

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	27 (2020), 1/2	S. 33–46	5 Abb., 1 Tab., 52 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	-------------------------

Zur Petrographie und magnetischen Suszeptibilität rezenter litoraler Ablagerungen auf der Insel Usedom

Petrography and Magnetic Susceptibility of Recent Litoral Sediments on the Island of Usedom

MICHAEL PIRRUNG, MARCUS BÖHM, DIRK MERTEN, MARTINA KUNZ-PIRRUNG

1 Einleitung und Fragestellung

Die Insel Usedom ist die östlichste deutsche Ostseeinsel, der östliche Teil gehört zur Republik Polen (Abb. 1). Im Folgenden werden für die bessere Lesbarkeit die deutschen Ortsbezeichnungen verwendet, da das Untersuchungsmaterial nahezu ausschließlich aus dem deutschen Anteil Usedom stammt. Die Barriere-Insel liegt südwestlich der Pommerschen Bucht und nördlich bis östlich des Kleinen Stettiner Haffs und der Boddengewässer Achterwasser, Krummer Wiek und Peenestrom. Die Oder mündet nördlich von Stettin in das lagunäre Ästuar Stettiner Haff. Die bei Swinemünde mündende Swine bildet den bedeutendsten Auslauf der Oder (siehe z. B. bei PUSCH et al. 2009).

Der Bereich Streckelsberg bei Zinnowitz ragt aus der ansonsten recht geradlinigen Küstenlinie Usedom nach Osten heraus, hier weicht die Uferlinie infolge Abrasion um bis zu 60 m (DENG et al. 2014, bzw. 90 m (ANONYMUS 2009) pro Jahrhundert landwärts zurück. Auch um die Mündung der Swine ragt die Küstenlinie Ost-Usedom und des westlichen Teils von Wollin seewärts vor als Folge des Materialaustrags durch das Ästuar (DENG et al. 2014). Durchschnittliche bodennahe Meeresströmungen zwischen Oktober 1996 und September 1997 verliefen in der westlichen Pommerschen Bucht als Teil eines Wirbels im Uhrzeigersinn mit Zentrum etwa 20 km nördlich der Swine-Mündung in westlicher bis nordwestlicher Richtung auf die seewärtige Küste von Usedom zu (HARFF et al. 2004) mit durchschnittlich etwa $0,5 \text{ cm s}^{-1}$ in etwa 1–2 km Entfernung vom Ufer. Bei Ostwind tritt in der östlichen Pommerschen Bucht ein Transportband von der Swine-Mündung nach Osten auf (LASS et al. 2001). Der Netto-Sedimenttransport im Litoral Usedom erfolgt nach ANONYMUS 2009 aufgrund vorherrschender Westwinde überwiegend nach Südsüdost, mit Ausnahme des Bereiches unmittelbar nördlich des Streckelsberges, wo Nordnord-westrichtung vorherrscht (DENG et al. 2014).

Der Untergrund Usedom besteht oberflächennah aus Lockersedimenten des Spätpleistozäns und Holozäns (DUPHORN et al. 1995), (KRIENKE 2004). Die Steilküsten

Usedom, siehe DENG et al. (2014) und Abbildung 1, liegen 1. zwischen Zinnowitz und Zempin, 2. am Streckelsberg zwischen Koserow und Kölpinsee, 3. südöstlich Kölpinsee bei Stubbenfelde, 4. am Langen Berg nordwestlich Bansin, und 5. in Heringsdorf. Sie bieten Aufschlüsse glazialer Moränen-Ablagerungen und von glazifluviatilen Schmelzwassersanden des letzten, deutsches Gebiet erreichenden Gletschervorstoßes (LAGERLUND et al. 1995), (HOFFMANN & REICHERTER 2012). Mit abnehmendem Alter und abnehmender Horizontalabstand zum Litoral sind holozäne Braun-, Gelb-, Grau- und Weißdünen vor allem in der Swine-Niederung verbreitet (OSADCZUK 2002). Rezente Ablagerungen der Boddengewässer werden vorwiegend von proximalen Organik-reichen Feinsanden und distalen ebenfalls Organik-reichen Peliten gebildet (LEIPE et al. 1998), (BORÓWKA et al. 2002). Oberflächennahe Ablagerungen der Pommerschen Bucht bestehen vor allem aus Fein- bis Mittelsanden (BOBERTZ et al. 2006).

Im Zweiten Weltkrieg wurde die Heeresversuchsanstalt auf der Halbinsel Peenemünde von Flugzeugen der Alliierten bombardiert (siehe u. a. ORDWAY et al. 2007). In der Nachkriegszeit erfolgte Munitionsverklappung im Seegebiet zwischen Usedom und Bornholm (BÖTTCHER et al. 2011). In Polen wurde zwischen der Oder-Mündung in das Stettiner Haff und dem Südtteil der Swine sowie in der südlichen Pommerschen Bucht ein Schifffahrtskanal auf 12,5 m Tiefe ausgebagert (BACHOR 2005), (DENG et al. 2014). Die in Nordnordwest–Südsüdost–Richtung verlaufende seewärtige Ausgleichsküste Usedom ist rund 42 km lang.

Bernstein wurde nach dem Zweiten Weltkrieg einige Jahre lang am Streckelsberg gewonnen (FRANKE 2019), heute gibt es nur vereinzelt Anreicherungen im Litoral. Offshore Sandgewinnung für Strandaufspülungen auf Usedom im Bereich Streckelsberg (ANONYMUS 2009) erfolgte 1996 auf der Höhe von Koserow und Zinnowitz (HARFF et al. 2004). Im Projekt „SEESand“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wird das Potential für eine Offshore-Gewinnung von Schwermineralen in der Ostsee untersucht (ANONYMUS 2018). Die Anreicherung von Schwermineralen

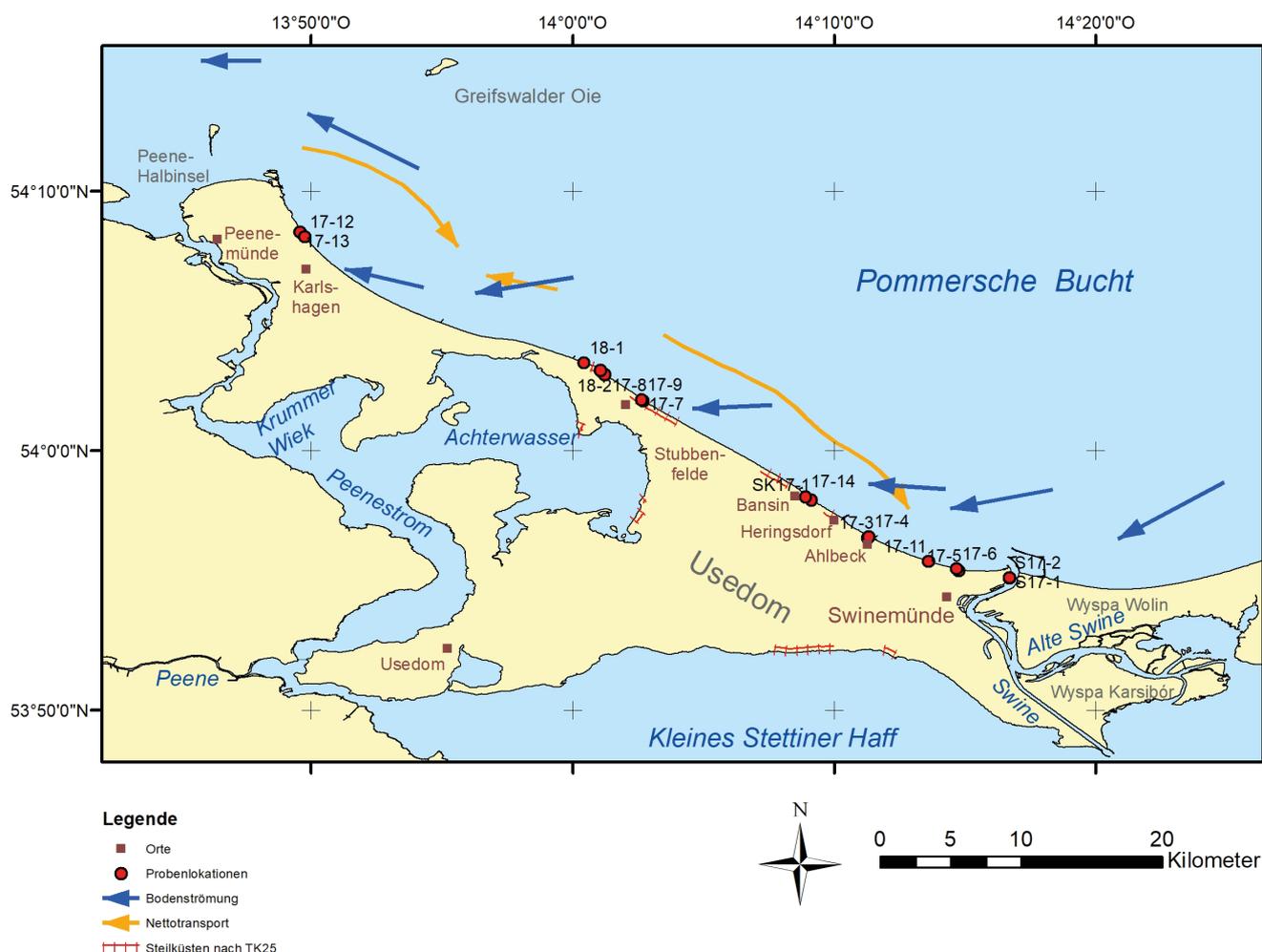


Abb. 1: Probenlokationen auf der Insel Usedom. Küstenlinie erstellt nach Luftbildern von Google Earth aus den Jahren 2016 bis 2018. Ortsnamen und Steilküsten ergänzt nach GARMIN 2008 und Luftbildern. Netto-Sedimenttransport nach ANONYMUS 2009: S. 17, mittlere bodennahe Strömungen nach HARFF et al. 2004. Probenbezeichnungen sind abgekürzt gemäß folgendem Schema: FM_Ostsee2017-1 als 17-1, FM_Ostsee2018-1 als 18-1, FM_Sackkanal2017-1 als SK17-1, FM_Swine2017-1 als S17-1. Die Symbole der Proben 17-3, Weißdüne, 17-8, Schwermineralseife Strandwall und 17-7, Grobsand Strandwall sind ganz oder teilweise durch eine nahegelegene Probe überdeckt.

Fig. 1: Sampling locations on the Island of Usedom. Coast line created after aerial images of Google Earth dating from 2016 to 2018. Location names and escarpments after GARMIN 2008 and aerial images. Net sediment transport after ANONYMUS 2009: P. 17, mean near bottom currents after HARFF et al. 2004. Sample names abbreviated after following scheme: FM_Ostsee2017-1 as 17-1, FM_Ostsee2018-1 as 18-1, FM_Sackkanal2017-1 as SK17-1, FM_Swine2017-1 as S17-1. Symbols of samples 17-3, white dune, 17-8, placer beach ridge, and 17-7, coarse sand beach ridge, are partly or entirely covered by nearby samples.

im Vorstrand und im Schwall- und Sogbereich des Strandwalls sowie nach Stürmen durch Abrasion mariner Sande und Aufwehung in die Vordünen ist von Usedom mehrfach beschrieben worden (WASMUND 1938), (PFEIFFER 1972), (BECKER & DIETZE 1986), (GRANITZKI & KATZUNG 2004), jedoch nach Kenntnis der Autoren bisher noch nicht im Hinblick auf die magnetische Suszeptibilität der Sedimente.

In dieser Studie werden vier Fragestellungen bzw. Ziele verfolgt: 1. Lassen sich mit sedimentpetrographischen und umweltmagnetischen Methoden anthropogene Me-

tallfragmente im Litoral Usedom nachweisen?; 2. Da Studien von z. B. (SHANKAR et al. 1996) grundsätzlich die Effizienz der magnetischen Suszeptibilität bei der Suche nach Schwermineral-Anreicherungen im Rahmen der Rohstoff-Suche gezeigt haben, kann für Proben von Usedom getestet werden, für welche Schwerminerale diese Methode einen Anzeiger auf erhöhte Konzentrationen darstellt; 3. Hinweise auf die Sedimentdynamik als Beitrag für die Planung des Küstenschutzes zu gewinnen; 4. für Rekonstruktionen des Paläomilieus holozäner Küstenablagerungen aus Bohrgut (VIEHBERG et al. 2008),

Kriterien zu entwickeln, mit denen sandige fossilfreie oder -arme Ablagerungen in einen Bezug zur Küstenlinie gestellt werden können.

2 Material und Methoden

Auf Usedom wurden an 20 Lokationen folgende Faziesbereiche beprobt: 1. Schwallbereich am Strandwall, Übergangsbereich nasser zu trockenem Strand, 2. Vordüne bzw. vorderste Weiß-Düne, 3. Gelbdüne am Streckelsberg, 4. Bachauslauf des Sackkanals südöstlich Bansin, 5. Westufer des Swine-Ästuars bei Swinemünde. Die Proben mit einem mittlerem Trockengewicht von 200 g wurden im März 2017 und im September 2018 entnommen, die Jahreszahl findet sich abgekürzt in den Probenbezeichnungen in Abbildung 1 wieder. Hierzu wurde eine 50 ml fassende Kunststoffschaufel verwendet, gelagert wurden die Proben in 1 l Allzweck- und Gefrierbeuteln. Die Teilproben der Gesamtfraktion und der nichtmagnetischen bzw. magnetischen Fraktion wurden in 12,5 ml Polystyrol-Dosen gelagert. Die Proben wurden im Trockenschrank bei Umluft über mindestens 3 Tage getrocknet. Das Gewicht der Gesamt- bzw. Teilproben wurde mit SARTORIUS Waagen TE3102S bzw. BP210S, Ablesegenauigkeit 0,01 bzw. 0,0001 g, bestimmt.

Die Auftrennung der Gesamtprobe in eine nichtmagnetische und eine ferrimagnetische Fraktion, letztere nachfolgend als magnetische Fraktion bezeichnet, erfolgte direkt an der trockenen Probe in einer Schale aus glasiertem Porzellan mit einer Teflonhülle um einen Fe-Stab an einem Sr-Nd-Permanentmagneten, konstruiert nach (DOBENECK et al. 1987). Zusätzlich erfolgte die Gewinnung an einigen Proben mit geringem Extrakt unter Wasserbedeckung.

Die Binokular-Ansprache der nichtmagnetischen Fraktion wurde bei 10,5- und 45-facher Vergrößerung im kombinierten Auf- und Durchlicht sowie Durchlicht mit einem Leica Zoom 6000 durchgeführt. Fotos wurden mit einer Sony DSC-W650 Digitalkamera aufgenommen, eingestellt auf 4608 x 3456 Bildpunkte, davon entfielen etwa 2900 x 2900 Bildpunkte auf den sichtbaren Ausschnitt. An diesen erfolgte eine Einstufung in eine der folgenden Kategorien: 1. Quarz matt, 2. Quarz glänzend, 3. Quarz mit oranger bis gelblicher Kutane, 4. Lithoklasten, 5. Granat, 6. grüne Hornblende, 7. Epidot, 8. Rutil, 9. orange + beige Körner, 10. Feldspat, 11. Anatas, 12. Schalen-Fragmente, 13. Mikroplastik-Fragmente. Kornparameter wurden an mindestens 300 Körnern je Probe bestimmt, hierbei wurden der maximale und der minimale Korndurchmesser ausgemessen, an Einzelkörnern die Rundung nach Schätzbildern nach PETTJOHN et al. (1973) (in: STOW 2008) bestimmt, die Sphärizität aus dem Verhältnis maximaler zu minimaler Korndurchmesser berechnet, und die Sortierung als Standardabweichung maximaler Korndurchmesser in phi-Einheiten ermittelt. Die Schiefe wurde nach WARREN (1974) (in: TUCKER 1985) aus Kornsummenkurven bestimmt.

Für die ergänzende Kornansprache der nichtmagnetischen Fraktion und für Korngrößenbestimmungen der magnetischen Fraktion wurde ein Keyence Digitalmikroskop VHX-6000 mit Objektiven 0–200x und 200–1000x verwendet bei Beleuchtung mit einer Kombination Ringlicht in einem 45 ° Sektor und Durchlicht. In der magnetischen Fraktion wurden Körner in die Kategorien Magnetite oder Lithoklasten eingestuft, zu letzteren wurden auch vereinzelte schwarze Hornblende gezählt, die mit weiteren weißen oder braunen Mineralen Aggregate bildet.

An zwei Proben wurde die Fraktion der Minerale leichter und schwerer als 2.80 g/ccm durch Schwerentrennung mittels Natrium-Polywolframat nach BOENIGK 1983 durchgeführt, Dünnschliffpräparate wurden mit Araldit 2020, HUNTSMAN, mit Brechungsindex 1.553 eingebettet, als Schleifmittel wurde Aluminiumoxid 9 bzw. 3 µm verwendet. Schwer- und Leichtmineralfraktion wurden unter einem ZEISS Axioskop bei 50x, 100x und 200x Vergrößerung durchgemustert.

Die Bestimmung der Masse-spezifischen magnetischen Suszeptibilität erfolgte nach DEARING 1994 mit einem Bartington MS2 Susceptibility Meter mit Sensor B (BARTINGTON-INSTRUMENTS 2018) nach Mehrfach-Messungs-Kalibration mit einer Standardprobe $3142 \cdot 10^{-6}$ [SI] des Herstellers, dabei betrug der Korrekturfaktor zwischen 0,9995 und 1,0038 an 14 Messtagen. Es wurden mindestens Doppelmessungen bei 460 Hz und für die Frequenzabhängigkeit mindestens vier Doppelmessungen bei 460 und 4600 Hz durchgeführt. Die relative Standardabweichung von 6 je 8 durchgeführten Doppelmessungen bei 460 und 4600 Hz beträgt gemittelt 2,0 bzw. 1,4 % des Mittelwertes der Proben. Thermomagnetische Messungen wurden in Luft mit einem Bartington Temperature-Susceptibility-System im Ramp-Modus mit 5 °C min^{-1} im Temperaturbereich 20 bis 800 °C und 800 bis 24 °C durchgeführt und daraus die Curie-Temperatur nach der Wendepunkt-Methode (FABIAN et al. 2013) bestimmt.

Für die Extraktion der Oxalat-löslichen Fraktion nach SCHWERTMANN (1959) wurde ohne weitere Aufbereitung 1 g getrocknetes Sediment < 2 mm in einem 50 ml Greiner Röhrchen abgewogen, mit 0,1134 Mol Di-Ammonium-oxalat-Monohydrat, MERCK 101192, p. A., und 0,0866 m Oxalsäure Dihydrat, MERCK 100495, p. A., versetzt und für 2 Stunden im Dunkeln mit 15 U min^{-1} überkopf geschüttelt, danach für 15 min bei 2500 U min^{-1} zentrifugiert. Überstehende Lösung wurde durch einen 0,45 µm Cellulose-Acetat-Filter in ein 15 ml Greiner-Röhrchen infiltriert. Elementgehalte für Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Ti wurden mit ICP-OES, Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv-gekoppeltem Plasma, 725ES, AGILENT Technologies, jeweils dreifach bestimmt. Zur Kalibration wurde MERCK Multielement Standard verwendet. Für Fein- bis Mittelsande wurden 4 Teilproben gemessen, für die beiden Grobsandproben 6 Teilproben. Bei K-Gehalten liegen Teilproben in 10 Proben unter der Nachweisgrenze, NWG, von 15 µg g^{-1} , bei P-Gehalten 6 Proben unter NWG $7,5 \text{ µg g}^{-1}$

und bei Na-Gehalten 5 Proben unter NWG $5 \mu\text{g g}^{-1}$. Die mittlere Standardabweichung aus vier bis sechs Messungen von Teilproben für das Element mit den niedrigsten mittleren Elementgehalten, K mit $26 \mu\text{g g}^{-1}$, beträgt für 9 Proben $2,8 \mu\text{g g}^{-1}$, für das Element mit den höchsten mittleren Elementgehalten, Na mit $473 \mu\text{g g}^{-1}$, beträgt sie für 9 Proben $86 \mu\text{g g}^{-1}$, Teilproben unterhalb der NWG wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Farben wurden mit der Farbtabelle nach Munsell (ANONYMOUS 2000) an der Gesamtfraction getrockneter Proben bestimmt.

Für die Faktoren- und Clusteranalyse wurde das Program GCDkit, Geochemical Data Toolkit for Windows, Version 4.1 (JANOUSEK et al. 2006) eingesetzt. Zuvor wurden, falls erforderlich, Elementgehalte unterhalb der Nachweisgrenze durch Zufallszahlen im Bereich zwischen 0 und NWG ersetzt und mit der Berechnung von $[\text{Messwert} - \text{Mittelwert}] / \text{Standardabweichung}$ erfolgte die Standardisierung der Messwerte.

Ausgewählte Daten können unter <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.907802> heruntergeladen werden. Eine Auflistung geowissenschaftlicher Literatur sowie Geländefotos der sedimentären Milieus und Informationen zu Korngrößenverteilung, Mineralen sowie Curie-Temperaturen findet sich in PIRRUNG et al. (2019).

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse in der Reihenfolge der oben genannten Ziele bzw. Fragen vorgestellt. In Tabelle 1 sind diese Parameter zusammenfassend dargestellt.

3.1 Nachweis anthropogener Metallfragmente

An magnetischen Extrakten sind mehrere Stahlfragmente in einer Düne an der Swine-Mündung und ein Blechpartikel zwischen Ahlbeck und Heringsdorf sowie eine Schlacke bei Stubbenfelde als anthropogene Partikel nachweisbar. Magnetische Sphärule, die vermutlich aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe kommen (JORDANOVA et al. 2006), konnten in zwei Proben von Ahlbeck je einmal und viermal in einer Düne an der Swine-Mündung beobachtet werden. Nur letztere Probe zeigt eine deutliche Dominanz anthropogener Partikel gegenüber geogenen Magnetiten. Da die genannte Probe nur eine Suszeptibilität von $65 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ der Gesamtfraction aufweist, kann allein aus der Suszeptibilität von Proben im Litoral Usedom nicht auf das Vorkommen oder Fehlen anthropogener Metallreste geschlossen werden.

Die Curie-Temperaturen liegen für fast alle Proben im Bereich von 552 bis $564 \text{ }^\circ\text{C}$, typisch für Titanomagnetite mit nur geringen Ti-Gehalten (EVANS & HELLER 2003). Nur in der an anthropogenen Metallresten angereicherten Probe einer Düne in der Swine-Mündung liegt die Curie-Temperatur

Fazies	N	MS_g	MS_n	MS_m	TC	MF	QZ_{NMF}	Md_{qzNMF}	Md_{mtMF}	Fe_g
Strandwall	8	469	40	178310	568	0,15	79	427	450	218
±	8	1199	44	120615	8	0,38	13	62	380	60
Strandwall*	6	596	30	214913	564	0,19	85	292	267	-
±	6	1391	46	118021	1	0,44	4	87	172	-
Weißdüne	6	115	20	255817	564	0,03	90	264	170	146
±	6	91	15	104385	2	0,04	2	368	40	45
Gelbdüne	1	71	14	176598	562	0,01	85	186	105	372
Bachauslauf	1	446	94	304891	562	0,06	89	372	140	199
Swine	1	7	5	194886	-	0,02	92	221	190	120

Tab. 1: Einzel- bzw. Mittelwerte ausgewählter Parameter für verschiedene Faziesbereiche. N = Probenanzahl; MS = massespezifische magnetische Suszeptibilität [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$], g = Gesamtfraction, n = nichtmagnetische Fraktion, m = ferrimagnetische Fraktion, TC = Curie-Temperatur [$^\circ\text{C}$], MF = ferrimagnetische Fraktion [Gew.-% der Gesamtprobe], NMF = nichtmagnetische Fraktion, QZ = Quarzanteil in Korn-%, Md = Median [μm], Fe = Eisengehalt in oxalatlöslicher Fraktion [$\mu\text{g g}^{-1}$], qz = Quarz, mt = Titanomagnetit, ± = Standardabweichung, * nur Mittelsande.

Tab. 1: Single and mean values of selected parameters for several facies zones. N = number of samples; MS = mass-specific magnetic susceptibility [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$], g = total fraction, n = nonmagnetic fraction, m = ferrimagnetic fraction, TC = Curie temperature [$^\circ\text{C}$], MF = ferrimagnetic fraction [wt.-% of total fraction], NMF = nonmagnetic fraction, QZ = quartz content in grain-%, Md = median [μm], Fe = iron content of oxalate-solvable fraction [$\mu\text{g g}^{-1}$], qz = Quartz, mt = titanomagnetite, ± = standard deviation, * only middle sands.

bei 622 °C, was nach THOMPSON & OLDFIELD (1986) für Hämatit, offensichtlich aus der Oxidation von Stahl resultierend, spricht.

3.2 Magnetische Suszeptibilität und Schwerminerale

Die Masse-spezifische magnetische Suszeptibilität der Gesamtfraktion von Proben aus dem Litoral Usedom liegt für Weißdünen niedriger als für den Strandwall, noch deutlich niedriger liegt die Probe aus dem Swine-Ästuar. Für 20 Strandwall-Proben von der südlichen Ostsee, die im Projekt FluvMag entnommen wurden in den Bereichen Schleimündung, Eckernförder Bucht, Timmendorfer Strand, Boltenhagen, Wohlenberger Wiek, Insel Poel, Darß und Zingst, liegt der Mittelwert mit $101 \pm 162 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ deutlich niedriger als für den Strandwall-Bereich Usedom. Fünf Proben von Weißdünen aus den letztgenannten Bereichen liegen mit $62 \pm 41 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ebenfalls niedriger. Für zwei Proben des von der Peene durchströmten Kummerower Sees ergaben sich mit $455 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ähnlich hohe Werte wie für den Strandwall Usedom. Im Litoral Usedom liegt die Frequenzabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität unter 1 %. Die kleinsten unter dem Mikroskop in einer hier untersuchten Probe beobachteten ferrimagnetischen Partikel haben einen Durchmesser von 10 µm.

Der Gewichtsanteil der extrahierten magnetischen Fraktion an der Gesamtprobe korreliert positiv mit der Masse-spezifischen magnetischen Suszeptibilität der Gesamtprobe, $R^2 = 0,99$. Der Granat-Gehalt in Korn-% in der nichtmagnetischen Fraktion korreliert positiv mit der Masse-spezifischen magnetischen Suszeptibilität der Gesamtfraktion, $R^2 = 0,766$; andere Schwerminerale haben geringere positive Korrelationen.

In der magnetischen Fraktion treten überwiegend Titanomagnetite als kantengerundete Oktaeder auf, seltener tritt Hornblende auf und noch seltener sind kugelförmige Partikel zu beobachten (Abb. 2). Der höchste Anteil der magnetischen Fraktion an der Gesamtprobe von etwa 1 Gew.-% tritt in einer Schwermineralseife des Strandwalls auf. Diese Probe weist mit 6 Korn-% auch den höchsten Anteil an Schwermineralen in der nichtmagnetischen Fraktion und mit $3434 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ auch die höchste magnetische Suszeptibilität der Gesamtfraktion auf.

3.3 Sedimentdynamik

In der nichtmagnetischen Fraktion des Litorals von Usedom, (Abb. 3) überwiegen Quarzkörner: glänzend, matt oder mit Kutane. Sie machen zwischen 51 und 92 Korn-% der nichtmagnetischen Fraktion aus; zwischen 2 und 39 Korn-% stellen Lithoklasten dar, bei denen granitische Gesteine am häufigsten auftreten; beide Komponenten zusammen ergeben 87 bis 98 Korn-%. Die Gehalte an Quarzkörnern mit einer Kutane, von gelblicher bis oranger

Färbung, in der nichtmagnetischen Fraktion liegen in Weißdünen mit im Mittel 50 Korn-% nahezu gleichhoch wie in Sanden des Strandwalls, nur die Gelbdüne hat einen Wert von 75 Korn-%. Bei den Kutanen um Quarzkörner dürfte es sich aufgrund der vorherrschend gelben Färbung um Goethit, der nicht in Oxalat-Lösung löslich ist, handeln (siehe z. B. KOENSLER 1989), während die untergeordnet orange Färbung auf Ferrihydrit bzw. Limonit (BLUME et al. 2010) zurückgehen dürfte, beide Minerale sind löslich in Oxalat-Lösung. In der Probe der Gelbdüne blieb der Anteil von Quarzkörnern mit Kutanen mit 75 bzw. 79 Korn-% vor bzw. nach der Anwendung von Oxalsäure etwa gleich hoch, was auf die Dominanz von Goethit hinweist. Bei einigen Körnern, sowohl aus Dünen Sanden als auch Sanden vom Strandwall, zeigt eine unterschiedlich intensive Färbung die Bildung in einem nur teilweise wassergesättigten, vadosen Porenraum mit präferentiellen Fließwegen an. Eine Strandwall-Probe vom September 2018 liegt mit nur 32 Korn-% Quarzkörnern mit Kutane im Bereich der niedrigsten Werte der Proben von 2017.

In der nichtmagnetischen Fraktion beträgt der Anteil an Lithoklasten in Weißdünen im Mittel etwa 5 und in Mittelsanden des Strandwalls etwa 7 Korn-%. Die beiden Proben mit den höchsten Gehalten an Lithoklasten sind die Grobsande des Strandwalls mit 24 bzw. 39 Korn-%, die erstgenannte der beiden Proben liegt zwischen Ahlbeck und Swinemünde etwa 5 km vom nächsten Steilufer bei Bansin entfernt.

Zwei in einer Horizontalabstand von 870 m im Bereich Streckelsberg von der Vordüne und vom nassen Strand entnommene Proben wurden für die Schwermineralanalyse aufgrund der Exposition dieses Bereiches ausgewählt. Quarz dominiert mit über 80 Korn-% die Leichtmineral-Fraktion und die Schwermineral-Fraktion wird in der Vordüne von brauner und grüner Hornblende mit zusammen 15 Korn-% bzw. am nassen Strand von Granat mit 19 Korn-% neben Lithoklasten mit 10 bzw. 39 Korn-% und opaken Körnern mit 30 bzw. 6 Korn-% geprägt. Detaillierte Schwermineraluntersuchungen quartärer Sedimente in Nordpolen ergaben ähnliche Zusammensetzungen wie für die Proben von Usedom (VAN LOON & PISARSKA-JAMRO 2017). Der Median der Schwermineralfraktion liegt im nassen Strand etwas über, in der Vorderdüne deutlich unter dem Median der Leichtmineralfraktion; der Schwermineralgehalt an der Gesamtprobe beim Strandwall ist mit 1 Gew.-% höher als in der Vordüne mit 0,3 Gew.-%.

Mikroplastik-Partikel mit 190 bzw. 230 µm Länge wurden nur in einer Probe am Streckelsberg beobachtet. Umgerechnet auf ein kg Trockensediment wären das 12 Partikel.

Die Korngröße der untersuchten Proben liegt im Bereich Fein- bis Mittelsand, nur bei zwei Proben vom Strandwall handelt es sich um Grobsande; die Werte für den Strandwall in Tabelle 1 sind einmal mit und einmal ohne die Lithoklasten-reicheren Grobsande angegeben. Von allen bestimmten

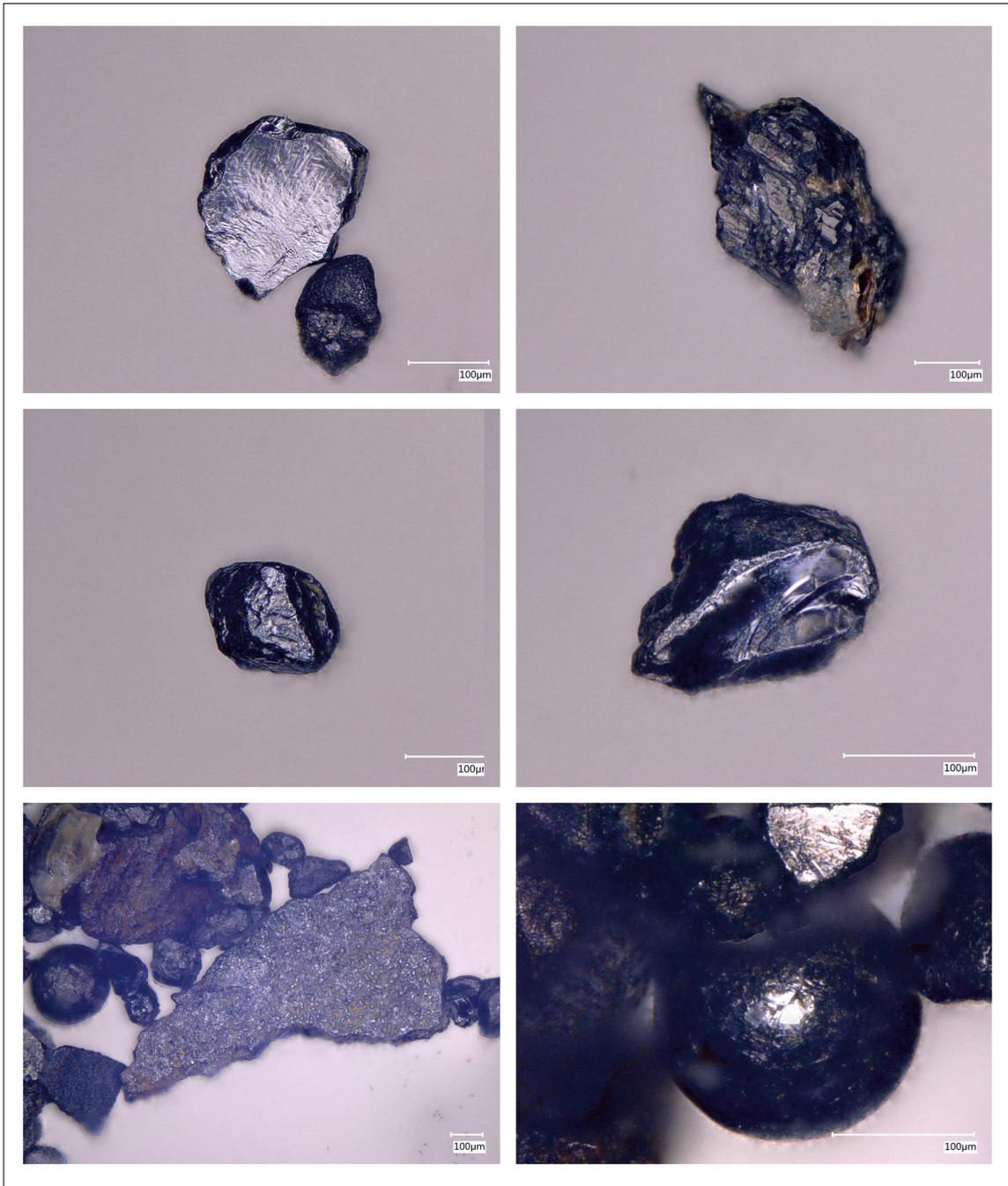


Abb. 2: Körner der ferrimagnetischen Fraktion unter dem Digitalmikroskop; Maßstabsbalken 100 µm. Oben links FM_Ostsee2017-7, Bruchstück eines Titanomagnetits mit deutlicher Rundung des ursprünglichen Kristalls; oben rechts FM_Sackkanal2017-1, Hornblendekristall, verwachsen mit braunem Mineral, gezählt als Lithoklast; Mitte links FM_Sackkanal2017-1, Titanomagnetit-Korn mit Resten der ursprünglichen Oktaeder-Flächen; Mitte rechts FM_Ostsee2017-7, Titanomagnetit-Korn mit muscheligen Bruch; unten links FM_Swine2017-2, Stahl-Bruchstück und schwarze Sphärule mit rauer Oberfläche und 270 µm Durchmesser, möglicherweise ein sehr gut gerundetes Titanomagnetit-Korn; unten rechts FM_Swine2017-2, schwarze Sphärule von 185 µm Durchmesser mit glänzender glatter Oberfläche.

Fig. 2: Grains of the ferrimagnetic fraction under the digital microscope; scale bar 100 µm. Upper left FM_Ostsee2017-7, fragment of a titanomagnetite with clear rounding of the original crystal; upper right FM_Sackkanal2017-1, hornblende crystal aggregated with a brown mineral, counted as lithoclast; middle left FM_Sackkanal2017-1, titanomagnetite grain with remains of original octahedral faces; middle right FM_Ostsee2017-7, titanomagnetite grain with conchoidal fracture; lower left FM_Swine2017-2, steel fragment and black spherule with uneven surface, 270 µm diameter, possibly a well-rounded titanomagnetite grain; lower right FM_Swine2017-2, black spherule, 185 µm diameter, with brilliant surface.

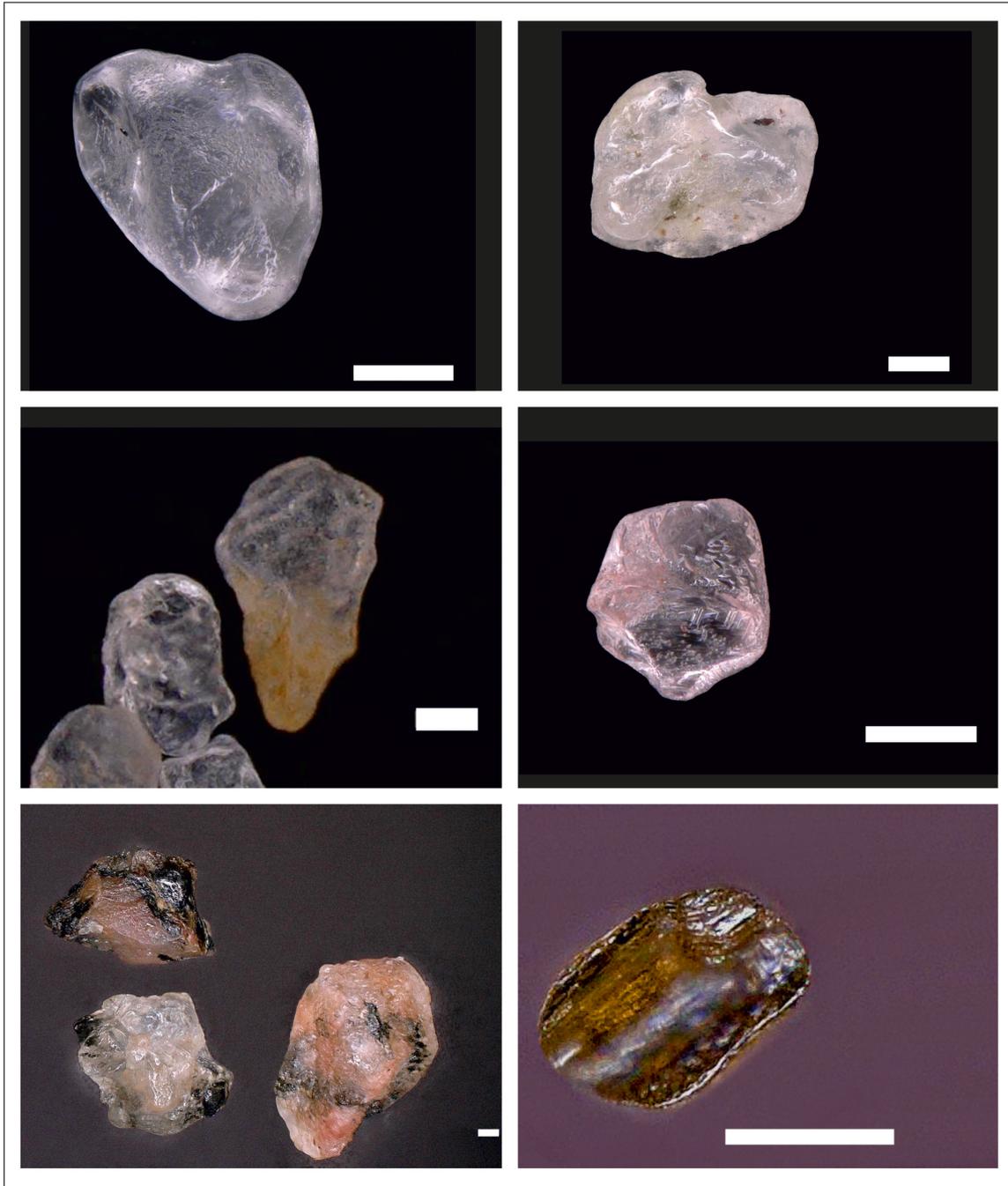


Abb. 3: Körner der nichtmagnetischen und der magnetischen Fraktion unter dem Digitalmikroskop, Maßstabsbalken 100 μm . Oben links FM_Swine2017-2, mattiertes Quarzkorn, wie es typischerweise in äolischen Sanden auftritt; oben rechts FM_Sackkanal2017-1, Quarzkorn mit glänzender Oberfläche, wie es für unter Wasserbedeckung transportierte Körner zu erwarten ist; Mitte links FM_Sackkanal2017-1, vermutlich Goethit-Kutane, die ein Quarzkorn nur teilweise umhüllt; Mitte rechts Schwermineralseife der Probe FM_Ostsee2017-7, Granatkorn, transparent lachsrosa, wie dies für Spessartin typisch ist (BOENIGK 1983): S. 89-90; unten links FM_Ostsee2017-4, granitische bis syenitische Lithoklasten mit mafischen Mineralen, vermutlich Hornblende, und rosafarbigem Kalifeldspäten; unten rechts FM_Ostsee2017-7, vermutlich ein Rutil-Korn.

Fig. 3: Grains of non-magnetic and magnetic fractions under the digital microscope, scale bar 100 μm . Upper left FM_Swine2017-2, matt quartz grain typical for aeolian sands; upper right FM_Sackkanal2017-1, quartz grain with brilliant surface typical for grains transported under water column; middle left FM_Sackkanal2017-1, supposed goethite cutane covering a quartz grain only partly; middle right placer of sample FM_Ostsee2017-7, garnet, transparent salmon pink typical for spessartine (BOENIGK 1983): P. 89-90; lower left FM_Ostsee2017-4, granitic to syenitic lithoclasts with mafic minerals, probably hornblende and pink potassiumfeldspar; lower right FM_Ostsee2017-7, probably a rutile grain.

Kornparametern zeigen die Mediane der Titanomagnetitkörner, d. h. der magnetischen Fraktion ohne Lithoklasten, den größten Variationskoeffizient, für die nichtmagnetische Fraktion gilt dies für die Mediane der Lithoklasten. Für Mittelsand liegen Mediane der Quarzkörner in Proben des Strandwalls nur geringfügig über denen der Weißdünen. Die Proben vom Strandwall sind deutlich grobkörniger als die in wenigen km Entfernung offshore kartieren Sande der westlichen Pommerschen Bucht mit einem Median von etwa 188 μm , abgeschätzt aus einer Karte von BOBERTZ et al. (2006). In der nichtmagnetischen Fraktion liegen die Werte weiterer Kornparameter für alle Faziesbereiche nahe beieinander: Sortierung als Standardabweichung der Körner in phi-Einheiten 0,40 für Dünen und 0,42 für Strandwall, Sphärizität 0,76 für Dünen und für Strandwall, Rundung 3,34 für beide Bereiche, Schiefe +0,24 für Dünen und +0,11 für den Strandwall, nur eine Probe etwa 2 km westlich der Swine-Mündung weist eine für Strandsande typische negative Schiefe (TUCKER 1985) auf. Die für Dünen- und für Strandwall erwartende positive Schiefe findet sich also auch in den meisten Proben vom Strandwall wieder. Eine Probe aus dem Litoral des Swine-Ästuars und eine Probe aus der Mündung eines Baches zwischen Heringsdorf und Ahlbeck liegen (bezogen auf Kornparameter) für erstere im Bereich der Dünen- und für letztere im Bereich der Strandwall-Proben.

Um für die Interpretation der Ablagerungsdynamik Körner gleicher Dichte zu betrachten, sind in Tabelle 1 Mediane der Quarzkörner und der Titanomagnetitkörner angegeben. Auffällig ist, dass nur für die Strandwall-Proben die mittleren Mediane der Titanomagnetite denen der Quarzkörner ähnlich sind, in drei Proben liegt der Median der Titanomagnetite sogar über dem der Quarze.

Die Mediane von Quarzkörnern, matt und glänzend, korrelieren positiv mit $R^2 = 0,828$ mit denen der Lithoklasten, die Mediane von Titanomagnetitkörnern und Lithoklasten korrelieren mit $R^2 = 0,875$. Damit ist eine Herkunft sowohl der Quarz- als auch der Titanomagnetitkörner aus Lithoklasten-reichen Geschiebemergeln, die bei Stürmen in Steiluferbereichen Usedom abradiert wurden, sehr wahrscheinlich.

Für Proben aus Weißdünen liegen die Gehalte an von Oxalat-löslichen schlecht kristallinen pedogenen Fe-Verbindungen, wie dem leicht löslichen Ferrihydrit (BLUME et al. 2010), etwas niedriger als für Proben des Strandwalls, während für eine Gelbdüne ein deutlich höherer Oxalat-löslicher Fe-Gehalt vorliegt, siehe Tabelle 1. In Sanden der sechs Weißdünen und einer Gelbdüne nimmt der Oxalat-lösliche Fe-Gehalt von 110 ppm an der Oberfläche auf 360 ppm in 2,3 m Tiefe zu, $R^2 = 0,784$. Erwartungsgemäß liegen die Alkali-Gehalte in Proben der Weißdünen deutlich unter denen vom Strandwall, gleiches gilt für Mg-Gehalte, jedoch nicht für Ca-Gehalte, es kommt also offensichtlich kaum zur Karbonat-Lösung in den Weißdünen aufgrund ihres geringen Alters.

In Box-Whisker-Plots treten für einzelne Proben in bis zu 13 von 58 Parametern Abweichungen von mehr als dem 1,5-fachen Interquartilsabstand auf, die als Ausreißer angesehen werden könnten (BACKHAUS et al. 1996), hier jedoch für die statistische Betrachtung nicht entfernt wurden, um den Informationsgehalt nicht zu verringern. Die erhobenen Parameter sind, mit und ohne Ausreißer, bis auf wenige, wie z. B. die geschätzte Rundung der magnetischen Fraktion und die Oxalat-löslichen Al-Gehalte, nicht normal verteilt, meist ist eine rechtsschiefe Verteilung mit Häufigkeitsmaximum im niedrigen Wertebereich ausgeprägt.

3.4 Multivariate Statistik und Zuordnung zu Ablagerungsbereichen

Für die multivariate Statistik wurden 5 topographische Parameter, die die relative Lage zum Ufer bzw. zum Küstenabschnitt beschreiben, nicht weiter betrachtet, da sie bei Paläomilieuanalysen ja in der Regel unbekannt sind. Von den übrigen 53 erfassten Parametern lassen sich in die Rubriken magnetische Parameter 7, Komponenten der nichtmagnetischen Fraktion 16, Korngröße und -form jeweils der nichtmagnetischen Fraktion 10 und der magnetischen Fraktion 8, Farbe 2, Elementgehalte 10 einordnen. Für jede Rubrik wurde mit einer Hauptkomponentenanalyse die Kovarianz bestimmt und es wurden aus Parametern mit rechtsschiefer Verteilung jeweils die beiden bzw. bei den Farben einer mit den höchsten Faktorladungen bestimmt. Aus diesen wurden in einer zweiten Hauptkomponentenanalyse insgesamt fünf Parameter mit wiederum höchsten Faktorladungen ausgewählt: 1. optisch bestimmter Schwermineralanteil und 2. Mittelwert der nichtmagnetischen Fraktion, 3. Munsell Intensität, 4. Mg- und 5. Si-Gehalt der oxalatlöslichen Fraktion. Mit diesen Variablen wurde für die 17 Proben eine hierarchische Clusteranalyse nach der WARD-Methode durchgeführt. Si-Gehalt und Intensität haben negative Faktorladungen $< -0,6$ bei Komponente 1 und bei Komponente 2 hat der Mittelwert der nichtmagnetischen Fraktion mit $+0,7$ die höchste Faktorladung. Beide Komponenten erklären rund 64 % der kumulativen Varianz der fünf Parameter. Vergleicht man die Ergebnisse der Clusteranalyse mit dem bekannten Ablagerungsmilieu der Proben, so weist die Probe der Gelbdüne die größte Distanz zu weiteren Proben auf, gefolgt von der Schwermineralseife. Eine Probe des Swine-Ästuars und weitere vier Proben vom nassen Strand stehen neben zwei Grobsandproben vom nassen Strand fünf äolischen Proben gegenüber, dazwischen liegt noch eine gemischte Gruppe aus je einer fluviatilen, äolischen und litoralen Probe. Damit liefern die hier genannten fünf Parameter die Möglichkeit, das Ablagerungsmilieu von etwa 80 % der in dieser Studie auf Usedom entnommenen litoralen Proben zu bestimmen.

Um eine effektivere Zuordnung der Proben zu den bekannten Ablagerungsfazies zu erzielen, wurden die vorgenannten Parameter ersetzt durch leichter zu bestimmende Parameter: 1. Schwermineralanteil der nichtmagnetischen Fraktion in Korn-% durch magnetische Suszeptibilität der Gesamtfrak-

tion, beide Parameter sind positiv korreliert, $R^2 = 0,68$, und 2. der aus maximalen Korndurchmessern bestimmte Mittelwert der nichtmagnetischen Fraktion durch den geschätzten Median der nichtmagnetischen Fraktion, beide Parameter sind positiv korreliert, $R^2 = 0,96$. In dem Dendrogramm der Abbildung 4 resultiert dies auf dem 35 %-Niveau in einer vollständigen Trennbarkeit der Proben aus Weißdünen von Fein- bis Mittelsand-Proben vom Strandwall sowie vom Swine-Ästuar und der Bachmündung, Gelbdüne, Schwermineralseife und die zwei Grobsande bilden jeweils eine separate Gruppe, eine Mischgruppe wie oben gibt es dabei nicht.

4 Diskussion

4.1. Anthropogene Metallreste

Da sich alle Lokationen, an denen anthropogene Metallreste beobachtet wurden, mit Ausnahme einer Schlacke bei Stubbenfelde, im Ostteil Usedom befinden, die bombardierten Anlagen bei Peenemünde aber im äußersten Nordwesten liegen, ist es unwahrscheinlich, dass die Blechpartikel aus Munitionsresten von der Peenehalbinsel abzuleiten sind. Auch der rekonstruierte Netto-Sedimenttransport (ANONYMUS 2009) spricht dagegen. Ein Ursprung im Hafengebiet von

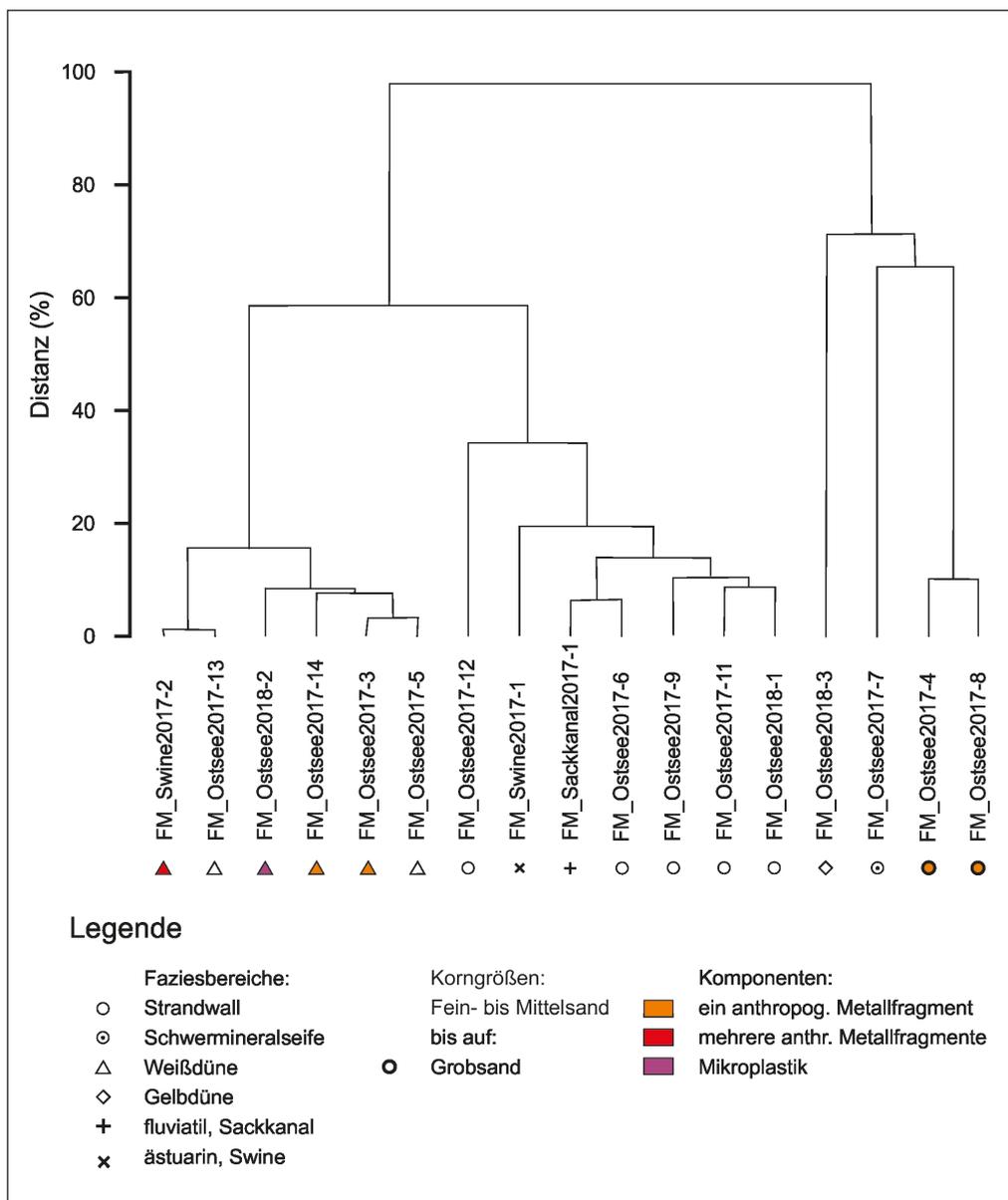


Abb. 4: Dendrogramm mit WARD's Algorithmus, quadrierte euklidische Distanzen, der Cluster-Analyse der Parameter Schwermineralanteil der nichtmagnetischen Fraktion, Mittelwert der nichtmagnetischen Fraktion, Munsell-Intensität, Mg- und Si-Gehalt der Oxalat-löslichen Fraktion.

Fig. 4: Dendrogram using WARD's algorithm, squared euclidian distances, for the cluster analysis of the parameters heavy mineral content of nonmagnetic fraction, mean of nonmagnetic fraction, Munsell intensity, Mg- and Si-content of oxalate-solvable fraction.

Swinemünde ist wahrscheinlicher. Die im Ostteil Usedom nachweisbaren magnetischen Sphärule wurden offenbar mit östlichen Winden, z. B. aus den Schornsteinen von Frachtschiffen auf der Swine, in den Ostteil Usedom verweht. Die Häufigkeit anthropogener Metallfragmente bzw. metallischer Sphärule ist in den untersuchten Proben sehr gering bis auf eine Probe mit etwa einem Metallpartikel in 10 g Trockenmaterial von einer Düne in Swinemünde. Hieraus kann eine Einschränkung der Erholungsqualität für Badegäste durch Metallpartikel zumindest für die untersuchten Lokationen ausgeschlossen werden.

4.2 Magnetische Suszeptibilität

Im Vergleich mit Proben aus dem Litoral der südlichen Ostsee zeigen diejenigen von Usedom höhere Werte der magnetischen Suszeptibilität. In Schwermineralseifen Usedom wurden von PFEIFFER (1972) mit bis zu 21 Gew.-% Magnetit in der Gesamtfraktion die höchsten Gehalte an der mecklenburgischen Ostseeküste festgestellt. Offenbar sind glazigene Ablagerungen der Insel Usedom und seewärts vorgelagerter Untiefen ungewöhnlich reich an magnetischen Komponenten, was für ein an basischen Magmatiten, z. B. präkambrische Gesteine im südlichen Schweden in der Blekinge-Region nördlich Karlskrona: Granodiorite, Tonalite, oder in Småland: Gabbros, Diorite, Ultramafite (KOISTINEN et al. 2001) und Eisenerze bei Smålands Taberg, oder den Ostseegrund mit kambro-silurischen Sedimenten südlich Bornholm (siehe FREDÉN 1994), als Herkunft sprechen könnte.

Die geringen Werten der Frequenzabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität zeigen nach DEARING et al. (1996) und EVANS & HELLER (2003) das Dominieren von ferrimagnetischen Multi-Domain- und Pseudo-Single-Domain-Partikeln im Bereich $> 1 \mu\text{m}$ und das Fehlen superparamagnetischer Partikel $< 0,03 \mu\text{m}$ an. Die kleinsten unter dem Mikroskop beobachteten Körner der magnetischen Fraktion liegen bei $10 \mu\text{m}$, PFEIFFER (1972) beobachtete in Seifen von Usedom als kleinste Korngröße für Magnetite $90 \mu\text{m}$. Feineres ferrimagnetisches Material, primär aus Lithoklasten mit kleiner Korngröße oder sekundär durch Aufarbeitung von einzelnen Titanomagnetit-Körnern aus Lithoklasten im Litoral, bleibt im seewärtigen Litoral Usedom offensichtlich in Suspension und wird mit der Feinfraktion erst in distalen tieferen Beckenbereichen sedimentiert.

PUPIENIS et al. (2011) konnten zeigen, dass sich im Litoral Litauens die Schwerminerale Granat, Rutil, Zirkon, Magnetit, Ilmenit und Hornblende durch erhöhte magnetische Suszeptibilität von den normalen Quarz-reichen Sanden unterscheiden lassen. Nach den hier vorgelegten Ergebnissen eignet sich auch auf Usedom die magnetische Suszeptibilität sehr gut zum Nachweis erhöhter Schwermineralegehalte, insbesondere von Granat. Bei einer Gewinnung von Schwermineralen aus Offshore geförderten Sanden im Bereich zwischen Usedom und Bornholm könnten wahrscheinlich Messungen der Volumen-spezifischen magneti-

schen Suszeptibilität, z. B. mit Ringsensoren um ein Kunststoff-Rohr für den Materialtransport, höffige Sande während der Förderung anzeigen.

4.3 Sedimentumlagerung

Das häufige Auftreten von gelblichen bis orangefarbenen Kutanen um Quarzkörner spricht für die Fällung von Goethit oder Ferrihydrit in den Weißdünen Usedom. Der pH des von den Wasserwerken auf Usedom geförderten Trinkwassers liegt nach <https://www.zv-usedom.de/index.php/informationen/haertebereich-ph-werte> bei 7,2 bis 7,7; der CaCO_3 -Gehalt von 2-4 mmol/l dürfte sowohl aus aufgewehten Molluskenschalen als auch aus karbonatischen Klaksten stammen. Für Dünen ergäbe sich bei geringen Sauerstoffgehalten für pH 7,5 nach dem Pourbaix-Diagramm in (SCHWERTMANN 2008) eine mögliche Fällung von sowohl Goethit als auch Ferrihydrit. Zumindest für eine Gelbdüne zeigt die Oxalsäure-Extraktion die Dominanz von Goethit an. In den im Frühjahr 2017 beprobten Sanden des Strandwalles stammen von Kutanen umhüllte Körner offensichtlich aus Material der bei Stürmen abradierten Vordünen und der vordersten Weißdünen-Kette. Da Brandungsaktivität zu einem raschen Verlust der Kutane führen würde, dürften diese Strandproben vor allem Material enthalten, das durch die Sturmflut am 5. Januar 2017 (siehe z. B. „Die Zeit“ vom 5.1.2017, <https://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2017-01/unwetter-hochwasser-ostsee-schleswig-holstein-mecklenburg-vorpommern>) abradiert wurde. Hierfür spricht auch, dass sich im Litoral Usedom Proben sowohl vom nassen Strand als auch von Vor- und Weißdünen bei Kornform, -größe sowie Komponenten einschließlich der Häufigkeit von Quarzkörnern mit Fe-reicher Kutane ähnlich sind. Auch das Material, das in der Swine transportiert wird, sollte im Wesentlichen aus Dünenansanden bestehen, aufgrund der geringen Korngröße vermutlich aus weiter vom Ufer entfernten Dünen. Sehr wahrscheinlich erfolgt im Litoral Usedom als Folge von Stürmen ein mehrfacher Wechsel der Sandkörner zwischen den Ablagerungsmilieus nasser Strand und Weißdünen. Hierfür spricht auch das Auftreten einer „Mischgruppe“ bei der multivariaten Analyse.

In der Sedimentologie wird die Korngrößenverteilung als wichtiges Werkzeug zur Paläomilieu-Analyse eingesetzt. Hydraulisch äquivalente Partikel, die in einer stehenden Wassersäule mit gleicher Geschwindigkeit absinken, können sich in Volumen, Form und Dichte unterscheiden (SELLEY 2000), außerdem haben die Partikelkonzentration, Temperatur und Dichte der Lösung einen Einfluß auf die Sinkgeschwindigkeit (FLEMMING 2007). Ein kugelförmiges Quarzkorn mit einem Durchmesser $233 \mu\text{m}$ mit einer Dichte von $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ sinkt nach FLEMMING (2007) genau so schnell wie ein annähernd isometrisches Titanomagnetitkorn mit einer Dichte von 5,1 bis $5,18 \text{ g cm}^{-3}$ (BOENIGK 1983) mit einem Durchmesser von $149 \mu\text{m}$. Generelle Aspekte zu Wellenaktivität und Transport von Schwermineralen werden u. a. bei TOMKINS et al. (2003) beschrieben.

Nur in höherenergetischen Milieus kann es zur Seifenbildung kommen (SELLEY 2000), (MCCAVE & SYVITSKI 2007). In einer Vordünen-Seife von Bansin liegt der Median von Magnetit bei ca. 188 μm und von Quarz bei 240 μm nach PFEIFFER (1972). Zu erwarten wäre demnach, dass im Litoral Usedom Titanomagnetitkörner deutlich kleiner sind als die zusammen mit ihnen abgelagerten Quarzkörner. Für die 17 in dieser Studie untersuchten Proben zeigen Mediane der nichtmagnetischen und der magnetischen Fraktion eine positive Korrelation mit $R^2 = 0,86$ und eine Steigung der Regressionsgeraden von nahezu 1, Ähnliches ergibt sich für die Korrelation der Mediane von matten und glänzenden Quarzkörnern gegen die der Titanomagnetitkörner mit $R^2 = 0,707$ bei einer Steigung von 1, siehe Abbildung 5. Im Schwallbereich des Strandwalls mit dem Auslaufen der Wellen, mit dem Wechsel von turbulenter zu schießender Strömung, mit zum Spülsaum abnehmenden Mächtigkeiten der Wassersäule, Schaumbildung und Abweichungen der Transportrichtung von der Lotrechten um mehrere 10er Grad je nach Windrichtung erfolgt offensichtlich der Transport von Quarzkörnern und etwa gleich großen schwereren Titanomagnetiten gemeinsam! Auch für den maximal etwa 100 m langen Bereich des wenige Dezimeter über den Was-

serspiegel ragenden trockenen Strandes zwischen Strandwall und Vordünen bzw. vorderster Weißdünen-Kette sind bei stärkeren Winden turbulente Strömungen zu erwarten.

Die einheitlichen Curie-Temperaturen in litoralen Ablagerungen der Insel Usedom könnte man perspektivisch nutzen, um über den Vergleich der Curie-Temperaturen potentieller Liefergesteine in den Kliffs den Ursprung der Titanomagnetite und damit den Horizont, aus dem das Material durch Abrasion stammt, zu bestimmen.

4.4 Rekonstruktion von Ablagerungsmilieus

Aus den Parametern magnetische Suszeptibilität der Gesamtfraktion, geschätzter Median, Munsell Intensität, Mg- und Si-Gehalt der oxalatlöslichen Fraktion lassen sich für eine Rekonstruktion des Ablagerungsmilieus von holozänen Sedimenten des Küstenbereichs von Usedom aus Sanden mit Hilfe der multivariaten Statistik Einstufungen der Proben in entweder ein äolisches Milieu oder in das seewärtige Litoral mit den Bereichen nasser Strand, Swine-Ästuar und Bachlauf auf aktuogeologischer Basis vornehmen.

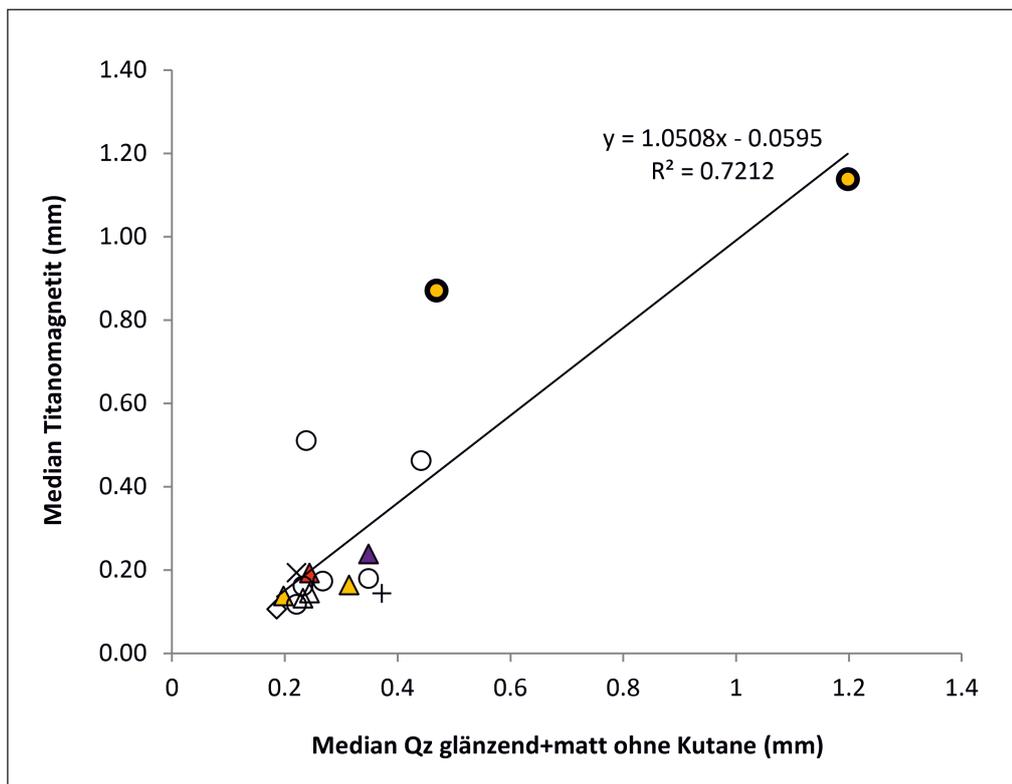


Abb. 5: Mediane der Titanomagnetite gegen diejenigen von Quarz glänzend und Quarz matt, ohne Kutane. Kreise = Strandwall, Dreiecke = Vor- und Weißdüne, Raute = Gelbdüne, + = Bachmündung Sackkanal, x = Swine-Ästuar; rot = mehrere anthropogene Metallpartikel, orange = ein bis zwei Metallpartikel, lila = mit Mikroplastik; fetter Rand = Grobsande.

Fig. 5: Medians of titanomagnetite against those of brilliant and matt quartz, without cutane. Circle = beach ridge, triangle = fore dunes, white dunes, diamond = yellow dune, + = mouth of river Sackkanal, x = Swine estuary; red = several metal particles, orange = 1-2 metal particles, purple = with microplastic; bold margin = coarse sands.

Zusammenfassung

Bezogen auf die vier Ausgangsfragen bzw. Ziele lassen sich folgende Aussagen treffen: 1. Anthropogene Metallfragmente und magnetische Sphärule liegen im Litoral nur im Südost-Teil Usedom in geringen Konzentrationen vor, sie stammen vermutlich aus dem Hafengebiet von Swinemünde; ein Bezug zu Munitionsresten ist aufgrund der räumlichen Verteilung der Lokationen mit Metallresten weitgehend auszuschließen. 2. Im Litoral Usedom zeigt das Schwermineral Granat eine hohe positive Korrelation mit der Masse-spezifischen magnetischen Suszeptibilität, so dass die Suszeptibilität sich im Bereich Usedom für die Suche nach Schwermineral-Seifen erfolgreich anwenden ließe. 3. Im Frühjahr 2017 bei Ahlbeck beprobte Lithoklasten-reiche litorale Sande des Strandwalls zeigen erheblichen Nettotransport von der nächstgelegenen Steilküste nach Südosten über mehrere Kilometer an. 4. Rezentbeobachtungen im Litoral der Insel Usedom belegen, dass sich aus den mit relativ geringem Aufwand bestimmbar Parametern magnetische Suszeptibilität, geschätzter Median der nichtmagnetischen Fraktion, Munsell-Intensität, Mg- und Si-Gehalt der oxalatlöslichen Fraktion, eine Einordnung von Sanden in die Milieus Dünen, Strand und fluvial-ästuariner Bereich durchführen lässt. Dies könnte für sandiges Bohrgut ohne Erhalt von Schichtungsmerkmalen oder Fossilien bei der Interpretation holozäner Sedimentabfolgen im Hinblick auf die relative Position des Meeresspiegels genutzt werden. Die Ablagerungen des Strandwalls und des trockenen Strandes lassen sich allerdings auch ohne Statistik erkennen, wenn magnetische Partikel die gleiche Größe haben wie nichtmagnetische.

Summary

With reference to the starting questions and aims of this study the following results can be given: 1. Anthropogenic metal fragments and magnetic spherules, present in low concentrations only in the southeastern part of the Island of Usedom, probably originate from ships in the harbour of Świnoujście. 2. The heavy mineral garnet in litoral sands is highly correlated with mass-specific magnetic susceptibility, therefore this method is suitable for the detection of placers at Usedom. 3. For spring 2017, lithoclast-rich sands at Ahlbeck indicate coast-parallel net transport from the next cliff with moraine material in a southeastern direction over a distance of several kilometers. 4. Studies in the recent litoral zone of the Island of Usedom demonstrate that by means of the parameters magnetic susceptibility, Munsell value, Mg and Si content of oxalate-soluble fraction, all of them determinable with relatively sparse amount of lab work, an attribution of coastal sands to the sedimentary environments: dunes, beach, fluvial-estuarine zone, is possible; this could help for the interpretation of Holocene sediment sequences with respect to shore distance in sediment cores where no bedding structures or fossils are preserved.

Danksagung

Die Nutzung des Keyence Digitalmikroskops ermöglichte Herr Prof. Dr. Christoph Heubeck, Lehrstuhl für allgemeine und historische Geologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena, die Einführung übernahmen Herr Dr. Steven Flesh und Herr PD Dr. Peter Frenzel, Herr Frank Linde führte die Schwermineralabtrennung durch. Ein Bartington-Susceptibility-Temperature-System stand in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. Thorsten Schäfer, Lehrstuhl für angewandte Geologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena, zur Verfügung. Zwei Proben vom Kummerower See wurden von Frau Dr. Daniela Nägelein und Herrn Jens Buschhardt, Leipzig, zur Verfügung gestellt. Für diese Unterstützung möchten wir uns herzlich bedanken.

Literatur

- ANONYMOUS (2000): Munsell Soil Color Charts, 1. ed. – Grand Rapids, MI (Munsell Color x-rite)
- ANONYMUS (2018): BGR Report - Mai 2019, 82 S., Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)
- ANONYMUS (2009): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtsheft: Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick. – 102 S., Rostock (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern)
- BACHOR, A. (2005): Nährstoff- und Schwermetallbilanzen der Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns unter besonderer Berücksichtigung ihrer Sedimente. – Schriftenr. LA Umwelt Naturschutz Geol. Meckl.-Vorpommern 2, S. 1-233
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (1996): Multivariate Analyse-Methoden. – 591 S., Berlin, Heidelberg, New York (Springer Verlag)
- BARTINGTON-INSTRUMENTS (2018): MS2 / MS3 magnetic susceptibility system. – 22 S., Witney, Oxon, U.K. (Bartington Instruments Limited)
- BARTINGTON-INSTRUMENTS (o. A.): Operation manual for MS2 magnetic susceptibility system. – OMO408/49. 82 S., Witney, Oxon, U. (Bartington Instruments)
- BECKER, S. & DIETZE, H.-J. (1986): Massenspektrographische Konzentrationsbestimmung der Selten-Erden-Elemente an Schwermineralfraktionen der Ostsee-Strandseifen. – Z. angew. Geol. 32, S. 299-301
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. – 16. Aufl., 570 S., Wiesbaden (Springer Spektrum)

- BOBERTZ, B., HARFF, J., LEMKE, W., USCINOWICZ, S., KRAMARSKA, R., ZACHOWICZ, J. & PRZEDZIECKI, P. (2006): Surface sediments of the south-western Baltic Sea. 1: 250 000, 1 map sheet, 12 pages text, CD 1. Aufl. – Warszawa, Warnemünde (Polish Geological Institute Warsaw, Baltic Sea Research Institute Warnemünde)
- BOENIGK, W. (1983): Schwermineralanalyse. – 158 S., Stuttgart (Enke Verlag)
- BORÓWKA, R. K., LATALOWA, M., OSADCZUK, A., SWIETA, J. & WITKOWSKI, A. (2002): Palaeogeography and palaeoecology of Szczecin Lagoon. – Greifswalder geograph. Arb. **27**, S. 107–113
- DEARING, J. (1994): Environmental magnetic susceptibility - using the Bartington MS2 system. – 104 S., Kenilworth, UK (Chi Publishing)
- DEARING, J. A., DANN, R. J. L., HAY, K., LEES, J. A., LOVELAND, P. J., MAHER, B. A. & O'GRADY, K. (1996): Frequency-dependant susceptibility measurements of environmental materials. – Geophys. J. Intern. **124**, p. 228–240
- DENG, J., ZHANG, W., HARFF, J., SCHNEIDER, R., DUDZINKA-NOWAK, J., TEREFEENKO, P., GIZA, A. & FURMANCZYK, K. (2014): A numerical approach for approximating the historical morphology of wave-dominated coasts - A case study of the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea. – Geomorphology **204**, p. 425–443
- DOBENECK, T.V., PETERSEN, N. & VALI, H. (1987): Bakterielle Mikrofossilien - palaeomagnetische und palaeontologische Spuren einer ungewöhnlichen Bakteriengruppe. – Geowiss. uns. Zeit **5**, S. 27–35
- DUPHORN, K., KLIEWE, H., NIEDERMEYER, R.-O. & WERNER, F. (1995): Die deutsche Ostseeküste. – Sammlg. geol. Fü., 88, 281 S., Berlin, Stuttgart (Gebrüder Bornträger)
- EVANS, M. E. & HELLER, F. (2003): Environmental magnetism - principles and applications of enviromagnetics. – 299 pp, Amsterdam, Boston etc. (Academic Press)
- FABIAN, K., SHCHERBAKOW, V. P. & MCENROE, S. A. (2013): Measuring the Curie temperature. – Geochem. Geophys. Geosyst. **14**, p. 947–961
- FLEMMING, B.W. (2007): The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: Implications for sediment trend analysis. – Sediment. Geol. **202**, p. 425–435
- FREDÉN, C. (1994): Geology. - National Atlas of Sweden, – 208 pp., Stockholm (SNA Publishing Stockholm University)
- GRANITZKI, K. & KATZUNG, G. (2004): Steine und Erden. - In: KATZUNG, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern – S. 409–419, Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)
- HARFF, J., BOBERTZ, B., GRANITZKI, K., LEMKE, W. & WEHNER, K. (2004): Sand and gravel deposits in the south-western Baltic Sea, their utilization and sustainable development. – Z. angew. Geol. **Sonderheft 2**, S. 111–123
- HOFFMANN, G. & REICHERTER, K. R. (2012): Soft-sediment deformation of Late Pleistocene sediments along the southwestern coast of the Baltic Sea (NE Germany). – Intern. J. Earth Sci. **101**, p. 351–363
- JANOUSEK, V., FARROW, C. M. & ERBAN, V. (2006): Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCD-kit). – J. Petrology **47**, p. 1255–1259
- JORDANOVA, D., JORDANOVA, N. & HOFFMANN, V. (2006): Magnetic mineralogy and grain-size dependence of hysteresis parameters of single spherules from industrial waste products. – Physics Earth Planet. Inter. **154**, p. 255–265
- KOENSLER, W. (1989): Sand und Kies - Mineralogie, Vorkommen, Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten. –123 S., Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag)
- KOISTINEN, T., STEPHENS, M. B., BOGATCHEV, V., NORDGULEN, Ø., WENNERSTRÖM, M. & KORHONEN, J. (2001): Geological map of the Fennoscandian Shield 1 : 2 000 000, 1. ed. – (Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden, North-West Department of Natural Resources of Russia)
- KRIENKE, H.-D. (2004): Usedom. - In: KATZUNG, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern – S. 327–332, Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)
- LAGERLUND, E., PERSSON, K. M., KRZYSZKOWSKI, D., JOHANSSON, P., DOBRACKA, E., DOBRACKI, R. & PANZIG, W.-A. (1995): Unexpected ice flow directions during the Late Weichselian deglaciation of the south Baltic area indicated by a new lithostratigraphy in NW Poland and NE Germany. – Quatern. Intern. **28**, p. 127–144
- LASS, H. U., MOHRHOLZ, V. & SEIFERT, T. (2001): On the dynamics of the Pomeranian Bight. – Contin. Shelf Res. **21**, p. 1237–1261
- LEIPE, T., EIDAM, J., LAMPE, R., MEYER, H., NEUMANN, T., A., O., JANKE, W., PUFF, T., BLANZ, T., GINGELE, F.X., DANNENBERGER, D. & WITT, G. (1998): Das Oderhaff - Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars. – Meereswissenschaftliche Berichte **28**, S. 1–83

- MC CAVE, I. N. & SYVITSKI, J. P. M. (2007): Principles and methods of geological particle size analysis. - In: SYVITSKI, J. P. M. (Hrsg.): Principles, methods, and application of grain size analysis – p. 3–11, Cambridge (Cambridge University Press)
- ORDWAY, F. I. I., III, F. I. O., DAHM, W. K., DANNENBERG, K., HÄUSSERMANN, W., REISIG, G., STUHLINGER, E., TIESENHAUSEN, G. v. & WILLHITE, I. (2007): A memoir: From Peenemünde to USA: A classic case of technology transfer. – *Acta Astronautica* **60**, p. 24–47
- OSADCZUK, K. (2002): Evolution of the Świna barrier spit. – *Greifswalder geograph. Arb.* **27**, S. 119–126
- PETTIJOHN, F. J., POTTER, P. E. & SIEVER, R. (1973): Sand and sandstone. – 618 pp., Berlin Heidelberg New York (Springer Verlag)
- PFEIFFER, H. (1972): Schwermineralseifen, Küstendynamik und Sedimenthaushalt sandiger Flachküsten Mecklenburgs. – *Jahrbuch Geologie* **4**, S. 301–346; Berlin
- PIRRUNG, M., BÖHM, M., MERTEN, D. & KUNZ-PIRRUNG, M. (2019): Forschungsprojekt FluviMag: Fluviatiler Transport von Magneto-Mineralen - 5.12. Litoral – Usedom - <http://angeo.uni-jena.de/mitarbeiter/pirrung-michael.html>, 49 S.
- PUPIENIS, D., BUYNEVICH, I. V. & BITINAS, A. (2011): Distribution and significance of heavy-mineral concentrations along the southeast Baltic Sea coast. – *J. Coastal Res.* **SI 64**, p. 1984–1988
- PUSCH, M. & AL., E. (2009): Rivers of the Central European Highlands and Plains. - In: (Hrsg.): Rivers of Europe – p. 525–576, Cambridge, Massachusetts (Academic Press)
- SCHWERTMANN, U. (1959): Die fraktionierte Extraktion der freien Eisenoxide im Boden, ihre mineralogischen Formen und ihre Entstehungsweisen. – *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde* **84**, S. 194–204
- SCHWERTMANN, U. (2008): Iron oxides. - In: CHESWORTH, W. (Hrsg.): Encyclopedia of soil science – p. 363–369, Berlin, Hamburg, New York (Springer)
- SELLEY, R. C. (2000): Applied sedimentology. – 523 pp., San Diego (Academic Press)
- SHANKAR, R., THOMPSON, R. & PRAKASH, T. N. (1996): Estimation of heavy and opaque mineral contents of beach and offshore placers using rock magnetic techniques. – *Geo-Mar. Lett.* **16**, p. 313–318
- STOW, D. A. V. (2008): Sedimentgesteine im Gelände - ein illustrierter Leitfaden. – 320 S.; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag)
- THOMPSON, R. & OLDFIELD, F. (1986): Environmental magnetism. – 227 pp., London (Allen & Unwin)
- TOMKINS, M. R., NIELSEN, P. & HUGHES, M. G. (2003): Selective entrainment of sediment graded by size and density under waves. – *J. Sedimentary Res.* **73**, p. 906–911;
- TUCKER, M.E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrographie. – 265 S., Stuttgart (Enke Verlag)
- VAN LOON, T. & PISARSKA-JAMRO, M. (2017): Changes in the heavy-mineral spectra on their way from various sources to joint sinks. - In: MUZUMDER, R. (Hrsg.): Sediment Provenance - influences on compositional change from source to sink – p. 49–62, Amsterdam (Elsevier)
- VIEHBERG, F. A., FRENZEL, P. & HOFFMANN, G. (2008): Succession of late Pleistocene and Holocene ostracode assemblages in a transgressive environment: A study at a coastal locality of the southern Baltic Sea (Germany). – *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.* **264**, p. 318–329
- WARREN, G. (1974): Simplified form of the Folk-Ward skewness parameter. – *J. Sediment. Petrol.* **44**, p. 259
- WASMUND, E. (1938): Die Schwerminerallagerstätten der deutschen Küsten. – *Geol. Rundschau* **29**, S. 287–300

Anschrift der Autoren:

PD Dr. Michael Pirrung
Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Geowissenschaften
Burgweg 11
D-07749 Jena
Email: michael.pirrung@uni-jena.de
Tel.: (+49) 36 41 94 86 44

M.Sc. Geogr. Marcus Böhm
Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Geowissenschaften
Burgweg 11
D-07749 Jena
Email: marcus.boehm@uni-jena.de

Dr. Dirk Merten
Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Geowissenschaften
Burgweg 11
D-07749 Jena
Email: dirk.merten@uni-jena.de

Dr. Martina Kunz-Pirrung
Helmholtz Zentrum für Umweltforschung,
Wissenschaftlich-Administrative Projektbetreuung
Permoser Straße 15
D-04318 Leipzig
Email: martina.kunz-pirrung@ufz.de