

Die Seeser Sande als Barriereinseln: Fazielle Differenzierungen in den Ablagerungen der Greifenhain-Subformation

Daniela Focke¹, Frank Bretschneider¹ & Gerda Standke²

¹ LAOP – Laboratories for Applied Organic Petrology, Straße der Freundschaft 92, D-02991 Lauta, d.focke@laop-consult.de / f.bretschneider@laop-consult.de

² Johann-Sebastian-Bach-Straße 2, D-09599 Freiberg, gbstandke@t-online.de

Zusammenfassung

Seit ca. 2009 kam es im Bereich der ehemaligen Tagebaue Schlabendorf und Seese wiederholt zu Bodenverflüssigungen und Sackungen in den Innenkippen im Hinterland gesicherter Restseeböschungen. Diese Ereignisse werden u. a. auf die dort vorkommende sedimentäre Abfolge der „Seeser Sande“ der Meuro-Formation zurückgeführt. Daher wurden die „Seeser Sande“ durch ein umfangreiches Arbeitsprogramm aus geochemischen, sedimentologischen, palynologischen und kutikularanalytischen sowie sedimentpetrographischen Analysen detailliert untersucht.

Mithilfe dieses multidisziplinären Ansatzes konnte die Abfolge der Seeser Sande als Bildung von Barriereinseln beschreiben werden, welche sich südöstlich des Untersuchungsgebietes mit Wattablagerungen verzahnen. Es wird die isochrone Position der Seeser Sande zur G400-Stratigraphie der Greifenhain-Subformation herausgestellt. Weiterhin wird der Inhalt der Basisgerölllagen (Seeser Geröllgemeinschaft) von den Ablagerungen der Seeser Sande getrennt, bezugnehmend auf Zeitraum der originären Ablagerung und der Provenienz.

Schlagwörter:

Barriereinseln; geochemische Sedimentologie; Palynologie; Provenance-Analyse; Schwermineralanalyse; Seeser Sande

1. Einleitung

Im Bereich der ehemaligen Tagebaue Schlabendorf und Seese kommt es seit ca. 2009 immer wieder zu Bodenverflüssigungen und Sackungen in den Innenkippen im Hinterland gesicherter Restseeböschungen. Diese Ereignisse werden u. a. auf die dort vorkommende sedimentäre Abfolge der „Seeser Sande“ zurückgeführt, deren physikalische Eigenschaften als ursächlich in Betracht gezogen werden. Mit dem Hintergrund dieser Problematik wurde von der Lausitz Energie Bergbau AG (LE-B) ein Projekt initiiert, um die Seeser Sande, zugehörig zur Meuro-Formation, detaillierter bodenphysikalisch, geochemisch, geologisch und sedimentpetrographisch zu untersuchen. Dabei fielen in das Aufgabengebiet von LAOP die geochemische Charakterisierung durch Elementscreening mittels Hand-RFA, die sedimentologische Beschreibung der Bohrungen, die palynologische und kutikularanalytische Analyse der organikreichen Sedimente, die sedimentpetrographische Analyse sowie die Untersuchung der Geröllhorizonte. Des Weiteren wurden die Sande mit den Ablagerungen aus

Welzow-Süd und Nochten verglichen und ein geologisches Genesemodell für das Untersuchungsgebiet erarbeitet.

2. Regionalgeologischer Überblick zur Einordnung der Meuro-Formation

Paläogeographische Daten zur Lausitz im Miozän sind zahlreich publiziert (RÖGL 1999; FAUPL 2000; KNOX et al. 2010) und stellen die Lausitz an den Südrand eines Meeresbeckens der Nordwesteuropäischen Senke. GIBBARD & LEWIN (2016) verbinden die Sedimentationsräume mit den Zuflüssen und verweisen auf die Interaktion von Klima und Tektonik als entscheidende Faktoren für das Sedimentationsgeschehen im Neogen. Die klimatische Entwicklung im Neogen wird generell als zyklische Abkühlung betrachtet, welche seit der Oberkreide weltweit einsetzte (FAUPL 2000; ELICKI & BREITKREUZ 2016; BRADSHAW 2020). Diese Abkühlung geht einher mit Packeis- und Gletscherbildungen und dadurch initiierten Regressionsphasen.

Nach BRADSHAW (2020) gibt es im Miozän mehrere klimatische Events. Zum einen ist das Miozäne Climate Optimum (MCO, 17-14,5 Ma) zu nennen (Abb. 1), welches mit der Bildung des 2. MFK (Miozäner Flözkomplex) korreliert. LARSEN et al. (2011) gibt für einen paläobotanischen Proxy des MCO in Jütland, Dänemark mittlere Jahrestemperaturen von knapp unter 20 °C an (warmest month mean: 27 °C, coldest month mean: 12 °C) bei einer jährlichen Niederschlagsmenge von ca. 1.300 mm.

Die Mid-Miozäne Climate Transition (MMCT, 14,1-13,8 Ma) wird nach BRADSHAW (2020) mit einem schnellen Zuwachs des antarktischen Eisschildes begründet. Sie kann mit den regressiven Tendenzen im Zeitraum der Oberbegleiterbildung in der Lausitz korreliert werden. Das Late Miozäne Cooling (LMC, 7,8-6,7 Ma) wirkt mit weiteren starken Regressionstendenzen in die Ablagerungsräume hinein und führt in der Lausitz zu brackischen bis terrestrischen Ablagerungsbedingungen des höheren Miozän und Pliozän.

Die Tektonik ist die zweite treibende Kraft für das Sedimentationsgeschehen. Abb. 2 zeigt die tertiären Strukturelemente im Nordseebereich nach GIBBARD & LEWIN (2016). Demnach befindet sich die Lausitz (grüner Kreis) in einem Bereich minimaler Subsidenz, flankiert von uplift-Gebieten im Süden und Gebieten erhöhter Subsidenz im Norden und Nordosten.

Zu Beginn des Miozän wird eine Schichtlücke angenommen, welche in einem verstärkten Uplift durch die savinische Phase, an der Grenze Oligozän und Miozän, begründet wird (GIBBARD & LEWIN 2016). Eine weitere tektonische Phase im höheren Miozän, stellt die sogenannte steirische Phase dar. Sie hatte nach TRIFONOV & SOKOLOV (2018) zwei Aktivierungszeiträume. Der erste fällt in das Langhium (von 16-15 Ma / Welzow-Sfm.). Dabei sind sowohl die Diskordanz am Top des 2. MFK, als auch die Schrägstellung des Flözes nach der

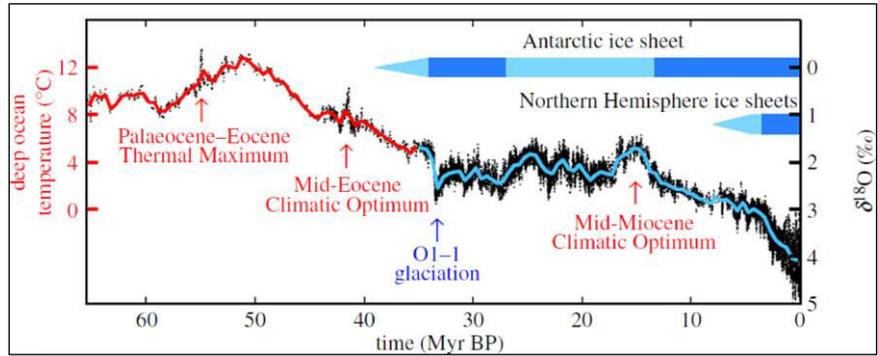


Abb. 1: Klimatische Entwicklung des Känozoikum anhand von Tiefseetemperaturen (aus HANSEN et al. 2013).

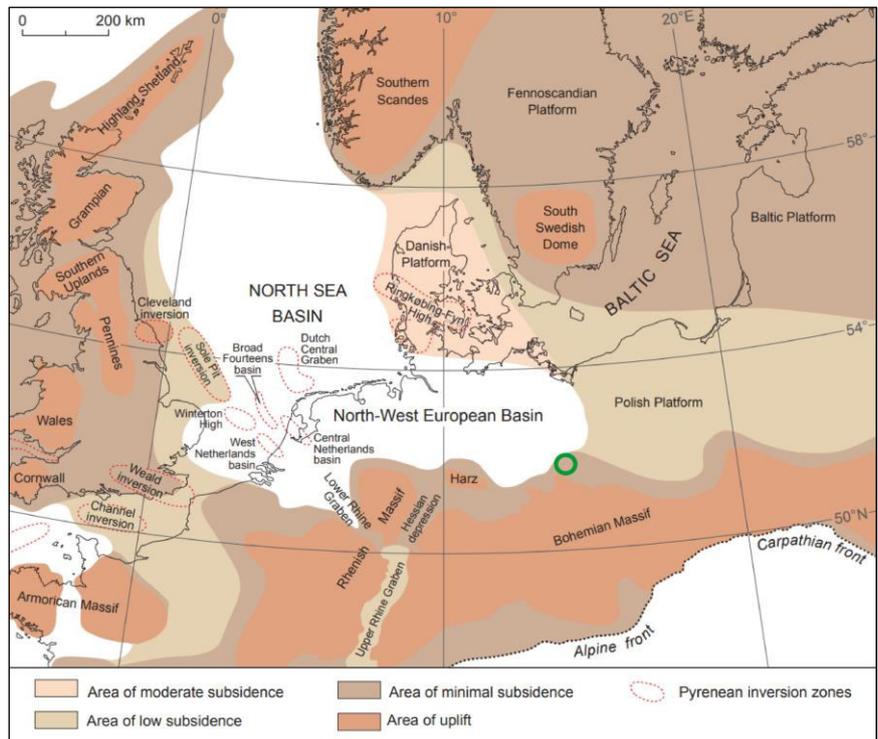


Abb. 2: Tertiäre Strukturelemente im Nordseebereich (aus GIBBARD & LEWIN 2016).

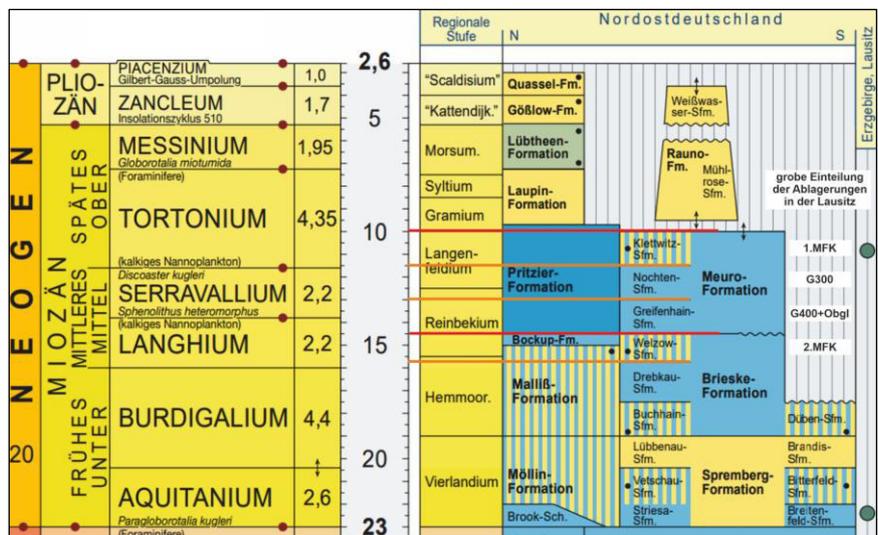


Abb. 3: Stratigraphische Zuordnung der Ablagerungen der Lausitz (nach DSK 2016).

endogenen Tektonik „Typ Nochten“ (vgl. BRAUSE & HAHMANN 1989) mögliche Relikte dieser tektonischen Phase. Der zweite Aktivierungszeitraum wird in das frühe Tortonium (von 12-11 Ma, höhere Meuro-Fm.) gestellt.

Der Lausitzer Block und die Elbezone werden nach LANGE et al. (2008) in der Oberkreide exhumiert. Für das Westerzgebirge nimmt SUHR (2003) erste morphologisch wirksame Hebungen im Oligozän an, welche im Miozän auf das Osterzgebirge übergreifen. Erzgebirge und Lausitzer Block sind daher auch die beiden regionalsten Provenienzen der betrachteten Sedimente im Miozän.

Stratigraphisch wird die Meuro-Formation in das Mittel- bis Spätmiozän (Langhium bis Tortonium) gestellt (Abb. 3, DSK 2016) und umfasst einen Zeitraum von ca. 4,5 Ma (14,5-10,0 Ma). Sie beginnt mit einer Erosionsdiskordanz über den Ablagerungen des 2. Miozänen Flözkomplexes (2. MFK), welcher selbst in die Welzow-Subformation, oberste Brieske-Formation, gestellt wird. Den unteren Teil der Meuro-Formation umfassen flachmarine Ablagerungen der Greifenhain-Subformation. Diese werden im unteren Teil von Wattsedimenten, im mittleren Teil von marinen Sanden des Grundwasserleiter 400 (G/GWL) und im oberen Teil von brackischen, teils kohligten Ablagerungen des Oberbegleiters geprägt. Die darüber folgende Nochten-Subformation besteht vornehmlich aus flachmarinen Sanden des G 300. Den Abschluss der Meuro-Formation bilden wiederum Wattsedimente mit bis zu sieben eingeschalteten Vermoorungszyklen (GEISLER et al. in STANDKE 2011), den Kohlen des 1. Miozänen Flözkomplexes (1. MFK). Bei einem Vergleich der Ablagerungsräume liegt in der Bearbeitung der Fokus auf der Greifenhain-Sfm. und stratigraphisch angrenzender Abfolgen.

Den Seeser Sanden fällt in der Literatur immer wieder eine Sonderstellung zu. Begründet wird dies zum einen mit einer Basiskonglomeratlage, deren Inhalt neben mesozoischen Lithoklasten auch paläozoische, fossilführende Bestandteile enthält. Zum anderen wird ein hoher Granatanteil in der Schwermineralführung als Beleg für eine nordische Fernkomponente dieser Sedimente angeführt. Als Provenienz wurde diesen Ablagerungen der skandinavische Raum zugeschrieben. Erste systematische Untersuchungen der Gerölllagen der Seeser Sande wurden von AHRENS & LOTSCH (1976) durchgeführt. KRUEGER (1994), NOWEL et al. (1994), AHRENS (1995), SUHR (1995) und LUDWIG (2015) diskutieren ausführlich die Stellung und den Inhalt dieser Gerölllagen und erörtern Bildungshypothesen. GÖTHEL (2002) bringt die Gerölle in Zusammenhang mit einem möglichen Tsunami, auch LANGE & SUHR (2022) greifen die Möglichkeit eines Zusammenhangs mit dem Riesimpakt auf und regen zur Diskussion an. STANDKE (2011) fasst die geologischen Fragestellungen rund um die Seeser Sande sehr gut zusammen, sodass die Autoren hier auf die vorgestellte Literatur verweisen. In dieser Schrift werden eigene Untersuchungen an Gerölllagen aus den Bohrungen des Raumes Seese/Schlabendorf beschrieben und diskutiert.

3. Erkundungsbohrungen im Modellgebiet

Die Lausitz Energie Bergbau AG (LE-B) teufte mehrere Vollkernbohrungen im Bereich der ehemaligen Tagebaue Seese und Schlabendorf ab. Drei dieser Bohrungen durchteufte die Stratigraphie der „Seeser Sande“. Die lithologischen Beschreibungen erfolgten durch LE-B und bilden hier auch die Grundlage für weitere Analysen. Für bodenphysikalische Untersuchungen wurde Material für die Firmen GMB und CDM bereitgestellt. LAOP führte am Material der Gesamtkernstrecken Fotodokumentationen, Untersuchungen zur Geochemie mit einem RFA-Handgerät (Niton XI3t) sowie eine Beprobung der lithologischen Einheiten durch.

Als Grundlage für die Darstellung der Bohrungen wurde das endgültige Schichtenverzeichnis herangezogen, erstellt durch LE-B. Die Kornverteilung der Sedimente wird als ein auf 100 % normiertes Spektrum mit den Farben: blau (Ton), lila (Schluff), gelb (Sand) und rot (Kies) dargestellt. Die geochemischen Werte (Elementscreening, 1 Messpunkt aller 10 cm) werden zu Schichtmittelwerten zusammengefasst. Die Teufenauflösung der bohrlochgeophysikalischen Daten beträgt 5 cm. Die geochemischen Daten sind in den Arbeitsberichten der jeweiligen Bohrung dokumentiert.

Die Geochemie der anorganischen Sedimente ist primär vom Mineralgehalt abhängig. Dabei unterscheiden sich Feinsande, Tone und kohlige Schluffe schon in ihren Hauptbestandteilen (Si, Al, K, Ca). Sekundär spielen fazielle Prozesse eine Rolle, welche sich durch differierende Anteile von Spurenelementen (Pb, Zn, As, Zr, Y, Sr, Rb) ausdrücken. Durch Unterschiede im Chemismus, der Dichte und der Verwitterungsstabilität einer primären Mineralgesellschaft können durch diverse Transportmechanismen, in ein und demselben Ablagerungsraum, geochemisch verschiedene Sedimentkörper entstehen.

Oft sind die dabei auftretenden Elementgehalte Korngrößenabhängig. Diese Korngrößenabhängigkeit wird korrelativ in dem Verhältnis Elementgehalt/mittlere Kornverteilung erfasst. Im Nachgang können die Abweichungen von dieser Korrelation als Korngrößenunabhängige An- und Abreicherungen analysiert werden. Beispielhaft sei hier das Element Zirkonium erwähnt, welches deutliche Seifenbildungen anhand der Elementverteilungen anzeigt.

Die unreifen quartären, glazigen bis limnisch-fluviatilen Sedimente unterscheiden sich deutlich von den reiferen, marin geprägten, tertiären Ablagerungen. Die Betrachtungen der Elementverhältnisse (Abb. 4) und der Korngrößenunabhängigkeit (Abb. 5) zeigt bei den geochemischen Daten mindestens zwei unterschiedliche tertiäre Sedimentabschnitte, wobei der untere den Seeser Sanden zugeordnet werden kann. Geochemisch wird dieser Abschnitt durch partielle Zr- und K-Anreicherungen, relativ hohe K/Rb-Verhältnisse und niedrige Ca/S- und Fe/S-Verhältnisse geprägt.

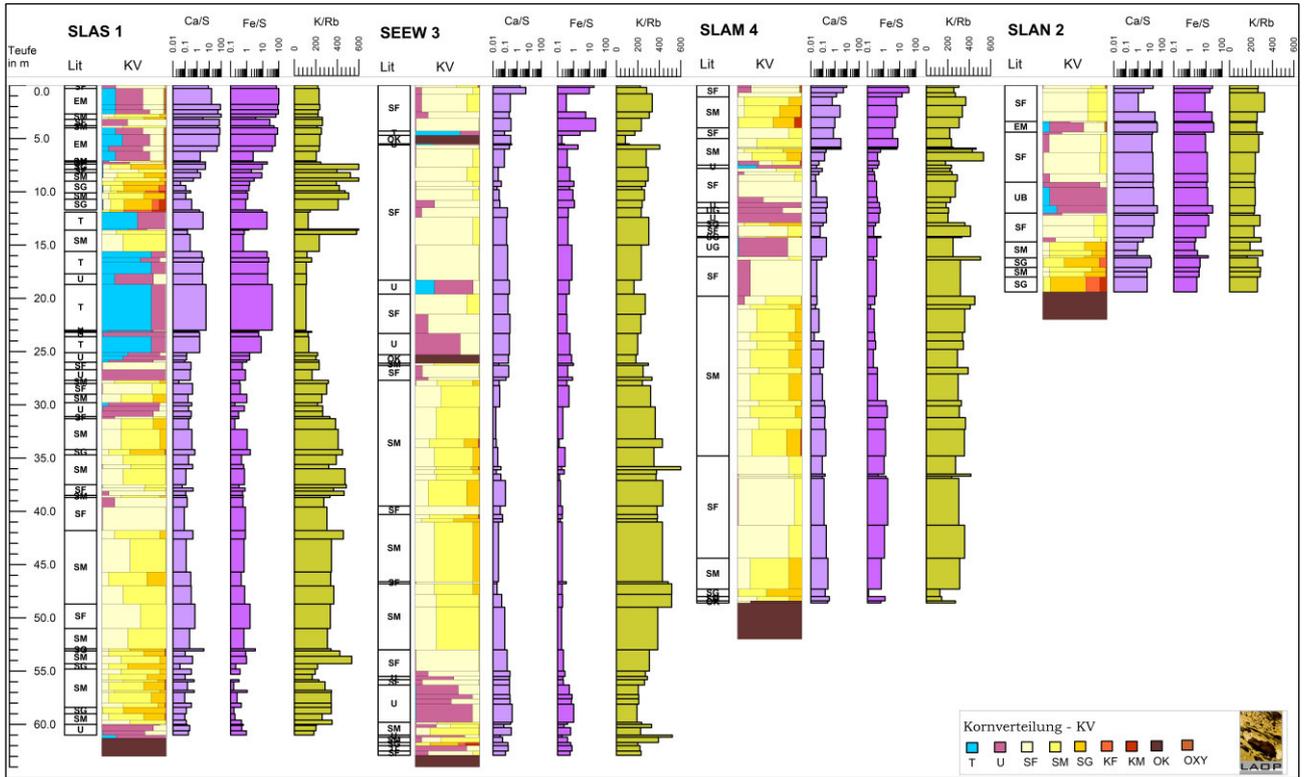


Abb. 4: Geochemische Übersichtsdarstellung der Elementverhältnisse Ca/S, Fe/S und K/Rb der vier abgeteufen Bohrungen im Modellgebiet.

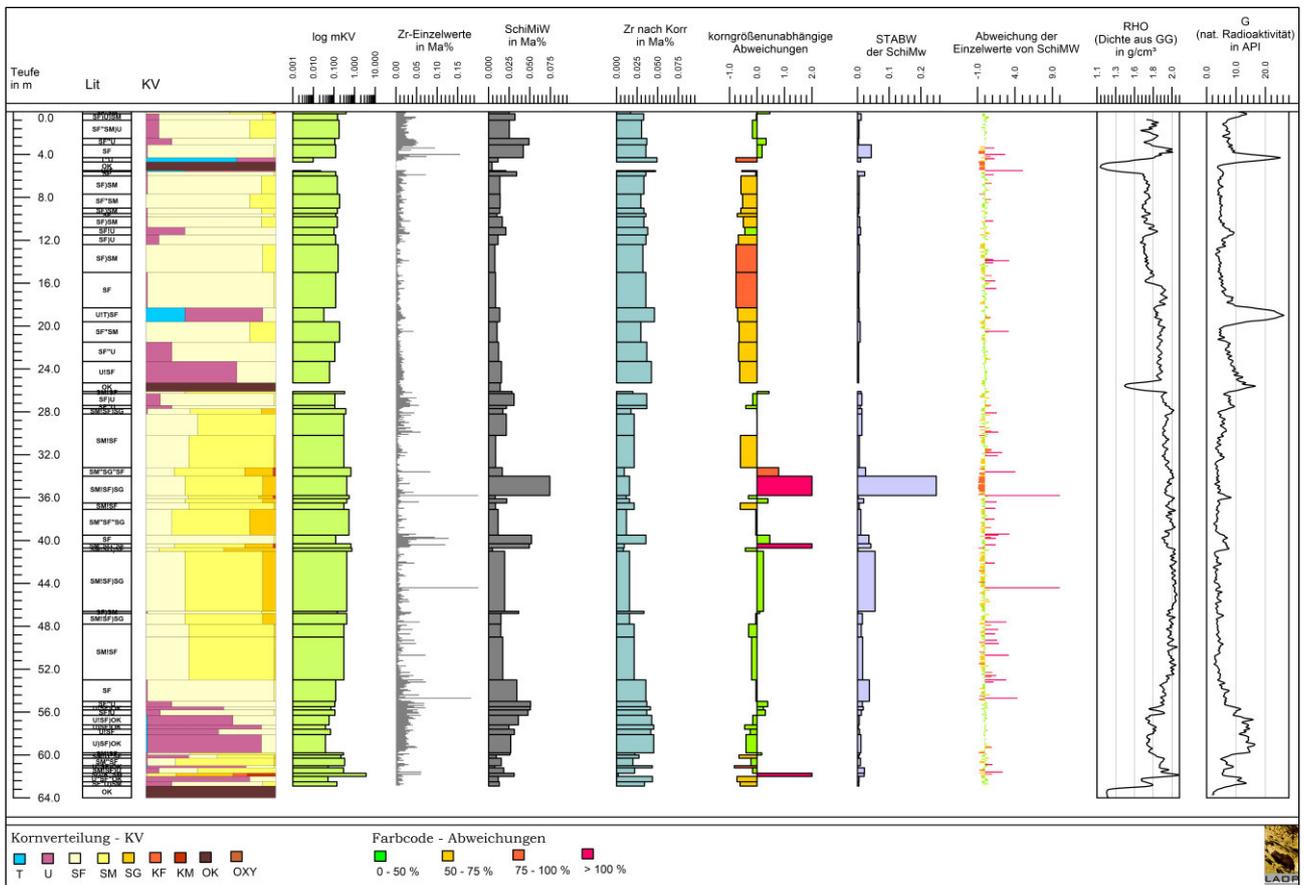


Abb. 5: Auswertung der Zr-Verteilung der Bohrung SEEW3 und Ermittlung komgrößenunabhängiger An- und Abreicherungen.

Mit Unterstützung von Dr. Gerda Standke wurden die lithologischen Einheiten faziell eingeordnet und sedimentologisch beschrieben. Die Schichten der Meuro-Formation zeigen vielfältige sedimentäre Fazies randmariner Ablagerungsräume: intertidale Wattbereiche, lagunäre Zonen bis hin zu subtidalen foreshore-Bildungen. In allen Bohrungen wurden, teils mehrere Meter mächtige, Bereiche schräggeschichteter Grob- bis Mittelsande angetroffen. Diese werden als typisch für die Abfolge der Seeser Sande beschrieben (NOWEL et al. 1994; STANDKE 2011). Die Schrägschichtungskörper, mit Wechsellagerungen von Grob- und Mittelsanden im cm-Bereich, werden als Großrippelbildungen angesehen. Sie sind stratigraphisch stark mit Strandbereichen verknüpft. Auf Grundlage der Kornverteilung und der faziellen Einordnung wurden Energiebereiche definiert und in den Profilabbildungen (Abb. 8) dargestellt.

Vermutlich handelt es sich bei dem Ablagerungsmilieu der schräggeschichteten Seeser Sande um den intertidalen bis teils subtidalen Bereich einer Hochenergieküste. Die stratigraphisch folgenden Ablagerungen spiegeln eher niedrigerenergetische Küstenbildungen mit verstärkter Wattenentwicklung wider (Abb. 6).

Die bindigen bis kohligten Sedimentanteile der tertiären Schichten wurden auszugsweise palynologisch und kutikularanalytisch untersucht. Der Hauptteil der Proben wurde aus energieärmeren Sedimenten im Hangenden der Seeser Sande genommen. Der Großteil des Materials wird einem Bildungszeitraum zwischen Hauptflöz und Oberbegleiter zugeordnet. Anzeiger dafür sind die Nachweise von *Sciadopitys* sp., Palmengeweben (*Versipalmicutis rhenana*, *Versipalmicutis* sp.) und die Kutikule *NFu 31*, welche bis in den Oberbegleiterzeitraum auftreten. Im Zeitraum des 1. MFK fehlen diese Anzeiger (Abb. 7).

Über dem Paket der schräggeschichteten Mittelsande wurden teilweise *Gordonia hradekensis* und *Verrucosicutis coartata* bestimmt. Diese weisen auf eine Sonderbildung der Lausitz, den „Raunoer Fluss“ hin, welcher sich nach SCHNEIDER & GRÖSCHKE (2003) im Zeitraum der Nochten-Sfm. zeitweise erosiv in die randmarine Sedimentation einschneidet. Mehrere Proben beinhalten marine Anzeiger wie die Chenopodiaceen oder Hystrichosphaerideen.

Typische Anzeiger für die kühleren Bildungsbedingungen des 1. MFK, z.B. *Cunninghamia* (Spießtanne), fehlen komplett und bestätigen im Analogieschluss die stratigraphische Einstufung. Einzig eine kohlige Lage im oberen Teil der Bohrung SEEW3 (Probe SEEW3-010) weicht durch fehlende *Sciadopitys* und Drüsen (Oudhkusumites) von den restlichen Proben ab und könnte schon einen Übergang zum 1. MFK bilden. Die schräggeschichteten Mittelsande sind nach paläobotanischen Gesichtspunkten in die Greifenhain-Subformation, isochron zum G 400, zu stellen. Eine spätere, tiefgreifende erosive Ablagerung, z. B. im Zeitraum der Klettwitz-Subformation, gilt als ausgeschlossen.

4. Sedimentpetrographische Untersuchungen an den Bohrungen aus Seese/Schlabendorf

Die aus den Bohrungen gewonnenen Proben mit Gerölllagen, werden in einem Abschnitt am Ende des Kapitels separat betrachtet. Alle anderen Proben repräsentieren verschiedene Faziesbereiche und Korngrößenspektren. Dabei wurde die Bohrung SEEW3 als Leitprofil gewählt und detailliert mit Proben zur sedimentpetrographischen Analyse untersetzt. Aus den anderen beiden Bohrungen wurden die Proben so gewählt, dass ein lateraler Vergleich der Sedimentpakete möglich ist. Die Proben wurden aufbereitet und gesiebt. Für die Schwermineralanalyse wurden die Korngrößensklassen

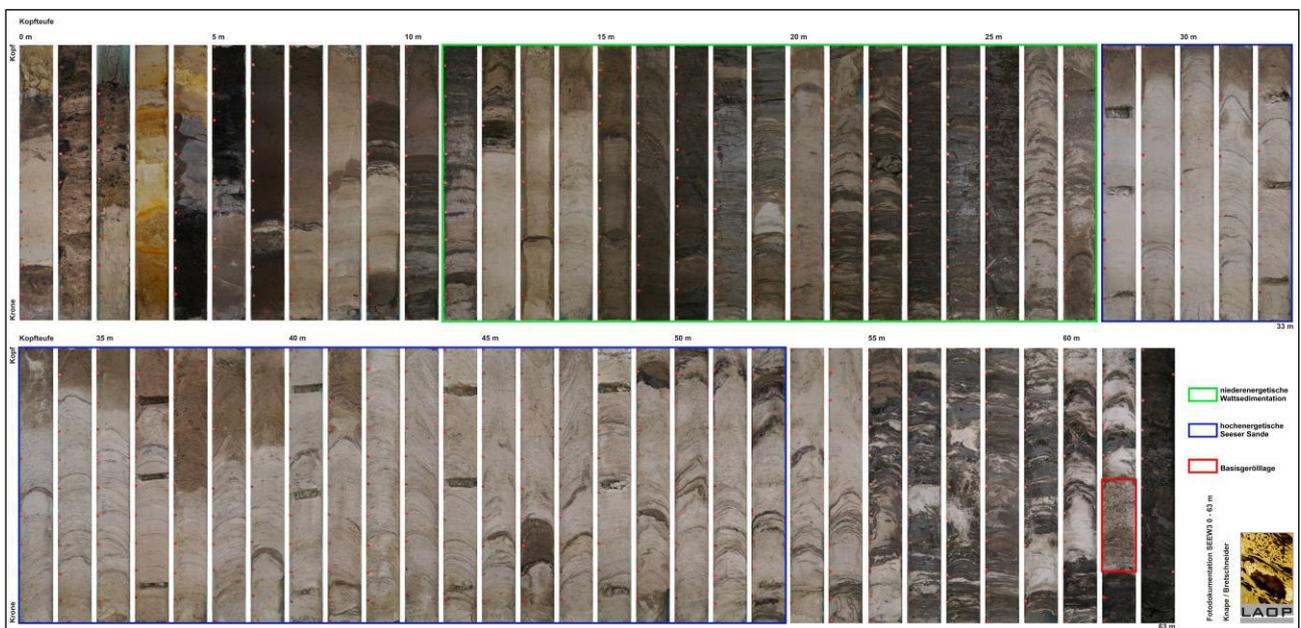


Abb. 6: Fotodokumentation der Bohrung SEEW3 mit Kennzeichnung wichtiger sedimentärer Abfolgen (grün: niedrigerenergetische Watten sedimentation, blau: hochenergetische Seeser Sande, rot: Basisgerölllage).

100-200 µm und 63-100 µm ausgewählt. Die Abtrennung der Schwerminerale (SM) erfolgte mittels der Schwereflüssigkeit Natriumpolywolframat mit einer Dichte von ca. 3 g/cm³. Es wurden maximal 5 g Probenmaterial der jeweiligen Korngröße getrennt und im Anschluss aus der gewonnenen Probe Körnerpräparate hergestellt. Als Einbettmittel kam Melmount (Lichtbrechung n = 1,662) zur Anwendung. Die anschließende Auszählung und Bestimmung der Minerale mittels Bandzählung erfolgte am Polarisationsmikroskop, wobei idealerweise ca. 300 transparente Körner ausgewertet wurden. Bei allen weiteren Untersuchungen wurde die Probenanzahl der Bohrung SEEW3 von 23 auf 11 reduziert, um sich auf die wechselnden Ablagerungsbedingungen zu fokussieren. Für die quantitative Analyse der Mineralzusammensetzung und die Charakterisierung der Oberflächen der mineralischen Körner wurden von den Kornfraktionen, welche ≥ 10 % Anteil an der Gesamtprobe aufweisen, Streupräparate angefertigt. Diese wurden mit Kohlenstoff beschichtet und ins Rasterelektronenmikroskop verbracht. Es erfolgte je Kornfraktion die Auszählung aller bestimmbarer Minerale (pro Probe ca. 300 Körner) sowie die quantitative Analyse der Hauptmineralen Quarz, Kalifeldspat und, wenn vorhanden, Plagioklas (ca. 100 Körner). Dabei wurden der Rundungsgrad (vereinfacht nach POWERS 1953 in FÜCHTBAUER 1988), die Oberflächenbeschaffenheit (glatt, angeraut, rau, löchrig, gefurcht, skelettiert) und die Anlösungserscheinung (nicht, schwach, deutlich, stark) ausgewertet. Für die Dünnschliffanalyse am Polarisationsmikroskop wurden die Fraktionen 100-200 µm und 200-400 µm mit einem Anteil von mindestens 5 Ma.-% ausgewählt. Die Dünnschliffpräparate wurden von der ERZLABOR GmbH, Freiberg angefertigt. Bei LAOP wurden, im gekreuzt polarisierten Licht, 300 bis 450 Körner

pro Präparat mittels Linienzählung analysiert. Die Körner wurden im Bereich der Quarzvarietäten, der Nichtquarze (Feldspatvarietäten, Kaolinit, Fe-Oxid-Anteil...) und auch der vorherrschenden Einschlüsse, quantitativ untersucht. Zur besseren Übersicht werden im Folgenden nur die Ergebnisse der Vergleichskorngröße 100-200 µm präsentiert.

Das Leitprofil SEEW3 kann, anhand der gewonnenen Ergebnisse, in sieben Gruppen oberhalb der Basisgerölllage gegliedert werden (Abb. 8). Gruppe 7 (Quartär) soll hier nicht weiter beleuchtet werden und Gruppe 1 wird zusammen mit der Basisgerölllage (siehe unten) beschrieben.

Die Gruppen 2, 3 und 4 werden den Seeser Sanden zugeordnet und kennzeichnen sich, mit Ausnahme von Gruppe 2, durch Ablagerungen eines hochenergetischen Milieus. Die Schwerminerale bestehen aus durchschnittlich 60 % Opakmineralen und 40 % nicht opaker Minerale. Die Opakminerale beinhalten zum Großteil Ti- und Fe-Ti-Oxide. Die Zusammensetzung der transparenten Schwerminerale ist in Abb. 9 dargestellt. Granat ist mit 33 % dominant, gefolgt von den Aluminiumsilikaten (23 %), den Titanoxiden (14 %), Zirkon (11 %) und Turmalin sowie Staurolith mit je 8 %. Alle übrigen Minerale sind mit je unter 2 % vertreten. Die Restgruppe enthält Chlorit, Chloritoid, Baryt, Apatit, Epidot-Gruppe, Amphibol, Pyroxen und Glaukonit. Der Zirkonanteil ist vor allem von Gruppe 4 gesteuert, da sich hier mehrere Strandseifen befinden, in denen Zirkon angereichert ist. Diese Zusammensetzung ist im Mittel auch in den Proben aus den Bohrungen SLAS1 und SLAM4, welche den Seeser Sanden zugeordnet wurden, wiederzufinden (Abb. 8). Vergleicht man den transparenten Schwermineralinhalt der Seeser Sande mit dem Sedimentpaket der Schüttungsgruppen 5 und 6,

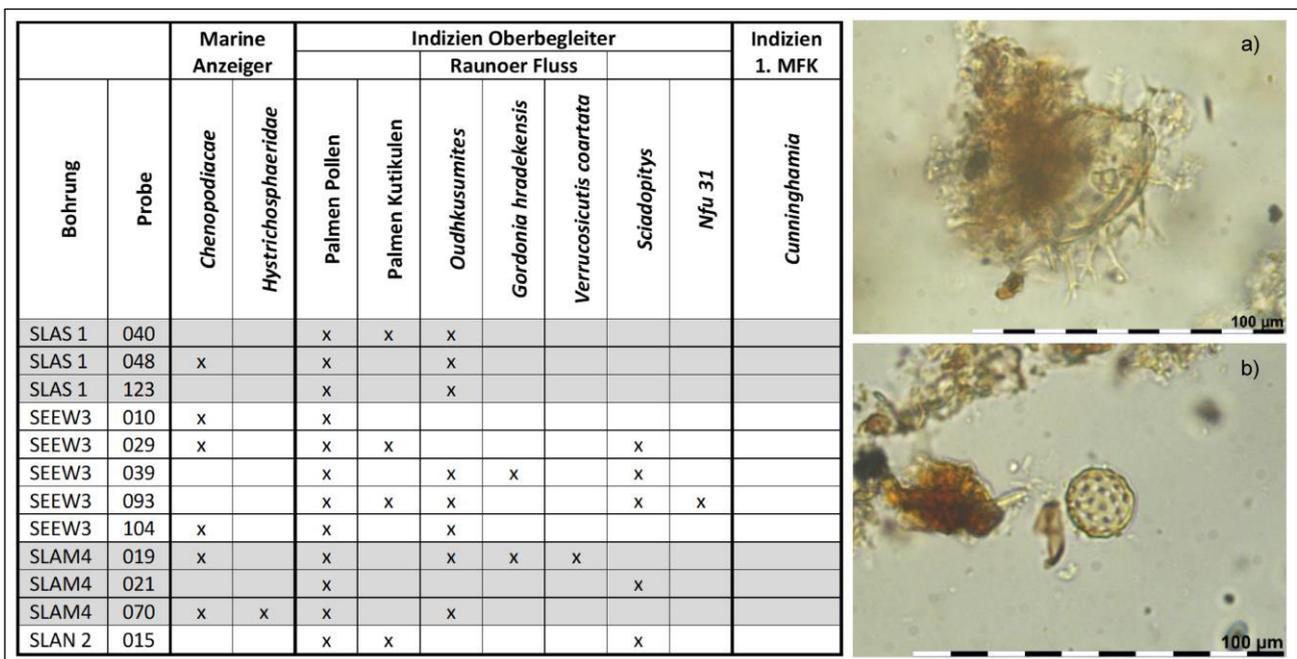


Abb. 7: Auftreten von Indikationspalynomorphen in den Proben der untersuchten Linerabschnitte. A: Marine Hystrichosphaeridae. B: Pollen von salzliebenden Chenopodiaceen.

so ist festzustellen, dass die auftretenden Minerale übereinstimmen, jedoch ihr Anteil variiert. Dazu gehört Zirkon, dessen Anteil auf 4 % zurück geht. Turmalin hingegen erhöht seinen Anteil auf 25 %, während der Anteil an Granat auf 20 % sinkt. In der Betrachtung der Leichtminerale sind wenige deutliche Charakteristika der Seeser Sande auszumachen. Kalifeldspat erreicht im Schnitt 6,5 %. Damit ist sein Anteil niedriger, als derer der Gruppen 5 und 6 (10,6 %). Generell ist, besonders ab Schüttungsgruppe 4, zu verzeichnen, dass der Feldspatanteil vom Liegenden zum Hangenden in der sedimentären Abfolge zunimmt, ebenso wie die relative Zunahme des Orthoklas gegenüber Mikroklin. Plagioklase traten nur als Einzelkörner in zwei Proben fraktionsunabhängig auf und haben daher keine genetische Aussagekraft. Bei den Hellglimmern und Kaoliniten sind die Unterschiede innerhalb der einzelnen Gruppen größer, als zwischen den Ablagerungszyklen, sodass diese keine charakteristischen Werte aufweisen. Der Rundungsgrad der Quarze in den Seeser Sanden setzt sich aus ca. 50 % angerundeten/gerundeten und 50 % subangularen/angularen Körnern zusammen (Bohrung SEEW3, SLAM4). Bei Quarzen der Gruppen 5 und 6 verschiebt sich das Verhältnis hin zu Letzteren. In der Bohrung SLAS1 traten die Quarze der Seeser Sande weniger gerundet auf und zeigten Ähnlichkeit mit Ergebnissen der Sedimente von Gruppe 5 und 6. Die in den Dünnschliffen analysierten polykristallinen Quarze zeigen vor allem in der

Fraktion 200-400 µm einen vom Liegenden zum Hangenden zunächst abfallenden und dann wieder ansteigenden Trend. In der Fraktion 100-200 µm ist dies weniger deutlich, aber in der Tendenz dennoch vorhanden. Dieser Befund korreliert stark mit den festgelegten Energiebereichen, wobei der Rückgang der polykristallinen Quarze einer höheren Aufarbeitung geschuldet ist. Des Weiteren ist der Anteil der magmatischen Körner an den polykristallinen Quarzen in den Seeser Sanden sehr gering, bei meist unter 10 %. In den darüber liegenden Ablagerungen erfolgt eine, wenn auch sehr geringe Zunahme dieser zum Hangenden. Weiter wurden die mikrokristallinen bis kryptokristallinen Quarze ausgezählt. Zu ihnen gehören kalt gebildete Varietäten wie Flint und Lydite, aber auch Chalcedon oder Achat. In den vorliegenden Proben wurden drei Kategorien mikrokristallinen Quarzes unterschieden. Zum ersten wurde typischer mikrokristalliner Flint klassifiziert. Dieser tritt sporadisch, mit Anteilen nahe der Nachweisgrenze, auf. Den höchsten Anteil dabei hat die Probe SEEW3-027 aus Schüttungsgruppe 6 (Abb. 10). Als weitere Klasse wurden kryptokristalline Quarze mit zumeist konzentrischer Ausbildung gezählt. Diese sind der Varietät Chalcedon zuzuordnen und wurden nur in zwei Proben aus Gruppe 5 bzw. 6 nahe der Nachweisgrenze analysiert. Unter „Sonstige“ wurden weitere, zumeist gröbere, mikrokristalline Körner eingeordnet. Vergleichbar sind diese Ausbildungen mit SiO₂-Zementen konsolidierter Sandsteine. Diese Körner

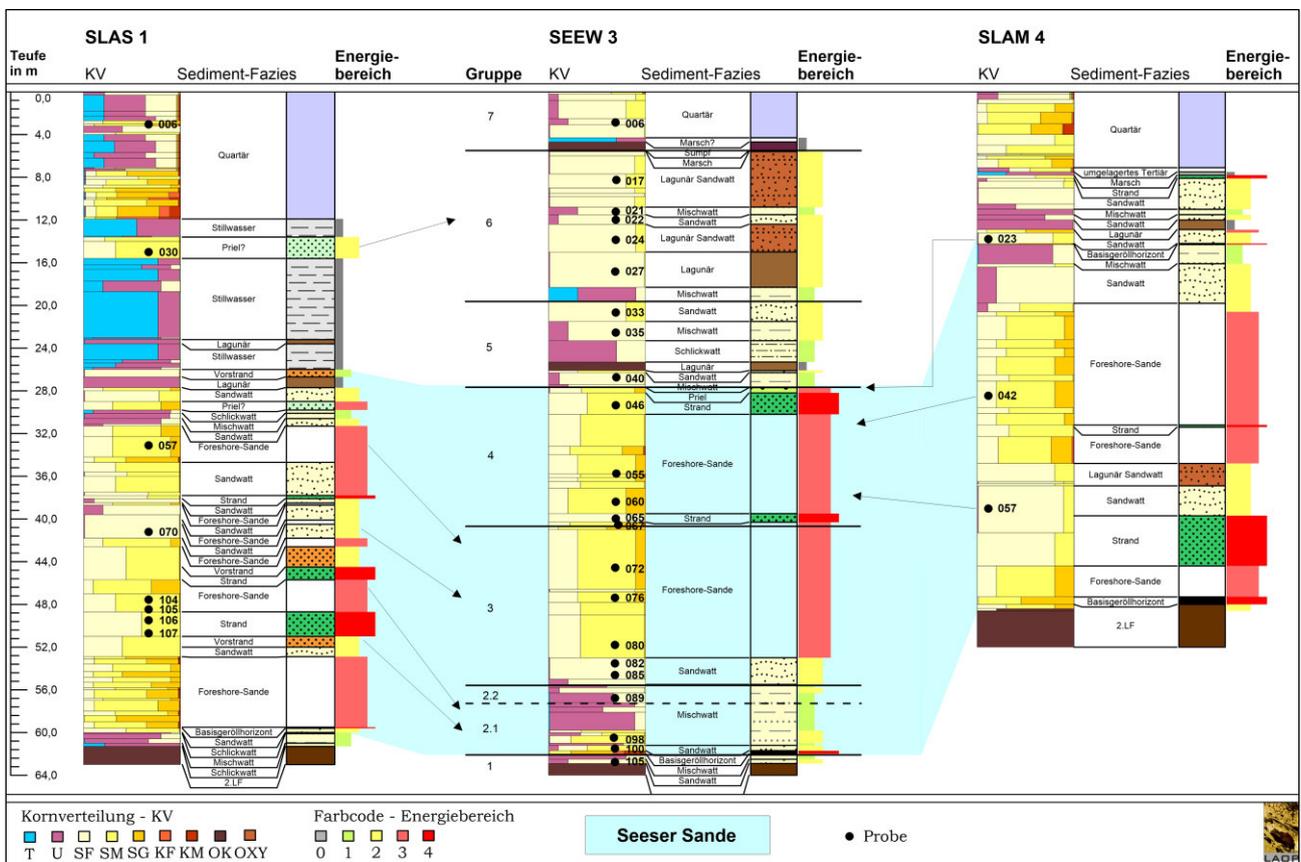


Abb. 8: Darstellung der untersuchten Bohrungen im Raum Seese/Schlabendorf, der untersuchten Proben, der Aufteilung der Gruppen und des Bereiches der Seeser Sande.

sind im Profil weit verbreitet und stammen vermutlich aus aufbereiteten, primären Sedimentgesteinen. Die Verteilung des mikrokristallinen Quarzes lässt die Schlussfolgerung zu, dass die gefundenen Flintstücke nicht unmittelbar in originärem Zusammenhang zur Seeser Geröllgemeinschaft stehen, sondern vielmehr über das gesamte Sedimentpaket hinweg geschüttet wurden.

Bei den Einschlüssen im Quarz wurden alle Körner gezählt, welche mindestens zwei gut diagnostizierbare Einschlüsse pro Klasse aufwiesen. Bei den sicher identifizierten Klassen handelte es sich um Rutilnadeln, Serizit, Zirkon, Turmalin und fibrolitischen Sillimanit. Weitere nicht präzise zuordenbare Einschlüsse waren farblose bis grünlich, säulige bis nadelige Einschlüsse. Diese sind nicht eindeutig identifiziert, es wird aber davon ausgegangen, dass ein Großteil davon leere Hohlformen ehemaliger Kristalle darstellen, sog. tubes (HYRSL & NIEDERMAYR 2003). Die bräunlich prismatischen bis rundlichen Einschlüsse sind vermutlich weitere Ti-Oxide. Bei den transparenten Einschlüssen mit grauen Interferenzfarben handelt es sich entweder um Minerale wie Apatit, Feldspatphasen oder Flüssigkeitseinschlüsse ohne Gasphase. In der Klasse „mehrere diverse“ wurden Körner mit einer Vielzahl verschiedener Einschlüsse (ab ca. 5 in Summe) gezählt. Sehr blasenreiche Quarze mit Luft- bzw. Flüssigkeitsblasen im µm-Bereich wurden ebenfalls ausgehalten. Beschrieben werden die blasigen Erscheinungen als magmatische Niedertemperaturbildungen, zumeist aus dem hydrothermalen Bereich (Gangquarze). Abb. 11 zeigt die relativen Anteile der ausgezählten Einschlüsse. Es kann festgestellt werden, dass die Verteilung der Einschlüsse sowohl von der Stratigraphie als auch der Korngröße abhängig ist. Somit wird beispielsweise der Anstieg der Quarze mit Rutilnadeln in der Fraktion 200-400 µm im Besonderen der Lieferkorngröße zugeschrieben. Die Verteilungsgrenzen der Anteile der zwei Kornfraktionen sind sehr ähnlich und bewegen sich zwischen 2 und 5 %.

4.1. Beschreibung der Gerölllagen

Es wurden Proben der drei Bohrungen SLAS1, SEEW3 und SLAM4 untersucht, welche zum einen die basale Gerölllage der Seeser Sande beinhalten. Zum anderen wurde eine Gerölllage in der SLAM4 (Probe-024) im Niveau der oberen Seeser Sande-Abfolge analysiert. In den Gerölllagen wurden alle Sedimentanteile in folgenden Fraktionen quantitativ untersucht: 1-2 mm, 2-4 mm, 4-6,3 mm und > 6,3 mm. Dabei ergeben sich die analysierten Anteile an der jeweiligen Gesamtprobe wie folgt: SLAS1-120 36,7 %; SEEW3-101 62,0 %; SEEW3-102 56,3 %; SLAM4-024 18,4 % und SLAM4-068 10,4 %. Zusätzlich wurden die Fraktionen > 2 mm, aller weiteren in Untersuchung befindlichen Proben, qualitativ untersucht. Im Fokus dieser Untersuchungen standen hier die Nichtquarze, im Besonderen Gesteinsanteile und biogene Silifikate.

Die Basis der Gesamtanzahl der analysierten Sedimentkörner liegt in der Fraktion 1-2 mm am höchsten mit ca. 25.000 Körnern und in der Fraktion > 6,3 mm des Basiskonglomerats der SEEW3 immer noch bei > 150 Körnern.

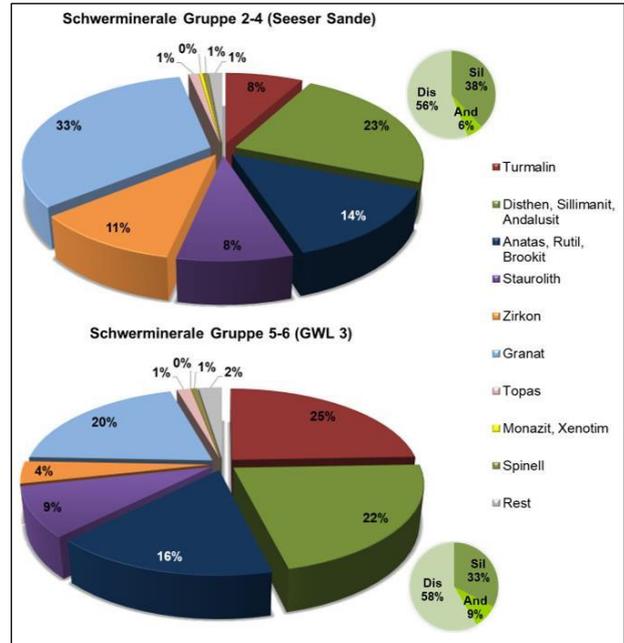


Abb. 9: Durchschnittliche prozentuale Verteilung der Schwerminerale, Bohrung SEEW3, Kornfraktion 100-200 µm.

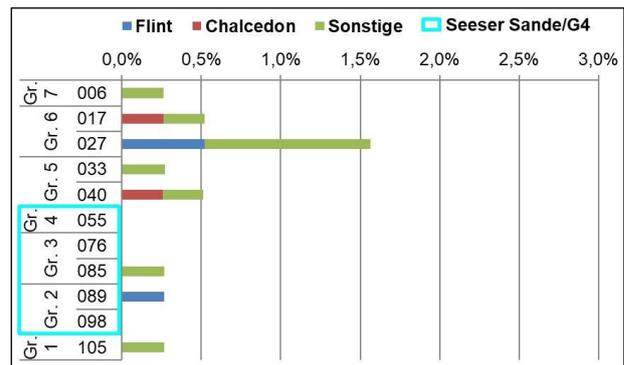


Abb. 10: Absolutverteilung der mikrokristallinen Quarzkörner in Korn%, Bohrung SEEW3, Kornfraktion 100-200 µm.

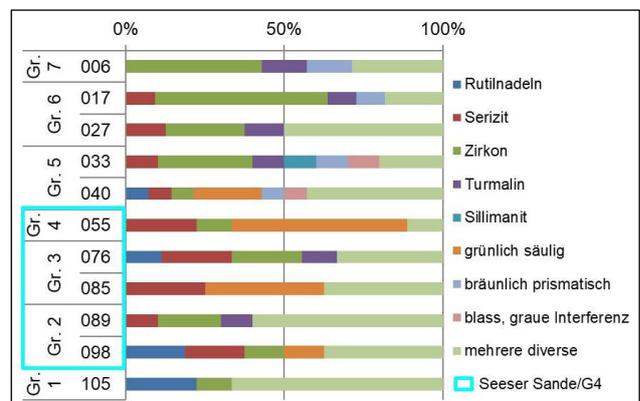


Abb. 11: Relativverteilung der mineralischen Einschlüsse im Quarz, Bohrung SEEW3, Kornfraktion 100-200 µm.

Bei der Methodik werden alle normalen (klaren, transparenten) Quarze am Stereomakroskop ausgeschleust und nur besondere Quarze oder Nichtquarze klassifiziert. Da die Proben unterschiedliche Kornspektren besitzen, sind die Ergebnisse der Analysen nur relativ vergleichbar. Die besonderen ausgezählten Quarze bilden den Großteil der

gesamten ausgezählten Körner (85-95 %). Wenn man die Quarzvarietäten relativ betrachtet (z. B. in der Vergleichsfraktion 1-2 mm), erkennt man über alle Proben eine ähnliche Verteilung (Abb. 12). Zu den Nichtquarzen wurden alle Lithoklasten und Silifikate (Biogenmaterial und Flint) gezählt. Im Spektrum der Basisgeröllhorizonte wurden

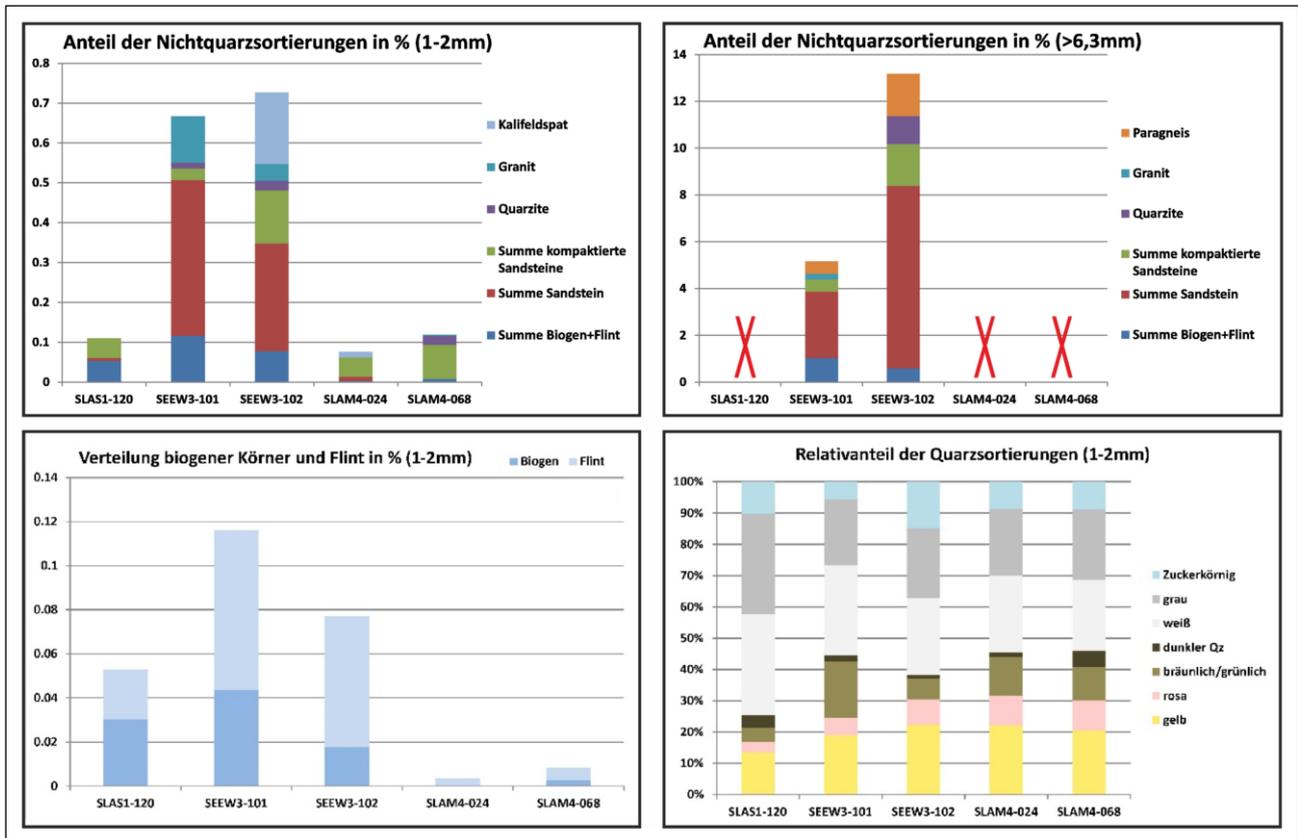


Abb. 12: Verteilung der Anteile der Geröllanalyse. **Oben:** Anteile der Nichtquarzsorierungen in Korn% der Fraktionen 1-2 mm und > 6,3 mm. **Unten links:** Anteile der silifizierten biogenen Körner an der Vergleichskorngröße 1-2 mm. **Unten rechts:** Relativanteil der ausgelesenen Quarze an der Vergleichskorngröße 1-2 mm.

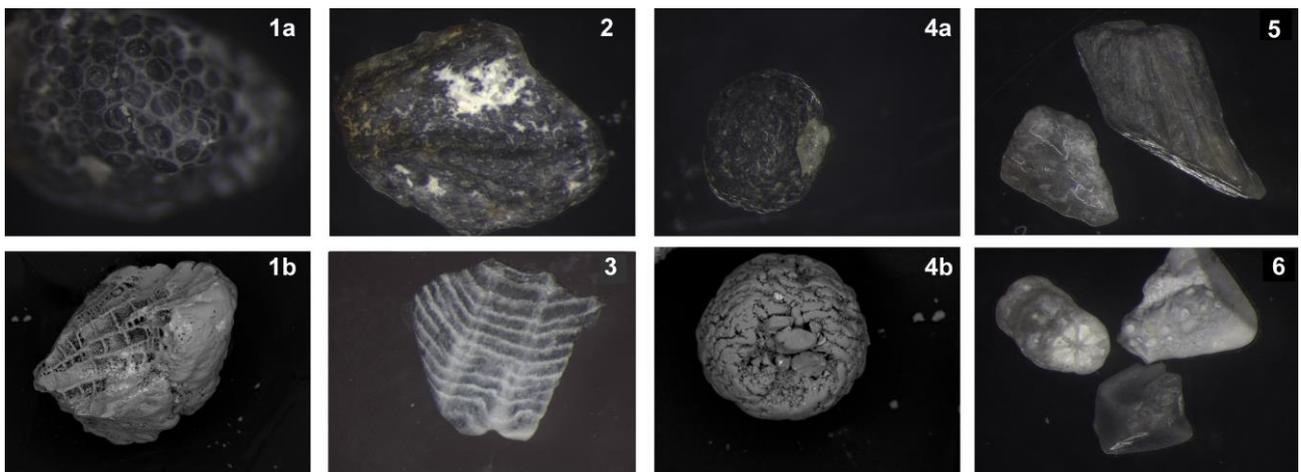


Abb. 13: Ausgelesene biogene Körner **1:** Silifiziertes Korallenbruchstück a) Oberfläche unter Stereomikroskop b) seitliche Bruchfläche unter SEM (SLAS1-120 1-2 mm). **2:** Silifikat einer vermutlichen Fischechuppe (SLAS1-120 1-2 mm). **3:** Bivalven-Bruchstück (SEEW3-101 1-2 mm). **4:** Silifikat eines kugeligen Aggregates, primär kalkiger Ooid? a) Stereomakroskop b) SEM (SLAS1-120 1-2 mm). **5:** Steinkerne der Solitärkoralle *Parasmilia* sp. (SEEW3-101 1-2 mm). **6:** Mesozoischer Flint, Bryozoen-Flint und vermutliches Echinoidenfragment (SLAM4-068 1-2 mm).

relativ unreife, kaolinitisch gebundene Fein- und Mittelsandsteine neben kompaktierten Sandsteinen mit silikatisch gefüllten Klüften beobachtet. Als metamorphe Relikte traten Quarzite und im groben Material der SEEW3, auch Paragneise auf. Magmatische Relikte konnten in den größeren Fraktionen als Granit-Klasten und in den kleineren Fraktionen als Feldspat/Quarz-Verwachsungen analysiert werden.

Die Lithoklasten zeigen somit neben transportstabilen Geröllen (Quarzite, Paragneise, silifizierte Sandsteine) auch weniger stabile Anteile (Granite, kaolinitische Sandsteine) potenziell näherer Liefergebiete. Auch das Auftreten von Kristallinmaterial und Graniten im Spektrum ist ein Novum, welches die bisherigen Untersuchungen nicht zeigten.

Das silifizierte Material besteht bis zu 30 % aus biogenen Bruchstücken (Abb. 13). Dabei handelt es sich einerseits um dunkle, vermutlich paläozoische Anteile aus Korallenbruchstücken, Bivalvenresten und einer vermuteten „Fischschuppe“. Zudem konnten mesozoische Bruchstücke wie Bryozoenreste, die Einzelkoralle *Parasmilia* sp. und Echinoidenresten beobachtet werden. Sämtliche als paläozoisch eingestuft Anteile waren nur in den Proben des Basiskonglomerates zu finden. Mesozoische Anteile traten dagegen auch in den stratigraphisch höheren Niveaus auf. Der Flintanteil ist typisch für kreidezeitliche Ablagerungen und teilweise von einer weißen Rinde umgeben.

Im Liegenden der Gerölllage traten in der Bohrung SEEW3 geringmächtige Feinsande auf. Sedimentpetrographisch wurden diese der Gruppe 1 (Abb 8) zugeordnet. Im Unterschied zu den Gruppen der Seeser Sande (2.1, 2.2, 3 und 4) weist das SM-Spektrum (100-200 µm) hier deutlich höhere Turmalin- sowie Monazit- und geringe Granat-Anteile auf. Außerdem ist hauptsächlich fibrolitischer Sillimanit enthalten, wohingegen in den anderen Gruppen die prismatische Varietät als häufigste Form oder gleichhäufig auftritt. Im Gegensatz zu den Seeser Sanden ist hier kaum Disthen, jedoch mehr Andalusit vorhanden. Der Rundungsgrad der Quarze zeigt sich etwas niedriger und der Anteil der polykristallinen Quarze ist erhöht. Die Gruppe 1 repräsentiert somit die Überreste eines ersten Schüttungszyklus.

Die in den Bohrungen aufgeschlossenen Geröllhorizonte sind zwar eher geringmächtig, zusammenfassend kann dennoch ihr Inhalt dem momentanen Wissensstand folgende Indizien hinzufügen:

- Nur die Basisgerölllagen beinhalten paläozoische Silifikate.
- Neben transportstabilen Geröllen einer Fernkomponente sind auch instabile Gerölle einer Nahkomponente enthalten.
- Die Basisgerölllagen enthalten neben Sedimentiten auch Gneis und Granit.
- Mesozoische Silifikate finden sich auch in den stratigraphisch höheren Niveaus.
- Die Zusammensetzung der Quarzvarietäten in den kleineren Kornfraktionen unterscheidet sich nur geringfügig und ist eher typisch für die Ablagerungen der Seeser Sande.

Aufgrund dieser Punkte ist aus Sicht der Autoren der, durch AHRENS & LOTSCH (1976) definierte, Begriff der „Seeser Geröllgemeinschaft“ anzupassen und aus Provenienz-Sicht nicht mit dem Ablagerungspaket der Seeser Sande gleichzusetzen. Vielmehr wird in den Basisgerölllagen eine Residualbildung einer transgressiven Phase (LUDWIG 2015) der unteren Greifenhain-Subformation gesehen. Dabei können wir aber weder auf die Transportbedingungen, noch auf die Herkunft der vermuteten Fernkomponente (paläozoische Biogena, Paragneis, Quarzite) schließen, da diese Geröllanteile vermutlich mehrfach umgelagert wurden. Die Nahkomponente (Granite, kaolinitische Sandsteine) stammt vermutlich von den südlich angrenzenden Liefergebieten: Lausitzer Block, Elbe-Lineament. Der Ablagerungszeitraum kann dennoch nach dem 2. MFK und vor der Ablagerung der Seeser Sande postuliert werden.

Die über der Basisgerölllage befindlichen, schrägschichteten Mittelsande bringen nur die Energie mit, nicht aber das Material der Seeser Geröllgemeinschaft, und sind daher losgelöst von der Basisgerölllage zu betrachten.

5. Sedimentologie und -petrographie von Vergleichsproben aus Welzow-Süd und Nochten

Um den Raum Seese mit Welzow vergleichen zu können, wurden im Tagebau Welzow-Süd (WS) zur Kartierung und Schlitzprobenahme zwei Profilschnitte jeweils im Brückenhochschnitt (BHS) und Brückentiefschnitt (BTS) angelegt. Profil 1 lag im BHS bei Station 7,5 und im BTS bei Station 11,0. Profil 2 (BHS+BTS) lag bei Station 32,0 und wurde zur weiteren Untersuchung ausgewählt.

Die betrachteten Profile beginnen im Liegenden (Lgd) über dem 2. Lausitzer Flözkomplex mit dem Hangend-Schluff, welcher durch eine relativ energiearme, tidal geprägte Mischwattsedimentation geprägt ist (Abb. 14). Im Übergang von Hangend-Schluff zu den G4-Sanden lagerten sich zunächst Mittelsande als Bildung eines Transgressionshorizontes (Transgression 1) ab. Diese gehen dann in schluffige Feinsande über. Die darüber folgenden G4-Sande sind durch teils mittelsandige Feinsande mit flasriger Schichtung sowie mit kleineren Rinnen mit aufgearbeiteten kohligen/xylitischen Resten und Schluffklasten charakterisiert. Biogene Spuren sind in geringer Anzahl in Profil 2 vertreten und nur als Fluchtspuren ausgebildet. Dies deutet auf eine relativ schnelle Sedimentation dieses Profilschnittes hin. Im weiteren Verlauf der Profile schalten sich gröbere, schrägschichtete Rinnen in die Abfolge ein. Im unteren und mittleren Teil des GWL 4 sind SE (Profil 1) und SW (Profil 2) gerichtete Paläoströmungen vorherrschend. Diese Konstanz in der Sedimentationsrichtung wird einem mikrotidalen „flood tidal delta“ mit +/- südlicher Schüttungsrichtung zugeschrieben. Im höheren GWL 4 kommt es dann zu einer Umkehr der Strömungsrichtung nach NW (Profil 1) bzw. E (Profil 2). Dabei kündigt sich ein regressiver Trend mit einer Ausräumung und Umlagerung der Sedimente an.

Der Übergang zur regressiven Oberbegleiterentwicklung ist von Wattsedimenten geprägt. Bei der Annahme der offenen Meeresbereiche in nördlicher Richtung, sind die südlich geschütteten Ablagerungen nur durch einen Wechsel von tiden- zu wellengeprägter Sedimentation zu erklären. Die Möglichkeit vorgelagerter Barriereinseln bedingt dabei im rückwärtigen Sedimentationsraum die Bildung von südwärts gerichteten Schüttungen sog. „flood tidal deltas“. Diese bestehen primär aus dem Material des Küstenlängstransportes. Die im Rückraum abgelagerten Sedimente können natürlich auch lateral verfrachtet werden. Die regressiv Entwicklung erreicht in der Bildung des Oberbegleiters 2 zunächst ihren Höhepunkt. Der Oberbegleiter 2 ist im Profil 1 als uneben bis linsig geschichteter Schluff ausgebildet, mit hellen Grobschlufflagen kleiner 1 mm und vereinzelt Pflanzenhäcksel. In Profil 2 tritt im Hangenden (Hgd) dieses Schluffs noch ein hellbrauner Ton mit Wurzel und Xylitresten auf, gefolgt von ca. 10 cm ungeschichteter Kohle. Auf diese lagunären Stillwasserbereiche folgt eine höherenergetische Sandwatt-Entwicklung (GWL 330) mit teils bioturbaten Feinsanden, welche wiederum aufgearbeitete Kohle-, Xylit- und Schluffklasten beinhalten. Teilweise sind trogförmige Schrägschichtungen, Strömungsrippel und Klasten in Dachziegelstruktur zu beobachten. Es treten aber auch planar schräggeschichtete, und ungeschichtete Feinsandpakete auf. Auch sind hier

zahlreiche Spurenfossilien zu finden. Im Übergang zum Oberbegleiter 1 tritt eine Schicht mit reichlich Skolithos-Spuren auf. Innerhalb des regressiven Oberbegleiterkomplexes scheint diese Abfolge eine transgressive Zwischenphase zu sein, welche von NW-(Profil 1) bzw. NE-(Profil 2) gerichteten Strömungen geprägt ist. Im Bereich des Oberbegleiters 1 sind wiederum geschichtete kohlige Schluffe zu finden. Der feinsandige GWL 320, welcher im Zuge der Ablagerung des Oberbegleiter 1 sedimentiert wird, ist lediglich in Profil 1 geringmächtig ausgebildet. Im Hangenden des Oberbegleiters kommt es zu einer weiteren transgressiven Phase (Transgression 2). Hierbei handelt es sich um die untersten Ablagerungen des GWL 310. Sie beinhaltet glaukonitische Sande sowie abgerundete Schluff-Brocken, Kohle und Xylitreste. Die weitere Entwicklung des GWL 310 ist verstärkt mesotidalen Verhältnissen mit Misch- bis Sandwattfazies zugeschrieben und enthält teils stark bioturbate Horizonte. Dabei treten in Profil 1 niedrigerenergetische Mischwatttypen neben Sandwattablagerungen auf. Profil 2 ist hingegen stärker sandwattgeprägt. Eine besonders reiche Spurenfossilgemeinschaft ist in Profil 1 in den ersten zwei Metern über dem tonigen Schluff (Äquivalent Ton-Hosena) anzutreffen. Die jetzt in beiden Profilen nordwärts ausgerichteten Paläoströmungsanzeiger weisen auf die verstärkt südliche Herkunft der Schüttungsanteile.

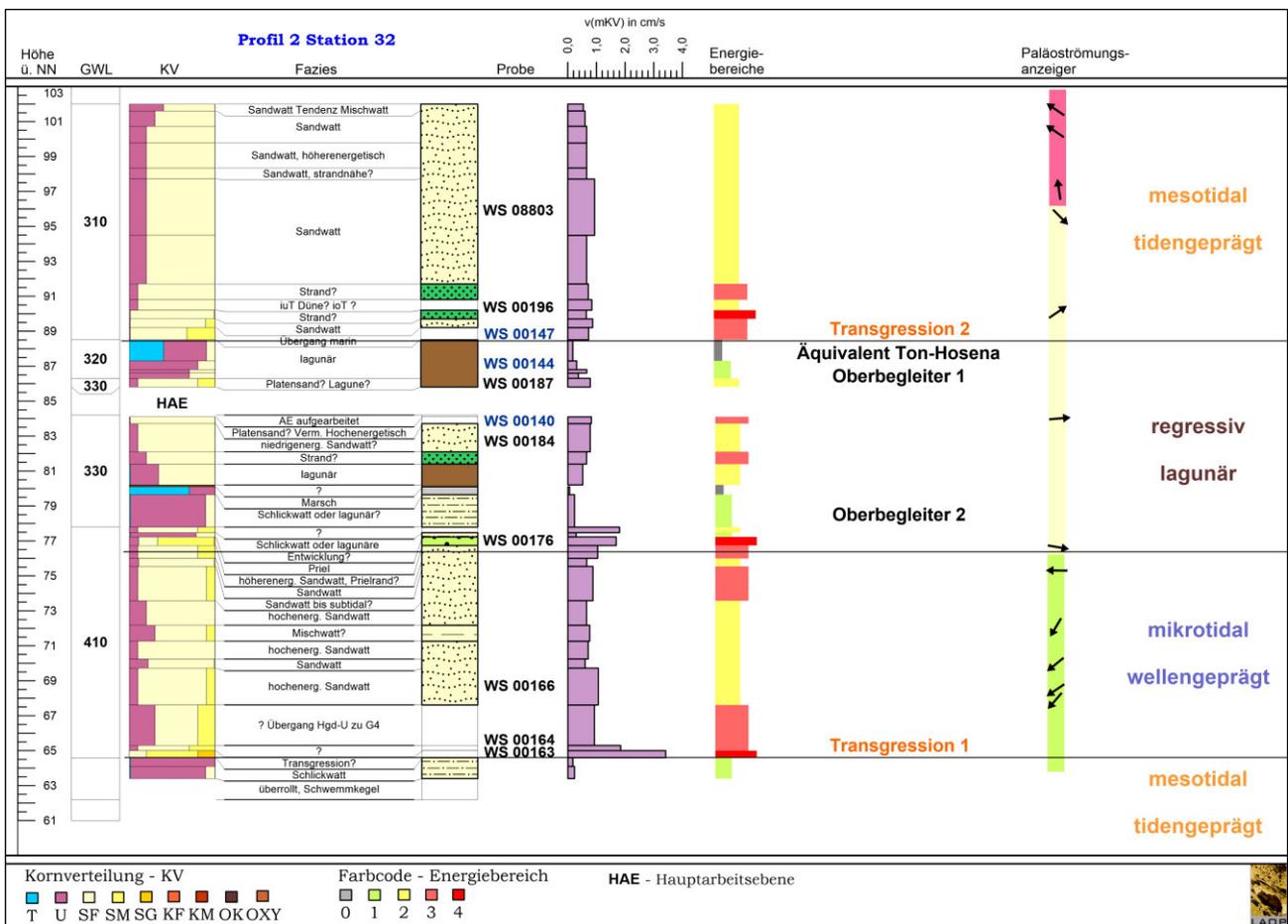


Abb. 14: Zusammenfassende Sedimentationsbereiche und abgeleitete Abschnitte küstendynamischer Prozesse im Raum Welzow-Süd.

Die Sande der Transgression 1 sind durch die Proben WS-00163 und WS-00164 repräsentiert. Die Proben WS-00166 und WS-00176 bilden den Bereich des GWL 410 ab. Beide Proben unterscheiden sich von den vorangegangenen Ablagerungen kaum. Das Material der Sedimente kann hier als vergleichbar gelten und wird daher als G4 zusammengefasst dargestellt. Die SM-Fraktion (Vergleichskornfraktion weiterhin 100-200 µm) zeichnet sich durch je 25 % Granat und Aluminiumsilikate aus, wobei letztere von Disthen, gefolgt von Sillimanit, dominiert werden und nur einen geringen Andalusitanteil aufweisen. Weiterhin sind Titanoxide mit 16 %, Zirkon mit 14 %, Turmalin mit 11 % und Staurolith mit 7 % vertreten (Abb. 15). Bei der Quarzrundung beträgt das Verhältnis angerundeter / gerundeter zu subangularen / angularen Körnern 40:60. Die Anlösungserscheinungen sind gering. Die Einschlüsse im Quarz zeigen im Wesentlichen ein sehr einheitliches Bild mit hauptsächlich Rutilnadeln und zunehmend Serizit als Haupteinschlüsse (Abb. 16). Weiter sind kaum mikrokristalline Quarze enthalten, was typisch für den unteren Teil der Abfolge ist (Abb. 17). Der polykristalline Quarz ist dominiert von der metamorphen Varietät, welche im Mittel gut 60 % ausmacht. Der Feldspatanteil liegt im Schnitt bei 6,5 %, wobei das Verhältnis Orthoklas zu Mikroklin nahezu 50:50, bezogen auf Ma.-% an der Gesamtprobe, ist. Aus dem nachfolgenden GWL 330 stammen die Proben WS-00184, WS-00187 und WS-00140. Die Proben sind uneinheitlicher als der G4, beinhalten im SM-Anteil jedoch generell mehr Turmalin. Die Schüttungen setzen sich aus dem Material des unteren Bereichs und Anteilen davon abweichender Sedimente zusammen. Die Anteile letzterer nehmen zum Hangenden zu, wobei in Probe WS-00187 z. B. nur Orthoklas als Feldspatvarietät nachgewiesen werden konnte und auch die Anzahl der Einschlüsse im Quarz sich leicht erhöht. Die Kornform der Quarze ist innerhalb der drei Proben hingegen sehr ähnlich und auch der niedrige mikrokristalline Quarzanteil unterscheidet sich kaum. Probe WS-00144 repräsentiert den GWL 320 und Proben WS-00147 die untersten Ablagerungen des GWL 310 (Transgression 2). Beide Proben werden genetisch zusammen betrachtet, da sie vom Ausgangsmaterial vergleichbar scheinen. Relativ wenig stabile Schwerminerale und ein relativ hoher Feldspatanteil (mit überwiegend Orthoklaskomponente) weisen auf kompositionell unreife Sedimente mit kurzem Transportweg hin. Das Material unterscheidet sich zudem durch einen hohen Anteil an mikrokristallinem Quarz und nur wenigen mineralischen Einschlüssen in den Quarzen (hier fast nur Serizit). Die Probe WS-00147 fällt durch einen sehr niedrigen Rundungskoeffizienten und durch die stärkeren Anlösungserscheinungen der Quarzkörner auf. Der hohe Glaukonitanteil kann auf einen starken Fe-haltigen Eintrag der Oberbegleiterentwicklung in das marine System hinweisen. Die weiteren, hier aufgeschlossenen Ablagerungen des GWL 310 sind durch die Proben WS-00196 und WS-08803 vertreten. Der SM-Anteil ist durch einen weiter steigenden Turmalinanteil und weniger Granat geprägt. Ein geringerer Anteil der AlSiO₅-Hochdruckvarietät Disthen ist ebenso zu ver-

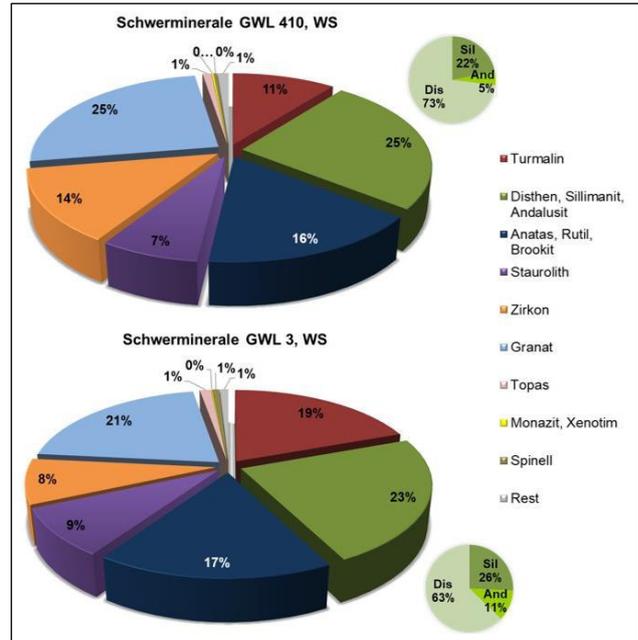


Abb. 15: Durchschnittliche prozentuale Verteilung der Schwerminerale, Vergleichsprofil Welzow-Süd, Kornfraktion 100-200 µm.

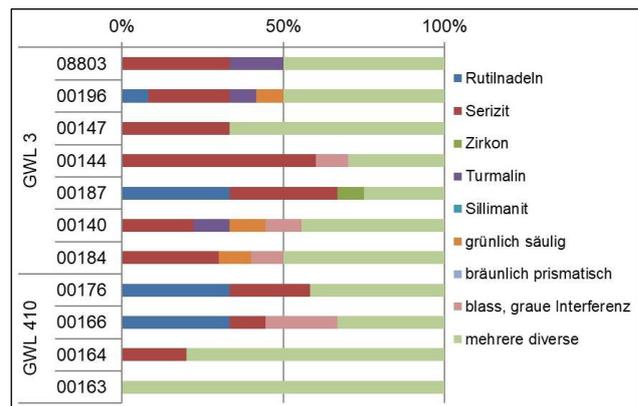


Abb. 16: Relativverteilung der mineralischen Einschlüsse im Quarz, Vergleichsprofil Welzow-Süd, Kornfraktion 100-200 µm.

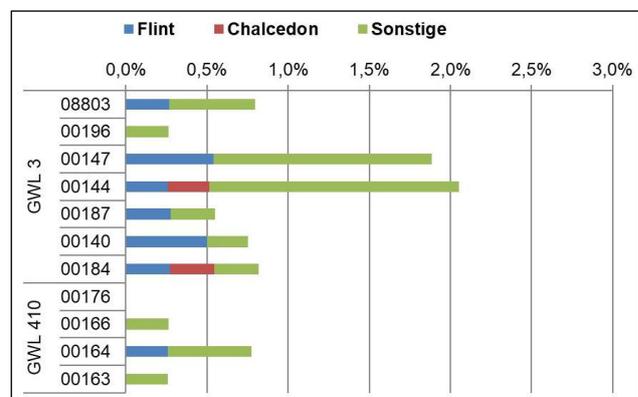


Abb. 17: Absolutverteilung der mikrokristallinen Quarzkörner in Korn%, Vergleichsprofil Welzow-Süd, Kornfraktion 100-200 µm.

zeichnen. In diesem Bereich steigen auch wieder die Anzahl und die Vielfalt der mineralischen Einschlüsse in den Quarzen. Zurück geht der Anteil mikrokristalliner Quarze. Generell nimmt der Reifegrad sukzessive zu, belegt in einem sinkendem Feldspatgehalt und einem steigenden, relativen Mikroklinanteil. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erlangen, wurden die Ergebnisse der verschiedenen G3-Sande zusammengefasst. In Abb. 15 ist die SM-Fraktion dargestellt. Gegenüber den G4-Sanden stehen die höheren Turmalin- (19 %) und niedrigeren Zirkongehalte (8 %) heraus. Auch der Granatanteil geht leicht zurück (21 %). Der Anteil an Feldspat beträgt im Schnitt 7,4 %, wobei das Verhältnis Orthoklas zu Mikroklin innerhalb der G3-Sande stark schwankt. Generell ist mehr mikrokristalliner Quarz enthalten, als in den G4-Sanden. Der polykristalline Quarzanteil zeigt in seiner Zusammensetzung große Schwankungen, erreicht im Mittel aber eine ähnliche Verteilung, wie die G4-Sande. Das Verhältnis zwischen angerundeten / gerundeten zu subangularen / angularen Quarzen beträgt 30:70. Die Quarze zeigen kaum Anlösungserscheinungen.

Um einen Vergleich mit Nochten (NO) zu ermöglichen, erfolgte bisher keine systematische Probenahme und Analyse. Jedoch kann auf wenige Daten / Proben anderer Projekte zurückgegriffen werden. Bei den Proben handelt es sich um eine Bohrungsprobe aus dem GWL 44 und um Punktproben aus dem GWL 4341. Letztere können von der stratigraphischen Zuordnung mit den Proben des GWL 410 aus WS verglichen werden. Weiter gibt es Punktproben aus dem GWL 310 (in NO stratigraphisch zu den Klettwitz-Sfm. gehörend!) bzw. unteren Bereich des GWL 2, welche stratigraphisch über den GWL 310-Proben aus WS (GWL 310 in WS zu den Nochten-Sfm. gehörend!) einzuordnen sind. Eine genaue Einordnung der Teufe ist bei den Punktproben nicht möglich (vgl. Beispielprofil Abb. 18). Daher dienen sie nur als Anhaltspunkte und die nachfolgende Auswertung ist somit unter Vorbehalt zu verstehen und nicht im gleichen Umfang belastbar wie jene aus dem Raum Seese und Welzow-Süd.

Bei Probe NO401 des GWL 44 handelt es sich um einen Feinsand, der sich in der Vergleichsfraktion 100-200 µm aus 91,7 % Quarz und 5,6 % Kalifeldspat zusammensetzt. Bei den Schwermineralen dominieren die Aluminiumsilikate mit rund 23 %, gefolgt von den Titanoxiden (20 %), Granat (19 %) und Turmalin (18 %) (Abb. 19). Zirkon ist mit 8 % vertreten. Damit unterscheiden sich die Sande des G 44 in ihrer Schwermineralzusammensetzung von den übrigen GWL 4-Sanden. Eine isochrone Entstehung mit Probe 105 aus Bohrung SEEW3 liegt nahe, da auch diese zu den darüber liegenden Sedimenten deutliche Unterschiede aufweist. Die drei Proben des GWL 4341 (im Folgenden GWL 4) sind ebenfalls Feinsande, wobei NO404 eine starke Mittelsandkomponente beinhaltet. Kornfraktion 100-200 µm besteht hier zu rund 95 % aus Quarz und zu 3,5 % aus Kalifeldspat, wobei letzterer eine hohe Orthoklas-komponente (im Mittel 75 %) aufweist. Beim SM-Spektrum dominiert Turmalin mit 35 %. Die Aluminium-

silikate und Titanoxide sind mit je 16 % und Granat mit 14 % vertreten. Zirkon weist lediglich 4 % auf. Mikrokristalliner Quarz tritt sporadisch, mit Anteilen nahe der Nachweisgrenze, auf (Abb. 20). Der polykristalline Quarz ist dominiert von der metamorphen Varietät. Bei den Einschlüssen im Quarz gibt es zwischen den Proben große Unterschiede, wobei der Inhalt u.a. durch Turmalin, Zirkon und Sillimanit geprägt ist (Abb. 21). Die Quarzrundung zeigt ein Verhältnis der angerundeten / gerundeten zu subangularen / angularen Körnern von 27:73. Die Proben des GWL 3 bzw. 2 bestehen in Kornfraktion 100-200 µm im Schnitt aus 91 % Quarz und 6,5 % Kalifeldspat, wobei letzterer vom Liegenden zum Hangenden zunimmt. Bei den Feldspäten fehlt Orthoklas, dafür ist in Probe NO301 Plagioklas enthalten. Das Schwermineralspektrum zeigt wieder hohe Turmalingehalte von rund 36 %. Hier tritt jedoch auch ein ebenfalls großer Anteil an Aluminiumsilikaten (29 %) auf. Dabei steigen die Gehalte von Sillimanit

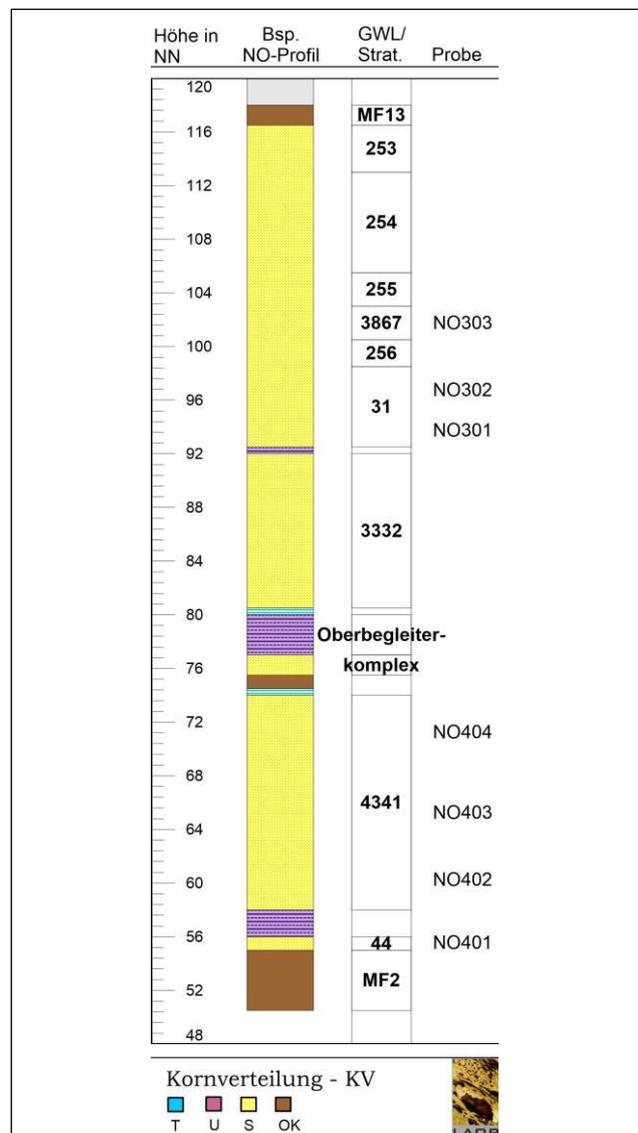


Abb. 18: Darstellung eines Standardprofils im Raum Nochten und der betrachteten Proben.

und Andalusit an, während der Disthengehalt abnimmt (Abb. 19). Die Sillimanitgehalte erreichen hier wieder das Niveau der G 44-Sande. Der Anteil von Granat sinkt im Vergleich zu den Proben des GWL 4 auf im Mittel 5 %, wobei eine Abnahme zum Hangenden hin angedeutet ist. Zirkon liegt bei durchschnittlich 7 %. Auch hier tritt mikrokristalliner Quarz nur sporadisch auf und es dominiert bei den polykristallinen Quarzen die metamorphe Variante. Die Einschlüsse im Quarz sind mit denen des GWL 4 vergleichbar.

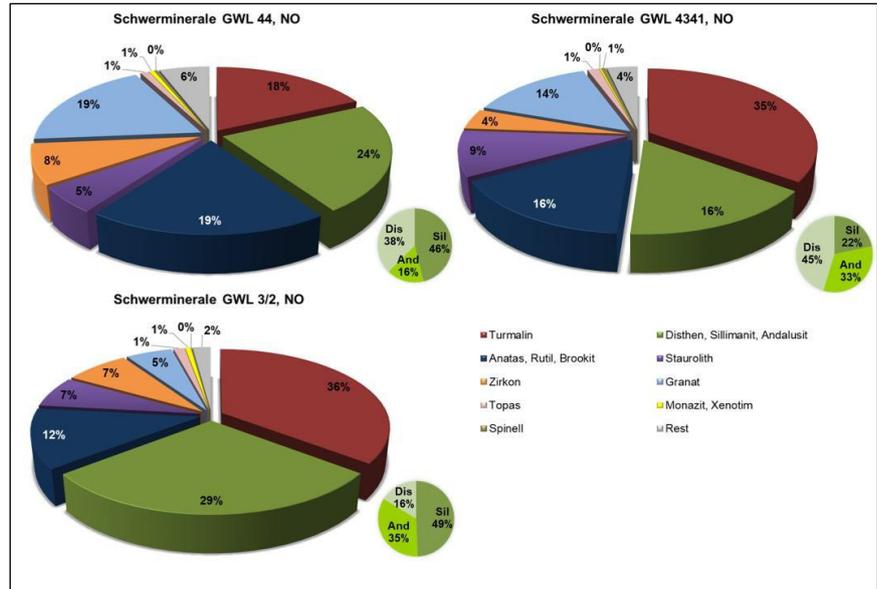


Abb. 19: Durchschnittliche prozentuale Verteilung der Schwerminerale, Proben Nochten, Kornfraktion 100-200 µm.

6. Sedimentologischer und -petrographischer Vergleich Seese – Welzow-Süd – Nochten

Nachfolgend sollen die Ablagerungen des GWL 43 bis 41, das Sedimentpaket begrenzt durch Hangendschluff und Unterbank Oberbegleiter, und die Sedimente des GWL 3, Sande des Oberbegleiter-Komplexes und oberhalb des Spezialtons Heide (bzw. seiner Äquivalente; vgl. LANGE & SUHR in diesem Heft), jeweils regional und zusammenfassend verglichen werden. Dabei nimmt der Raum Seese/Schlabendorf den dem offenen Meer am nächsten befindlichen Ablagerungsort ein. Eine Zwischenstellung wird dem Raum Welzow zugeschrieben und der Raum Nochten weist auf einen zur offenen Meeresküste entfernteren Ort hin.

6.1. GWL 43 bis 41

6.1.1. Sedimentologie

Das Paket der Seeser Sande besteht aus schräggeschichteten Mittelsanden und mittelsandigen Feinsanden. Der GWL 4 im Raum Welzow besteht aus mittelsandigen Feinsanden (Abb. 22). Die Ablagerungsenergien waren im Raum Seese über große Teile des Sedimentpaketes hoch und werden Foreshore-Ablagerungen (sub- bis intertidal) bzw. On-Shore-Ablagerungen (supratidal) zugeschrieben. Das Paket im Raum Welzow erfuhr geringere Energien und wird als Sandwatt (mit Mischwatteinschaltungen) des Sub- bis Intertidalbereichs dargestellt. Die Feinsande im Raum Nochten werden von SCHELLENBERGER (2011) als Watablagerungen mit zeitweise trockenfallendem Meeresboden und mit Anzeichen für einen geschützten Ablagerungsraum (z. B. Lagune) beschrieben. Zu den Paläoströmungsrichtungen liegen uns für den Raum Seese keine Daten vor, da die Bohrungen nicht orientiert abgeteuft wurden. Literaturangaben sind uns dazu nicht bekannt. Im Raum

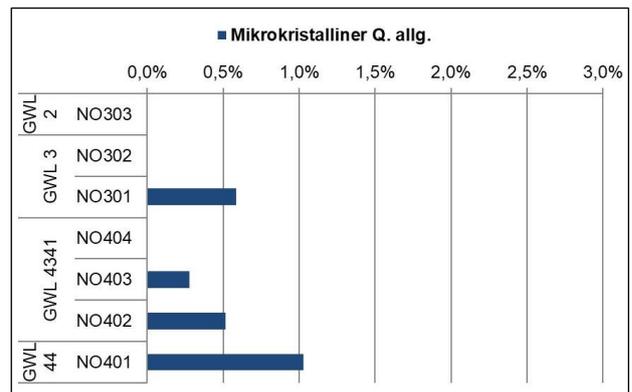


Abb. 20: Absolutverteilung der mikrokristallinen Quarzkörner in Korn%, Proben Nochten, Kornfraktion 100-200 µm.

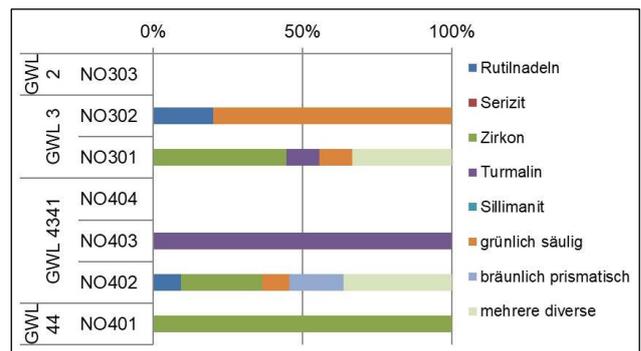


Abb. 21: Relativverteilung der mineralischen Einschlüsse im Quarz, Proben Nochten, Kornfraktion 100-200 µm.

Welzow wurden bei der Kartierung im GWL 43 bis 41 Paläoströmungen in Richtung SE bis SW ermittelt. Im oberen Bereich kehrt sich die Richtung um 180° und leitet somit eine neue Phase der Sedimentation ein. SCHELLENBERGER (2011, S. 64) beschreibt für den Tagebau Welzow-Süd ebenfalls eine Hauptströmung aus NNE. Für den Tagebau

Nochten beschreibt sie eine Hauptströmungsrichtung der Gezeiten – WNW. Weitere Angaben zu Paläoströmungsrichtungen liegen derzeit nicht vor.

6.1.2. Sedimentpetrographie

Die Sedimente der Seeser Sande weisen in der SEEW3-Bohrung die niedrigste kompositionelle Reife auf. Welzow-Süd nimmt eine Mittelstellung ein und Nochten hat im Vergleich die Ablagerung der höchsten kompositionellen Reife. Die strukturelle Reife beschreibt die Abrundung der Körner und ist ein Hinweis auf die mechanische Beeinflussung der Sedimente. Sie wird nachfolgend als ein Verhältnis der zwei „runden“ Gruppen (angerundet / gerundet) zu den zwei „eckigen“ Gruppen (subangular / angular) angegeben. Dabei sind im Allgemeinen die Mittelsande (200-400 µm) runder als die Feinsande (100-200 µm). In der Feinsandfraktion ändert sich das Verhältnis „runder“:„eckiger“ Körner vom hochenergetischen Meer in Seese (50:50), über den Bereich Welzow (40:60) bis in den distalen Bereich Nochten (27:73) kontinuierlich. Diesen Trend zeigen auch die Mittelsande, wobei zwischen Welzow und Nochten nur geringfügige Unterschiede zu verzeichnen sind. Somit zeigt sich eine sinkende strukturelle Reife vom Meer zum Festland. Die kompositionelle und die strukturelle Reife sind damit gegenläufig (Abb. 23). Dies ist ein Hinweis für das Koexistieren von Ablagerungen verschiedener Provenancen als auch verschiedener Aufarbeitungsintensitäten der Sedimente im Bereich der Lausitz im Zeitraum des GWL 43-41. Die weiteren morphologischen Charakteristika der Quarzkörner zeigen keine Unterschiede zwischen den Ablagerungsgebieten. Bei der Analyse der polykristallinen Quarzkörner ist festzustellen, dass die Summen der Körner in der Vergleichskorngröße (100-200 µm) von Seese nach Nochten von 3,0 auf 2,3 % abnehmen. Größere Körner werden durch höhere Energien stärker aufgearbeitet und somit finden sich in den energieärmeren Mittelsandanteilen (200-400 µm) in Welzow mehr polykristalline Körner (5,7 %) als im Raum Seese (4,8 %). Des Weiteren werden bei den polykristallinen Quarzen eher die Quarze mit geraden, gut ausgebildeten Korngrenzen (quarzitische Sandsteine bzw. spätmagmatische Quarze)

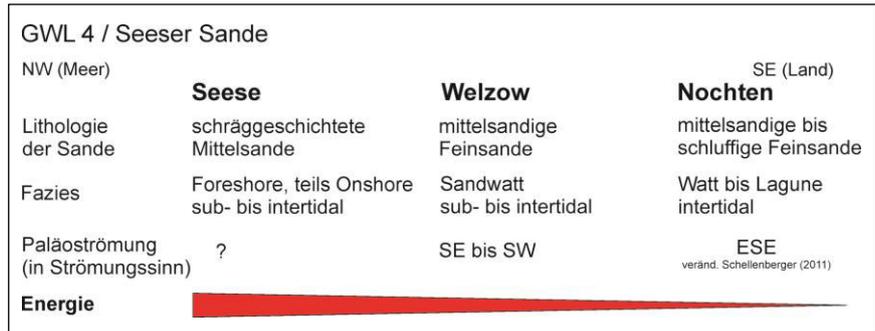


Abb. 22: Schematische Darstellung der wichtigsten Sedimentparameter des GWL 43 bis 41 im regionalen Vergleich.

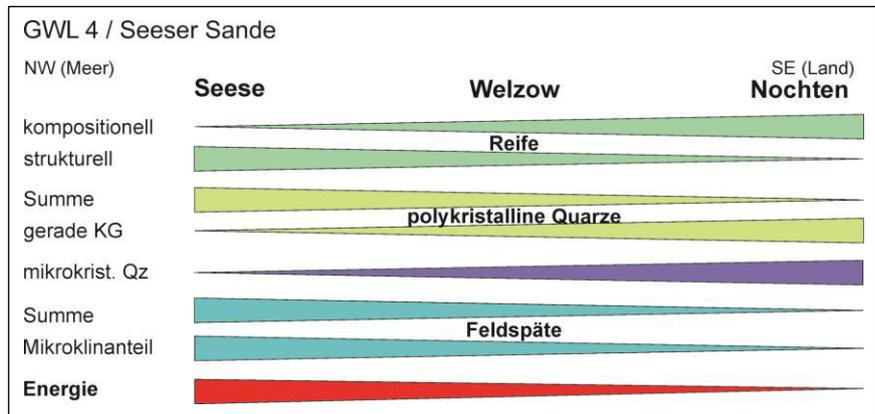


Abb. 23: Schematische Darstellung der wichtigsten petrographischen Parameter des GWL 43 bis 41 im regionalen Vergleich (KG-Korngrenzen, Qz-Quarz).

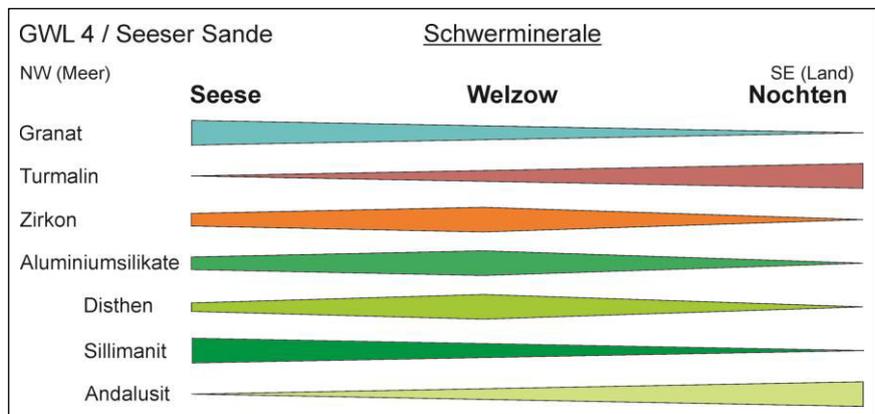


Abb. 24: Schematische Darstellung der wichtigsten Schwerminerale des GWL 43 bis 41 im regionalen Vergleich.

aufgearbeitet, als die metamorphen Quarze mit ungeraden Korngrenzen. Somit nehmen bei abnehmender Energie Richtung Südosten die Anteile der polykristallinen Quarze mit geraden Korngrenzen zu. Der Anteil der mikrokristallinen Quarze ist generell sehr gering und nimmt in der Vergleichskorngröße vom Meer Richtung Festland zu, von 0,1 % in Seese, über 0,3 % in Welzow bis 0,4 % im Raum Nochten. Bei der Analyse der Feldspäte sind zwei Varietäten der Kalifeldspäte dominant, deren Verhältnis Mikroklinateil:Orthoklas nachfolgend für die Gesamtprobe in Ma.-% angegeben wird. Im Raum Seese beträgt dies

aufgearbeitet, als die metamorphen Quarze mit ungeraden Korngrenzen. Somit nehmen bei abnehmender Energie Richtung Südosten die Anteile der polykristallinen Quarze mit geraden Korngrenzen zu. Der Anteil der mikrokristallinen Quarze ist generell sehr gering und nimmt in der Vergleichskorngröße vom Meer Richtung Festland zu, von 0,1 % in Seese, über 0,3 % in Welzow bis 0,4 % im Raum Nochten. Bei der Analyse der Feldspäte sind zwei Varietäten der Kalifeldspäte dominant, deren Verhältnis Mikroklinateil:Orthoklas nachfolgend für die Gesamtprobe in Ma.-% angegeben wird. Im Raum Seese beträgt dies

Verhältnis für die Seeser Sande 1:2, im Raum Welzow 1:4 und im Raum Nochten 1:10. Diese rapide Abnahme des Mikroklin Richtung Südosten gibt wiederum Hinweise für die Koexistenz von mindestens zwei Schüttungstypen in der Lausitz.

Bei den Schwermineralen im Raum Seese bildet der Granat die größte Gruppe. Seine Anteile nehmen nach Nochten über Welzow immer weiter ab. Turmalin zeigt ein genau entgegengesetztes Verhalten. Zirkon erreicht in Welzow-Süd die höchsten Werte, dicht gefolgt vom Raum Seese, während die Gehalte in Nochten deutlich niedriger liegen. Gleiches ist bei den Aluminiumsilikaten zu beobachten. Betrachtet man die Aluminiumsilikate genauer, so zeigt sich eine Zunahme an Disthen bei gleichzeitiger Abnahme von Sillimanit vom Raum Seese nach Welzow. In Nochten nehmen sowohl Disthen, als auch Sillimanit ab, während Andalusit deutlich häufiger vorkommt, als in den anderen beiden Gebieten (Abb. 24). Auch der Antagonismus zwischen Granat, Sillimanit und Turmalin, (teilweise Disthen) ist nicht ausschließlich auf Aufarbeitungsmechanismen, sondern auf unterschiedliche Provenancen zurückzuführen.

6.2. GWL 3

6.2.1. Sedimentologie

Zusammengefasst werden nachfolgend alle Sedimente betrachtet, welche dem GWL 3 zugeordnet werden. Ein lateraler Vergleich der Ablagerungen, besonders der oberen Bereiche, ist durch den fehlenden isochronen „Deckel“ besonders schwierig. Die untersuchten rolligen Sedimente bestehen in allen drei Ablagerungsräumen aus enggestuften bis schluffigen Feinsanden. Im Oberbegleiterkomplex treten schluffige Abschnitte und vereinzelt auch Flözbildungen auf. Die vorherrschenden Sedimentationstypen im Raum Seese sind intertidale Wattbereiche (Schlick- bis Sandwatt), vor allem in den höheren Profilbereichen, sowie lagunäre Bereiche im Oberbegleiterkomplex. Nach Südwesten erweitert sich diese Suite um abgeschlossene Stillwasserbereiche. Das Erscheinungsbild der Sedimente oberhalb des Paketes der „Seeser Sande“ unterscheidet sich nur wenig vom südöstlicheren Ablagerungsraum. Während im Oberbegleiter-Niveau der Räume Welzow und Nochten regressiv lagunäre Verhältnisse vorherrschen, sind im Raum Seese ebenfalls intertidale bis lagunäre Ablagerungen vorhanden, teilweise weniger stark ausgeprägt (Abb. 25). Die obere Entwicklung der Sande im Raum Seese ist von rolligen Sedimenten geprägt, wobei in Richtung Nochten die bindigen Anteile des GWL 3 leicht zunehmen. Die Ablagerungsenergien des GWL 3 werden als „mittel“ eingeschätzt, wobei auch niedrigerenergetische Verhältnisse, zumeist im unteren Teil, auftreten. Für den Raum Welzow-Süd lagen bei der Kartierung nur wenige Messpunkte für etwaige Paläoströmungsmessungen vor. Nach einer östlichen bis nördlichen Strömung im Oberbegleiter-Bereich, stellen

sich teils wechselnde Strömungsverhältnisse (NW-SE) einer mesotidalen Wattedimentation im G 310 ein. SCHELLENBERGER 2011 beschreibt die Hauptströmungsrichtung des GWL 3 aus NNE- und WNW-Richtung und untergeordnet aus SE-Richtung. Für den Raum Nochten beschreibt sie die Hauptpaläoströmung des G3 aus NNW und untergeordnet aus NW. Weitere Daten liegen bislang nicht vor.

6.2.2. Sedimentpetrographie

Die regressive Entwicklung im Zeitraum des Oberbegleiters bedingt eine geringere laterale Durchmischung der Sedimente und zeigt sowohl neue, relativ unreife Schüttungen auf, als auch deutliche Verlagerungen einzelner Schüttungsbereiche von Süd nach Nord. Die kompositionelle Reife der Sedimente nimmt von Nordwest nach Südost kontinuierlich zu bzw. nimmt der Kalifeldspatanteil der Sedimente ab. Generell ist der Mittelwert der Feldspatanteile des GWL 3 gegenüber den Ablagerungen der Sande des GWL 43-41 erhöht, was möglicherweise auf eine geringere Aufarbeitung bzw. Umlagerung zurückzuführen ist. Auch in der strukturellen Reife ist der geringere Energieinput zu sehen, welches sich in generell „eckigeren“ Körnern widerspiegelt. Im Raum Seese beträgt das Rundungs-Verhältnis der Vergleichsfraktion 37:63 und ist damit nur geringfügig anders als im Raum Welzow mit 30:70. Für den Raum Nochten liegen bislang keine Untersuchungen vor. Die Gegenläufigkeit der strukturellen und kompositionellen Reife besteht im Zeitraum des GWL 3 dennoch weiter (Abb. 26). Der Mittelwert der Summe der polykristallinen Quarze ist für die Räume Seese (3,1 % in der SF- und 4,5 % in der SM-Fraktion) und Welzow (2,9 % in der SF- und 4,6 % in der SM-Fraktion) relativ gleich. Im Gegensatz zum GWL 4 liegen die analysierten Proben des Raums Nochten (3,4 % in der SF- und 5,9 % in der SM-Fraktion) über den Anteilen der nördlicheren Ablagerungsbereiche (z.B. Seese). Generell sind auch in diesen Sedimenten zumeist mehr polykristalline Quarze mit ungeraden Korngrenzen zu finden, als mit geraden. Sie zeigen aber keine eindeutigen Verteilungsmuster, da zumindest die Energieabhängigkeit nicht gegeben ist. Der Anteil der mikrokristallinen Quarze ist im Raum Nochten immer noch relativ gering. Die Räume Welzow und Seese haben jedoch ein, gegenüber dem GWL 4, signifikant erhöhtes Niveau. Auch hier sind die größeren Fraktionen reicher an mikrokristallinen Quarz. Wie in Abbildung 3.3 und 4.4 dargestellt, sind diese Mittelwerte aber sehr abhängig von den Einzelproben, welche reich an mikrokristallinem Quarz sind. Generell sind die Mittelwerte der Gesamtfeldspatanteile zwar höher als im GWL 4, dennoch ist dieselbe Abnahme des Mikroklin-Anteiles von Nordwesten nach Südosten zu verzeichnen. Die Verhältnisse von Mikroklin:Orthoklas betragen im Raum Seese 1:5, im Raum Welzow 1:8 und im Raum Nochten 1:15.

Die Schwermineralanalyse zeigt im Raum Seese weniger Granat und Zirkon, aber mehr Turmalin, im Vergleich zum GWL 4. Der Gehalt an Aluminiumsilikaten ändert sich kaum. Die gleiche Aussage gilt für den Vergleich zwischen GWL 4 und 3 in Welzow-Süd. Hier ändert sich jedoch bei den Aluminiumsilikaten das Verhältnis der einzelnen Minerale zueinander, indem der Disthengehalt sinkt, während Andalusit, und in geringem Maße Sillimanit, zunehmen (Abb. 27). In Nochten nimmt der Gehalt an Aluminiumsilikaten von GWL 4 zu GWL 3 zu, was auf höhere Andalusit- und vor allem Sillimanitgehalte zurückzuführen ist. Der Anteil an Disthen geht leicht zurück. Bei den übrigen Mineralgruppen verzeichnet Granat eine Abnahme, während Zirkon häufiger wird. Der Gehalt an Turmalin ändert sich nicht. Im räumlichen Vergleich gleicht sich der Granatgehalt zwischen dem Raum Seese und Welzow, wobei bei letzterem der Granat, zum Hangenden hin, immer mehr abnimmt. In Nochten sind die Anteile deutlich niedriger. Beim Zirkon weist Seese die niedrigsten Gehalte auf, während sich Welzow und Nochten ähneln. Der Turmalingehalt ist in Nochten am höchsten, gefolgt von Seese und Welzow. In Welzow steigen die Turmalingehalte jedoch vom G 330 im Liegenden zum G 310 an und erreichen im Hangenden in etwa das Niveau von Seese. Der Gesamtgehalt der Aluminiumsilikate ändert sich nur gering und ist in Nochten am höchsten. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich aber in der Zusammensetzung der Aluminiumsilikate. Tritt in Seese und Welzow hauptsächlich Disthen gefolgt von Sillimanit und untergeordnet Andalusit auf, so dominiert in Nochten Sillimanit vor Andalusit. Disthen zeigt die niedrigsten Gehalte.

Auch die Änderungen in der Schwermineralzusammensetzung zwischen den Bereichen ober- bzw. unterhalb des Oberbegleiterkomplexes, aber auch die Änderungen zwischen den Sedimentationsräumen im Bereich GWL 3, sind nicht ausschließlich mit Aufarbeitungsmechanismen zu erklären, sondern sprechen für die Koexistenz mehrerer Liefergebiete. Somit wird für den GWL 3 weiterhin eine Sedimentation aus mehreren verschiedenen Quellen angenommen, wobei

sich der Bereich Welzow als Übergangsgebiet herausstellt. Aufgrund des regressiven Charakters der Abfolge hin zu den Klettwitz-Schichten ist hier aber von einer schwächeren Durchmischung der Sedimente auszugehen. Des Weiteren sind die Probenarmut und die unklare stratigraphische Stellung einzelner Proben anzumerken. Die Zusammenfassung des GWL 3 sollte daher zuvorderst dem Vergleich mit den Daten des GWL 4 dienen und kann bei Vorliegen weiterer, stratigraphisch eingehängter, Analysen durchaus präzisiert werden.

GWL 3 / Gr. 5+6			
	Seese	Welzow	Nochten
NW (Meer)			SE (Land)
Lithologie der Sande	enggestufte bis schluffige Feinsande	enggestufte bis schluffige Feinsande	enggestufte bis schluffige Feinsande
Fazies	Schlick- bis Sandwatt intertidal teils lagunär	Schlick- bis Sandwatt und Stillwasser intertidal bis regressiv lagunär	Schlick- bis Sandwatt und Stillwasser intertidal bis regressiv lagunär
Paläoströmung (in Strömungssinn)	?	E bis N	SSE bis SE <small>veränd. Schellenberger (2011)</small>
Energie			

Abb. 25: Schematische Darstellung der wichtigsten Sedimentparameter des GWL 3 im regionalen Vergleich.

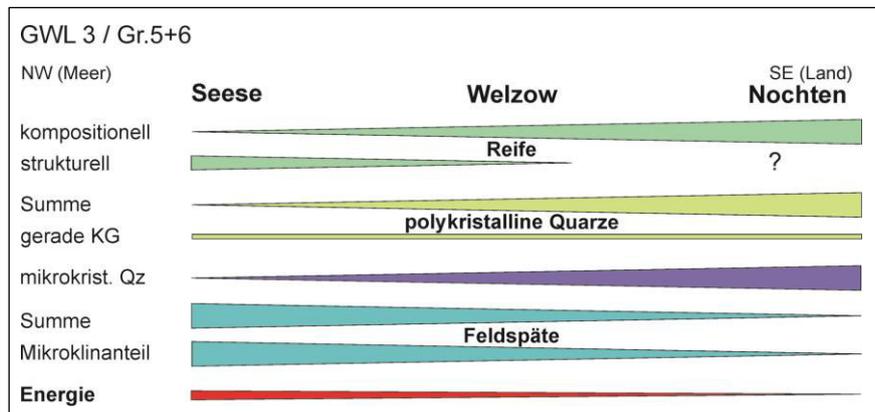


Abb. 26: Schematische Darstellung der wichtigsten petrographischen Parameter des GWL 3 im regionalen Vergleich (KG-Korngrenzen, Qz-Quarz).

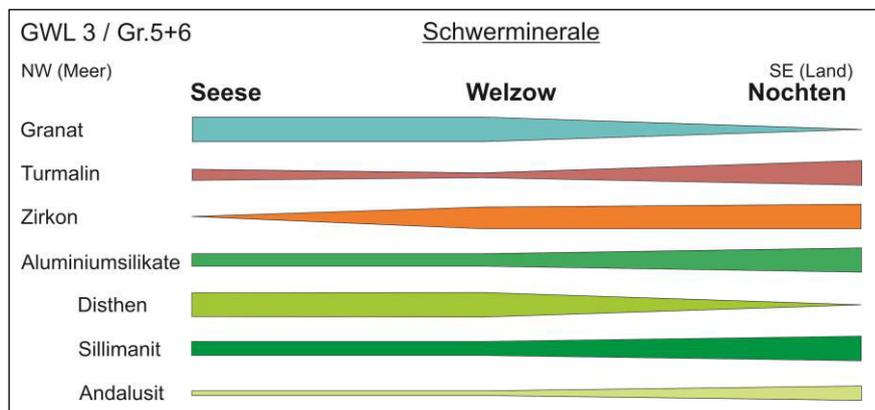


Abb. 27: Schematische Darstellung der wichtigsten Schwerminerale des GWL 3 im regionalen Vergleich.

Um die Provenance der Sedimente einzugrenzen, wurde für den GWL 4 versucht, anhand der Haupt-Schwerminerale auf mögliche Liefergebiete zu schließen. Dabei ist unklar, welche Gesteinseinheiten zur fraglichen Zeit der Verwitterung ausgesetzt waren und ob deren Material durch die entsprechenden Flusssysteme abgeführt wurde. In den entsprechenden Regionen, die für eine Sedimentherkunft infrage kommen, wurde deshalb das Potenzial für das Vorhandensein der einzelnen Schwerminerale betrachtet. Unterschieden wird in die Liefergebiete Lausitzer Block (LB), Erzgebirge/Granulitgebirge, westliches Böhmisches Becken (BB), östliches Böhmisches Becken, Südflanke der Westsudeten + Adlergebirge, welche beide vermutlich über das östliche Böhmisches Becken entwässert werden, und Nordflanke der Westsudeten. Der Lausitzer Block bezieht sich hierbei auf den sächsischen Teil, wobei die anzutreffenden Schwerminerale (Zirkon, Turmalin, Granat und Andalusit) nur akzessorisch bzw. in kleinen Vorkommen auftreten, und somit eher nicht für die Masse der benötigten Schwerminerale in Frage kommen. In den übrigen Regionen sind Zirkon und Rutil überall zu finden, so dass die beiden Minerale für eine Differenzierung der Gebiete ausscheiden. Turmalin tritt vor allem im Erzgebirge/Granulitgebirge, dem westlichen böhmischen Becken und den südlichen Westsudeten auf, in den anderen Regionen ist er nur geringfügig anzutreffen. Auch die Herkunft des Stauroliths ist vorwiegend auf diese Gebiete beschränkt. Für die Aluminiumsilikate kommen ebenfalls verschiedene Provenancen infrage. Während Disthen überall anzutreffen ist, beschränken sich größere Vorkommen von Andalusit hauptsächlich auf das Erzgebirge / Granulitgebirge und die nördlichen Westsudeten. Sillimanit hingegen ist in größeren Mengen im Granulitgebirge und im Böhmisches Becken zu finden. Laut SUHR (2003) ist auch eine Sillimanitquelle in den Westsudeten möglich. Des Weiteren identifiziert er das westliche Böhmisches Becken als Quelle für fibrolitischen Sillimanit. Da in den Seeser Sanden bzw. GWL 4 jedoch hauptsächlich die Varietät des prismatischen Sillimanits auftritt, würde das westliche Böhmisches Becken als Liefergebiet ausscheiden. Die Herkunft des Granats kann noch einmal aufgrund der verschiedenen Granatvarietäten differenziert werden. Mittels REM/EDX wurden die Granate auf ihre Zusammensetzung untersucht. Die Ergebnisse sind in Dreiecksdiagrammen abgebildet, für welche hier stellvertretend das Diagramm der Probe SEEW3_065 dargestellt ist (Abb. 28). Dabei ist ersichtlich, dass in den untersuchten Proben Fe- (Almandin), Mn- (Spessartin) und Ca- (Grossular) Granate vorkommen, wobei erstere die größte Gruppe darstellen. Während im Erzgebirge / Granulitgebirge Almandin zur Verfügung steht,

können alle drei Granatvarietäten aus dem östlichen böhmischen Becken oder den nördlichen Westsudeten zugeführt werden (Abb. 29). Diese drei Lokalitäten können für den GWL 4 als Hauptliefergebiete angenommen werden. Weiter ist davon auszugehen, dass immer mindestens zwei der genannten Quellen gleichzeitig aktiv waren.

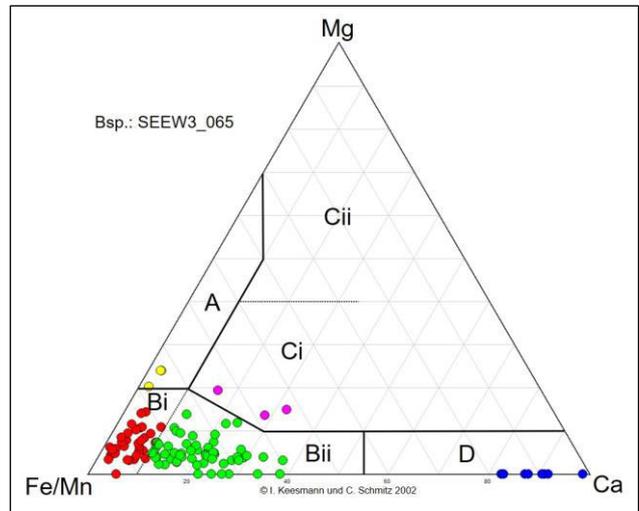


Abb. 28: EDX-Analyse von Granaten der Probe SEEW3_065 mit Zuordnung zu den jeweiligen Herkunftsgesteinen, nach MANGE & MORTON (2007). **A:** Granulitfaziale Metasedimente od. intermediär-silikat. magmat. Gesteine. **B:** Amphibolitfaz. Metasedimente (Bi - wenn Mn-reich: Granite/granit. Pegmatite). **Ci:** Metabasische Gesteine. **Cii:** Ultramafische Gesteine. **D:** Metasomatische Gesteine; niedriggrad. metabasische Gesteine; ultrahochtemp. metamorphe Kalksilikat-Granulite.

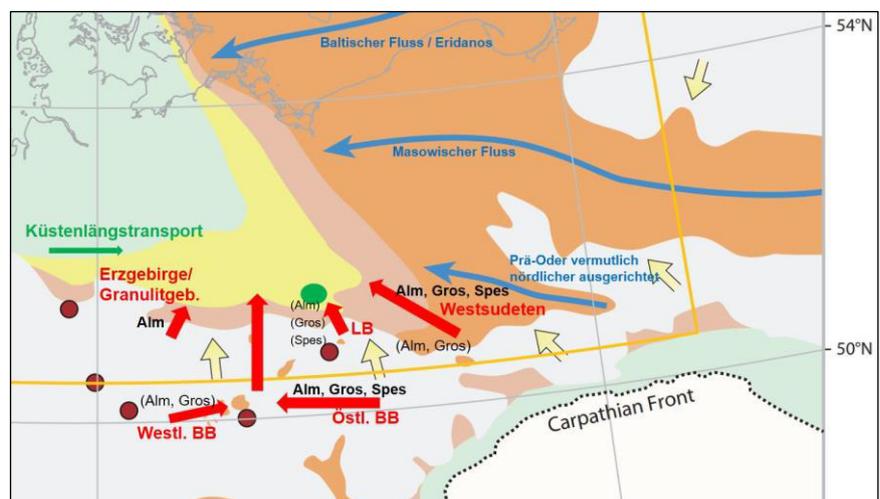


Abb. 29: Potenzielle Herkunftsgebiete der Granatvarietäten Almandin (Alm), Spessartin (Spes) und Grossular (Gros); grüner Kreis: Gebiet der Lausitz (Karte nach KNOX et. al 2010).

7. Modellentwicklung

Die Bildungen der Seeser Sande werden höher energetischen, randmarinen Ablagerungen einer mikro- bis mesotidalen Küste mit zeitweise erhöhter Wellenaktivität zugeschrieben. Abb. 30 zeigt die Einstufung des Bildungsraumes.

Die Mittelkörnigkeit, Schrägschichtungsanteile der Großrippel- und Riffschrägschichten und die Armut an bioturbaten Strukturen der Seeser Sande korrelieren auch hier sehr gut mit dem von uns postulierten Ablagerungsraum. Im Detail weisen die hochenergetischen, mittelkörnigen, schräg geschichteten Seeser Sande Charakteristiken von Strandriffen/Strandprielen auf.

Die Gesamtheit der Bildung der hochenergetischen Seeser Sande ist in Zeiträumen hoher wellendynamischer Aktivität zu sehen. Gemeinsam mit einer erhöhten Sedimentfracht aus dem Küstenlängstransport, welcher wiederum durch erhöhten Seegang getriggert wird, bilden diese Prozesse die Grundlage der Barriereinselentwicklung. Dieser Bereich kann als Hochenergieküste angesehen werden.

Der sedimentäre Inhalt der Barriereinseln setzt sich aus mehreren möglichen Liefergebieten zusammen. Zum einen ist ein hoher Anteil der Sedimente, welche über die Elbezone eingetragen wurden, wahrscheinlich. Zum anderen sind auch Anteile der westlichen Liefergebiete (Erzgebirge / Granulitgebirge) denkbar, welche durch Küstenlängstransport in die Lausitz verfrachtet werden können.

Die synchronen Ablagerungen im Raum Welzow besitzen einen relativ ähnlichen sedimentpetrographischen Inhalt, unterscheiden sich jedoch in der faziellen Ausbildung. Hier wird ein festlandsnäherer Ablagerungsraum hinter den Barriereinseln angenommen. Süd gerichtete Großrippelbildungen, zeigen zeitweise stärkeren Einfluss wellendynamischer Prozesse, wie Washovers oder Flood Tidal Deltas. Der tidale Einfluss scheint dennoch vorhanden, denn der nur geringe Spurenfossilinhalt der GWL 4-Ablagerungen im Raum Welzow deutet auf eine höhere Umlagerungskomponente der Feinsandanteile hin. Abschließend sind diese Ablagerungen niedrigerenergetischer, als die Seeser Sande im Raum Seese/Schlabendorf, anzusehen.

Die in das Projekt einbezogenen Proben aus dem Raum Nochten zeigen, neben einer weiteren Abnahme der energetischen Verhältnisse, auch stark differierende sedimentpetrographische Inhalte. Hier sind strukturell unreifere aber feldspatärmere Sedimente anzutreffen, welche sich auf ein küstennäheres Liefergebiet (Lausitzer Block, Westsudeten) beziehen lassen. Diese Ablagerungen haben daher kaum Gemeinsamkeiten mit den Seeser Sanden, außer den gleichzeitigen Ablagerungszeitraum.

Abb. 31 zeigt die schematische Darstellung der Ablagerungen zum Zeitpunkt der mittleren Greifenhain-Sfm. Die Entwicklung der Barriereinseln wird im Bereich Seese-Schlabendorf gesehen. Diese sind an die hochenergetischen Seeser Sande gebunden und beinhalten das Basiskonglo-

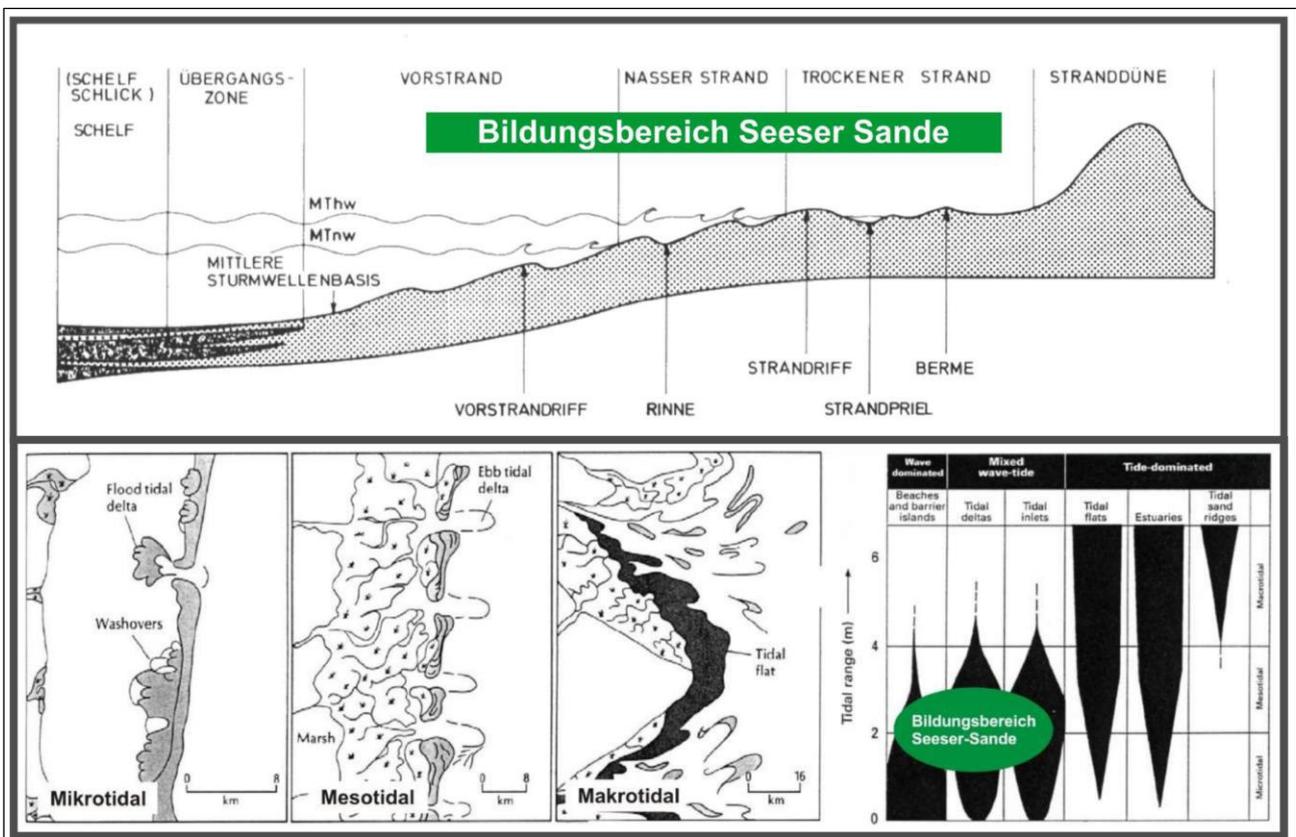


Abb. 30: Postulierte Bildungsbereiche der hochenergetischen Seeser Sande. Oben: Im Schnitt nach REINECK (1984). Unten: In Abhängigkeit von Hydrodynamik und Tidenhöhe nach READING (1996).

merat mit der Seeser Geröllgemeinschaft. Verzahnt mit diesen werden im Raum Welzow die mittlere-energetischen, mittelsandigen Feinsande abgelagert. Der Inhalt beider Sedimentpakete stammt vorzugsweise aus Quellen westlicher bzw. südlicher Provenance. Die niedere-energetischen Wattsedimente des Raums Nochten sind ebenfalls mit den mittlere-energetischen marinen Sanden verzahnt und beinhalten die Sedimente aus eher regionalen, südlichen bis südöstlichen Liefergebieten. Im intertidalen Bereich ist auch mit der Ausbildung von Gezeitenprielen zu rechnen, welchen wiederum höhere Energien zugeschrieben werden können.

Die Bildung der Barriereinseln wird an einen Zeitraum mit hoher wellendynamischer Energie geknüpft, welche nach einer moderaten Wattentwicklung (G 440, Hangenschluff und möglicher, rezent erodierter Sedimente) transgressiv auf die abgelagerten Sedimente übergrieff. Durch den höheren Anteil an Wellenenergie wird zeitgleich der Küstenlängstransport verstärkt und die sedimentpetrographischen Komplexe der Seeser Sande und des GWL 4 in Welzow werden, wenn auch faziell differenziert, abgelagert. Da im Raum Nochten ebenfalls stark sedimentiert wird, kommt es zur isochronen Koexistenz von petrographisch unterschiedlichen sedimentären Einheiten. Erst an der Grenze zum Oberbegleiterkomplex geht die starke wellendynamische Entwicklung zurück und es kommt zu einer Umkehr der Sedimentationsrichtung aus dem Bereich hinter der Barriereinsel heraus in Richtung Norden. Dies wird durch einen zunehmenden Südeinfluss im sedimentpetrographischen Inhalt belegt. Aus diesem Grunde wird im Bereich der südlichen Lausitz auch keine weitere Barriereinselbildung erwartet. Auch die Annahme einer generell regressiven Tendenz, innerhalb des oberen Miozäns, lässt die Verlagerung der randmarinen Sedimentationssysteme Richtung zentrales Nordseebecken vermuten.

Nur das Zusammenspiel von der passenden Primärmorphologie, einem hohen Sedimentangebot und einer hohen

wellendynamischen Energiekomponente führte damit zur Bildung der Barriereinseln in der Greifenhain-Sfm. und so zu den für die Lausitz einzigartigen Ablagerungen der Seeser Sande.

Danksagung

An dieser Stelle sei dem Unternehmen Lausitz Energie Bergbau AG, Abteilung Geotechnik, Fachgruppe Bodenmechanik, namentlich Frau Grosser für den Auftrag zur Bearbeitung der Thematik und das in uns gesteckte Vertrauen gedankt. Auch geht ein Dank an Peter Suhr und Jan-Michael Lange für die konstruktiven Gespräche rund um das Thema Seeser Geröllgemeinschaft.

Literatur

AHRENS, H. (1995): Die Seeser Sande im Niederlausitzer Miozänprofil. – In: SCHROEDER J. H. & NOWEL, W. (Hrsg.): Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg Nr. 3: Lübbenau-Calau. – Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e. V., Selbstverlag: 31-33; Berlin.

AHRENS, H. & LOTSCH, D. (1976): Zum Problem des Pliozäns in Brandenburg. – Jb. Geol., **7/8** (1971/72): 277-323.

BRADSHAW, C.D. (2020): Miocene Climates. – In: ELIAS S. & ALDERTON D.: Encyclopedia of Geology. – Academic Press, 2nd edition: The Cenozoic: 486-496.

BRAUSE, H. & HAHMANN, H.-G. (1989): Kipp-Gleit-Tektonik Typ Nochten. – Geoprofil, **1**: S. 63-64.

DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (2016): Die stratigraphische Tabelle von Deutschland (STD 2016). – Hrg. H.G. HERBIG, Univ. zu Köln, Köln.

ELICKI, O. & BREITKREUZ, C. (2016): Die Entwicklung des Systems Erde. – Springer Spektrum: 307 S.; Berlin Heidelberg.

FAUPL, P. (2000): Historische Geologie. – UTB Facultas: 270 S., Wien.

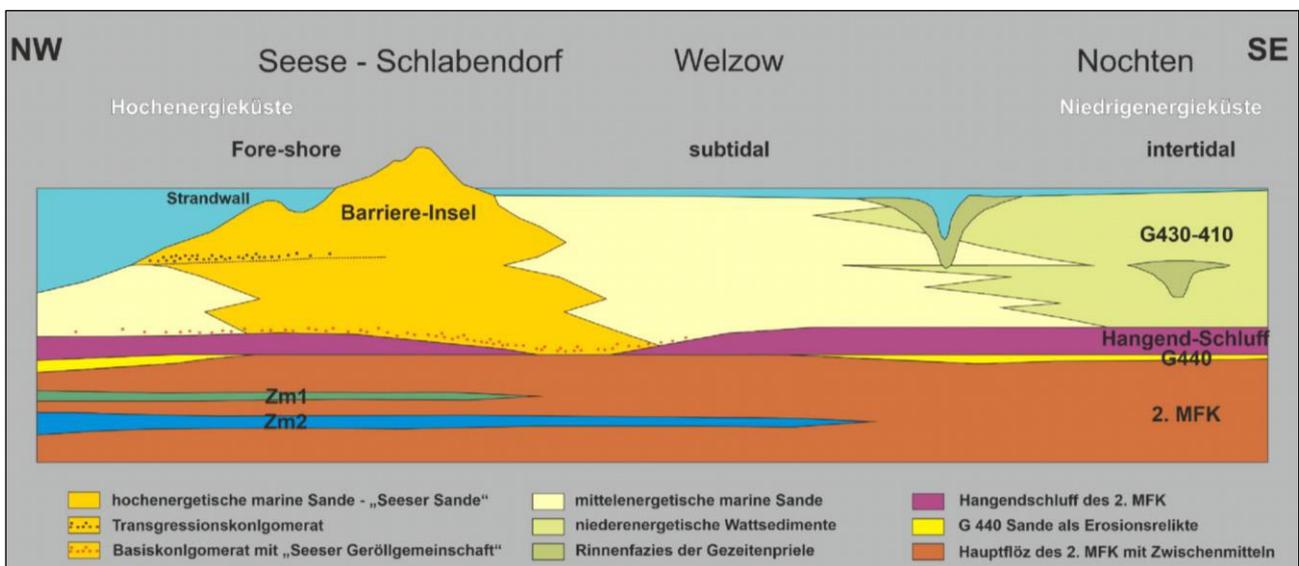


Abb. 31: Schematischer NW-SE-Schnitt durch den Ablagerungsraum des GWL 4 in der Lausitz zum Zeitpunkt der Ausbildung der Seeser Sande.

- FÜCHTBAUER, H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. – Schweizerbart: 1141 S.; Stuttgart.
- GEISSLER, E. et al. (1987): Lagerstättegeologische Forschung Braunkohle: Geologisches Modell der Lausitz. – unveröff. Forschungsbericht, VEB Geologische Forschung und Erkundung: 256 S.; Freiberg.
- GIBBARD, P.L. & LEWIN, J. (2016): Filling the North Sea Basin: Cenozoic sediment sources and river styles. – *Geologica Belgica*, **19** (3-4): 201-217.
- GÖTHEL, M. (2002): Die Seese Sande des Mittel-Miozäns der Lausitz - Ablagerungen einer Tsunami? – *Natur und Landschaft in der Niederlausitz*, **22**: 1-7; Cottbus.
- HANSEN, J.; SATO, M.; RUSSELL, G. & KHARECHA, P. (2013): Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide. *Phil Trans R Soc, A* **371**: 20120294. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0294>
- HYRSL, J. & NIEDERMAYR, G. (2003): Magic World: Inclusions in Quartz. – Bode Verlag: 240 S.; Haltern.
- KNOX, R. W. O'B.; BOSCH, J. H. A.; RASMUSSEN, E. S.; HEILMANN-CLAUSEN, C.; HISS, M.; DE LUGT, I. R.; KASIŃSKI, J.; KING, C.; KÖTHE, A.; SŁODKOWSKA, B.; STANDKE, G. & VANDENBERGHE, N. (2010): Cenozoic. – In: DOORNENBAL, J. C. & STEVENSON, A. G. (eds): Petroleum geological atlas of the Southern Permian Basin area. – EAGE Publications b.v.: S. 211-223; Houten.
- KRUEGER, H. H. (1994): Die nordische Geröllgemeinschaft aus der Lausitz (Miozän) und deren Vergleich mit Sylt. – *Brandenburgische Geowiss. Beitr.*, **1** (1994): 88-89; Kleinmachnow.
- LANGE, J. M.; TONK, C. & WAGNER, G. A. (2008): Apatitspaltspurdaten zur postvariszischen thermotektonischen Entwicklung des sächsischen Grundgebirges - erste Ergebnisse. – *Z Dt. Ges. Geowiss.*, **159** (1): 123-132.
- LANGE, J. M., & SUHR, P (2022): Die distalen Wirkungen des Riesimpaktes - eine Zusammenschau. – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.*, N.F. **104**: 11–90; Stuttgart.
- LARSSON, L. M. et al. (2011): Miocene climate evolution of northern Europe: A palynological investigation from Denmark. – *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, **309**: 161-175.
- LUDWIG, A. O. (2015): Inlandvereisungen in Nordeuropa während des Neogens? – *Z Dt. Ges. Geowiss.*, **166**: 297–320; Berlin.
- MANGE, M. A. & MORTON, A. C. (2007): Geochemistry of heavy minerals. – In: MANGE, M.A., WRIGHT, D.T. (Eds.), *Heavy Minerals in Use. Developments in Sedimentology* – Elsevier, Vol. **58**: S. 345-391; Amsterdam.
- NOWEL, W.; BÖNISCH, R.; SCHNEIDER, DR. W. & SCHULZE, H. (1994): Geologie des Lausitzer Braunkohlenreviers. – *Lausitzer Braunkohle AG; Senftenberg*.
- READING, H.G. (1996): *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. – 704 S.; Oxford.
- REINECK, H.-E. (1984): *Aktuogeologie klastischer Sedimente*. – Waldemar Klein: 348 S.; Frankfurt.
- RÖGL, F. (1999): Mediterranean and Paratethys. Facts and hypotheses of an oligocene to miocene paleogeography (short overview). – *Geologica Carpathica*, **50** (4): 339-349; Bratislava.
- SHELLENBERGER, H. (2011): Lithofazielle Dokumentation und Korrelation ausgewählter Profile der Meuro-Formation in der Lausitz (Tagebaue Nochten, Welzow-Süd und Jänschwalde). – Diplomarbeit; Freiberg.
- SCHNEIDER, W. & GRÖSCHKE, A. (2003): Bernstein und Blattreste im miozänen Raunoer Fluss. – *Natur und Landschaft in der Niederlausitz*, **23**: 41-71; Cottbus.
- STANDKE, G. (2011): Tertiär. – In: AUTORENKOLLEKTIV (2011): *Die geologische Entwicklung der Lausitz*. – Vattenfall Europe Mining AG: 41-84; Cottbus.
- SUHR, P. (1995): Das Tertiär. – In: SCHROEDER, J.H.; NOWEL, W. (Hrsg.): *Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg Nr. 3: Lübbenau – Calau*. – *Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e. V., Selbstverlag*: 28; Berlin.
- SUHR, P. (2003): The Bohemian Massif as a catchment area for the NW European Tertiary Basin. – *Geolines*, **15**: S. 147-159.

Projektbezogene unveröffentlichte Forschungsberichte

- BRETSCHNEIDER, F. & KNAPE, G. (2017): Ergebnisbericht zur Untersuchung der Linerstrecke der Erkundungsbohrung SEEW3/17 im Bereich des Kohlenfeldes Seese-West. Ergebnisbericht-LAOP 18/17: 12; Lautau.
- BRETSCHNEIDER, F. & NIEMZ, P. (2017): Ergebnisbericht zur Untersuchung der Linerstrecke der Erkundungsbohrung SLAS1/17 im Bereich des Kohlenfeldes Schlabendorf-Süd. Ergebnisbericht-LAOP 10/17: 12 S.; Lautau.
- BRETSCHNEIDER, F. & NIEMZ, P. (2017): Ergebnisbericht zur Untersuchung der Linerstrecke der Erkundungsbohrung SLAN2/17 im Bereich des Kohlenfeldes Schlabendorf-Nord. Ergebnisbericht-LAOP 19/17: 12; Lautau.
- BRETSCHNEIDER, F., NIEMZ, P. & KNAPE, G. (2017): Ergebnisbericht zur Untersuchung der Linerstrecke der Erkundungsbohrung SLAM4/17 im Bereich des Kohlenfeldes Schlabendorf-Mitte. Ergebnisbericht-LAOP 17/17: 4; Lautau.
- BRETSCHNEIDER, F., FOCKE, D., PFEIFFER, N. & MEUSEL, M. (2019): Zusammenfassender Ergebnisbericht zu vergleichenden geochemischen, sedimentologischen und faziesanalytischen Betrachtungen von 4 Bohrungen im Bereich Seese/Schlabendorf. Ergebnisbericht-LAOP 01/19: 33 S.; Lautau.
- FOCKE, D. & BRETSCHNEIDER, F. (2018): Sachstandsbericht zur sedimentpetrographischen Untersuchung von 4 Sandproben der Seeser Sande, Bohrung SLAS1. Sachstandsbericht-LAOP 08/18: 20 S.; Lautau.
- FOCKE, D. & BRETSCHNEIDER, F. (2020): Sachstandsbericht zur sedimentpetrographischen Untersuchung von Proben der Bohrung SEEW3, SLAS1 und SLAM4. Sachstandsbericht-LAOP 01/20: 59 S.; Lautau.
- FOCKE, D. & BRETSCHNEIDER, F. (2020): Sachstandsbericht zur sedimentpetrographischen Untersuchung von Proben aus dem Tagebau Welzow-Süd, Projekt Seeser Sande. Sachstandsbericht-LAOP 09/20: 41 S.; Lautau.
- FOCKE, D. & BRETSCHNEIDER, F. (2021): Abschlussbericht zum sedimentpetrographischen Vergleich der Regionen Seese/Schlabendorf, Welzow und Nochten, zur Einordnung des Untersuchungsgebietes in seinen geologischen Kontext und Erarbeitung einer Bildungshypothese für die Seeser Sande. Abschlussbericht-LAOP 03/21: 68 S.; Lautau.