

scriptum

Geowissenschaftliche

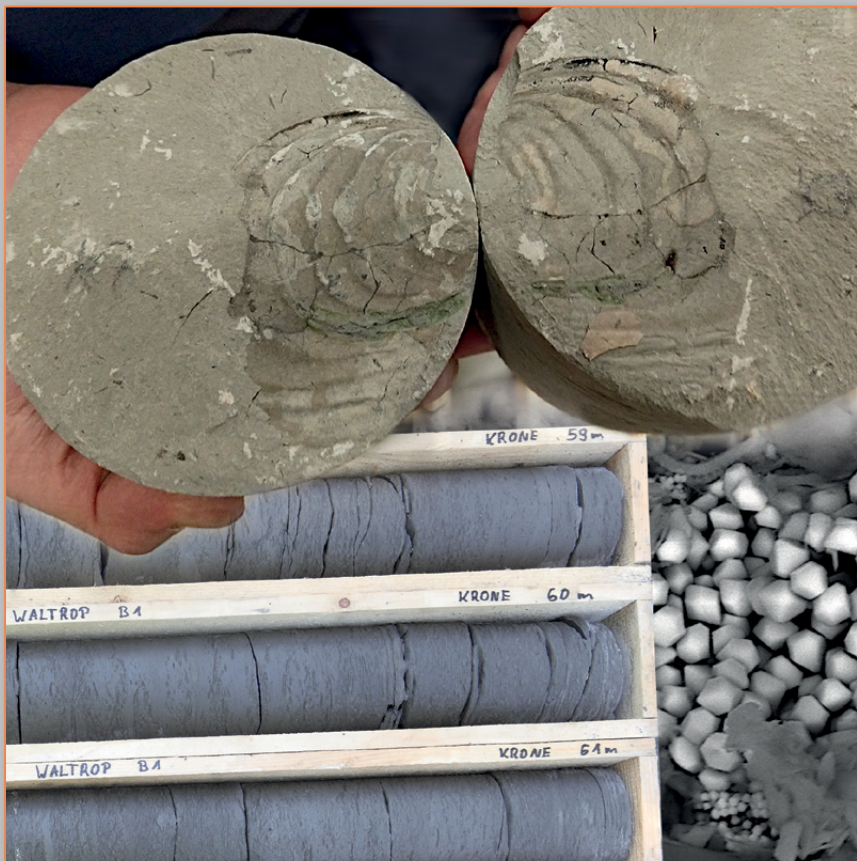
Arbeitsergebnisse
aus Nordrhein-Westfalen

online

19

Erste Ergebnisse der Sedimentanalyse der Emscher-Formation in der Bohrung Waltrop 1 unter besonderer Berücksichtigung der Tonmineralogie

Von Till Genth, Jan Sessing, Henning Jasnowski-Peters, Bettina Dölling & Christian Melchers



Erste Ergebnisse der Sedimentanalyse der Emscher-Formation in der Bohrung Waltrop 1 unter besonderer Berücksichtigung der Tonmineralogie

Von Till Genth¹, Jan Sessing², Henning Jasnowski-Peters¹, Bettina Dölling³ & Christian Melchers¹

¹Technische Hochschule Georg Agricola Bochum, Forschungszentrum Nachbergbau, Herner Str. 45, 44787 Bochum

²Deutsches Bergbau-Museum, Am Bergbaumuseum 28, 44791 Bochum

³Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb –, De-Greif-Str. 195, 47803 Krefeld

Zitierweise: GENTH, T.; SESSING, J.; JASNOWSKI-PETERS, H.; DÖLLING, B.; MELCHERS, CH. (2021): Erste Ergebnisse der Sedimentanalyse der Emscher-Formation in der Bohrung Waltrop 1 unter besonderer Berücksichtigung der Tonmineralogie. – scriptumonline, **19**: 21 S., 7 Abb., 2 Tab.; Krefeld. – [https://www.gd.nrw.de/pr_bs_scriptumonline.htm (Stand 2/2020) – <scriptumonline-19_2021-1.pdf>

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Geologie	6
1.2	Tonminerale	6
2	Methodik	8
2.1	Makroskopische Ansprache	8
2.2	Probennahme	8
2.3	Mikroskopische Untersuchung	9
2.4	Bestimmung der Gesteinszusammensetzung	9
2.5	Bulk-Röntgendiffraktometrie	9
2.6	Ton-Röntgendiffraktometrie	10
2.7	Glykol-Behandlung	10
3	Resultate	11
3.1	Lithologisch-sedimentologische Kernbeschreibung	11
3.2	Geochemie/Röntgendiffraktometrie	14
4	Diskussion	18
5	Danksagung	19
6	Literaturverzeichnis	21
	Impressum	21

Kurzfassung:

Der Bohrkernabschnitt 16 – 71 m der Bohrung Waltrop 1, am nordöstlichen Ortsausgang von Waltrop, wurde im Bereich der dort anstehenden Emscher-Formation (Obersantonium) lithologisch und geochemisch-mineralogisch untersucht. Im Fokus standen dabei die Ermittlung der Tongehalte und die detaillierte Analyse der Tonmineralogie mithilfe der Röntgendiffraktometrie unter Berücksichtigung des Anteils quellfähiger Tonminerale.

Für die im Kernmaterial größtenteils als Wechselfolge von grauen bis schwach grünlichen Ton-, Schluff- und Kalkmergelsteinen ausgebildete Emscher-Formation wurde anhand von 34 Proben über das gesamte Profil hinweg ein durchschnittlicher Tongehalt von 14 – 24 Gew.-% ermittelt. Anhand von sieben zuvor gemahlenden, anschließend unorientiert gemessenen sogenannten Bulk-Proben wurde ein Tonmineralspektrum, bestehend aus Smektit, Illit (Muskovit) und Kaolinit, nachgewiesen. Die Illit/Smektit-Mischkristallreihe ist hier durch fast reine Illit-Anteile mit Beimengungen von Smektit in der Größenordnung von 10 – 20 % charakterisiert. Auf die Bulk-Zusammensetzung bezogen, korrespondiert ein höherer Kalkgehalt im unteren Kernabschnitt mit höheren Werten von Illit/Smektit. In der texturiert gemessenen Tonmineralfraktion < 2 µm wurde viel Mikroquarz angetroffen (durchschnittl. 58 Gew.-%). Die Zusammensetzung der Tonfraktion ist als sehr reif im Hinblick auf den Transportweg des Sediments zu klassifizieren. Da am Südrand des Münsterländer Kreide-Beckens zur Ablagerungszeit keine großen Deltabereiche existierten, sind Umlagerung oder ein weit entferntes Liefergebiet mögliche Erklärungen für das angetroffene Tonmineralspektrum.

Abstract:

At drill hole Waltrop 1, situated on the northeastern border of the town Waltrop, North Rhine-Westphalia, Germany, lithological and geochemical-sedimentological analysis of sediments of the Emscher Formation (Upper Santonium) have been conducted on a core section ranging from 16 to 71 m depth. The aim was to investigate its clay contents and the distribution of clay minerals with special emphasis on expandable clays within the core using X-ray powder diffraction methodology.

The core section of the Emscher Formation consists of alternating grey to light greenish clay-, silt- and marlstones. Thirty-four samples evenly distributed in the section revealed a clay content of 14 to 24 wt. %. Seven samples were analysed randomly oriented for bulk clay content. The clay content mainly consists of smectite, illite (muscovite) and kaolinite. The identified smectites are mixed-layered with illite and exhibit an 80 – 90 wt. % illite content. Within the lower half of the core section, a higher carbonate content correlates with higher illite/smectite contents based on bulk samples. X-ray diffraction patterns of oriented samples < 2 µm investigated high micro-quartz contents (average 58 wt. %). Based on the mineralogical composition of the sediment, we conclude long-distance sediment transport dynamics. The depositional environment at the southern border of the Münsterland basin at time of deposition is not characterized by large fluvial deltas as sediment source. Therefore, long distance sediment sources or re-deposition of older sediments is a potential explanation for the clay mineral contents identified.

Schlüsselwörter:

Kreide, Nordrhein-Westfalen, Münsterland, Emscher-Formation, Lithologie, Karbonatgehalt, Tonmineralogie, Röntgendiffraktometrie

Keywords:

Cretaceous, North Rhine-Westphalia, Münsterland, Emscher-Formation, lithology, carbonate content, clay mineralogy, X-ray diffractometry

1 Einleitung

Die sedimentpetrographische und petrophysikalische Charakterisierung von Tonstein-Formationen liefert grundlegende Daten für eine Bewertung der Durchlässigkeit für Fluide. Die Emscher-Formation (Mittelconiacium bis Obersantonium) stellt ein bis über 1000 m mächtiges, weit verbreitetes und größtenteils als Ton- und Schluffmergelstein ausgebildetes Sedimentpaket innerhalb des Kreide-Deckgebirges dar. Die Emscher-Formation ist grundsätzlich als Aquitard und zentrale hydraulische Barriere (engl. „cap rock“) im Münsterländer Kreide-Becken und im nördlichen Ruhrgebiet anzusehen. Der darunterliegende Kluftgrundwasserleiter besteht aus z. T. verkarsteten und mit Styrolithen durchsetzten Kalkmergelsteinen und Kalksteinen, den sogenannten „Plänerkalken“ des Cenomaniums bis Unterconiaciums. Er streicht am Südrand des Münsterländer Kreide-Beckens aus. Unterhalb der Emscher-Formation zirkuliert Sole, die im Ausstrichbereich der Emscher-Formation stellenweise artesisch austritt. Die hier vorgestellten stratigraphischen und sedimentologischen Untersuchungen der Bohrung Waltrop 1 (UTM 32 E 391269,41; N 5723161,62; +49,67 m NHN, Bohrungsdatenbank des GD NRW: BNUM 314807) am nordöstlichen Ortsausgang von Waltrop, Unterlipper Straße, ergänzen die Daten zur Emscher-Formation, die seit 2009 im Rahmen der integrierten geologischen Landesaufnahme zur Erkundung des Kreide-Deckgebirges in den Kartierprojekten „Haarstrang“ und „Ruhrgebiet“ erhoben wurden (DÖLLING et al. 2018; Geologischer Dienst NRW 2020).

Die lithologische und geochemisch-mineralogische Sedimentanalyse unter der besonderen Berücksichtigung des Tongehalts, der tonmineralogischen Zusammensetzung und insbesondere der Anteile von quellfähigen Tonmineralen ist Hauptbestandteil dieser Arbeit. Die hier ermittelten Daten erlauben eine erste mineralogische Charakterisierung des Sediments und eine vorsichtige Indikation seiner Herkunft. Sie sind Bestandteil des für eine systematische Analyse erarbeiteten Workflows. Zukünftige Analysen beinhalten die Erfassung von Permeabilitäten und Durchlässigkeitsbeiwerten unter in-situ-Druckbedingungen mittels Triaxialzelle und durch hydraulische Bohrlochtests als quantitative Daten für eine weitergehende Bewertung.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Bohrkernkerne der Seilkernbohrung Waltrop 1 aus dem Tiefenbereich von 16 – 71 m hinsichtlich ihrer Petrographie bearbeitet. Dabei wurde eine genaue fazillithologische und makroskopische Kernaufnahme mit verschiedenen sedimentgeochemischen Untersuchungsmethoden kombiniert, um sedimentologische Unterschiede herauszuarbeiten, die Rückschlüsse auf unterschiedlichen Sedimenteintrag erlauben. Kenntnisse über die Verhältnisse der Anteile von Karbonat und Silikat, insbesondere der Tonmineralspezies in dem bearbeiteten Kernabschnitt, sollen es ermöglichen, den Eintrag von siliziklastischen Sedimenten der pelagisch induzierten in-situ-Karbonatproduktion gegenüberzustellen. Die Gesteine wurden nach DIN 22015 (1993) „Makroskopische Ansprache und Aufnahme der Gesteine des Deckgebirges“ klassifiziert.

1.1 Geologie

Aus Abbildung 1 ist die geographische Lage der Bohrung im Vergleich zu den bearbeiteten Bohrungen innerhalb der integrierten geologischen Landesaufnahme des GD NRW ersichtlich. Der untersuchte Bohrabschnitt datiert stratigraphisch ins Obersantonium. Das Ablagerungsmilieu spiegelt allgemein für die Emscher-Formation einen pelagischen Stillwasserbereich innerhalb des Münsterländer Kreide-Beckens wider. Hiss (1995) unterscheidet hierbei drei Ablagerungsphasen: Transgression, Subsidenz und Hebung. Der Zeitraum Albium (Unterkreide) bis Turonium (Oberkreide) ist durch transgressive Sedimentationszyklen charakterisiert. Im Cenomanium lagerten sich entlang einer Linie der heutigen Städte Duisburg – Essen – Dortmund mergelige bis sandig-glaukonitische Sedimente in marginaler Fazies, sogenannte Küstensedimente, ab (vgl. PÜTTMANN et al. 2018). Weiter nördlich korrelieren diese mit hemipelagischen Kalkmergeln und Kalken. In der zweiten Phase vom Coniacium bis Santonium kam es zu erhöhter Subsidenz im Becken und gleichzeitig zu einer Hebung am nördlichen Beckenrand. Die kontinuierliche Subsidenz im Beckenzentrum führte zu hohen Sedimentationsraten. Die Ablagerungen der Emscher-Formation erreichen teilweise Mächtigkeiten von bis zu 1500 m. In der abschließenden dritten Phase, ab dem höheren Santonium, kam es teilweise zu Hebungen. Sandreiche Mergel bilden die typischen Sedimente des Campaniums (HISS & MUTTERLOSE 2010).

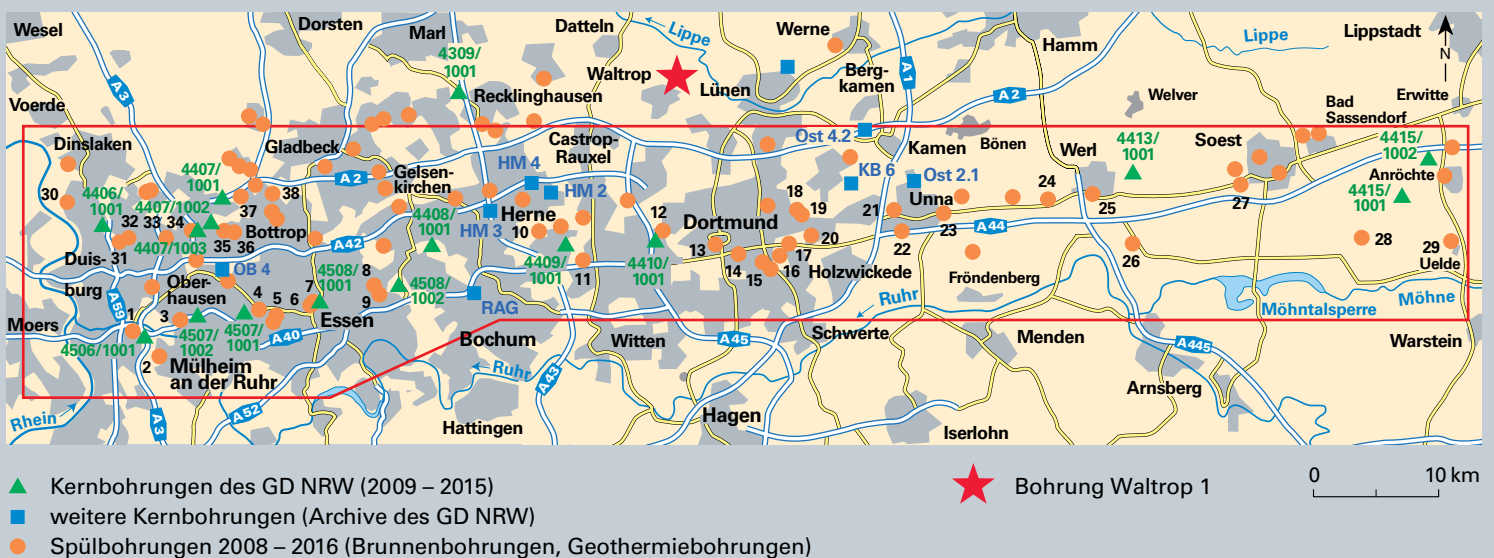


Abb. 1: Bohrungen im Rahmen der integrierten geologischen Landesaufnahme zur Erkundung des Kreide-Deckgebirges im Raum südliches Münsterland und Ruhrgebiet (nach DÖLLING et al. 2018; Geologischer Dienst NRW 2020) und Lage der Bohrung Waltrop 1

1.2 Tonminerale

Tonminerale werden in einer Gruppe von hydratisierten Alumosilikaten, bekannt auch als Glimmer oder Phyllosilikate, zusammengefasst, die die Korngrößenfraktion $< 2 \mu\text{m}$ dominieren. Sie sind bedeutende Feldspat-Verwitterungsprodukte und sedimentologisch ein Indikator für die „Reife“ eines Sediments, sprich seines Transportweges bzw. seiner Umlagerung. Je nach Anzahl und Anordnung von Tetraeder- (T) und Oktaederschichten (O) unterscheidet man zwischen Zweischicht-(TO)-, Dreischicht-(TOT)- und Vierschicht-(TOTO)-Tonmineralen. Zusätzlich differenziert man nach der Kationenbesetzung di- und trioktaedrische Tonminerale: Bei den dioktaedrischen Tonmineralen sind 2/3 der Oktaederzentren von dreiwertigen Kationen besetzt, bei den trioktaedrischen Tonmineralen sind

alle Oktaederzentren durch zweiwertige Kationen besetzt. Durch die Substitution von Silizium durch Aluminium werden Kationen in den Strukturen eingelagert und elektrostatische Kräfte aufgebaut, die für die typische Koagulation von Tonmineralen an deren geladenen Oberflächen verantwortlich sind.

Die dioctaedrische Illit-Gruppe gehört zu den Dreischicht-Tonmineralen. Ihre Vertreter sind nicht quellfähig und umfassen die glimmerartigen Minerale Illit, Muskovit und Glaukonit. Diese unterscheiden sich nur in den jeweiligen Kationen-Substitutionen. Illit enthält mehr Silizium (Si), Magnesium (Mg), Eisen (Fe) und H_3O^+ anstelle von Kalium (K). Muskovit enthält mehr Kalium und Aluminium (Al). Das grüne Mineral Glaukonit ist der $Fe^{2+/3+}$ -reiche Vertreter der Illit-Gruppe (BAILEY 1984).

Die Gruppe der Smektite gehört ebenfalls zu den Dreischicht-Tonmineralen und beinhaltet größtenteils Montmorillonit als dioctaedrische Varietät, die auch den Hauptbestandteil von Bentoniten ausmacht. Durch nur schwache Bindungskräfte zwischen der zentralen Al-reichen Oktaederschicht und den nach innen gerichteten Tetraederschichten sind sie quellfähig und können unter Einlagerung von H_2O in (001)-Richtung expandieren. Sie entstehen durch die Verwitterung basischer Gesteine und Si, Mg, Kalzium (Ca) oder Fe sind relativ angereichert (POPPE et al. 2001).

Die Zweischicht-Tonminerale der Kaolinit-Gruppe besitzen nur je eine Oktaeder- und Tetraederschicht und bestehen aus mehreren dioctaedrischen Vertretern wie Dickit und Halloysit. Kaolinit ist das typische Verwitterungsprodukt von Feldspäten unter sauren Bedingungen. Kaolin-Mineralen finden oft Anwendung bei der Herstellung von Keramiken, Papier oder Farben. Als Vertreter der reinsten Tonminerale baut Kaolinit kein Wasser ein und ist nicht quellfähig.

Die sogenannten Mixed-Layer-Tonminerale sind eine wichtige Gruppe als Anzeiger für diagenetische Umwandlungen bzw. Neuformungen. Die diversen Formen der Smektit-Illit-Interstratifizierung sind intensiv untersucht. Man unterscheidet sie je nach geordneter Wechsellagerung oder einer zufälligen Anordnung. Die „Mixed-Layer“-Smektit-Illit-Mineralen entstehen neben der diagenetischen Umwandlung auch bei der Verwitterung oder bei hydrothermalen Alterationen und stellen bei der Bewertung der Quellfähigkeit eine Art intermediären Komplex dar.

Die vierschichtigen Chlorite als typische Vertreter von detritischer oder authigener Herkunft in siliziklastischen Sedimenten bestehen aus negativ geladenen Tetraederschichten, die sich mit positiv geladenen Oktaederschichten vom Brucit-Typ ($Mg(OH)_2$) abwechseln.

2 Methodik

2.1 Makroskopische Ansprache

Die makroskopische Ansprache des Kernmaterials erfolgte in Zusammenarbeit mit dem GD NRW. Das Kernprofil wurde im nassen sowie im trockenen Zustand nach lithologischen Gesichtspunkten (Farbe, Bestandteile, Korngröße, Sedimentstrukturen, Makrofossilien/Spurenfossilien) aufgenommen. Die Bilddokumentation wurde mittels Stereomikroskop (Distelkamp Electronic Di-Li 1009-S) durchgeführt. Eine mikrofazielle Ansprache durch Dünnschliffpetrographie erfolgte nicht.

2.2 Probennahme

Zur geochemischen Sedimentanalyse wurden insgesamt 34 Proben zu je 100 – 200 g im Abstand von 2 m genommen. Sedimentologisch auffällige Teilabschnitte wurden zusätzlich beprobt. Der Workflow zur sedimentgeochemischen Analyse der Proben ist in Abbildung 2 dargestellt.

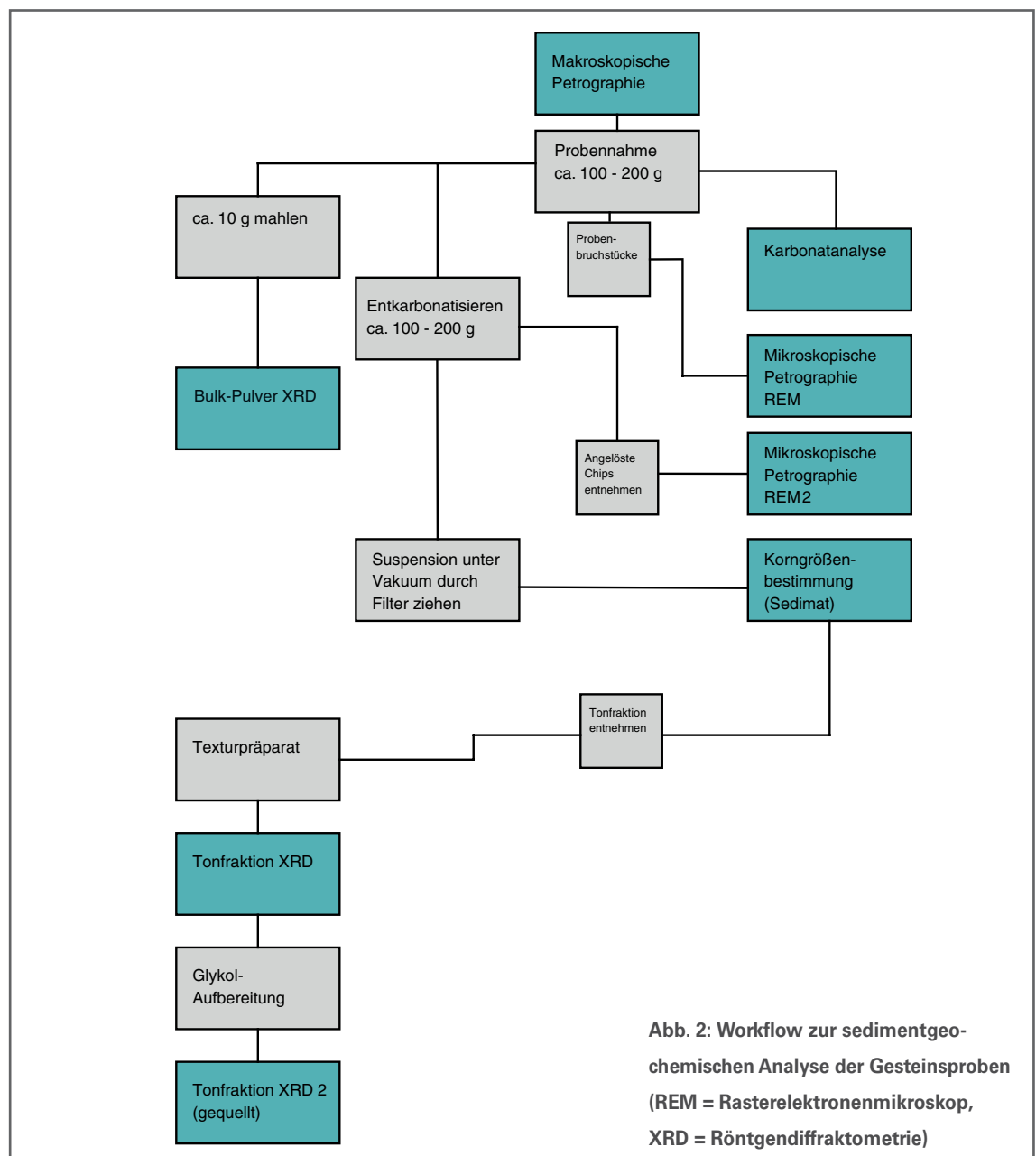


Abb. 2: Workflow zur sedimentgeochemischen Analyse der Gesteinsproben (REM = Rasterelektronenmikroskop, XRD = Röntgendiffraktometrie)

2.3 Mikroskopische Untersuchung

Aufgrund des hohen Anteils feinkörniger, kalkiger und tonig-schluffiger Bestandteile wurde in den Laboren des Deutschen Bergbau-Museums Bochum (DBM) an einzelnen Proben eine mikroskopische Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop (Zeiss Supra 40 VP) in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDAX) durchgeführt. Insgesamt 10 Probenstücke mit frischer Bruchfläche wurden analysiert. Drei Probenstücke wurden nach Anlösung durch Salzsäure (10 Vol.-%) untersucht. Mittels EDAX wurde die Elementzusammensetzung der vorkommenden Minerale ermittelt.

2.4 Bestimmung der Gesteinszusammensetzung

Die Einteilung der Gesteinszusammensetzung erfolgte nach dem Einteilungsprinzip für Mischgesteine gemäß DIN 22015 (1993). Für diese Einteilung wurden in den Laboren des GD NRW der Karbonatgehalt und die Korngrößenverteilung der Proben analysiert. Der Karbonatgehalt wurde mittels thermischem Differenzierungsverfahren (Elementar soliTOC Cube) nach DIN 19539 (2016) bestimmt. Die Korngrößenverteilung bis $\geq 0,063$ mm wurde per Siebverfahren ermittelt. Die Schluff- und Tonfraktion wurde mithilfe der Pipettanalyse nach DIN ISO 11277 (2002) durch einen vollautomatisierten Sedimat (UGT Sedimat 4-12) unter Berücksichtigung des zuvor mit Salzsäure entfernten Karbonates analysiert.

2.5 Bulk-Röntgendiffraktometrie

Die röntgenographische Untersuchung des Sediments mittels Röntgenpulverdiffraktometrie wurde in Zusammenarbeit mit dem DBM (Panalytical X'pert Pro) und dem GD NRW (Philips X'Pert MPD PW 3040/00) durchgeführt. Die Diffraktometer sind jeweils mit einem Divergenzschlitz ausgestattet und es wurde unter folgenden Bedingungen gemessen:

Wellenlänge Cu $K\alpha = 1,541 \text{ \AA}$

Röhrenspannung: 45 kV

Röhrenstrom: 40 mA

Die generelle Scan-Konfiguration betrug für Mineralpulver:

Messbereich: $2\theta = 5^\circ - 70^\circ$

Schrittweite: $2\theta = 0,04^\circ$

Zählzeit: 6 Sekunden

Die Proben – im Folgenden als Bulk bezeichnet – wurden mit dem Handmörser gemahlen und ohne weitere Aufbereitung gemessen. Die Differenzierung der Minerale erfolgte nach Abgleich der mineralspezifischen Reflexe anhand von Literaturwerten (MOORE & REYNOLDS 1997). Die Auswertung und Semiquantifizierung der Diagramme erfolgte unter Zuhilfenahme der internen Datenbank PDF-2, Stand 1995, des DBM mit dem Programm „High Score plus“, das die sogenannten RIR-Werte (Relative Intensity Ratio) – die Intensität des stärksten Reflexes im Vergleich zu reinem Korund (CHUNG 1975) – als Wichtungsfaktoren benutzt. Dies ist nötig, um die unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten der jeweiligen Einheitszellen der Kristalle zu berücksichtigen. Die Hauptpeaks der jeweiligen Minerale werden identifiziert und ihre Peakflächen werden mit diesen internen Wichtungsfaktoren verrechnet. So können Haupt- und Nebenbestandteile der Proben bestimmt und semiquantifiziert werden. Die Notation ist in Gew.-%, die Flächenindizes sind nach Miller-Notation in (hkl) angegeben.

2.6 Ton-Röntgendiffraktometrie

Die weiterführende röntgenographische Bestimmung der Tonminerale wurde durch Vakuumfiltration in Anlehnung an die Probenaufbereitung in MOORE & REYNOLDS (1997) durchgeführt. Die Proben wurden mit 20-%iger Salzsäure (HCl) entkarbonatisiert und durch Vakuumfiltration mehrfach filtriert (Porendurchmesser 11 μm). Die Tonfraktion ($< 2 \mu\text{m}$) wurde mittels vollautomatisiertem Sedimaten (UGT Sedimat 4-12) im Labor des GD NRW abgetrennt. Die Messung von insgesamt 7 Proben fand nach vorheriger Behandlung mit einem Dispergierungsmittel auf einem Glasprobenträger statt. Die Proben wurden mit 96-%igem Ethanol flotiert, um eine Einregelung der Tonminerale parallel zur (001)-Fläche (Basisfläche) zu erreichen. Derartige Texturpräparate erhöhen die Intensität der Tonmineral-Peaks, d. h. der Basisreflexe in c-Richtung (001-Reflexe), und dienen einer genauen Bestimmung der verschiedenen Tonminerale. Es wurde unter folgenden Bedingungen gemessen:

Messbereich: $2\theta = 5^\circ - 35^\circ$

Schrittweite: $2\theta = 0,017^\circ$

Zählzeit: 100 Sekunden

Die Semiquantifizierung wurde nach Peak-Intensität und Integration der Peakfläche durchgeführt. Hauptaugenmerk wurde auf die Tonmineralvertreter Kaolinit, Illit, die Glimmer Muskovit und den Fe-reichen Vertreter Glaukonit sowie Smektit und Chlorit als typische detritische und diagenetische Vertreter gelegt.

2.7 Glykol-Behandlung

Für die Bestimmung der Anteile von Kaolinit zu Chlorit und den quellfähigen Tonmineralen, insbesondere des Anteils an Smektit, und die Bestimmung der Wechsellagerung der Smektit/Illit-(Glimmer)-Minerale wurde jeweils eine Probe nach einer Glykol-Behandlung gemessen (SRODON 1980). Glykol verdrängt das eingelagerte H_2O in den quellfähigen Tonmineralen und führt zu einer Aufweitung der Gitterabstände und somit zu einer Peakverschiebung im Röntgendiffraktogramm. Die Glykolisierung fand im Exsikkator bei 60°C statt. Zur Verifizierung der Methodik wurden diverse Vergleichsmessungen an einem glykolisierten Bentonitstandard (Montmorillonit) durchgeführt.

3 Resultate

3.1 Lithologisch-sedimentologische Kernbeschreibung

Die lithologische Kernaufnahme nach makroskopischen Gesichtspunkten ergab eine Wechselfolge von grauen bis schwach grünlichen, teilweise schwach glaukonitischen und pyritischen Ton-, Schluff- und Kalkmergelsteinen. Es sind in der Regel dünne Bänke ausgebildet. Dünnpaltige Kalkbänke sind vermehrt im unteren Abschnitt ab 45,00 m eingeschaltet (Abb. 3).

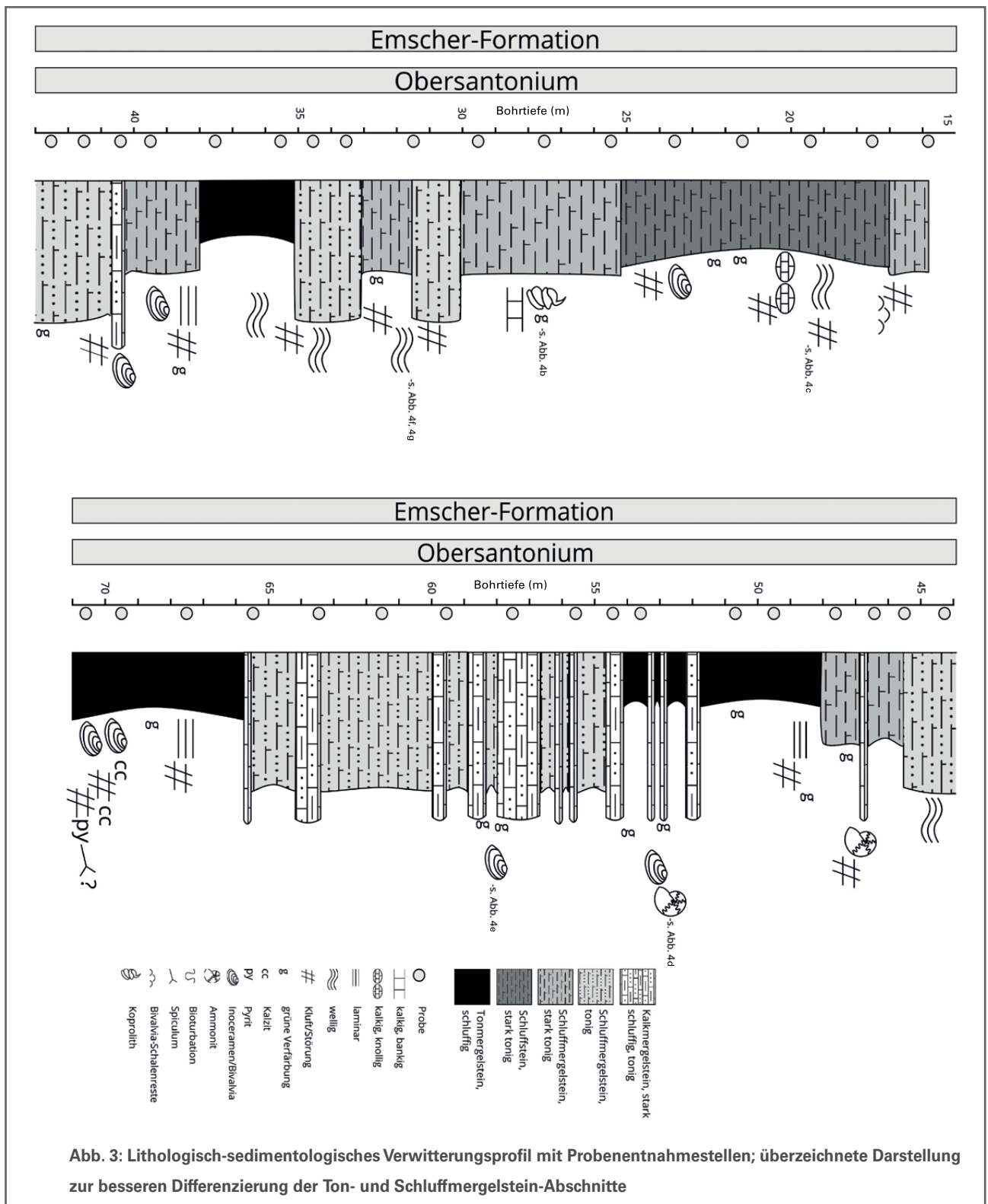


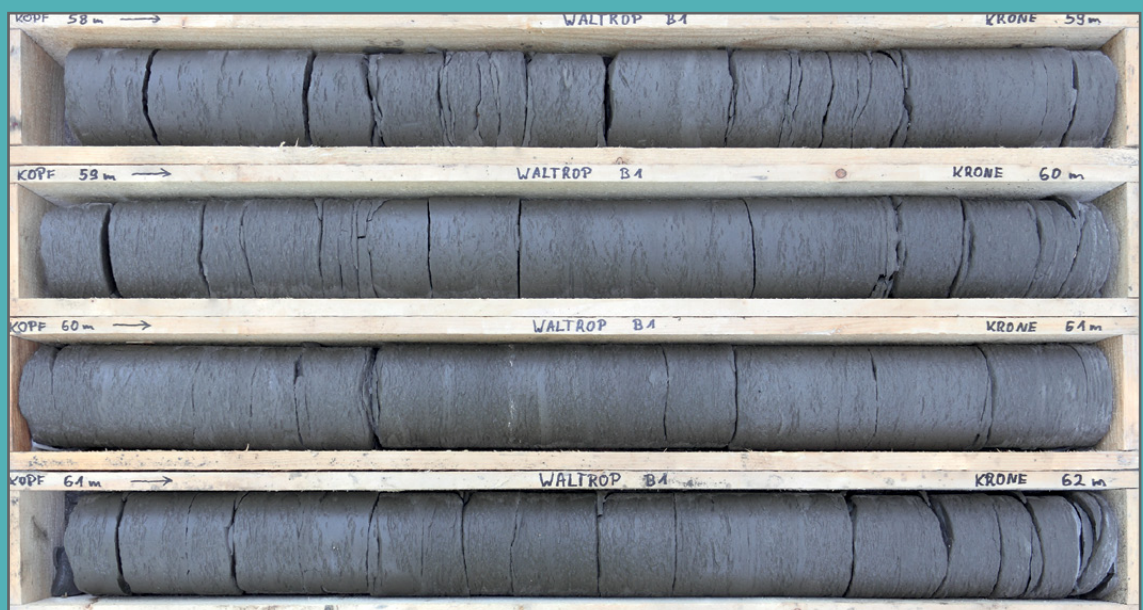
Abb. 3: Lithologisch-sedimentologisches Verwitterungsprofil mit Probenentnahmestellen; überzeichnete Darstellung zur besseren Differenzierung der Ton- und Schluffmergelstein-Abschnitte

Die Mergelsteine sind fein geschichtet. Blättrige bis flaserige Feinschichtungen alternieren mit bioturbaten bis stark bioturbaten Gefügen (Abb. 4a). Auf den Schichtflächen finden sich teilweise eingelagerte Pflanzenhäcksel. Die Erhaltung von organischem Material spiegelt sich in dunkelgrau bis schwarz laminierten, z. T. grünlich verfärbten, feinschichtigen Bereichen wider. Bioturbation und Kotpillen sind in Abbildung 4b ersichtlich. Viele Bioklasten, größtenteils Bivalven-Schalenreste, sind zu framboidalem Pyrit umkristallisiert. Die Korngrößen der einzelnen framboidalen Pyrite liegen im Bereich von 100 nm bis 10 µm (Abb. 4c). Einzelne Inoceramen- und Ammoniten-Steinkerne wurden im Profil in 46,56 m, 52,95 m, 58,27 m und 69,50 m Tiefe identifiziert. Schwammnadeln sind unter dem Binokular bei 70,50 m zu erkennen. Der Kernabschnitt von 31,25 – 47,50 m ist vielfach geklüftet. Die Klüfte haben ein Einfallen von 20 – 45°. Teilweise sind sie kalzitisch mineralisiert, eine Kluft im Bereich von 70,47 – 70,56 m ist mit idiomorphem Pyrit ausgekleidet.

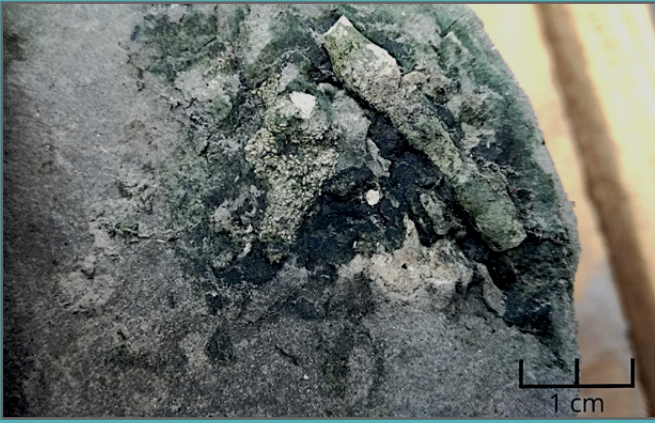
Eine zeitliche Einordnung fand litho- und biostratigraphisch mithilfe der Inoceramen-Fragmente und eines Ammonitenfundes mit Lobenlinienerhaltung statt. Der Ammonit wurde als *Hauericeras pseudogardeni* (SCHLÜTER 1872) bestimmt, Reichweite Obersantonium bis unteres Untercampanium, *pilula*-Zone (Abb. 4d). Bei den Inoceramen bei 58,27 m und 69,80 m handelt es sich um Exemplare von *Cordiceramus muelleri* (PETRASCHECK 1906), Reichweite nach SEITZ (1961) Obersantonium (Abb. 4e), und um *Cordiceramus bueltenensis* (SEITZ 1961), Reichweite nach SEITZ (1961) Obersantonium (Bestimmungen U. Kaplan, Gütersloh, 2019, pers. Mitt.).

Alle Proben wiesen kalkige Nannofossilien, größtenteils in Form von Coccolithophoriden (Abb. 4c u. 4f), auf. Biogener Quarz (z. B. in Form von Radiolarien) konnte nicht nachgewiesen werden. Das tafelige Mineralkorn aus Abbildung 4f wurde als Muskovit identifiziert (Abb. 4g). Die Ca-Anteile der EDAX-Analyse sind auf Kontamination durch Karbonat zurückzuführen.

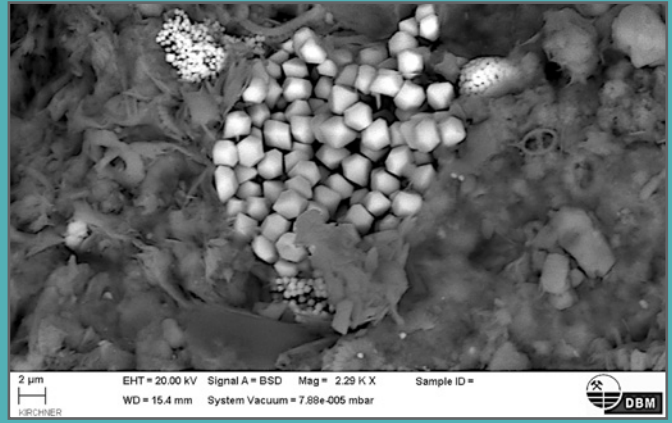
Abb. 4: Makro- und mikroskopische Kernaufnahme



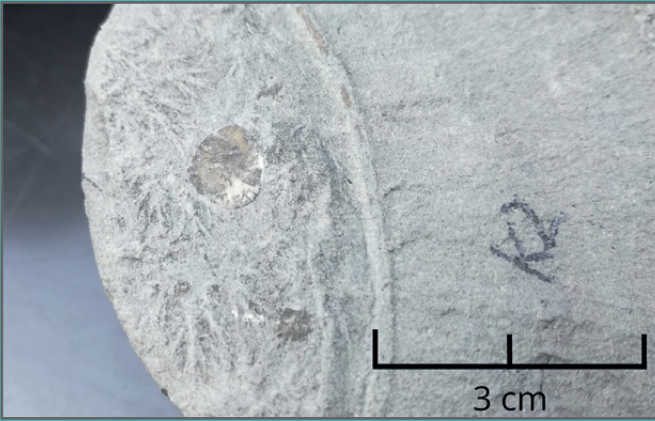
4a: Kernabschnitt 58 – 62 m, nass, fein geschichtete bis flaserige Schluffmergelsteine mit dünnplattigen Kalkmergelstein-Einschaltungen



4b



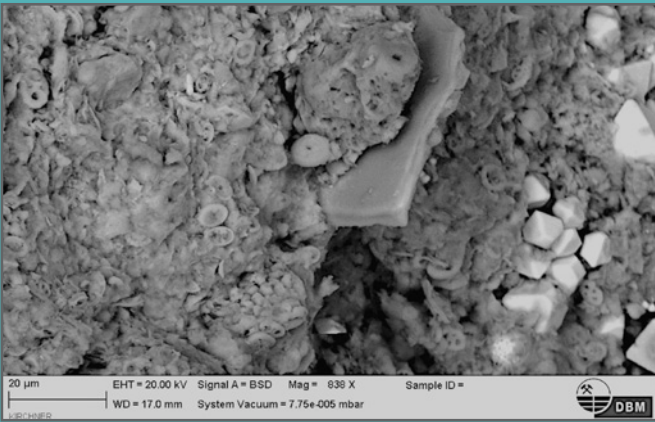
4c



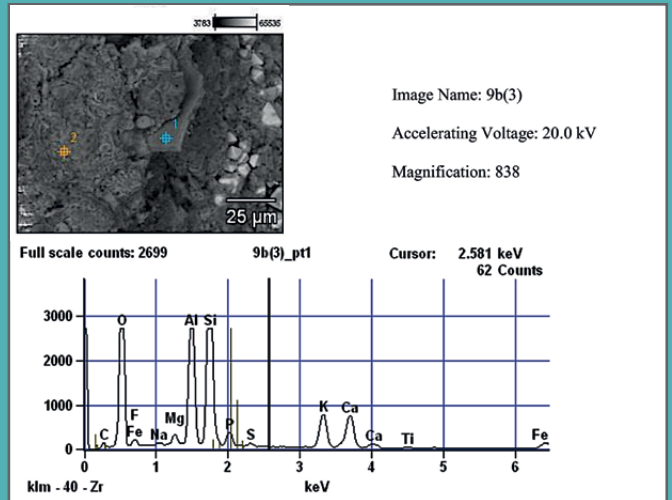
4d



4e



4f



4g

- 4b: 27,50 m: Kotpillen auf grünlich schwarz-grau verfärbter Schichtfläche, rechts oben bioturbates Gefüge, Krebsgang
- 4c: 19,4 m: REM-Aufnahme, framboidaler Pyrit, oktaedrische Einzelkristalle 100 nm – 2 µm, Matrix aus Biomikrit-Coccolithenfragmenten
- 4d: 52,74 m: Steinkern mit Lobelinienverlauf *Hauericeras pseudogardeni* (SCHLÜTER 1872)
- 4e: 58,27 m: Inoceramen-Steinkern: *Cordiceramus muelleri* (PETRASCHECK 1906)
- 4f: 31,5 m: REM-Aufnahme, Pyritframboide (2 – 5 µm), Muskovit-Plättchen (Mitte), Matrix aus Biomikrit-Coccolithenfragmenten
- 4g: REM-Aufnahme und EDAX-Elementgeochemie des Muskovitplättchens aus 4f

3.2 Geochemie/Röntgendiffraktometrie

Die Kombination aus Karbonatanalyse und Bestimmung der Korngrößenverteilung erlaubte eine Klassifizierung der Schichtenfolge nach DIN 22015 (1993). Das Gestein ist über den gesamten untersuchten Kernabschnitt als „Schluffmergelstein, stark tonig“ einzustufen. Die in der makroskopischen Ansprache angetroffenen Kalkbänkchen sind durch die Karbonatanalyse bestätigt worden.

Durch die Auswertung der Bulk-Röntgendiffraktogramme, die unorientiert an den mit dem Handmörser auf < 20 µm gemahlene Proben gemessen wurden, konnten Quarz und Kalzit als Hauptminerale identifiziert und semiquantifiziert werden (Tab. 1). Ihre Anteile schwanken zwischen 39 und 61 Gew.-% für Quarz und zwischen 24 und 41 Gew.-% für Kalzit. Demgegenüber wurde der Karbonatgehalt beim GD NRW thermisch ermittelt. Hier lagen die Karbonatgehalte im Bereich von 22,8 – 45,9 Gew.-%. Abweichungen beider Methoden zur Karbonatbestimmung lagen im arithmetischen Mittel bei 4,2 %. Pyrit ist trotz seines häufigen Auftretens als Spurenmineral (< 5 Gew.-%) einzustufen.

Die Semiquantifizierung der Bulk-Röntgendiffraktogramme macht es möglich, den Anteil an Kalzit, Quarz, Pyrit und den Tonmineralen ins Verhältnis zu setzen und als Gew.-% auszuweisen (Tab. 1).

Durch Analysen der Tonfraktion an 7 ausgewählten Proben (Nr. 1, 5, 10, 16, 22, 28 u. 34; vgl. Tab. 2) wurden Smektit, Illit und Kaolinit als Haupttonminerale identifiziert (Abb. 5). Die Hauptreflexe in orientierter Lage senkrecht zu (001) entsprechen jeweils den Gitterabständen (d) von 17 Å (Smektit), 10 Å (Illit) und 7 Å (Kaolinit). Die weiteren Ebenenreflexe von (002) entsprechen Illit/Glimmer (5 Å) und Kaolinit (3,5 Å). Chlorit wird durch seinen 14,1 Å-(001)-Hauptreflex identifiziert, dessen (002)-Reflex überlappt mit dem (001)-Reflex von Kaolinit und im weiteren Verlauf der (004)-Chlorit-Reflex mit dem Kaolinit-Reflex von (002). Der (003)-Reflex von Illit/Glimmer wird oftmals durch eine Vorherrschaft von Quarz und dessen 3,33 Å-(101)-Reflex unterdrückt. Glaukonit überlappt stark mit Illit und hat normalerweise eine höhere (001)/(003)-Intensität.

Quantifizierungen der Bulk XRD-Diagramme und Vergleiche Karbonat thermisch/Kalzit Bulk XRD, Tonanteil aus Korngrößenbestimmung Sedimat/Tonminerale Bulk XRD

Proben-Nr.	Tiefe	Anteile aus Röntgendiffraktogramm der Bulk XRD Untersuchung				Vergleich Karbonat thermisch/Kalzit Bulk XRD		Vergleich Tonanteil aus Korngrößenbestimmung Sedimat/Tonminerale Bulk XRD	
		Pyrit	Quarz	Kalzit	Tonminerale	Karbonat (thermische Analyse)	Abweichung Karbonat thermisch/Kalzit Bulk XRD	Tonanteil aus Korngrößenbestimmung Sedimat Gesamte Masse	Abweichung Tonanteil aus Korngrößenbestimmung Sedimat/Tonminerale Bulk XRD
xxx	[m]	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	%	%
1	15,85	2	61	24	14	24,74	0,74	28,75	14,75
2	17,50	2	55	25	17	22,94	2,06	31,36	14,36
5	23,60	2	59	24	15	23,02	0,98	31,72	16,72
6	25,50	2	59	23	16	22,83	0,17	28,09	12,09
7	27,50	2	50	27	22	23,78	3,22	28,35	6,35
8	29,65	2	53	21	24	28,95	7,95	24,80	0,80
10	33,45	4	44	32	21	26,47	5,53	30,96	9,96
11	34,50	1	55	25	19	24,87	0,13	26,07	7,07
12	35,55	1	58	23	18	27,61	4,61	28,88	10,88
15	40,30	3	57	29	11	30,48	1,48	27,46	16,46
17	43,65	4	39	35	21	25,12	9,88	26,73	5,73
18	44,25	2	60	24	14	28,60	4,60	30,13	16,13
19	45,50	2	55	27	17	30,66	3,66	29,33	12,33
20	46,40	3	40	38	18	28,06	9,94	30,00	12,00
23	51,70	3	50	28	20	32,53	4,53	29,48	9,48
24	53,60	2	52	28	18	32,69	4,69	29,95	11,95
25	54,40	2	47	33	17	36,34	3,34	26,29	9,29
26	55,60	3	32	46	19	40,83	5,17	27,16	8,16
27	57,50	2	56	26	16	26,94	0,94	31,56	15,56
30	63,40	4	36	40	19	45,92	5,92	19,74	0,74
31	65,50	3	39	41	18	32,12	8,88	30,07	12,07
34	70,60	2	47	31	19	27,30	3,70	30,39	11,39
Mittelwerte		2,41	50,18	29,55	17,86	29,73	4,19	28,19	10,65

Tab. 1: Quantifizierung der Mineralanteile nach Röntgendiffraktometrie-Analyse (Cu K α = 1,541 Å), der Korngrößenanteile nach Sedimat (DIN 11277) und des Karbonatgehaltes nach thermischer Analyse (DIN 19539)

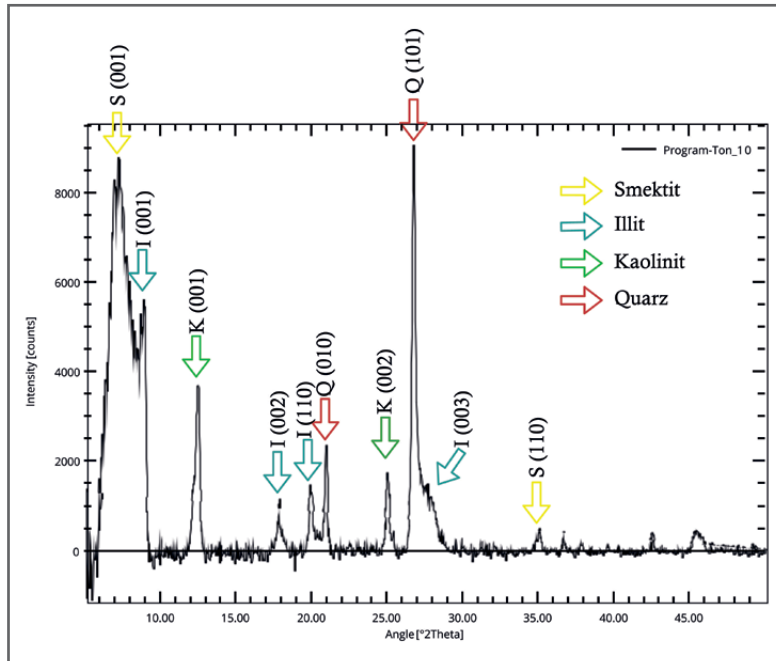


Abb. 5: Röntgendiffraktogramm der Probe 1 bei 15,85 m Tiefe; Scan von 5° – 50° 2θ, Baseline korrigiert; orientiert, Korngröße < 2 µm; identifizierte Tonminerale (Smektit/Illit, Kaolinit) und Quarz

Er kann durch das Fehlen oder eine sehr starke Abschwächung des 17 – 18 Å-(002)-Reflexes aufgrund der starken Streuung seines hohen Eisengehaltes (Fe³⁺ in den Oktaederzentren) unterschieden werden. Bei einer starken Vorherrschaft von Illit gegenüber Smektit und Glaukonit ist dies jedoch bei einer lufttrockenen orientierten Probe mit dieser „Screening“-Methode schwierig.

Chlorit-Anteile werden meist von Kaolinit-(001)- und Smektit-(001)-Reflexen überlagert, sodass hier auch nur eine Kombination aus Glykol-Behandlung und Aufheizen der Probe auf 550 °C – was den Chlorit-(001)-Reflex stark hervorhebt – für eine eindeutige Identifikation heranzuziehen ist. Chlorit wurde daher nicht semiquantitativ bestimmt und in der Statistik nicht berücksichtigt. Bei einer hohen Korngrößenbandbreite ist der Bereich von 0° – 6° 2θ oftmals durch einen hohen Hintergrund geprägt. Bei dem Gerät „XPerT Pro“ von Pananalytical war dieser Bereich nicht optimal konfiguriert, sodass die Auflösung für eine Unterscheidung von Smektit/Montmorillonit und Illit in niedriger Konzentration zu gering war und erst nach einer Baseline-Korrektur möglich wurde. Dadurch konnte in allen Proben nicht genau zwischen Smektit/Montmorillonit und Illit differenziert werden. Dies kann künftig durch bessere Korngrößenabtrennung und Dispergierung verbessert werden.

Quantifizierung der Tonfraktion < 2 µm und Vergleiche der Tonminerale Bulk XRD/Tonminerale Tonfraktion und Tonanteil aus Korngrößenbestimmung Sedimat/Tonminerale Tonfraktion XRD

Proben-Nr.	Tiefe	Anteil in Tonfraktion			Anteil in Gesamtprobe				Vergleich Tonminerale Bulk XRD/ Tonminerale Tonfraktion XRD		Vergleich Tonanteil aus Korngrößenbestimmung Sedimat/ Tonminerale Tonfraktion XRD	
		Illit (Glimmer)/ Smektit	Kaolinit	Quarz	Illit (Glimmer)/ Smektit	Kaolinit	Quarz	Summe Tonminerale	Tonminerale Bulk XRD	Abweichung Tonminerale Bulk XRD/Summe Tonminerale	Tonanteil aus Korngrößen- bestimmung Sedimat	Abweichung Summe Tonminerale/ Tonanteil aus Korngrößenbestimmung Sedimat
xxx	[m]	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	%
1	15,85	30,50	20,06	49,44	8,77	5,77	14,21	14,54	14	0,54	28,75	14,21
5	23,60	13,89	9,08	77,04	4,40	2,88	24,43	7,28	15	7,72	31,72	24,44
10	33,45	23,17	13,12	63,71	7,17	4,06	19,72	11,23	21	9,77	30,96	19,73
16	41,55	28,18	11,34	60,48	7,73	3,11	16,60	10,85			27,45	
22	49,50	25,76	10,55	63,70	7,14	2,92	17,66	10,07			27,73	
28	59,50	43,42	17,35	39,22	13,35	5,34	12,06	18,69			30,75	
34	70,60	30,59	16,86	52,55	9,30	5,12	15,97	14,42	19	4,58	30,39	15,97
Mittelwert		27,93	14,05	58,02	8,27	4,17	17,24	12,44	17,25	5,65	29,68	18,58

Tab. 2: Quantifizierung der Tonmineral-Anteile nach Röntgendiffraktometrie-Analyse (Cu Kα = 1,541 Å), bezogen auf die relative Häufigkeit und die Häufigkeit in der Gesamtprobe; Abweichungen im Vergleich zur Korngrößenbestimmung der Tonfraktion mittels Sedimat

Ebenfalls konnte Mikroquarz als Hauptbestandteil der Tonfraktion bestimmt werden (Abb. 5). Unter den Tonmineralen ist die Illit (Muskovit)/Smektit-Tonmineral-Mischkristallreihe der Hauptbestandteil, welcher etwa doppelt so stark vertreten ist wie der Kaolinit.

Die drei Tonmineralvertreter weisen über den gesamten Kernverlauf geringe Abweichungen untereinander auf. Die Verteilung der semiquantitativ ermittelten Anteile ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

Der Vergleich der beiden Diffraktogramme in Abbildung 6, unbehandelt (luftgetrocknet) zu glykolbehandelt, weist nur eine marginale Veränderung auf. Lediglich ein sehr breiter Reflex konnte im Bereich $16^\circ - 17,7^\circ 2\theta$ festgestellt werden. In diesem Bereich entsteht nach der Glykol-Behandlung eine Peakverschiebung beim Smektit hin zu geringeren 2θ -Werten (MOORE & REYNOLDS 1997). Dies setzt einen gewissen Anteil von Smektit voraus, der laut dem Vergleich der beiden Diagramme sehr gering ausfällt. Der Anteil wird nach SRODON (1980) anhand der Peakverschiebung des (001)-Illit-Reflexes zwischen $15,7^\circ$ und $17,6^\circ 2\theta$ auf unter 10 Gew.-% geschätzt. Weitere quellfähige Tonminerale wie Montmorillonit sind nicht in den Proben enthalten.

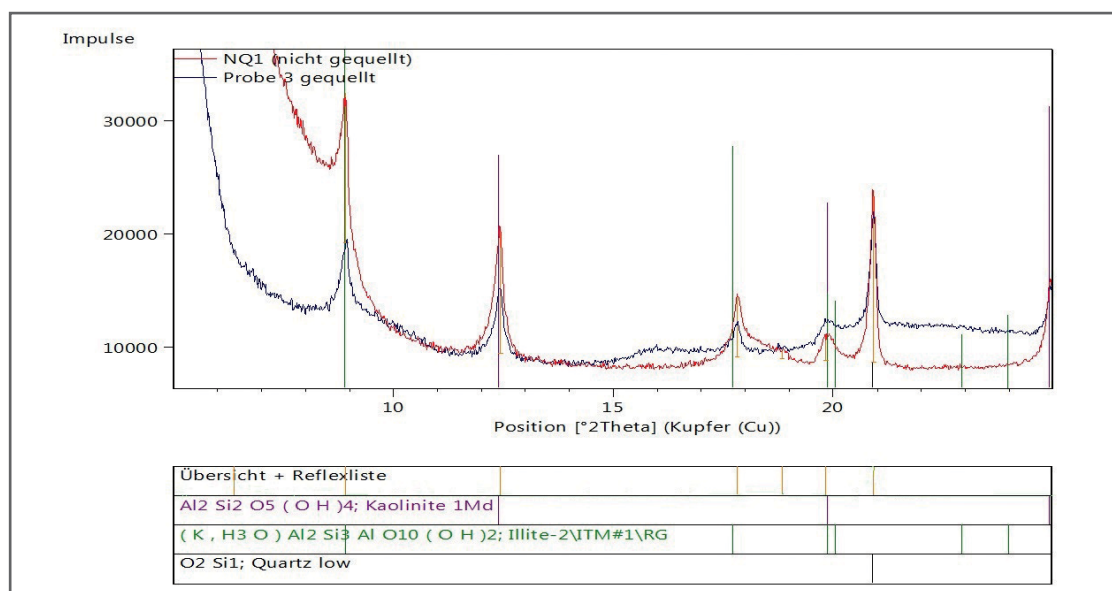


Abb. 6: Röntgendiffraktogramme, Scan $5^\circ - 25^\circ 2\theta$, orientiert, luftgetrocknet (rot) und glykolisiert (blau); im Bereich $15,7^\circ - 17,6^\circ 2\theta$ breiter Peak als Smektit-Anteil identifiziert

Der Vergleich der Lithologie mit der Geochemie und der Mineralogie ist in Abbildung 7 dargestellt. Der höhere Kalkgehalt im unteren Abschnitt im Vergleich zu den ersten 35 m des Kerns ist klar herausgestellt. Damit korrespondiert eine höhere Konzentration von Illit/Smektit. Kaolinit-Anteile, bezogen auf die Bulk-Probe, liegen gleichbleibend über das gesamte Profil verteilt zwischen 3 und 6 Gew.-%. Innerhalb der Tonfraktion liegen die Kaolinit-Anteile zwischen 9 und 20 Gew.-% bei einem Mittelwert von 14,05 Gew.-%. Illit/Glimmer-Anteile steigen von 13,89 Gew.-% und im Mittel ca. 20 Gew.-% in der oberen Hälfte auf bis zu 43 Gew.-% in der unteren Hälfte an. Überraschend in der Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ ist der hohe Mikroquarz-Anteil von im Mittel 58,02 Gew.-%. Eine weitere Identifikation, wie sich der Mikroquarz-Anteil faziell zusammensetzt bzw. um welche Art von Quarzen es sich handelt, steht aus.

Feldspäte als Alkalifeldspäte (Albit/Orthoklas) wurden nur in Spuren in sechs Proben der Bulk-Röntgendiffraktometrie-Untersuchungen des GD NRW identifiziert. Im Profil waren dies die Proben bei 46,00 m, 49,50 m, 55,60 m, 69,50 m und bei 71,50 m.

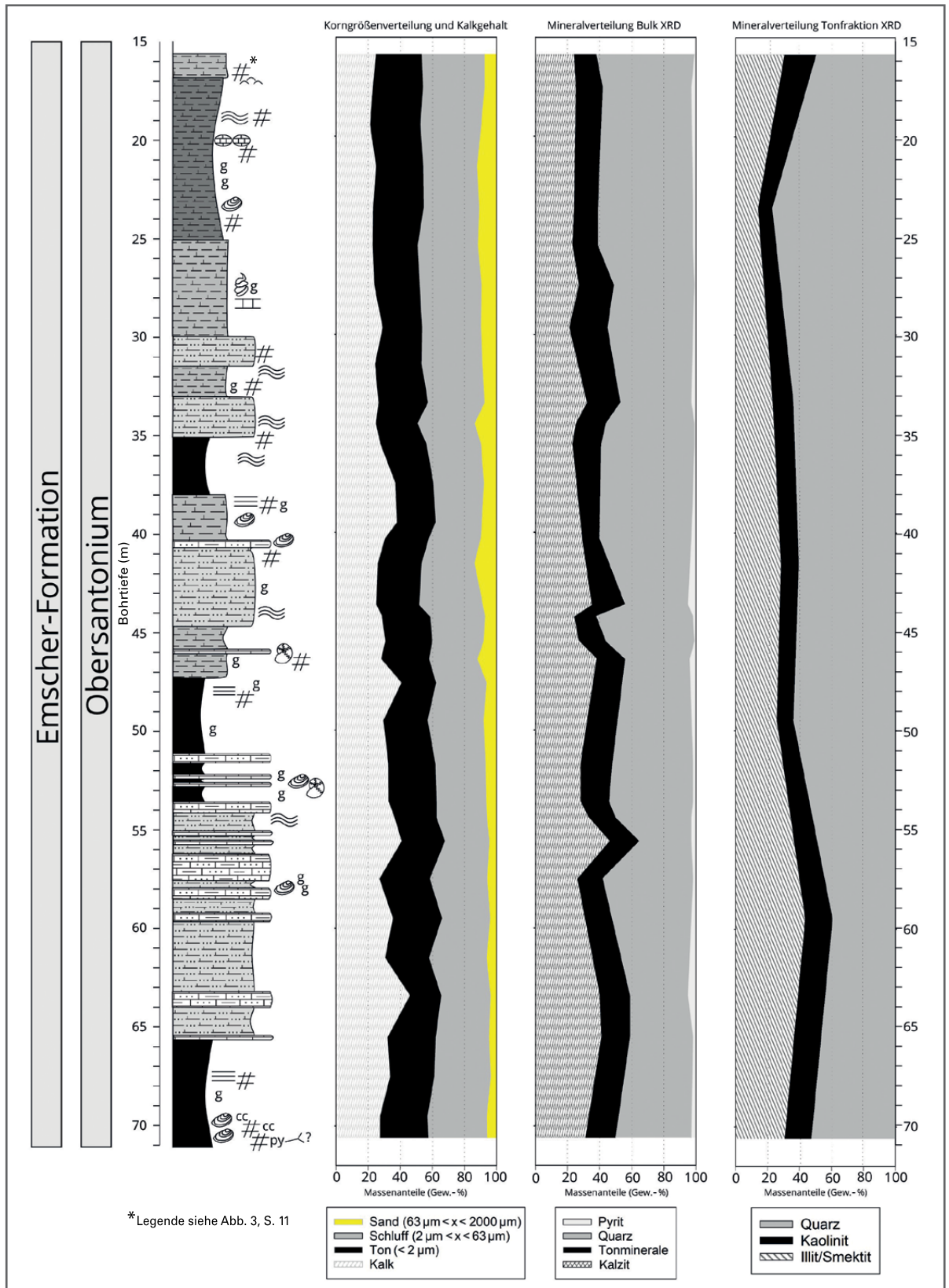


Abb. 7: Verwitterungsprofil, Korngrößenverteilung und Sedimentgeochemie (XRD = Röntgendiffraktometrie)

4 Diskussion

Die Geochemie und Mineralogie des Bohrkernprofils Waltrop 1 wurde mithilfe eines einfachen Workflows zur sedimentgeochemischen Charakterisierung untersucht. Ziel war es, aufgrund von Mineralogie und Geochemie in der auf den ersten Blick lithologisch monotonen Emscher-Formation geochemische Muster für eine weitere Untergliederung der Gesteinsabfolge herauszuarbeiten. Die Lithologie reicht von Ton-/Schluffmergelstein bis hin zu Kalkmergelstein (vgl. Abb. 3). In der unteren Hälfte (ab 45 m Tiefe) wechseln kalkige Bänke mit stärker tonhaltigen Partien ab. Der obere Teil (bis 45 m Tiefe) weist eine homogene Verteilung von Ton- und Kalkbestandteilen mit Sandanteilen von bis zu 10 Gew.-% im Vergleich zu den stärker kalkigen Partien des unteren Kernabschnitts mit Sandanteilen < 5 Gew.-% auf. Da Dünnschliffe fehlen, erfolgte die Charakterisierung der Kalkmergelsteine aufgrund von REM-Aufnahmen als „stark Coccolithen-dominiert“. Im unteren Bereich ist eine diagenetische Mikritisierung und somit eine diagenetisch bedingte Schichtung für die bankigen, stärker kalkhaltigen Partien im Wechsel mit stärker tonigen Sedimenten nicht auszuschließen. Generell ist eine hohe Bioproduktion in Form von Phyto- und Zooplankton mit einem hohen Eintrag von Nährstoffen zu assoziieren. Nährstoffe sind meist an Detritus gebunden. Da der Detritus fast feldspatfrei ist, viel Quarz enthält und das Tonmineralspektrum keinerlei Indizien für eine frühe Verwitterung und den Erhalt von Smektiten aufweist, kann man von einem sehr reifen Sediment hinsichtlich seines Transportweges bzw. der Häufigkeit seiner Umlagerungen sprechen. Das Rheinische Schiefergebirge im Süden des Münsterländer Kreide-Beckens erscheint als Liefergebiet naheliegend, jedoch passt die Reife des Sediments nicht in dieses Bild. Darüber hinaus wurden dort während der Oberkreide-Zeit keine großen Deltabereiche nachgewiesen (HISS & MUTTERLOSE 2010; DÖLLING et al. 2017). Daher ist hier von einer Umlagerung oder von einem weiter entfernten Liefergebiet auszugehen, wie z. B. der Niederländischen Trias-Plattform (HERNGREEN & WONG 2007) oder Bereichen des südlichen Niedersächsischen Beckens, dessen Ablagerungen bei seiner Inversion erodiert und sehr wahrscheinlich zum großen Teil in das südlich gelegene Münsterländer Kreide-Becken eingetragen wurden. Schwermineralanalysen, die gegebenenfalls Rückschlüsse auf mögliche Liefergebiete erlauben würden, sind als weiterführende Analysen vorgesehen.

Der Erhalt von organischem Material, die häufig anzutreffenden framboidalen Pyrite (WILKIN & BARNES 1997) und das Fehlen von aragonitischen Schalenresten sprechen für einen starken Umsatz von organischem Material durch bakterielle Sulfatreduktion, die mit erhöhten Bikarbonatgehalten und eventuell stärkerer Mikritisierung korreliert. Die hohe Anzahl von kalkigem Phytoplankton (Coccolithen) untermauert die Korrelation und die gleichbleibend hohe Bioproduktion durch vermehrten Nährstoffeintrag in Form von Detritus. Der hohe Anteil an detritischem Eisen puffert das durch Sulfatreduktion entstandene Sulfid über die Bildung von framboidalem Pyrit ab (RICKARD & LUTHER 2007; STRAUSS et al. 2012). Die Wassersäule war aber keinesfalls anoxisch wie im rezenten Schwarzen Meer und auch die oberen Bereiche des Porenwasserraums im Sediment müssen aufgrund der starken Bioturbation ebenfalls oxisch gewesen sein. Pyrit als Disulfid mit seinem Anteil elementaren Schwefels bildet sich meist an der oxisch-anoxischen Grenzfläche (BERNER 1983). Dies spricht trotz der stark fein geschichteten Sedimentpartien für relativ hohe Sedimentationsraten, was für die Emscher-Formation des Münsterländer Kreide-Beckens aufgrund der hohen Subsidenz ein bekanntes Phänomen ist. Für das Santonium der Bohrung Münsterland 1 (Bohrungsdatenbank des GD NRW: BNUM 18018) lässt sich z. B. eine Sedimentationsrate von 29,4 m/100 000 J. berechnen (750 m Sediment in 2,7 Mio. J.; vgl. COHEN et al. 2013). Das ist eine 8-fach höhere Sedimentationsrate als im Turonium, die in der Bohrung Münsterland 1 bei 3,6 m/100 000 J. liegt (150 m Sediment in 4,1 Mio. J.; vgl. COHEN et al. 2013).

Sogenannte Mixed-Layer-Smektit/Illit-Tonminerale, die für eine Verwitterung von pelitischen Sedimenten sprechen würden und die als diagenetische Indikatoren dienen (FOSCOLOS & POWELL & GUNTHER 1976), konnten bislang nicht nachgewiesen werden. Hier muss eine genauere Aufbereitungsmethodik benutzt werden, um detaillierter den Bereich von $0^\circ - 7^\circ 2\theta$ aufzulösen. Bei einer mehrere Hundert Meter mächtigen Gesteinsabfolge der Emscher-Formation wäre in größeren Tiefen aufgrund der kinetischen Umwandlung von Smektit zu Illit bzw. der Neuordnung der Mixed-Layer-Smektit/Illit-Tonminerale bei steigenden Temperaturen generell mit einem zunehmenden Illit-Gehalt zu rechnen.

Die fehlende Vorherrschaft von quellfähigen Tonmineralen und der hohe Anteil an Mikroquarz haben Auswirkungen auf die petrophysikalischen Eigenschaften der Tonmergelsteine der Emscher-Formation. Die große Anzahl an Klüften in dem vergleichsweise kurzen Kernabschnitt, die teilweise mineralisiert waren, spricht zudem für Durchlässigkeiten in Form von verbundenem Matrix-Porenraum und entlang tektonischer Wegsamkeiten (Klüfte, Störungen etc.). Der hohe Mikroquarz-Anteil in der Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ ergibt ein durchaus neues Bild der Tonmergelsteine und muss weiter untersucht werden. GASSE (1987) betrachtete in den Bohrungen Werne 8 (BNUM 70732), Sandbochum 2 (BNUM 71624) und Lerche 1 (BNUM 71714) ebenfalls die Emscher-Formation. Seine röntgendiffraktometrischen Analysen ergaben ein Vorkommen von Smektit und Illit im Bereich der gesamten Schichtenfolge. GASSE (1987) beobachtete ein Auftreten von Chlorit und Kaolinit erst im Coniacium, d. h. in größeren Bohrtiefen.

Der hier angewandte Workflow für eine detaillierte sedimentgeochemische Analyse hat sich als praktikabel erwiesen, muss aber jeweils für bestimmte Fragestellungen angepasst werden. Im Gegensatz spricht die hohe Reife aber für die These einer starken Umlagerung. Schwermineralanalysen, eine erweiterte chemische Aufbereitung der Tonmineralproben und eine detaillierte Dünnschliffansprache sind weitere Vorgehensweisen, um den Ablagerungsraum der Emscher-Formation weiter zu charakterisieren.

5 Danksagung

Wir danken der RAG AG für die Überlassung des Bohrkernmaterials und für die Genehmigung zur Veröffentlichung der Bohrergebnisse. Die Autoren bedanken sich bei Prof. Dr. Michael Prange für die fachliche Unterstützung und für die Möglichkeit, die analytischen Geräte des Deutschen Bergbaumuseums Bochum zu benutzen. Ulrich Kaplan wird gedankt für seine Bestimmung der Makrofossilien. Ganz besonderer Dank geht an Annegret Kahlert, Angelika Olders und Ulrike Wefels (alle Geologischer Dienst NRW) für die Durchführung der Korngrößenanalysen und der Bulk-Röntgendiffraktometrie.

6 Literaturverzeichnis

- BAILEY, S. W. (1984): Structures of Layer Silicates. – In: BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. [Hrsg.]: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. – Mineral. Soc. Eng., **5**: 124 S.; London.
- BERNER, R. A. (1983): Sedimentary pyrite formation. – Amer. J. Sci., **268** (1): 1 – 23; New Haven/Conn. – [DOI: 10.2475/ajs.268.1.1]
- COHEN, K. M.; FINNEY, ST. C.; GIBBARD, PH. L.; FAN, J. (2013; aktualisiert): The ICS International Chronostratigraphic Chart. – Episodes **36** (3): 199 – 204, 1 Tab. – <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2013/v36i3/002> – Version 2020: <https://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.pdf>
- CHUNG, F. H. (1975): Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. III. Simultaneous determination of a set of reference intensities. – J. Appl. Cryst., **8** (1): 17 – 19. – [DOI: 10.1107/S0021889875009454]
- DIN 22015 (1993): Rohstoffuntersuchungen im Steinkohlenbergbau; Makroskopische Ansprache und Aufnahme der Gesteine des Deckgebirges; Berlin u. a. (Beuth-Verl.).
- DIN 19539 (2016): Untersuchung von Feststoffen – Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC_{400°}, ROC, TIC_{900°}); Berlin u. a. (Beuth-Verl.).
- DIN ISO 11277 (2002): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation; Berlin u. a. (Beuth-Verl.).
- DÖLLING, B.; DÖLLING, M.; HISS, M.; BERENSMEIER, M.; PÜTTMANN, T. (2017): Upper Cretaceous shallow-marine deposits of the southwestern Münsterland (northwest Germany) influenced by synsedimentary tectonics. – Cretaceous Res., **87**: 261 – 276; Amsterdam. – [DOI: 10.1016/j.cretres.2017.05.002]
- DÖLLING, B.; DÖLLING, M.; HISS, M.; LENZ, A.; PABSCH-ROTHER, U.; SALAMON, M. (2018): Das Projekt „Ruhrgebiet“ der Integrierten Geologischen Landesaufnahme. – EDGG, **259**: 31 – 55; Hannover.
- FOSCOLOS, A. E.; POWELL, T. G.; GUNTHER, P. R. (1976): The use of clay minerals and inorganic and organic geochemical indicators for evaluating the degree of diagenesis and oil generating potential of shales. – Geochim. cosmochim. Acta, **40** (8): 953 – 966, 9 Abb., 6 Tab.; Oxford u. a. – [DOI: 10.1016/0016-7037(76)90144-7]
- GASSE, W. (1987): Mikropaläontologie, Sedimentologie und Geochemie der Emscher-Fazies (Oberkreide) des südlichen Münsterlandes. – Diss. Univ. Münster: 295 S., 12 Abb., 36 Tab., 12 Taf., Münster/Westf. – [unveröff.]
- Geologischer Dienst NRW [Hrsg.] (2020), mit Beitr. von DÖLLING, B.; DÖLLING, M.; GAWLIK, A.; GELLENDIN, M.; HISS, M.; HOPP, H.; LENZ, A.; PABSCH-ROTHER, U.; SALAMON, M.; SCHÄFER, I.; SCHOLLMAYER, G.; SCHRIJVER, D.; STEUERWALD, K.: Integrierte geologische Landesaufnahme in Nordrhein-Westfalen : Erläuterungen zum Kartierprojekt Ruhrgebiet. – 173 S., 86 Abb.; Krefeld.
- HERNGREEN, G. F.W.; WONG, TH. (2007): Cretaceous, in Geology of the Netherlands. – Netherl. Acad. of Arts and Sci.: 127 – 150.
- HISS, M. (1995): Kreide. – In: Geologie im Münsterland: 41 – 65, 11 Abb.; Krefeld (Geol. L.-Amt Nordrh.-Westf.).
- HISS, M.; MUTTERLOSE, J. (2010): Field trip E6: Cretaceous geosites of the eastern Ruhr Area and the southern Münsterland. – Sch.-R. dt. Ges. Geowiss., **66**: 168 – 183; Hannover. – [DOI: 10.1127/sdgg/66/2010/168]
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. (1997): X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, 2. Aufl. – XVII + 378 S.; Oxford u. a. – [DOI: 10.1180/claymin.1999.034.1.21]
- PETRASCHECK, W. (1906): Über Inoceramen aus der Gosau und dem Flysch der Nordalpen. – Jb. k. k. geol. Reichsanst., **56** (1): 155 – 168, 4 Abb., 1 Taf.; Wien.
- POPPE, L. J.; PASKEVICH, V. F.; HATHAWAY, J. C.; BLACKWOOD, D. S. (2001): A Laboratory Manual for X-Ray powder diffraction. – Geol. Surv. Amer. Open-File Report, **01.041**: 1 – 88; Washington. – [DOI: 10.3133/ofr0141]
- PÜTTMANN, T.; LINNERT, CH.; DÖLLING, B.; MUTTERLOSE, J. (2018): Deciphering Late Cretaceous (Cenomanian to Campanian) coastline dynamics in the southwestern Münsterland (northwest Germany) by using calcareous nanofossils: Eustasy vs local tectonics. – Cretaceous Res., **87**: 174 – 184. – [DOI: 10.1016/j.cretres.2017.07.005]
- RICKARD, D.; LUTHER, G. W. (2007): Chemistry of iron sulfides. – Chem. Rev., **107** (2): 514 – 562. – [DOI: 10.1021/cr0503658]

- SCHLÜTER, C. A. (1872): Cephalopoden der oberen deutschen Kreide. – *Palaeontographica N. F.*, **21** (1): 25 – 120, 35 Taf.; Kassel.
- SEITZ, O. (1961): Die Inoceramen des Santon von Nordwestdeutschland, Tl. 1: Die Untergattungen *Platyceramus*, *Cadoce-ramus* und *Cordiceramus*. – *Beih. Geol. Jb.*, **46**: 186 S., 39 Abb., 15 Taf.; Hannover.
- SRODON, J. (1980): Precise Identification of Illite / Smectite Interstratifications by X-Ray Powder Diffraction. – *Clays and Clay Miner.*, **28** (6): 401 – 411, 8 Abb., 2 Tab.; Bloomington/Ind. – [DOI: 10.1346/CCMN.1980.0280601]
- STRAUSS, H.; BAST, R.; CORDING, A.; DIEKRUP, D.; FUGMANN, A.; GARBE-SCHÖNBERG, D.; LUTTER, A.; OESER, M.; RABE, K.; REINKE, D.; TEICHERT, B. M.; WESTERNSTRÖER, U. (2012): Sulphur diagenesis in the sediments of the Kiel Bight, SW Baltic Sea, as reflected by multiple stable sulphur isotopes. – *Isotopes Environ. Health Stud.*, **48** (1): 166 – 179. – [DOI: 10.1080/10256016.2012.648930]
- WILKIN, R. T.; BARNES, H. L. (1997): Formation processes of framboidal pyrite. – *Geochim. Cosmochim., Acta*, **61** (2): 323 bis 339. – [DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00320-1]

Impressum

Alle Rechte vorbehalten

scriptum^{online}

Geowissenschaftliche Arbeitsergebnisse aus Nordrhein-Westfalen

© 2021 Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb –
De-Greiff-Straße 195 · 47803 Krefeld · Postfach 10 07 63 · 47707 Krefeld
Fon 0 21 51 897-0 · poststelle@gd.nrw.de
www.gd.nrw.de

Satz und Gestaltung:

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen

Für den Inhalt des Beitrags sind die Autoren allein verantwortlich.

scriptum^{online} erscheint in unregelmäßigen Abständen.

Kostenloser Download über www.gd.nrw.de

ISSN 2510-1331