

BmBF-Projekt: „SECOS“ (The Service of Sediments in German Coastal Seas)

Teilprojekt 1.1 Kartierung / Typologie der Oberflächensedimente der deutschen Ostsee

Ergebnis (Produkt): Geochemische Karten der Oberflächensedimente der Deutschen Ostsee (GIS-Atlas)

Michael Naumann, Thomas Leipe, Franz Tauber, Rene Friedland (alle IOW)

Vorbemerkungen:

Der Meeresboden der deutschen Ostsee wurde im Zeitraum von Ende der 1990er Jahre bis etwa 2010 flächendeckend neu kartiert. Diese Kartierung erfolgte im Auftrag des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durch Mitarbeiter der Sektion Marine Geologie des Institutes für Ostseeforschung Warnemünde (IOW). Die entsprechenden Karten (9 Blätter im Maßstab 1:100.000) wurden vom BSH im Jahre 2012 herausgegeben. Der Daten- und Probenbestand aus dieser Kartierung war eine wesentliche Grundlage zur Beantragung des SECOS-Projektes.

Auf der Basis des geologischen Kartenwerkes wurden 6 Sedimentklassen extrahiert, die für das Gebiet der deutschen Ostsee von Bedeutung sind (Abb. 1; Tabelle 1). Für die prozess-orientierten Teilprojekte von SECOS wurden innerhalb dieser Klassen (Gebiete) repräsentative Schlüssel-Positionen festgelegt, an denen umfangreiche Detailuntersuchungen durchgeführt werden.

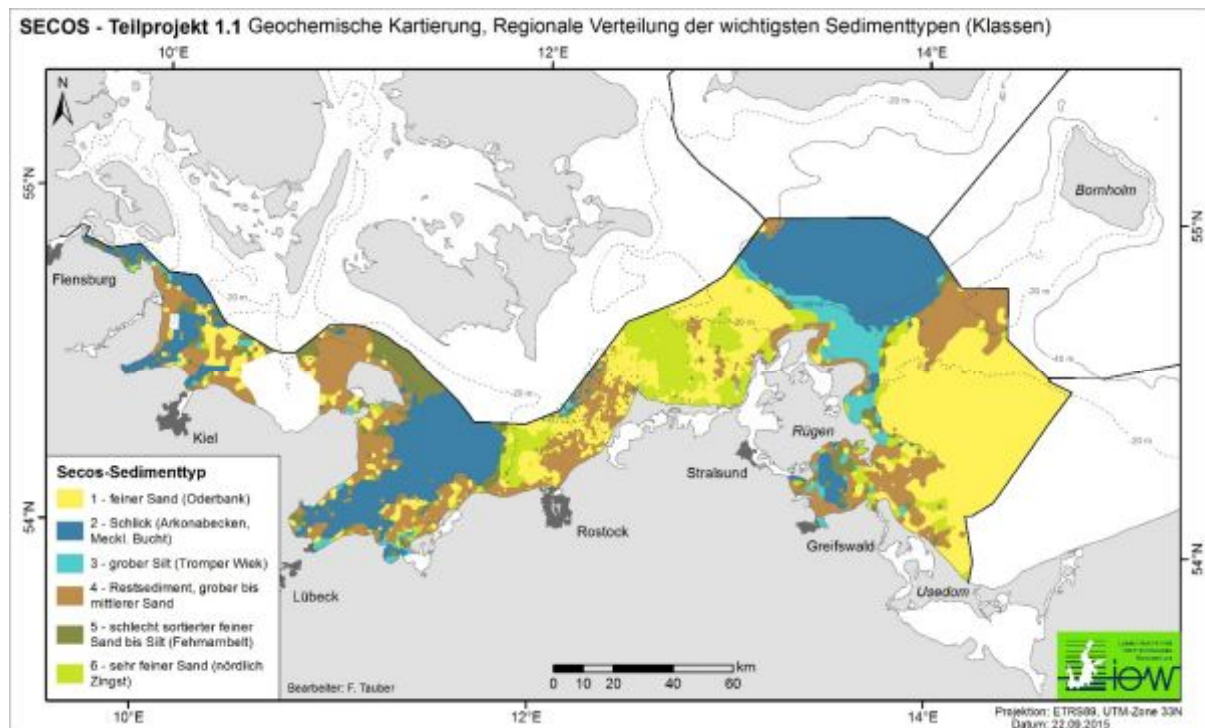


Abb. 1: Regionale Verteilung der wichtigsten Sedimenttypen (Klassen) der deutschen Ostsee.

Tabelle 1: Detailinformationen zu diesen 6 Klassen

Nr.	Median (phi)	Sortierung	Sediment	Typuslokation(en)	Fläche (km ²)	Flächenanteil (%)
1	2.33	0.35	feiner Sand	Oderbank	4541	32
2	6.5	1.9	Schlick	Arkonabecken, Becken der Mecklenburger Bucht	3603	25
3	4.4	1	grober Silt	Tromper Wiek	637	5
4	0.9	0.9	Restsediment bis mittlerer Sand	Adlergrund, westlich Fehmarn	2814	20
5	3.4	2.1	schlecht sortierter feiner Sand bis Silt	Fehmarnbelt	808	6
6	3.1	0.4	sehr feiner Sand	nördlich Zingst	1330	9
die restlichen 3% Flächenanteil entfallen auf das Schießgebiet Hohwachter Bucht						

Datengrundlage/Probenbestand:

Aus der Sediment-Datenbank des IOW (Dr. F. Tauber) wurde zunächst eine „Teilmenge“ von Stationen ausgewählt, die folgende Kriterien zu erfüllen hatte: Sie sollte das gesamte Arbeitsgebiet hinreichend abdecken, für jeden Sedimenttyp repräsentativ sein und für die geplanten geochemischen Analysen einen realistischen Gesamtumfang nicht überschreiten. Für diese Anzahl von rund 700 Stationen standen somit Stationsnummern, Koordinaten und Korngrößendaten zur Verfügung. Die entsprechenden Originalproben wurden aus dem Sedimentarchiv des IOW herausgesucht und die für die geochemischen Analysen vorbereitet.

In Ergänzung, hauptsächlich zum Schließen vorhandener regionaler Lücken im Probenbestand des Archivs, wurden noch ca. 100 neue Proben bearbeitet, die während der SECOS-Ausfahrten 2014 gewonnen wurden. Für das Seegebiet „Hohwachter Bucht“ westlich von Fehmarn konnten aus Sicherheitsgründen (militärisches Schießgebiet) keine Sedimentproben gewonnen werden.

Ein vorhandener kleiner Datensatz (8 Stationen) aus dem Oderhaff von 2001 wurde für einige Parameter (TOC, N, Hg, P) auch in den Datenbestand von SECOS und in die Kartendarstellungen einbezogen. Das Oderhaff besitzt im Übergangsbereich zwischen Odermündung und Ostsee eine „Pufferfunktion“ für partikulär transportiertes Material und ist somit für das Verständnis des Flusseintrages wichtig.

Zur Beprobung des Meeresbodens wurden in Abhängigkeit vom Sedimenttyp Backengreifer, Kastengreifer oder Multi-Corer verwendet. Als Sedimentoberfläche wurde das Tiefenintervall von 0 cm bis 2 cm definiert und entsprechend beprobt.

Da große Teile des Untersuchungsgebietes von Sanden (und Mischsedimenten) bedeckt sind, wurde entschieden, vor Beginn der geochemischen Analysen, von allen Originalproben die Feinfraktion (<63µm) abzutrennen und nur diese zu analysieren.

Hintergrund dieses Verfahrens ist die Tatsache, dass die zu untersuchenden (projektrelevanten) Elemente ganz überwiegend in der Feinfraktion gebunden vorliegen und durch geochemisch inerte gröbere Sedimente (zumeist Quarz-Sand) verdünnt werden. Dieser Zusammenhang wird auch als Korngrößeneffekt bezeichnet. Dieses hier verwendete Verfahren ist für die Analytik von gröberen (sandigen) Sedimenten viel präziser (mitunter sogar notwendig), weil bei der Analyse der Gesamtproben oft die Nachweisgrenze des Verfahrens erreicht wird. Da die Korngrößenzusammensetzung der Proben bekannt ist, können die an der Feinfraktion gemessenen Gehalte der Elemente auf die Konzentrationen in der Originalprobe zurückgerechnet werden.

Die Abtrennung und Analyse der Feinfraktion von Sedimentproben sehr unterschiedlicher Korngrößenzusammensetzung hat aber noch einen anderen, gewollten Nebeneffekt: Es können Unterschiede in den Konzentrationen sichtbar gemacht und interpretiert werden, die eben nicht nur durch den „Korngrößeneffekt“ verursacht werden. Für den (theoretischen) Fall eines in sich abgeschlossenen, chemisch homogenen Systems mit einem morphologisch und hydrodynamisch bedingten Gradienten der Korngröße (Sortierungseffekt) von der Küste (Sand) bis ins Becken (toniger Schlack) sollte die chemische Zusammensetzung der Feinfraktion praktisch gleich sein. Dies ist in der Natur aber nicht der Fall, wie die Ergebnisse aus dem SECOS Arbeitsgebiet sehr eindrucksvoll zeigen. Diese Abweichungen von der „Norm“ reflektieren Einflüsse oder Prozesse, die lokale bzw. regionale Ursachen haben. Dies können sein: besondere Quellen, Altlasten oder auch bio-geo-chemisch gesteuerte Anreicherungen.

Das Analysenprogramm:

Folgende Parameter wurden analysiert:

Komplettes Korngrößenspektrum	
C-org. (TOC), C-anorg. (TIC), N, S, Hg	(Direktverfahren, Elementaranalytik)
Biogen-Opal (SiO ₂)	(ICP-OES nach basischer Extraktion)
P, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, As	(ICP-OES in zwei Fraktionen)

Die Korngrößenbestimmung erfolgte mittels Siebung bzw. Laser-Analysengerät. Für die Proben aus der früheren Kartierung lagen diese Daten bereits vor. Bei den Direktverfahren wird die trockene Probe eingewogen und unmittelbar gemessen (TC, TIC, TOC=TC-TIC, TN, TS, Hg). Beim Biogen-Opal wird aus der Probe ein basisches (NaOH) Extrakt hergestellt und anschließend mittels ICP-OES auf Si analysiert. Für die untere Reihe der Elemente (P, usw.) wurden von den Proben zwei Fraktionen gewonnen und getrennt analysiert: 1. Veraschen der Probe und Extraktion mit HCl, dies entspricht für P dem Gesamtgehalt, für die übrigen Elemente weitgehend dem Gesamt-Anteil. 2. HCl-Extraktion von der trockenen Probe (ohne Veraschung). Diese Gehalte entsprechen dem leicht mobilisierbaren Anteil vom Gesamtgehalt. Letzteres ist besonders im Hinblick auf eine mögliche „Verfügbarkeit“ in der Umwelt von Relevanz.

Der im Rahmen dieses Teilprojektes erzeugte finale geochemische Datensatz ist nicht lückenlos. Für eine Reihe von Stationen konnten nicht alle Parameter bestimmt werden. Dies war überwiegend durch nicht ausreichende Probenmengen begründet. Das Gesamtergebnis des Teilprojektes (Kartendarstellungen, Berechnung von Raten, Inventaren usw.) wird durch diese Tatsache aber nur

unwesentlich beeinflusst, da alle Sedimenttypen und alle Regionen mit einer genügenden Abdeckung durch Messpunkte vertreten sind.

Der finale Datensatz sind zwei Tabellen (im Excel-Format). Die erste beinhaltet neben den Stationsnummern, Koordinaten und Feinkornanteil ($<63\mu\text{m}$) die Ergebnisse der vom Gesamtsediment abgetrennten und analysierten Feinfraktion der Proben. In den Spalten erscheinen zunächst die im Direktverfahren gemessenen Elemente (Hg, TC, TN, TS, TIC, TOC, das berechnete Verhältnis TOC/N), und der Gehalt an biogenem Opal (Silikat). Dann folgen die Elementgehalte die mittels ICP-OES Bestimmung an Aufschlüssen gemessen wurden (As, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, P, Pb, Zn) jeweils an der veraschten (A) und unbehandelten (U) Probensubstanz der Feinfraktion.

Die zweite Tabelle enthält die aus den Analysendaten berechneten Elementgehalte für das Gesamtsediment (Originalprobe). Hier wird die in der Natur vorliegende „Verdünnung“ der Elementgehalte durch eine weitgehend inerte Grobfraktion (Sand) berücksichtigt. Diese Daten und Kartendarstellungen charakterisieren den im Gelände vorliegenden Originalzustand, wenn man so will, die tatsächliche Situation vor Ort.

Weitere Ableitungen (Berechnungen) von Daten sind möglich und im Rahmen des Projektes auch vorgesehen. Zum Beispiel: Flächen, Inventare, Raten, Differenzbeträge, Elementverhältnisse und anderes mehr.

Verfahren der Kartenerstellung (GIS):

Mit Hilfe von geostatistischen Verfahren wurden die räumlich heterogen verteilten Datenpunkte in ein gleichförmiges Datenraster („grid“) überführt. Im ersten Schritt wurden standardisierte Rechenroutinen zur Koordinatentransformation der Software ArcGIS 10.2 genutzt, um die Probenpositionen von geographischen Koordinaten mit Bezugssystem WGS84 in das kartesische Koordinatensystem ETRS89 (UTM-Zone 33N) zu überführen. Die metrische Positionsangabe diene als Basis zur Interpolation der Daten in äquidistante Raster mit 250 m Gitterpunktabstand aus denen die Kartendarstellungen erzeugt werden konnten. Zusätzlich ist ETRS89 das amtlich vorgeschriebene Lagebezugssystem und wird von der EU als einheitliches Bezugssystem für Geodaten empfohlen.

Als zweiter Vorgang wurde die Interpolation von Rastern der einzelnen geochemischen Parameter mit Kriging unter Verwendung von Semi-Variogramm-Modellen durchgeführt. Zu Beginn wird auf Grundlage der punktuellen Daten eine räumlich-statistische Datenanalyse (Semi-Variogrammanalyse) durchgeführt, die aus zwei Teilen besteht. Zuerst wird das experimentelle Variogramm berechnet, das die gemittelte Abweichung zweier Datenpunkte in Abhängigkeit von ihrem Abstand zueinander graphisch darstellt. Dabei werden in einem definierbaren Umkreis alle Datensätze miteinander verglichen. Das Verfahren dient zur Beschreibung der räumlichen Varianz einer Messgröße. Anschließend wird eine Modellfunktion an den Graphen angepasst, die später im statistischen Interpolationsverfahren Anwendung findet und die Qualität der Schätzung erhöhen soll. In einer Experimentierphase wurden die Auswirkungen verschiedener Parametereinstellungen wie zum Beispiel die Größe des Suchradius, Richtungsabhängigkeit der Messwerte, Funktionstypen oder unterschiedliche Gitterpunktabstände des zu berechnenden Rasters getestet. Der Suchradius schränkt in der Berechnung einzelner Gitterpunkte die zugrunde liegenden Datenpunkte ein. Große Radien sorgen dabei für Glättung von lokalen Strukturen wie zum Beispiel Becken und Sandriffe

während kleine Suchradien diese detaillierter abbilden können. Für die finalen Berechnungen der Raster aller Parameter wurde ein Suchradius von maximal 60.000 m gewählt. Sedimentäre Großstrukturen wie zum Beispiel das Arkona Becken im Nordosten des Arbeitsgebietes sind von dem aufgespannten Suchfeld eingeschlossen. Größere Radien führen zu unerwünschter Glättung, da weit entfernte Werte im Schätzvorgang einbezogen werden die aus geomorphologischer Sicht vermutlich wenig mit lokalen Strukturbesonderheiten in Verbindung stehen.

Richtungsabhängigkeiten der Datensätze wurden mit elliptischen Suchfeldern in West-Ost- und Süd-Nord-Ausrichtung getestet, die mögliche Transportwege und Stoffflüsse im Sediment zu beschreiben. Es konnten jedoch nur in Teilgebieten, wie im Gebiet der Oder Bank, Verbesserungen erzielt werden. Für das gesamte Arbeitsgebiet konnte jedoch keine einheitliche Richtungsabhängigkeit nachgewiesen werden und so wurden die finalen Raster ohne Richtungsbeschränkung des Suchfeldes erstellt. Zusätzlich wurden unterschiedliche Gitterpunktabstände von 250 m, 500 m und 1000 m erprobt, um eine sinnvolle Auflösung des Rasters für die durchschnittliche Datendichte von 0,2 Messpunkten pro km² zu finden. Für die finalen Berechnungen der Raster wurde ein einheitlicher Gitterpunktabstand von 250 m gewählt. Als Funktionstypen fanden lineare, quadratische, sphärische und Gauß'sche Modelle Anwendung. Tabelle 2 listet die gewählten Parametereinstellungen für den Krigingprozess zur Erstellung der Raster mit der Software SURFER 12 auf.

Tabelle 2: Überblick verwendeter Parametereinstellungen zur Interpolation der geochemischen Messgrößen

No.	Parameter	Dataset (samples)	Variogram (Max. lag distance/ Number of lags/ Lag width/ Vertical scale/ Lag direction)	Model (Nugget effect/ Function/ Scale/ Length)	Spacing [m]
K2	Feinfraktion <63 µm	866	40000 m/ 20/ 5000/ 2000/ 360°	200/ quadratic/ 1250/ 40000	250x250
K3	TOC - Gesamtfraktion	866	40000 m/ 20/ 5000/ 3.2/ 360°	0.45/ quadratic/ 2.7/ 40000	250x250
K4	TOC - Feinfraktion	866	40000 m/ 20/ 5000/ 4.5/ 360°	1/ linear/ slope 0.000087	250x250
K5	TIC - Gesamtfraktion	866	40000 m/ 19/ 2500/ 0.2/ 360°	0.029/ linear/ slope 0.0000008	250x250
K6	TIC - Feinfraktion	866	40000 m/ 22/ 5000/ 1/ 360°	0.5 /linear/ slope 0.0000015	250x250
K7	N - Gesamtfraktion	866	40000 m/ 22/ 2500/ 0.05/ 360°	0.007/ quadratic/ 0.04/ 40000	250x250
K8	N - Feinfraktion	866	60000 m/ 22/ 2500/ 0.1/ 360°	0.012/ quadratic/ 0.08/ 72000	250x250
K9	TOC/N Verhältnis	866	40000 m/ 23/ 2500/ 2.2/ 360°	0.6/ spherical/ 1.45/ 16000	250x250
K10	Opal (biogen) - Gesamfr.	866	40000 m/ 19/ 1000/ 4.5/ 360°	1.55/ quadratic/ 2.8/ 40000	250x250
K11	Opal (biogen) - Feinfrakt.	866	40000 m/ 20/ 1000/ 9/ 360°	3.5/ spherical/ 4.7/ 35000	250x250
K12	TP - Gesamtfraktion	601	40000 m/ 18/ 2000/ 0.005/ 360°	0.0008/ gaussian/ 0.004/ 20000	250x250
K13	TP - Feinfraktion	601	40000 m/ 19/ 5000/ 0.025/ 360°	0.003/ linear/ slope 0.00000055	250x250
K14	P (mobil) - Gesamtfrakt.	607	40000 m/ 21/ 5000/ 0.002/ 360°	0.0003/ gaussian/ 0.0014/ 22000	250x250
K15	P (mobil) - Feinfrakt.	607	40000 m/ 22/ 2500/ 0.004/ 360°	0.0009/ linear/ slope 0.00000008	250x250
K16	Hg - Gesamtfraktion	866	25000 m/ 22/ 1000/ 9000/ 360°	1800/ linear/ slope 0.28	250x250
K17	Hg - Feinfraktion	866	25000 m/ 20/ 2500/ 11000/ 360°	4000/ linear/ slope 0.265	250x250
K18	As - Gesamtfraktion	572	40000 m/ 25/ 1000/ 75/ 360°	17/ gaussian/ 52/ 19000	250x250
K19	As - Feinfraktion	572	40000 m/ 18/ 5000/ 120/ 360°	32/ linear/ slope 0.00195	250x250
K20	Zn - Gesamtfraktion	601	40000 m/ 22/ 5000/ 10000/ 360°	2200/ spherical/ 6600/ 38000	250x250

K21	Zn - Feinfraktion	601	40000 m/ 22/ 5000/ 10500/ 360°	5200/ linear/ slope 0.122	250x250
K22	Cu - Gesamtfraction	601	40000 m/ 21/ 5000/ 1310/ 360°	400/ linear/ slope 0.0245	250x250
K23	Cu - Feinfraktion	601	40000 m/ 20/ 3000/ 19000/ 360°	3800/ linear/ slope 0.33	250x250
K24	Pb - Gesamtfraction	601	40000 m/ 18/ 3000/ 2300/ 360°	400/ spherical/ 1600/ 39000	250x250
K25	Pb - Feinfraktion	601	40000 m/ 20/ 5000/ 2200/ 360°	1150/ linear/ slope 0.02	250x250

Als dritter Schritt wurden die erstellten Raster in ArcGIS weiterverarbeitet und daraus GIS-Datensätze mit Klassifikation der geochemischen Parameter erzeugt. Diese Daten fanden Eingang in den Baltic Sea Atlas und wurden als Kartendarstellung exportiert. Dabei wurden die Raster an der Küstenlinie und AWZ-Grenze als Abgrenzung des Arbeitsgebietes sowie Flächen ohne ausreichende Beprobungsdichte ausgeschnitten. Eine Ausnahme bildet das Gebiet des Arkona Beckens, das aufgrund guter Datengrundlage und seiner geologischen Bedeutung als Struktureinheit grenzübergreifend bis in schwedische und dänische Hoheitsgebiete dargestellt wurde. Anschließend wurde zur Festlegung von Klassengrenzen in der Kartendarstellung eine statistische Verteilung der Z-Werte (interpolierte Messwerte) der Raster erzeugt und die jeweilige Legende für die einzelnen Parameter definiert. Für den Kartenexport wurde ein einheitliches Kartenlayout mit Zusatzinformationen, wie zum Beispiel die Lage von Großstädten entlang der Küste, AWZ-Grenzen oder Bathymetrielinien, erstellt.

Ergebnis:

Der hier vorgelegte geochemische Atlas der Oberflächensedimente der deutschen Ostsee umfasst folgende Darstellungen und stellt eine Auswahl wichtiger projektrelevanter Elemente und Parameter dar:

- Verteilung der wichtigsten Sedimenttypen der deutschen Ostsee (Tauber-Karte).
- Porosität der Sedimente im Untersuchungsgebiet, berechnet auf der Grundlage der Korngrößenverteilung (median grain-size) Friedland-Karte.
- Bathymetrie (Tiefenverhältnisse) des Untersuchungsgebietes und Verteilung der Probenstationen, für welche geochemische Daten vorliegen.
- Regionale Verteilung des Anteils der Feinfraktion (<63µm in Gew. % vom Gesamtsediment), welche für die geochemischen Untersuchungen abgetrennt und analysiert wurde.
- Organischer Kohlenstoff (TOC) in der Gesamtfraction.
- TOC in der Feinfraktion.
- Anorganischer Kohlenstoff (TIC) in der Gesamtfraction.
- TIC in der Feinfraktion.
- Stickstoff (N) in der Gesamtfraction.
- N in der Feinfraktion.
- TOC/N Verhältnis (Korngrößenunabhängig).
- Biogen-Opalgehalt in der Gesamtfraction.
- Biogen-Opalgehalt in der Feinfraktion.
- Gesamt-Phosphor (TP) in der Gesamtfraction.
- TP in der Feinfraktion.

- Reaktiver (mobiler) P in der Gesamtfraktion.
- Reaktiver (mobiler) P in der Feinfraktion.
- Quecksilber (Hg) in der Gesamtfraktion.
- Hg in der Feinfraktion.
- As in der Gesamtfraktion.
- As in der Feinfraktion
- Zn in der Gesamtfraktion.
- Zn in der Feinfraktion
- Cu in der Gesamtfraktion
- Cu in der Feinfraktion
- Pb in der Gesamtfraktion
- Pb in der Feinfraktion

Die augenscheinlichen Ähnlichkeiten der Verteilungsmuster zahlreicher Elemente und Parameter sind dadurch bedingt, dass diese positiv hoch korreliert sind. Die Ursachen hierfür werden noch eingehender erläutert. Bei den Kartendarstellungen geht es aber auch um die generelle Information der Zahlenwerte, der Gehalte.

Für weitere gemessene Elementgehalte und abgeleitete Parameter können bei Bedarf zusätzliche Karten erzeugt werden. Aus Platzgründen und auch wegen der Tatsache, dass einige Parameter für die Projektpartner (Arbeitsgruppen) und Nutzer von untergeordneter Bedeutung sind, soll an dieser Stelle darauf verzichtet werden.

Einführende Diskussion:

Die Verteilung der Feinfraktion im Untersuchungsgebiet ist streng Abhängig von der Wassertiefe bzw. Morphologie und von der Hydrodynamik. In den sandigen Gebieten, auf groben Restsedimenten und Steinfeldern beträgt der Feinkorn-Anteil nur wenige Masse-% vom Gesamtsediment. In den Schlickgebieten der Becken liegt der Feinkornanteil dagegen bei über 90 %.

Wegen des grundlegenden Zusammenhangs zwischen Feinfraktion und Elementgehalt (Korngrößeneffekt), zeigen die Verteilungsbilder der projektrelevanten Elemente, berechnet auf die Gesamtfraktion, sehr ähnliche charakteristische Grundmuster: Die Schlicke der Beckengebiete haben (natürlich) höhere Gehalte, als die Sande und Restsedimente der flachen Küstenbereiche, Bänke und Schwellen.

Regional betrachtet sind für die Schlickgebiete das Arkonabecken und die Mecklenburger Bucht von größter Ausdehnung und Bedeutung als Ablagerungsraum. Im Westen der deutschen Ostsee befinden sich noch kleinere Schlick-Vorkommen in der Kieler Bucht, Flensburger Förde und Eckernförder Bucht. Die größten zusammenhängenden Sandgebiete sind die Oderbucht (Oderbank) im Osten, die sogenannte Falster-Rügen-Platte (nördlich der Halbinsel Darß-Zingst) und das Sandgebiet zwischen Warnemünde und Gedser. Die restlichen Flächen werden durch die anderen Sedimenttypen (Schluffe, Steinfeldern, Restsedimente etc.) abgedeckt (siehe Karte der Sedimenttypen und Tabelle 1).

Bei der Darstellung der regionalen Verteilung von Elementgehalten in der Feinfraktion ($<63 \mu\text{m}$) hebt sich das oben beschriebene Grundmuster teilweise auf. Nun wird sichtbar, dass in einigen Gebieten (z.B. auf der Oderbank) die dort vorhandenen geringen Anteile der Feinfraktion trotzdem sehr hohe Gehalte der betreffenden Elemente aufweisen können.

Die feinkörnigen, vom Festland eingetragen und in der Wassersäule gebildeten biogenen und mineralischen Partikel und Aggregate und die daran gebundenen Substanzen gelangen erst in den Becken zur (längerfristigen) Ablagerung. Die flachen Sandgebiete sind wegen ihrer hohen Hydrodynamik für diese Feinfraktion nur Übergangsbereich bzw. Transportareal. Sie werden unter ruhigen hydrographischen Verhältnissen zum Boden absinken (Stichwort: fluffy layer), teilweise in das sandige Sediment eingearbeitet (auch durch Bioturbation) und bei Strömung und Wellengang wieder weiter transportiert. Im Resultat dieser ständig ablaufenden Prozesse enden die feinkörnigen und organischen Partikel in den Akkumulationsgebieten (Becken). Die Verweildauer des fluffy layer Materials auf den sandigen Bänken und Platten kann mit Zeitskalen von Tagen bis Wochen (Monaten) abgeschätzt werden. Der Fein-Anteil, der tiefer in das sandige Sediment eingearbeitet wird, könnte dort möglicherweise auch für längere Zeit verbleiben. Starke Stürme (Wellen) werden diesen Feinanteil teilweise wieder auswaschen und fortbewegen, das gröbere Sediment (Sand) sinkt sofort wieder ab. Die fein- bis mittelkörnigen Sande der Oderbank, zum Beispiel, sind sehr alt und liegen dort schon seit einigen Jahrtausenden. Sie haben eine hohe interne Dynamik (z.B. auch sichtbar durch Mega-Rippeln), bewegen sich aber insgesamt kaum fort aus dem Gebiet.

Ob das Arkonabecken oder die Mecklenburger Bucht im geologischen Sinn tatsächlich „Endlager“ für feinkörniges mineralisches und organisches Material darstellen, ist eine andere Frage, die im Teilprojekt 1.2 nachgegangen wird. Zumindest jedoch wird auf Zeitskalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten dieses feine Material dort verbleiben, soviel kann aus den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen schon abgeleitet werden.

Bemerkenswert ist die für zahlreiche Elemente zu beobachtende erhöhte Konzentration in der Feinfraktion auf der Oderbank (Pommernbucht). Die Konzentrationen dort übersteigen in vielen Fällen sogar die Werte der Schlickgebiete der Becken. Wegen der anzunehmenden kurzen Verweilzeit des Feinanteiles auf dieser Sandbank kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei z.B. für TOC um überwiegend junges, frisches organisches Material aus der in-situ Primärproduktion des Gebietes handelt. Diese Aussage wird auch durch die niedrigen TOC/N-Verhältnisse des organischen Materials gestützt. Für die Verteilung und Konzentration der Nährstoff-Elemente N und P sowie für biogenes Silikat (Opal) gilt hier der gleiche Zusammenhang wie für TOC. Dass die Gewässer der Pommernbucht wegen der Nähe zur Odermündung (Nährstoffeintrag) biologisch hochproduktiv sind, ist seit langem bekannt. Zu dieser Problematik gab es bereits in den 1990er und 2000er Jahren im IOW einige Projekte und entsprechende Publikationen, z.B. „ODER“, „BASYS“, „Pommernbucht“. Neu ist hier, dass durch die flächendeckende Information auch Aussagen über ablaufende Prozesse möglich sind. Kurzfristig (Saisonal) werden diesem System die Nährstoffe nicht entzogen, weil das organische Material (z.B. aus Algenblüten) nicht in größere Tiefen absinken kann, sondern auf der flachen Sandbank verbleibt, dort teilweise verarbeitet wird, und in den Kreislauf relativ rasch zurückgelangt. Diese räumlich und zeitlich kurzen, intensiven Kreisläufe mögen die Ursache für die hohen Konzentrationen in der (wenigen) Feinfraktion auf den Sandbänken der Oderbucht sein.

Sinngemäß gelten die gleichen regionalen Zusammenhänge und Prozesse wie für die Effekte der Eutrophierung (Nährstoffe) auch für Schadstoffe (z.B. Schwermetalle). Die Fracht der über Jahrzehnte hochbelasteten Oder gelangt über das Oderhaff (als Zwischenlager) in die vorgelagerte Ostsee (Pommernbucht). Da die Pufferkapazität des flachen Oderhaffs begrenzt bzw. erschöpft ist (frühere Studien haben ergeben, dass die mittlere Verweilzeit des Materials der oberflächennahen Sedimentschicht bei wenigen Jahrzehnten liegt) werden fortwährend noch historisch belastete Schwebstoffe (re-suspendiertes Sediment) aus dem Haff in die Pommernbucht eingetragen. Genau dieser Prozess kommt in den Verteilungsbildern der Schwermetalle (z.B. Hg) in der Feinfraktion zum Ausdruck. In den entsprechenden Elementverteilungskarten, berechnet auf die Gesamtfraktion der Sedimente ist das nicht zu sehen.

Die Transportwege feinkörnigen Materials mit den daran gebundenen Stoffen können somit nachgezeichnet werden. Nach dem Ausstrom aus dem Oder-Ästuar gelangt das Material in die Pommernbucht und von dort aus weiter, entweder nach Nordwesten in Richtung Arkonabecken oder nach Nordosten in Richtung Bornholmbecken. Letzteres liegt außerhalb unseres Untersuchungsgebietes. Der direkte Transportweg von der Pommernbucht nach Nordwesten in Richtung Arkonabecken scheint nach einigen hier vorliegenden Befunden zu mindestens zeitweise abgeschnitten zu sein. Ursache dafür sind sehr wahrscheinlich starke West-Ost gerichtete Bodenwasser-Strömungen (Kontur-Ströme) vor der Nordküste Rügens, am Südrand des Arkonabeckens. Der Partikeltransport wird dann nach Osten abgelenkt, was die starken Gradienten in einigen Verteilungsbildern von Elementgehalten in der Feinfraktion dieser Region erklären würde.

Diesbezüglich wäre auch der auffällige „gelbe Ring“ niedriger TOC Werte (in der Feinfraktion) am Rande des Arkonabeckens zu verstehen. Hier ist das Sediment ein Grob-Silt (Sedimenttyp 3; Tromper Wiek) mit deutlich niedrigeren TOC-Werten, als im Becken und auf der Oderbank. In diesem Zusammenhang muss ebenfalls auf die TOC/N-Werte verwiesen werden, die in diesem Bereich teilweise auffällig höher sind, als im Becken und auf der Oderbank. Die oben erwähnten Strömungsmuster mit entsprechenden Erosions- und Transportprozessen wären eine mögliche Erklärung, weil damit z.B. auch eine Freilegung und Umlagerung alter organischer Substanz (Stichwort: fossile Torfe) verbunden sein kann. Dieses Gebiet am Südrand des Arkonabeckens ist offensichtlich kein Ablagerungsraum für junges (frisches) organisches Material und daran gebundener Stoffe.

Bezüglich einiger Schwermetalle, insbesondere für Hg, sind neben dem Oderausstrom noch zwei sogenannte Altlasten als „Hot-Spots“ sichtbar. Am Westrand des Arkonabeckens betrifft das eine militärische Altlast aus dem 2. Weltkrieg und in der Mecklenburger Bucht (Lübecker Bucht) eine Industrie-Altlast aus den 1960er Jahren. Über diese Vorkommen wurde bereits publiziert, zum Beispiel: Leipe, et al., (2005): Ecotoxicity assessment of natural attenuation effects at a historical dumping site in the western Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 50, 446-459 und Leipe et al., (2013): Mercury in Baltic Sea sediments – natural background and anthropogenic impact. *Chemie der Erde (Geochemistry)* 73, 249-259.

Der Karbonat-Gehalt (TIC) der Feinfraktion der Sedimente der deutschen Ostsee ist insgesamt relativ gering. Insbesondere die Schlicke der großen Beckengebiete (Arkona-Becken, Mecklenburger Bucht) sind ausgesprochen kalkarm. Diese Tatsache ist deshalb bemerkenswert, da große Teile des

Einzugsgebietes kalkreiche Gesteine aufweisen: Geschiebemergel, Kreide (Rügen). Ausnahmen bilden die calcitreichen Sedimente der eutrophen Bodden- und Haffgewässer (hier kann es zeitweise zu einer plankton-bedingten Kalkfällung kommen), sowie einige Gebiete auf denen kalkbildende Benthos-Organismen, z.B. Muschelbänke vorkommen. In dieser Hinsicht ist die Abtrennung und Analyse der Feinfraktion eventuell ein gewisser Nachteil, da auch die Grobfraktion ($>63\mu\text{m}$) kalkreich sein kann.

Das TOC/N-Verhältnis kann als grober Indikator der Art (Herkunft) und des Alters der organischen Substanz im Sediment verwendet werden. Frisches Phytoplankton der westlichen Ostsee hat typischerweise Werte zwischen 6 und 8. Höhere Werte deuten auf „gealtertes“ organisches Material hin (Abbau) bzw. Einfluss terrigener organischer Substanzen. Gerade im Bereich der Tromper Wiek und des Adlergrundes sind auch fossile Torfe bekannt, die auf Erosionsflächen am Meeresboden anstehen. Größere Bereiche mit Werten zwischen 8 und 9 z.B. im Gebiet des Arkonabeckens unterstützen die bereits diskutierte Tatsache, dass hier organisches Material zur längerfristigen Ablagerung (mit fortschreitendem Abbau) kommt. Zu diesem Themenkreis wird insbesondere auch in den Teilprojekten 1.3. und 2.3. (Sedimentkerne) des SECOS-Projektes gearbeitet.

Zwei weitere biogene bzw. biorelevante „Proxys“ sind der biogene Opal (Silikat) und der Phosphor. Wegen der oben diskutierten generellen Korrelation zwischen Feinfraktion, TOC und weiteren Elementen und Parameter, welche an die Feinfraktion gebunden sind, sehen die Muster der Verteilung auch hierfür sehr ähnlich aus. Die Hauptquelle des Biogenen Opals (Silikat) sind die Kieselalgen, die in der Regel als „Frühjahrsblüte“ bzw. auch in manchen Jahren als „Herbstblüte“ auftreten. Phosphor ist an organische Substanz gebunden, kann aber auch als Ca-Phosphat oder Fe-gebundenes Phosphat vorliegen. Beim Abbau der organischen Substanz und bei sich ändernden Redox-Verhältnissen können große Teile des gebundenen Phosphors wieder bio-verfügbar werden. Auch in den Verteilungsmustern der Feinfraktion dieser Parameter fällt die Pommersche Bucht (Oderbank) als biologisch produktives Gebiet auf. Hier gelten die gleichen Zusammenhänge wie beim TOC, Nährstoffeinträge vom Festland (Oder-Ästuar) und ein hoher Intensität der Stoffkreisläufe charakterisieren diese Region.

Zusammenfassung:

Für die regionale Verteilung projektrelevanter Elemente und biogeochemischer Parameter wird der generelle positive Zusammenhang zwischen Korngröße (Anteil der Feinfraktion am Gesamtsediment) TOC, Nährstoffelemente und Schadstoffe (Schwermetalle) sichtbar. Die flachen Küstengebiete und großen Sandbänke sind wegen ihrer hohen Hydrodynamik nur Übergangs- bzw. Transportareal für feinkörniges und organisches Material. Das Arkonabecken und die Mecklenburger Bucht sind die bedeutendsten Depositionsgebiete für feinkörnige Schlicke und die daran gebundenen Stoffe. Ungeachtet dessen enthüllte die Abtrennung und Analytik der Feinfraktion vom Gesamtsediment eine Reihe überraschender Befunde: Die Elementkonzentrationen in der Feinfraktion sind nicht gleichmäßig verteilt. Höhere Werte finden sich für die meisten der projektrelevanten Elemente und Parameter (C, N, P, bio-Silikat, Schwermetalle) im Gebiet der sandigen Pommernbucht (Oderbank). Dies zeigt den Einfluss von Nährstoffen (und Schadstoffen) aus dem Oder-Ästuar und charakterisiert

dieses Areal als biologisch hoch-produktiv. Die Verteilungsbilder der Elemente in der Feinfraktion lassen teilweise auch Rückschlüsse auf Transportwege zu.

Ausblick:

Die jetzt vorliegende Datenbasis wird zunächst die Berechnung von flächen- und raumbezogenen Inventaren und Raten von Elementen im Sediment ermöglichen. Weiterhin können flächendeckende Informationen zu Sedimenteigenschaften auch die Kopplung an hydrodynamische Modelle verbessern. Schließlich sollen die bio-geochemischen Daten auch für die Öko-System und Benthos-Modellierung genutzt werden.