

Im REM wurden in jeder Probe kalkige Nanofossilien, meist Coccolithophoriden, identifiziert. Ebenfalls wurde im gesamten Teufenverlauf framboidaler Pyrit identifiziert. Aus den kombinierten Korngrößen und Karbonat-Analysen, lässt sich das Gestein im gesamten als Schluffmergelstein, stark tonig, einstufen.

Im Kernverlauf wurde ein Karbonat-Gehalt (Kalzit) von durchschnittlich 39 Gew.-% gemessen. Als Siliziklastika konnten Quarz, Illit/Smektit (I/S), Illit/Muskovit, Kaolinit/Chlorit und Feldspat identifiziert werden. Des Weiteren wurde Pyrit in den Proben identifiziert. Die Tonminerale machen ca. 1/3 der gesamten Zusammensetzung aus. Dabei weisen Illit/Smektit (I/S) und Illit/Muskovit in etwa gleiche Anteile auf. Die Illit/Smektit-Tonminerale weisen einen durchschnittlichen Anteil von 18 Gew.-% auf.

Die Tonminerale weisen keinen bis einen sehr schwach abnehmenden Trend im Kernverlauf auf. Die Analyse der Texturpräparate zeigt, dass Quarz in der Tonfraktion (<2 µm) vorhanden ist. Mittels Glykolbehandlung konnte Illit/Smektit (I/S) in Wechsellagerung mit einem Illit-Anteil von durchschnittlich ca. 20 Gew.-% identifiziert werden. Der Wechsellagerungstyp wurde als „random“ eingestuft. Durch Erhitzen der Texturpräparate konnte Chlorit in allen Proben identifiziert werden (Abbildung 3). Der Anteil nimmt mit der Tiefe zu, konnte jedoch nicht quantifiziert werden.

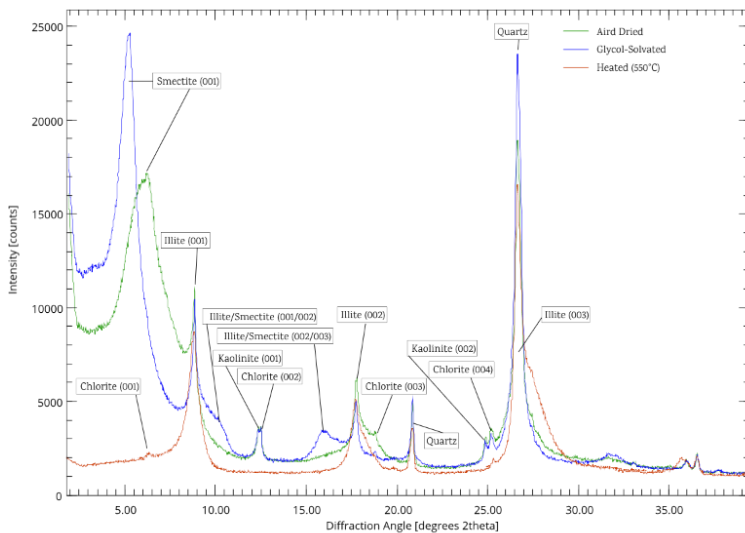


Abbildung 3: Röntgendiffraktogramme der Texturpräparate der Probe 430 m; Vergleich: luftgetrocknet (grün), Glykol behandelt (blau), erhitzt auf 550 °C (rot); Mineral-Reflexe mit zugewiesenen und den Millerschen Indizes (hkl)

INTERPRETATION

Das Quellvermögen von Smektit-Tonmineralen ist ein wichtiger Parameter bei tektonisch bedingten Durchlässigkeiten in der Formation. Die durch die Quellung ausgelöste Selbstabdichtung kann in Bereichen mit hohen Smektit-Anteilen für ein „Schließen“ der Störung sorgen. Der festgestellte Wechsellagerungstyp deutet auf ein niedriges Diagenesepotential mit Temperaturen von ca. 60 °C hin. Ein weiterer Marker für diagenetische Prozesse ist der Chlorit-Anteil, welcher im Kernverlauf zunimmt. Die Zunahme des Kalzits im Verlauf deutet auf einen stärker hemipelagisch geprägten Karbonat-dominierenden Plänerkalkstein hin. Im Kontrast dazu stehen die später sedimentierten detritischen Abschnitte. Der höhere detritische Anteil in den oberen Abschnitten, welcher durch höhere Quarz Anteile geprägt ist, ist auf inversionsbedingte Hebungen oder umgelagerte ältere Sedimente zurückzuführen. Der hohe Anteil an Quarz in der <2 µm Fraktion, welcher als Microquarz eingestuft werden kann, könnte für ein spröderes Verhalten der Formation sorgen.

AUSBLICK

Aufgrund der großen Faziesunterschiede im Ost-Westverlauf innerhalb der Emscher-Formation, müssen weitere Bohrungen aus dem Konzept „Tiefe Pegel“ analysiert werden. Das Ziel ist es, belastbare Daten über die gesamte Ausbreitung der Formation zu ermitteln. Der Microquarz-Anteil, welcher Auswirkungen auf die Integrität und das gebirgsmechanische Verhalten haben kann, wird zukünftig durch aufbereitete $<2\ \mu\text{m}$ Pulverpräparate quantifiziert. Für eine bessere Darstellung der elementaren Zusammensetzung, welcher bis dato aus den quantifizierten Röntgendiffraktogrammen abgeleitet wurde, sind Röntgenfluoreszenz Analysen geplant.

LITERATUR

- Doebelin, N. und Kleeberg, R. (2015) „Profex' a graphical user interface for the Rietveld refinement program „BGMN““, *Journal of Applied Crystallography*, 48(5), S. 1573–1580. doi: [10.1107/S1600576715014685](https://doi.org/10.1107/S1600576715014685).
- Moore, D. M. und Reynolds, R. C. (1997) „X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals“, *Clay Minerals*. doi: [10.1180/claymin.1999.034.1.21](https://doi.org/10.1180/claymin.1999.034.1.21).
- Vaitkus, A., Merkys, A. und Gražulis, S. (2021) „Validation of the {C}rystallography {O}pen {D}atabase using the {C}rystallographic {I}nformation {F}ramework“, *Journal of Applied Crystallography*, 54(2), S. 661–672. doi: [10.1107/S1600576720016532](https://doi.org/10.1107/S1600576720016532).

Teilprojekt 2: Ermittlung petrophysikalischer Kenngrößen (Permeabilität/Durchlässigkeit)

Für ein nachhaltiges Grubenwassermanagement ist die Berücksichtigung der hydraulischen Durchlässigkeit unerlässlich. Der Anstieg des Grubenwassers, und damit verbunden die Reduzierung der Grubenwasserhaltungsstandorte, sind Hauptbestandteil des Grubenwasserhaltungskonzepts im ehemaligen Steinkohlenrevier des Ruhrgebiets. Ein schrittweiser Anstieg von durchschnittlich 900 auf 600 m Pumphöhe machen die Reduzierung von 13 auf 6 Grubenwasserhaltungsstandorte und die Befreiung mehrerer Fluss- und Bachläufe von Grubenwasser möglich. Das oberste Schutzziel, der Schutz der Trinkwasservorkommen, ist durch einen Abstand zum Grubenwasser von 150 m dauerhaft zu gewährleisten. Für ein umfassendes Bild der hydraulischen Verhältnisse des Deckgebirges erfolgt eine lithostratigraphische, petrologische und petrophysikalische Analyse der von der RAG AG erstellten Bohrungen. Die petrophysikalischen Kenngrößen Porosität und Permeabilität bzw. hydraulische Durchlässigkeit stehen folgend im Fokus. Untersucht wurden Proben aus der Emscher-Formation, sowie Proben des Bentheimer Sandstein zu Vergleichszwecken.

Die Porosität gibt den Hohlraumanteil eines Gesteins an und ergibt sich als Quotient aus dem Porenvolumen und dem gesamten Gesteinsvolumen. Dabei wird, abhängig von der Berücksichtigung der Poren und Risse, von verschiedenen Porositäten gesprochen. Werden die gesamten Poren und Risse erfasst, handelt es sich um totale Porosität. Dagegen werden bei der offenen Porosität nur die miteinander verbundenen Poren und Risse einbezogen. Die geschlossene Porosität beinhaltet nur die Poren, die keine Verbindungen haben. Die Zusammensetzung der Emscher-Formation aus Karbonaten und Siliziklastika bedingt ein großes Spektrum an Poren. Karbonate bilden aufgrund vieler verschiedener Arten von Poren ein Netzwerk von Porengeometrien, während es bei Siliziklastika durch Diagenesevorgänge und damit verbundenen Lösungserscheinungen zu unterschiedlichen Porengrößen kommt. Dies führt zu einem großen Anteil geschlossener Poren.

Die intrinsische Permeabilität (κ) ist eine Gesteinsgröße, welche die Durchlässigkeit für ein poröses Medium angibt. Die hydraulische Durchlässigkeit (κ_i) bezieht zusätzlich die Dichte und Viskosität der Flüssigkeit mit ein. Diese können über die Porenverteilung oder die Messung mit der Darcy-Gleichung ermittelt werden.

METHODIK

Mit dem Hg-Porosimeter wurden Plug-Proben mit einer Länge und einem Durchmesser von jeweils etwa 2,5 cm, untersucht (Abbildung 1). Die Durchführung der Porositätsmessungen erfolgt mit Quecksilber (Hg), welches aufgrund seiner geringen Benetzbarkeit und hohen Oberflächenspannung verwendet wird. Zur Dichtebestimmung der Plug-Gesteinsproben wird ein Helium-Gaspyknometer, sowie zusätzlich das Hg-Porosimeter genutzt. Die untersuchten Proben aus dem Emscher Mergel sind aus einem Teilstück der Bohrung Pferdekamp 1 aus der Tiefe 495,68 – 495,96 m gebohrt. Für die Proben aus dem Bentheimer Sandstein wurden Plugs aus Gesteinsblöcken vom Typ Gildehaus gebohrt.

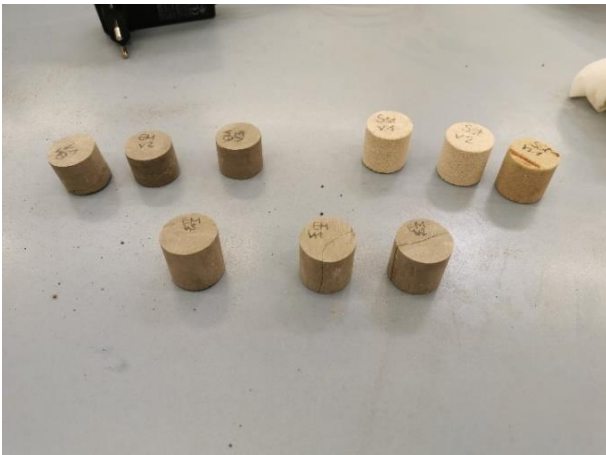


Abbildung 1: Plug-Proben des Emscher Mergel und Bentheimer Sandstein

Zur Herstellung der Plug Proben werden passende Gesteinsblöcke des Bentheimer Sandstein gewählt und das etwa 30 cm lange Teilstück der Bohrung des Emscher Mergel in weitere Teilstücke gesägt. Diese Teilstücke werden horizontal oder vertikal ausgerichtet auf eine Runde Platte positioniert und mit Gips stabilisiert. Im Anschluss können mit der Gesteinssäge von oben Stücke herausgesägt werden, die im Anschluss auf die richtige Länge gesägt und planparallel geschliffen werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Porosimetrie-Untersuchungen an Plug-Proben der Emscher-Formation und des Bentheimer Sandsteins

	Gesamtes Porenvolumen [m ² /g]	Mittlerer Porendurchmesser [µm]	Durchschnitt Porendurchmesser [µm]	Gesamt Dichte [g/mL]	Skelettdichte [g/mL]	Porosität [%]
EM h1	9,951	0,03475	0,02582	2,29	2,685	14,7094
EM h2	10,658	0,02954	0,02326	2,274	2,6471	14,0959
EM h3	10,145	0,03322	0,0257	2,2735	2,669	14,8192
EM v1	10,581	0,03544	0,02677	2,2369	2,6579	15,8393
EM v2	12,31	0,028	0,02128	2,2497	2,6385	14,736
EM v3	11,475	0,02646	0,02175	2,2858	2,666	14,2636
Sst v1	0,147	28,10055	3,1934	2,0061	2,6233	23,5259
Sst v2	0,31	26,49321	1,35345	2,0846	2,668	21,866
Sst h1	0,269	27,70771	1,64421	2,0318	2,6207	22,4717

RESULTATE

Die Ergebnisse der Messungen sind als Übersicht in Tabelle 1 dargestellt. Der Emscher Mergel hat im Mittel eine Porosität von 14,7 %, der mittlere Porendurchmesser liegt bei 0,03 µm. Der Bentheimer Sandstein hat dagegen eine durchschnittliche Porosität von 22,6 % und einen mittleren Porendurchmesser von 27,43 µm. Abbildung 2 verdeutlicht die Unterschiede: während die Porosität und der mittlere Porendurchmesser beim Bentheimer Sandstein ähnlich hoch sind, liegen die Werte beim Emscher Mergel weit auseinander.

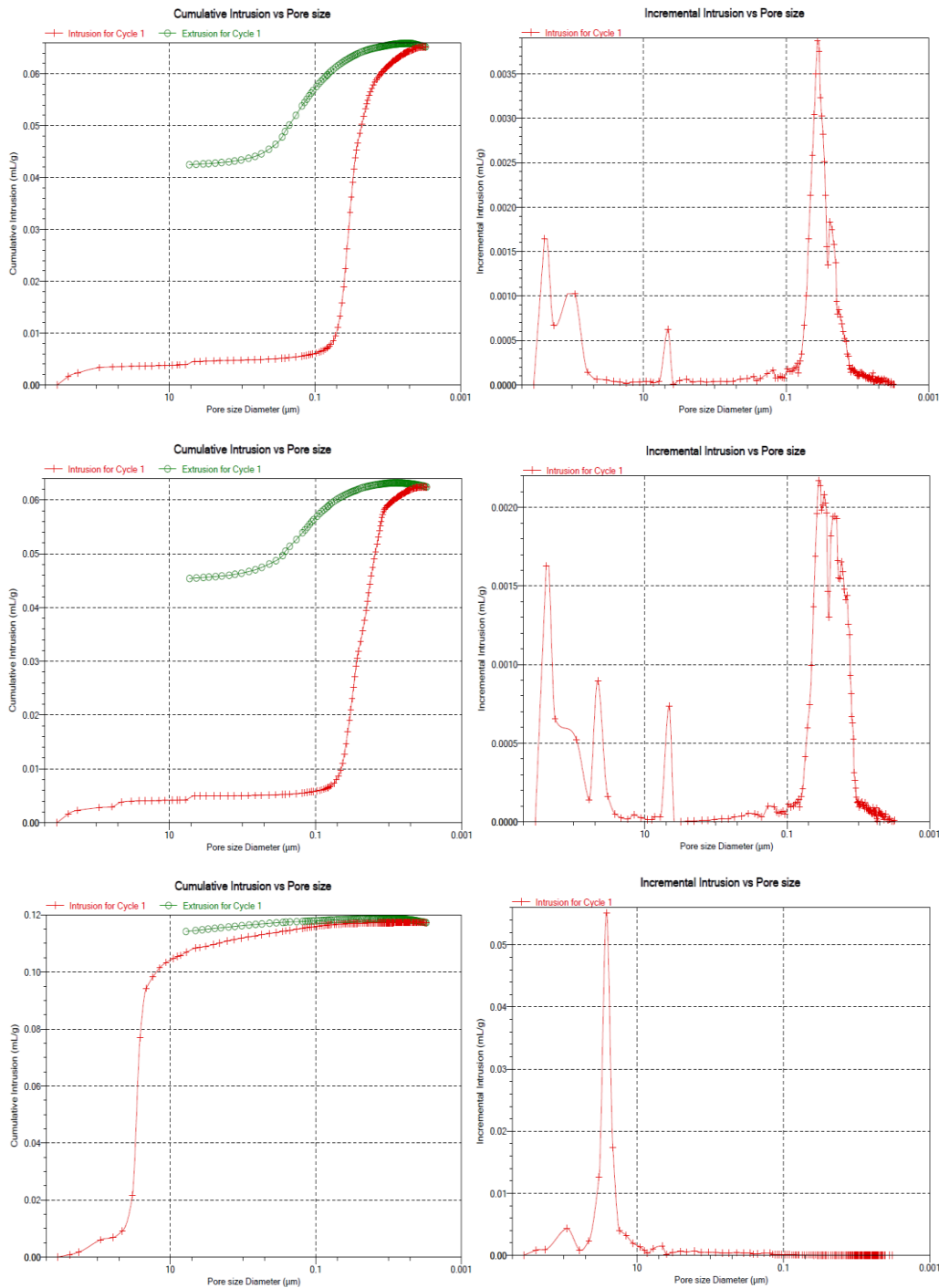


Abbildung 2: Quecksilber-Intrusions- und Extrusionsverläufe an folgenden Plug-Proben: EM h3 (oben), EM v3 (mitte), BS v1 (unten); Kummulatives Intrusionssvolumen vs Porengröße und Intrusionssvolumen-Inkremente vs Porengröße sind jeweils pro Probe dargestellt.

In der Hg- porosimetrie wird in einem sog. Penetrometer die Probe unter Druck mit Quecksilber umspült. Je nach Druckaufgabe wird das Quecksilber in die Porenräume gedrückt. Dabei kommt es auf den sog. kleinsten Porenhalsdurchmesser an, welche Poren mit dem nicht benetzbaren Fluid Quecksilber gefüllt werden. Neben diesem wichtigen Durchmesser, der für die Permeabilitätsbestimmung herangezogen werden kann, können auch Porengeometrien anhand der Druck-Volumen-Kurven abgeleitet werden. In den Versuchen wurden jeweils Drücke bis zu 414 MPa oder 60.000 psia angewendet, was einem kleinsten Porendurchmesser von ca. 0,006 μm oder 60 Angström entspricht. Größte Poren bis zu 360 μm bilden die Obergrenze der zu messenden Porendurchmesser. Die Kurvenverläufe der Volumeninkremente vs. Porengrößen zeigen bei den beiden Emscher-Formations-Plugs jeweils eine ausgeprägte Bimodalität im Bereich 0,02-0,04 μm . Die horizontal gebohrte Probe zeigt dabei eine stärkere Einregelung und eine Dominanz der größeren Porendurchmesser. Die vertikal gebohrte Probe zeichnet sich durch eine 50:50 Verteilung zweier Porenvolumen aus. Der Bentheimer Sandstein als Pendant zeigt eine unimodale Porengröße bei ca. 25 μm , zylindrische bis äquidistante Porengeometrien und eine sehr gute Durchlässigkeit.

INTERPRETATION

Der Emscher Mergel hat mit im Mittel 14,7 % eine vergleichsweise hohe Porosität im Vergleich zu seinen Porendurchmessern. Der mittlere Porendurchmesser mit 0,03 μm ist dagegen sehr gering. Der Bentheimer Sandstein hat im Vergleich dagegen mit durchschnittlich 22,6 % eine hohe Porosität und mit einem mittleren Porendurchmesser von 27,43 μm sehr große Poren. Dies bedingt eine hohe Durchlässigkeit. Aufgrund des niedrigen Porendurchmessers hat der Emscher Mergel trotz seiner hohen Porosität sehr schwache Durchlässigkeiten für Fluide.

Für eine Übertragung der ermittelten hydraulischen Eigenschaften auf einen größeren Betrachtungsmaßstab, wie Gesteinsformationen, sind Modelle notwendig. Da die messbaren Proben nur einen Bruchteil des Gebirges wiedergeben ist es wichtig, im ersten Schritt die hydraulisch relevanten Strukturelemente zu identifizieren. Damit können im nächsten Schritt repräsentative Proben aus den gewünschten Bereichen genommen werden. Die räumliche Anordnung und hydraulische Durchlässigkeit stehen in enger Beziehung zueinander und sind beide skalenabhängige Eigenschaften des Gebirges. Diese Eigenschaften sind für eine richtige Interpretation der Untersuchungsergebnisse wichtig zu betrachten. Sehr schwach durchlässige Gesteine, wie der Emscher Mergel, sind kleinskalig durch Plugs eindeutiger messbar.

Veröffentlichungen aus dem Projekt

Aus dem Projekt sind fünf Veröffentlichungen bereits publiziert oder zur Publikation eingereicht. Details finden sich im Publikationsverzeichnis ab Seite 71 unter den Referenznummern [10], [11], [12], [13] und [45].