

Ergebnisse der Schwermineraluntersuchungen von eozänen Sand- und Kiessandvorkommen in den Tagebauen Prießnitz, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld, Grana, Klausä und Profen (Sachsen-Anhalt und Thüringen)

ANTJE MIGALK, JOHANNES MENNICKE, RAIK DÖBELT

Adressen: Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle

Schlüsselwörter: Schwerminerale, Spektren, Zeitzer Schichten, Domsener Sande, Kiessande des Eozäns, Sachsen-Anhalt, N-Thüringen, Deutschland

Keywords: Heavy minerals, composition, Zeitzer Schichten, Domsener Sande, gravelly sands of the Eocene, Saxony-Anhalt, N-Thuringia, Germany

Zusammenfassung

In der vorliegenden Bearbeitung liegt das Hauptaugenmerk auf der Untersuchung schwermineralhaltiger stratigraphischer Einheiten der sechs Abbaugeliete Profen, Grana, Klausä, Prießnitz, Osterfeld und Schkölen-Nautschütz. Die Tagebaue befinden sich im Süden Sachsen-Anhalts bzw. im Norden Thüringens. Im Rahmen einer Bachelor- und zweier Master-Arbeiten wurden in Profen die Zeitzer Schichten und die Domsener Sande sowie in den übrigen Tagebauen eozäne Kiessandschichten mit dem Ziel beprobt, das enthaltene Schwermineralspektrum zu analysieren. Die Untersuchungen wurden als Kooperation zwischen dem Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU) ausgeführt.

Die Domsener Sande (Begleitschicht im Braunkohlentagebau Profen) wurden mittels Gamma-Ray-Log untersucht, um das Vorkommen von Schwermineralen mit Hilfe der von ihnen ausgehenden natürlichen Strahlung zu ermitteln. Mit dieser Technik konnten einzelne Schwerminerallagen exakt identifiziert und separat beprobt werden. Aus der stratigraphischen Abfolge wird in Profen eine Zuordnung der Proben zu den Zeitzer Schichten als gesichert angenommen.

Aus den Kiessanden wurde dahingegen je eine Großprobe entnommen, um nach anschließender Probeileilung einen Überblick über den gesamten Schwermineralinhalt der entsprechenden Schicht zu erhalten. Um die Kiessandproben miteinander korrelieren zu können, wurden in diesen Tagebauen Tonproben aus angrenzenden Sedimentschichten für biostratigraphische Analysen entnommen.

Für die Vorkonzentratherstellung kam ein Holman-Wilfley-Herd zur Anwendung (Dichtentrennung durch Wasser und Bewegung). Eine weitere Aufkonzentration erfolgte teils durch magnetische Trennung mit einem Frantz-Magnetscheider (Domsener Sande), teils durch Dichtentrennung mit Natriumpolywolframat-Lösung (Kiessandproben aus Prießnitz, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld, Grana, Klausä sowie Zeitzer Schichten).

In den Domsener Sanden wurden die Schwermineralspektren mit REM (Raster-Elektronenmikroskopie) ermittelt. Der Gesamtgehalt Profile innerhalb der 0,5 m bis 4,0 m mächtigen Schwerminerallagen liegt zwischen 1,18 Gew.-% und 3,25 Gew.-%. Die Kiessande wurden dahingegen hauptsächlich mit QEMSCAN analysiert. Im Resultat ergab sich ein geringer Schwermineralgehalt der Proben zwischen 0,02 Gew.-% (Schkölen-Nautschütz) und 0,07 Gew.-% (Prießnitz) für das westliche Untersuchungsgebiet gegenüber einem erhöhten Schwermineralgehalt der Proben aus dem östlichen Teil zwischen 0,24 Gew.-% in Grana über 0,48 Gew.-% in Profen bis zu 0,64 Gew.-% in Klausä.

Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Zusammensetzung der Schwermineralspektren gelegt. Die am häufigsten vorkommenden Schwerminerale sind Topas, Rutil/Anatas, Turmalin, Staurolith, Ilmenit und Leukoxen, Aluminiumsilikate und Zirkon. Der Großteil der Proben enthält geringe Mengen an Xenotim, Monazit, Dravit, Kassiterit und Chromit. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden SEE-Phosphate/-Arsenate sowie Kassiterit detaillierter untersucht. Minerale mit einem hohen SEE-

Gehalt enthalten in den meisten Fällen Spuren von Uran und Thorium. Insgesamt wurde jedoch in den meisten Schwermineralkonzentraten keine hohe Anreicherung an SEE-Mineralen angetroffen (< 1 Gew.-%). Lediglich die Domsener Sande zeigen höhere Gehalte dieser Minerale aufgrund natürlicher Anreicherungsprozesse (Schwermineralseifen). Ein relativ hoher Kassiteritanteil tritt in den Schwermineralkonzentraten aus Grana (1,93 Gew.-%) und Klausä (2,77 Gew.-%) auf. Außerdem zeigen die Kassiterite einen hohen Freiheitsgrad. Um eine mögliche Wirtschaftlichkeit zu bestätigen, wurden zusätzliche ICP-ES-Analysen veranlasst, die die Gehalte jedoch nicht bestätigen konnten.

Die Konzentrationen der einzelnen Minerale innerhalb der ermittelten Schwermineralspektren der Kiessande bestätigten eine Teilung des Untersuchungsgebietes in einen östlichen und einen westlichen Teil. Die Schwermineralkonzentration der östlichen Probenahmestellen (Klausä, Profen, Grana) werden von Topas dominiert wohingegen die der westlichen Probenahmestellen (Prießnitz, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld) von Ilmenit dominiert werden. Schlussfolgernd wird angenommen, dass die Kiessande der westlichen Tagebaue durch das Vogtländisch-Thüringische Flusssystem transportiert wurden und Einflüsse ilmenithaltiger Sedimente des Fichtelgebirges und des thüringischen Buntsandsteingebietes aufzeigen. Für die Sedimente der östlichen Tagebaue hingegen wird ein Transport durch das Zwickau-Altenburger Flusssystem vermutet, das Topas aus vergreisten Gesteinen des Erzgebirges transportierte. Die Analyse der Kornformen der auftretenden, sehr stabilen Minerale ergab, dass das sedimentierte Material verschiedene Quellen aufweisen muss. Dafür werden das Erzgebirge, das Böhmisches Massiv sowie das Sächsische Granulitgebirge auf Grundlage der spezifischen Indikatorminerale im Schwermineralspektrum angenommen.

Abstract

This article focuses on heavy mineral bearing stratigraphic units of the six mining areas Profen, Grana, Klausä, Prießnitz, Osterfeld, and Schkölen-Nautschütz. The workings are located in the south of Saxony-Anhalt and the north of Thuringia in Central Germany. Within the scope of one bachelor and two master theses the Eocene Zeitzer Schichten and the Eocene-Oligocene Domsener Sande were sampled in Profen and Eocene gravel sand layers in the other open pit mines to analyse the contained heavy mineral assemblages. The investigations were conducted as part of a cooperation of the Landesamt für Geologie und Bergwesen (LAGB, Federal State Office for Geology and Mining) Saxony-Anhalt and the Martin-Luther-University Halle-Wittenberg (MLU).

The Domsener Sande were investigated by gamma ray logging using the natural heavy mineral (HM) radiation for discovering. The technique allowed an exact identification of individual heavy mineral layers which could be sampled separately in this way. A bulk sampling method was preferred to analyse the gravel sands and to obtain an overview of the whole heavy mineral content. Due to correlation purposes of the investigated gravel sands, clay samples from adjoining layers from all open pit mines apart from Profen served for bio-stratigraphical analyses. In Profen, the age of the sampled layers is considered to be known due to sufficient former analyses in this area.

For pre-concentration a Holman-Wilfley table (water and movement controlled density splitting) was applied. For further concentration, either a magnetic separation with the Frantz-Magnet-Separator (Domsener Sande) or a heavy liquid separation with Sodium-Polytungsten (gravel sands from Prießnitz, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld, Grana, Klausä as well as Zeitzer Schichten) was used.

The heavy mineral assemblages in the Domsener Sande were analysed with SEM (Scanning Electron Microscopy). The content within 0.5 m up to 4.0 m thick profiles containing heavy mineral layers varies between ca. 1.18 wt% and 3.25 wt%. The gravel sands were primarily analysed by QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy). The results reveal a low content of heavy minerals between 0.02 wt% (Schkölen-Nautschütz) and 0.07 wt% (Prießnitz) in the western part of the research area in contrast to elevated HM contents in the eastern part ranging from 0.24 wt% in Grana to 0.48 wt% in Profen and up to 0.64 wt% in Klausä.

A special focus lies on the heavy mineral compositions of each analysed sample location. The main heavy minerals observed are topaz, rutile/anatase, tourmaline, staurolite, ilmenite and leucosene, aluminium silicates, and zircon. Most of the samples contain low amounts of xenotime, monazite, dravite, cassiterite, and chromite. For economic reasons, rare earth element (REE) bearing phosphates/arsenates

as well as cassiterite were investigated in a more detailed way. Minerals with a high content of REE commonly contain traces of thorium and uranium. However, in total, the heavy mineral concentrates of most localities did not show high enrichments in REE-bearing minerals (< 1 wt%). In contrast, the Domsener Sande showed higher amounts of these minerals due to natural enrichment processes (heavy mineral placer deposit). The heavy mineral concentrates of Grana (1.93 wt%) and Klausä (2.77 wt%) were relatively rich in cassiterite. Moreover, a significant release of the mineral grains was detected. To ensure a possible economic exploitation, additional ICP-ES analyses were carried out which could not confirm such high Sn-contents.

The quantification of the HM assemblage of the gravel sands confirmed a division of the study area in an eastern and a western part with regard to their HM contents. The heavy mineral concentrates of the eastern locations (Klausä, Profen, Grana) are dominated by topaz, whereas the western locations (Prießnitz, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld) are dominated by ilmenite. In conclusion, it can be assumed that the gravel sands of the western deposits were transported by the Vogtland Thuringian river system influenced by ilmenite-bearing sediments from Fichtelgebirge and the Thuringian red sandstone area. However, the sediments of the eastern part are supposed to be deposited by the Zwickau Altenburg river system carrying topaz from Erzgebirge greisen lithologies. The analysis of grain shapes of very resisting minerals leads to the conclusion that there are different sources of the deposited material. Material contribution from the Erzgebirge, the Bohemian Massif, and the Saxon Granulite Mountains is assumed because of the occurrence of very specific indicator minerals.

1. Anlass / Zielstellung

Ausgewählte känozoische Kiessand- und Sandvorkommen Sachsen-Anhalts sowie Nord-Thüringens wurden im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) in Zusammenarbeit mit der Fachgruppe Petrologie & Lagerstättenforschung der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg hinsichtlich ihrer Schwer- und Wertmineralführung analysiert. Ziel der Untersuchungen war es, bereits bekannte Daten aus nicht veröffentlichten Berichten und Explorationsergebnissen zu überprüfen, zu ergänzen und eine grobe Einschätzung zur wirtschaftlichen Gewinnbarkeit der vorhandenen Schwerminerale abzugeben. Die Schwermineralspektren der einzelnen Probenlokalitäten wurden des Weiteren verglichen, um eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Paläoflussystemen und damit unterschiedlichen Liefergebieten treffen zu können. Für die Gewinnung der Schwermineralkonzentrate und die anschließende Schwermineralanalytik wurden unterschiedliche Methoden im halbtechnischen Maßstab genutzt.

Die hier veröffentlichten Daten sind Ergebnisse der Abschlussarbeiten von DÖBELT (2013), MIGALK (2015) und MENNICKE (2015). Dabei untersuchte DÖBELT (2013) die Domsener Sande und MENNICKE (2015) die Zeitzer Schichten im Tagebau Profen. MIGALK (2015) beprobte die eozänen Kiessandhorizonte in den Tagebauen Grana, Klausä, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und Prießnitz.

2. Kenntnisstand

Zwei erfolgreiche Forschungsk Kooperationen zwischen dem Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU) zur Schwermineralführung mittel- und oberpleistozäner Kiessande am Saale-Unterlauf durch WOLF (2010) und pleistozäner Kiessande der Elbe in Sachsen-Anhalt durch ALLENBERG (2011) sind Grundlage neuerer Schwermineralforschung im Dreiländereck Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen. Ziel der damaligen Forschungsprojekte war es, im Abbau stehende Kiessand- und Sandvorkommen hinsichtlich ihres Schwermineralspektrums zu erforschen und zu bewerten. Als Grundlage kann MÜLLER (1988) angesehen werden, der erstmals eine umfassende Schwermineralbestimmung von Kiessanden der Schotterkomplexe im mittleren Saale-Elbe-Gebiet (Sachsen-Anhalt) lieferte. Die Ergebnisse von WOLF (2010) und ALLENBERG

(2011) sind im Rohstoffbericht Sachsen-Anhalt 2012 (ALLENBERG et al. 2012) veröffentlicht.

Erste Voruntersuchungen an den eozänen-oligozänen Domsener Sanden im Braunkohle-Tagebaukomplex Profen, Abbaufeld Schwerzau durch DÖBELT (2011) und Abbaufeld Domsen durch BURMESTER (2012) und JAHN (2012) bildeten die Grundlage für die hier beschriebenen, weiterführenden Untersuchungen im neuen Braunkohle-Abbaufeld Domsen. Dabei konnte auf unveröffentlichte DDR-Berichte zu Schwermineraluntersuchungen im Tagebau Profen zurückgegriffen werden.

3. Prozesse zur Anreicherung von Schwermineralen

Die Anreicherung von Schwermineralen in Sanden bzw. Kiessanden lässt sich auf eine Vielzahl von Prozessen zurückführen. Dabei spielen vor allem die Verwitterung und Erosion, der Transport, die Sedimentation und postsedimentäre Prozesse eine Rolle. Einen Überblick dazu geben WELTJE & VON EYNATTEN (2004). Für die qualitative Zusammensetzung der Schwermineralseifen ist das Liefergebiet bestimmend. Die Abtragung der Minerale wird im Liefergebiet neben physikalischer Verwitterung von chemischen und biochemischen Verwitterungsprozessen vorgenommen. Der anschließende Transport der Sedimentfracht erfolgt zumeist fluviatil, in wenigen Fällen äolisch (KOCUREK 1996). Insgesamt sind die Transport- und Ablagerungsprozesse von Flusssystemen weitestgehend gut verstanden.

Neben FÜCHTBAUER (1988) in der deutschen Literatur gibt es zahlreiche internationale Arbeiten, die diese Thematik umfassend betrachten (u.a. PYE 1994, ALLEN 1997, LEEDER 1999). Entscheidend für den Transport und die Ablagerung von Schwermineralen sind die Kornparameter Größe, Form und Dichte (ROBB 2005). Wesentlich komplizierter, allerdings maßgebend für die Bildung von Schwermineralseifen, sind die hydraulischen Sortierungsprozesse. SLINGERLAND & SMITH (1986) unterscheiden diese in Absenkungsverhalten der Körner, Sortierung durch Mitführung von Körnern aus dem Flussbett, Sortierung durch Scherung und Sortierung durch differenzierten Transport von Körnern. Je nach Transportlänge und Strömungseigenschaften der fluviatilen Systeme kommt den genannten Prozessen eine unterschiedliche Bedeutung zu. Hierbei ist anzumerken, dass sich die Sortierung durch Absenkung von Sedimentfracht zwar als relevanter Faktor bei der Sedimentation festmachen lässt, allerdings wenig Aufschluss über die Bildung von Schwermineralanreicherungen gibt. Durch den Prozess der Sortierung durch Scherung werden die Körner je nach Dichte im vertikalen Profil angeordnet. Dadurch kann es besonders bei gleichkörnigen Schwermineralen zu einer Aufkonzentration in bestimmten Profillagen kommen (ROBB 2005).

Als wohl wichtigster Sortierungsprozess fungiert allerdings der Transport im Allgemeinen. Dabei werden Unterschiede der Mineralkörner beim Sortieren durch Absenkung und der Mobilisierung durch Mitnahme über einen längeren Transportweg betrachtet (SLINGERLAND 1984). Die Kraft, die für die Mobilisierung eines Partikels aufgewandt werden muss, wird kritische Scherspannung τ genannt. Mit erhöhter Dichte und Korngröße der Schwerminerale erhöht sich auch die kritische Scherspannung, was bedeutet, dass Körner mit geringerer Dichte und Korngröße eher abtransportiert werden. Das hat zur Folge, dass Leichtminerale ausgewaschen werden und dadurch residuale Schwermineralanreicherungen entstehen können. Dieser Prozess der Mitnahme von Körnern trägt somit maßgeblich zu Schwermineralanreicherungen bei. Nach ROBB (2005) sind dünne, laminare Bänder in fluviatiler Fazies oder auch Schwerminerallagen in Schrägschichtungen Ergebnisse dieser Auswaschung weniger dichter Minerale.

Schwermineralanreicherungen können sich ebenfalls in einer Strandfazies bilden oder durch diese überprägt werden. Die Ausbildung reicht dabei von hochenergetischen, steilen Kiestküsten bis hin zu niedrigenergetischen Ton-Silt-dominierten Flachwässern. Einen näheren

Überblick zu der sedimentologischen Prozesssystematik von Stränden geben HARDISTY (1994) und ALLEN (1997). Strandschwermineralseifen werden zumeist mit der Wellenbewegung der Brandungszone assoziiert. Detailliertere Betrachtungen zu Strandseifen traf HUGHES et al. (2000). Die Schwermineralanreicherungen sind meist durch eine Sortierung durch Scherung bedingt. Nach der Ablagerung und während der Versenkung der Schwermineralanreicherungen der Seifen kann es neben authigener Mineralbildung zu "intrastratal solution" kommen, wobei Minerale gelöst und umgebildet werden können. Ein sicheres Merkmal für diesen Prozess sind so genannte "etching faces" (u.a. NICKEL 1973, FRIIS 1974, MORTON 1984, MORTON 1985, BORG 1986, SALVINO & VELBEL 1989, ANDÒ et al. 2012).

Unterschiede in den Kiessand- und Sandvorkommen der Untersuchungsgebiete sind damit u.a. auf die folgenden Parameter zurückzuführen:

- variierende fluviatile Systeme (mit unterschiedlichen physikalischen Parametern)
- unterschiedliche Liefergebiete
- temporärer mariner Einfluss

4. Lokalitäten der Probenahme und stratigraphische Einordnung

Die Datengrundlage der vorliegenden Untersuchungen basiert auf insgesamt sechs Probenahmelokalitäten, die sich über den Süden Sachsen-Anhalts und den Norden Thüringens verteilen (Abb. 1). Insgesamt wurden acht Großproben genommen und drei Liner-Bohrungen abgeteuft. Fünf der Großproben wurden zu je 300 kg in den Tagebauen Klausas, Grana, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und Prießnitz (MIGALK 2015) und drei zu je ca. 120 kg in den Abbaufeldern Profen-Süd und Schwerzau des Tagebaus Profen genommen (MENNICKE 2015). Die drei Liner-Bohrungen wurden im Abbaufeld Domsen des Tagebaus Profen abgeteuft (DÖBELT 2013).

Bei den Großproben handelt es sich um eozäne Kiessande. Eine nähere stratigraphische Einordnung konnte bei den nicht aus Profen stammenden Proben vorerst nicht mit Sicher-

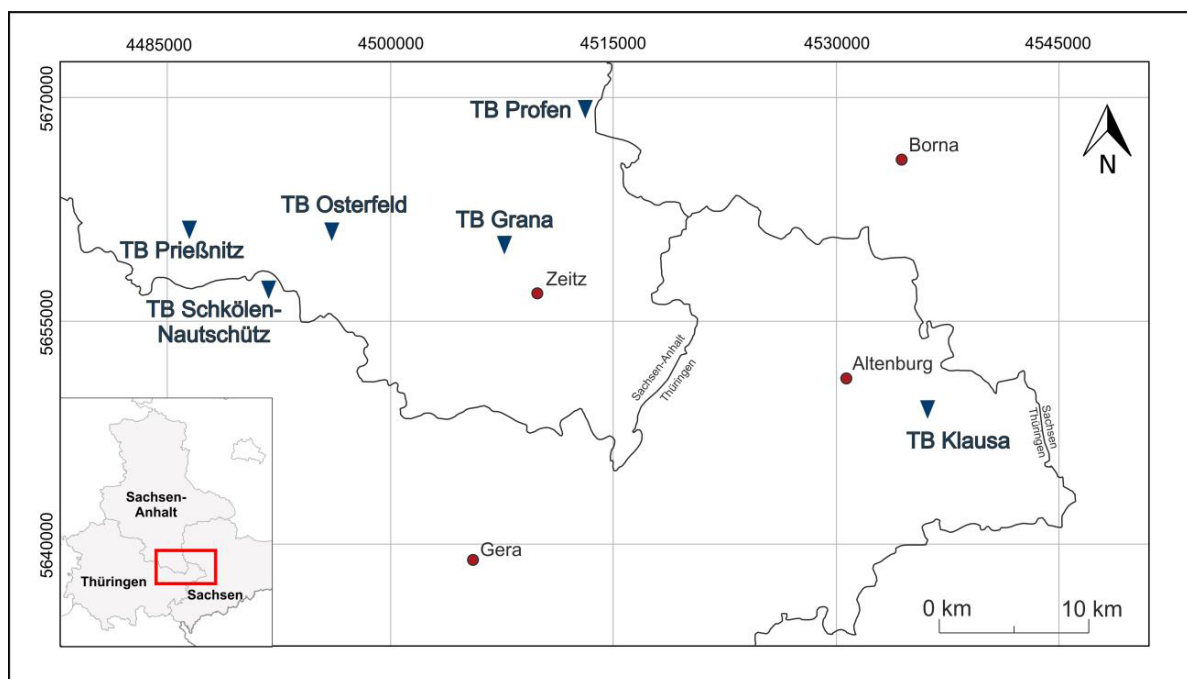


Abb. 1: Geographische Lage der Probenahmelokalitäten: Tagebaue (TB) Profen, Klausas, Grana, Osterfeld, Prießnitz und Schkölen-Nautschütz.

heit vorgenommen werden. Datengrundlage für eine vorläufige Einordnung lieferten Literaturangaben. Diese wurden als Arbeitshypothesen für erste Prüfungen zur Korrelierbarkeit der beprobten Schichten genutzt, machten jedoch gesicherte Aussagen über die chronologische Abfolge der Ablagerungen schwierig. Aus diesem Grund musste für die Proben, die nicht stratigraphisch gesichert waren, vorerst ein größerer möglicher Sedimentationszeitraum eingeräumt werden (Abb. 2, Abschnitte 4.1 bis 4.6). Auf dieser Grundlage wurde angenommen, dass die Domsener Sande die jüngste untersuchte Einheit bilden. Zur Prüfung einer genaueren Einordnung der Kiessande wurden im Laufe der Bearbeitung biostratigraphische Analysen in angrenzenden Tonhorizonten durchgeführt (Abschnitt 7.3).

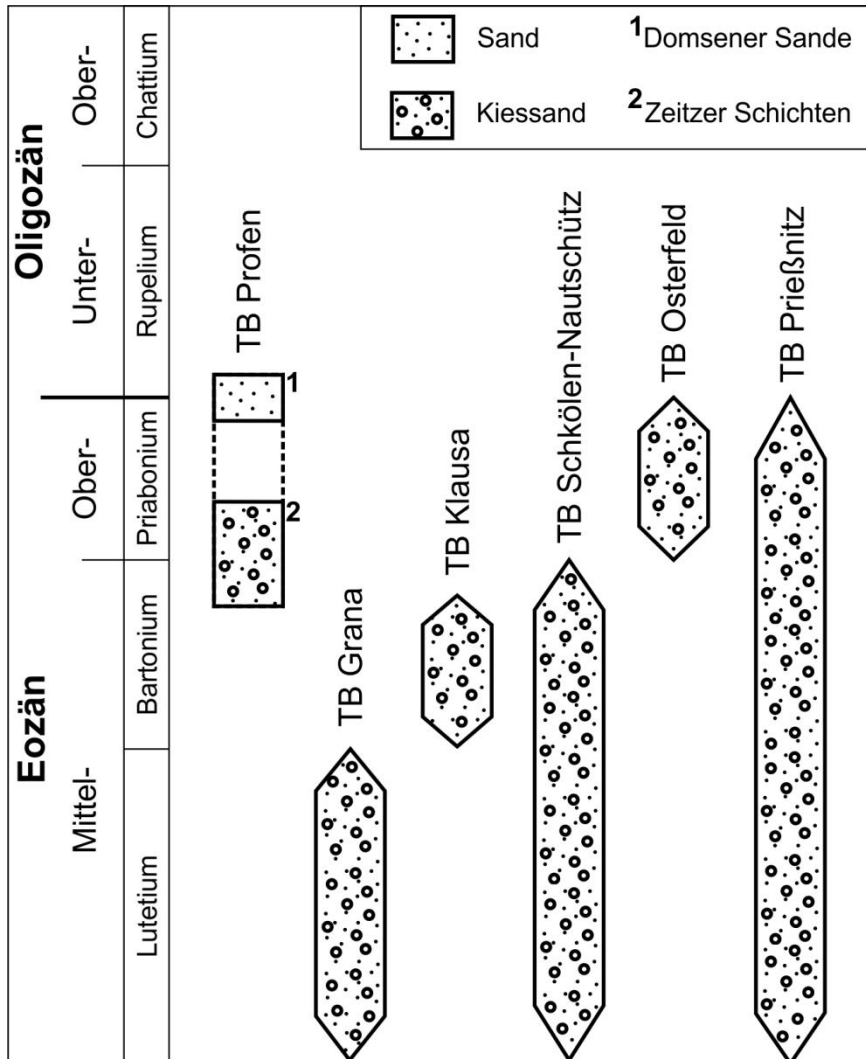


Abb. 2: Vereinfachte, vorläufige stratigraphische Einordnung des Probenmaterials vor Untersuchungsbeginn. Spitz zulaufende Darstellungen stellen die Spanne eines möglichen, nicht sicher abgrenzbaren Sedimentationszeitraumes dar.

4.1 Kiessand-Tagebau Prießnitz

Der Tagebau Prießnitz befindet sich etwa 6 km süd-südwestlich von Naumburg und wird von der MKW Mitteldeutschen Hartstein-Kies- und Mischwerke GmbH betrieben. Im Liegenden treten Ton- und Schlufffolgen, gefolgt von einer Sand-Kies-Wechsellagerung auf, die zum Teil tonige Einschaltungen und Brauneisenkonkretionen führt. Überlagert werden diese von eozänen Kiessanden mit intern stark variierender Korngrößenzusammensetzung. Wechselnde Fließgeschwindigkeiten des Paläoflusses lassen sich durch linsenförmige Ton-Schluff-Einlagerungen und Feinsandhorizonte belegen. Das Alter der Kiessande lässt sich nach EISENÄCHER et al. (1982) auf Grundlage von analogen geologischen Verhältnissen in Nachbargebieten dem Mittel- bis Obereozän zuordnen (s. auch Abb. 7).

4.2 Kiessand-Tagebau Schkölen-Nautschütz

Der Tagebau Schkölen-Nautschütz befindet sich nahe der Landesgrenze von Thüringen zu Sachsen-Anhalt und liegt zwischen den Ortschaften Schkölen und Heidegrund. Derzeitiger Betreiber ist die Unternehmensgruppe Fritz Herrmann. Die aus Röt-Ablagerungen bestehende Prätertiärbasis wird von fluviatilen Kiessanden überlagert, die nach KLAUA et al. (1980) u.a. auf Grundlage von sporenpaläontologischen Untersuchungen dem Mitteleozän zugeordnet werden. Teils sind limnische Einflüsse auf Grundlage von feinsandigen bis schluffigen, partiell kohleführenden Linsen zu beobachten.

4.3 Kiessand-Tagebau Osterfeld

Der Tagebau Osterfeld befindet sich südöstlich des Ortes Osterfeld im Süden Sachsen-Anhalts. Betrieben wird der Tagebau von der Firma Kasper Röcklein KG. Das Abbaugelände lässt sich geologisch einem Randbecken des tertiären Weißelsterbeckens zuordnen. Die prätertiäre Basis wird von verwitterten Sand-, Schluff- und Tonsteinen des Mittleren Buntsandsteines gebildet. An der Tertiärbasis stehen tonige Kiessande an. Die beprobten Kiessande lassen sich nach KLAUA et al. (1987) in das Obereozän einordnen. In ihnen sind partiell Sande und Ton- bzw. Schlufflinsen eingelagert (Abb. 3).



Abb. 3: Beprobte Kiessandschichten im Tagebau Osterfeld (MIGALK 2015).

4.4 Tagebau Grana

Der Tagebau Grana befindet sich im Süden von Sachsen-Anhalt wenige Kilometer nordwestlich von Zeitz. Derzeit wird das Abbaugelände von der Firma SIBELCO Deutschland GmbH betrieben. Der Tagebau Grana wird geologisch der Zeitzer Bucht zugeordnet, welche sich am Rand des Weißelsterbeckens befindet. Das Prätertiär im Raum Grana besteht aus Buntsandstein, der am Kontakt zum Tertiär eine Verwitterungskruste ausgebildet hat. Aufliegend sind fluviatile Kiessande vorhanden, welche nach NUGLISCH et al. (1990) vermutlich im Verlauf des unteren bis mittleren Mitteleozäns durch Flusssysteme aus dem Süden transportiert wurden.

4.5 Kiessand-Tagebau Klausau

Der Tagebau Klausau befindet sich wenige Kilometer südöstlich der Stadt Altenburg im Nordosten Thüringens. Der Betreiber des Tagebaus ist die Heim-Gruppe. Der Tagebau Klausau

gehört geologisch zum Altenburger Vorsprung, der sich im Bereich des Schiefermantels des Granulitgebirges befindet. Die Probenahme erfolgte aus dem Kiessandhorizont des Altenburger Flusssystem, der nach GLÄSSER & WIEFEL (1997) im höheren Miozän sedimentierte. Teilweise befinden sich in den Kiessanden schluffig-sandige, partiell kohleführende Linsen, die vermutlich während Trockenphasen unter Stillwasserbedingungen abgelagert wurden.

4.6 Tagebau Profen

Der Tagebau Profen befindet sich im südlichen Teil Sachsen-Anhalts an der Grenze zu Sachsen. Er liegt etwa 11 km süd-südwestlich der Ortschaft Zeitz und besitzt eine Nord-Süd-Ausdehnung von etwa 6 km. Aktuell befindet sich der Tagebau im Betrieb durch die Mitteldeutsche Braunkohle AG (MIBRAG).

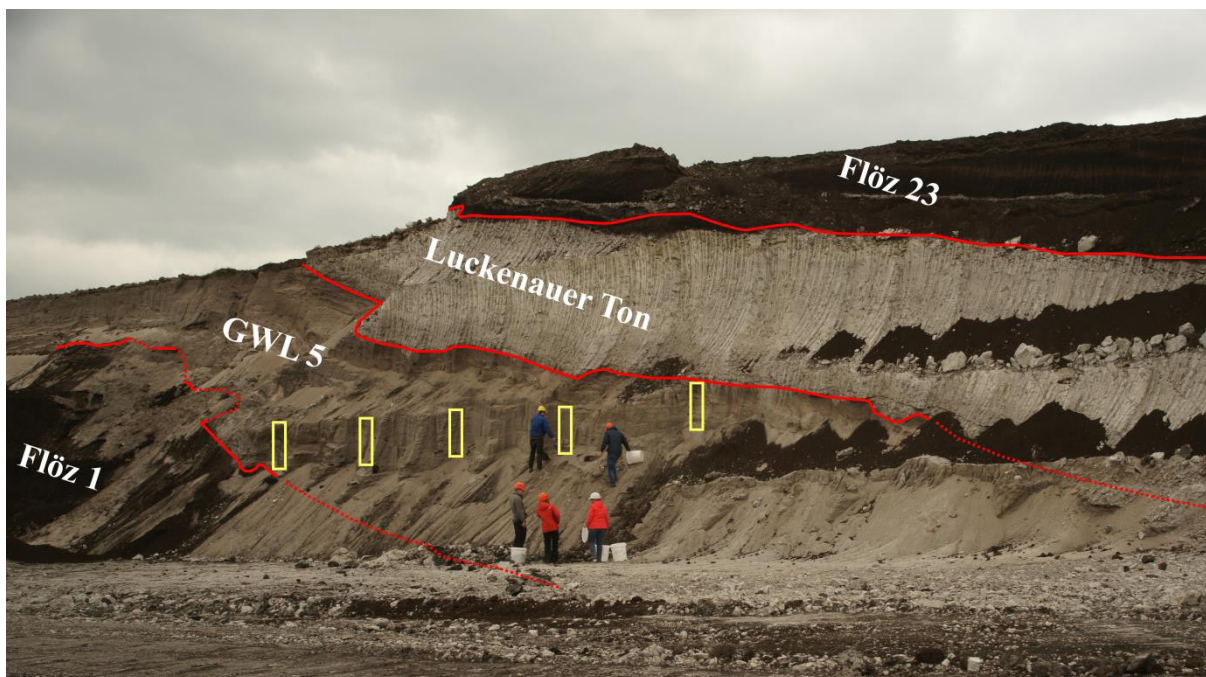


Abb. 4: Beprobung der Zeitzer Schichten (GWL 5), Probenahmepunkt Schwerzau I (Foto: Stedingk 2015).

Die Basis für die Tertiärsedimente im Tagebau Profen bilden sowohl Schluffsteine des Buntsandsteines als auch Plattendolomite des Zechsteins. Überlagert wird das Prätertiär von der Borna-Formation. Diese besteht aus Wechsellagerungen von Sanden bzw. Kiessanden, Ton/Schluffen und Braunkohleflözen. Der beprobte Kiessand wird als "Zeitzer Schichten" bzw. "Grundwasserleiter 5" angesprochen und der Borna-Formation zugeordnet (STANDKE et al. 2010).

Es handelt sich dabei um einen Kiessandkörper, der sich zwischen dem Flöz 1 (Sächsisch-Thüringer Unterflöz) und dem Liegendton des Flözes 23 (Thüringer Flöz) befindet (Abb. 4). Die drei genommenen Proben stammen aus dem Norden des Abbaufeldes Profen Süd (Probe Domsen), aus dem südlichen Bereich des Abbaufeldes Schwerzau (Abb. 4, Probe Schwerzau I) und aus dem zentralen Bereich des Abbaufeldes Schwerzau (Abb. 5, Probe Schwerzau II).

Die Domsener Sande sind Teil der 70 m bis 150 m mächtigen tertiären Schichtenfolge des Braunkohletagebaugesbietes Profen. Dabei treten die Sande ausschließlich zwischen dem Böhleiner Oberflöz (Flöz IV, Flöz Gröbers, einschließlich Flöz Dieskau & Lochau) und dem Thüringer Hauptflöz (Flöz III, Flöz 23o, Flöz Schkeuditz) auf. Zum Hangenden finden sich zum Teil Tertiärquarzite, die als Verkieselungen im Grenzbereich zwischen Strand- und Dünensanden

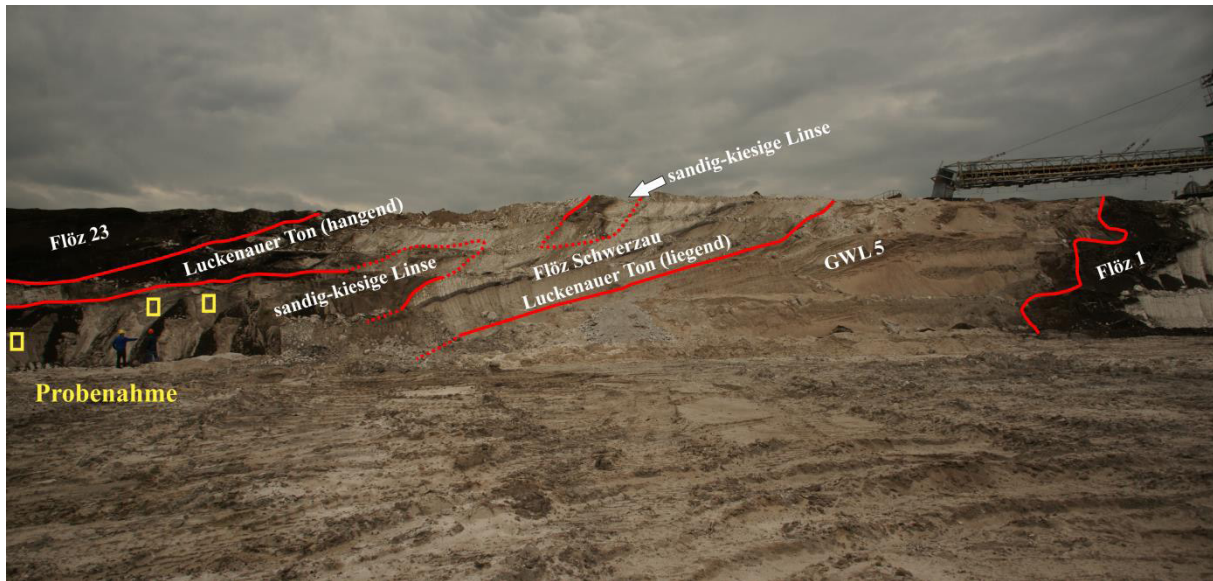


Abb. 5: Beprobung der Zeitzer Schichten (GWL 5), Probenahmepunkt Schwerzau II (Foto: Stedingk 2015).

durch lagunär beeinflusstes Grundwasser interpretiert werden (ELLENBERG & DOLL 1983). Die Domsener Sande erstrecken sich über weite Teile der Region und weisen charakteristische, makroskopisch sichtbare Schwerminerallagen auf (Abb. 6).

5. Geologischer Rahmen und Paläogeographie

Die beprobten Tagebaue liegen in direkter Nähe bzw. im Bereich des sogenannten Weißelsterbeckens. Die Prätertiäroberfläche wird von triassischen Gesteinen des Buntsandsteins bzw. im Abbaugbiet Prießnitz vom Mittleren Muschelkalk aufgebaut. Im Gebiet Klausä besteht diese aus kambroordovizischen Gesteinen des Schiefermantels vom Granulitgebirge. Das gesamte Gebiet wurde ab der Kreide herausgehoben, sodass es zu starker Erosion und Verwitterung der bis dahin abgelagerten Gesteine kam, die bis in das Eozän hineinreichte (STANDKE et al. 2010, STANDKE & SUHR 2008). Im beginnenden Tertiär (Abb. 7) war das Untersuchungsgebiet



Abb. 6: Deutlich sichtbare Schwerminerallagen in den Domsener Sanden (Foto: Stedingk 2011).

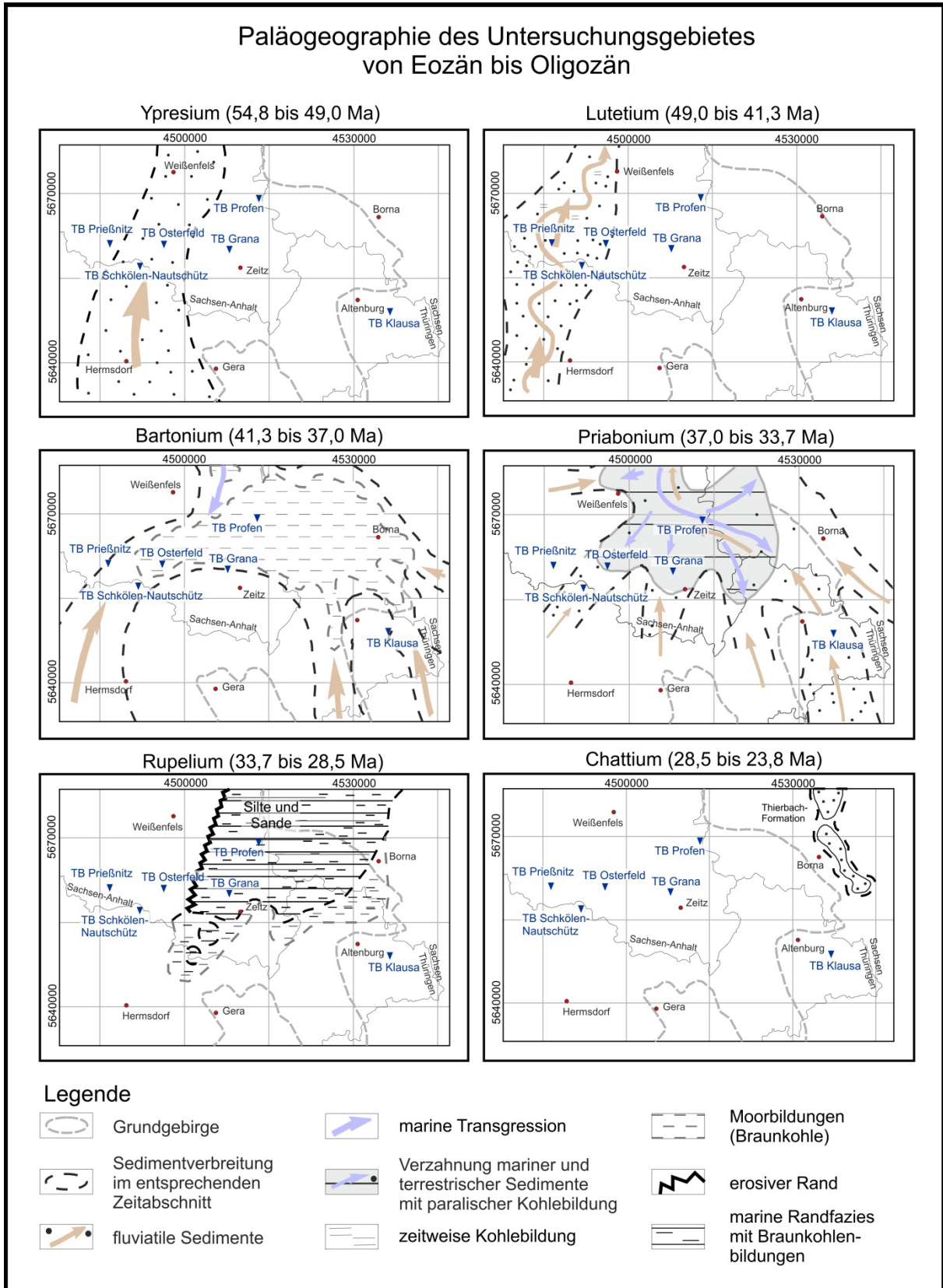


Abb. 7: Paläogeographie des mitteldeutschen Raumes vom Untereozän bis zum Oberoligozän mit Altersangaben nach MENNING et al. (2012) in Millionen Jahren (Ma) (Abbildung bearbeitet nach BACHMANN 2008).

größtenteils eingeebnet (BERKNER 2004). Dessen Lage am Südrand der Nordwesteuropäischen Tertiärsenke bzw. der Paläo-Nordsee führte zu temporären Verbindungen mit dem Uratlantik und damit zur Beeinflussung durch den zeitlichen und räumlichen Wechsel von marinen Trans- und Regressionszyklen (STANDKE & SUHR 2008).

Man erkennt eine Zyklizität der Ereignisse an der wiederholten Abfolge grob- bis mittelklastischer, feinklastisch-pelitischer und biogener Sedimente (BERKNER 2004). Ab dem mittleren Eozän begann sich die Region hauptsächlich aufgrund von Subrosion großflächig abzusenken (EISSMANN 2002). Es bildete sich ein hufeisenförmiger Senkungsraum mit einer nach Norden gerichteten Öffnung - das sogenannte Weißelsterbecken. Das Becken gilt vorerst als limnisch-fluviatil betonte Senke, die von Flüssen durchströmt und zeitweise von Mooren bedeckt wurde (s. Grana und Profen, Abb. 7). Zusätzlich waren weitere Randbuchten wie das Osterfelder Becken vorhanden, in der sich das Abbaugelände Osterfeld befindet (STANDKE 2002). Das Gebiet wurde zur Hauptentwässerungspassage von zwei aus dem Süden kommenden Flusssystemen. Dabei handelte es sich um das Zwickau-Altenburger Flusssystem, das bei Altenburg zusammenfloss, und das Vogtländisch-Thüringische Flusssystem, das seinen Zusammenfluss östlich von Zeitz hatte (KÜHL et al. 2006).

Vom Ypresium (Untereozän) bis zum Lutetium (unteres bis mittleres Mitteleozän) waren die Gebiete Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und Prießnitz fluviatilen Schüttungen aus dem Süden unterlegen (Abb. 7). Im Raum Profen kam es zur Ablagerung klastischer Sedimente sowie erster tertiärer Braunkohlebildung, die zusammen die Schichten der Profen-Formation bildeten (RASCHER et al. 2005). Zudem wird diese Formation durch die mitteleozänen Sedimente der „Bornaer Folge A“ repräsentiert (STANDKE & SUHR 2008). Während des Bartoniums (Mittlereozän) blieb der fluviatile Einfluss in den genannten Regionen erhalten, weitete sich jedoch auch auf die Gebiete Grana und Klausau aus. Des Weiteren traten gehäuft Moorbildungen auf, die für die heutigen Braunkohlehorizonte verantwortlich sind. Im Weißelsterbecken bildeten sich die Bornaer Folgen B und C, die allgemein als „Ältere Zeitzer Flusssande“ (EISSMANN & LITT 1994) oder auch „Zeitzer Schichten“ (STANDKE et al. 2010) bekannt sind. Sie werden auch als GWL 5 bezeichnet und besitzen neben deren fluviatil-sedimentologischen Eigenschaften auch marine Merkmale (u.a. KRUTZSCH 2008). Im Zuge von Transgression weitete sich der marine Einfluss im Priabonium (Obereozän) bis in den Raum Zeitz in die Abbaugelände Grana und Osterfeld aus. Es kam dort zu einer Verzahnung mariner und terrestrischer Sedimente. Der GWL 5 wird vom Flöz 23 (Thüringer und Bornaer Hauptflöz) überlagert. Folgend sedimentierten die Domsener Schichten, welche die Domsener, Hainer und Mittleren Flusssande sowie den Haselbacher Ton zusammenfassen (STANDKE 2008). Diese weisen sowohl Flusssedimente als auch Ablagerungen eines Ästuars auf. Die beprobten Domsener Sande lagerten sich dabei zwischen dem Obereozän (Priabonium) und dem Unteroligozän (Rupelium) im flach-marinen Bereich bzw. im Uferbereich ab. Zum Teil bestand ein Einfluss von lagunär überprägten Grundwässern, welcher die Herausbildung von Tertiärquarziten zur Folge hatte (ELLENBERG & DOLL 1983). Der obere Teil der Domsener Schichten besteht aus meist flächenhaft verbreiteten marinen Sedimenten (STANDKE et al. 2010).

Die die beprobten Schichten stratigraphisch überlagernden Sedimente sind bis in das Oberoligozän von weiteren Trans- und Regressionen gekennzeichnet und weisen marine, marin-brackische sowie fluviatile Einflüsse auf (BERKNER 2004, RASCHER et al. 2005, EISSMANN 2002). Im Folgenden wurde das gesamte Gebiet bis hinein in das Pliozän gehoben und erodiert (EISSMANN 2002). Während der Eiszeiten kam es zu einer diskordanten Ablagerung glazigener und moränaler Sedimente des Elster- und Saale-Glazials sowie lokal zu Lössablagerungen des Weichsel-Hochglazials (LITT & WANSCHA 2008). Das Gebiet unterlag zwischenzeitlich der Erosion, die bis heute anhält (BERKNER 2004).

6. Methodik

Die Aufbereitung der Proben erfolgte auf unterschiedliche Art und Weise. Je nach Eigenschaften der Proben und der Untersuchungsschwerpunkte gab es Abweichungen in den Aufbereitungsverfahren. Die jeweiligen Vorgehensweisen sind in Abb. 8 dargestellt. Die Verwendung des Holman-Wilfley-Herdes, des Magnetscheiders und der Dichteseparierung mittels Natriumpolywolframat-Lösung erwiesen sich schon in den Arbeiten von WOLF (2010), ALLENBERG (2011) und DÖBELT (2011) als zweckdienlich und wurden dementsprechend auch bei der Aufbereitung der Proben der vorliegenden Arbeiten als Grundlage genutzt.

6.1 Probenahme

Aufgrund unterschiedlich beprobter stratigraphischer Einheiten und variierender Korngrößen (Ton-Feinsand-Kies) wurden im Rahmen der einzelnen Untersuchungsschwerpunkte verschiedene Probenahmearten angewandt. Je nach Zielstellung und Material variiert die Probenmenge dabei zwischen einigen hundert Gramm für die Pollenanalyse und 3 kg bis 300 kg für die Herstellung eines Schwermineralkonzentrates.

6.1.1 Probenahme am Stoß mittels Bagger/Schaufel

Die zu beprobenden Kiessande wurden anhand der durch lagerstättenkundliche Untersuchungen im Rahmen der Tagebauerschließung erstellten stratigraphischen Profile ausgewählt. Durch vorangegangene Arbeiten (ALLENBERG et al. 2012) konnte definiert werden, dass die zu entnehmende Probenmenge ca. 100 kg der Sandfraktion enthalten sollte. Aus dem durch die Tagebaubetreiber bekannten ungefähren Kies-Sand-Verhältnis ergab sich für MIGALK (2015) eine zu entnehmende Gesamtprobe von ca. 300 kg Kiessand. Im Idealfall konnte durch den Einsatz von einem Bagger ein frischer Stoß angelegt werden. In den Tagebauen Grana und Schkölen-Nautschütz wurde das Gesamtprofil mittels Bagger abgezogen, aufgehäuft und anschließend mittels Schaufel eine Teilprobe von ca. 300 kg entnommen. Die Lagerstätte Klausä verfügte über eine mächtige aufgeschlossene Kiessandschicht, wodurch aufgrund fehlender Zwischenstrossen nur der stratigraphisch ältere Teil des Profils mittels Bagger erreicht werden konnte. Außerdem waren unterhalb ca. 3 m des Profils bis zur Tagebausohle verschüttet, sodass nicht ausgeschlossen ist, dass ein Teil des stratigraphisch älteren Kiessandprofils nicht beprobt werden konnte. In den Lagerstätten Osterfeld und Prießnitz erfolgte die Beprobung des gesamten aufgeschlossenen Kiessandprofils mittels Schaufeln direkt am Stoß.

Durch die Erkenntnisse von MIGALK (2015) hinsichtlich der Menge des aus 300 kg eozänen Kiessandes zu gewinnenden Schwermineralkonzentrates, aufgrund des bekannten Kies-Sand-Verhältnisses und der räumlichen Nähe konnte die Probenmenge bei MENNICKE (2015) auf 100-150 kg pro Kiessandprobe reduziert werden.

MENNICKE (2015) beprobte die Zeitzer Schichten im Tagebau Profen an drei unterschiedlichen Lokalitäten. Der Probenahmepunkt "Schwerzau I" wurde über eine Länge von ca. sechs Metern beprobt (145 kg). Des Weiteren wurde eine Kies-Sandlinse im Bereich des Luckenauer Tones beprobt (130 kg). Es wird vermutet, dass es sich bei dieser Lokalität (Schwerzau II) um die Einschaltung einer Kies-Sandlinse der Zeitzer Schichten handelt. Um die Gesamtmächtigkeit der Schichten abzudecken, wurden je Lokalität mehrere Teilproben entnommen. Die dritte Großprobe (Domsen) wurde ebenfalls den Zeitzer Schichten im Abbaubereich Profen Süd entnommen (ca. 100 kg).

6.1.2 Trockenkernbohrverfahren

Drei ungestörte Liner-Bohrungen wurden im Abbaufeld Domsen, TB Profen, mittels Trockenbohrverfahren abgeteuft (DÖBELT 2013). Die Bohrlöcher wurden anschließend von der Brunnen- und Bohrlochinspektion Gommern GmbH (BBi) und der Fugro Consult GmbH

geophysikalisch vermessen und dokumentiert. Der erbohrte Bereich erstreckt sich dabei vom Thüringer Hauptflöz (Flöz III, Liegendes) bis in den Bereich des Haselbacher Tons (Hangendes). Die Liner haben einen Durchmesser von ca. 10 cm und die Bohrungen eine Gesamtlänge von 16 m bis 28 m. Nach der Bohrkernaufnahme erfolgte anhand visueller Merkmale und der geophysikalischen Auswertung eine Einteilung in einzelne für die Schwermineralaufbereitung zu beprobende Bereiche (6-12). Der Liner-Bohrung L26265Z wurden mithilfe des Riffelteilers Teilproben für eine Siebkurvenanalyse am LAGB Sachsen-Anhalt entnommen.

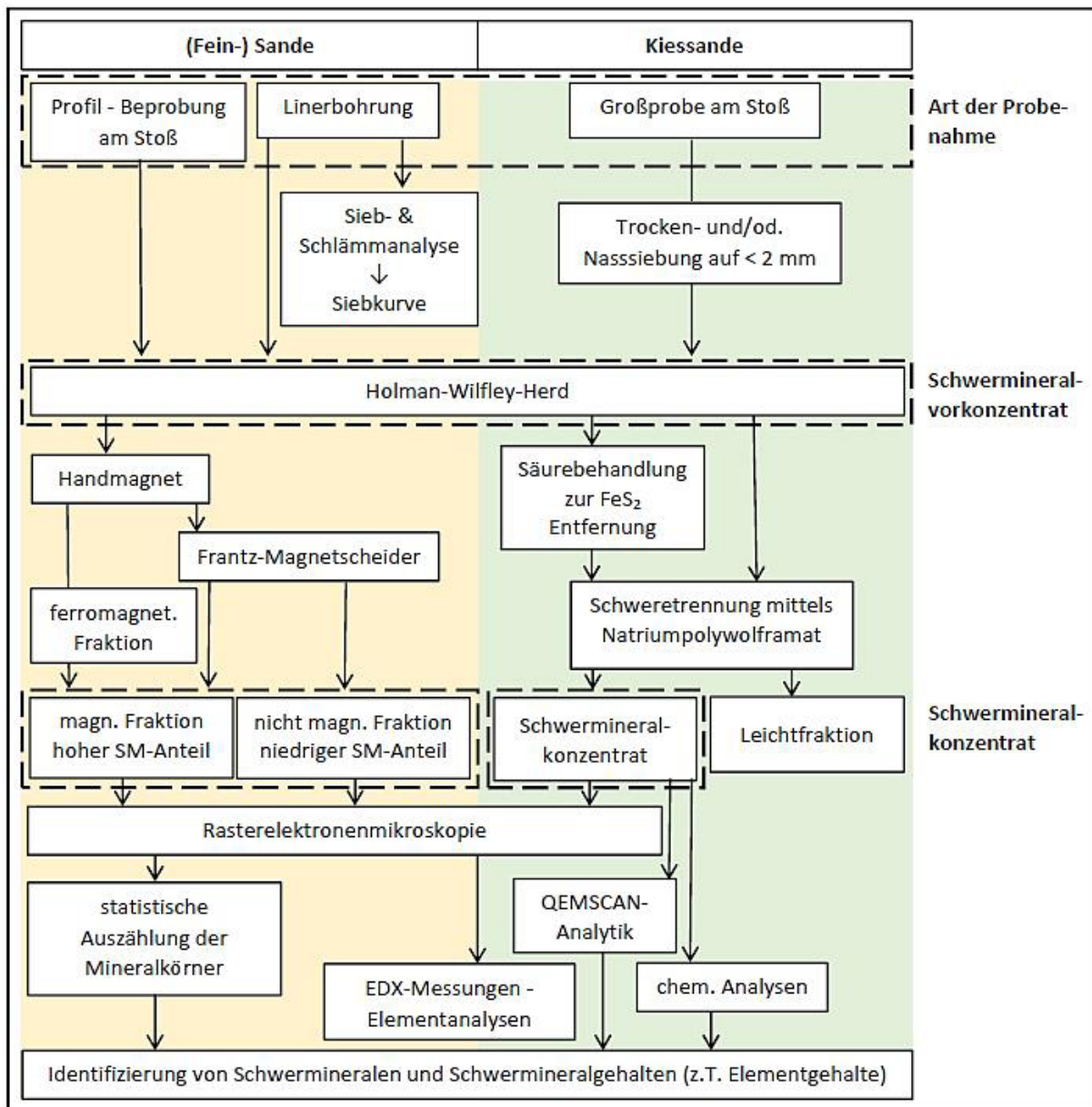


Abb. 8: Vereinfachtes Fließschema der durchgeführten Arbeitsschritte.

6.2 Homogenisierung und Ermittlung der Trockenmasse

Nach den Probenahmen musste aus dem in-situ feuchten Probenmaterial eine Trockenmasse ermittelt werden. Dieses Verfahren gestaltete sich bei den Bearbeitern unterschiedlich. MIGALK (2015) trocknete das gesamte Probenmaterial in Trockenschränken des LAGB Sachsen-Anhalt bei 110 °C und wog im Anschluss die Trockenmasse aus. DÖBELT (2013) ließ die Proben lufttrocknen. MENNICKE (2015) ermittelte die Trockenmasse rechnerisch. Dafür wurden

vier repräsentative Teilproben je Großprobe entnommen. In der Praxis wurde dabei das Ausgangsprobenmaterial mit einer Schaufel homogenisiert, statistisch auf 4 kg heruntergeteilt und auf 4 Einzelproben je 1 kg aufgeteilt. Die Teilproben wurden getrocknet und über den Wassergehalt die Trockenmasse berechnet.

6.3 Probenvorbereitung für Schwermineralgewinnung

Für die Schwermineralaufbereitung musste das Probenmaterial in einer Korngröße < 2 mm vorliegen. Die oligozänen Domsener Sande wiesen die gewünschte Korngröße bereits auf, so dass eine Siebung des Materials nicht notwendig war. MIGALK (2015) verarbeitete das Probenmaterial der Großproben Grana, Klaus, Schkölen-Nautschütz, Prießnitz und Osterfeld mit einer Nasssiebung des getrockneten Kiessandes. MENNICKE (2015) trennte den Siebvorgang der Kiessande aus Profen in ein Trocken- und ein Nasssiebverfahren. Die Korngrößenbestimmung für die Siebkurvenanalyse der Teilbereiche der Bohrung L26265Z erfolgte nach DIN 18123 (1996) mittels kombinierter Siebschlammanalyse.

6.4 Herstellung der Schwermineralvorkonzentrate mittels Holman-Wilfley-Herd

Zur Herstellung eines Schwermineralvorkonzentrates aus der Sandfraktion wurde der Holman-Wilfley-Herd des Instituts für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD) der Technischen Universität Clausthal verwendet. Dabei handelt es sich um eine gravitative Separationsmethode, die Mineralkörner der Dichte nach mithilfe von Wasserspülung und niederfrequentem Rütteln trennt. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte der Körner bilden sich im Ergebnis eine Schwermineral-, eine Leichtmineral- und eine Schwemmfraction aus (Abb. 9). Die aufgefangenen Schwerminerale wurden anschließend 1 bis 12 Stunden bei 80-100 °C getrocknet.

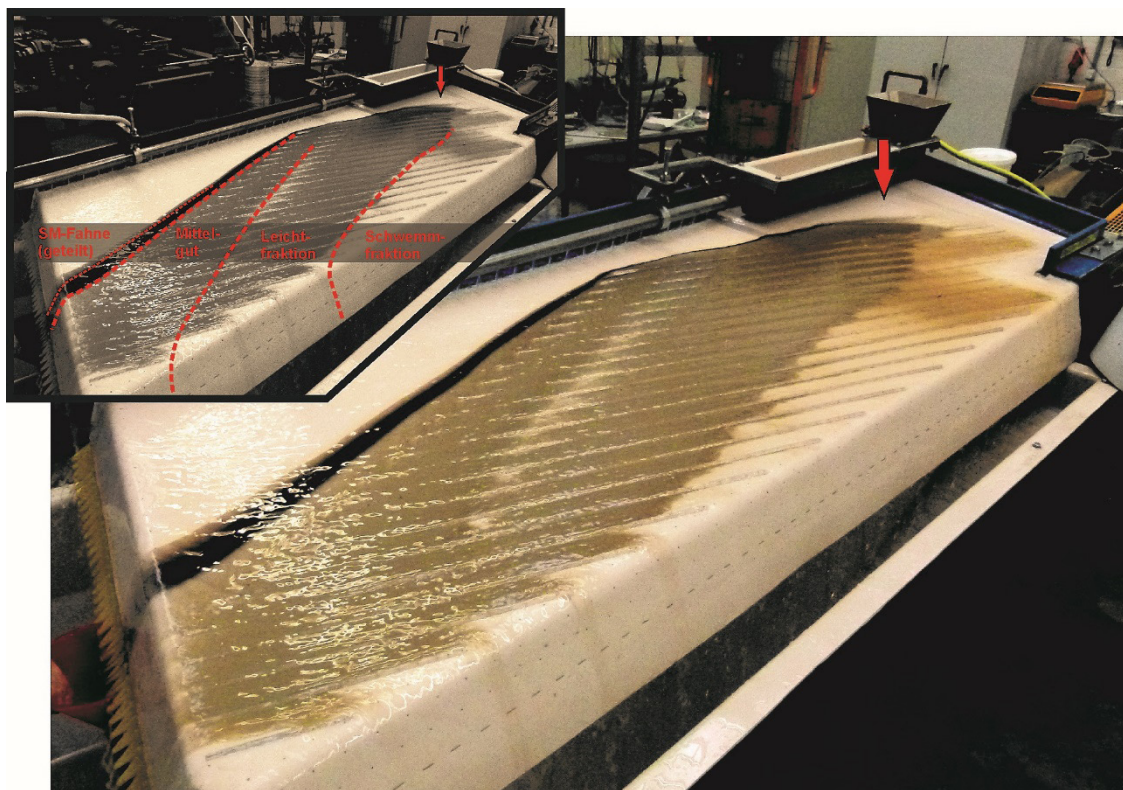


Abb. 9: Anwendung des Holman-Wilfley-Herdes. Links oben sind die verschiedenen Bereiche der Sedimentseparation dargestellt (DÖBELT 2013).

6.5 Herstellung Schwermineralkonzentrat

6.5.1 Der Frantz-Magnetscheider

Der Frantz-Magnetscheider ermöglicht eine kostengünstige Aufbereitung der am Holmann-Wilfley-Herd gewonnenen Schwermineralvorkonzentrate. Dabei kann das Konzentrat mit einem einstellbaren elektrischen Magneten in eine magnetische, an Schwermineralen angeereicherte und eine nicht magnetische Fraktion geteilt werden (Abb. 10). Das Prinzip beruht auf der unterschiedlichen Magnetisierbarkeit von Schwermineralen, wobei nur wenige Schwerminerale wie Zirkon oder Topas als nicht magnetisch beschrieben werden (BOENIGK 1983). Vor dem Probendurchsatz sind die ferromagnetischen Bestandteile der Probe mittels Handmagneten abzutrennen.

Das Verfahren wurde aufgrund der hohen Probenanzahl bei den Domsener Sanden als günstige Anreicherungsmethode am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD) der Technischen Universität Clausthal getestet (DÖBELT 2013). Mit der Separation in verschiedene Fraktionen war die Aufkonzentration selten vorkommender Schwerminerale möglich.

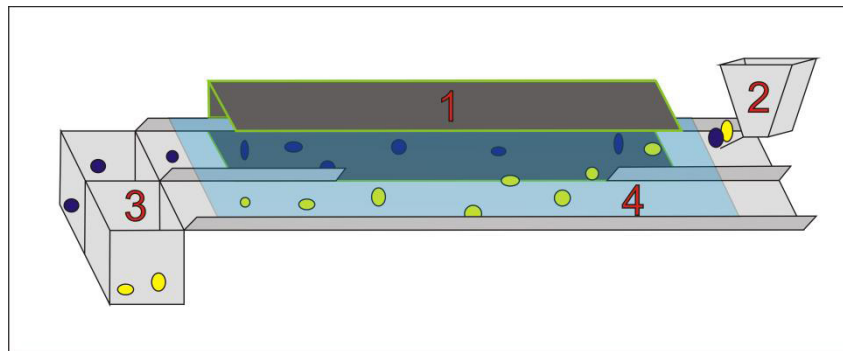


Abb. 10: Frantz-Magnetscheider mit [1] Dauermagnet, [2] Einfülltrichter, [3] Auffangbehälter und [4] abgedeckter Rüttelschiene; gelbe Körner = nicht magn. Fraktion, blaue Körner = magn. Fraktion (DÖBELT 2011).

6.5.2 Dichtentrennung mittels Natriumpolywolframat-Lösung

Die Schwerentrennung mittels Natriumpolywolframat-Lösung ermöglicht eine nahezu vollständige Trennung der Schwerminerale von den Leichtmineralen. Bei der Natriumpolywolframat-Lösung ($\text{Na}_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}] \cdot \text{H}_2\text{O}$) handelt es sich um eine hellgelbe bis hellgrünliche Schwereflüssigkeit (TC-TUNGSTEN COMPOUNDS 2015). Bei den von MIGALK (2015) und MENNICKE (2015) durchgeführten Schwerentrennungen wurde sie auf eine Dichte von $2,83 \text{ g/cm}^3$ eingestellt. Prinzipiell orientiert sich die Funktionsweise einer solchen Schwerentrennung an der Dichteinversion unterschiedlich dichter Körner mit der Flüssigkeit (Abb. 11). Das Probenmaterial aus Grana, Klaus, Prießnitz, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und die Proben Domsen, Schwerzau I und Schwerzau II aus Profen wurden mithilfe dieses Verfahrens im Inst. für Geol. Wissenschaften und Geographie der MLU aufbereitet, um aus den entsprechenden Vorkonzentraten des Holman-Wilfley-Herdes reine Schwermineralkonzentrate herzustellen. Dabei musste das Probenmaterial auf $< 1 \text{ mm}$ gesiebt werden, da die verwendeten Geräte keine größeren Mineralkörner zuließen. Im Falle der Probe Schwerzau II erfolgte eine vorherige Säurebehandlung, da authigene Eisensulfide die Aufbereitung erschwert und die Ergebnisse verfälscht hätten.

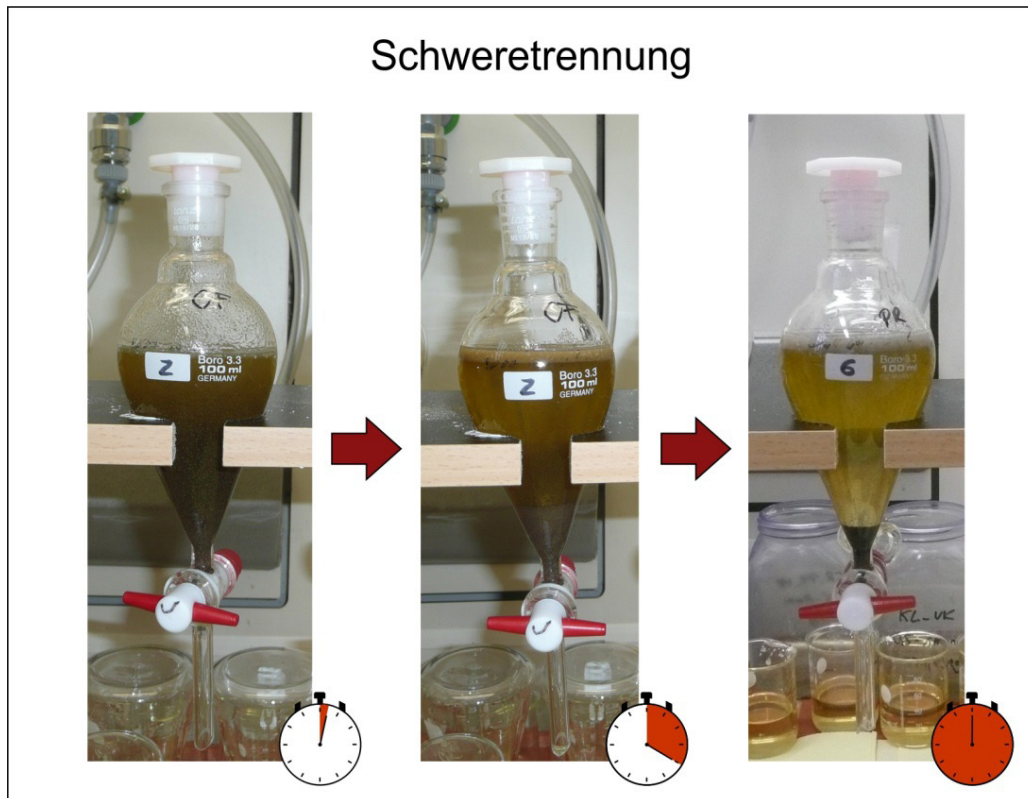


Abb. 11: Trennung in Schwer- und Leichtmineralfraktion mittels Natriumpolywolframat-Lösung. Deutlich sichtbar wird die Aufklärung der Suspension durch die Sedimentation der Schwerminerale und den Auftrieb der weniger dichten Minerale (MIGALK 2015).

7. Analytik

7.1 EM-EDX-Analyse

Ein Rasterelektronenmikroskop (REM) der Firma JEOL (JEOL JSM 6300) im Inst. für Geowissenschaften und Geographie der MLU wurde für die Analytik verwendet. Die Analyse erfolgte mit einem am REM installierten EDX-Detektor der Firma Bruker (X-Flash 5010). Die Auswertung der aufgenommenen EDX-Spektren wurde mit der Quantax 200-Software von Bruker durchgeführt.

Zur Identifikation der einzelnen Schwerminerale wurde ein Elementspektrum mittels EDX-Messung aufgenommen. Über das für jedes Mineral typische Spektrum konnten die Einzelminerale identifiziert werden. Eine Identifizierung von unbekanntem Mineralen erfolgte über die Analyse der chemischen Zusammensetzung.

Um eine statistisch gesicherte Aussage zur Quantifizierung des Schwermineralspektrums zu erhalten, erfolgte bei der Analyse der Domsener Sande durch DÖBELT (2013) eine Auszählung der Minerale. Jedes am Holman-Wilfley-Herd hergestellte Vorkonzentrat wurde am Frantz-Magnetscheider in zwei Fraktionen unterteilt, von denen je ein Dickschliff hergestellt und je Schliff ca. 600 Minerale ausgezählt wurden. Durch die Teilung in zwei Fraktionen konnten auch Minerale erfasst werden, die nur in geringsten Konzentrationen vorkommen.

Die Analyse mittels EDX-Messung wurde auch durch MIGALK (2015) und MENNICKE (2015) an den Schwermineralkonzentraten der Kiessandproben Grana, Klaus, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld, Prießnitz und Profen angewandt. Der Fokus lag hierbei allerdings auf qualitativen, mineralogischen Untersuchungen zur genaueren Charakterisierung der Schwerminerale.

Somit konnten SEE-Phosphate (Monazit, Xenotim und Al-(Ba)-Phosphate) genauer bezüglich ihrer Elementgehalte analysiert und extern erzeugte Daten überprüft und ergänzt werden.

7.2 QEMSCAN-Analyse

Die vorliegenden Analysen der Proben aus Grana, Klaus, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld, Prießnitz und Profen wurden am „Zeiss EVO 50 scanning electron microscope“ von der Cambridge School of Mines (University of Exeter) durchgeführt. Wegen des großen Korngrößenpektrums und dem Ziel, die gesamte mineralogische Zusammensetzung sowie Aussagen zu Mineralverwachsungen zu erhalten, wurde der Fieldscan-Modus (FS-Modus) für die Analysen genutzt. Dabei wurde der Elektronenstrahl im Abstand von 10 µm über die gesamte Probe geleitet. Gemessen wird generell im „backscatter electron mode“, sodass die Partikel definitiv vom Hintergrund differenziert werden können. Die Methode identifiziert mit Hilfe mineral-spezifischer Röntgenspektren Mineralphasen und liefert eine mengenmäßige Abschätzung der auftretenden Volumenanteile basierend auf einem 2D-Schnitt (Abb. 12).

Das Resultat sind ein Falschfarbenbild des analysierten Streupräparats, die mineralogische Zusammensetzung der Probe sowie Angaben zu Mineralverwachsungen (ROLLINSON 2015). Einschränkungen in der Analytik bestehen bei der Unterscheidung von Polymorphen sowie bei Mineralen mit sehr ähnlicher chemischer Zusammensetzung (PIRRIE & ROLLINSON 2011). Eine Stärke der QEMSCAN- Methode liegt im Erkennen des Vorhandenseins derselben Wertkomponente in verschiedenen, auch nicht extrahierbaren Mineralphasen.

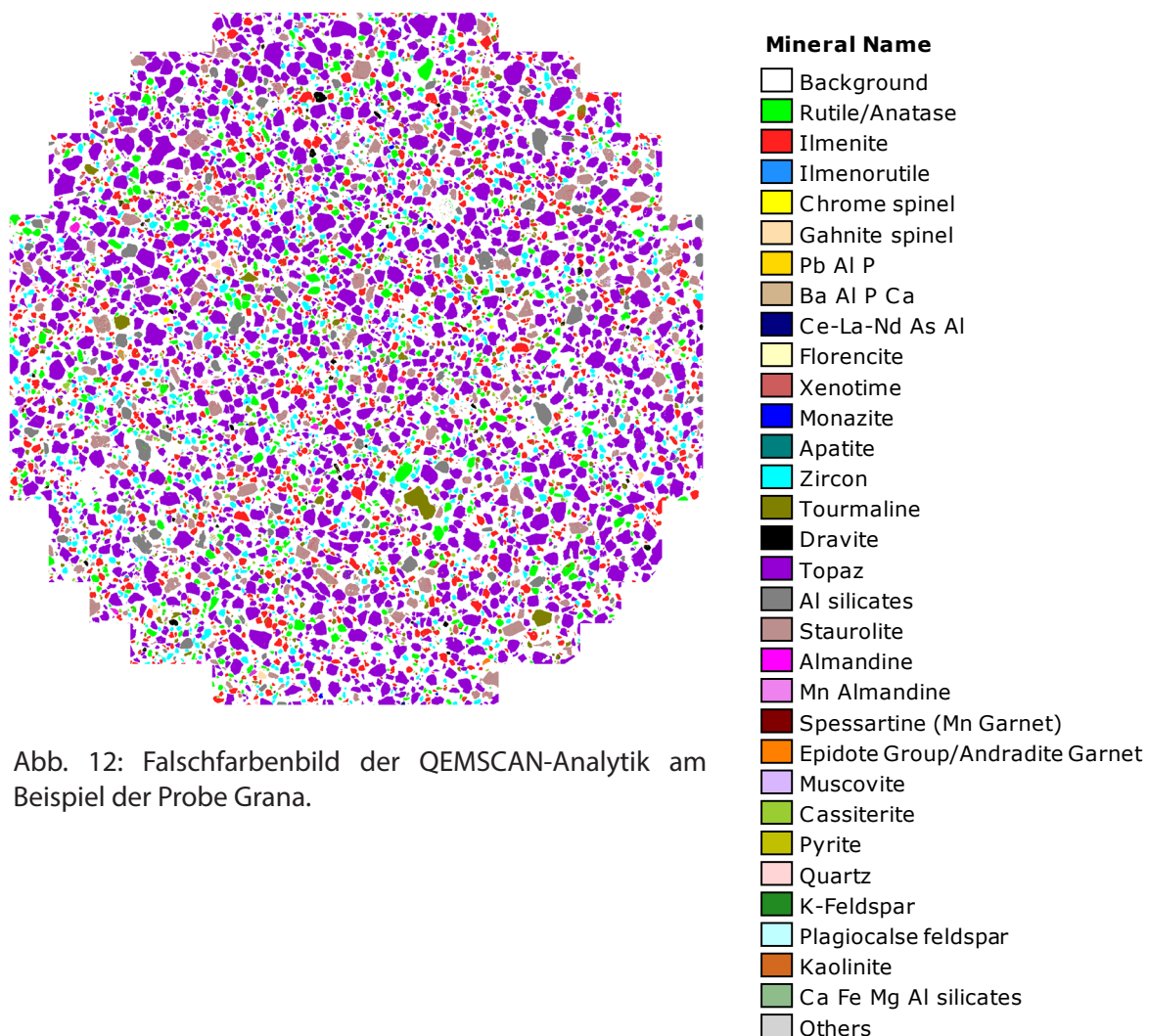


Abb. 12: Falschfarbenbild der QEMSCAN-Analytik am Beispiel der Probe Grana.

7.3 Biostratigraphische Analyse

Für die biostratigraphischen Untersuchungen wurden bevorzugt Tonproben aus möglichst an die beprobten Kiessande angrenzenden Schichten für die Pollenanalyse genommen (ca. 0,5 kg). Diese wurden bei MIGALK (2015) in den Tagebauen Grana, Klaus, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und Prießnitz durchgeführt, um eine Korrelation aller Kiessand-Proben zueinander vornehmen zu können. Die Aufbereitung der Proben fand im Pollen-Labor des Geographischen Institutes der Friedrich-Schiller-Universität Jena statt. Dr. H. Blumenstengel und Dr. E. Endtmann führten die mikropaläobotanische Analyse durch, wobei die auftretenden Palynomorpha und Planktonformen (Abb. 13) im Durchlichtmikroskop bei 400- bis 600-facher Vergrößerung bestimmt wurden (BLUMENSTENGEL & ENDTMANN 2014).

Es ist zu beachten, dass die Analyse durch eine geringe Probenanzahl und -menge erschwert war. Dementsprechend erlaubten eine geringe Anzahl auftretender Pollen zwar eine grobe zeitliche Einordnung, die jedoch statistisch nicht gesichert ist.



Abb. 13: Beprobung einer Tonlinse im Tagebau Grana (links, Foto F. Lierse) mit Vorkommen von *Mediocolpopollis compactus*, ca. 20 µm Länge (rechts, nach BLUMENSTENGEL & ENDTMANN 2014).

8. Ergebnisse

Die Ergebnisse zu den Gesamtgehalten der Schwerminerale in allen beschriebenen Proben sind in Tab. 1 dargestellt. Im Verlauf der folgenden, detaillierten Beschreibung der Schwermineralspektren der einzelnen Probenahmelokalitäten sind Rutil/Anatas/Brookit als Titanoxide und Andalusit/Sillimanit/Disthen als Aluminiumsilikate zusammengefasst. Zu beachten ist, dass die Ergebnisse aufgrund der verschiedenen Analysemethoden mit unterschiedlichen Prozentangaben versehen sind. Die Einheit "Gew.-%" wird bei quantifizierten Masseanteilen verwendet, wohingegen mit "%" angegebene Konzentrationen Kornprozent repräsentieren.

8.1 Domsener Sande

Der durchschnittliche Schwermineralanteil in den 0,5 m bis 4 m mächtigen, durch DÖBELT (2013) beprobten Gamma-Anomaliebereichen der Domsener Sande (Liner-Bohrungen) beträgt zwischen 1,18 Gew.-% und 3,25 Gew.-%. Anhand der Analyse der gesamten Liner-Bohrung L26265Z (Abb. 14) wurde ein durchschnittlicher Schwermineralgehalt der Domsener Sande von 0,32 Gew.-% ermittelt. Jedoch schwanken die Mächtigkeiten der Schwerminerallagen innerhalb des Gesamtprofils der Domsener Sande im horizontalen Verlauf stark, weshalb die Repräsentativität dieses punktuellen Wertes begrenzt ist. Nach Daten von HÄRTEL (1972) liegt der durchschnittliche Schwermineralanteil für die Domsener Sande zwischen 0,6 Gew.-% und 2,4 Gew.-%.

Im Allgemeinen weisen die Domsener Sande in ihrer Zusammensetzung ein enges Spektrum auf. Dabei sind die reinen Schwermineralkonzentrate von Titanoxiden (ca. 35-54 %), Zirkon

Tab. 1: Überblick über die Schwermineralanreicherungen in den untersuchten Sedimentproben mit zugehöriger stratigraphischer Einordnung entsprechend der erhaltenen Analyseergebnisse (> Sedimentation vor...; = Sedimentation im...).

Probenahme-lokalität	Stratigraphische Einordnung/Einheit	Probenart	Schwermineralgehalt
TB Profen Abbaufeld Domsen	Eozän bis Oligozän Domsener Sande	<u>Liner-Bohrung</u> <u>Sande:</u> L26265Z (15,8 m) →	0,32 Gew.-%
		<u>Gamma-Anomalie-</u> <u>Bereiche:</u> L26264Z (4 m) →	1,22 Gew.-%
		L26265Z (0,5 m) →	3,25 Gew.-%
		L26266Z (4 m) →	1,18 Gew.-%
TB Profen Abbaufeld Profen Süd, Probe Domsen	Mittel- bis Obereozän Zeitler Schichten (GWL 5)	Großprobe Kiessande	0,42 Gew.-%
TB Profen Abbaufeld Schwerzau, Probe Schwerzau I	Mittel- bis Obereozän Zeitler Schichten (GWL 5)	Großprobe Kiessande	0,33 Gew.-%
TB Profen Abbaufeld Schwerzau, Probe Schwerzau II	Mittel- bis Obereozän Zeitler Schichten (GWL 5)	Großprobe Kiessande	0,69 Gew.-% (1,39 Gew.-%, inkl. Eisensulfide)
TB Prießnitz	Tertiär (Obereozän?)	Großprobe Kiessande	0,07 Gew.-%
TB Schkölen- Nautschütz	>/= Übergang Mittel- zu Obereozän	Großprobe Kiessande	0,02 Gew.-%
TB Osterfeld	Obereozän	Großprobe Kiessande	0,03 Gew.-%
TB Grana	>/= Obereozän	Großprobe Kiessande	0,24 Gew.-%
TB Klaus	>/= Obereozän	Großprobe Kiessande	0,64 Gew.-%

(ca. 19-44 %), Turmalin (ca. 3-19 %) und Aluminiumsilikaten (ca. 2-8 %) dominiert. Topas (ca. 2-7 %), Monazit (ca. 1-4 %) und Ilmenit (bis ca. 2 %) kommen dagegen in geringeren Mengen vor. Eine Besonderheit stellt die Bohrung L26265Z dar, die einen Anteil von etwa 17 % Pyrit/Markasit aufweist. Des Weiteren finden sich in den Proben weitere Schwerminerale mit einem Anteil von < 1 %. Dazu gehören beispielsweise Al-(Ba)-Phosphate wie Kemmlitzit, Svanbergit und Gorceixit (DÖBELT 2013). Die Schwermineralzusammensetzung der Anomaliebereiche der Liner-Bohrungen L26265Z, L26264Z und L26266Z sind in Abb. 15 dargestellt.

8.1.1 Liner-Bohrung L26265Z

Der durchschnittliche Schwermineralinhalt für die Liner-Bohrung L26265Z (Teufe: 18-33,8 m, Abb. 14) beträgt etwa 0,32 Gew.-% und liegt damit weit unter den Anreicherungswerten der (Gamma-) Anomaliebereiche. Diese werden nachfolgend gesondert betrachtet. Der Schwermineralinhalt der Sande wird von Titanoxiden (ca. 34,9 %), Zirkon (ca. 26,1 %) und Pyrit/Markasit (ca. 17,4 %) dominiert. Die Titanoxide können dabei in Fe-führend (ca. 14,1 %), Fe-frei (ca. 19,8 %) und Nb-führend (ca. 1,0 %) unterteilt werden. Außerdem kommen Turmalin (ca. 7,4 %), Aluminiumsilikate (ca. 5,0 %), Topas (ca. 3,5 %) und Monazit (ca. 2 %) vor. In geringeren Mengen treten Chromit (0,7 %), Ilmenit (0,7 %), Xenotim (0,6 %), (Titanio-) Magnetit (0,3 %), Kassiterit (0,3 %) und Al-(Ba)-Phosphate (0,1 %) auf. Der hohe Anteil an

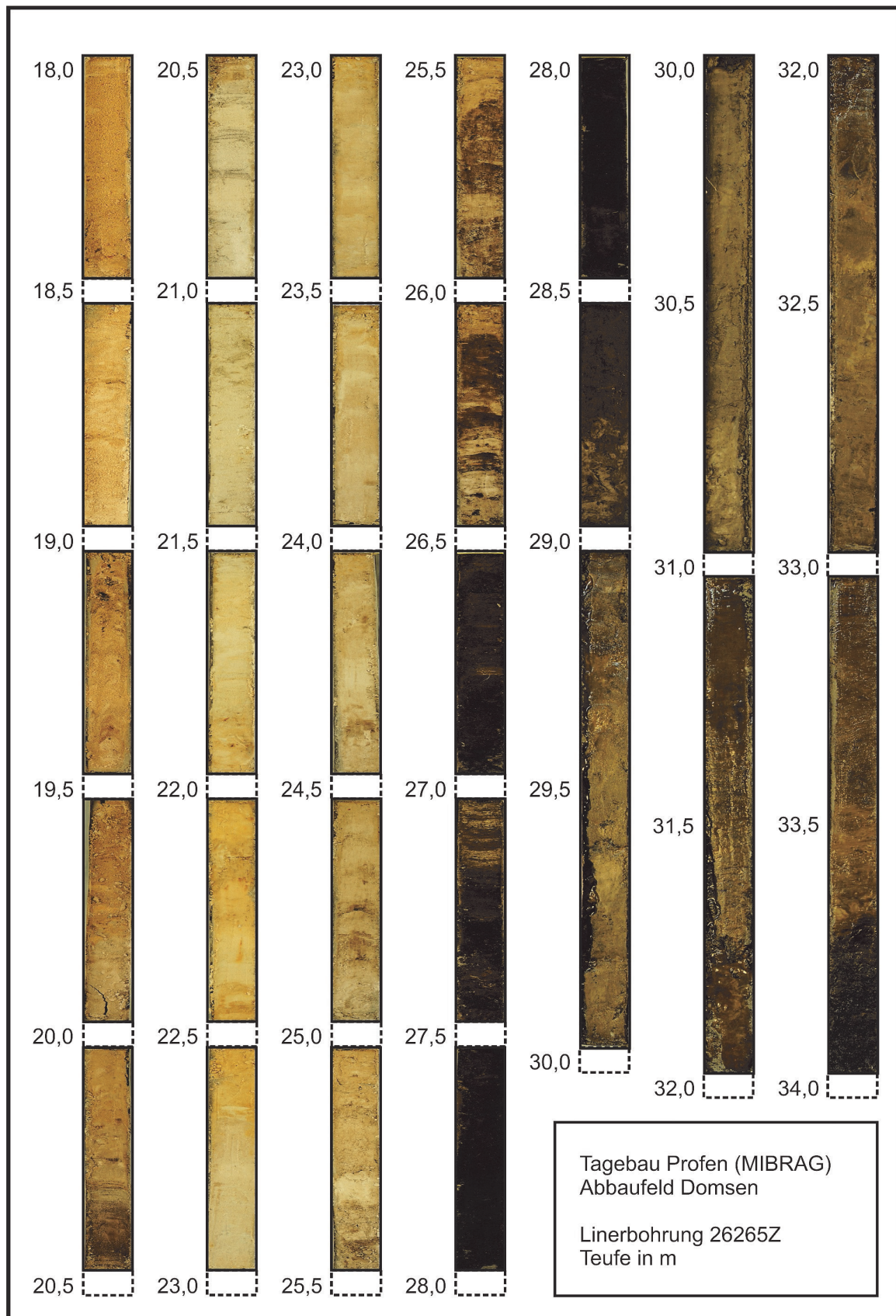


Abb. 14: Fotodokumentation der Domsener Sande, Liner-Bohrung L26265Z mit dem Gamma-/Schwermineral-Anomaliebereich zwischen 20,3-20,8 m. Kennzeichnend ist die farbliche Varianz der Domsener Sande, die auf unterschiedliche Ablagerungsbedingungen hinweist (DÖBELT 2013).

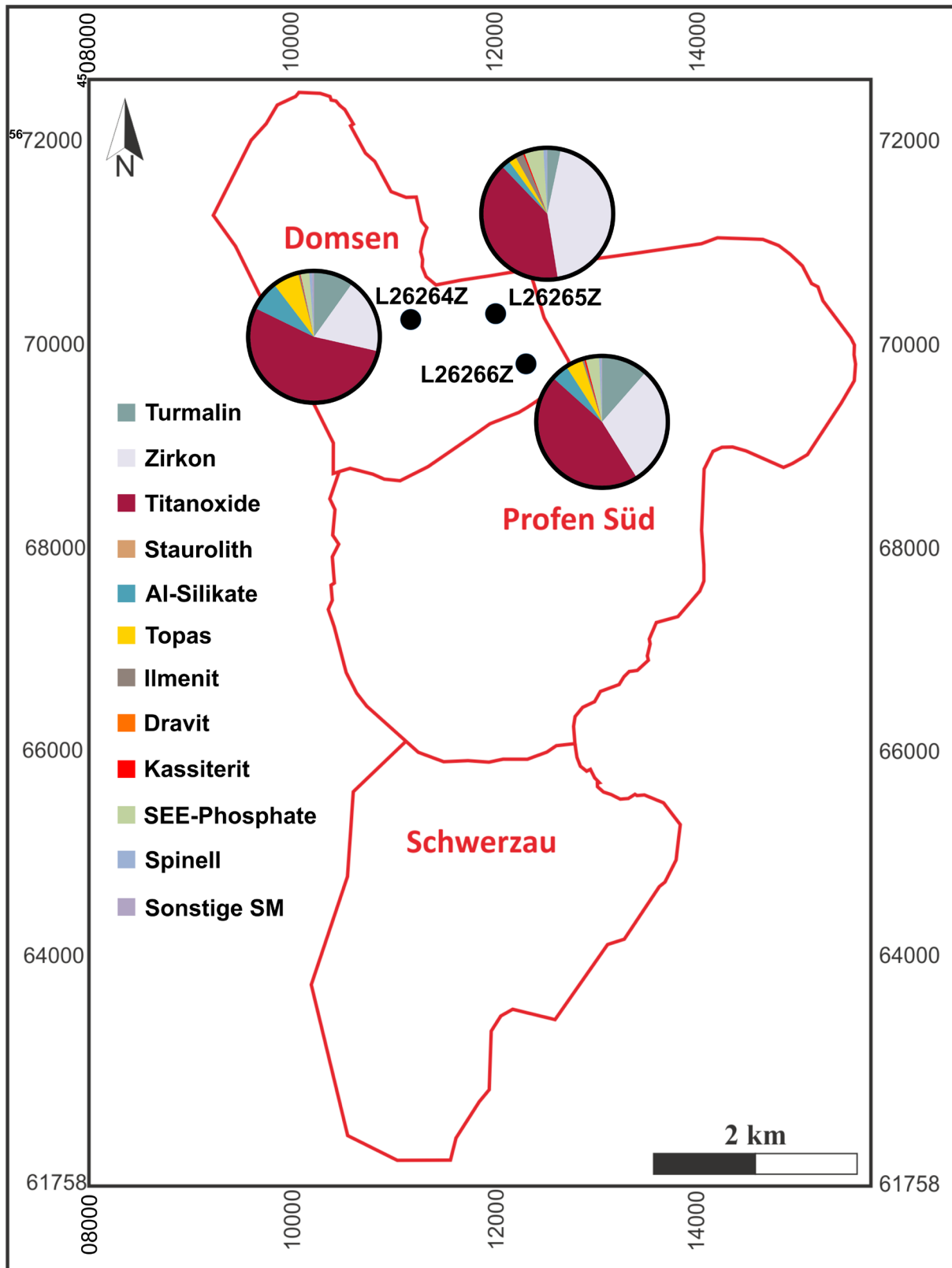


Abb. 15: Schwermineralverteilung einzelner Gamma-Anomalie-Horizonte der durch DÖBELT (2013) beprobten Domsener Sande (Angaben in Kornprozent).

Pyrit/Markasit ist sehr wahrscheinlich auf die Nähe zum Kohleflöz und der In-situ-Bildung von Pyrit/Markasit zurückzuführen.

8.1.2 Anomaliebereich Liner-Bohrung L26265Z (Teufe: 20,3-20,8 m)

Der (Gamma-) Anomaliebereich der Liner-Bohrung L26265Z weist einen Schwermineralgehalt von 3,25 Gew.-% auf. Die Zusammensetzung des Schwermineralspektrums wird von Zirkon (44,2 %) und Titanoxiden (40,4 %) dominiert. Des Weiteren kommen Monazit (3,7 %), Turmalin (3,3 %), Aluminiumsilikate (2,1 %), Ilmenit (2,0 %), Topas (1,9 %), Xenotim (1,0 %), Chromit (0,9 %), Kassiterit (0,5 %) und Al-(Ba)-Phosphate (0,1 %) vor (Abb. 15).

8.1.3 Anomaliebereich Liner-Bohrung L26264Z (Teufe: 20,0-24,0 m)

Der (Gamma-) Anomaliebereich der Liner-Bohrung L26264Z weist einen Schwermineralgehalt von 1,22 Gew.-% auf. Das Schwermineralspektrum wird von Titanoxiden (53,7 %), Zirkon (18,7 %) und Turmalin (9,9 %) dominiert (Abb. 15). In geringeren Mengen treten Aluminiumsilikate (7,4 %), Topas (6,5 %), Monazit (1,3 %), Xenotim (0,9 %), Chromit (0,7 %), Ilmenit (0,3 %), Kassiterit (0,2 %), Korund (0,1 %), Al-(Ba)-Phosphate (0,1 %) und Pyroxen (0,1 %) auf.

8.1.4 Anomaliebereich Liner-Bohrung L26266Z (Teufe: 36,0-40,0 m)

Der (Gamma-) Anomaliebereich der Liner-Bohrung L26266Z weist einen Schwermineralgehalt von 1,18 Gew.-% auf. Das Schwermineralspektrum wird von Titanoxiden (45,5 %), Zirkon (29,7 %) und Turmalin (11,5 %) dominiert (Abb. 15). Daneben treten Topas (4,3 %), Aluminiumsilikate (4,2 %), Monazit (2,8 %), Chromit (0,6 %), Xenotim (0,5 %), Ilmenit (0,5 %), Kassiterit (0,4 %), Al-(Ba)-Phosphate (0,1 %) und Pyrit/ Markasit (0,01 %) auf.

8.2 Zeitzer Schichten im Tagebau Profen

Durchschnittlich treten in den durch MENNICKE (2015) beprobten Kiessanden des Tagebaus Profen 0,48 Gew.-% Schwerminerale auf. In den Proben Domsen, Schwerzau I und Schwerzau II konnten sehr ähnliche Schwermineralzusammensetzungen festgestellt werden (Abb. 16, 17). Hauptanteil der Schwermineralspektren machen Topas, Turmalin und Dravit, Ilmenit, Titanoxide, Staurolith, Aluminiumsilikate und Zirkon aus. Mit weniger als 1 Gew.-% treten Chromit, Ilmenorutil, Almandin, Pyrit/Markasit, Kassiterit, SEE-Phosphate, Al- und Fe-Metalloxide/-hydroxide, Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate, Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten, Fe-Karbonate, Minerale der Epidot-Gruppe, Gahnit, Apatit, Ferberit und Ca-Fe-Mg-Al-Silikate auf (MENNICKE & BORG 2016). Aufgrund der identischen Analytik konnten die Kiessande Profen regional mit den Kiessanden aus Klausau, Grana, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und Prießnitz in Zusammenhang gebracht und vergleichend dargestellt werden.

8.2.1 Kiessandprobe Domsen

Der Schwermineralgehalt der Großprobe Domsen beträgt 0,42 Gew.-% der Gesamtprobe. Das Schwermineralkonzentrat der Probe Domsen setzt sich hauptsächlich aus Topas (46,9 Gew.-%), Turmalin (12,0 Gew.-%), Ilmenit (9,9 Gew.-%), Titanoxiden (8,9 Gew.-%), Staurolith (6,8 Gew.-%), Aluminiumsilikaten (6,3 Gew.-%), Zirkon (3,6 Gew.-%) und Dravit (3,2 Gew.-%) zusammen. Mit je weniger als 1,0 Gew.-% treten Chromit, Granat, Minerale der Epidotgruppe, Pyrit, Kassiterit, SEE-Phosphate und Al- und Fe- Oxide/Hydroxide bzw. Fe-Karbonate auf. Unter den SEE-Phosphaten kommen Florenzit mit 0,09 Gew.-%, Xenotim mit 0,15 Gew.-% und Monazit mit 0,26 Gew.-% im Schwermineralkonzentrat vor. Kassiterit tritt mit 0,27 Gew.-% auf.

In Spuren treten Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate, Ca-Fe-Mg-Al-Silikate (vor allem Amphibole und Pyroxene), Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten, Ilmenorutil, Gahnit,

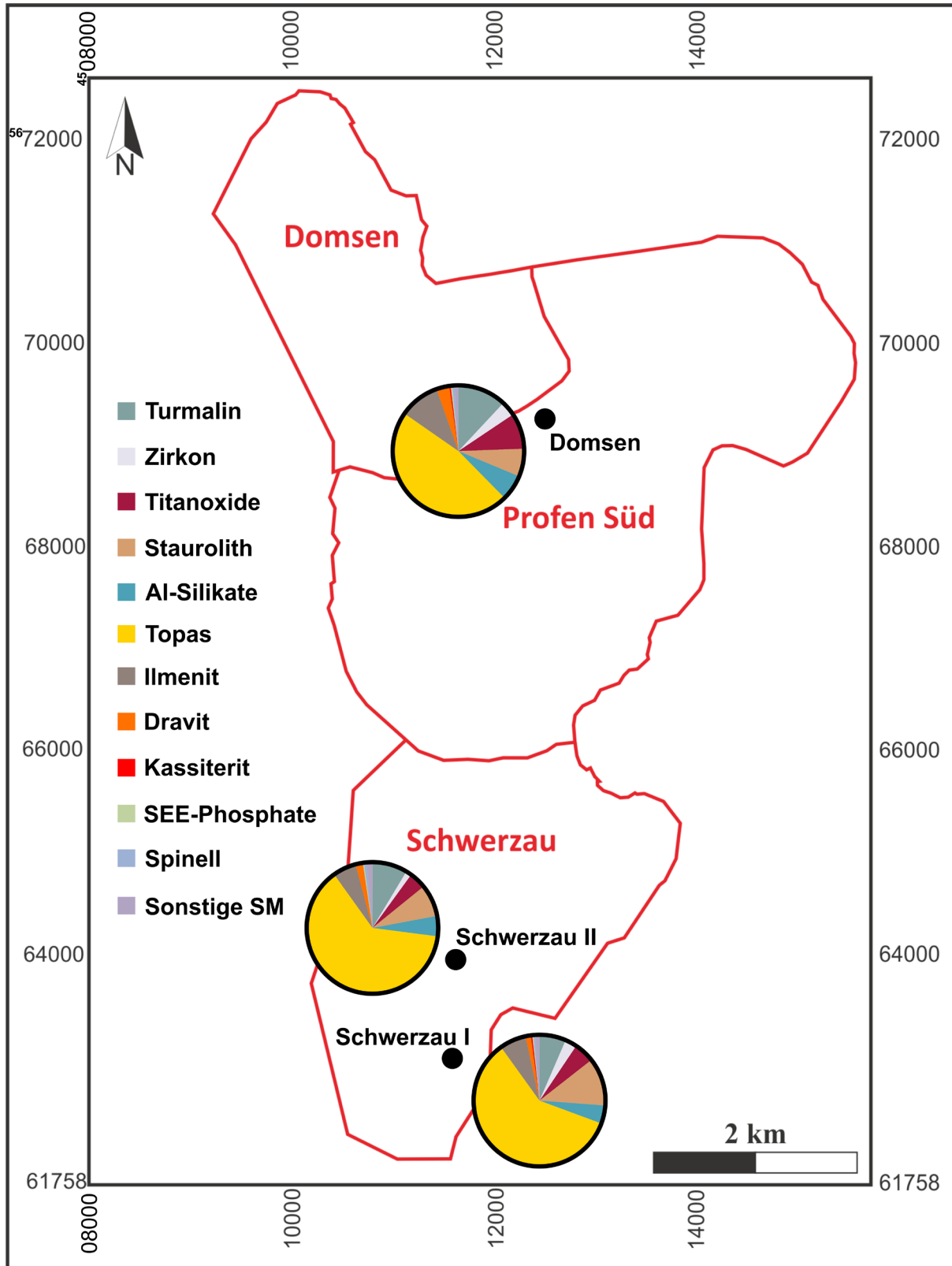


Abb. 16: Schwermineralverteilung in den durch MENNICKE (2015) beprobten Zeitzer Schichten im Tagebau Profen (Angaben in Gew.-%).

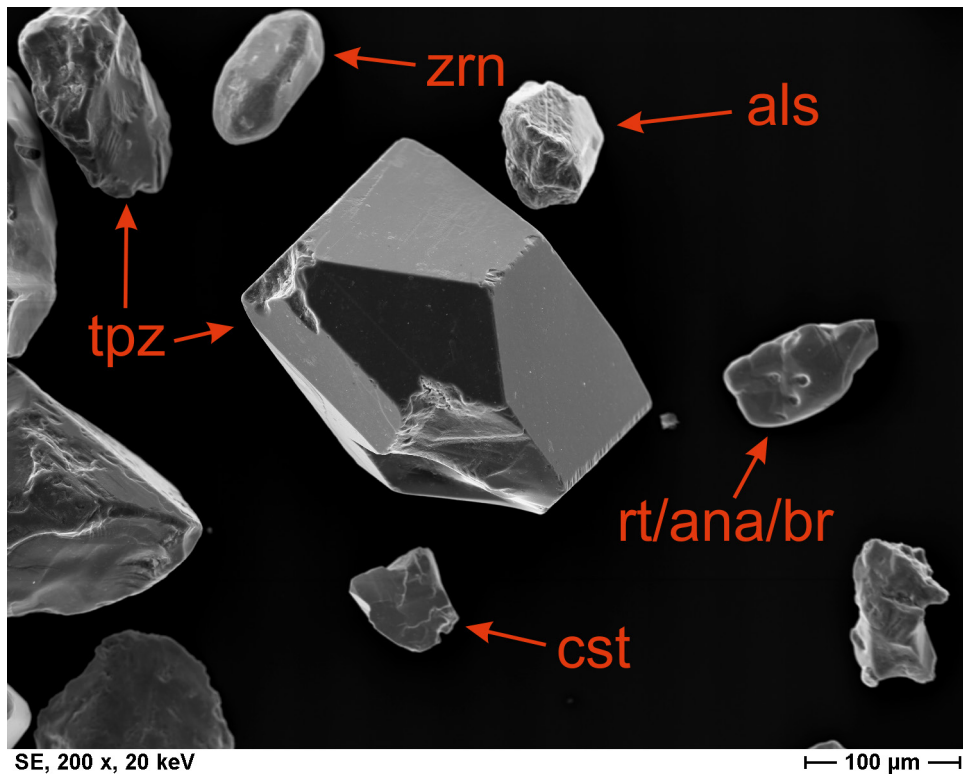


Abb. 17: REM-Bild der Kiessandprobe Schwerzau I mit Darstellung der analysierten Minerale (Topas (tpz), Zirkon (zrn), Aluminiumsilikat (als), Titanoxid-Rutil/Anatas/Brookit (rt/ana/br), Kassiterit (cst)).

Apatit, Ferberit und Schwefel auf. Die Schwerminerale mit weniger als <1 Gew.-% sind in Abb. 16 als "Sonstige SM" zusammengefasst und machen zusammen ca. 2,3 Gew.-% des gesamten Schwermineralspektrums aus (MENNICKE & BORG 2016).

8.2.2 Kiessandprobe Schwerzau I

Die Probe Schwerzau I besitzt einen Schwermineralgehalt von 0,33 Gew.-%. Gleich der Probe Domsen treten auch im Schwermineralkonzentrat der Probe Schwerzau I Topas (59,5 Gew.-%, Abb. 17), Staurolith (11,8 Gew.-%), Ilmenit (6,5 Gew.-%), Turmalin (6,4 Gew.-%), Titanoxide (4,9 Gew.-%), Aluminiumsilikate (4,4 Gew.-%), Zirkon (2,9 Gew.-%) und Dravit (1,2 Gew.-%) als Hauptbestandteile auf. Zu Schwermineralen mit einem Anteil von unter 1 Gew.-% zählen Chromit, Granate, Minerale der Epidotgruppe, Pyrit, Kassiterit, SEE-Phosphate, Al- und Fe-Oxide/Hydroxide und Fe-Karbonate. Sie machen zusammen einen Anteil von 2,6 Gew.-% am Schwermineralkonzentrat aus. Die SEE-Phosphate setzen sich aus 0,05 Gew.-% Florenzit, 0,07 Gew.-% Xenotim und 0,12 Gew.-% Monazit zusammen. Kassiterit tritt mit 0,41 Gew.-% auf. In Spuren kommen außerdem Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate, Ca-Fe-Mg-Al-Silikate, Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten, Ilmenorutil, Gahnit, Apatit, Ferberit und Schwefel vor (MENNICKE & BORG 2016).

8.2.3 Kiessandprobe Schwerzau II

In der Probe Schwerzau II liegen 0,69 Gew.-% (1,39 Gew.-% inkl. Eisensulfide) Schwerminerale vor (Abb. 18). Der Hauptanteil der Schwermineralfraktion besteht aus Topas (63,1 Gew.-%), Turmalin (8,7 Gew.-%), Staurolith (7,9 Gew.-%), Ilmenit (5,7 Gew.-%), Aluminiumsilikaten (5,0 Gew.-%), Titanoxiden (4,1 Gew.-%), Dravit (1,8 Gew.-%) und Zirkon (1,3 Gew.-%). Sonstige Schwerminerale mit einem Anteil von je < 1 Gew.-% treten mit insgesamt

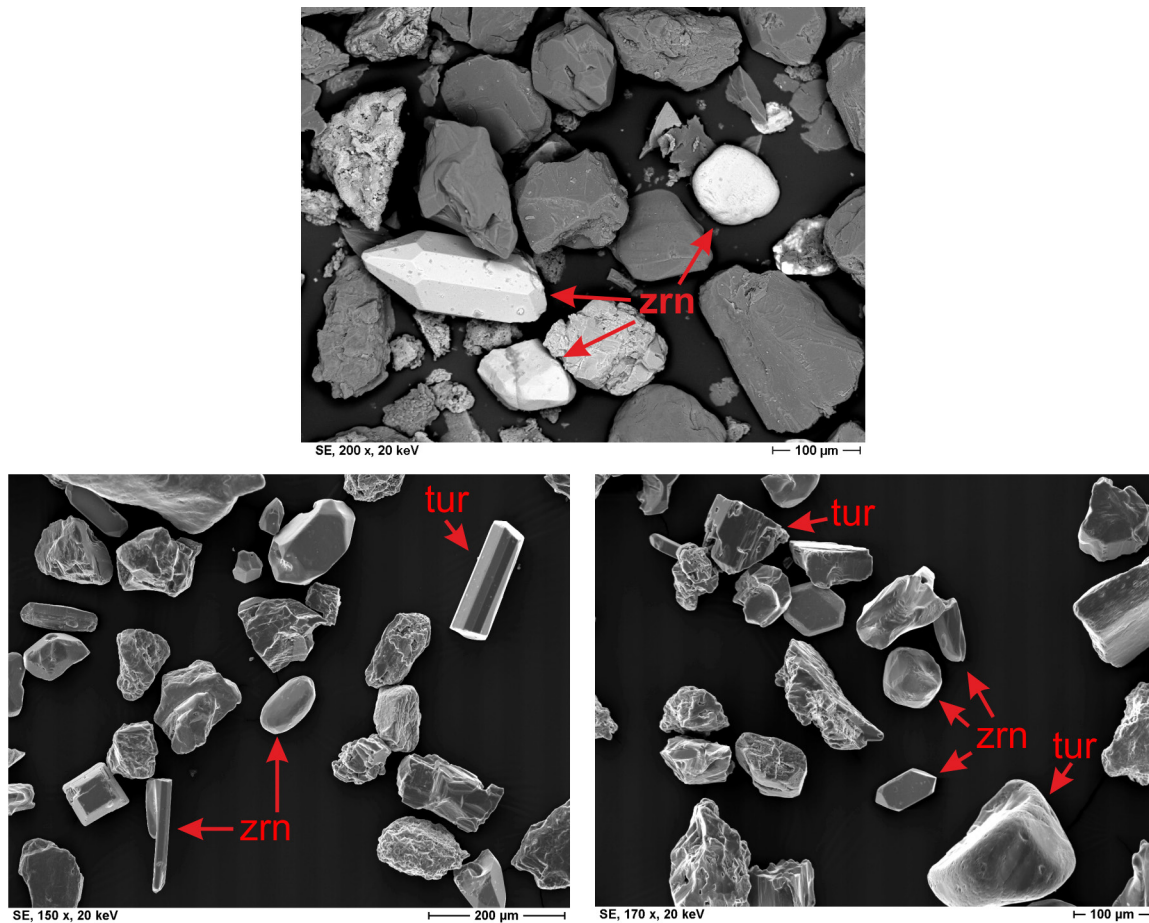


Abb. 18: Unterschiede der Kornrundungen von Zirkon (zrn) und Turmalin (tur) am Beispiel der Zeitzer Schichten in Profen. Oben: Probe Schwerzau II, unten: Probe Domsen (MENNICKE 2015).

2,4 Gew.-% auf. Darunter befinden sich Ilmenorutil, Chromit, Al- und Fe-Oxide/Hydroxide, Fe-Karbonate, Granat, Minerale der Epidot-Gruppe und SEE-Phosphate. In der Gruppe der SEE-Phosphate kommen Florenzit mit 0,13 Gew.-%, Xenotim (0,07 Gew.-%) und Monazit (0,03 Gew.-%) vor. In Spuren treten Ca-Fe-Mg-Al-Silikate, Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten, Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate, Kassiterit (0,08 Gew.-%, Abb. 21), Apatit, Gahnit und Ferberit auf (MENNICKE & BORG 2016).

8.3 Kiessande im Tagebau Prießnitz

Die Gesamtprobe Prießnitz besteht zu 0,07 Gew.-% aus Schwermineralen (Tab. 1). Das häufigste auftretende Mineral im Schwermineralkonzentrat ist mit 39,1 Gew.-% Ilmenit. Es wird gefolgt von Titanoxiden (27,4 Gew.-%) und Turmalin (15,1 Gew.-%). Aluminiumsilikate sind zu 7,6 Gew.-% vertreten und bestehen hauptsächlich aus Andalusit. Zirkon tritt mit 5,3 Gew.-% auf. Einen geringen Anteil machen Dravit (1,9 Gew.-%), Phosphate (1,5 Gew. %) und Minerale der ferromagnetischen Fraktion (1,1 Gew.-%) aus (Abb. 19). Weitere auftretende Minerale mit einem Anteil von je unter 1 Gew.-% sind Spinelle, Topas, Kassiterit, Granate, Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate, Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten sowie Ilmenorutil, Staurolith und Ca-Fe-Mg-Al-Silikate. Diese sind in Abb. 19 unter „Sonstige SM“ zusammengefasst (MIGALK 2015).

Zusätzlich zur Großprobe wurden Tone im Liegenden der Kiessande für eine biostratigraphische Einordnung entnommen (Abschnitt 7.3). Sie zeigen einen geringen Sporen- und Polleninhalte, umgelagerte mesozoische Formen, aber dennoch ein verhältnismäßig häufige

ges Auftreten von *Veryhachium*. Sie werden in das Tertiär eingeordnet. Im Hinblick auf das Vorkommen von *Chenopodipollis* in einer untersuchten Probe ist eventuell eine Einstufung dieser Probe in das Obereozän möglich. In einer weiteren Probe treten jedoch lediglich mesozoische Umlagerungen auf, sodass eine genaue Einstufung nicht möglich ist (BLUMENSTENGEL & ENDTMANN 2014).

8.4 Kiessande im Tagebau Schkölen-Nautschütz

Die Gesamtprobe Schkölen-Nautschütz besteht zu 0,02 Gew.-% aus Schwermineralen. Den Hauptanteil machen dabei Ilmenit (38,4 Gew.-%), Turmalin (21,7 Gew.-%), Titanoxide (19,5 Gew.-%) und Aluminiumsilikate (11,3 Gew.-%) aus (Abb. 19). Letztere bestehen zusätzlichen XRD-Untersuchungen zufolge hauptsächlich aus Andalusit, wobei auch Disthen und Sillimanit auftreten. Außerdem kommen Zirkon (3,2 Gew.-%) und Dravit (1,7 Gew.-%) vor. Die ferromagnetische Fraktion macht einen Anteil von 1,2 Gew.-% aus. Des Weiteren treten ca. 1 Gew.-% Phosphate auf, bei denen Monazit mit 0,8 Gew.-% dominiert. Weitere Minerale mit einem Auftreten von je < 1 Gew.-% sind Topas, Spinelle, Kassiterit, Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate, Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten, Granate, Staurolith sowie Ca-Fe-Mg-Al-Silikate (MIGALK 2015).

Zusätzlich zu der Großprobe wurde eine Tonprobe im Hangenden der Kiessande für eine stratigraphische Einordnung genommen (Abschnitt 7.3). Diese wurde aufgrund verschiedener Pollenformen wie beispielsweise *Chenopodipollis* in den Übergang zwischen Mittel- und Obereozän eingeordnet. Die Kiessande müssen entsprechend älter sein. Wegen der geringen Pollenzahl gilt die Einordnung als nicht gesichert (BLUMENSTENGEL & ENDTMANN 2014).

8.5 Kiessande im Tagebau Osterfeld

Die Probe Osterfeld besteht zu 0,03 Gew.-% aus Schwermineralen. Das am häufigsten im Schwermineralkonzentrat auftretende Mineral ist mit 38,7 Gew.-% Ilmenit, gefolgt von Turmalin (22,2 Gew.-%) und Titanoxiden (18,6 Gew.-%). Außerdem kommen Zirkon (8,7 Gew.-%), Dravit (3,4 Gew.-%) und Aluminiumsilikate (2,5 Gew.-%) im Konzentrat vor (Abb. 19). Letztere bestehen hauptsächlich aus Andalusit. Spinelle treten mit 1,6 Gew.-% auf, von denen der Großteil aus Chromspinell besteht. Im Konzentrat sind des Weiteren 1,4 Gew.-% ferromagnetische Fraktion enthalten, neben je 1,1 Gew.-% Topas und Phosphaten. Zusätzliche Minerale mit einem Anteil von < 1 Gew.-% sind Kassiterit, Granat, Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate, Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten, Ilmenorutil, Staurolith und Ca-Fe-Mg-Al-Silikate (MIGALK 2015).

Es wurden zusätzlich Proben zur biostratigraphischen Einordnung genommen (Abschnitt 7.3). Diese ermöglichen eine Zuordnung des Profils zum Obereozän (Tab. 1). Außerdem zeigt die Beprobung des Kiessandprofils Vorkommen von Hystrichosphaeridae und Prasinophyceae, was auf eine marine Beeinflussung des Ablagerungsgebietes hinweist (BLUMENSTENGEL & ENDTMANN 2014).

8.6 Kiessande im Tagebau Grana

Das Schwermineralkonzentrat Grana macht 0,24 Gew.-% der Gesamtprobe Grana aus. Das Konzentrat besteht zu über 50 Gew.-% aus Topas. Das zweithäufigste Mineral ist Ilmenit (14,5 Gew.-%), gefolgt von Titanoxiden (8,4 Gew.-%), Staurolith (7,8 Gew.-%), Zirkon (7,2 Gew.-%) und Aluminiumsilikaten (3,7 Gew.-%). Letztere bestehen hauptsächlich aus Sillimanit, was durch eine zusätzliche XRD-Untersuchung an der Camborne School of Mines nachgewiesen wurde. Aber auch Andalusit und Disthen sind Bestandteil. Letzteres ist makroskopisch bestätigt. Einen geringeren Anteil am Schwermineralkonzentrat machen Kassiterit und Turmalin (je 1,9 Gew.-%) aus (Abb. 19). Außerdem kommen Phosphate mit einem Ge-

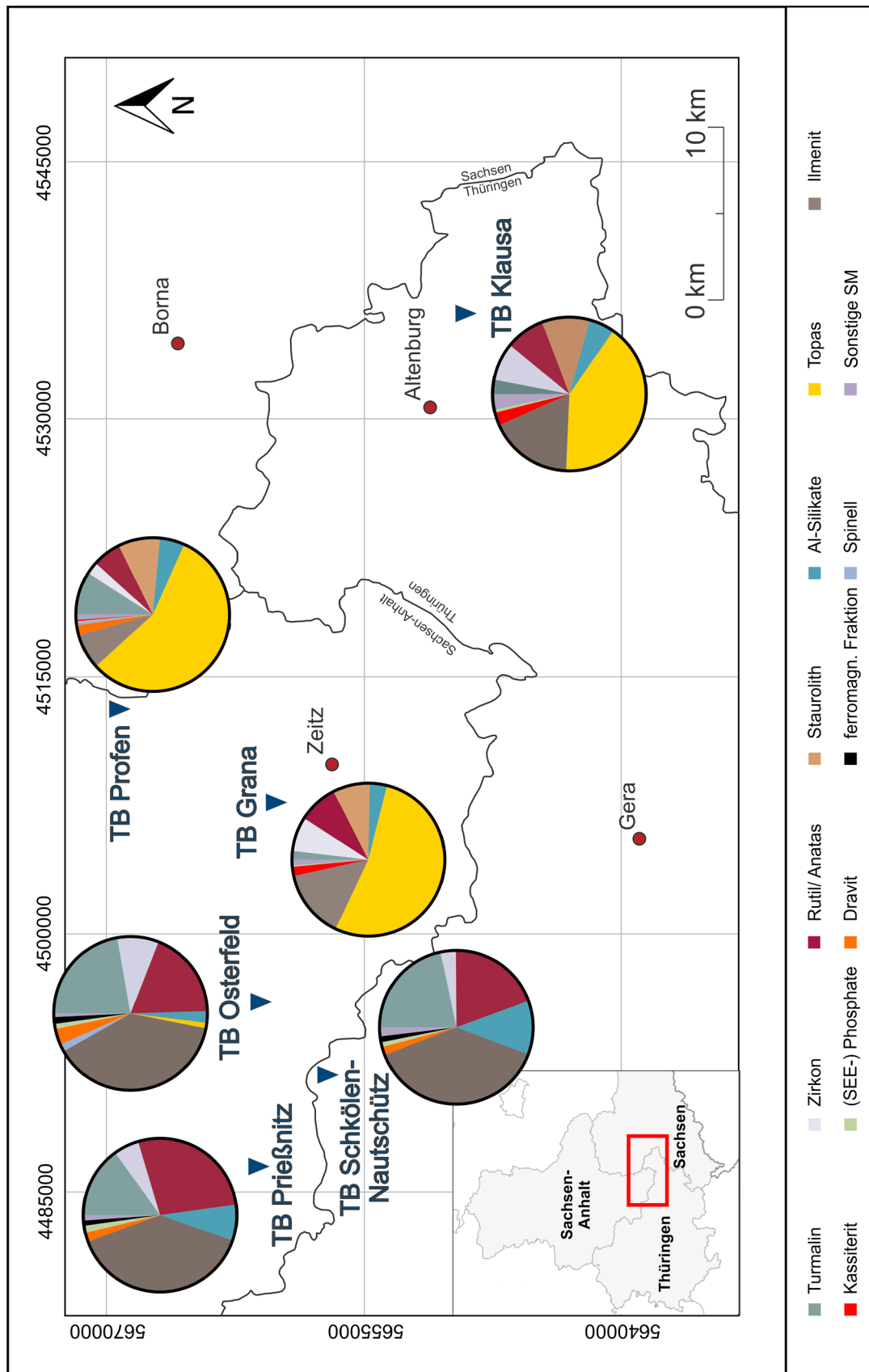


Abb. 19: Zusammensetzung der Schwerminerkonzentrate der durch MENNICKE (2015) beprobten Kiessande im Tagebau (TB) Profen sowie der durch MIGALK (2015) beprobten Kiessande der Tagebaue Grana, Klaus, Prießnitz, Schkölen-Nautschütz und Osterfeld (Angaben in Gew.-%).

halt von 0,3 Gew.-% vor, die sich aus Florenzit, Xenotim, Monazit und einem sehr geringen Prozentsatz Apatit zusammensetzen. Weitere Minerale mit einem Anteil von < 1 Gew.-% am Konzentrat sind Dravit, Granate, Spinelle, Ca-Fe-Mg-Al-Silikate wie beispielsweise Amphibole, Minerale der ferromagnetischen Fraktion, Minerale der Epidotgruppe, Ilmenorutil, Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate sowie Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten (MIGALK 2015).

Es wurden außerdem Tone im Hangenden des Profils zur biostratigraphischen Einordnung beprobt (Abschnitt 7.3). Diese ließen sich aufgrund von sporadisch auftretenden *Mediocolpopollis compactus* in das Obereozän einordnen (BLUMENSTENGEL & ENDTMANN 2014). Dementsprechend müssen sich die Kiessande im bzw. vor dem früheren Obereozän abgelagert haben (Tab. 1).

8.7 Kiessande im Tagebau Klausä

Die Gesamtprobe Klausä besteht zu 0,64 Gew.-% aus Schwermineralen (Tab. 1). Das häufigste im Konzentrat auftretende Mineral ist Topas mit 41 Gew.-% (Abb. 19). Dieses wird gefolgt von Ilmenit (17,6 Gew.-%), Staurolith (10,1 Gew.-%), Titanoxiden (8,3 Gew.-%) und Zirkon (7,9 Gew.-%). Die vorgefundenen Aluminiumsilikate (5,4 Gew.-%) setzen sich hauptsächlich aus Sillimanit zusammen. Sowohl Disthen als auch Andalusit treten zusätzlich auf. Weitere Schwerminerale im Konzentrat sind Turmalin (3,0 Gew.-%) und Kassiterit (2,8 Gew.-%). Phosphate machen einen Anteil von 0,6 Gew.-% aus und setzen sich hauptsächlich aus Monazit, Xenotim und einem geringen Anteil von Florenzit und Apatit zusammen. Weitere Minerale mit einem Prozentsatz von < 1 Gew.-% sind Spinelle, Ca-Fe-Mg-Al-Silikate, Granate, Minerale der ferromagnetischen Fraktion, Minerale der Epidotgruppe sowie Ilmenorutil, Pb-Al- und Ba-Al-Ca-Phosphate und Mineralphasen mit Ce-La-Nd-As-Al-Gehalten (MIGALK 2015). Im Tagebau wurden außerdem Tone im Hangenden der Kiessande zur biostratigraphischen Einordnung beprobt (Abschnitt 7.3). Diese ließen sich aufgrund von sporadisch auftretenden *Alangiopollis eocaenicus* sowie *Tricolporopollenites striatoreticulatus* in das Obereozän einordnen (BLUMENSTENGEL & ENDTMANN 2014). Dementsprechend müssen sich die Kiessande im frühen Obereozän oder eher abgelagert haben (Tab. 1).

9. Provenienz- und Sedimentanalyse

9.1 Eozäne Kiessande

Für die eozänen Kiessande wurden Großproben genommen, weswegen keine Aussagen über Änderungen im vertikalen Profil der Kiessande getroffen werden können. Aufgrund der geringen Probenzahl pro Tagebau sind gesicherte Aussagen zum Liefergebiet nicht möglich, sondern sollten lediglich als Hinweise gewertet werden.

Bereits frühere Untersuchungen erzielten wichtige Ergebnisse zur Herkunft verschiedener Minerale in den beprobten Tagebauen (z.B. GLÄSSER & WIEFEL 1997, KUHN 1997, KLAUA et al. 1980, STEINMÜLLER & ORTMANN 1970). Eine Übersicht zur paläogeographischen Situation nach BACHMANN (2008) gibt Abb. 7.

Beim Vergleich der Schwermineralspektren aller Probenahmestellen (Abb. 19) zeichnet sich eine Zweiteilung des Untersuchungsgebietes in einen westlichen und einen östlichen Teil ab. Östlich zeigen Grana, Klausä und Profen ein sehr ähnliches Schwermineralspektrum, weshalb davon ausgegangen wird, dass dieser Raum vom gleichen Erosionsgebiet beliefert wurde. Dagegen zeigen Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und Prießnitz untereinander ein ähnliches Spektrum, das vor allem durch die prozentualen Anteile der auftretenden Minerale signifikant von den Spektren Grana, Klausä und Profen abweicht. Deshalb wird dieses Gebiet von einem anderen Erosionsgebiet beliefert worden sein.

9.1.1 Mögliche Herkunft der Kiessande Grana, Klausä und Profen

Für die beprobten Kiessandhorizonte in Grana, Klausä und Profen wird von einem Materialtransport über den Altenburger Fluss ausgegangen, der ein Zusammenfluss des aus Süden kommenden Zwickauer Flusses und des aus Osten kommenden Lunzenauer Flusses war (GLÄSSER & WIEFEL 1997).

Im Probenmaterial ist auffällig, dass Zirkon und Turmalin trotz ihrer extremen Stabilität in verschiedenen ausgeprägten Rundungsgraden vorliegen (Abb. 18). Die verschiedenen Erscheinungsformen der Minerale können Hinweise darauf liefern, dass die Region aus verschiedenen Liefergebieten gespeist wurde. Da Klausä nach GLÄSSER & WIEFEL (1997) räumlich nicht weit entfernt hinter dem Zusammenfluss des Zwickauer Flusses aus dem Süden und des Lunzenauer Flusses aus dem Osten liegt, wären damit bereits zwei Liefergebiete erklärt. Das Alter der Proben variiert zwischen dem unteren Miozän (Grana) und dem unteren Oligozän (Profen). Aufgrund der Gleichheit der Schwermineralspektren muss die Situation der beiden zusammenfließenden Flüsse aus verschiedenen Gebieten über diesen Zeitraum bestanden haben.

Wegen der übereinstimmend hohen Topasführung der Proben Grana, Klausä und Profen wird davon ausgegangen, dass eines der Herkunftsgebiete, wie bereits von KUHN (1997) ermittelt, das westliche Erzgebirge darstellt. Speziell der Westrand des Kontakthofes des Eibenstocker Granits im Erzgebirge ist typisch für seine hohe Topasführung (STEINMÜLLER & ORTMANN 1970). Eine bekannte Topasquelle stellt außerdem der Schneckenstein dar. Dieser führt zudem Kassiterit. Bekannt für topasführende Kassiteritvorkommen ist auch die Region um Dönitzgrund/Fletschmaul, die innerhalb des Eibenstocker Granitmassivs liegt. Somit kann der Durchfluss des Zwickauer Flusses durch das westliche Erzgebirge bzw. am Rand des westlichen Erzgebirges entlang (s. Einfluss Schneckenstein) bestätigt werden.

Der Lunzenauer Fluss kommt von Klausä aus betrachtet aus dem Osten. Eine Herkunft aus östlicheren Teilen des Erzgebirges kann nicht ausgeschlossen werden. Der recht hohe Anteil an Staurolith in den Proben und das Vorkommen von Disthen sind nach STEINMÜLLER (1995) typisch für Glimmerschiefer und Gneise. Beides tritt in weiten Gebieten des Erzgebirges auf (KAULFUSS & KRAMER 2000). Typisch sind sie jedoch nach STEINMÜLLER (1995) auch für das Elstergebirge. Demnach müsste in allen bisher benannten Liefergebieten eine Vormacht an Andalusit herrschen, was jedoch nach XRD-Analyse nicht der Fall ist. Stattdessen treten hauptsächlich Sillimanite auf. Diese sind ein typisches Mineral der Böhmisches Masse (VINKEN 1988). Nach HARTMANN (2005) bestand im Eozän ein Gewässernetz, das von Böhmen bis in den nördlichen Leipziger Raum reichte.

Als Quelle für die Ilmenite könnten die tertiären Basalte im Westerzgebirge dienen. Sie befinden sich beispielsweise am Pöhlberg, Bärenstein und Scheibenberg (STANDTKE 2002, SEBASTIAN 2013). Der auftretende Disthen ist vor allem typisch für das Sächsische Granulitgebirge (SEBASTIAN 2013), auf dessen Schiefermantel sich der Tagebau Klausä befindet. Er würde für zusätzliches Material mit kurzem Transportweg sprechen.

9.1.2 Mögliche Herkunft der Kiessande Schkölen-Nautschütz, Osterfeld und Prießnitz

Für die im westlichen Untersuchungsgebiet beprobten Kiessandhorizonte wird von einem Materialtransport über das Vogtländisch-Thüringische Flusssystem ausgegangen (KÜHL et al. 2006).

Frühere Untersuchungen ergaben eine Unterteilung der Kiessand-Wechselagerungen in eine untere, durch die Stabilassoziationen Zirkon, Rutil und Turmalin geprägte Folge und eine obere Folge, die durch hohe Anteile an Zirkon, Rutil, Turmalin und Andalusit geprägt ist (KLAUA et al. 1980). Nach STEINMÜLLER & ORTMANN (1970) zeigt die untere Folge eine für

den unterlagernden Buntsandstein typische Schwermineralassoziation, die obere Folge weist auf Sedimente aus dem Fichtelgebirge und somit dem Einzugsgebiet der obersten Saale hin.

Alle Proben des westlichen Teils des Untersuchungsgebietes zeichnen sich durch einen sehr hohen Ilmenitanteil und eine Vormacht an Zirkon, Rutil und Turmalin aus. Die Aluminiumsilikate setzen sich nach XRD-Analyse größtenteils aus Andalusit zusammen. Dies spricht für eine Zuordnung der Sedimente zu der sogenannten oberen Folge und damit für eine Herkunft der Sedimente aus dem Einzugsgebiet der obersten Saale im Fichtelgebirge (STEINMÜLLER & ORTMANN 1970). Generell ist jedoch der Anteil der Aluminiumsilikate im Vergleich zum Zirkon-Rutil-Turmalin-Anteil sehr gering, sodass eine Durchmischung mit der sogenannten unteren Folge nicht auszuschließen ist. Die Stabilassoziation Zirkon-Rutil-Turmalin spricht für eine Herkunft aus dem ostthüringischen Buntsandsteingebiet (LANGBEIN 1995) und damit für kurze Transportwege. Da beide Folgen aus fluviatilen Kiessanden bestehen, die direkt nacheinander abgelagert wurden (KLAUA et al. 1980) und versucht wurde, das gesamte abgelagerte Kiessandprofil zu beproben, ist eine Durchmischung beider Folgen sehr wahrscheinlich. Auch die stark gerundeten Zirkone sprechen für eine Herkunft aus dem Buntsandstein (ANDÓ et al. 2012).

Im Fichtelgebirge sind die Schiefer der inneren Kontakthöfe der Granite als Quelle zu sehen, da diese eine typische Andalusitführung aufweisen (STEINMÜLLER 1995). Ein Andalusitvorkommen im Fichtelgebirge bildet der Steinwaldgranit, wo das Mineral aus von regional- und kontaktmetamorph überprägten Phylliten und Orthogneisen entstand (DIMROTH 1960). In der Probe Osterfeld ist der Anteil an Aluminiumsilikaten im Vergleich zu den Schwermineralkonzentrat Schkölen-Nautschütz und Prießnitz wesentlich geringer, dafür tritt ein höherer Topasgehalt auf. Auch die Kiessandprobe selbst unterschied sich durch einen verhältnismäßig hohen Sandanteil und eine geringe Eisenoxid-Verkrustung von den anderen beiden Proben. Sowohl höherer Feinkornanteil als auch Topasgehalt könnten von einem zusätzlichen Einfluss des Weißelsterbeckens zeugen. Eine marine Beeinflussung des beprobten Kiessandhorizontes in Osterfeld wurde außerdem durch die biostratigraphische Analyse vermutet (Abschnitt 8.5).

9.2 Oligozäne Sande

Das wenig variierende Schwermineralspektrum innerhalb der Domsener Sande spricht für ein konstantes Liefergebiet mit einer gewissen Distanz zum Ablagerungsmilieu (HÄRTEL 1972). Untersuchungen in einem Kaolintagebau der Region zeigten jedoch, dass ein ähnliches Schwermineralspektrum im naheliegenden prätertiären Untergrund (Ignimbrit) vorkommt (DÖBELT 2013). Dieser kann demnach das Ausgangsgestein der auftretenden Schwerminerale darstellen, sodass ein entferntes Liefergebiet nicht notwendig erscheint. Die bekannten Paläoflussläufe nach ESCHER (1998-2002) lassen ein südlich des Tagebaus Profen gelegenes Liefergebiet vermuten. Die Siebkurvenanalyse der Bohrung L26265Z (Abb. 20) zeigt Ähnlichkeiten mit den von SEBASTIAN (2009) beschriebenen charakteristischen Sieblinien für Fluss-Unterläufe. Andere Ablagerungssituationen können dabei aufgrund der geografischen Lage und der klimatischen Situation (Eozän bis Oligozän) ausgeschlossen werden (z.B. glazialfluviatile Sedimentation/Sander). Die Entwicklungen der Siebkurven vom Liegenden zum Hangenden deuten auf eine Änderung des Ablagerungsmilieus hin. Zum Hangenden hin ähneln sie eher einem Flusslauf als im Liegenden. Der Einfluss eines transgredierenden Meeres könnte dafür verantwortlich sein. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass es sich um flussähnliche Ablagerungsräume wie z.B. einen Priel handelt. Für den marin beeinflussten Ablagerungsraum können die strahlend weiße Farbe der Feinsande des Profils sprechen sowie die darin auftretenden Schwerminerallagen (Abb. 6). Diese deuten auf ein küstennahes Ablagerungsmilieu hin. Vergleichbare rezente Ablagerungsbereiche sind z.B. an der heutigen Küste Fuerteventuras

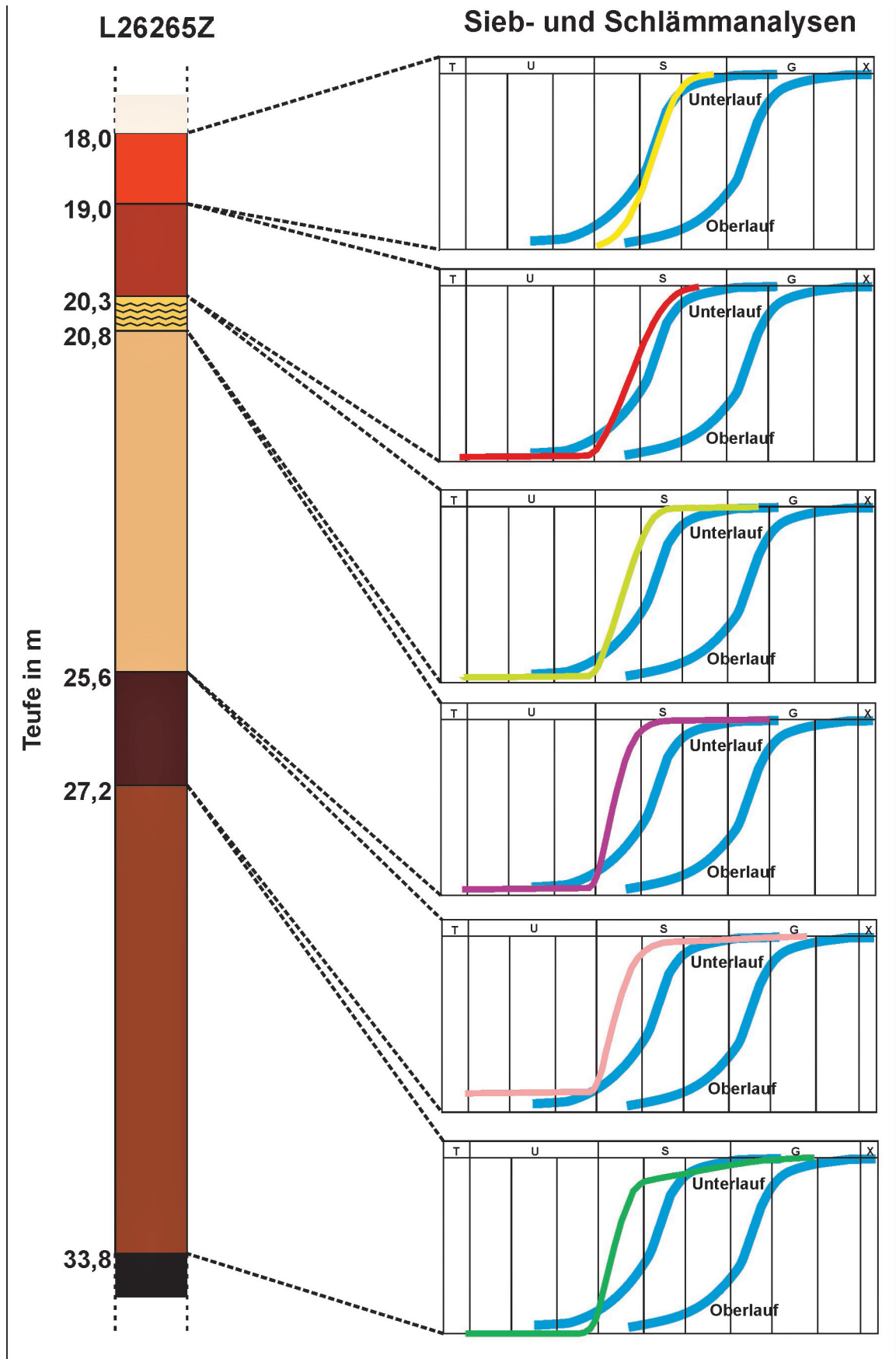


Abb. 20: Sieb- und Schlämmanalyse der Probe L26265Z. Unbeschriftete farbige Linien zeigen Korngrößenverteilung des jeweiligen Probenahmebereichs (DÖBELT 2013)..

zu beobachten. Dabei wird bei Starkregen Sediment an die Küste gespült und dort von den Gezeiten aufbereitet, wobei sich schwarze Schwermineralanreicherungen bilden.

Die Untersuchung und Siebanalyse der Liner-Bohrung L26265Z ergab im gesamten Bereich zwischen den Tertiärquarziten und dem Kohleflöz III eine Korngröße zwischen Fein- und Mittelsand (Abb.14 und 20). Der durch STANDTKE et al. (2010) beschriebene, das Kohleflöz III überlagernde Schluff von 5-10 m Mächtigkeit konnte an der vorliegenden Lokalität nicht nachgewiesen werden. Es ist jedoch typisch für die oftmals auskeilenden Domsener Sande, dass stratigraphische Abschnitte fehlen oder unterschiedliche Mächtigkeiten aufweisen (frdl. mündl. Mitteilung STANDTKE 2013). Die von KLUCK (2013) untersuchten Bohrlochdaten (Bohrlog, zur Verfügung gestellt durch die Mitteldeutsche Braunkohle AG) für das Untersuchungsgebiet ergaben eine durchschnittliche Mächtigkeit der Domsener Sande von 10,2 m. Dabei konnten Mächtigkeiten zwischen 0,3 m und 41,9 m beobachtet werden. Der durch geophysikalische Untersuchungen definierte Anomaliebereich (Gamma-Log) innerhalb der Domsener Sande schwankt, insoweit er auftritt, zwischen 0,6 m und 6,4 Metern (KLUCK 2013). Die durchschnittliche Mächtigkeit gibt KLUCK (2013) mit 2,18 m an.

Vergleiche der Bohr-Log Daten (KLUCK 2013) mit den entnommenen Liner-Bohrungen und der durchgeführten Siebanalyse zeigen jedoch, dass die tatsächliche Mächtigkeit der Domsener Sande höher ist (Abb. 20). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die in den Bohr-Logs als Domsener Schluffe interpretierten Bereiche lokal durch Siebanalysen den Domsener Sanden zugeordnet werden konnten (DÖBELT 2013). Der von KLUCK (2013) verwendete Anomaliebereich scheint aussagekräftiger, da die Gamma-Anomalien tatsächlich mit den an Schwermineralen angereicherten Bereichen übereinstimmen. Die Modellierung der Gamma-Strahlungsintensität nimmt nach Osten hin zu. KLUCK (2013) interpretiert diesen Anstieg als Zunahme der Konzentration der Strahlungsträger, gleichzusetzen mit der Zunahme der Konzentration der Schwerminerale im Allgemeinen. Die Untersuchungen der Liner-Bohrungen zeigen trotz großer Mächtigkeiten der Domsener Sande nur kleine Gamma-Anomaliebereiche (ab 0,5 m) während weitere Untersuchungen auch Schwermineralbereiche von 2,95 m Mächtigkeit zeigen (DÖBELT 2013).

10. Bewertung und wirtschaftliche Einschätzung

Die Schwermineralvorkommen werden im Folgenden bezüglich ihrer wirtschaftlichen Aspekte näher beleuchtet. Der Fokus liegt dabei auf der Quantität und Qualität der Wertminerale. Die technischen Aspekte, die die reale Wirtschaftlichkeit ebenfalls maßgeblich beeinflussen, werden nicht in die Betrachtungen einbezogen.

Nach ORTMANN (1962) und LUDWIG (1955) sind Schwermineralgehalte von unter 0,1 % für Grobkiesproben typisch. Bei höheren Gehalten bezogen auf die Gesamtprobe kann man von einer Schwermineralanreicherung reden. Ob man auch von einer Wirtschaftlichkeit der Proben reden kann, hängt jedoch zusätzlich von den Abbauraten der Tagebaue, vom Mineralinhalt des Schwermineralkonzentrats und von Mineralverwachsungen der wirtschaftlich nutzbaren Minerale ab. Nach ELSNER (2010) sind folgende Schwerminerale von wirtschaftlicher Relevanz:

- Ilmenit und Leukoxen
- Rutil
- Zirkon
- Monazit und Xenotim
- Aluminiumsilikate
- Staurolith
- Granat
- Chromit
- Magnetit
- Kassiterit
- Columbit-Tantalit
- Wolframit
- Scheelit

In Tab. 2 sind die Gehalte der potenziell wirtschaftlich relevanten Schwerminerale der Kiessande Grana, Klaus, Schkölen-Nautschütz, Prießnitz, Osterfeld und Profen detailliert dargestellt.

Tab. 2: Schwermineralgehalte in den Kiessandproben Grana, Klaus, Schkölen-Nautschütz, Prießnitz, Osterfeld und Profen bezogen auf die Gesamtprobe (Angaben in ppm).

	Ilmenit	Ti-Oxide	Xenotim & Monazit	Staurolith	Al-Silikate	Zirkon	Chromit	Kassiterit
Klaus	1129	529	33	647	344	506	57	178
Profen	354	287	11	426	253	127	25	12
Grana	346	200	6	186	87	172	1	46
Osterfeld	133	64	3	0	9	30	5	1
Schkölen-Nautschütz	72	37	2	0	21	6	1	0
Prießnitz	283	199	9	0	55	38	3	1

10.1 Domsener Sande

Die Klassifizierung der Schwerminerale ergibt für das Untersuchungsgebiet von DÖBELT (2013) eine Titanoxid-Zirkon-Turmalin-Seife. HÄRTEL (1972) bezeichnete die Schwermineralanreicherung als Titan-Zirkon-Monazit-Seife, jedoch konnte in den vorliegenden Untersuchungen keine Dominanz von Monazit festgestellt werden. Die Gamma-Anomalie ordnet HÄRTEL (1972) den Strahlungsträgern Monazit und Zirkon zu. Die EDX-Messungen (REM) der Minerale bei DÖBELT (2013) haben jedoch gezeigt, dass Zirkon weitestgehend frei von Th und U ist und als Strahlungsträger hauptsächlich die SEE-führenden Minerale Monazit, Xenotim und die Al-(Ba)-Phosphate in Frage kommen. Diese können, wie die EDX-Messungen belegen, sowohl Th als auch U führen. Die Minerale sind dabei sehr variabel in ihrer chemischen Zusammensetzung und bauen unterschiedlichste Mengen an Seltenen Erdelementen ein.

Die wirtschaftlich interessanten Schwerminerale in den Domsener Sanden sind nach HÄRTEL (1972) Ilmenit, Rutil, Anatas, Brookit, Leukoxen, Zirkon, Monazit und Xenotim. Durch BURMESTER (2012) erstmals beschrieben, müssen die SEE-führenden Al-(Ba)-Phosphate ergänzt werden. Andere Schwerminerale sind auch bei DÖBELT (2013) nur untergeordnet aufzufinden und nicht von wirtschaftlicher Bedeutung (z.B. Kassiterit und Korund). Die vorliegenden Analysen weisen darauf hin, dass die Domsener Sande die SEE-führenden Minerale Monazit, Xenotim und Al-(Ba)-Phosphate (z.B. Kemmlitzit und Svanbergit) enthalten. Insgesamt ist der durchschnittliche Anteil an SEE-führenden Mineralen im Anomalie-Bereich mit ca. 0,03 % relativ gering. Die höchste Anreicherung von SEE-führenden Mineralen (0,16 %) konnte im 0,5 m mächtigen Anomaliebereich der Liner-Bohrung L26265Z beobachtet werden. Der gesamte Schwermineralanteil lag dort bei 3,25 Gew.-% (Tab. 1). Die Domsener Sande zeigen in den Bereichen ohne Gamma-Anomalie keine weiteren Schwermineralanreicherungen. Der Schwermineralanteil der Probe mit dem niedrigsten Gamma-Strahlungswert beträgt lediglich 0,23 Gew.-%.

Insgesamt liegt eine geringe Gesamtkonzentration der Schwerminerale vor, da sich Anreicherungen nur auf einen kleinen Teil des stratigraphischen Profils beschränken. Dieser ist mithilfe des Gamma-Logs nachweisbar. Der Bereich ist jedoch zu geringmächtig, um ihn mit den Großgeräten der MIBRAG abzubauen. Eine Lokalisierung der Schichten wäre notwendig und mittels Geophysik (Gamma-Anomalie) auch möglich. Der Abbau der geringmächtigen Schichten (0,5-4 m) wäre durch den kleinräumigen Fazieswechsel jedoch sehr aufwendig und

unwirtschaftlich.

10.2 Kiessande Profen

Die von MENNICKE (2015) analysierten Kiessande des Tagebaus Profen weisen einen durchschnittlichen Schwermineralgehalt von 0,48 Gew.-% auf (Tab. 1). Einen Großteil machen allerdings die Schwerminerale Topas und Turmalin aus. Der Anteil von wirtschaftlich nutzbaren Mineralen beschränkt sich auf 0,15 Gew.-%, welche sich aus den Wertmineralen Ilmenit/Leukoxen, Titanoxiden, Zirkon, Monazit, Xenotim, Aluminiumsilikaten, Staurolith, Chromit, Kassiterit (s. Abb. 21) und Columbit/Tantalit zusammensetzen (MENNICKE & BORG 2016). Hierbei ist allerdings anzumerken, dass Monazit, Xenotim, Chromit, Kassiterit und Columbit/Tantalit (nur bei REM-Analyse aufgetreten) zu verhältnismäßig sehr geringen Anteilen auftreten. Somit ist die allgemeine Anreicherung der Schwerminerale nicht wirtschaftlich nutzbar.

Besonderheiten ließen sich bei den Mineralen Rutil/Anatas und Ilmenit/Leukoxen feststellen. Rutil/Anatas ist zu ca. 70 Gew.-% freiliegend. Außerdem finden sich neben Ti partiell andere Wertelemente in Rutil/Anatas. Einige Körner weisen geringe Gehalte an Cr und Nb von ca. 0,5 Gew.-% auf.

Ilmenit/Leukoxen kann neben Ti ebenfalls weitere Wertelemente enthalten. In einzelnen Ilmeniten/Leukoxenen wurde Mn mit ca. 1,4 Gew.-% und W mit ca. 1,7 Gew.-% nachgewiesen. Des Weiteren wurde ein erhöhtes Ti/Fe-Verhältnis in Ilmenit/Leukoxen festgestellt. Außerdem besitzt Ilmenit/Leukoxen ähnlich wie Rutil/Anatas einen Freiheitsgrad von 60-80 Gew.-% freigelegten Körnern. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass es sich bei den nicht freiliegenden Körnern zum Großteil um Verwachsungen zwischen Rutil/Anatas und Ilmenit handelt.

Innerhalb der Zirkonfraktion der Kiessande konnten sowohl Th- und U-haltige, als auch Th-

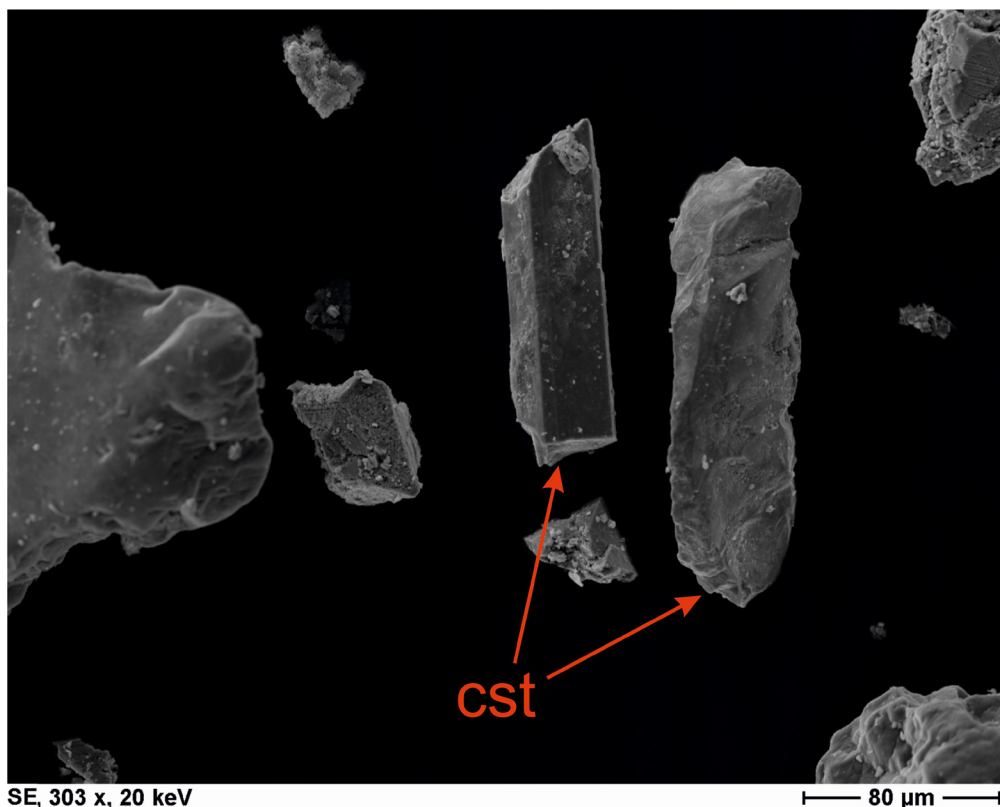


Abb. 21: REM-Aufnahme von freiliegenden Kassiteriten (cst) aus der Probe Schwerzau II (Tagebau Profen).

und U-freie Zirkone ermittelt werden. Das Verhältnis dieser beiden Zirkonarten zueinander war nicht Bestandteil der Untersuchungen. Die SEE-führenden Minerale Monazit und Xenotim sind in nur sehr geringen Konzentrationen vorhanden.

Staurolith tritt als sehr heterogenes Wertmineral auf. Sehr oft beinhalten die Körner Einschlüsse von Rutil/Anatas, Ilmenit, Leukoxen, Turmalin, Zirkon, Monazit und Xenotim. Auch die Aluminiumsilikate weisen Einschlüsse auf. Dabei handelt es sich vor allem um Xenotim und Kassiterit. In Columbit/Tantalit wurde ein Nb-Ta-Verhältnis von ca. 3:1 festgestellt. Neben 13 Gew.-% Fe ließen sich in geringen Mengen auch W, Ti, Mn, Zn und Sc belegen.

Die Schwermineralanreicherung in den Kiessanden aus dem TB Profen sind mit 0,48 Gew. % zwar erhöht, stellen aber in Anbetracht des Anteils der wirtschaftlich nutzbaren Minerale von lediglich 0,15 Gew.-% an der Gesamtprobe keine abbauwürdige Seifenlagerstätte dar.

10.3 Kiessande Prießnitz

Die von MIGALK (2015) analysierte Kiessandprobe Prießnitz zeigt einen Schwermineralgehalt von lediglich 0,07 Gew.-%, was keiner Schwermineralanreicherung entspricht (Tab. 1). Optisch sind keine abgrenzbaren Schwerminerallagen innerhalb des Kiessandprofils auszumachen. Die auftretenden wirtschaftlich relevanten Minerale Ilmenit/Leukoxen, Rutil/Anatas, Aluminiumsilikate, Zirkon, SEE-Phosphate, Granat, Kassiterit und Staurolith machen einen Anteil von ca. 81 Gew.-% am Schwermineralkonzentrat aus. SEE-führende Phosphate treten zu 1,5 Gew.-% im Konzentrat auf und setzen sich hauptsächlich aus Monazit, Florenzit und einem geringen Anteil von Xenotim zusammen. Die exemplarische REM-Analyse an Monazit hat in allen Fällen einen Einbau von Th (zw. ca. 3 und 10 Gew.-%) ergeben. In Xenotim wurde sowohl U und als auch Th nachgewiesen. Eine Wirtschaftlichkeit aller Phosphate wird aufgrund der geringen Gehalte ausgeschlossen. Ilmenit macht den größten Anteil am Schwermineralkonzentrat aus. Mit ca. 0,03 Gew.-% an der Gesamtprobe wird er trotzdem als nicht wirtschaftlich relevant betrachtet. Dennoch ist der Titanisierung des Ilmenits durch Leukoxenisierung Beachtung zu schenken. Außerdem wurde ermittelt, dass zwar nur rund 65 Gew.-% des Minerals frei vorliegen, der Großteil der Verwachsungen jedoch aus den titanhaltigen Mineralen Rutil/Anatas besteht (MIGALK 2015).

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann aufgrund der Analyse von lediglich einer Probe keine gesicherte Aussage zur Wirtschaftlichkeit getroffen werden. Das Ergebnis liefert einen ersten Überblick über den Schwermineralinhalt der Kiessande. Die geringen Gehalte der wirtschaftlich relevanten Minerale von unter 0,1 % weisen jedoch darauf hin, dass es sich bei der beprobten Lagerstätte um keine abbauwürdige Seifenlagerstätte handelt.

10.4 Kiessande Schkölen-Nautschütz

Die von MIGALK (2015) analysierte Kiessandprobe Schkölen-Nautschütz zeigt einen Schwermineralgehalt von lediglich 0,02 Gew.-%, was keiner Schwermineralanreicherung entspricht (Tab. 1). Optisch sind keine abgrenzbaren Schwerminerallagen innerhalb des Kiessandprofils auszumachen. Die auftretenden wirtschaftlich relevanten Minerale Ilmenit/Leukoxen, Rutil/Anatas, Aluminiumsilikate, Zirkon, SEE-Phosphate, Granat, Kassiterit und Staurolith machen einen Anteil von ca. 73 Gew.-% am Schwermineralkonzentrat aus.

SEE-führende Phosphate zeigen einen Gehalt von 1 Gew.-% am Konzentrat und setzen sich hauptsächlich aus Monazit, Florenzit und einem geringen Anteil von Xenotim zusammen. Die exemplarische REM-Analyse an Monazit hat in allen Fällen einen Einbau von Th (zw. ca. 1 und 7 Gew.-%) ergeben. Es wurden außerdem Xenotime ohne U und Th sowie Xenotime mit bis zu 6 Gew.-% U-Gehalt analysiert. Eine Wirtschaftlichkeit aller Phosphate wird aufgrund der geringen Gehalte ausgeschlossen.

Das Kiessandprofil in Schkölen-Nautschütz konnte zwar fast vollständig beprobt werden, dennoch ist zu beachten, dass lediglich eine Probe genommen wurde. Diese dient einem ersten Überblick über den Schwermineralinhalt. Aufgrund der geringen Schwermineralkonzentration in dieser Probe wird nach derzeitigem Kenntnisstand davon ausgegangen, dass es sich bei der beprobten Lagerstätte um keine abbauwürdige Seifenlagerstätte handelt.

10.5 Kiessande Osterfeld

Die von MIGALK (2015) analysierte Kiessandprobe Osterfeld zeigt einen Schwermineralgehalt von lediglich 0,03 Gew.-%, was keiner Schwermineralanreicherung entspricht (Tab. 1). Optisch sind keine abgrenzbaren Schwerminerallagen innerhalb des Kiessandprofils auszumachen. Die auftretenden wirtschaftlich relevanten Minerale Ilmenit/Leukoxen, Rutil/Anatas, Zirkon Aluminiumsilikate, SEE-Phosphate, Granat, Kassiterit und Staurolith machen einen Anteil von ca. 70 Gew.-% am Schwermineralkonzentrat aus.

SEE-führende Phosphate treten mit einem Anteil von 1,1 Gew.-% im Konzentrat auf und setzen sich hauptsächlich aus Monazit, Florenzit und einem geringen Anteil von Xenotim zusammen. Die exemplarische REM-Analyse an Monazit zeigt sowohl Monazite ohne Th und U als auch Monazite, in denen beide Elemente eingebaut sind. Gleiches gilt für die analysierten Xenotime. Eine Wirtschaftlichkeit aller Phosphate wird aufgrund der geringen Gehalte ausgeschlossen.

Ilmenit macht auch in Osterfeld den größten Anteil am Schwermineralkonzentrat aus. Nähere Analysen zum Titangehalt wurden jedoch aufgrund der generell sehr geringen Schwermineralkonzentrationen in der Gesamtprobe nicht durchgeführt.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann aufgrund der Analyse von lediglich einer Probe keine gesicherte Aussage zur Wirtschaftlichkeit getroffen werden. Das Ergebnis liefert einen ersten Überblick über den Schwermineralinhalt der Kiessande. Die Gehalte der wirtschaftlich relevanten Minerale weisen jedoch darauf hin, dass es sich bei der beprobten Lagerstätte um keine abbauwürdige Seifenlagerstätte handelt.

10.6 Kiessande Grana

In der von MIGALK (2015) analysierten Großprobe Grana wurde ein Schwermineralgehalt von 0,24 Gew.-% ermittelt, sodass von einer Schwermineralanreicherung geredet werden kann. Optisch sind keine abgrenzbaren Schwerminerallagen innerhalb des Kiessandprofils auszumachen. Es treten die wirtschaftlich relevanten Minerale Ilmenit/Leukoxen, Rutil/Anatas, Zirkon, Aluminiumsilikate, Staurolith, Kassiterit, SEE-Phosphate und Granat auf. Diese Minerale machen rund 45 Gew.-% des Schwermineralkonzentrats und damit lediglich 0,11 Gew.-% der Gesamtprobe aus (Tab. 1).

Es wurden SEE-führende Phosphate mit einem Gehalt von 0,3 Gew.-% im Schwermineralkonzentrat ermittelt, die sich aus Florenzit, Xenotim, Monazit und einem sehr geringen Prozentsatz Apatit zusammensetzen. Die exemplarische REM-Analyse an Monazit hat in allen Fällen einen Einbau von Th ergeben, die Analyse von Xenotim einen Einbau von U. Wegen des geringen Gehalts von lediglich je 3 ppm an der Gesamtprobe wird die wirtschaftliche Nutzbarkeit beider Minerale jedoch ausgeschlossen. Gleiches gilt für die weiteren Phosphate.

Aufgrund des Kassiteritgehaltes von fast 2 Gew.-% im Schwermineralkonzentrat wurde eine wirtschaftliche Relevanz näher geprüft. Mittels QEMSCAN-Analytik ergab sich, dass 95 Gew.-% der Kassiterite zu 90-100 % frei vorliegen. Der hohe Freiheitsgrad wurde mit exemplarischen REM-Analysen bestätigt. Dabei wurde lediglich ein sehr seltenes Auftreten von sehr kleinen Einschlüssen ermittelt. Auf Grundlage des Kassiteritgehaltes wurde für das Konzentrat ein Sn-Anteil von 1,53 Gew.-% berechnet. Im Zuge der durchgeführten Analytik konnten keine Sn-

Gehalte in weiteren Mineralen nachgewiesen werden, weshalb davon ausgegangen wird, dass dieser Sn-Gehalt dem Gesamt-Sn-Gehalt des Konzentrats entspricht. Aufgrund der Konzentration und des guten Freiheitsgrades des Kassiterits wurde zur Verifizierung des hohen Sn-Gehalts in den Proben im Labor der Bureau Veritas Minerals Laboratories in Kanada mittels ICP-ES eine weitere Analyse durchgeführt. Die Sn-Gehalte der QEMSCAN-Analytik konnten nicht bestätigt werden (Tab. 3). Eine konkrete Ursache wurde nicht gefunden. Mögliche Gründe liegen in einer Inhomogenität des Probenmaterials oder einem unvollständigen Sn-Aufschluss bei der chemischen Analyse. Bei Bedarf sollte weiteres Probenmaterial für zusätzliche Analysen zur Prüfung des Sn-Gehalts herangezogen werden.

Generell ist zu beachten, dass das Kiessandprofil in Grana zwar fast vollständig beprobt wurde, jedoch lediglich eine Großprobe genommen wurde. Diese gibt einen Überblick zur Schwermineralzusammensetzung des Kiessandhorizontes und soll als Grundlage für weitere Analysen dienen.

Die Aussagen zur Wirtschaftlichkeit sind entsprechend zu bewerten und liefern lediglich einen Anhaltspunkt darüber, welche Minerale bei weiterführenden Bearbeitungen besonders zu berücksichtigen sind. Anhand der vorliegenden Großprobe ergibt sich zwar eine wirtschaftliche Anreicherung von Schwermineralen, jedoch zeigen die einzelnen wirtschaftlich relevanten Minerale nach vorliegendem Kenntnisstand keine wirtschaftliche Konzentration bezogen auf die gesamte Kiessandschicht. Zusätzlich bildet die beprobte Kiessandschicht im Tagebau Grana das Liegende und wird somit nicht abgebaut. Für die wirtschaftliche Nutzung der Schwerminerale müsste demnach der Abbau auf die Kiessandschicht ausgeweitet werden.

Tab. 3: Unterschiede in den Sn-Gehalten der Schwermineralkonzentrate (SMK) und Gesamtproben Grana und Klausä bei unterschiedlicher Analytik (Sn-Gehalte nach QEMSCAN errechnet aus Kassiteritgehalt, MIGALK 2015).

	QEMSCAN		ICP-ES	
	SMK	Gesamtprobe	SMK	Gesamtprobe
Grana	1,53 Gew.-%	36,35 ppm	0,801 Gew.-%	19,103 ppm
Klausä	2,18 Gew.-%	140,06 ppm	0,882 Gew.-%	56,648 ppm

10.7 Kiessande Klausä

In der von MIGALK (2015) analysierten Großprobe Klausä wurde ein Schwermineralgehalt von 0,64 Gew.-% ermittelt (Tab. 1), sodass von einer Schwermineralanreicherung geredet werden kann. Optisch sind keine abgrenzbaren Schwerminerallagen innerhalb des Kiessandprofils auszumachen. Es treten die wirtschaftlich relevanten Minerale Ilmenit/Leukoxen, Rutil/Anatas, Zirkon, Aluminiumsilikate, Staurolith, Kassiterit, SEE-Phosphate und Granat auf. Diese machen rund 53 Gew.-% des gesamten Schwermineralkonzentrates aus, was einem Anteil von 0,34 Gew.-% an der Gesamtprobe entspricht.

SEE-führende Phosphate treten mit 0,6 Gew.-% im Konzentrat auf und setzen sich hauptsächlich aus Monazit, Xenotim und einem geringen Anteil von Florenzit und Apatit zusammen. Die exemplarische REM-Analyse an Monazit hat in allen Fällen einen Einbau von Th (zw. 2 und 12 Gew.-%) und geringen Mengen U (max. 1 Gew.-%) ergeben. In Xenotim wurden keine Substitutionen durch U und Th nachgewiesen. Eine Wirtschaftlichkeit aller Phosphate wird aufgrund der geringen Gehalte ausgeschlossen.

Eine eventuelle wirtschaftliche Relevanz zeigt der Kassiteritgehalt von 2,8 Gew.-% innerhalb des Schwermineralkonzentrats. Außerdem liegen 95 Gew.-% der Kassiterite zu 90-100 % frei vor. Wie auch in der Probe Grana konnten im Zuge der durchgeführten Analytik keine weit-

eren Sn-haltigen Minerale ermittelt werden, sodass davon ausgegangen wird, dass der kasiteritbedingte Sn-Gehalt dem gesamten Sn-Gehalt des Konzentrats entspricht. Aufgrund der Konzentration und des guten Freiheitsgrades wurde zur Verifizierung dieses hohen Sn-Gehalts auch an der Probe Klausä eine weitere Analyse mittels ICP-ES im Labor der Bureau Veritas Minerals Laboratories in Kanada durchgeführt.

Die Sn-Gehalte der QEMSCAN-Analytik konnten mit den zusätzlichen Analysemethoden nicht bestätigt werden (Tab. 3), sind jedoch je nach Abbaubedingungen wirtschaftlich zu berücksichtigen. Bei Bedarf sollte weiteres Probenmaterial für zusätzliche Analysen zur Prüfung des Sn-Gehalts herangezogen werden.

Generell ist zu beachten, dass das Kiessandprofil Klausä nur partiell beprobt werden konnte und lediglich eine Großprobe genommen wurde. Diese gibt einen Überblick zur Schwermineralzusammensetzung eines Teiles des Kiessandhorizontes und soll als Grundlage für weitere Analysen dienen. Die Aussagen zur Wirtschaftlichkeit sind entsprechend zu bewerten und liefern lediglich einen Anhaltspunkt darüber, welche Minerale bei weiterführenden Bearbeitungen besonders zu berücksichtigen sind. Der hohe Schwermineralgehalt an der Gesamtprobe liefert unter dem gegebenen Kenntnisstand eine Grundlage für weitere Prüfungen bezüglich der wirtschaftlichen Relevanz.

11. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die gewählten Aufbereitungsverfahren der unterschiedlichen Bearbeiter zielführend waren. Es sollte jedoch langfristig nach einer Vereinheitlichung der Aufbereitungsverfahren und der Probenahme in der Schwermineralanalytik gestrebt werden, um die Ergebnisse direkt miteinander vergleichbar zu machen. Ebenso sollte auf die Repräsentativität der Ergebnisse geachtet werden. So sind nur eine von sechs Kiessandbeprobungen und die Liner-Bohrungen in den Domsener Sanden mit jeweils drei Proben als tendenziell repräsentativ zu verstehen. Gleichermaßen sind die abgeleiteten Aussagen zur Provenienz und wirtschaftlichen Nutzbarkeit als Hinweise zu verstehen und nicht als gesicherte Einschätzungen. In Bezug auf die Analytik stellte sich heraus, dass die Methode der Rasterelektronenmikroskopie eine günstige und effektive Variante für die Untersuchung von Schwermineralen ist. In Verbindung mit QEMSCAN-Analytik ergibt sich eine breite Datengrundlage, die sich gut für die Charakterisierung von Schwermineralanreicherungen eignet und auch für zukünftige Fragestellungen empfohlen wird. Um gesicherte Aussagen über Wertmetall-Gehalte zu machen, ist eine quantitative Analyse jedoch unabdingbar.

12. Danksagung

Für die wissenschaftliche Betreuung an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg möchten wir uns herzlich bei Herrn Prof. Dr. G. Borg, Frau S. Walther, den Herren Dr. D. Wolf und A. Kamradt sowie Frau Dr. M. Frotzsch bedanken. Außerdem gilt besonderer Dank Herrn Dr. K. Stedingk (LAGB) und Frau R. Präger (LAGB) für die Vergabe und die finanzielle Ermöglichung der durchgeführten Projekte sowie für die konstruktive Betreuung während der Bearbeitung. Zusätzlich möchten wir uns bei Herrn Dipl.-Ing. A. Günther und den Mitarbeitern der MIBRAG, der SIBELCO Deutschland GmbH - Standort Grana, der Heim-Gruppe - Standort Klausä, der Kaspar Röcklein KG - Standort Osterfeld, der Unternehmensgruppe Fritz Herrmann - Standort Schkölen-Nautschütz sowie der MKW Mitteldeutsche Hartstein-Kies- und Mischwerke GmbH - Kieswerk Prießnitz für die Ermöglichung und Unterstützung der Probenahmen bedanken. Frau A. Nestler (TLUG) und Herr C. Bechmann (Nobitz) unterstützten uns bei der Probenahme in Thüringen. Herrn Dr. H. Blumenstengel (†) und Frau Dr. E. Endtmann sei für die Klärung wichtiger stratigraphischer Fragen gedankt. Für die Unterstützung bei der Aufbereitung und Analytik gehört Herrn Prof. Dr. D. Goldmann, Herrn

C. Duwe und Herrn B. Breitenstein von der Technischen Universität Clausthal sowie Frau E. Pollnow (MFPA Leipzig) und Dr. G. Rollinson von der University of Exeter unser herzlicher Dank. Außerdem möchten wir uns bei den Herren Prof. Dr. C. Gauert und Dr. K. Stedingk (LAGB) für wertvolle Hinweise bei der Erarbeitung des Manuskripts bedanken.

13. Literaturverzeichnis

- ALLEN, P.A. (1997): *Earth Surface Processes*.- 404 S., Blackwell Science Ltd, Oxford.
- ALLENBERG, A. (2011): *Qualitative und quantitative Untersuchung der Schwer- und Wertmineralführung pleistozäner Kiessande der Elbe in Sachsen-Anhalt*.- Dipl.-Arbeit MLU Halle-Wittenberg, 133 S., Halle/Saale (unveröff.).
- ALLENBERG, A., WOLF, D., ANDERSEN, J., ROLLINSON, G., BORG, G., PRÄGER, R. & STEDINGK, K. (2012): *Untersuchung der Schwermineral-Spektren in Terrassenablagerungen der Elbe, Saale und Weißen Elster (Sachsen-Anhalt)*.- *Mitt. Z. Geologie und Bergwesen von Sachsen-Anhalt*, 17, Rohstoffbericht 2012, 95-129, Halle/Saale.
- ANDÒ, S., GARZANTI, E., PADOAN, M. & LIMONTA, M. (2012): *Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis*.- *Sedimentary Geology*, 280, 165-178.
- BACHMANN, G.H. (2008): *Paläogen (Alttertiär)*.- In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M.: *Geologie von Sachsen-Anhalt*.- 273-290, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- BERKNER, A. (2004): *Der Braunkohletagebau im Südraum Leipzig - Bergbaumonographie*.- *Bergbau in Sachsen*, 11, 362 S., LfULG, Dresden.
- BLUMENSTENGEL, H. & ENDTMANN, E. (2014): *Biostratigraphische Bearbeitung unterschiedlicher lagerstättenkundlicher Probenserien*.- *Ergebnisbericht*, 30 S., Altenburg (unveröff.).
- BOENIGK, W. (1983): *Schwermineralanalyse*.- 152 S., Enke Verlag, Stuttgart.
- BORG, G. (1986): *Faceted garnets formed by etching. Examples from sandstones of Late Triassic age, South Germany*.- *Sedimentology*, 33, 141-146.
- BURMESTER, E. (2012): *Aufbereitung und Klassifizierung der Schwerminerallagen in den Decksanden des Braunkohletagebaus Profen in Sachsen-Anhalt*.- BSc-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 80 S., Halle/Saale (unveröff.).
- DIMROTH, E. (1960): *Stratigraphie, Tektonik und Metamorphose im südwestlichen Fichtelgebirge*.- In: Ziehr, H. & Lieber, W. (Hrsg.): *Fichtelgebirge und Münchberger Gneismasse - Geologie-Mineralogie-Petrographie*.- 71-89, VFMG e.V., Heidelberg.
- DÖBELT, R. (2011): *Schwermineralinhalt der Domsener Sande, im Bereich des Tagebaues Schwarzerzau (Sachsen-Anhalt)*.- BSc-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 62 S., Halle/Saale (unveröff.).
- DÖBELT, R. (2013): *Vergleichende petrografische Untersuchungen und Schwermineralanalysen der Domsener Sande, anhand von Linerbohrungen und Stoßprofilproben aus dem Tagebaukomplex Profen, Abbaufeld Domsen*.- MSc-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 133 S., Halle/Saale (unveröff.).
- EISENÄCHER, L., REY, S., KNAUF, C., NUGLISCH, K. & LUGE, J. (1982): *Ergebnisbericht Lagerstättengeologie, Kiessand Prießnitz*.- *Ergebnisbericht*, VEB Geologische Forschung und Erkundung, Halle/Saale (unveröff.).
- EISSMANN, L. & LITT, T. (1994): *Das Quartär Mitteldeutschlands. Ein Leitfaden und Exkursionsführer. Mit einer Übersicht über das Präquartär des Saale-Elbe-Gebietes*.- *Altenburger naturwiss. Forsch.*, 7, 458 S., Altenburg.

- EISSMANN, L. (2002): Tertiary geology of the Saale-Elbe Region.- *Quaternary Science Reviews*, 21, 1245-1274, Elsevier, München.
- ELLENBERG, J. & DOLL, G. (1983): Zur Sedimentation des Domsener Sandes (Obereozän) im Raum Profen.- Kurzfassung Vortrag zur 30. Jahrestagung der GGW, Mitt. Ges. f. Geol. Wiss., 11 (2/3), 23-24, Berlin.
- ELSNER, H. (2010): *Heavy Minerals of Economic Importance*.- 218 S., BGR, Hannover.
- ESCHER, D., FISCHER, J., MEIER, J., RASCHER, J., KÄSTNER, S. & DUTSCHMANN, U. (1998-2002): Lithofazieskarten Tertiär Nordwestsachsen 1 : 50 000, Einheitsblatt Zeitz (2665), Mittweida (2666), Leipzig (2565), Wurzen (2566), Bitterfeld (2465), Eilenburg (2466). Freiberg: GEOmontan GmbH Freiberg, LfULG (Hrsg.).
- FRIIS (1974): Weathered heavy-mineral associations from the young-tertiary deposits of Jutland, Denmark.- *Sedimentary Geology*, 12, 199-213.
- FÜCHTBAUER, H. (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine*.- 1141 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GLÄSSER, W. & WIEFEL, H. (1997): Erläuterungen zur geologischen Karte 1 : 25000 von Thüringen, Blatt Langenleuba - Niederhain, Nr. 5041.- TLUG (Hrsg.).
- HÄRTEL, H. (1972): Technisch-ökonomische Einschätzung der volkswirtschaftlichen Bedeutung und Nutzung der Schwermineralsande im Deckgebirge der Braunkohlefelder Profen-Süd und -Nord sowie der angrenzenden Gebiete.- Ergänzender Teil III des Konditionsantrages Profen-Südfeld, 55 S., Halle/Saale (unveröff.).
- HARDISTY, J. (1994): Beach and nearshore sediment transport.- In: Pye, K. (Hrsg.): *Sediment Transport and Depositional Processes*.- 219-255, Blackwell Science Ltd, Oxford.
- HARTMANN, B. (2005): Die Genese des stofflichen Inventars des Braunkohlenflözes Bruckdorf (Obereozän) zwischen Halle und Bitterfeld, Sachsen-Anhalt.- Dissertation, MLU Halle-Wittenberg, 130 S., Halle/Saale (unveröff.).
- HUGHES, M.G., KEENE, J.B. & JOSEPH, R.G. (2000): Hydraulic sorting of heavy mineral grains by swash on a medium-sand beach.- *Journal of Sedimentary Research*, 70, 994-1004.
- JAHN, J. (2012). Petrographische Beschreibung einer Bohrung der Domsener Sande des Tagebaus Profen mit besonderem Focus auf deren Schwermineralführung.- BSc-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 48 S., Halle/Saale (unveröff.).
- KAULFUSS, W. & KRAMER, M. (2000): Naturlandschaften und Nutzungspotenziale Sachsens.- In: Kowalke, H.: *Sachsen*.- 71-73, Klett-Perthes-Verlag Gotha, Stuttgart.
- KLAUA, D., FALK, E., RAUSCH, M., RAU, D. & SCHRÖDER, N. (1987): Ergebnisbericht mit Vorratsberechnung: Erkundung Kies Schkölen IV, Teilgebiet Osterfeld.- Ergebnisbericht, VEB Geologische Forschung und Erkundung Freiberg, Jena (unveröff.).
- KLAUA, D., PFARRE, I. & RAU, D. (1980): Ergebnisbericht mit Vorratsberechnung: Suche und Erkundung Schkölen II, Feld Kleinhelmsdorf.- Ergebnisbericht, VEB Geologische Forschung und Erkundung Freiberg, Jena (unveröff.).
- KLUCK J. (2013): Verbreitung und lithologische Modellierung der "Domsener Sande" im Bereich des Abbaufeldes Domsen (Tagebau Profen) unter besonderer Berücksichtigung der SEE-führenden Minerale.- MSc.-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 128 S., Halle/Saale (unveröff.).
- KOCUREK, G.A. (1996): Desert aeolian systems.- In: Reading, H. G. (ed.): *Sedimentary Environments, Processes, Facies and Stratigraphy*.- 125-153, Blackwell Science Ltd, Oxford.

- KRUTZSCH, W. (2008): Die Bedeutung der fossilen Pollengattung *Mediocolpopollis* Krutzsch (1959) (fam. Santalaceae) für die Gliederung des Obereozän im mitteldeutschen Ästuar.- Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Beiheft, 25, 103 S., Halle/Saale.
- KÜHL, A., JUNGE, F.-W., STEINBERG, T. & STANGE, R. (2006): Geologisch-sedimentologische Untersuchungen des Sedimentmittels zwischen dem Bornaer und dem Thüringer Hauptflöz im Restloch Groitzscher Dreieck.- Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 13 (1/2), 67-88, Cottbus.
- KUHN, G. (1997): Kiessande.- In: Gläßer, W. & Wiefel, H. (Hrsg.): Erläuterungen zur geologischen Karte 1 : 25000 von Thüringen, Blatt Langenleuba – Niederhain, Nr. 5041.- 67-77, TLUG.
- LANGBEIN, R. (1995): Oberer Buntsandstein – Myophorien-Folge – Petrographie.- In: Seidel, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen.- 309-313, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Leeder, M. (1999): Sedimentology and Sedimentary Basins. From Turbulence to Tectonics.- 592 S., Blackwell Science, Oxford.
- LITT, T. & WANSA, S. (2008): Quartär.- In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt.- 293-325, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- LUDWIG, G. (1955): Neue Ergebnisse der Schwermineral- und Kornanalyse im Oberkarbon und Rotliegend des südlichen und östlichen Harzvorlandes.- Geologie, 14, 1-76.
- MENNICKE, J. (2015): Qualitative und quantitative Untersuchungen des Schwermineralspektrums von drei eozänen Kiessandprofilen des Tagebaus Profen (Sachsen-Anhalt).- BSc-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 82 S., Halle/Saale (unveröff.).
- MENNICKE, J. & BORG, G. (2016): Ergänzungen zum Projektbericht - Qualitative und quantitative Untersuchungen des Schwermineralspektrums von 3 eozänen Kiessandprofilen des Tagebaus Profen (Sachsen-Anhalt).- Projektbericht LAGB Sachsen-Anhalt, 20 S., Halle/Saale (unveröff.).
- MENNING, M. & Deutsche Stratigraphische Kommission (2012): Erläuterung zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland Kompakt 2012.- Z. dt. Ges. Geowiss., 163, 385-409, Stuttgart.
- MIGALK, A. (2015): Charakterisierung eozäner Kiessande und ihres Schwermineralspektrums der Kiessand-Tagebaue Grana, Klausä, Kleinhelmsdorf, Osterfeld und Prießnitz.- MSc-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 163 S., Halle/Saale (unveröff.).
- MORTON, A.C. (1984): Stability of detrital heavy minerals in tertiary sandstones from the North Sea basin.- Clay Minerals, 19, 287-308.
- MORTON, A.C. (1985): Heavy minerals in provenance studies.- In: Zuffa, G.G. (Hrsg.): Provenance of Arenites.- Nato Science Series C, 148, 249-277, Springer Netherlands.
- MÜLLER, A. (1988): Die Schwerminerale im fluviatilen Quartär des mittleren Saale-Elbe-Gebietes.- Altenburger naturwiss. Forsch., 4, 1-70, Altenburg.
- NICKEL, E. (1973): Experimental dissolution of light and heavy minerals in comparison with weathering and intrastratal solution.- Contrib. Sedimentology, 1, 1-68.
- NUGLISCH, K., LUGE, J. & MEYER, E. (1990): Ergebnisbericht Glashafenton Tagebauvorfeld Grana.- Ergebnisbericht, Geologische Forschung und Erkundung GmbH, Jena, (unveröff.).
- ORTMANN, R.E. (1962): Schwermineralanalytische Untersuchungen des Tertiärs der Mulden von Egelu und Oschersleben sowie der angrenzenden Gebiete.- Dissertation, MLU Halle-

- Wittenberg, 154 S., Halle/Saale (unveröff.).
- PIRRIE, D. & ROLLINSON, G. K. (2011): Unlocking the applications of automated mineral analysis.- *Geology Today*, 27 (6), 226-235, Wiley & Sons, London.
- POHL, W. L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe – Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten.- 527 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- PYE, K. (1994): *Sediment Transport and Depositional Processes*.- 219-255, Blackwell Science Ltd, Oxford.
- RASCHER, J., ESCHER, D., FISCHER, J., DUTSCHMANN, U. & KÄSTNER, S. (2005): *Geologischer Atlas Tertiär Nordwestsachsen 1* : 250 000.- 7 S., LfULG, Freiberg/Dresden.
- ROBB (2008): *Introduction to ore forming processes*.- 373 S., Blackwell Science Ltd, Oxford.
- ROLLINSON, G.K. (2015): Mineralogical characterisation of heavy mineral concentrate samples by QEMSCAN®.- *Ergebnisbericht*, 7 S., Camborne School of Mines, Exeter (unveröff.).
- SALVINO, J.F. & VELBEL, M.A. (1989): Faceted garnets from sandstones of the Munising Formation (Cambrian), northern Michigan: petrographic evidence for their origin by intrastatal dissolution.- *Sedimentology*, 36, 371-379.
- SEBASTIAN, U. (2009): *Gesteinskunde, Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender*.- 175 S., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SEBASTIAN, U. (2013): *Die Geologie des Erzgebirges*.- 268 S., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- SLINGERLAND, R. (1984): Role of hydraulic sorting in the origin of fluvial placers.- *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 137-150.
- SLINGERLAND, R. & SMITH, N. D. (1986): Occurrence and formation of water-laid placers.- *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 113-147.
- STANDKE, G. (2002): *Das Tertiär zwischen Leipzig und Altenburg*.- *Beiträge zur Geologie von Thüringen*, 9, 41-73, Jena.
- STANDKE, G. (2008): Tertiär.- In: Pälchen, W. & Walter, H. (Hrsg.): *Geologie von Sachsen. Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte*.- 358-419, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- STANDKE, G., ESCHER, D., FISCHER, J. & RASCHER, J. (2010): *Das Tertiär Nordwestsachsens - Ein geologischer Überblick*.- 158 S., LfULG, Dresden.
- STANDKE, G. & SUHR, P. (2008): Tertiär.- In: Pälchen, W. & Walter, H. (Hrsg.): *Geologie von Sachsen. Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte*.- 358-419, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- STEINMÜLLER, A. & ORTMANN, R. (1970): Sedimentologische und stratigraphische Untersuchungen im Tertiär Ostthüringens.- *Geologie*, 19 (2), 178-205.
- STEINMÜLLER, A. (1995): Känozoikum.- In: Seidel, G. (Hrsg.): *Geologie von Thüringen*.- 378-422, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- TC-Tungsten Compounds (2015): *Technical Data Sheet - Sodium Polytungstate (SPT-x)*.
- VINKEN, R. (1988): The Northwest European Tertiary Basin: results of the International Geological Correlation Programme, Project No. 124.- *Geol. Jahrbuch Reihe A*, Band 100, 508 p.
- WELTJE, G.A. & VON EYNATTEN, H. (2004): Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook.- *Sedimentary Geology*, 171, 1-11.

WOLF, D. (2010): Charakterisierung der Schwermineralspektren mittel- und oberpleistozäner Kiessande am Saale-Unterlauf.- Dipl.-Arbeit, MLU Halle-Wittenberg, 184 S., Halle/Saale (unveröff.).

