

Der Schifffahrtskanal im Oderhaff - Eine Sediment-, Nähr- und Schadstofffalle?



Diplomarbeit von Marion Minning

Der Schifffahrtskanal im Oderhaff – Eine Sediment-, Nähr- und Schadstofffalle?

Diplomarbeit

zur Diplomprüfung im Fach Geographie

dem Prüfungsausschuss für den
Diplomstudiengang Geographie
der
Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von

Marion Minning

Kronshagen, 2003

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Symbole und Einheiten.....	iii
Kurzfassung.....	iv
1. Einleitung.....	1
2. Untersuchungsgebiet und Hintergrundinformation.....	3
2.1 Die Oder.....	3
2.1.1 Geographische Lage und Geologie.....	3
2.1.2 Hydrographische Verhältnisse.....	4
2.1.3 Bevölkerung und anthropogene Nutzung im Einzugsgebiet.....	5
2.1.4 Wassermengen und Schwebstofftransport.....	6
2.2 Das Oderhaff.....	8
2.2.1 Entstehung und morphologische Entwicklung.....	8
2.2.2 Hydromorphologische Verhältnisse.....	9
2.2.3 Sedimentbeschaffenheit.....	9
2.2.4 Ökologischer Zustand des Oderhaffs unter Einbeziehung der EU- Wasserrahmenrichtlinie.....	11
2.3 Der Schifffahrtskanal im Oderhaff.....	12
2.3.1 Bau des Schifffahrtskanals.....	12
2.3.2 Vertiefungen und Erneuerungen.....	13
3. Material und Methoden.....	16
3.1 Datenerhebung.....	16
3.2 Probenahme.....	16
3.3 Physikalische Eigenschaften.....	18
3.3.1 Wassergehalt und Trockenraumdichte.....	18
3.3.2 Glühverlust.....	18
3.3.3 Korngrößenanalyse.....	18
3.4 Geochemie.....	19
3.4.1 Kohlenstoff- und Schwefelbestimmung.....	19
3.4.2 Kohlenstoff- und Stickstoffbestimmung.....	19
3.4.3 Totalaufschluss und Atomemissionsspektrometrie.....	20

3.5 Mineralogie	21
3.5.1 Gesamtmineralogie und Tonmineralogie.....	21
3.5.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersive Spektrometrie (EDX)....	22
3.6 Tiefenmessung mit Echolot.....	23
3.7 Strömungsmodell FEMFLOW 2D.....	23
3.8 Statistische Methoden.....	24
4. Ergebnisse.....	26
4.1 Physikalische Eigenschaften.....	26
4.2 Geochemie	33
4.2.1 Schwermetalle.....	33
4.2.2 Nährstoffe.....	40
4.2.3 Sonstige Inhaltstoffe.....	46
4.3 Mineralogie	47
4.4 Tonmineralogie	52
4.5 Tiefenprofil des Schifffahrtskanals durch Echolotaufnahmen.....	54
4.6 Bilanzierung.....	55
4.7 Strömungsmodellierung mit FEMFLOW 2D.....	57
5. Diskussion.....	63
5.1 Methodenkritik.....	63
5.2 Einfluss der Schifffahrtsrinne auf den Stoffhaushalt des Oderhaffs.....	65
5.2.1 Sedimenttransportprozesse.....	65
5.2.2 Physikalische Eigenschaften.....	68
5.2.3 Stickstoff.....	69
5.2.4 Phosphor.....	71
5.2.5 Kohlenstoff.....	73
5.2.6 Schwermetalle.....	74
5.2.7 Mineralogie.....	81
5.3 Auswertung der Bilanzierung.....	83
5.4 Konsequenzen der geplanten Kanalvertiefung für das Oderhaff.....	84
5.4.1 Veränderungen im Stoffhaushalt.....	84
5.4.2 Baggergutproblematik.....	87
5.4.3 Veränderungen des Hydrosystems.....	91
6. Zusammenfassung.....	94
7. Danksagung.....	96
8. Literatur.....	97

Abkürzungen, Symbole und Einheiten

DBD	Dry Bulk Density (Trockenraumdichte)
EDX	Elektron disperse X-Ray-analyse – Energiedispersive Spektrometer
HABAB-WSV	Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut im Binnenland
HABAK-WSV	Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut im Küstenbereich
ICP-AES	Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LUNG	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie
MOS	Maritime Office of Szczecin
ppm	parts per million
REM	Rasterelektronenmikroskop
SPM	Suspended particular material
SSSA	Szczecin-Swinoujscie Seaport Authority
TC	„Total Carbon“ – Gesamter Kohlenstoff
TIC	„Total Inorganic Carbon“ – Gesamter mineralischer Kohlenstoff
TOC	„Total Organic Carbon“ – Gesamter organischer Kohlenstoff
TS	Trockensubstanz
UTC	Universal Time Coordinated (koordinierte Weltzeit)
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für die Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik)

Kurzfassung

Das Untersuchungsgebiet liegt an der deutsch-polnischen Grenze, wo die Oder in die Ostsee mündet. Hier hat sich ein der Küstenlinie vor gelagertes Becken gebildet, das Oderhaff (auch Stettiner Haff). Den größten Zufluss in das Haff stellt die Oder mit einem Einzugsgebiet von 118.861 km² dar. Das Haff ist 687 km² groß bei einer mittleren Tiefe von 3,8 m und wird durch die Nehrunginseln Usedom im Westen und Wolin im Osten von der Ostsee getrennt. Eine Verbindung mit dieser besteht lediglich über die drei Mündungsarme Peene, Swina und Dziwna. Das Haff gliedert sich in zwei Bereiche, das Kleine Haff auf deutscher Seite und das Große Haff (Zalew Wielki) auf polnischem Gebiet.

Durch das Große Haff führt ein bereits im 19. Jahrhundert künstlich angelegter Schifffahrtsweg, der den etwa 70 km flussaufwärt an der Oder gelegenen Hafen von Stettin mit der Ostsee verbindet. Dieser Kanal wurde im Laufe seiner Geschichte immer weiter vertieft, um größeren Schiffen die Durchfahrt zu ermöglichen, bis er seinen heutigen Zustand mit einer Tiefe von etwa 10,5 m erreicht hat. In Planung ist ein weiterer Ausbau dieses Schifffahrtsweges mit einer Vertiefung des Kanals auf etwa 14,5 m und einer damit verbundenen Kanalverbreiterung.

Küstengewässer wie Haffe und Bodden spielen eine bedeutende Rolle in Bezug auf Stoffaustauschprozesse zwischen Land und Meer. Sie können beispielsweise als Filter, Senke oder Transformator für fluviale Materialfrachten aus dem Binnenland fungieren. In dieser Arbeit war daher von Interesse, wie sich der künstlich angelegte Schifffahrtskanal, der das Oderhaff durchquert, auf die Eigenschaften und Funktionen des Haffs in dieser Hinsicht auswirkt. Stellt der Schifffahrtskanal eine Falle für Sedimente, Nähr- und Schadstoffe dar?

Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen waren im Wesentlichen die folgenden Fragen:

- Wie viel Material lagert sich im Schifffahrtskanal ab?
- Wie setzt sich das im Kanal abgelagerte Material zusammen und woher stammt es hauptsächlich?
- Haben die regelmäßigen Ausbaggerungen einen relevanten Nährstoffentzug für das System Oderhaff zur Folge und wie wirkt sich dies auf die Trophie des Haffs aus?
- Welche Bedeutung hat der Kanal bei der Bewertung des Oderhaffs als Senke für die Ostsee?

Eine weitere zu behandelnde Frage im Zusammenhang mit der geplanten Vertiefung war:

- Wie wirkt sich die Vertiefung auf die Materialtransport- und Ablagerungsprozesse und somit auf den Nähr- und Schadstoffhaushalt des Oderhaffs aus?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden mittels eines Kastengreifers elf Sedimentproben aus dem Kanal entnommen und im Labor auf die verschiedenen physikalischen, geochemischen und mineralogischen Eigenschaften untersucht (Lage der Probestellen siehe Abb. 1). Als physikalische Parameter wurden der jeweilige Wassergehalt, Trockenraumdichte, Glühverlust und Korngrößenzusammensetzung bestimmt. Durch geochemische Analysen wurden die Konzentrationen an Schwermetallen, Nährstoffen und einigen weiteren Bestandteilen ermittelt. Zudem wurden die Gehalte der mineralogischen Bestandteile wie Quarz, Feldspat, Calcit, Dolomit

und Pyrit bestimmt, sowie die Gehalte tonmineralogischer Bestandteile wie Kaolinit, Illit, Chlorit und Smektit. Elektronenmikroskopische Betrachtungen und energiedispersive Spektrometrie an ausgewählten Proben gaben zusätzliche Einblicke über die Probenzusammensetzung.

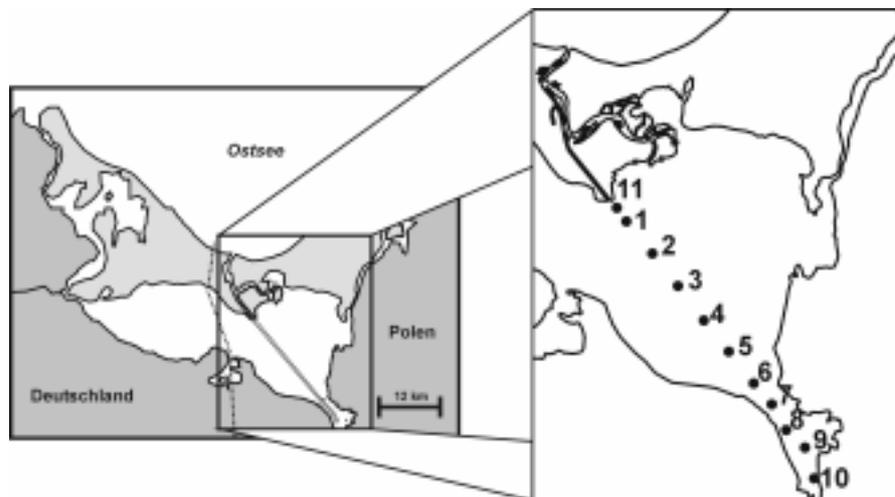


Abb. 1: Probenpunkte im Schifffahrtskanal des Großen Haffs.

Während einer Expedition mit dem Forschungsschiff „Prof. Albrecht Penck“ in das Oderhaff wurden zudem Echolotaufnahmen der Kanaltiefe gemacht, die Rückschlüsse auf kürzlich durchgeführte Baggerungen ermöglichten.



Foto 1: FS „Professor Albrecht Penck“ im Hafen von Ziegenort.

Des Weiteren fanden mit dem Simulationsmodell FEMFLOW2D Modellierungen der Strömungsfelder im Oderhaff mit einem theoretisch auf 14,5 m vertieften Kanal statt, die mit den Modellierungen des Haffs mit dem Kanal in heutigem Zustand verglichen werden konnten.

Die Untersuchungen der Sedimentproben auf ihre Zusammensetzung haben ergeben, dass sich im Kanal vorrangig schlackiges Material ablagert, welches reich an organischen Bestandteilen ist und große Nähr- und Schadstoffmengen enthält. Durch die Analyse der Sedimentzusammensetzung waren zum Teil Rückschlüsse auf die Herkunft des Materials möglich. In der Rinne lagert sich Oderfracht, umgelagertes Material aus dem Haff, das dem Durchmischungshorizont entstammt und verschiedenen Alters ist, sowie aus der Ostsee eingeschwemmtes Material ab. Die allgemeinen

Strömungsverhältnisse, zunehmender Schiffsverkehr und Ähnliches verursachen Resuspensions- und Umlagerungsprozesse und bewirken eine zusätzliche Materialdurchmischung im Kanal.

Um die Auswirkungen des Kanals auf das Haff und schließlich für die Ostsee beurteilen zu können, müssen die regelmäßigen Baggerarbeiten mit berücksichtigt werden, die im Kanal durchgeführt werden, um die Tiefe zu erhalten. Die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen zu den stofflichen Inhalten im jährlich entnommenen Baggergut haben gezeigt, dass es sich hierbei um durchaus relevante Größenordnungen handelt. Ein Vergleich der in den Jahren 1986 bis 2000 durchschnittlich entnommenen Baggergutmenge mit der durchschnittlichen Fracht der Oder nach Berechnungen aus LEIPE et al. (1996) haben ergeben, dass knapp 50 % der Odereintragsmenge durch die Baggerungen entnommen wird. Eine anthropogene Entnahme dieser Größenordnung sollte bei Berechnungen zu Stoffhaushalt des Haffs und Materialtransportprozesse in die Ostsee keinesfalls außer Acht gelassen werden. Der Kanal übernimmt durch diese regelmäßigen Materialentnahmen eine Art Reinigungsfunktion, da unter anderem schadstoffbelastetes Material aus dem Gewässer entnommen wird und somit nicht mehr in die Ostsee weiter transportiert werden kann. Auch im Sediment gespeicherte Nährstoffe werden mit dem Baggergut aus dem Gewässer entnommen. Diese könnten anderenfalls wieder aus dem Sediment freigesetzt werden und sich entsprechend auf die Trophie des Haffs auswirken. Auch in Zukunft ist ein deutlicher Einfluss des Kanals durch die regelmäßig durchgeführten Baggerungen zu erwarten. Schon durch die Kanalvertiefung und –verbreiterung wird es zur Entnahme großer Mengen an Sediment kommen, aber auch in der Folgezeit werden möglicherweise verstärkt regelmäßige Baggerungen nötig sein, um die neue Tiefe von 14,5 m erhalten zu können.

Die Modellierungen der Strömungsverhältnisse im Haff haben gezeigt, dass nach geplanter Kanalvertiefung eine Verstärkung des Wasseraustausches zwischen Haff und Ostsee zu erwarten ist. Dies kann höhere Salzkonzentrationen im Oderhaff und weiter oderaufwärts nach sich ziehen und sich auf die chemischen Prozesse im Gewässer auswirken. Eine Veränderungen im Stoffhaushalt des Oderhaffs ist zu erwarten, die auch für den Materialtransport in die Ostsee von Bedeutung sein wird.

Abschließend ist demnach festzustellen, dass der Kanal durch die regelmäßigen Baggerungen durchaus als Materialsenke zu bewerten ist. Durch diesen künstlichen Schifffahrtskanal übernimmt das Oderhaff eine Art Filterfunktion zwischen der Oder und der Ostsee.

1. Einleitung

Die Wasserqualität vieler Gewässer ist im Verlaufe des vergangenen Jahrhunderts durch Industrialisierung, technischen Fortschritt und Bevölkerungswachstum deutlich in Mitleidenschaft gezogen worden. Durch industrielle, kommunale und agrarwirtschaftliche Abwässer sowie über die Atmosphäre gelangen Schadstoffe und erhöhte Nährstoffmengen in die aquatischen Ökosysteme und verursachen Vergiftungserscheinungen bei Lebewesen oder Eutrophierungen der Gewässer.

Für die Belastung der Ostsee sind vor allem die atmosphärischen und fluvialen Einträge von Bedeutung. Eines der Hauptprobleme stellt der hohe Nährstoffeintrag durch die Flüsse dar. Etwa 760.750 t Gesamtstickstoff gelangten 1995 über Gewässer in die Ostsee, wobei 90 % davon über Flüsse eingetragen wurden. Im gleichen Jahr gelangten ca. 37.650 t Gesamtposphor auf diesem Wege in die Ostsee, wobei etwa 81 % davon durch Flussfracht eingeschwemmt wurden (HELCOM 1998, S. 53ff). Diese hohen Nährstoffmengen führten zu einer fortschreitenden Eutrophierung der Ostsee.

Küstengewässer wie Bodden und Haffe, wie sie in der südlichen Ostsee zu finden sind, spielen hier eine bedeutende Rolle als Filter, Transformator oder Senke bei dem Stofftransport zwischen Land und Meer. Eines dieser Küstengewässer der südlichen Ostsee ist das Oderhaff (Stettiner Haff) an der deutsch-polnischen Grenze. Hier mündet der sechstgrößte Süßwasserzufluss der Ostsee, die Oder. Es hat sich in diesem Bereich ein durch Nehrungsinseln weitestgehend von der Ostsee abgetrenntes Becken gebildet, welches das im Mittel 3,8 m tiefe und etwa 687 km² große Oderhaff ist. Das Wasser der Oder passiert zunächst dieses Becken, wobei Teile der Nähr- und Schadstofffracht akkumuliert oder biologisch umgesetzt werden. Zur Frage der Funktion des Oderhaffs bei Transportprozessen zwischen den Flüssen und der Ostsee wurden beispielsweise von R. LAMPE, T. LEIPE, G. SCHERNEWSKI, M. WIELGAT oder I. NÖHREN bereits Arbeiten und Modelle erstellt.

In dieser Diplomarbeit soll die Bedeutung des Schifffahrtskanals im Oderhaff näher betrachtet werden. Der bereits 1874 bis 1880 künstlich angelegte Schifffahrtskanal verbindet den Stettiner Hafen, etwa 70 km oderaufwärts, durch das Oderhaff mit der Ostsee. Aufgrund der hohen Sedimentationsrate im Haff sind regelmäßige Ausbaggerungen notwendig, um die Tiefe des Kanals zu erhalten. Besonders im Zeitalter der Globalisierung machen neue Technologien in der Schifffahrt einen weiteren Ausbau des Stettiner Hafens und des Schifffahrtskanals notwendig, damit Stettin im Seeverkehr und –transport sowie in der Werftindustrie weiter konkurrenzfähig bleiben kann. In Planung ist daher die Vertiefung und Verbreiterung des Kanals auf etwa 14,5 m Tiefe und ca. 140 m Breite sowie der Ausbau und die Modernisierung der Häfen.

Folgende Fragen sollen im Rahmen dieser Arbeit diskutiert werden:

- Wie setzt sich das im Kanal abgelagerte Material zusammen und woher stammt es hauptsächlich?
- Haben die regelmäßigen Ausbaggerungen einen relevanten Nährstoffentzug für das System Oderhaff zur Folge und wie wirkt sich dies auf die Trophie des Haffs aus?

- Welche Bedeutung hat der Kanal bei der Bewertung des Oderhaffs als Senke für die Ostsee?

Eine weitere zu behandelnde Frage im Zusammenhang mit der geplanten Vertiefung war:

- Wie wirkt sich die Vertiefung auf die Materialtransport- und Ablagerungsprozesse und somit auf den Nähr- und Schadstoffhaushalt des Oderhaffs aus?

Zur Klärung dieser Fragen standen elf Sedimentproben aus dem Schifffahrtskanal zur Verfügung, die im Labor analysiert werden konnten. Zudem wurde eine Fahrt mit dem Forschungsschiff „Professor Albrecht Penck“ in das Oderhaff unternommen. Zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse im Oderhaff stand das Simulationsmodell FEMFLOW 2D zur Verfügung. Die Auswertung und Diskussion der so gewonnenen Informationen soll Aufschluss über die oben genannten Fragen geben.

2. Untersuchungsgebiet und Hintergrundinformation

2.1 Die Oder

2.1.1 Geographische Lage und Geologie

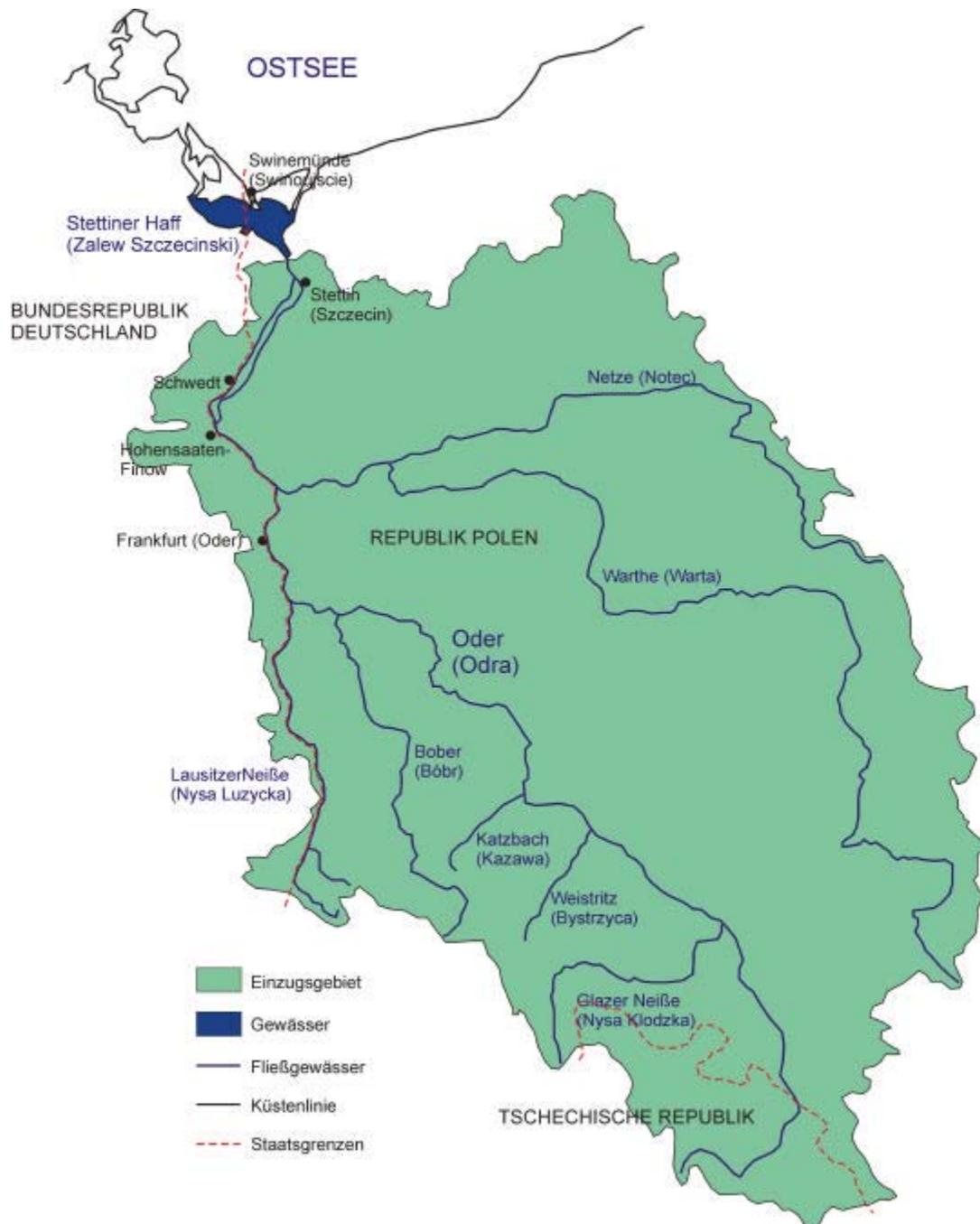


Abb. 2.1.1 - 1: Das Oder-Einzugsgebiet im Überblick (erstellt nach: LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998a und CLEVELAND (Hrsg.), 1994).

Die Oder (tschechisch und polnisch: Odra) fließt im östlichen Mitteleuropa und gehört zum Einzugsgebiet der Ostsee. Sie entspringt in den tschechischen Ostsudeten im Odergebirge am 25 km östlich von Olmütz (Olomouc) gelegenen Lieselberg (Fiduv Kopec) in einer Höhe von 634 m über dem Meeresspiegel. Die ersten 120 km fließt sie auf tschechischem Gebiet (siehe dazu Abb. 2.1.1 – 1). Innerhalb dieser Strecke münden die Flüsse Ostrawitz (Ostravice) und Olsa (Olž e/Olza) aus den westlichen Beskiden sowie der Fluss Oppa (Opava) aus dem Gesenke in die Oder. Anschließend durchfließt sie die schlesische Bucht (Nizina Šlaska) und die Vortiefe der Sudeten auf polnischem Gebiet. Die Hauptfließrichtung ist in diesem Bereich Nordwest. Nach dem Zusammenfluss mit der Lausitzer Neiße (Nysa Luzycka) fließt die Oder als Grenzfluss an der deutsch-polnischen Grenze zunächst in nördliche Richtung, streift das Gebiet Oderbruch südlich von Frankfurt (Oder) und fließt nach Einmünden der Warthe (Warta) bei Oder-Strom-km 617,5 wieder in nordwestliche Richtung. Die Warthe ist der größte Nebenfluss der Oder. Eine weitere Änderung der Fließrichtung findet etwa ab Hohensaaten statt. Hier fließt die Oder nach Nord bis Nordost, um nördlich von Stettin (Szczecin) in das Stettiner Haff (Zalew Szczecinski) und schließlich in die Ostsee zu münden (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998a, S. 6).

Die wichtigsten Nebenflüsse der Oder sind linksseitig Oppa (Opava), Glatzer Neiße (Nysa Klodzka), Ohle (Olawa), Weistritz (Bystryca), Katzbach (Kaczawa), Bober (Bóbr) und Lausitzer Neiße (Nysa Luzycka) sowie rechtsseitig Malapan (Mala Panew), Stober (Stobrawa), Weide (Widawa), Bartsch (Barycz), Warthe (Warta), Mietzel (Mysla) und Ihna (Ina) (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998a, S. 6).

Durch das Zusammenfließen von Oder und Warthe dominiert im Gesamteinzugsgebiet der Anteil des Flachlandes, da die Warthe und die Netze (Notec) eine ausgedehnte Flachlandzone Polens durchfließen. Der Anteil an Berg- und Hügelland im Einzugsgebiet ist deutlich geringer und beschränkt sich im Wesentlichen auf den Bereich der Sudeten.

2.1.2 Hydrographische Verhältnisse

Die Oder hat eine Länge von 854 km und ein Einzugsgebiet von 118.861 km², welches sich mit 106.057 km² (89 %) in der Republik Polen, mit 7.217 km² (6 %) in der Tschechischen Republik und mit 5.587 km² (5 %) in der Bundesrepublik Deutschland befindet (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998b, S. 8). Damit gehört die Oder zu den vier größten Zuflüssen der Ostsee. Die südliche Einzugsgebietsgrenze wird durch die langgestreckte Mittelgebirgskette der westlichen Beskiden der Karpaten bis zu den Sudeten gebildet. Das durchschnittliche Gefälle der Oder beträgt etwa 0,7 ‰, im Unterlauf unterhalb von Küstrin etwa 0,01 ‰ bei einer mittleren Breite von 200 m (LOZÁN & KAUSCH, 1996, S. 60), womit die Oder ein typischer Flachlandfluss ist. Sie unterliegt einem ständigen Wechsel zwischen langsamem Dahinströmen in breiten Urstromtälern mit sehr geringem Gefälle und flachen Ufern sowie einem schnellen Fließen bei größerem Gefälle in engen und teilweise steilufrigen Durchbruchstätern. Diese Durchbruchstäler haben sich in den

Moränenzügen und Grundmoränenplatten gebildet, die die Urstromtäler durchziehen (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998a, S. 9).

Die Oder durchfließt unter anderem das Becken von Ostrava (Ostrau), das Slasker (schlesische) Tiefland und tangiert den Oderbruch. Sie entwässert nahe der deutsch-polnischen Grenze in das Oderhaff und anschließend über die drei Mündungsarme Peene, Swina (Swine) und Dziwna (Dievenow) in die Ostsee.

Die mittlere Jahresabflussmenge beträgt etwa 17 km³ am Pegel Hohensaaten-Finow, womit die Oder den sechstgrößten Süßwasserzufluss zur Ostsee bildet (LOZÁN & KAUSCH, 1996, S. 59). Etwa 70 % des Oderzuflusses entwässern über die Swina und jeweils etwa 15 % über den Peenestrom und Dziwna (MOHRHOLZ & LASS, 1998).

Das Odereinzugsgebiet liegt im Übergangsbereich zwischen gemäßigt-kontinentalem und kontinentalem Klima des östlichen Europas. Die jährlichen Niederschlagsmengen betragen etwa 500 – 600 mm, wobei im Bereich des Unterlaufs geringere Niederschlagsmengen (< 500 mm) vorherrschen (LOZÁN & KAUSCH, 1996, S. 59). Die höchsten Jahresniederschlagssummen werden in den südlichen Kammlagen mit 1.000 bis 1.400 mm erreicht. In Richtung Unterlauf sind die geringsten Niederschlagsmengen mit bis zu 434 mm (bei Manschnow im Oderbruch) zu verzeichnen (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998a, S. 9).

Aus dem Osten heranströmende kalte Festlandsluft führt zu häufigeren und längeren Vereisungsperioden der Oder als bei westlicher gelegenen Flüssen. Am Pegel Hohensaaten wurden in den Jahregängen 1900/01 bis 1990/91 durchschnittlich 44 Tage mit Eiserscheinungen, davon 30 Tage mit Eisstand, registriert (LUA 1994; aus: LOZÁN & KAUSCH, 1996, S. 59).

Durch die meteorologische Situation bedingt führt die Oder jährlich zwei Hochwasser ab. Ein Winter- bzw. Frühjahrshochwasser entsteht durch Schneeschmelze oder Eisstand und ein Sommerhochwasser durch ergiebigere Niederschläge im oberen und mittleren Einzugsgebiet. Starke Regenfälle in der Sommerperiode führen in der Regel zu kurzen, steilen Hochwasserwellen (LOZÁN & KAUSCH, 1996, S. 60).

2.1.3 Bevölkerung und anthropogene Nutzung im Einzugsgebiet

Im gesamten Odereinzugsgebiet (bis Krajnik Dolny/Schwedt) leben etwa 15,5 Mio. Einwohner.

In der Republik Polen (Rzeczpospolita Polska) leben auf einer Fläche von 312.678 km² 38.667.000 Einwohner (Dezember 1998). Daraus ergibt sich eine Bevölkerungsdichte von 123 Einwohner pro Quadratkilometer (www.auswaertiges-amt.de/www/de/laenderinfos/laender/laender_ausgabe_html).

Besonders in den letzten Flusskilometern münden einige kleinere Flüsse in die Oder. In diese Flüsse werden diverse kommunale Abwässer nach unterschiedlicher Aufbereitung eingeleitet. In Stettin, der größten Stadt dieser Region, werden zudem kaum behandelte Abwässer in die Oder geleitet, da Stettin über keine effiziente Kläranlage verfügt. Stettin leitet etwa 169.308 Mio. m³ Abwasser pro Jahr in die Oder (CHOJNACKI 1999, S. 257). In diesen Abwässern sind jährlich ca. 950 t Gesamtposphor und 4.150 t Gesamtstickstoff enthalten (CHOJNACKI 1999, S. 258). Damit trägt Stettin entscheidend zur Wasserqualität und dem Belastungsgrad der Oder bei. Hinzu kommt die Belastung durch industrielle Einleitungen, wie beispielsweise durch die Chemiewerke in Police, durch die Werften und Hafenanlagen sowie durch agrarwirtschaftliche Einträge, wie zum Beispiel Düngemittel, in die Oder.

2.1.4 Wassermengen und Schwebstofftransport

Das Abflussregime der Oder ist durch eine hohe Wasserführung im Frühjahr bei Schneeschmelze und durch relativ geringere Abflüsse im Sommer, abgesehen vom Sommerhochwasser, gekennzeichnet.

In der Sommerperiode auftretende starke Niederschlagsereignisse führen häufig zu kurzen steilen Hochwasserwellen. Aus diesen klimatischen Gegebenheiten resultieren die deutlichen Schwankungen im Abflussgeschehen der Oder. An dem für den Unterlauf repräsentativen Pegel Hohensaaten-Finow wurden beispielsweise Minimalwasserstände von 84 cm und Maximalwasserstände von 778 cm sowie Minimalabflüsse von 111 m³/s und Maximalabflüsse von 3.480 m³/s beobachtet. Im mehrjährigen Mittel liegen diese Werte bei einem mittleren Wasserstand von 308 cm (Jahresreihe 1987/96) und einem mittleren Abfluss von 522 m³/s (Jahresreihe 1941/96 ohne 1945) (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998a, S. 9).

Als Schwebstoffe bezeichnet man im Wasser befindliche feinste nicht gelöste Stoffe bzw. Partikel, welche aufgrund ihrer ähnlichen Dichte im Wasser suspendiert sind und kaum oder gar nicht sedimentieren (<http://lexikon.wasser.de>). Schwebstoffe setzen sich aus festen und gelförmigen anorganischen und organischen Komponenten zusammen. Die festen Partikel werden als Einzelkörner oder als Flocken im Verbund miteinander im Wasserkörper bewegt.

Untersuchungen haben Schwebstoffkonzentrationen im Bereich der Oder bei Schwedt von durchschnittlich 17 mg TS/l ergeben (TS = Trockensubstanz) (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998b, S. 28). In Abschätzungen darüber, welche Mengen von der Oder in das Oderhaff eingetragen werden, wird der Wert 25 mg/l bzw. 425.000 t/a SPM (SPM – suspended particular material) angegeben (LEIPE et al., 1998, S. 8).

Die Zusammensetzung der Schwebstoffe und der Sedimente der Oder in Bezug auf einige Haupt- und Spurenelemente ist in Tabelle 2.1.4 - 1 aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und vergleichend dargestellt.

	Leipe et al. 1998	Landesumweltamt Brandenburg 1998		Bundesanstalt für Gewässerkunde
	Schwebstoff	Schwebstoff	Sediment	Sediment (< 63 µm)
%				
SiO ₂	41,3	39,6	44,4	-
Al ₂ O ₃	8,5	7,46	9,26	-
Fe ₂ O ₃	6,8	7,16	7,2	-
MnO	1,1	1,18	0,56	-
MgO	0,8	0,77	0,88	-
CaO	3,2	3,13	2,84	-
P-gesamt mg/l (gelöst+partikulär)	0,47	-	-	-
N-gesamt mg/l (gelöst+partikulär)	2,94	-	-	-
S	0,4	-	-	-
mg/kg				
Cd	9	10	10	5,1
Co	-	35	36	-
Cr	-	188	232	62,9
Cu	120	172	196	125
Hg	2,5	5	-	-
Ni	-	77	78	43,2
Pb	200	260	227	182
Zn	1.700	1.800	1.770	2229

Tab. 2.1.4 - 1: Zusammensetzung der Odersedimente und -schwebstoffe (Daten aus verschiedenen Quellen zusammengetragen).

Damit transportiert die Oder nach LEIPE ET AL., 1998 pro Jahr etwa 85 t Pb, 700 t Zn, 50 t Cu, 65.025 t TOC, 1.700 t S, 50.000 t N-gesamt und 8.000 t P-gesamt in das Haff. In HELCOM, 1999 werden etwas abweichende Daten für die jährliche Oderfracht gegeben. Hier werden von 4.922 t P, 76.973 t N, 387,62 t Zn, 66,19 t Cu, 55,12 t Pb und 53,49 t Ni angegeben.

Diese Angaben werden im Folgenden noch mit Blick auf die regelmäßigen Baggerungen im Haff von Interesse sein.

2.2 Das Oderhaff

2.2.1. Entstehung und morphologische Entwicklung

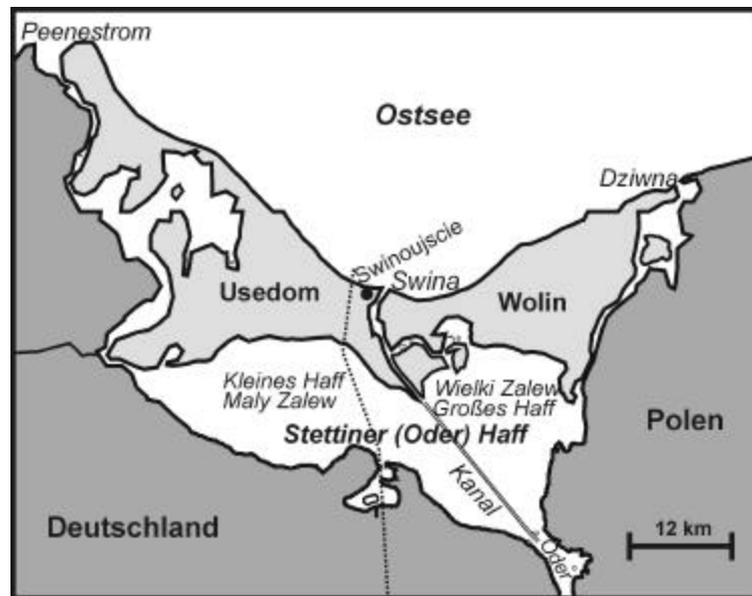


Abb. 2.2.1 - 1: Das Oderhaff an der deutsch-polnischen Grenze

Das Oderhaff (auch Stettiner Haff; polnisch: Zalew Szczecinski) liegt in Mitteleuropa im Grenzgebiet zwischen Deutschland und Polen (siehe Abb. 2.2.1 – 1). Dieses Gebiet an der südlichen Ostsee befindet sich in einem Senkungsgebiet der nacheiszeitlichen Isostasie-Bewegung. Der gesamte Raum der südlichen Ostsee war im Pleistozän (2,3 Mio. bis 10 000 Jahre vor heute) Akkumulationsgebiet, in dem das Inlandeis mächtige Glazialschuttdecken in Form von Grund- und Endmoränen oder sandigen Eisstausee-Sedimenten ablagerte. Die Landoberfläche wird hier daher im Allgemeinen von Gletscherfracht aus Skandinavien gebildet. Nur an wenigen Orten treten ältere Gesteine an die Oberfläche, wie zum Beispiel bei den Kreidekliffs von Rügen und Mön (RHEINHEIMER (Hrsg.), 1996, S. 11).

Die Küsten in diesem Gebiet zählen zu den Boddenküsten. Bodden sind flache, breite Gletscherzungenbecken oder tief liegende Grundmoränen, die vom Meer bis an die angrenzenden Hochlagen im Zuge der nacheiszeitlichen Transgression überflutet wurden. Mit Verlangsamung der Transgression vor ca. 6000 Jahren begann die Bildung von Haken und Nehrungen, wodurch die Inseln teilweise miteinander verbunden und die überfluteten Becken weitgehend vom Meer abgeriegelt wurden. Es entstand eine so genannte Doppelküste (FIETZ, 1996, S. 10).

In einem derartigen Gebiet mündet der Fluss Oder in die Ostsee. Zwischen den hier teilweise abgetragenen Moränenzügen haben sich im Mündungsbereich der Oder die Nehrungsinseln Usedom im Westen und Wolin im Osten gebildet, die das Oderhaff von der offenen Ostsee trennen.

Nur über die drei Mündungsarme Peenestrom, Swina und Dziwna ist das Haff mit dieser verbunden.

2.2.2 Hydromorphologische Verhältnisse

Das Oderhaff hat eine Fläche von 687 m² und eine mittlere Tiefe von 3,8 m. Es ist ein typisches lagunäres Ästuar der südlichen Ostseeküste, das gezeitenfrei und polymiktisch ist (LAMPE, 1999, S. 46). Die theoretische Aufenthaltszeit des Wassers im Oderhaff beträgt im Großen Haff 0,5 Monate bzw. 3 Monate im Kleinen Haff (LEIPE et al., 1998, S. 9).

Nach Artikel 2 der Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, WRRL) ist das Oderhaff als „Übergangsgewässer“ zu bezeichnen. Übergangsgewässer sind hiernach „die Oberflächenwasserkörper in der Nähe von Flussmündungen, die aufgrund ihrer Nähe zu den Küstengewässern einen gewissen Salzgehalt aufweisen, aber im wesentlichen von Süßwasserströmungen beeinflusst werden;“ (WRRL, Artikel 2, 6).

2.2.3. Sedimentbeschaffenheit

Horizontale Sedimentstruktur

Abhängig von den hydrographischen und morphologischen Gegebenheiten im Haff, bestehen die Oberflächensedimente aus feinkörnigen Schlickern (Schluffen) in den tieferen Beckenbereichen und Sanden bzw. sandigen Schlickern in flacheren Rand- und Schwellenbereichen. Die Sedimente des Oderhaffs sind durch einen hohen Anteil an organischer Substanz gekennzeichnet, besonders in den feinkörnigen Schlickern (im Mittel 28,49 % Glühverlust; LEIPE et al., 1998, S. 22). Dieser Anteil an biogen-organogenen Bestandteilen verursacht unter anderem die Ausprägung reduzierender Milieuverhältnisse im Sediment.

Insgesamt weisen die Sedimente des Oderhaffs eine relativ homogene Zusammensetzung in der Feinfraktion auf. Als Ursache hierfür werden die Materiallagerungen durch windinduzierte Turbulenzen in dem flachen Gewässer und Bioturbation durch das Makrozoobenthos genannt (LEIPE et al., 1998, S. 22).

Die Zusammensetzung der etwas gröberen Schlicke am Südwestrand des Großen Haffs deuten auf den vermehrten Eintrag von Material aus der Oder hin. Hier wird ein höherer Anteil an gröberen festländischen organischen Substanzen vermutet. Zudem finden sich hier auch die höchsten C/N-Verhältnisse, was ebenfalls auf den Einfluss von terrigenem Material hindeutet (LEIPE et al., 1998, S. 23f).

Vertikale Sedimentstruktur

Auffällig in der vertikalen Sedimentstruktur der Oderhaffsedimente ist eine 10 – 15 cm mächtige Schicht an der Sedimentoberfläche, die eine hohe Homogenität in Bezug auf die meisten geochemischen und sedimentologischen Parameter aufweist. Dieser Durchmischungshorizont ist unterhalb der Redox-Sprungschicht als schwarz-grauer anoxischer Schlack ausgebildet. Über ihm befindet sich eine 1-3 cm mächtige Flockenschicht, die meist oxisch bis suboxisch ist und eine gelblich-graue Farbe hat (fluffy layer).

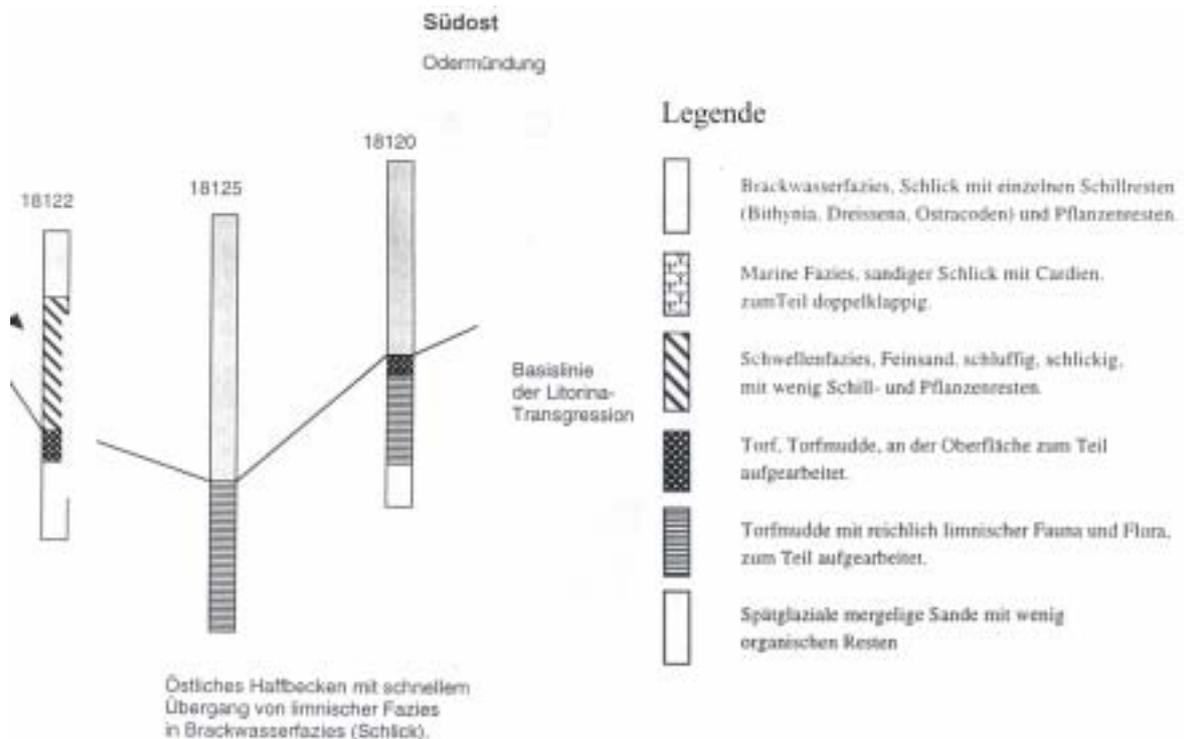


Abb. 2.2.3 - 1: Sedimentprofil modifiziert nach LEIPE et al., 1998, S. 41f.

Auf den Durchmischungshorizont folgt ein Carbonathorizont (hauptsächlich Ostracoden), der eine Art „Hartgrund“ bildet. Hierauf folgt ein Bereich mit tief schwarzem Schlack. Dieser Bereich ist konstant anoxisch.

Unter dieser Schicht liegt grauoliv-farbener Schlack, der als Fermentationshorizont bezeichnet wird (Methanbildung). Dieser Horizont stellt mit seinen geochemischen Werten den vorindustriellen natürlichen Hintergrund dar. Etwa in dieser Tiefe befindet sich die Basis der Litorina-Transgression.

Auf diese schlackige Brackwasserfazies folgt im Großen Haff stellenweise eine Schicht, die sich aus Torf oder Torfmulde zusammensetzt, gefolgt von einer Torfmulde-Schicht, die reich an zum Teil aufgearbeiteter limnischer Fauna und Flora ist. Diese Schicht zeigt die ehemalige Landoberfläche des Haffs.

Unterhalb dieser Schicht befinden sich spätglaziale mergelige Sande mit wenig organischen Resten (LEIPE et al., 1998, S. 41f).

2.2.4. Ökologischer Zustand des Oderhaffs unter Einbeziehung der Wasserrahmenrichtlinie

In das Haff münden neben einigen kleineren Zuflüssen die Flüsse Peene, Zarow, Uecker und Oder (von Westen nach Osten). Das Einzugsgebiet der Oder macht etwa 91,5 % des gesamten Haffeinzugsgebietes aus. Ungefähr 97 % des Haffzuflusses geschehen über die Oder (CHOJNACKI 1999, S. 259). Aus diesem Grund spielt die Oder mit ihrer Nähr- und Schadstofffracht eine entscheidende Rolle für die Wasserqualität des Oderhaffs. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, ist das Wasser der Oder durch verschiedenen anthropogene Einflüsse belastet. Mit den eingeleiteten kommunalen Abwässern werden Fäkalien, Schadstoffe und Nährstoffe in die Oder geleitet. Besonders die größte Stadt der Region, Stettin, trägt mit ihren Abwassereinleitungen zur Verschlechterung der Wasserqualität bei. Diese großen Nährstofffrachten, die mit der Oder in das Haff gelangen, führen zu intensiver Primärproduktion und Phytoplanktonblüten. Im Zusammenhang mit den im Haff vorliegenden morphologischen und hydrologischen Bedingungen führt dies zur Eutrophierung des Gewässers. Das Oderhaff wird im Gewässergütebericht des Landes Mecklenburg-Vorpommern als stark eutroph bis polytroph eingestuft (LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE, 2001, S. 71).

Die Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für die Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik) trat im Jahr 2000 in Kraft und soll anstelle diverser älterer Gewässerschutzrichtlinien zu einer einheitlicheren Gewässerschutzpolitik für die Binnenoberflächengewässer, die Übergangsgewässer, die Küstengewässer und das Grundwasser in Europa führen.

In Anhang V der Wasserrahmenrichtlinie werden unter anderem die von der Europäischen Gemeinschaft zur Einstufung des ökologischen Zustandes von Übergangsgewässern vorgesehenen Qualitätskomponenten genannt. Hierzu zählen verschiedene biologische, hydromorphologische, chemische und physikalisch-chemische Komponenten sowie einige allgemeine Anforderungen und der Gehalt an spezifischen Schadstoffen:

Qualitätskomponenten für die Einstufung des ökologischen Zustands von Übergangsgewässern nach WRRL:

? Biologische Komponenten

- Zusammensetzung, Abundanz und Biomasse des Phytoplanktons,
- Zusammensetzung und Abundanz der sonstigen Gewässerflora,
- Zusammensetzung und Abundanz der benthischen wirbellosen Fauna,
- Zusammensetzung und Abundanz der Fischfauna;

? Hydromorphologische Komponenten in Unterstützung der biologischen Komponenten

- Morphologische Bedingungen

- Tiefenvariation,
 - Menge, Struktur und Substrat des Gewässerbodens,
 - Struktur der Gezeitenzone;

Tidenregime
Süßwasserzustrom,
Wellenbelastung;

? Chemische und physikalisch-chemische Komponenten in Unterstützung der biologischen Komponenten

Allgemein
Sichttiefe,
Temperaturverhältnisse,
Sauerstoffhaushalt,
Salzgehalt,
Nährstoffverhältnisse;

Spezifische Schadstoffe
Verschmutzung durch alle prioritären Stoffe, bei denen festgestellt wurde, dass sie in den Wasserkörper eingeleitet werden,
Verschmutzung durch sonstige Stoffe, bei denen festgestellt wurde, dass sie in signifikanten Mengen in den Wasserkörper eingeleitet werden.

Im folgenden dieser Arbeit werden hauptsächlich die chemischen und physikalisch-chemischen Komponenten, insbesondere die Nährstoffe und Schwermetalle und deren Konzentrationen im Oderhaff und speziell im Schifffahrtskanal betrachtet.

2.3 Der Schifffahrtskanal im Oderhaff

2.3.1 Bau des Schifffahrtskanals

Anthropogene Eingriffe im Bereich der Oder wurden schon sehr früh durchgeführt. Bereits im 18. und 19. Jahrhundert wurde das Flussbett der Oder zur Landgewinnung und zum Schutz vor Hochwasserschäden verändert. Im Zeitraum von 1740 bis 1896 wurde der Flusslauf durch Begradigungen (Durchstiche) insgesamt um 187 km verkürzt. Es wurden immer wieder Hochwasserschutzdeiche im Rahmen der Flussbegradigungen errichtet, die jedoch schwereren Hochwasserereignissen nicht standhalten konnten. Das natürliche Überschwemmungsgebiet der Oder hatte ein ursprüngliche Fläche von etwa 3.709 km². Durch die Eindeichungen wurde das Überschwemmungsgebiet bis 1896 auf 859,4 km² reduziert. In den Jahren 1907 bis 1932 wurden weitere Eindeichungen, Begradigungen und Wasserstraßenverbindungen vorgenommen (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998a, S. 8).

Für die Stadt Stettin spielte die Schifffahrt von jeher eine bedeutende Rolle. Aus diesem Grund wurden auch hier schon sehr früh bauliche Maßnahmen zur Erleichterung der Schifffahrt durchgeführt. Der erste Schifffahrtsweg von Stettin in die Ostsee führte durch den Peenestrom. Man entschied sich aber bald für die Schifffahrtsroute durch die Swina-Mündung. Die Planung begann schon 1730 und ab 1739 benutzten viele Schiffe diesen Weg in die Ostsee. 1877 wurde der

so genannte Kaseburger Durchstich erstellt, der in der Karte aus BRANDT, 1896 deutlich zu erkennen ist (durch roten Pfeil in Abbildung 2.3.1 - 1 markiert).



Abb. 2.3.1 - 1: Historische Karte modifiziert nach BRANDT, 1896, S. 110.

Hierbei handelt es sich um einen künstlich angelegten Wasserweg, der in den Jahren 1874 bis 1880 ausgebaut wurde. Diese so genannte Kaiserfahrt (heute: Piastowski Kanal) reichte von Swinemünde in das Oderhaff bis nach Stettin. Zunächst dominierte dennoch die alte Swine, also der alte Hauptmündungsarm der Oder, in Bezug auf den Wasseraustausch zwischen Haff und Meer. Die alte Stromrinne war zu dieser Zeit etwa 5,9 bis 9 m tief (Brandt, 1896, S. 110) und setzte sich see- und haffwärts noch etwas fort.

2.3.2 Vertiefungen und Erneuerungen

Der Schifffahrtskanal reicht von Swinoujscie an der Swinamündung bis Stettin, etwa 70 km flussaufwärts (Abb. 2.3.2 - 1). Er hat seit 1984 eine mittlere Tiefe von 10,5 m und eine durchschnittliche Breite von 90 m (in Biegungen etwa 130 m). Baggergutdaten vom *Maritime Office of Szczecin* (MOS) zeigen, dass von 1949 bis 2000 im Durchschnitt jährlich 1.490.312,7 m³ Baggergut (Nassmaterial) aus den Bereichen des nördlichen Schifffahrtskanals, des Kanals im Bereich des Swinoujscier Hafens und aus dem Kanalstück von Swinoujscie nach Stettin entnommen wurden, um die Tiefe halten zu können und ein Zusedimentieren zu verhindern. Dieses

Material wird im Wesentlichen an Land auf Deponien und Spülfeldern verbracht und somit dem System Oderhaff entzogen.



Abb. 2.3.2 - 1: Der Schifffahrtsweg von Swinoujscie bis Stettin (aus: www.polfracht.pl).

Für Polens Wirtschaft ist der Seetransportsektor von großer Bedeutung. Die Tiefe des Kanals ist ein begrenzender Faktor für diesen, aber auch für die Schiffbauindustrie. Aus diesem Grund soll der Kanal weiter ausgebaut und gefördert werden, damit er auf dem internationalen Markt konkurrenzfähig bleibt. Von Bedeutung ist hier die günstige geographische Lage Stettins. Von Berlin aus ist Stettin der nächstgelegene Seehafen, mit einer Entfernung von etwa 140 km. Der nächstgelegene deutsche Seehafen, Rostock, liegt etwa 240 km von Berlin entfernt. Dies macht den Stettiner Hafen, besonders in Hinblick auf den EU-Beitritt Polens, für viele Transportunternehmen und Investoren interessant (WELTBANK, 2000). Die Weltbank unterstützt mehrere Projekte in Polen, die dem Ausbau und der Erweiterung verschiedener Häfen und Kanäle dienen. Für die Förderung des Hafens Swinoujscie-Szczecin erhält die Republik Polen von der Weltbank ein Darlehen über 27,5 Mio. US\$ (29,3 Mio. Euro) und die *Szczecin-Swinoujscie Seaport Authority (SSSA)* erhält 11,0 Mio. US\$ (11,7 Mio. Euro). Verantwortlich für die Verwendung des Geldes und die Projekte sind das MOS sowie die SSSA. Die Förderung des Projekts läuft über 4 Jahre (2001 bis 2005). Insgesamt werden mit Kosten von 81,8 US\$ für die vier Teilbereiche des Projektes gerechnet:

- ? Teilprojekt 1 (54,8 Mio. US\$): Ausbau und Verbesserung der Uferbefestigung im Piastowski Kanal, Ausbau und Verbesserung der Wellenbrecher besonders im Mündungsbereich, Anlage und Ausbau von Spülfeldern zur Baggergutverbringung.
- ? Teilprojekt 2 (0,6 Mio. US\$; finanziert durch das MOS): Technische Unterstützung und Training für das MOS bei Verwendung von neueren umweltfreundlichen Baggermethoden zur

Trennung von potentiell belastetem Material und im Allgemeinen unbelastetem sandigem Material.

- ? Teilprojekt 3 (14,6 Mio. US\$): Anlage von neuen und Ausbau von bestehenden Liege- und Ankerplätzen im Bereich Katowice Peninsula zur Vermietung an private Unternehmen und Firmen im Bereich des Frachttransportes (410 m für Seeschifffahrt, 80 m für Binnenschifffahrt), Uferbefestigungen auf 580 Metern, die nicht als Liegeplätze vorgesehen sind, Ausbau der Infrastruktur an Land.
- ? Teilprojekt 4 (11,8 Mio. US\$): Bau von 232 m Liegeplätzen an Grabowski Island (westlicher Teil), Bau von Roll-on/Roll-off-Flächen, Verbesserung der Uferbefestigung, Ausbaggerung von 400.000 m³, Anlage von Zufahrtsstraßen und Abwasserkanälen (WELTBANK, 2000).

Der Schifffahrtskanal soll im Zuge dieser Modernisierungsmaßnahmen von derzeit 10,5 m auf zunächst ca. 12,5 m und im Laufe der folgenden auf etwa 14,5 m vertieft werden (schriftliche Mitteilung A. Borowiec, MOS). Eine Vertiefung des Kanals in einem Schritt von 10,5 m auf 14,5 m ist aus technischen Gründen nicht möglich. Strömungsverhältnisse und Fließgeschwindigkeiten verhindern dies. Darum wird der Kanal schrittweise vertieft und im Vorfeld sowie während der Arbeiten immer wieder mit Uferbefestigungen stabilisiert. Hierbei wird zudem eine Verbreiterung des Kanals auf zunächst 120 m und schließlich 140 m angestrebt, um unter anderem das Unfallrisiko für den Schiffsverkehr herabzusetzen.

Im Vorfeld der eigentlichen Kanalvertiefung muss die derzeitige Uferbefestigung des Piastowski Kanals abgebaut werden. Diese Arbeiten werden voraussichtlich nicht vor 2006 beendet werden (schriftliche Mitteilung A. Borowiec, MOS). Erst anschließend kann mit der eigentlichen Vertiefung und Verbreiterung begonnen werden. Es besteht außerdem eine Abhängigkeit von den finanziellen Ressourcen, da noch nicht in jedem Fall geklärt ist, woher die Gelder stammen werden. Das MOS geht davon aus, dass die Vertiefung auf 12,5 m bis 2010 abgeschlossen ist.

Für die anschließende Zeit ist die weitere Vertiefung auf 14,5 m und Verbreiterung auf 140 m mit entsprechendem Ab- und Umbau der Uferbefestigung sowie der Hafenmodernisierungen von Police geplant. Hierfür rechnet das MOS mit der Beendigung der Arbeiten bis 2050 (schriftliche Mitteilung A. Borowiec, MOS).

Diese tief greifenden Baumaßnahmen werden Veränderungen im Oderhaff zur Folge haben. Der tiefere und breitere Kanal wird die Strömungsverhältnisse, -geschwindigkeiten und das Sedimentationsverhalten beeinflussen und somit Einfluss auf das gesamte Ökosystem nehmen.

3. Material und Methoden

3.1 Datenerhebung

Die zu untersuchende Thematik wird mittels Daten- und Literaturlauswertungen behandelt. Eigene Untersuchungen an Sedimentproben aus dem Schifffahrtskanal des Oderhaffs haben stattgefunden und werden in dieser Arbeit vorgestellt und im Kontext zu bereits bestehenden Untersuchungen und Datengrundlagen betrachtet und ausgewertet.

Literaturrecherchen wurden an den Universitätsbibliotheken in Kiel, Rostock und Greifswald, sowie in den Bibliotheken des Institutes für Ostseeforschung in Warnemünde und des Institutes für Meereskunde in Kiel durchgeführt. Des weiteren fanden Recherchen im Internet statt, die regelmäßig wiederholt wurden, um möglichst aktuelle Literatur und Daten zur Verfügung zu haben.

Zudem wurden Informationen vom Landesumweltamt Brandenburg (Dr. Frank Sonnenburg) und vom Amt für Raumordnung und Landesplanung Vorpommern (Waldemar Okon) zur Verfügung gestellt. Es fand außerdem am 29.08.2002 ein Expertengespräch mit Frau Dr. Annette Ernst vom Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund zum Thema „Ausbau und Vertiefung von Schifffahrtswegen und Umgang mit anfallendem Baggergut“ statt.

3.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte im Oktober 2001 durch Doc. dr hab. Norbert Wolnomiejski, Sea Fisheries Institute, Research Station in Swinoujście, Poland.

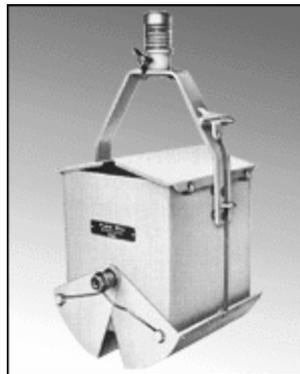


Abb. 3.2 - 1: Beispiel eines Kastengreifers des Typs Ekman-Birge (Quelle: <http://www.bioclear.com.my/aanderaa.html>)

Die Proben wurden mittels eines 7,5 kg schweren Kastengreifers des Typs Ekman-Birge genommen, wie er in Abbildung 3.2 - 1 beispielhaft zu sehen ist. Der Inhalt des Greifers wurde an Bord auf ein Sieb abgeladen. Als Probenmaterial wurden etwa die oberen 5 cm des Sedimentes entnommen und in Plastiktüten abgefüllt. Diese wurden anschließend bei -20°C tiefgefroren.

Die Probenahme erfolgte entlang des Schifffahrtskanals des Oderhaffs. Die genaue Lage der Probenahmepunkte sind in Abbildung 3.2 - 2 und Tabelle 3.2 - 1 dargestellt. Im nördlichen Teil des Schifffahrtskanals zwischen den Inseln Usedom und Wolin (Piastowski Kanal) war aufgrund der Substratbeschaffenheit keine Probenahme möglich. Der Grund des Kanals besteht dort aus festem, kompaktem Sand, wodurch der Greifer nicht in den Untergrund eindringen konnte.

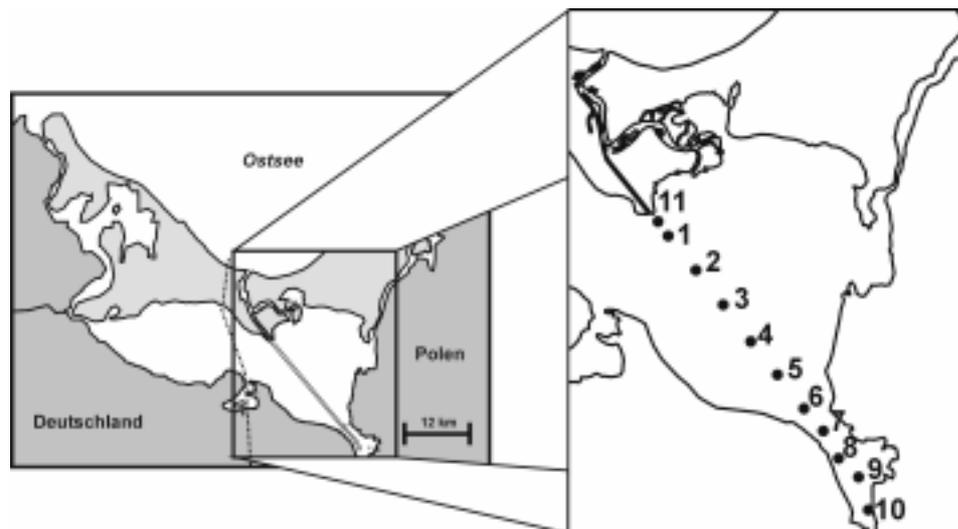


Abb. 3.2 - 2: Probenpunkte im Schifffahrtskanal des Großen Haffs.

Probennummer	Koordinaten	Tiefe
1	53°47',73 N - 14°21',37 E	11,2 m
2	53°46',33 N - 14°23',30 E	10,4 m
3	53°44',90 N - 14°25',17 E	11,1 m
4	53°43',41 N - 14°27',11 E	10,1 m
5	53°42',05 N - 14°28',95 E	10,4 m
6	53°40',67 N - 14°30',80 E	11,0 m
7	53°39',73 N - 14°32',15 E	10,5 m
8	53°38',59 N - 14°33',19 E	10,8 m
9	53°37',84 N - 14°34',56 E	10,2 m
10	53°36',50 N - 14°35',24 E	10,7 m
11	53°48',29 N - 14°20',65 E	11,0 m

Tab. 3.2 - 1: Verzeichnis der Koordinaten und Tiefen der jeweiligen Probenpunkte.

3.3 Physikalische Eigenschaften

Alle Proben wurden bis zur weiteren Bearbeitung bei -20°C gelagert. Anschließend erfolgte die Gefriertrocknung und je nach Anforderung der Weiterbearbeitung eine Homogenisierung des Materials.

3.3.1 Wassergehalt und Trockenraumdichte

Von allen Proben wurde der Wassergehalt und die Trockenraumdichte (Dry Bulk Density, DBD) bestimmt. Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte durch Subtraktion des jeweiligen Probengewichts vor und nach der Gefriertrocknung. Die Differenz gibt den Wassergehalt an.

Zur Bestimmung der Trockenraumdichte wurden die Proben nach der Gefriertrocknung gewogen und das Volumen der Petrischalen ermittelt. Die Trockenraumdichte errechnet sich aus dem Quotienten von Gewicht und Volumen und wird in g/cm^3 angegeben.

3.3.2 Glühverlust

Die Messung des Glühverlustes erfolgte durch Erhitzen der Proben auf 550°C . 1,5 g Probenmaterial (bei sandigen Proben 3,0 g) wurden in Keramikbehälter eingewogen und 3 Stunden im Veraschungs-ofen (auch Muffelofen genannt) auf 550°C erhitzt. Anschließend wurden die Proben erneut gewogen. Die Differenz zwischen erster und zweiter Einwaage stellt den Glühverlust dar. Dieser gibt den ungefähren Gehalt an organischem Material an.

3.3.3 Korngrößenanalyse

Die Bestimmung der Korngrößen erfolgte an einem Lasergerät des Typs Galai CIS – 50 (WCIS – 50 Particle size analyser). Die Messung der Korngrößen wird hierbei durch eine foto-optische Zählung durchgeführt.

Verwendet wurde jeweils ein halbes Gramm Probenmaterial, das in einem Becherglas mit 30-40 ml demineralisiertem Wasser versetzt wurde. Hinzugegeben wurden 10 ml Wasserstoffperoxid (H_2O_2 , 35% technisch), um das organische Material aus der Probe herauszuoxidieren. Anschließend kamen die Proben für 10-15 Minuten in ein Ultraschallbad, um das Probenmaterial in Dispersion zu bringen. Danach wurden 1-3 ml gesättigte Calgon-Lösung dazugegeben, die Proben wurden geschüttelt und über Nacht stehen gelassen.

Eine weitere Messreihe erfolgte ohne vorherige Zugabe von Wasserstoffperoxid und Calgon-Lösung, um die Partikelgrößen-Verteilung einschließlich organischem Material zu erfassen.

3.4 Geochemie

3.4.1 Kohlenstoff- und Schwefelbestimmung

Die Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehaltes (Total carbon - TC oder C_{ges}), des Gehaltes an anorganischem Kohlenstoff (Total inorganic carbon – TIC) und des Schwefelgehaltes (S) erfolgte am multi EA 2000 CS der Firma Analytik Jena AG.

Der multi EA 2000 CS ist ein System zur Simultan- und Einzelbestimmung des Kohlenstoffs und des Schwefels. Dies erfolgt bei trockenen Proben durch Oxidation im Sauerstoffstrom. Eingesetzt wird eine Hochtemperatur-Keramiktechnologie (HTC-Technologie).

Die Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffs (TIC) erfolgt im TIC-Feststoffmodul und misst den anorganisch gebundenen Kohlenstoff. 50-100 mg des Probenmaterials werden in einen Erlenmeyerkolben eingewogen. Unter Rühren mit einem Magnetrührwerk mit beheizter Arbeitsplatte werden anschließend dreimal 2 ml 40-50 %ige Phosphorsäure hinzu gegeben, um die im Probenmaterial vorhandenen Carbonate bzw. Hydrogencarbonate zu zersetzen. Unter weiterem Rühren und Ausblasen in einem konstanten Sauerstofffluss wird das entstehende CO_2 ausgetrieben. Durch einen Glaszylinder mit Trockenmittel zum Trocknen und Filtern des Messgases wird das CO_2 dem Detektor zugeführt und gemessen.

Die Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs (TC) und des Gesamtschwefels (TS) erfolgt über die Zuführung des Probenmaterials in die heiße Zone des Ofens. Die Pyrolyse und die Oxidation der Probe findet im Sauerstoffstrom bei entsprechender Temperatur statt. Der Sauerstoff ist zugleich Oxidationsmittel und Trägergas für die Reaktionsprodukte. Das entstandene Messgas wird über Partikelfilter und die Trocknungseinheit in den Detektor transportiert und gemessen.

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (Total organic carbon – TOC) wird aus der Differenz zwischen TC und TIC berechnet.

3.4.2 Kohlenstoff- und Stickstoffbestimmung

Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte der Proben wurden am EA 1110 Elemental Analyser (CE Instruments) mit der Software Eager 200 gemessen. Hierbei wurde zunächst eine bestimmte Menge Probenmaterials in Aluminiumschiffchen gegeben und fest verschlossen. Anschließend werden sie in den Probenträger des Gerätes gegeben und automatisch nacheinander analysiert.

3.4.3 Totalaufschluss und Atomemissions-Spektrometrie

Die Bestimmung der Metalle und einiger weiterer Elemente erfolgte durch einen Druckbombenaufschluss und eine Analyse im ICP AES (Atomemissions-Spektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma).

Zur Erstellung des Druckbombenaufschlusses werden jeweils 500 mg Probenmaterial in PFA-Becher eingewogen und zweimal mit 5ml 65 %iger Salpetersäure (HNO_3) abgeraucht, um die organischen Substanzen aus dem Material zu entfernen. Nach dem Trocknen der Probe werden 4 ml 40 %ige Flusssäure (HF) und 4ml Königswasser (HNO_3/HCL 1:3) hinzu gegeben. Nach erneuter Trocknung der Proben auf einer Heizplatte werden die PFA-Becher in die Druckaufschlussbombe eingesetzt, verschlossen und acht Stunden bei 180 °C und 35 bar in den Trockenschrank gestellt.

Nach Ablauf der Zeit werden die Druckaufschlussbomben aus dem Trockenschrank entnommen. Das Material in den PFA-Bechern wird mit 1 ml 60 %iger Perchlorsäure (HClO_4) versetzt. Anschließend wird zweimal mit 10 ml 18 %iger Salzsäure (HCl) abgeraucht, um die Fluoride zu entfernen. Der Rückstand wird dann mit 5 ml Salzsäure aufgelöst, in einen 50 ml Messkolben überführt und mit demineralisiertem Wasser auf 50 ml aufgefüllt. Die Flüssigkeit wird in 50 ml PE-Flaschen überführt und ist zur Messung am ICP AES bereit (ARBEITSANLEITUNG MARINE GEOLOGIE, IOW).

Die Analysen wurden am ICP Emission Spectrometer Liberty 200 durchgeführt. Ein Atomemissions-Spektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma besteht aus einem Hochfrequenzgenerator, einem Plasmabrenner (Abb. 3.4.3 – 1), einem hochauflösenden Spektrometer und einem Rechner zur Steuerung der Messanordnung und der Datenausgabe. Als Plasma bezeichnet man ein Gas von sehr hoher Temperatur (5.000 bis 10.000 °C), in dem Atome und Moleküle ionisiert sind. Bei einem induktiv gekoppelten Plasma wird Argon durch eine Kombination von Quarzglasrohren geleitet und vom Durchfluss so reguliert, dass es einen ringförmigen Feuerball bildet. Damit die Glashülle des Brenners nicht schmilzt, wird Stickstoff oder Argon als Kühlgas eingeblasen. Die Probenlösung wird dann mit Hilfe eines Zerstäubers als Aerosol mit dem Argon-Trärgas vermischt und in den Plasmafeuerball eingespritzt. Die Probenlösung wird bei den hohen Temperaturen vollständig atomisiert (ionisiert).

Atome und Ionen emittieren im angeregten Zustand Licht, wobei die Wellenlängen und Lichtintensitäten Rückschlüsse auf die jeweiligen Elemente erlauben.

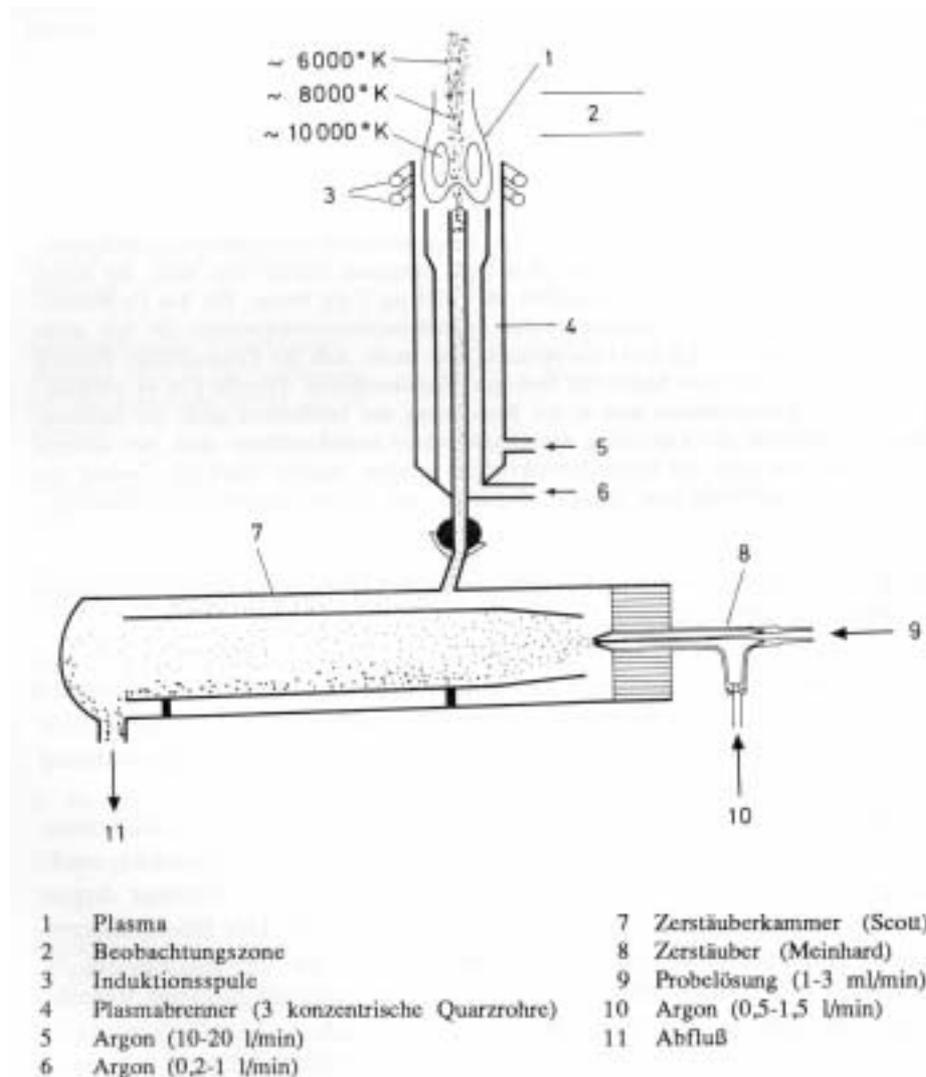


Abb. 3.4.3 - 1: Plasmabrenner mit Zerstäubersystem (aus: HEINRICHS & HERRMANN, 1990, S. 248)

3.5 Mineralogie

3.4.4 Gesamtmineralogie und Tonmineralogie

Zur Untersuchung der Tonmineralogie wurde die Fraktion $<2 \mu\text{m}$ mit Hilfe des Atterbergverfahrens abgetrennt. Hierzu wurden in der Regel 5 g Probenmaterial (bei sandigen Proben 15 bis 20 g) in Bechergläser gefüllt. Anschließend wurde 150 ml 35 %ige Wasserstoffperoxid-Lösung zum Herausoxidieren des organischen Materials hinzu gegeben. Des weiteren wurden 3 ml 96 %ige Essigsäure zum Entcarbonisieren hinzu gefügt. Die Proben wurden mehrere Tage unter einem Lüftungsabzug stehen gelassen und regelmäßig geschüttelt.

Nach möglichst vollständiger Oxidation des organischen Materials und Entcarbonatisierung wurde das Probenmaterial in die Standzylinder der Atterberg-Anlage umgefüllt. Es erfolgte ein Aufschlännen des Materials mit Ammoniakwasser (10 ml 25 %ige Ammoniaklösung auf 100 ml demineralisiertes Wasser). Das Ammoniakwasser fungierte als Dispergierungsmittel. Mit Hilfe des Stokesschen Gesetzes wurde die Silt-Sedimentationsdauer berechnet. Das Stokessche Gesetz besagt, dass sich Teilchen in ruhigen Flüssigkeiten infolge der inneren Reibung und unter Einfluss äußerer Kräfte (Viskosität, Schwerkraft) mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegen (TUCKER, 1996, S. 63f). Nach Ablauf der Silt-Sedimentationsdauer erfolgte das Absaugen der in der Säule verbliebenen Tonsuspension, die in Eimern aufgefangen wurde. Dies wurde so lange wiederholt, bis die überstehende Flüssigkeit in den Standzylindern klar war. Nach vollständiger Tonabtrennung wurden beide Fraktionen ($> 2 \mu\text{m}$ und $< 2 \mu\text{m}$) in vorgewogene Tüten abgefüllt und getrocknet.

Zur Bestimmung der Tonmineralogie wurden Texturpräparate (Vakuumfilterpräparate) aus dem abgetrennten Material $< 2 \mu\text{m}$ angefertigt. 30 mg des Probenmaterials wurden in 50 ml-Becher eingewogen und mit 20 ml deionisiertem Wasser 10 – 15 Minuten in ein Ultraschallbad gestellt und dispergiert. Direkt nach der Ultraschall-Behandlung wurden 10 ml der Suspension mit einer Pipette entnommen und in ein Schraubfiltergerät mit Membranfilter der Porenweite $0,45 \mu\text{m}$ und 25 mm Durchmesser gegeben. Das Wasser wurde mit einer Membran-Vakuumpumpe sofort abgesaugt. Anschließend wurde der Membranfilter vorsichtig dem Schraubfiltergerät entnommen und mit der Filterseite auf eine Keramikplatte gelegt. Das Präparat wurde mit Trägerpapier von Selbstklebeetiketten und einem Glasobjektträger abgedeckt, mit Klammern fixiert und an der Luft getrocknet. Das luftgetrocknete Texturpräparat wurde anschließend mit der Oberseite nach unten auf mit Doppelklebeband versehene, runde Aluminiumträger (Durchmesser 27 mm, ca. 2 mm Stärke) aufgebracht. Der Membranfilter wurde abgezogen, wodurch die Unterseite des Präparates zur Oberseite wurde. Dies ist wichtig, denn nur an der Unterseite ist die statistische Verteilung der Tonminerale zu finden (CLASEN, 1995, S. 6).

Die Aluminiumträger wurden anschließend in den Probenhalter für das Diffraktometer eingespannt und von 2 bis $15^\circ 2 \text{ \AA}$ mit einer Schrittweite von $0,01^\circ$ und einer Sekunde Messzeit pro Schritt gemessen. Im evakuierten Exsikkator wurden die Präparate dann 12 Stunden bei 60°C mit Ethylenglykol bedampft. Das eingelagerte Ethylenglykol weitet den Schichtbasisabstand der quellfähigen Smektite von 14 auf 17 auf, was die Unterscheidung vom Chlorit ermöglicht. Die Präparate wurden dann erneut gemessen.

3.4.5 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energiedispersive Spektrometrie (EDX)

Zur Untersuchung ausgewählter Proben mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden zunächst Texturpräparate (Vakuumfilterpräparate) erstellt. Diese wurden nach ausreichender Trocknung auf Aluminium-Objektträger mit einem Zentimeter Durchmesser aufgebracht. Um

Proben mit dem Rasterelektronenmikroskop bearbeiten zu können, müssen diese trocken und gut leitend sein. Proben, die nicht über ausreichende Leitfähigkeit verfügen, werden mit einer leitenden Schicht überzogen, die jedoch so dünn sein muss, dass sie die Struktur der Probe nicht unkenntlich macht. Aus diesem Grund wurden die Proben nach der Befestigung auf den Objektträger mit einer Gold-Paladium-Legierung bedampft. Dies erfolgte, indem das Metall durch Kathodenzerstäubung gleichmäßig auf die Proben aufgebracht wurde.

Bearbeitet wurden die Proben an einem Rasterelektronenmikroskop des Typs CamScan 44 mit energiedispersiver Röntgenmikroanalytik der Firma EDAX. Ein Elektronenstrahl rastert die Probenoberfläche ab. Das Auftreffen des Primärelektronenstrahls auf die Probe löst das Austreten von Sekundärelektronen, Rückstreuielektronen und Röntgenstrahlung aus. Die Oberflächentopographie der Probe führt zu Signalunterschieden zwischen Sekundär- und Rückstreuielektronen, wodurch man von unebenen Probenoberflächen plastische Bilder erhält. Die charakteristische Röntgenstrahlung eines jeden Elementes ermöglicht ihre Identifikation.

3.6 Tiefenmessung mit Echolot

Auf der Forschungsfahrt 40/02/12 vom 26. 5. bis 31.5.2002 mit dem FS Prof. Albrecht Penck vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde wurde unter der Leitung von Dr. Thomas Leipe eine Tiefenmessung im Schifffahrtskanal des Oderhaffs mit einem Echolot durchgeführt. Am Morgen des 27.05.2002 um 4.03 Uhr UTC wurde bei Erreichen der Swina-Mündung mit der Messung begonnen. Um etwa 6.13 Uhr UTC endete die Messung bei Verlassen der Schifffahrtsrinne. Aufgenommen wurde die Tiefe des Kanals ab 53,9323 N – 14, 2746 E, etwa dem Beginn der Swina-Mündung, bis 53,6874 N – 14,5019 E im Süden des Großen Haffs (Angaben in Dezimalgrad). Eine zweite Messung der Kanaltiefe erfolgte später am selben Tag. Diese Daten sind jedoch aufgrund technischer Probleme nicht verwertbar.

3.7 Strömungsmodell FEMFLOW2D

Das Simulationsmodell FEMFLOW2D ist ein Modell zur Simulierung von Strömungsfeldern in flachen Gewässern bei verschiedenen Windrichtungen. Das Modell arbeitet mit Hilfe einer Gleichung für Bewegung und Kontinuität in flachen Gewässern. Das hier angewandte Modell ist speziell auf die Verhältnisse im Oderhaff angepasst. Ein trianguläres Netz enthält an den einzelnen Knotenpunkten die notwendigen Informationen über die Bathymetrie im Haff (siehe dazu Abb. 3.7 - 1).

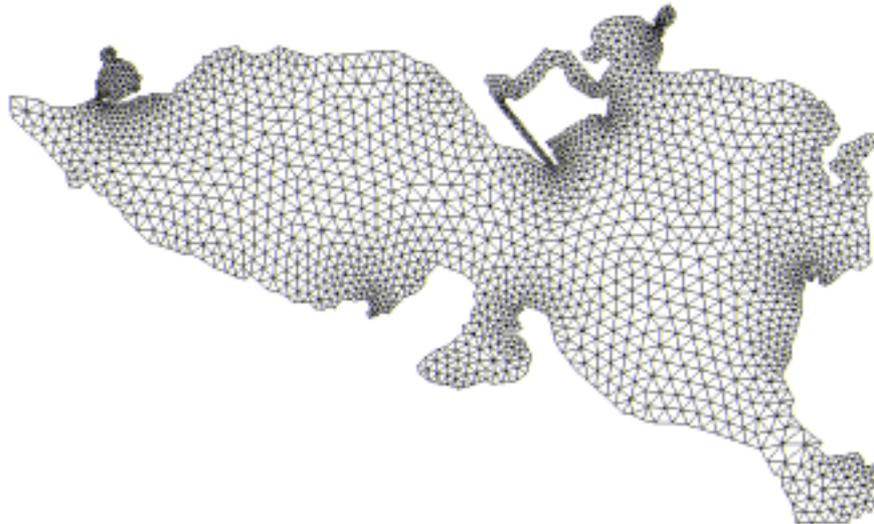


Abb. 3.7 - 1: Trianguläres Datennetz des Simulationsmodells FEMFLOW 2D.

Hierbei wurden Bathymetriedaten von K. Buckmann, Greifwald zu Grunde gelegt, die mit Hilfe des Netzes soweit vereinfacht wurden, dass die Simulationen in angebrachter Zeit zu erstellen sind. Mit diesem Modell ist die Simulierung des Strömungsfeldes im Oderhaff bei verschiedenen Windrichtungen möglich, wobei von einem konstanten Windfeld ausgegangen wird. Ein mittlerer Oderzufluss, wie er in Sommermonaten vorliegt, ist vorgegeben, ebenso wie diverse andere Parameter, wie beispielsweise die Rauigkeit des Grundes. Nicht mit einbezogen wird der Salzwasserzustrom aus der Ostsee.

Verwendet wurde das Modell in dieser Arbeit unter anderem, um die Frage zu behandeln, welche Auswirkungen die geplante Kanalvertiefung für das Oderhaff und auch für die Ostsee haben kann. Zu diesem Zweck wurden die Bathymetriedaten manuell verändert, um den Kanal von den derzeit etwa 10,5 m auf seine zukünftige Tiefe von 14,5 m zu vertiefen. Die Modellläufe bei den verschiedenen Windrichtungen sollen zeigen, wie das Strömungsfeld des Oderhaffs mit einem vier Meter tieferen Kanal theoretisch aussehen wird. Das Modell enthält zudem Informationen über die Fließgeschwindigkeiten an den jeweiligen Knotenpunkten, die beispielsweise Berechnungen über abfließende Wassermengen pro Zeiteinheit ermöglichen.

3.8 Statistische Methoden

Die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgte mittels verschiedener statistischer Methoden.

Bei den Kohlenstoff- und Stickstoffwerten wurden beispielsweise deren Verhältnisse zueinander errechnet (C/N-Verhältnis), um mögliche Unterschiede in den jeweiligen Gehalten besser

herausstellen zu können. Zudem ermöglicht das jeweilige C/N-Verhältnis Rückschlüsse auf die Materialherkunft.

Für einige Datensätze wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Im wesentlichen wurden lineare Einfachregressionen, also die Betrachtung von jeweils nur zwei Variablen (X, Y), verwendet. In diesem Fall werden die Werte der beiden Variablen in einem rechtwinkligen Koordinatensystem gegeneinander aufgetragen, wodurch man ein so genanntes Streudiagramm erhält. Mit Hilfe dieses Streudiagramms kann ein regelhafter Zusammenhang zwischen zwei Parametern visuell erkannt werden. Ist der Zusammenhang linear, kann dieser mit Hilfe einer Geraden, der Regressionsgeraden, dargestellt werden. Man erhält so eine Funktion $Y = f(X)$ mit der Geraden $Y = a + bX$, die die Tendenz der Punktwolke durch einen regelhaften linearen Verlauf optimal ausdrückt (BAHRENBURG et al., 1990, S. 134ff). Mit dieser Methode sollten mögliche Zusammenhänge zwischen z.B. Schwermetall- oder Nährstoffgehalten und Korngrößenverteilung oder Gehalt an organischer Substanz herausgestellt werden.

4. Ergebnisse

4.1 Physikalische Eigenschaften

Wasseranteil und Trockenraumdichte

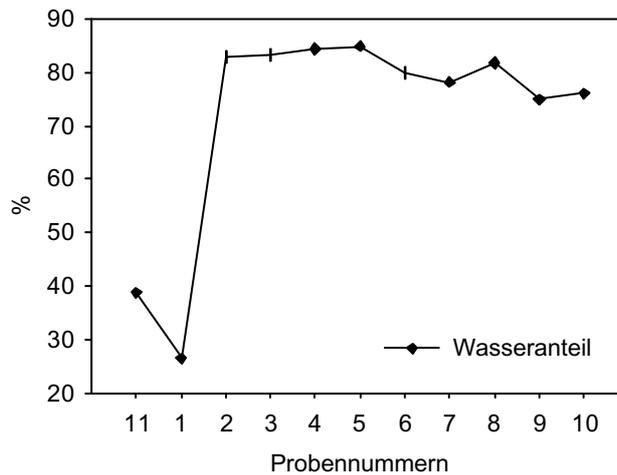


Abb. 4.1 – 1a: Wasseranteil in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

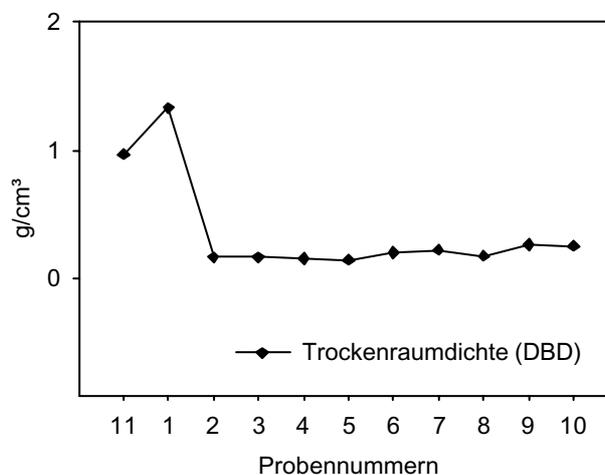


Abb. 4.1 – 1b: Trockenraumdichte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

Bei der Betrachtung der Wassergehalte der einzelnen Proben fallen deutliche Unterschiede auf. Die Probe 1 hat mit etwa 27 % Wasseranteil den geringsten Gehalt an Wasser im Material. Der maximale Wassergehalt ist in Probe 5 zu verzeichnen, die einen Wasseranteil von 84,81 % aufweist. Es liegt demnach eine Schwankungsbreite von ca. 52 Prozentpunkten vor.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Wassergehalt in den meisten Proben bei etwa 80 % liegt, nur die Proben 1 und 11 stellen eine Ausnahme dar, mit Wasseranteilen von weniger als der Hälfte.

Die Trockenraumdichte (DBD) der Proben bietet ein vergleichbares Bild. Das Minimum ist in Probe 5 mit einem Wert von $0,15 \text{ g/cm}^3$ erreicht. Der maximale Wert ist mit $1,33 \text{ g/cm}^3$ in Probe 1 zu verzeichnen. Im Mittel liegt die Trockenraumdichte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals bei etwa $0,2 \text{ g/cm}^3$, ausgenommen der Proben 1 und 11, welche Werte zwischen $0,97 \text{ g/cm}^3$ und $1,33 \text{ g/cm}^3$ aufweisen. Es liegt eine Schwankungsbreite in der Trockenraumdichte von ungefähr $1,18 \text{ g/cm}^3$ vor.

Glühverlust

Bei der Betrachtung des Glühverlustes in den verschiedenen Proben sind deutliche Unterschiede erkennbar. Die Proben 1 und 11 zeichnen sich durch einen geringen Glühverlust aus (zwischen kaum Verlust und ungefähr 3,3 % Glühverlust). Die übrigen Proben weisen Glühverluste von etwa 23 % auf. Das Maximum wird mit ca. 27 % in Probe 5 erreicht. Probe 7 weist mit etwa 17 % einen etwas geringeren Glühverlust als der Durchschnitt auf.

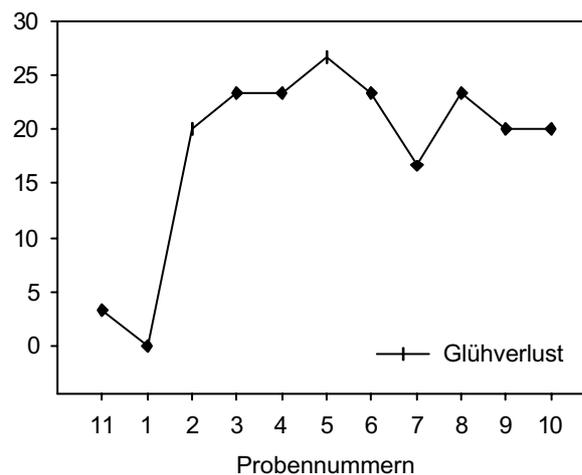


Abb. 4.1 - 2: Glühverlust in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenfraktionierung der Proben wurde zweimal mit einem Lasergerät ermittelt. Vor dem ersten Analysendurchgang wurde das Probenmaterial mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2) versetzt und das organische Material herausoxidiert, um die reine Korngrößenverteilung ohne organische Substanzen zu erhalten. Es wurde außerdem ein Dispergierungsmittel (Calgonlösung) hinzu gegeben, um die Korngrößen der einzelnen Bestandteile zu erhalten und Adhäsionen zu verhindern. In einem zweiten Analysengang wurde das Material lediglich im Ultraschallbad homogenisiert und komplett mit dem enthaltenen organischen Material auf Korngrößenzusammensetzung untersucht.

In der Regel beziehen sich Korngrößenanalysen auf die mineralischen Bestandteile des Sedimentes. Für eine Betrachtung der Korngrößenverteilung in den Sedimenten vor dem Hintergrund des Ablagerungs- und Resuspensionsverhaltens ist es jedoch sinnvoll, das Material in seinem natürlichen, unbehandelten Zustand zu betrachten, da einzelne Körner zu Aggregaten zusammengeslossen sind, die durch das Herausoxidieren der organischen Materials freigesetzt werden. Das oxidierte Material ist demnach feinkörniger als das frische Material wie es in der Natur vorliegt, und ist entsprechend anders im Sedimentations- und Resuspensionsverhalten. Daher waren die zwei Analysendurchgänge vor der hier behandelten Fragestellung sinnvoll.

Hauptbestandteil der meisten Proben sind Schluffe. Im Bereich der Korngrößen zwischen 2 und 63 μm liegen etwa 90 % des Materials der meisten Proben. Eine Ausnahme stellt Probe 1 dar, die einen Schluffanteil von lediglich etwa 26 %. Hier dominiert die Feinsandfraktion (63 – 150 μm) mit etwa 73 %.

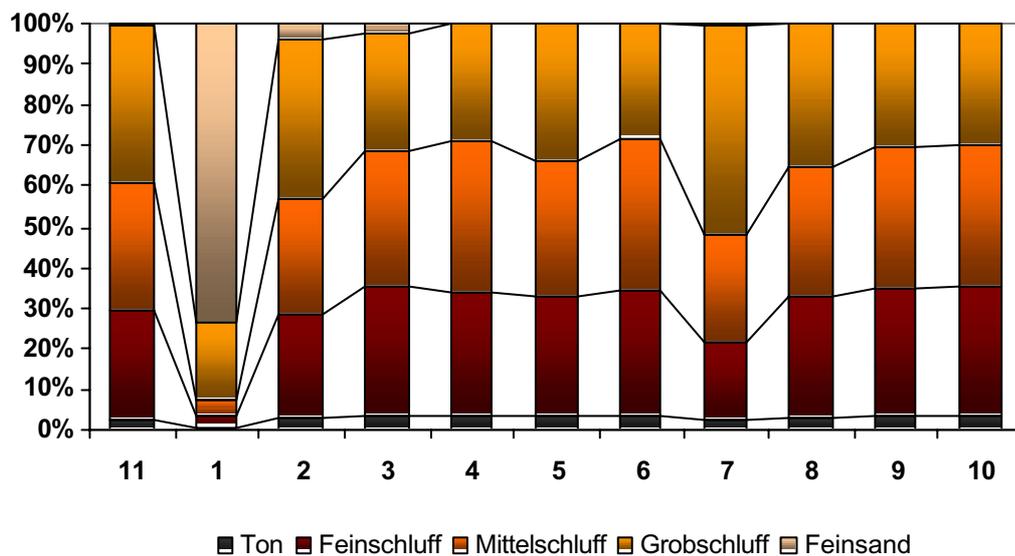


Abb. 4.1 - 3: Korngrößenverteilung in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals unter vorheriger Zugabe von H_2O_2 .

Bei der Korngrößenverteilung mit vorheriger Oxidierung des organischen Materials (Abb. 4.1 – 3) wird deutlich, dass das Probenmaterial der verschiedenen Probenpunkte eine recht homogene Zusammensetzung aufweist.

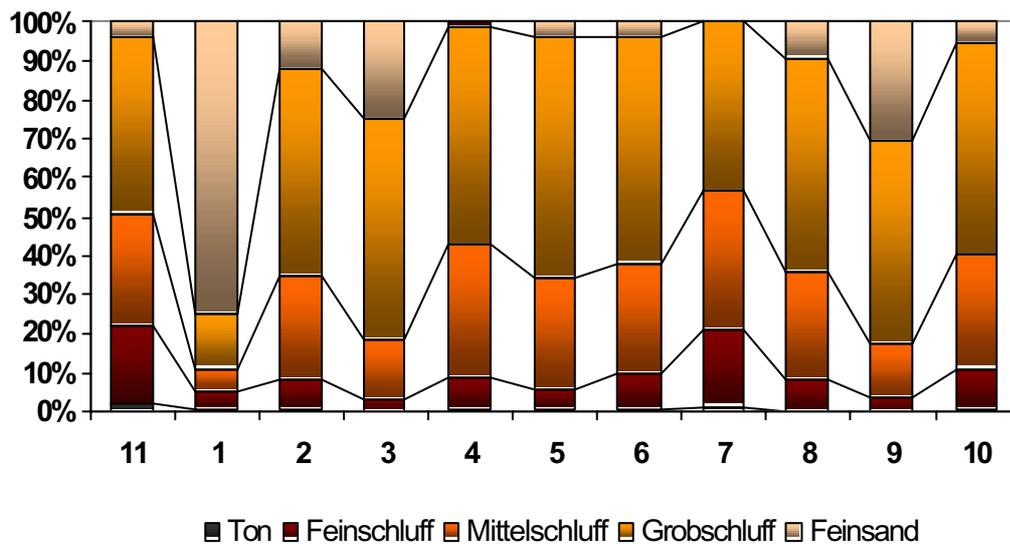


Abb. 4.1 - 4: Korngrößenverteilung in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals ohne Zugabe von H_2O_2 .

Der Tonanteil ($< 2 \mu m$) liegt bei dem Großteil der Proben bei ca. 3,1 bis 3,2 %. Das Minimum weist Probe 1 mit etwa 0,4 % auf, während das Maximum mit 3,3 % in Probe 3 zu finden ist. Der Vergleich dieser Analysenergebnisse mit den Ergebnissen der Korngrößenanalyse ohne vorherige Zugabe von H_2O_2 und Calgonlösung (Abb. 4.1 - 5) macht deutlich, dass der Tonanteil in den Proben ohne Oxidierung prozentual deutlich geringer ist. Der Tonanteil liegt hier meist unter 0,5 %. Ausnahmen stellen Probe 1 durch den gleich bleibend geringen Tonanteil und Probe 7 dar, die im ersten Analysendurchgang (mit H_2O_2 -Oxidierung) einen Tonanteil von ungefähr 2,2 % aufwies und im zweiten Durchgang im Gegensatz zu den anderen Proben noch einen Tonanteil von etwa 1,2 % hat.

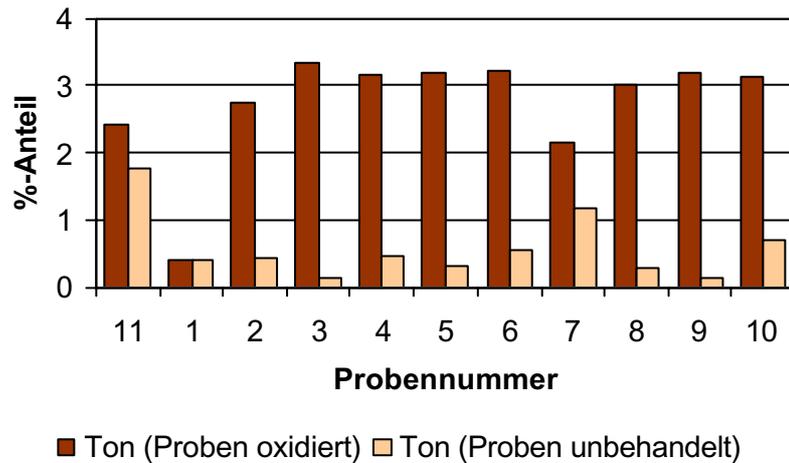


Abb. 4.1 – 5: Vergleich der Prozentanteile der Korngrößenfraktion Ton ($< 2 \mu\text{m}$) in den Proben mit vorheriger H_2O_2 -Behandlung und ohne Behandlung.

Beim Feinschluffanteil ($2 - 6,5 \mu\text{m}$) ist ein ähnliches Bild festzustellen (Abb. 4.1 – 6). Im Durchschnitt ist der Feinschluffanteil bei Analysen ohne Zugabe von H_2O_2 geringer. Die Größenordnung liegt hier bei etwa 20 Prozentpunkten. Ausnahmen sind hier wieder die Proben 1 mit einem gleich bleibend geringen Anteil an Feinschluff und Probe 7 mit einem konstanten Feinschluffanteil von ungefähr 19 %. Eine weitere Ausnahme stellt Probe 11 dar, deren Feinschluffanteil bei der zweiten Analyse lediglich um 6 Prozentpunkte geringer ist.

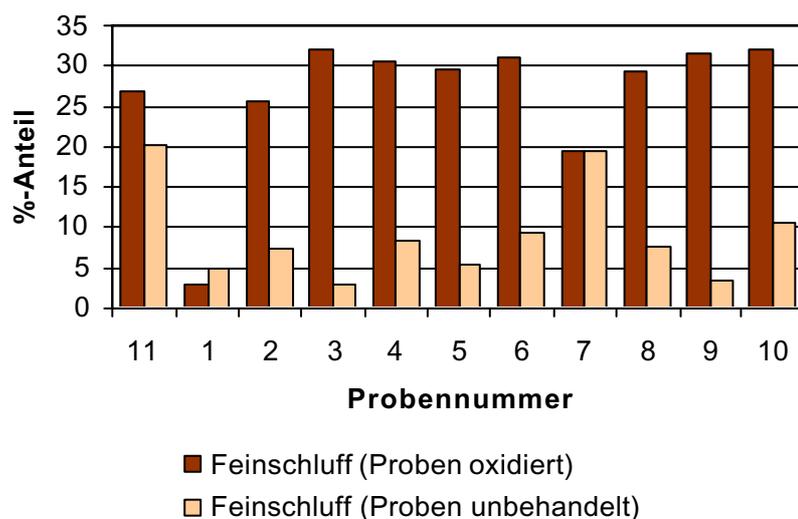


Abb. 4.1 – 6: Vergleich der Prozentanteile der Korngrößenfraktion Feinschluff ($2 - 6,5 \mu\text{m}$) in den Proben mit vorheriger H_2O_2 -Behandlung und ohne Behandlung.

Auch der Mittelschluffanteil ($6,5 - 20 \mu\text{m}$) war bei der zweiten Analyse in den meisten Fällen geringer als mit vorheriger Oxidation (Abb. 4.1 – 7). Ausnahmen sind wieder die Proben 1 und 7. Bei Probe 7 war der Mittelschluffanteil in der zweiten Analyse um ca. 10 Prozentpunkte höher.

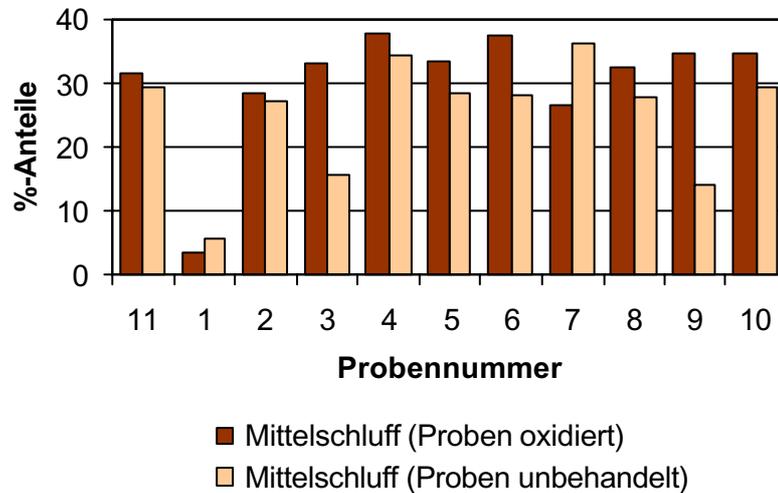


Abb. 4.1 – 7: Vergleich der Prozentanteile der Korngrößenfraktion Mittelschluff ($6,5 - 20 \mu\text{m}$) in den Proben mit vorheriger H_2O_2 -Behandlung und ohne Behandlung.

Der Grobschluffanteil ($20 - 65 \mu\text{m}$) weist ein gegensätzliches Bild auf (Abb. 4.1 – 8). Hier sind die Anteile bei Analyse ohne vorherige Zugabe von H_2O_2 um etwa 20 bis 30 Prozentpunkte höher. Lediglich bei den Proben 1 und 7 ist der Grobschluffanteil um ungefähr 6 bis 7 Prozentpunkte niedriger.

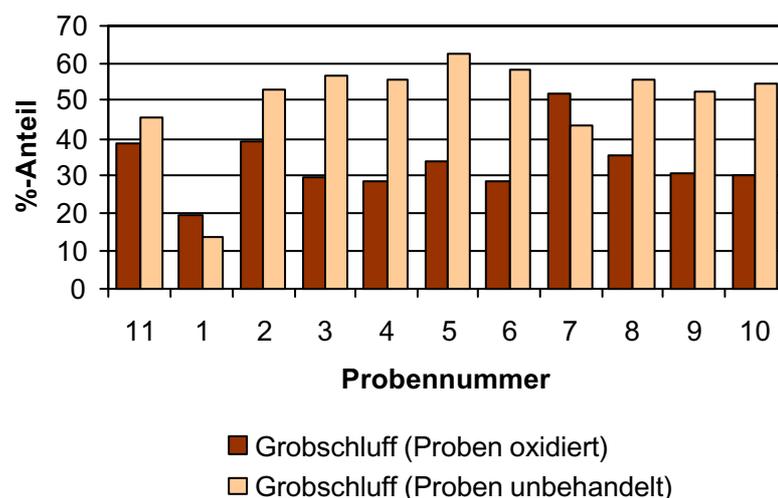


Abb. 4.1 – 8: Vergleich der Prozentanteile der Korngrößenfraktion Grobschluff ($20 - 63 \mu\text{m}$) in den Proben mit vorheriger H_2O_2 -Behandlung und ohne Behandlung.

Als Feinsand bezeichnet man in der Regel die Korngrößenfraktion $63-200 \mu\text{m}$. Der Laser Particle Analyser misst in diesem Bereich in zwei verschiedenen Abstufungen, einmal von $63-100 \mu\text{m}$ und

von 100-150 μm . Im Folgenden wird der Bereich 63-100 μm als Feinstsand und 100-150 μm als Feinsand bezeichnet.

Im Bereich der Feinstsandfraktion (63 – 100 μm) ist zu erkennen, dass bei etwa der Hälfte der Proben bei Analyse mit vorheriger Zugabe von H_2O_2 und dem Dispergierungsmittel Calgonlösung kein Anteil dieser Fraktion zu verzeichnen ist (Abb. 4.1 – 9). Bei Durchführung der Analyse ohne vorherige Zugaben ist diese Fraktion in den Proben mit etwa 3 bis 9 %, in einem Fall sogar mit ca. 27 % (Probe 9), vertreten. Auffällig ist Probe 1, deren Feinstsandanteil im ersten Analysendurchgang ungefähr 36 % und lediglich etwa 27 % im zweiten Durchgang beträgt.

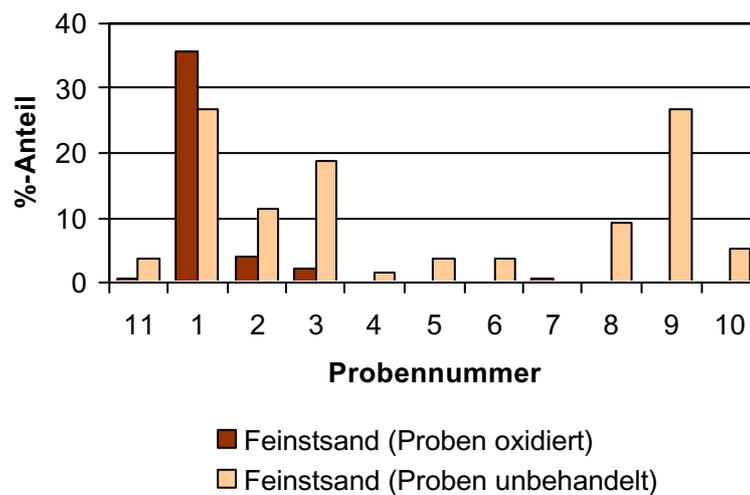


Abb. 4.1 – 9: Vergleich der Prozentanteile der Korngrößenfraktion Feinstsand (63 – 100 μm) in den Proben mit vorheriger H_2O_2 -Behandlung und ohne Behandlung.

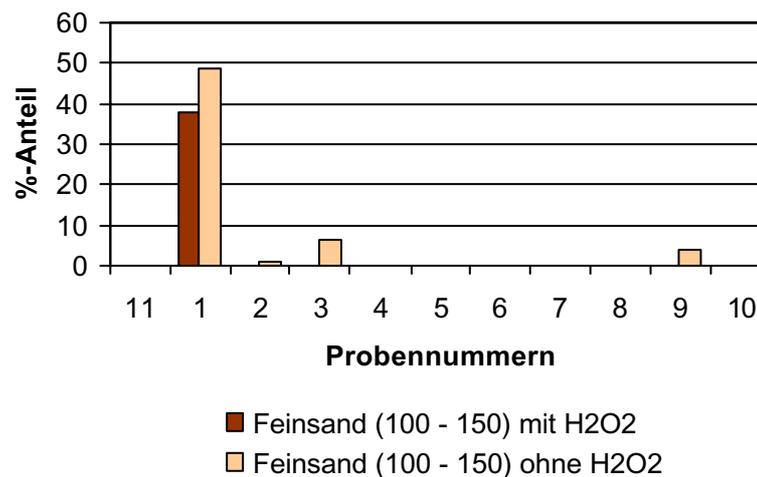


Abb. 4.1 – 10: Vergleich der Prozentanteile der Korngrößenfraktion Feinsand (100 – 150 μm) in den Proben mit vorheriger H_2O_2 -Behandlung und ohne Behandlung.

Die Fraktion 100 – 150 µm (Feinsand) ist bei Analyse mit Zugabe von H₂O₂ und Calgonlösung mit etwa 38 % lediglich in der Probe 1 vertreten (Abb. 4.1 - 10). Ohne Zugabe von H₂O₂ und Calgonlösung steigt der Anteil bei Probe 1 auf etwa 49 %. Zudem findet man in den Proben 2, 3 und 9 nun ebenfalls geringe Anteile dieser Korngrößenfraktion (zwischen 0,68 und 6,45 %).

4.2 Geochemie

4.2.1 Schwermetalle

Unter Schwermetallen versteht man im Allgemeinen Metalle, die in Elementform eine Dichte von über 4,5 g/cm³ aufweisen. Zu den Schwermetallen zählen daher Eisen (Fe), Cobalt (Co), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Chrom (Cr), Nickel (Ni), Cadmium (Cd), Blei (Pb), Thallium (Tl) und Quecksilber (Hg), um nur einige wichtige Vertreter zu nennen. Diese Elemente sind unter Normalbedingungen fest, lediglich Hg ist flüssig, und liegen in Gesteinen und Sedimenten meist als Oxide, Sulfide, Sulfate oder Carbonate vor. Nur wenige treten auch in elementarer Form auf und sind als solche in der Natur beständig (STREIT, 1994, S. 708).

Einige der Schwermetalle sind für Lebewesen essentiell, wie z.B. Zink, Eisen, Mangan und Kupfer, andere hingegen sind für viele Organismen nicht lebensnotwendig, wie z.B. Cadmium, Quecksilber und Blei. Sowohl essentielle als auch nicht essentielle Schwermetalle können bei Menschen und vielen anderen Lebewesen schon in leicht erhöhten Konzentrationen Gesundheitsschäden hervorrufen. Die toxische Wirkung eines Schwermetalls hängt neben der Konzentration ebenso von der chemischen Form ab, in der es vorliegt. Sie ist im allgemeinen um so größer, je besser die Verbindung in Wasser oder Fett löslich ist.

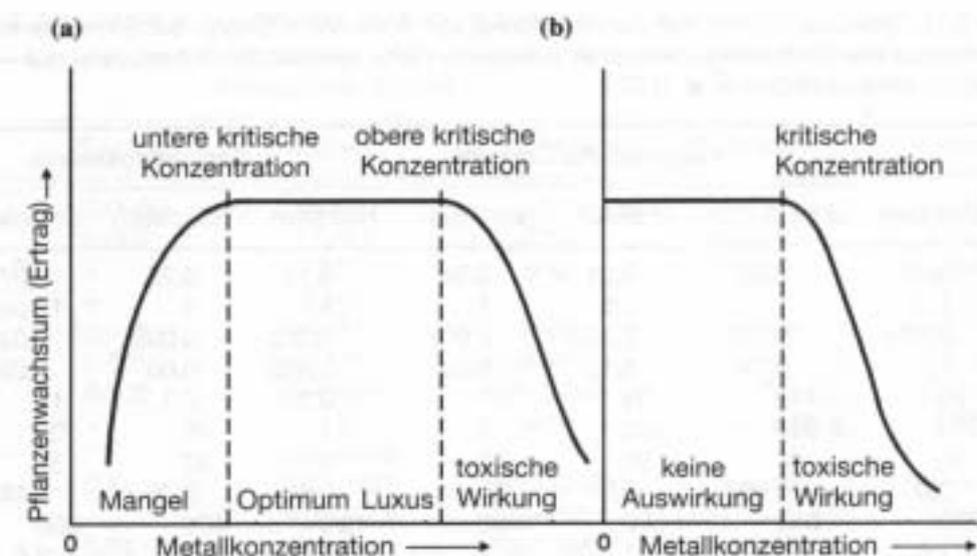


Abb. 4.2.1 – 1: Typische Dosis-Wirkungskurve für a) Mikronährstoffe und b) nichtessentielle Spurenelemente (aus ALLOWAY & AYRES, 1996, S. 167).

Diese Abbildung zeigt die physiologische Wirkung von Schwermetallen in verschiedenen Konzentrationen in Lösung einer Körperflüssigkeit, wie beispielsweise Blut. Zu geringe Konzentrationen an essentiellen Schwermetallen wie Eisen oder Kupfer führen zu Mangelerscheinungen. Nicht essentielle Schwermetalle wie Blei oder Cadmium haben schon in kleinen Konzentrationen toxische Wirkungen, die sich mit zunehmender Konzentration schnell verstärken.

Essentielle Schwermetalle

Cobalt (Co)

Cobalt ist ein für Tiere und Menschen essentielles Element. Es ist unter anderem für die N_2 -Bindung durch Cyanobakterien und verschiedenen anderen Bakterien unentbehrlich. Darüber hinaus konnte eine spezifische Funktion als unentbehrliches Nährelement für höhere Pflanzen jedoch noch nicht nachgewiesen werden (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998, S. 306).

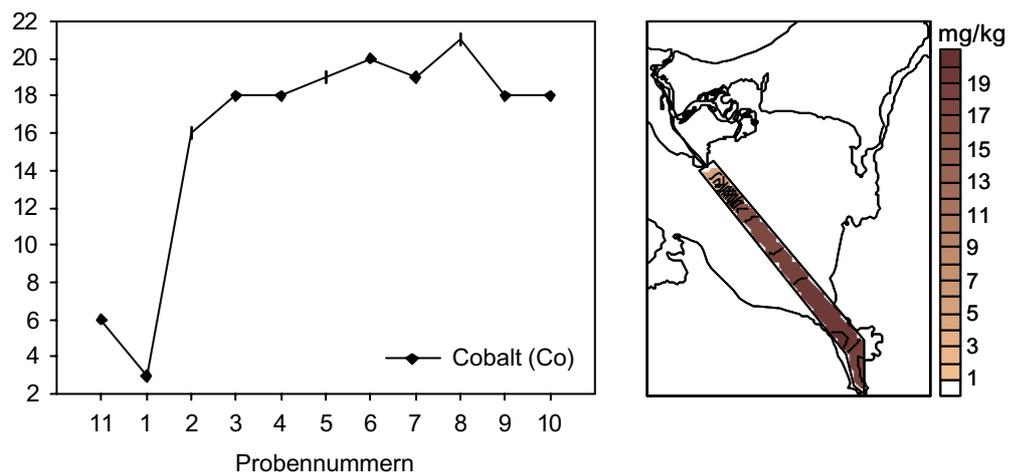


Abb. 4.2.1 - 2: Cobaltgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Cobalt tritt in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals mit einer Schwankungsbreite von 3 ppm (Probe 1, Minimum) bis 21 ppm (Probe 8, Maximum) auf. Die Proben 11 und 1 weisen mit Abstand die geringsten Gehalte auf. Im Durchschnitt liegt der Cobaltgehalt bei 16 ppm, wenn man die abweichenden Proben 11 und 1 mit einberechnet (ohne Probe 11 und 1: 18,6 ppm). Es ist kein Trend im Rinnenverlauf erkennbar.

Chrom (Cr)

Chrom stellt ein für Pflanzen vermutlich entbehrliches und für Menschen und Tiere dagegen essentielles Element dar. Chrom tritt in verschiedenen Formen auf. Bei dreiwertigem und metallischem Chrom sind toxische Wirkungen nicht mit Sicherheit nachgewiesen. Vierwertiges

Chrom hingegen ist deutlich toxischer und kann akute und chronische Vergiftungen beim Menschen auslösen (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998, S. 344).

Chrom ist in den Proben mit Werten ab 10 ppm (Probe 1, Minimum) bis 120 ppm (Probe 8, Maximum) zu verzeichnen. Die Chromgehalte der Proben 11 und 1 liegen deutlich unter dem Niveau der Gehalte in den übrigen Proben. Ein Gradient im Verlauf der Schifffahrtsrinne wird nicht deutlich.

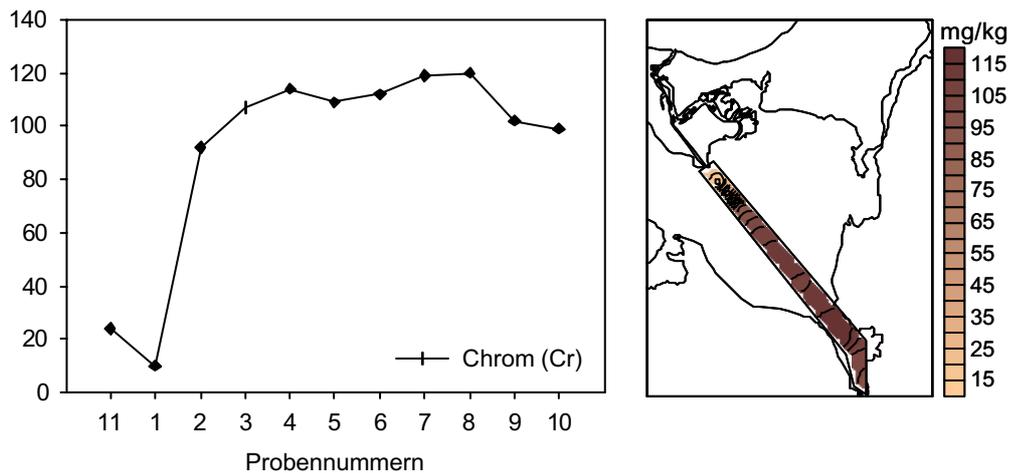


Abb. 4.2.1 - 3: Chromgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Kupfer (Cu)

Kupfer ist ein für die Ernährung aller Lebewesen essentielles Mikronährelement. Ein Kupferüberschuss hat jedoch bei Pflanzen und einigen Tieren toxische Wirkungen.

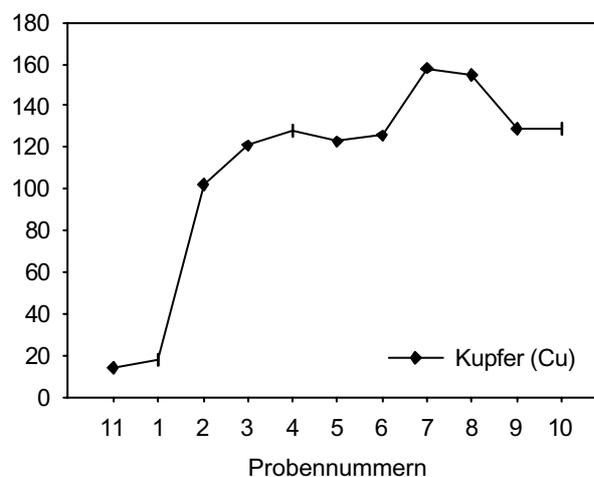


Abb. 4.2.1 - 4: Kupfergehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Kupfer kommt in Abhängigkeit von den jeweiligen Bedingungen des Gewässers gelöst als Kupferion, in Verbund mit anorganischen und organischen Komponenten sowie partikulär gebunden vor (LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG, 1998, S. 36). In der Erdkruste liegt Kupfer hauptsächlich in sulfidischer Form (CuFeS_2 (Kupferkies), CuS_2 (Kupferglanz), Cu_3FeS_3 (Bornit)) sowie oxischer und carbonatischer Form vor (Cu_2O (Rotkupfererz), $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ (Malachit)) (BRÜGMANN, 1993, S. 104). Für viele Organismen ist Kupfer essentiell, zeigt jedoch in höherer Dosis toxische Wirkungen bei Pflanzen, Tieren und Menschen.

Der minimale Kupfergehalt in den Proben des Schifffahrtskanals ist in Probe 11 mit einem Gehalt von 14 ppm zu verzeichnen. Der maximale Wert ist in Probe 7 mit 158 ppm zu finden. Die Proben 11 und 1 haben deutlich niedrigere Kupfergehalte als die übrigen Proben und die Proben 7 und 8 haben höhere Kupfergehalte als der Durchschnitt zu verzeichnen. Ein Trend im Verlauf des Schifffahrtskanals wird nicht deutlich.

Eisen (Fe)

Eisen ist ein für Pflanzen, Tiere und Menschen unentbehrliches Mikronährelement. Unter aeroben Bedingungen liegt Eisen vor allem in Form der dreiwertigen Eisenoxide und in silicatischen Bindungen vor. Unter anaeroben Verhältnissen werden die Fe(III)-Oxide zu Fe^{2+} -Ionen reduziert. Pflanzen nehmen Eisen in der Regel als Fe^{2+} auf (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998, S. 291).

In den Proben des Schifffahrtskanals sind Eisengehalte von 0,37 % (Probe 1, Minimum) bis 4,47 % (Probe 8, Maximum) gemessen worden. Es sind deutliche Niveauunterschiede im Eisengehalt zwischen den Proben 11 und 1 und den übrigen Proben zu erkennen. Ein deutlicher Trend der Gehalte im Rinnenverlauf ist nicht erkennbar.

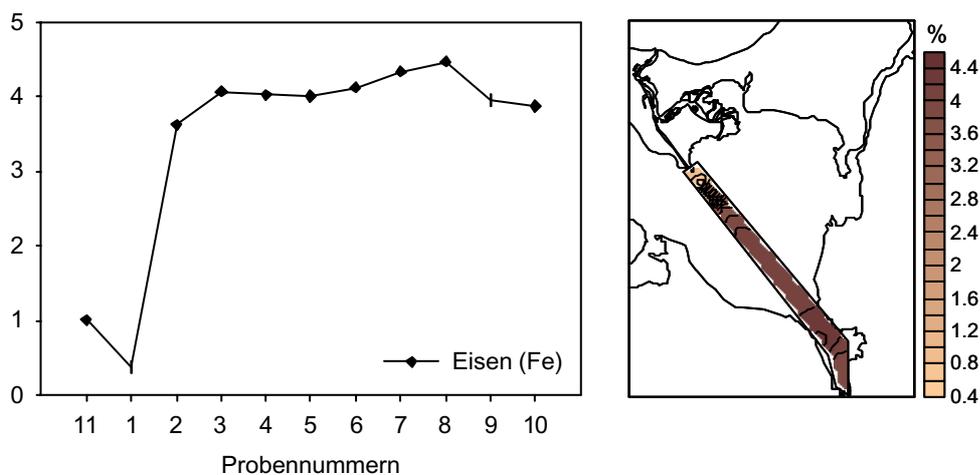


Abb. 4.2.1 - 5: Eisengehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in % TS).

Mangan (Mn)

Mangan zählt zu den Spurennährelementen, welche für die Ernährung von Pflanzen nur in Spuren erforderlich sind. Spurennährelemente werden auch als Mikronährelemente bezeichnet. Mangan ist ein für alle Lebewesen essentielles Nährelement. Es tritt in Böden hauptsächlich in Form von Manganoxiden auf, wird aber auch in Silicaten und Carbonaten gebunden. Zudem kann es adsorbiert und in organischen Komplexen gebunden sein, sowie in austauschbarer und gelöster Form (Mn^{2+}) auftreten.

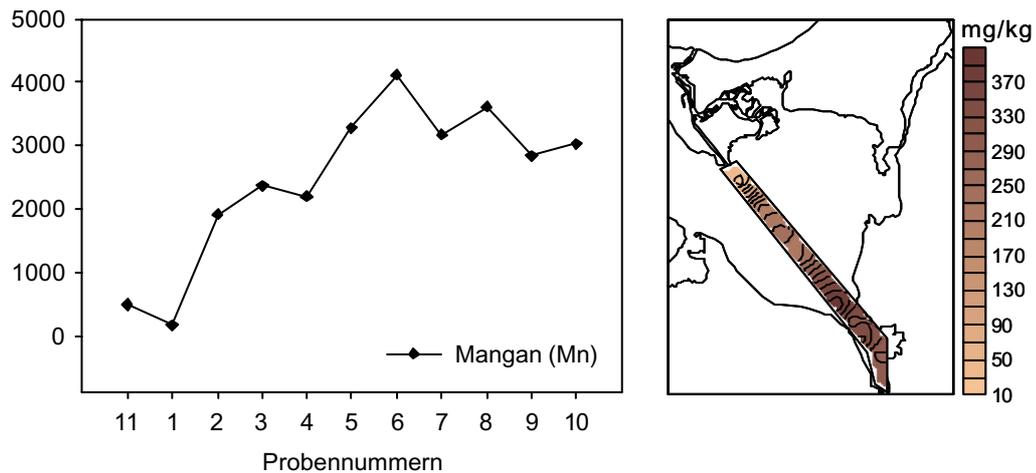


Abb. 4.2.1 - 6: Mangangehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Mangangehalte sind von 155 mg/kg TS in der Probe 1 (Minimum) bis 4122 mg/kg TS in der Probe 6 (Maximum) zu verzeichnen. Von Probe 2 bis 6 ist ein ansteigender Trend zu erkennen. Ab Probe 7 sinkt der Mangengehalt im Durchschnitt wieder.

Zink (Zn)

Zink ist ein für Pflanzen, Tiere und Menschen essentielles Mikronährelement. Bei sehr hohen Gehalten im Boden kann es jedoch toxisch auf Pflanzen und Mikroorganismen wirken.

Zink kommt in den Proben des Schifffahrtskanals mit Werten von 42 mg/kg (Probe 1, Minimum) bis 1240 mg/kg (Probe 7, Maximum) vor. Die Proben 11 und 1 haben deutlich geringere Zinkgehalte als die übrigen Proben zu verzeichnen. In den Proben 2 bis 10 liegt der Zinkgehalt im Durchschnitt bei etwa 1040 mg/kg. Ein Trend im Rinnenverlauf ist nicht zu erkennen.

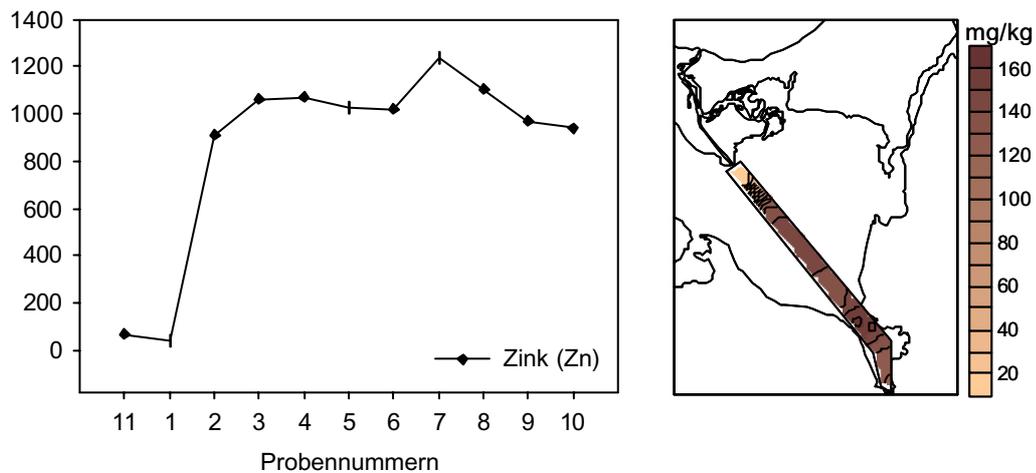


Abb. 4.2.1 - 7: Zinkgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Nicht essentielle Schwermetalle

Blei (Pb)

Blei ist ein aus toxikologischer Sicht relevantes Element, da es aufgrund seiner breiten Anwendungspalette trotz geringer geochemischer Mobilität in solchen Mengen in die Umwelt gelangt, dass der anthropogene Eintrag den natürlichen um ein vielfaches übersteigt. Fragmente aus Blei in den Ruinen des Altertums einiger Länder weisen auf eine frühe anthropogene Gewinnung und Nutzung von Blei hin. Industrielle Bedeutung gewann Blei aber erst in Zeiten des römischen Reiches. Aus dieser Zeit stammen auch die ersten bekannten Fälle von Bleivergiftung. Isotopenmessungen haben ergeben, dass etwa 95 bis 98 % des in der Umwelt befindlichen Bleis auf anthropogene Aktivitäten zurückzuführen sind (BRÜGMANN, 1993, S. 97).

Blei kommt in den Proben in Konzentrationen von 10 mg/kg (Probe 1, Minimum) bis 165 mg/kg (Probe 7, Maximum) vor. Probe 1 und 11 unterscheiden sich im Bleigehalt deutlich von den übrigen Proben. Sie liegen mit ihren Bleigehalten von 10 und 16 mg/kg unter dem Niveau der Proben 2 bis 10, deren minimaler Wert bei 119 mg/kg in Probe 10 liegt. Ein Gradient im Verlauf der Schifffahrtsrinne wird nicht deutlich.

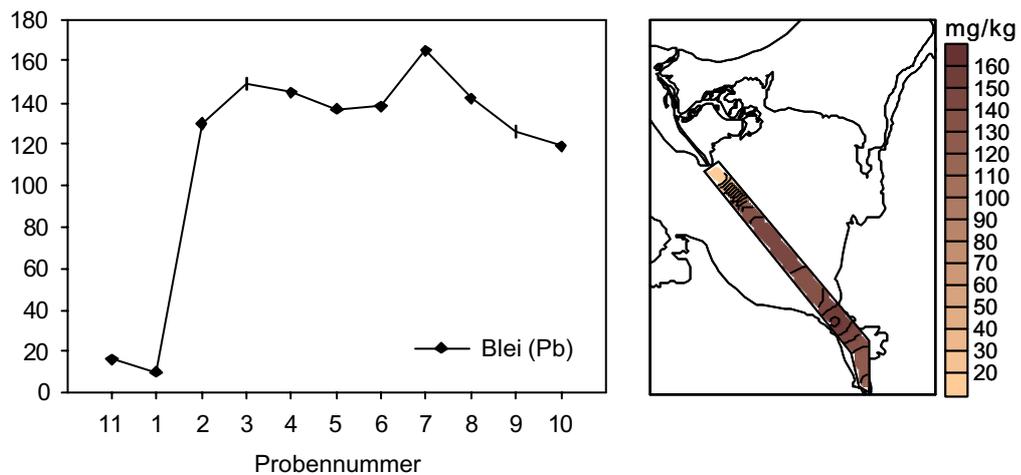


Abb. 4.2.1 - 8: Blei (Pb) in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Nickel (Ni)

Nickel hat bei einigen Tieren als essentielles Spurenelement Bedeutung. Auch auf Pflanzen und Mikroorganismen wirkt sich Nickel in geringen Konzentrationen zum Teil positiv aus. Nickel hat in erhöhten Konzentrationen dennoch recht starke phytotoxische Wirkungen (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998, S. 344).

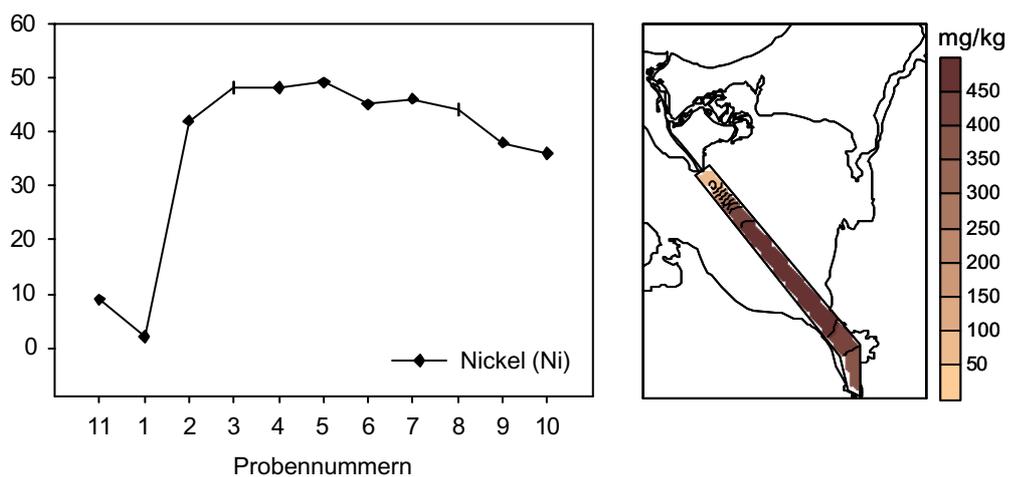


Abb. 4.2.1 - 9: Nickel (Ni) in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Nickelwerte von 2 mg/kg (Probe 1, Minimum) bis 49 mg/kg (Probe 5, Maximum) sind gemessen worden. Im Durchschnitt enthalten die Proben 44 mg/kg Nickel, ausgenommen Probe 11 und 1,

deren Nickelgehalte deutlich unter den übrigen Proben liegen. Insgesamt ist möglicherweise ein abfallender Trend von Probe 3 bis 10 zu verzeichnen.

4.2.2 Nährstoffe

Phosphor (P)

Phosphor kommt in der Natur hauptsächlich in seiner fünfwertigen Form als Phosphat vor. Das aus Lagerstätten abgebaute Rohphosphat findet Anwendung in der Landwirtschaft als Düngemittel oder für technische Zwecke, wie z.B. als Enthärtungsmittel in Waschmitteln. Nach ihrer Verwendung gelangen die Phosphate in den Wasserkreislauf und damit in die Umwelt. Industrie und Haushalte sind lokalisierbare Eintragsquellen für Gewässer. In Kläranlagen kann dieses Phosphat gezielt entfernt werden. Anders sieht es bei Phosphaten aus, die aus diffusen Quellen stammen, wie z.B. aus der Landwirtschaft durch phosphathaltige Düngemittel und durch Nutztierhaltung. 1980 wurde siebenmal soviel Phosphor als Phosphat von Nutztieren ausgeschieden, wie von der Weltbevölkerung (HEINTZ & REINHARDT, 1993, S. 132).

Gelangen die Phosphate in Flüsse, werden sie häufig ins Meer eingetragen und dort sedimentiert. Anders ist es mit Phosphaten in langsam fließenden oder stehenden Gewässern, zu denen das Oderhaff zählt. Hier werden die Phosphate zunächst ebenfalls sedimentiert. Sie können aber unter anaeroben Bedingungen wieder freigesetzt werden. Während der Algenblüte kann es am Gewässergrund zu Sauerstoffmangel kommen (WIELGAT & SCHERNEWSKI, 2002b), der dann das Freisetzen des Phosphors bewirkt. Da Phosphor in der Regel der limitierende Faktor für die Bioproduktivität darstellt, bewirkt der zusätzliche Phosphoreintrag aus dem Sediment eine Verstärkung des Algenwachstums.

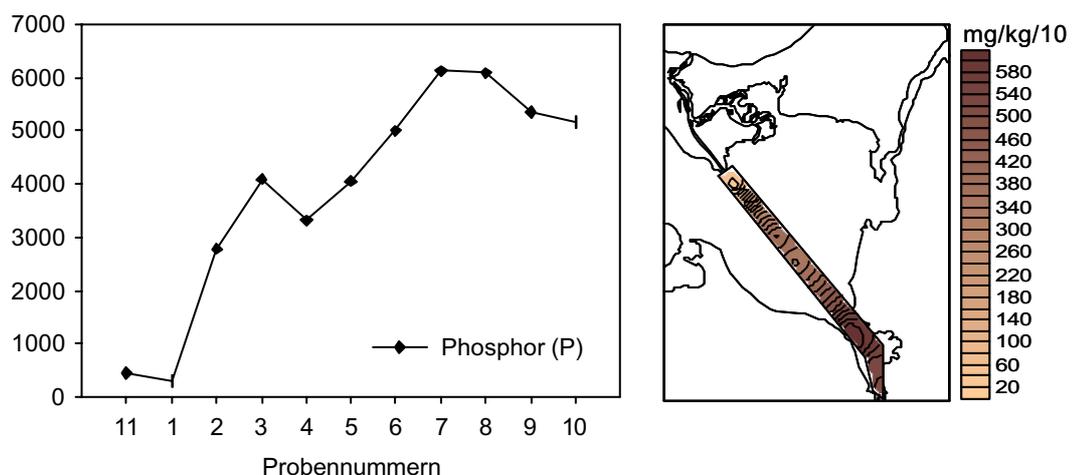


Abb. 4.2.2 - 1: Phosphorgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (mg/kg TS).

In den Sedimentproben des Schifffahrtskanals wurde ein minimaler Phosphorgehalt in der Probe 1 mit 304 mg/kg gemessen. Das Maximum wurde in der Probe 7 mit einem Gehalt von 6127 mg/kg

gemessen. Im Durchschnitt liegt der Phosphorgehalt ohne die Proben 11 und 1, deren Gehalte deutlich unter denen der übrigen Proben liegen, bei etwa 4663 mg/kg. Ein eindeutiger Gradient im Kanalverlauf ist nicht erkennbar.

Stickstoff (N)

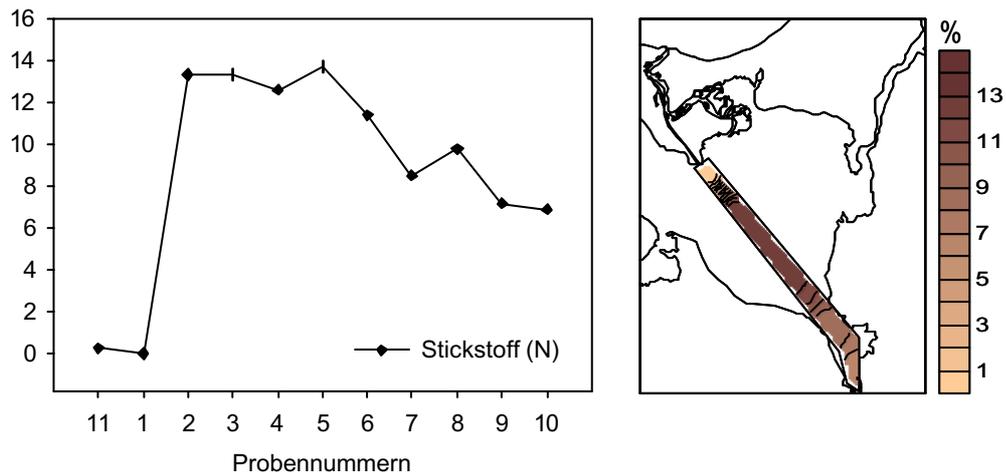


Abb. 4.2.2 - 2: Stickstoffgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (mg/g TS).

In den Sedimentproben des Schifffahrtskanals wurden Stickstoffgehalte von 0 mg/g in der Probe 1 (Minimum) bis 13,7 mg/g in der Probe 5 (Maximum) gemessen. Die Stickstoffgehalte der Proben 11 und 1 liegen deutlich unter dem Durchschnitt. Von Probe 5 bis 10 ist ein deutlich abfallender Trend im Stickstoffgehalt der Proben zu erkennen. Von den 13,7 mg/g in Probe 5 fällt der Wert auf 6,9 mg/g in Probe 10.

Kohlenstoff (C)

Der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) liegt zwischen 3,3 mg/g in der Probe 1 (Minimum) und 129,6 mg/g in der Probe 5 (Maximum). Der Mittelwert liegt bei etwa 92 mg/g bei Einberechnung aller Proben. Bei Berechnung ohne die deutlich abweichenden Proben 11 und 1, die deutlich unter dem Mittel liegende Kohlenstoffgehalte aufweisen, liegt der Mittelwert bei etwa 110 mg/g. Insgesamt ist ein leicht abfallender Trend im Kohlenstoffgehalt von Probe 3 bis 10 zu erkennen.

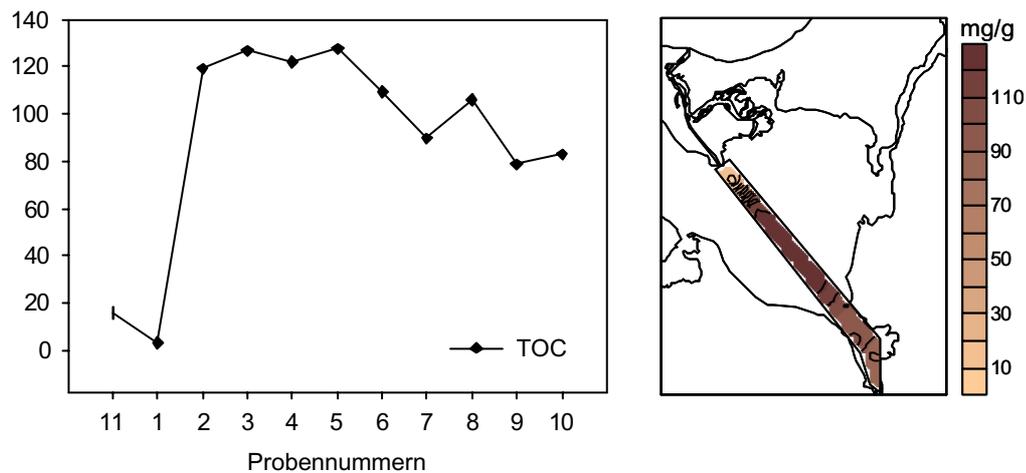


Abb. 4.2.2 - 3: Gehalte an organischem Kohlenstoff in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (mg/g TS).

Trennt man in der Betrachtung der Kohlestoffgehalte anorganischen (TIC) und organischen (TOC) Kohlenstoff, ergibt sich für den Gehalt an organischem Kohlenstoff ein ähnliches Bild. Auch hier ist in der Probe 1 der minimale Wert (2,8 mg/g) und in der Probe 5 der maximale Wert (118,5 mg/g) zu verzeichnen. Zudem wird der insgesamt ab Probe 3 abfallende Trend deutlich.

Auch der minimale Wert des anorganischen Kohlenstoffs ist in Probe 1 mit 0,4 mg/g gemessen worden. Der maximale Wert hingegen ist in Probe 2 mit 14,2 mg/g zu finden. Bei Betrachtung des TIC-Gehaltes im Rinnenverlauf wird ein insgesamt leicht abfallender Trend erkennbar.

Verhältnis Kohlenstoff/Stickstoff (C/N)

Das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis ergibt sich bei Division der Gesamtkohlenstoffgehalte durch die Stickstoffgehalte. Terrestrische Pflanzen bauen in der Regel mehr Stickstoff in ihren Organismus ein, weshalb das C/N-Verhältnis Rückschlüsse auf die mögliche Herkunft von organischem Material ermöglicht.

Für die Proben 11 und 1 mit ihren geringeren Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten ergeben sich verhältnismäßig hohe C/N-Werte. Die Probe 11 hat einen Wert von 45, während Probe 1 einen Wert von 28 zu verzeichnen. Bei den übrigen Proben liegt der Wert im Mittel bei etwa 10. Von Probe 2 mit einem Wert von 8,17 (Minimum) bis Probe 10 mit einem Wert von 12,83 ist ein deutlich ansteigender Trend zu erkennen.

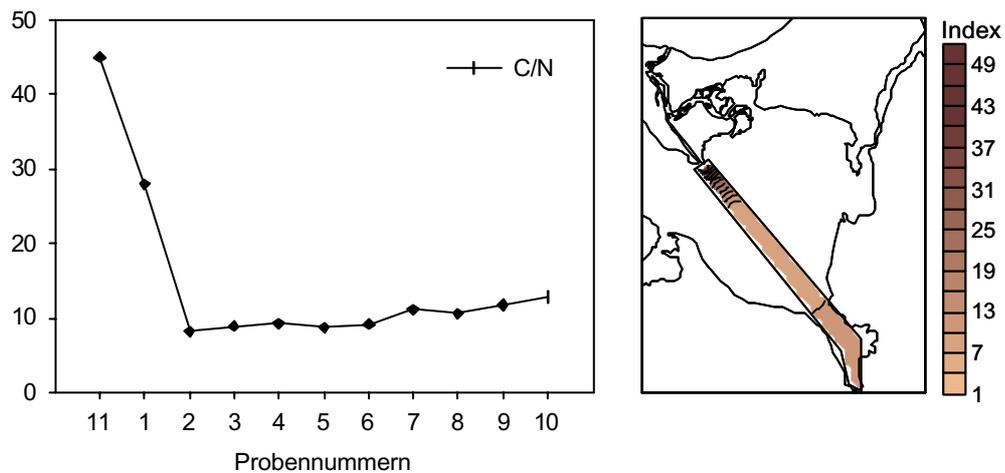


Abb. 4.2.2 - 4: Verhältnis zwischen Kohlenstoff und Stickstoff in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

Schwefel (S)

Schwefel ist für Lebewesen ein unentbehrliches Nährelement. In magmatischen Gesteinen liegt Schwefel hauptsächlich als Sulfid vor. Durch Verwitterungsprozesse werden die Sulfide zu Sulfaten oxidiert. In Sedimenten trifft man anorganisch gebundenen Schwefel daher unter aeroben Verhältnissen fast nur in Form von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) an. Unter anaeroben Verhältnissen ist Schwefel in Sedimenten hingegen hauptsächlich als Eisensulfid (FeS – Pyrrhotin, FeS_2 – Pyrit) zu finden (SCHEFFER/SCHACHTSCHA BEL, 1998, S. 282).

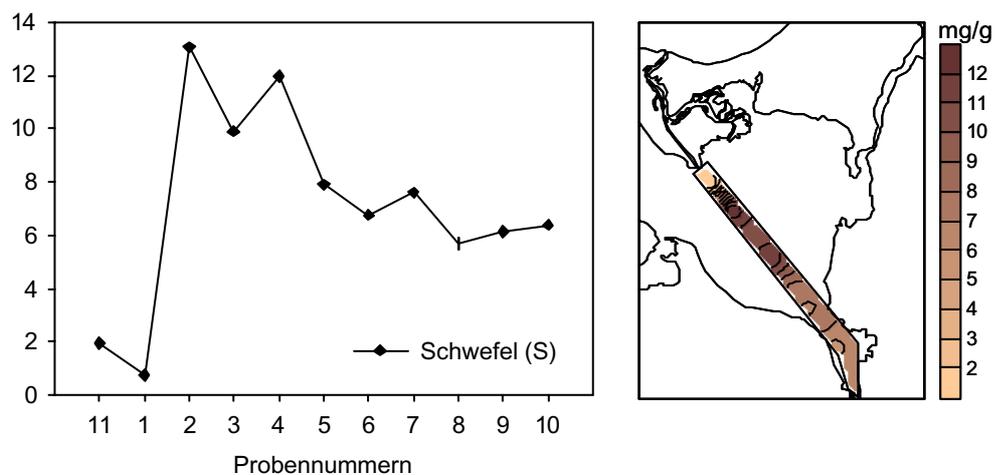


Abb. 4.2.2 - 5: Schwefelgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/g TS).

Der minimale Schwefelgehalt ist in der Probe 1 mit 0,75 mg/g gemessen worden. Das Maximum ist in der Probe 2 mit einem Wert von 13,07 mg/g zu verzeichnen. Bei insgesamt Betrachtung der

Schwefelgehalte in den Sedimenten des Schifffahrtskanals deutet sich möglicherweise ein abfallender Trend von Probe 2 bis 10 an.

Calcium (Ca)

Calcium ist eines der essentiellen Elemente für Pflanzen, Tiere und Menschen. Es tritt in der Natur häufig in Form der Carbonate Calcit (CaCO_3) und Dolomit [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] sowie im Sulfat Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) auf, sowie in den Silicaten Plagioklas, Pyroxen, Amphibol und Epidot. Diese Minerale sind leicht verwitterbar oder leicht löslich, weshalb Calcium oft in austauschbarer Form vorliegt. Zudem gelangt Calcium in der Landwirtschaft durch Düngung in den Boden.

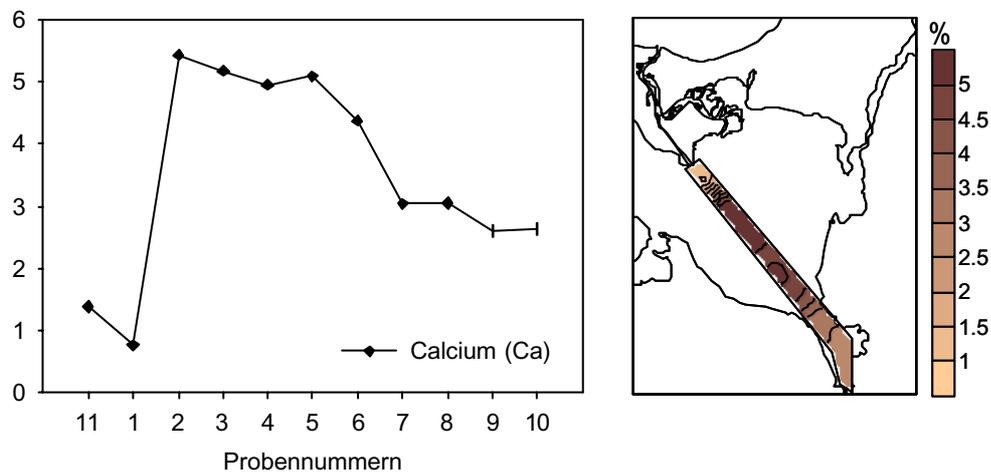


Abb. 4.2.2 - 6: Calciumgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in % TS).

Die Calciumgehalte der Proben 11 und 1 heben sich deutlich von denen der übrigen Proben ab. Die Probe 1 hat den minimalen Wert mit 0,76 % TS zu verzeichnen. Der Gehalt der Probe 11 liegt mit 1,39 % TS ebenfalls deutlich unter dem Durchschnitt. Der Mittelwert der übrigen Proben liegt bei etwa 37 mg/g. Das Maximum wurde in Probe 2 mit 5,42 % TS gemessen. Insgesamt ist ein von Probe 2 bis 10 deutlich abfallender Trend zu erkennen. Die Probe 10 hat im Gegensatz zu Probe 2 nur noch einen Calciumgehalt von 2,64 % TS.

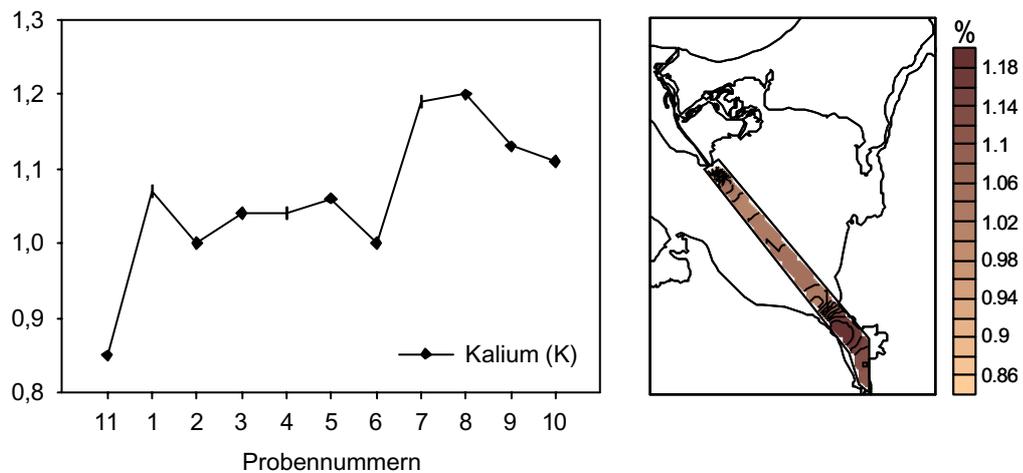
Kalium (K)

Abb. 4.2.2 - 7: Kaliumgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in % TS).

Der minimale Kaliumgehalt wurde in der Probe 11 mit 0,85 % TS gemessen. Das Maximum ist in der Probe 8 mit 1,2 % TS zu verzeichnen. Insgesamt wird ein von Probe 2 bis 10 ansteigender Trend erkennbar, mit einem Maximum in den Proben 7 und 8, und einem anschließenden leichten Abfall der Kaliumgehalte.

Magnesium (Mg)

Magnesium ist ein für alle Lebewesen essentielles Nährelement, das von Pflanzen aus dem Boden aufgenommen und an die anderen Glieder der Nahrungskette weitergegeben wird. Der überwiegende Anteil an Magnesium liegt in Böden in den Silicaten vor, beispielsweise in Amphibolen, Pyroxenen, Olivinen, Biotiten und einigen Tonmineralen wie Chlorit.

In den Proben sind Magnesiumgehalte von 0,1 % TS in der Probe 1 (Minimum) bis 0,69 % TS in der Probe 3 (Maximum) gemessen worden. Der mittlere Magnesiumgehalt liegt bei etwa 0,5 % TS bei Einberechnung aller Proben. Ohne die deutlich abweichenden Proben 11 und 1 ergibt sich ein Mittelwert von etwa 0,58 % TS. Bei gesamt Betrachtung der Magnesiumgehalte im Probenverlauf ist eine leicht abfallende Tendenz von Probe 3 bis 10 im Rinnenverlauf erkennbar.

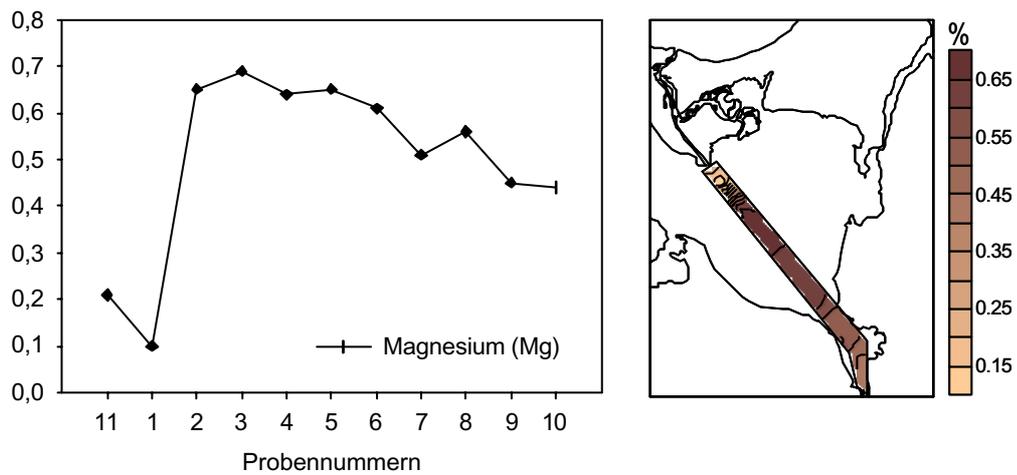


Abb. 4.2.2 - 8: Magnesiumgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in % TS).

4.2.3 Sonstige Inhaltstoffe

Aluminium (Al)

Aluminium ist das häufigste Metall der kontinentalen Kruste und zählt zu den Leichtmetallen. Es ist mit 8,2 % in der Erdkruste enthalten (ALLOWAY & AYRES, 1996).

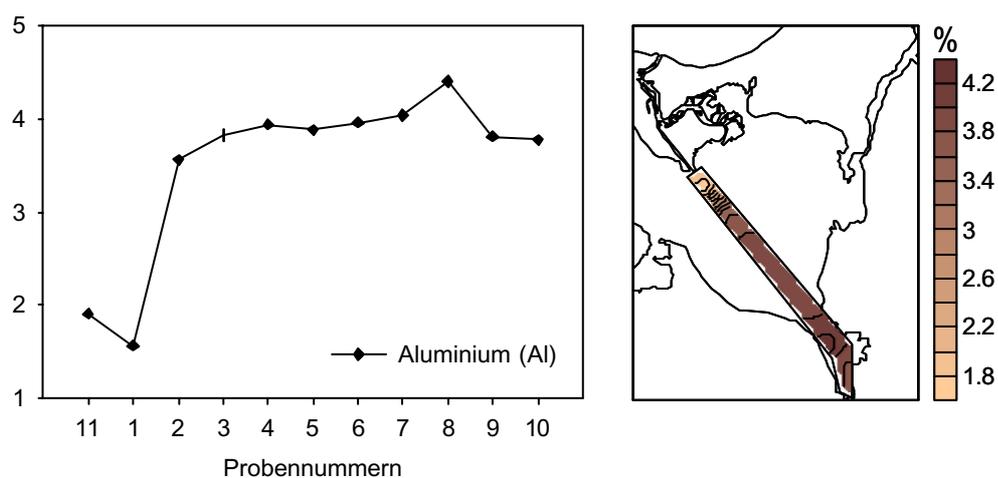


Abb. 4.4.3 - 1: Aluminiumgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in % TS).

Der minimale Gehalt an Aluminium wurde in der Probe 1 mit einem Wert von 1,57 % TS gemessen. Das Maximum ist in Probe 8 mit 4,4 % TS zu verzeichnen. Bei Betrachtung der

Aluminiumgehalte im Rinnenverlauf wird möglicherweise ein leicht ansteigender Trend von Probe 2 bis 8 erkennbar. Ab Probe 8 sinkt der Aluminiumgehalt wieder.

Lithium (Li)

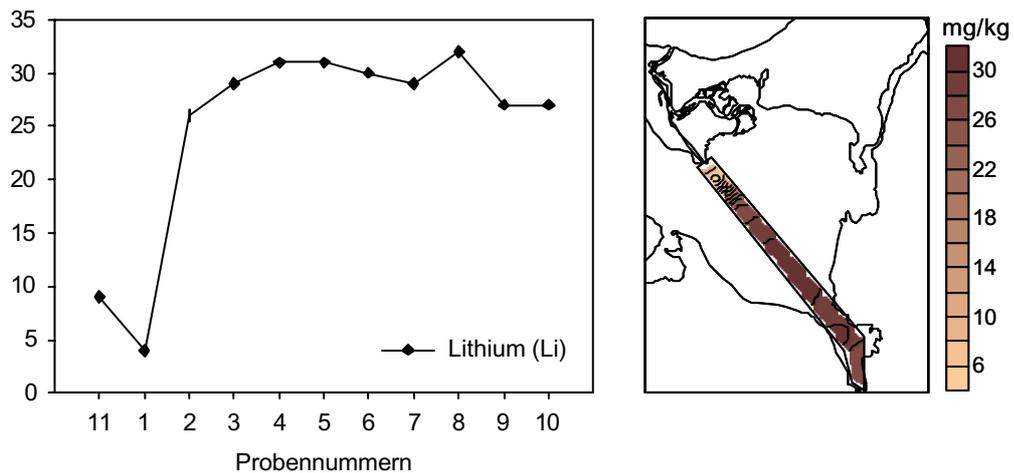


Abb. 4.4.3 - 2: Lithiumgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in mg/kg TS).

Lithium ist in den Proben des Schifffahrtskanals mit Werten von 4 mg/kg in der Probe 1 (Minimum) bis 32 mg/kg in der Probe 8 (Maximum) vertreten. Ein eindeutiger Trend der Lithiumgehalte im Rinnenverlauf ist nicht erkennbar.

4.3 Mineralogie

Quarz (SiO₂)

Quarz ist nach den Feldspäten das häufigste Mineral der kontinentalen Erdkruste. Nach der Mohs'schen Härteskala hat es die Härte 7 und ist ein chemisch sehr widerstandsfähiges Mineral, wodurch es bei Verwitterungsprozessen nahezu unangegriffen erhalten bleibt. Durch mechanische Zerkleinerung, Transport und Zersetzung der anderen, weniger resistenten Gesteinskomponenten kommt es zur Bildung klastischer Quarzsedimente.

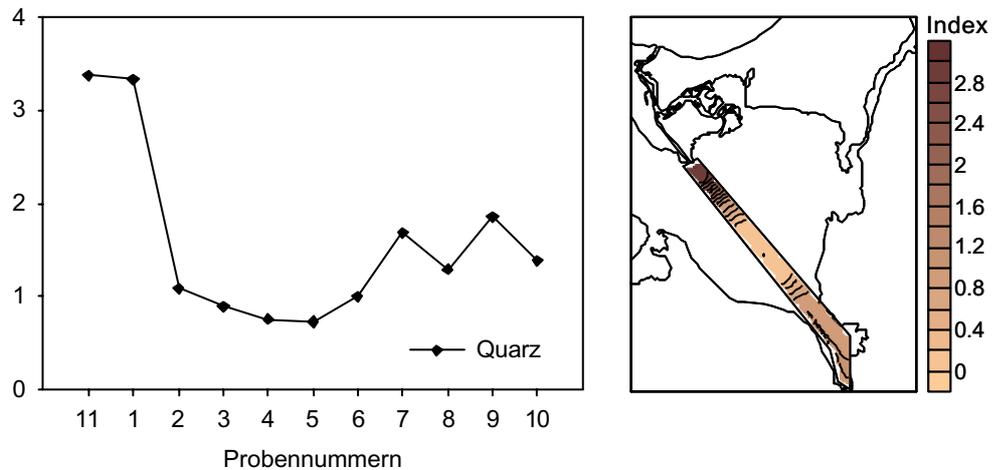


Abb. 4.3 - 1: Quarzgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

Die Quarzgehalte sind als Indexwerte angegeben. Diese Indexwerte beschreiben die Größenordnungen der jeweiligen Inhalte in den Sedimentproben. Erkennbar sind die Verhältnisse der verschiedenen Quarzgehalte, aber keine absoluten Gehaltswerte. Zu erkennen ist, dass in den Proben 1 und 11 ein verhältnismäßig hoher Quarzanteil enthalten ist. Die Werte liegen hier bei 3,33 und 3,37. Damit ist in Probe 11 das Maximum anzutreffen. Die Werte der Proben 2 bis 6 liegen zwischen 0,73 und 1,08. Der Wert 0,73 in Probe 5 gibt den minimalen Quarzanteil wider. In den Proben 7 bis 10 liegen die Werte bei 1,29 bis 1,85.

Feldspat

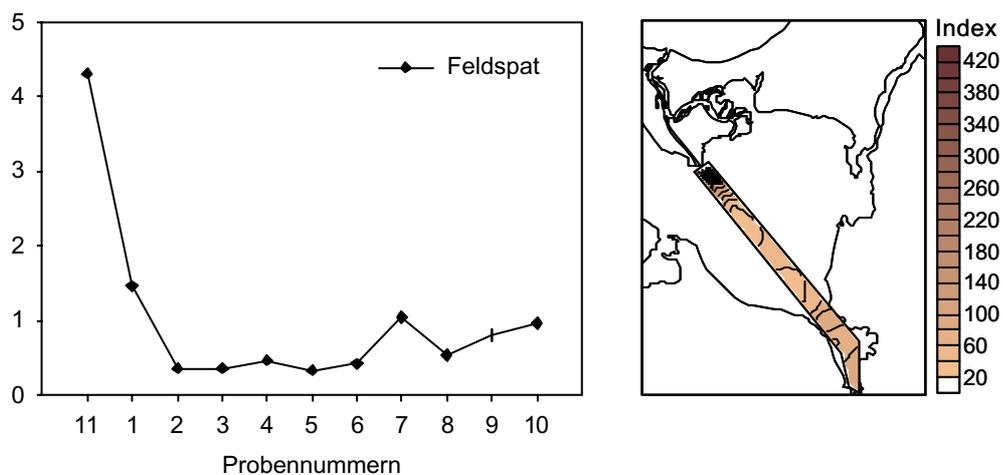


Abb. 4.3 - 2: Feldspatgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

Feldspäte sind mit etwa 60 Vol.% die häufigsten Minerale der Erdkruste (MATTHES, 2001). Verschiedene Arten von Feldspäten kommen vor. Die so genannten Plagioklase, auch Kalknatronfeldspäte, sind Calcium-Natrium-Feldspäte wie Albit ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) und Anorthit ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$). Bei Orthoklas handelt es sich um Kalifeldspat mit der chemischen Zusammensetzung $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$.

Die Indexwerte, die den Feldspatgehalt in den Proben beschreiben, haben eine Schwankungsbreite von 0,33 (Minimum in Probe 5) bis 4,31 (Maximum in Probe 11). Auch in Bezug auf den Feldspatgehalt lassen sich die Proben grob in drei Gruppen aufteilen. Die Proben 1 und 11 sind wieder durch einen hohen Gehalt gekennzeichnet (1,46 und 4,31). Die darauf folgenden Proben 2 bis 6 weisen geringere Werte zwischen 0,33 und 0,46 auf. Die Proben 7 bis 10 enthalten etwas höhere Feldspatgehalte von 0,53 bis 1,04.

Das Foto 4.3 - 1 zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Kali-Feldspats, welches sich anteilig aus Silicium (61,66 % Atomgewicht), Aluminium (23,95 % Atomgewicht) und Kalium (14,39 % Atomgewicht) zusammensetzt.

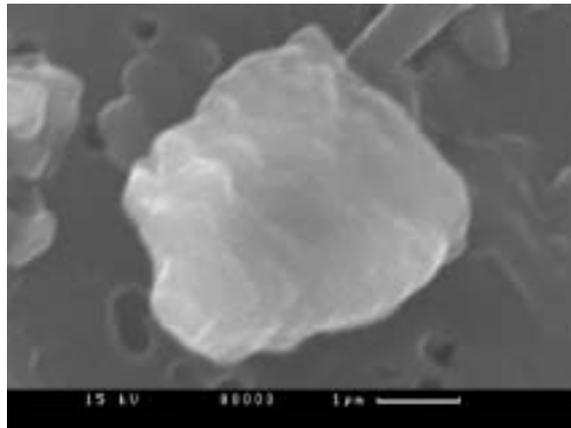


Foto 4.3 - 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Feldspatpartikels.

Calcit

Calcit hat die chemische Zusammensetzung CaCO_3 und ist ein so genannter Kalkspat.

In Bezug auf die Verteilung der Calcitgehalte, ist keine eindeutige Einteilung der Proben nach ähnlichen Gehalten in verschiedenen Kanalbereichen möglich. Der minimale Wert wurde in Probe 1 mit 0,2 gemessen, während der maximale Wert direkt in der benachbarten Probe (Probe 2) mit 2,39 gemessen wurde. Von Probe 4 bis 10 ist ein deutlich abfallender Trend im Calcitgehalt zu erkennen. Der Gehalt sinkt konstant von 2,10 auf 0,6.

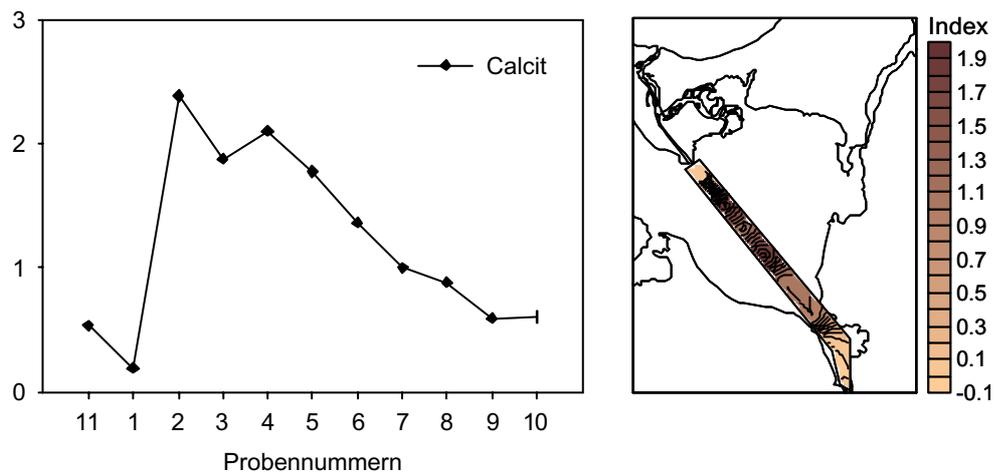


Abb. 4.3 - 3: Calcitgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

In Foto 4.3 - 2 ist ein Calcitkristall zu sehen, was EDX-Analysen bestätigt haben. Foto 4.2 - 3 zeigt neben einigen Kieselalgen ebenfalls Calcit.

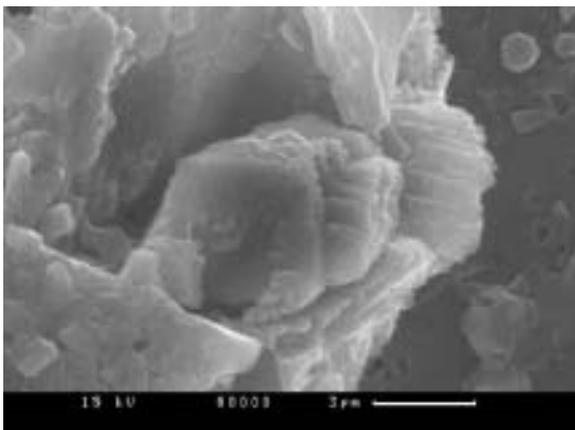


Foto 4.3 - 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Calcitkristalls.

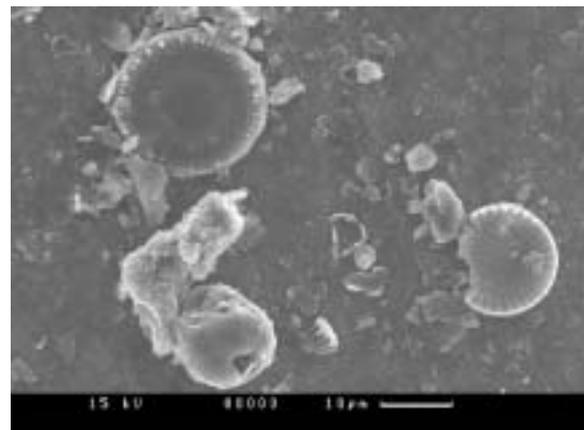


Foto 4.3 - 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Calcit und Kieselalgen.

Dolomit

Dolomit ist ein Calcium-Magnesium-Karbonat mit der chemischen Zusammensetzung $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Dolomit weist ähnliche Eigenschaften wie Calcit auf und entsteht durch Einlagerung von Magnesium in Kalke während der Diagenese.

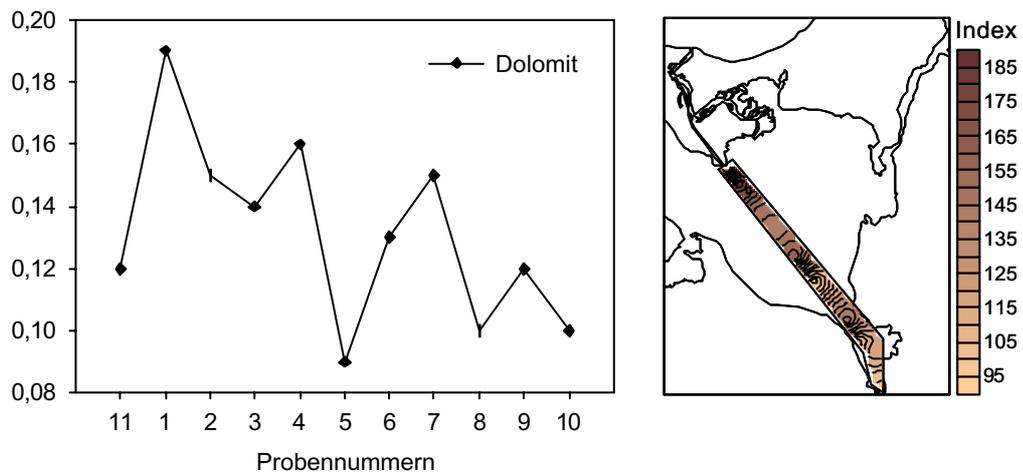


Abb. 4.3 - 4: Dolomitgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

Die Dolomitgehalte in den Proben des Schifffahrtskanals weisen keine ausgeprägte Schwankungsbreite auf, wie sie z.B. bei Feldspatgehalten zu finden war. Der minimale Dolomitgehalt ist in Probe 5 mit 0,09 festzustellen und das Maximum tritt in der Probe 1 mit einem Wert von 0,19 auf. Im Schnitt sind die Dolomitgehalte in den Proben 11 bis 4 höher, als in den Proben 5 bis 10. Daraus lässt sich möglicherweise ein abfallender Trend erkennen, der jedoch nicht deutlich ausgeprägt ist.

Pyrit

Pyrit ist ein Eisensulfid mit der chemischen Zusammensetzung FeS_2 , welches auch Schwefelkies oder Eisenkies genannt wird (MATTHES, 2001).

Die Pyritgehalte schwanken von 0,02 in Probe 1 (Minimum) bis 0,17 in Probe 3 (Maximum). Die Pyritgehalte der Proben 11 und 1 sind deutlich geringer als in den übrigen Proben. Auch hier ist ein abfallender Trend der Pyritgehalte von Probe 3 bis 10 zu erkennen.

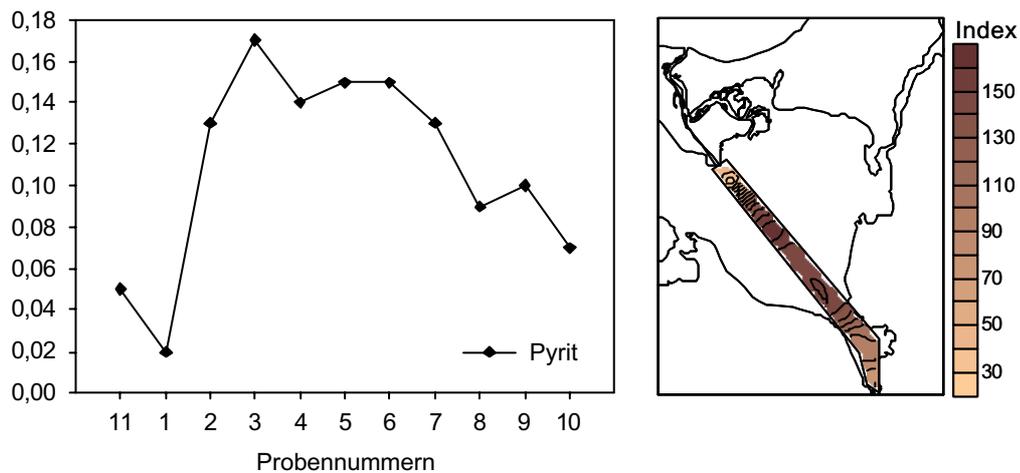


Abb. 4.3 - 5: Pyritgehalte in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals.

Foto 4.3 - 4 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Pyritkristallen aus der Probe 3. EDX-Analysen haben die Zusammensetzung aus Eisen und Schwefel bestätigt. Die für Pyrit typisch kubische Kristallform ist deutlich zu erkennen.

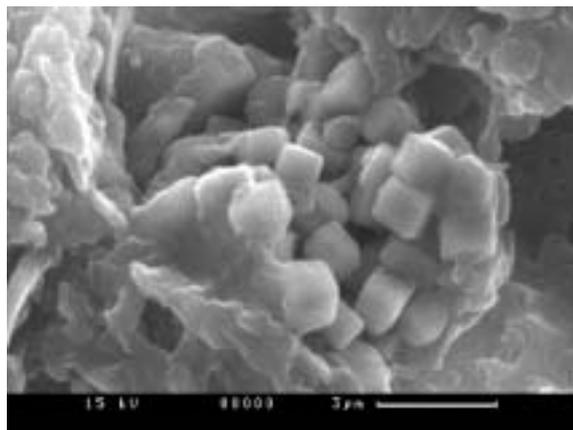


Foto 4.3 - 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von kubischen Pyritkristallen.

4.4 Tonmineralogie

Tonminerale gehören zu den wichtigsten bei der Verwitterung entstehenden Silicaten. Sie sind kristalline, OH-haltige Al-K-Mg-Na-Fe-Silicate und wesentliche Bestandteile vieler Böden und Sedimente. Es gibt Zwei-Schicht- und Drei-Schicht-Tonminerale. Sie sind blättchenförmig und im Rahmen ihres Grundaufbaus aus Tetraeder- und Okaeder-Lagen chemisch sehr unterschiedlich zusammengesetzt und bilden viele Übergänge.

Der Gehalt der einzelnen Tonminerale wird in Prozent vom Gesamttonmineralgehalt angegeben.

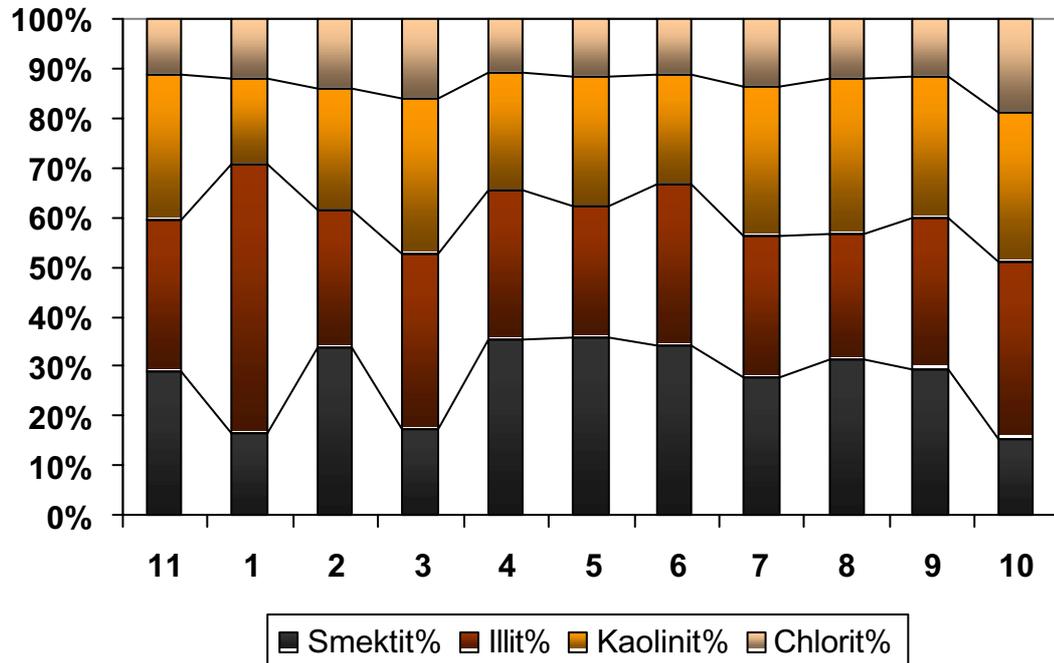


Abb. 4.4 - 1: Gehalte der vier gemessenen Tonminerale Smektit, Illit, Kaolinit und Chlorit in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals (in % des Gesamttonmineralgehaltes).

Smektit

Smektit ist ein Drei-Schicht-Tonmineral, dass in Mg-, Fe- und Al-reichen Formen vorkommt.

Die Schwankungsbreite der Smektitgehalte liegt zwischen 15,7 % (Minimum, Probe 10) und 36 % (Maximum, Probe 5). Besonders im Bereich der Proben 11 bis 4 treten deutliche Schwankungen auf. Im Durchschnitt enthält die Tonfraktion der Proben etwa 28 % Smektit. Im Verlauf des Schifffahrtskanals ist kein eindeutiger Trend zu erkennen.

Illit

Illit gehört ebenfalls zu den Drei-Schicht-Tonmineralen.

Der Großteil der Proben hat einen Illitgehalt zwischen 25,2 % (Minimum, Probe 8) und 35,3 %. Das Maximum ist in der Probe 1 mit einem Illitgehalt von 54,1 % zu finden. Der durchschnittliche Illitanteil an der Tonfraktion beträgt etwa 32,3 %. Ein Trend der Illitgehalte im Rinnenverlauf wird nicht deutlich.

Chlorit

Chlorit ist ein glimmerartiges Drei-Schicht-Tonmineral.

Im Verhältnis zu den anderen Tonmineralen ist Chlorit in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals deutlich weniger vertreten. Der maximale Wert liegt bei 18,9 % in der Probe 10. Das Minimum ist in Probe 4 mit 10,8 % zu verzeichnen. Im Durchschnitt sind etwa 13 % der Tonminerale in den Proben Chlorite. Es wird kein eindeutiger Gradient im Rinnenverlauf deutlich.

Kaolinit

Kaolinit ist das wichtigste Zwei-Schicht-Tonmineral. Es ist aus 1:1-Schichten aus je einem SiO-Tetraeder und einem AlO-Oktaeder aufgebaut. Kaolinit verfügt über wenig bodenhaushaltlich günstige Eigenschaften, da durch das Fehlen eines negativen Ladungsüberschusses nur eine geringe Sorptionskraft für H₂O-Moleküle und Nährstoffe besteht.

Den maximalen Kaolinitgehalt weist Probe 3 mit 31,4 % auf und das Minimum ist in Probe 1 mit 17,1 % zu finden. Im Durchschnitt enthält die Tonfraktion etwa 26,7 % Kaolinit. Ein Gradient im Rinnenverlauf ist nicht erkennbar.

Die Fotos 4.4 - 1 und 4.4 - 2 zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Tonmineralen. Foto 4.4 - 1 zeigt, wie durch EDX-Analysen festgestellt, Kaolinit, welches sich aus Silicium und Aluminium zusammensetzt (Verhältnisse der Atomgewichte: Al 44,99 %, Si 55,01 %). Bei dem Mineral in Foto 4.4 - 2 handelt es sich ebenfalls um ein Tonmineral.

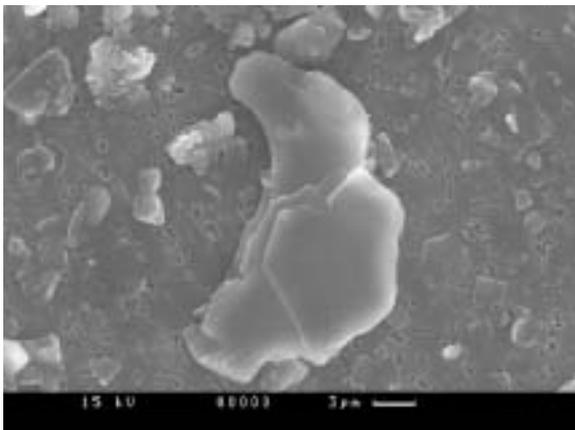


Foto 4.4 - 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines blättchenförmigen Kaolinites.

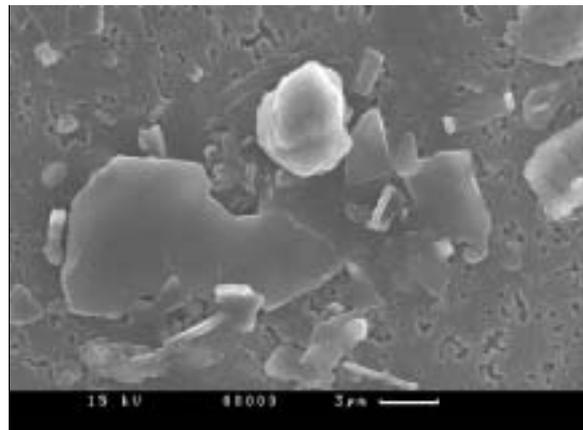


Foto 4.4 – 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme blättchenförmiger Tonminerale

4.5 Tiefenprofil des Schifffahrtskanals durch Echolotaufnahmen

Das mit Hilfe von Echolotaufnahmen angefertigte Tiefenprofil des Schifffahrtskanals zeigt im Bereich des offenen Haffs einen recht homogenen Tiefenverlauf (von etwa 53,68°N bis 53,81°N). In diesem Bereich weist der Kanal Tiefen zwischen 9,61 m und 10,81 m auf, durchschnittlich etwa 10,37 m. Diesem Bereich folgt eine tiefe Einsenkung, die sich direkt an der Mündung zum Swina-Kanal befindet. Im weiteren Kanalverlauf im Bereich zwischen den Inseln Usedom und Wolin

zeigt sich kein homogenes Tiefenprofil. Es treten deutliche Schwankungen in der Tiefe auf, die im Bereich von 9,68 m und 17,51 m liegen. Die durchschnittliche Tiefe liegt hier bei 11,96 m.

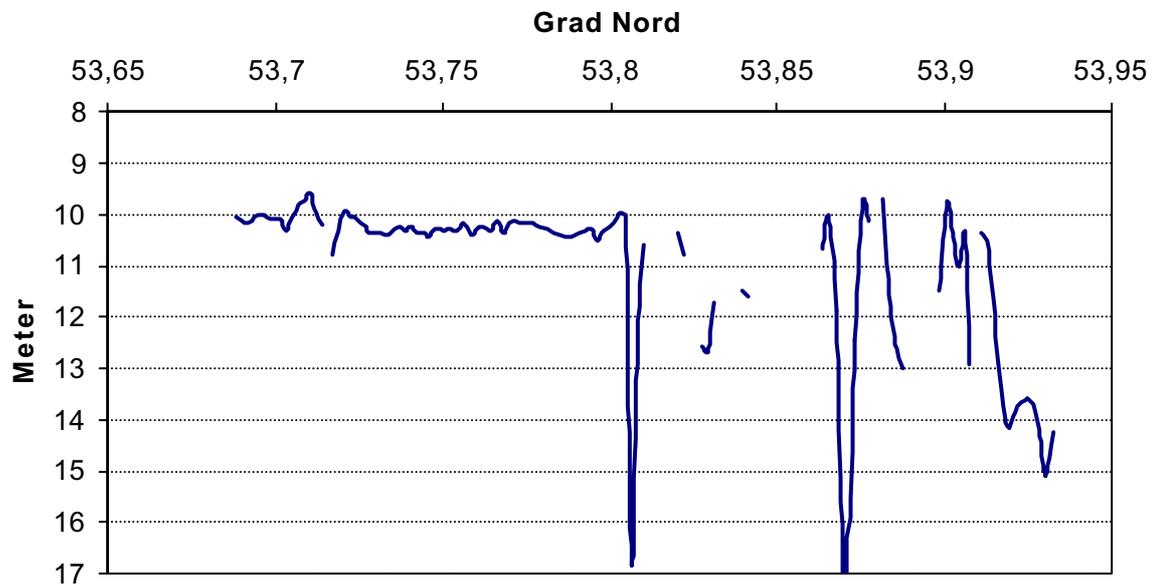


Abb. 4.5 - 1: Darstellung der Echolotaufnahme der Kanaltiefe von Süd nach Nord

4.6 Bilanzierung

Im Kanal werden vom MOS jährlich Baggerungen durchgeführt, um die Tiefe von 10,5 m für die Schifffahrt gewährleisten zu können. Hierbei werden pro Jahr in den verschiedenen Abschnitten des Kanals große Mengen an Sediment entnommen.

Nach Informationen des Maritime Office of Szczecin, Plac Batorego 4, 70-207 Szczecin (unveröffentlichte Daten) werden pro Jahr durchschnittlich etwa 1.490.313 m³ Baggergut aus dem Kanal entnommen. Legt man für dieses Material die Trockenraumdichte zu Grunde, die im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wurde (0,2 g/cm³; siehe Kap. 4.1), ergibt sich eine jährliche Entnahme von 298.063 t Trockensubstanz. Bei der Betrachtung der jährlichen Baggermengen fällt zudem auf, dass die Mengen von 441.962 m³ im Jahr 1949 bis 4.253.572 m³ im Jahr 1977 schwanken. In dem Zeitraum von Ende der 60er Jahre bis Anfang der 80er Jahre, wird im Schnitt etwa doppelt so viel Sediment aus der Schifffahrtsrinne entnommen, wie in den Jahren davor und danach. In einem Zeitraum von 15 Jahren wurden von 1968 bis 1982 jährlich im Durchschnitt ungefähr 2.571.625,07 m³ Nassbaggergut aus der Rinne entnommen. 1986 bis 2000 wurden in einer Zeit von ebenfalls 15 Jahren lediglich 1.024.379,4 m³ Nassbaggergut pro Jahr ausgebaggert. Dies entspricht einer Entnahme von 204.876 t Trockensubstanz.

Dieses ausgebaggerte Material enthält große Mengen der von der Oder eingeschwemmten Nähr- und Schadstoffe. Tabelle 4.6 - 1 zeigt die Berechnungen über die jährlichen Mengen, die durchschnittlich im Baggergut enthalten sind.

Inhaltsstoff	Durchschnittlicher Gehalt im Kanalschlick (ohne Probe 1 und 11)	Menge in 298.063 t TS (1949-2000)	Menge in 204.876 t TS (1986-2000)
TOC	107,05 mg/g	31.907,59 t	21.931,96 t
N	10,74 mg/g	3.201,19 t	2.200,37 t
P	4,66 mg/g	1.388,97 t	954,72 t
S	8,39 mg/g	2500,74 t	1.718,91 t
Mg	5,8 mg/g	1.728,76 t	1.188,28 t
Ca	40,4 mg/g	12.041,73 t	8.276,99 t
Pb	139 mg/kg	41,43 t	28,48 t
Cu	130,11 mg/kg	38,78 t	26,66 t
Mn	2948,22 mg/kg	878,75 t	604,02 t
Ni	44 mg/kg	13,11 t	9,01 t
Fe	40,5 mg/g	12.071,53 t	8.297,47 t
Zn	1039,67 mg/kg	309,89 t	213,0 t

Tab. 4.6 - 1: Durchschnittsgehalte verschiedener Elemente im Schlicksediment des Schifffahrtskanals und daraus resultierende Mengen im jährlichen Baggergut.

Wie in Kapitel 2.1.4 erwähnt, werden nach Abschätzungen von LEIPE et al., 1998 etwa 425.000 t SPM pro Jahr von der Oder in das Haff transportiert. Nach den oben aufgeführten Angaben des MOS werden pro Jahr etwa 298.063 t TS aus dem Kanal und somit aus dem Ökosystem Haff entnommen. Dies entspricht etwa 70 % der von der Oder eingetragenen Materialmenge. In den Jahren 1986 bis 2000 waren es etwa 204.876 t TS, die entnommen wurden, was ca. 48 % der Menge an eingetragenen Material entspricht. Das im Kanal abgelagerte Material setzt sich aus Oderfracht und umgelagertem Material aus dem Haff zusammen. Es kann daher nicht gesagt werden, dass etwa 70 % der Oderfracht wieder entnommen werden, da es sich auch um im Haff umgelagertes Material handelt.

In Kapitel 2.1.4 wurde ebenfalls die jährliche Fracht an TOC, P, N, S, Pb, Cu und Zn nach LEIPE et al., 1998 aufgeführt. Im Vergleich zu den hier berechneten Mengen, die im Baggergut von 1949 bis 2000 enthalten sind, ergibt sich folgendes Bild. Etwa 78 % der Menge des von der Oder eingetragenen Kupfers, 49 % der Menge an Blei, 44 % der Menge an Zink, 49 % der Menge an TOC und etwa 6% der Menge an eingetragenen Gesamt-Stickstoff werden mit dem Baggergut entnommen. Der Gesamtphosphoreintrag durch die Oder beträgt nach LEIPE et al., 1998 8.000 t pro Jahr, was bedeutet, dass etwa 17 % der eingetragenen Menge mit dem Baggergut entnommen wird. Eine deutliche Abweichung ist beim Schwefel zu erkennen. Nach LEIPE et al., 1998 werden pro Jahr etwa 1.700 t S durch die Oder in das Haff transportiert. Die im Sediment des Schifffahrtskanals ermittelten Schwefelgehalte lassen auf eine jährliche Entnahme mit dem Baggergut von 2.500 t schließen, was etwa das 1,5fache der von der Oder eingetragenen Menge entspricht.

Zieht man für diese Berechnungen die ebenfalls in Kapitel 2.1.4 aufgeführten Werte aus HELCOM, 1999 heran, die etwas von den Werten aus LEIPE et al., 1998 abweichen, erhält man folgende Verhältnisse. Etwa 58,59 % der Menge des eingetragenen Kupfers, 75 % des eingetragenen Bleis, 80 % des eingetragenen Zinks sowie etwa 28 % der Menge des eingeschwemmten Phosphors sowie 4% der Menge des eingeschwemmten Stickstoffs wurden jährlich mit dem Baggergut von 1949 bis 2000 entnommen.

4.7 Strömungsmodellierung mit FEMFLOW2D

Mit dem Simulationsmodell FEMFLOW2D wurde das Strömungsfeld im Oderhaff bei einer Kanaltiefe von 10,5 m sowie einer theoretischen, zukünftigen Kanaltiefe von 14,5 m berechnet. Die Simulationen erfolgten für die Windrichtungen Ost, Nordost, Nordwest, Nord, Südost, Südwest, Süd und West. Herr Iwan Tekujusuma vom Institut für Ostseeforschung in Warnemünde arbeitet mit diesem Modell und führte die Modellierungen für das Haff in seinem heutigen Zustand durch. Anschließend wurden die Tiefe des Kanals manuell bearbeitet und auf die theoretischen 14,5 m vertieft und die Modellläufe erneut durchgeführt.

Strömungsfelder bei Südwest-Wind:

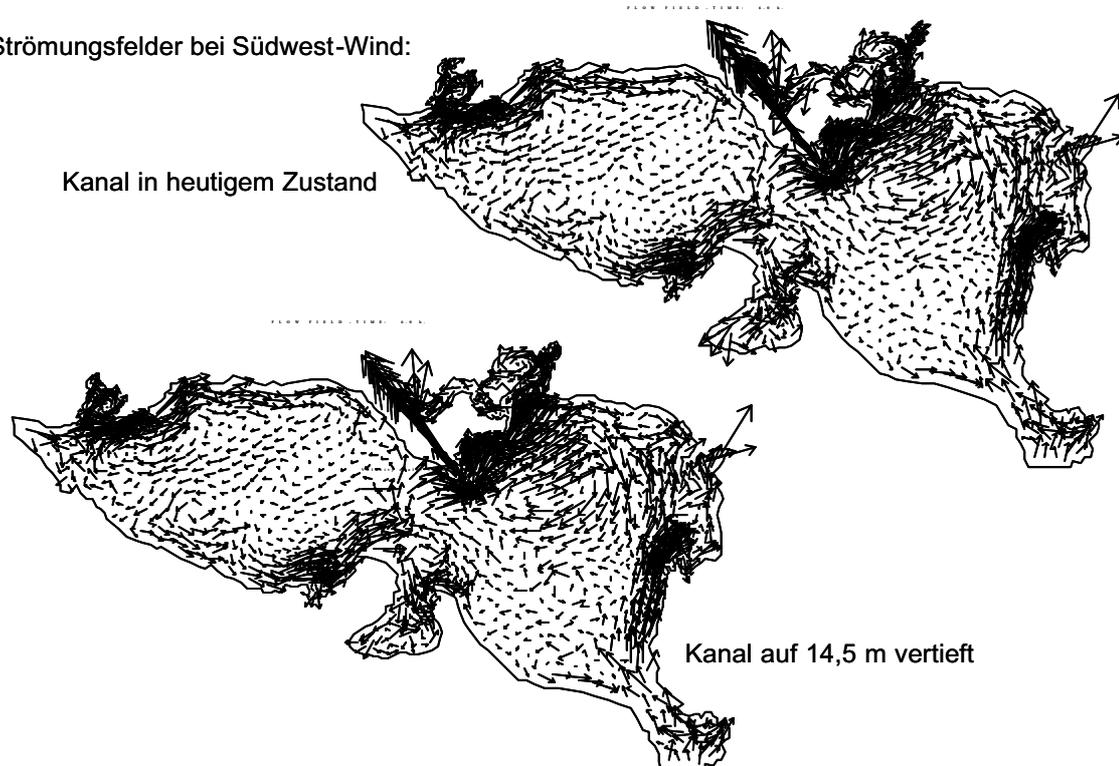


Abb. 4.7 – 1: Strömungsfelder im Oderhaff bei heutiger Kanaltiefe und bei vertieftem Kanal nach dem Simulationsmodell FEMFLOW 2D bei Südwest-Wind (häufige Windrichtung in dieser Region).

Die Abb. 4.7 – 1 zeigt die mit FEMFLOW2D modellierten Strömungsverhältnisse im Oderhaff für das Haff in heutigem Zustand mit einem etwa 10,5 m tiefen Kanal, sowie mit dem zukünftig auf 14,5 m vertieften Kanal. Dargestellt sind die Strömungsverhältnisse bei Südwest-Wind, einer für die Region typischen Windsituation. Die Pfeillängen deuten in etwa die Fließgeschwindigkeiten an, die an dem jeweiligen Punkt errechnet wurden. Erkennbar ist, dass das Wasser, das durch die Oder in das Haff strömt in beiden Fällen nicht einfach dem Kanalverlauf folgt, sondern verschiedene Bereiche des Haffs passiert. Im Bereich der Schifffahrtsrinne sind deutliche Querströmungen zu erkennen, die über den Kanal hinweg fließen.

Um mögliche Veränderungen im Strömungsfeld und Abflussregime bei zukünftig tieferem Kanal zu erkennen, wurden vergleichende Berechnungen aus beiden Modellierungen durchgeführt. Hierbei wurde ein Querschnitt durch den Piastowski-Kanal festgelegt, der im Modell durch die Knotenpunkte 1116, 1115 und 1113 dargestellt wird. Die Lage des Querschnittes ist in Abb. 4.7 - 2 zu sehen.

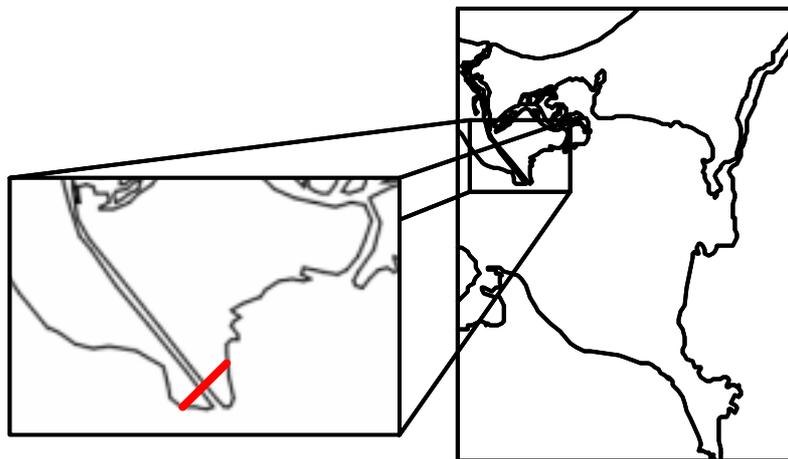


Abb. 4.7 – 2: Lage des Kanalquerschnittes im Piastowski-Kanal (rote Markierung).

Das Modell berechnet für jeden Knotenpunkt verschiedene Parameter, unter anderem die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit. Zudem ist jedem Knotenpunkt eine Meterangabe zugeordnet, die die Lage im Modellraum angibt. Mit Hilfe dieser Meterangaben wurde die theoretisch im Modell angenommene Kanalbreite ermittelt (siehe Abb. 4.7 – 3).

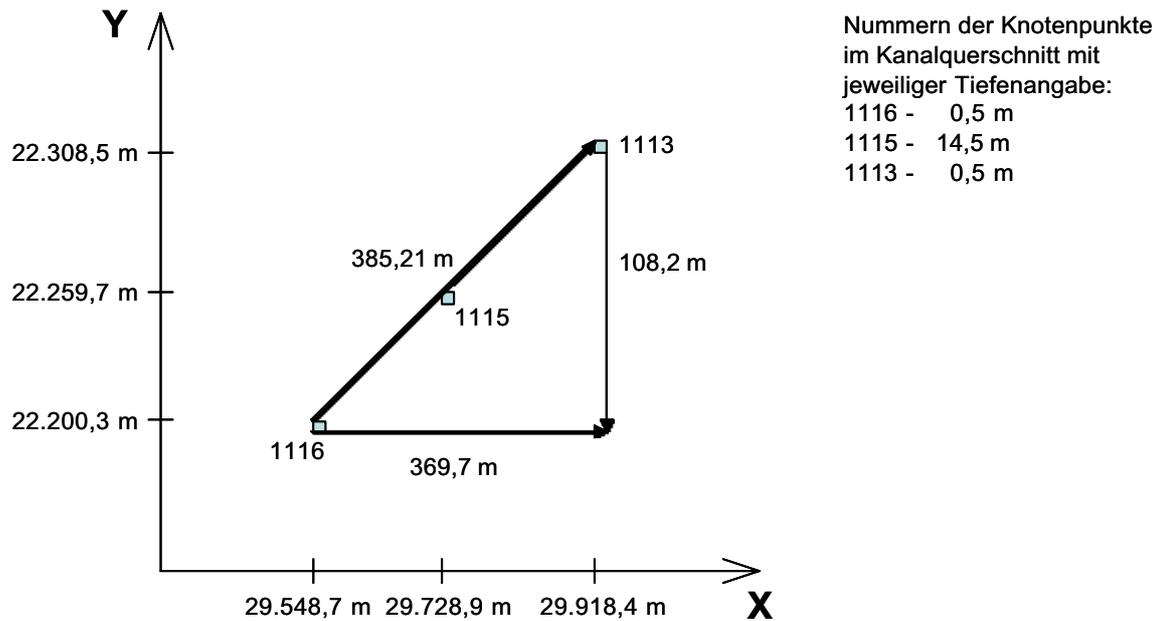


Abb. 4.7 – 3: Berechnung der im Modell angenommenen theoretischen Kanalbreite aus den Meterangaben, die jedem Knotenpunkt im Modell die Lage zuweisen.

Kanalquerschnitt, wie im Modell angenommen:

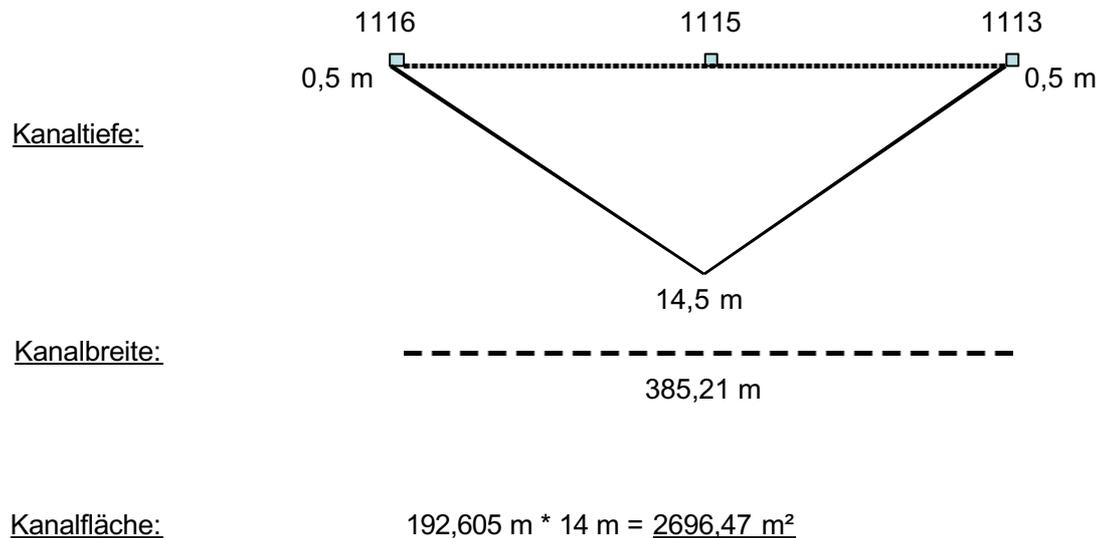


Abb. 4.7 – 4: Berechnung der Kanalquerschnittsfläche aus den Angaben des Simulationsmodells FEMFLOW 2D.

Die Tabelle 4.7 – 1 enthält die Fließgeschwindigkeiten, die im Modell für die Knotenpunkte 1116, 1115 und 1113 für die Kanaltiefe im heutigen Zustand (im Modell bei Knotenpunkt 1116 10,4779 m) verschiedenen Windrichtungen errechnet wurden, sowie die berechneten Wassermengen, die sich aus den Fließgeschwindigkeiten und den jeweiligen Flächen ergeben. In der rechten Spalte der Tabelle sind die Gesamtmengen angegeben, die bei den verschiedenen Windrichtungen dem Modell nach durch den Piastowski-Kanal in die Ostsee abfließen.

Knotenpunkt		1116	1115	1113	Gesamtmenge (m ³ /s)
Querschnittsfläche bei 10,4779 m Kanaltiefe (m²)		240,22	1441,35	240,22	1921,79
Ostwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,044606	0,12719	0,038787	
	Wassermenge (m ³ /s)	10,7154	183,3247	9,3176	203,36
Nordostwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,029126	0,14211	0,021286	
	Wassermenge (m ³ /s)	6,9968	204,8295	5,1134	216,94
Nordwestwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,0084401	0,16744	0,011259	
	Wassermenge (m ³ /s)	2,0275	241,3388	2,7047	246,07
Nordwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,0048436	0,15746	0,0094759	
	Wassermenge (m ³ /s)	1,1635	226,9542	2,2763	230,39
Südostwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,051853	0,12438	0,046745	
	Wassermenge (m ³ /s)	12,4563	179,2745	11,2293	202,96
Südwestwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,038779	0,15539	0,031765	
	Wassermenge (m ³ /s)	9,3157	223,9706	7,6307	240,92
Südwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,049291	0,13377	0,0442	
	Wassermenge (m ³ /s)	11,8409	192,8087	10,6179	215,35
Westwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,014515	0,17463	0,014845	
	Wassermenge (m ³ /s)	3,4869	251,7021	3,5661	258,76

Tab. 4.7 – 1: Berechnungen der theoretisch durch den Piastowski-Kanal abfließenden Wassermengen aus dem Strömungsmodell Femflow2D mittels Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit in Bezug auf die theoretischen Kanalquerschnittsfläche bei einer Kanaltiefe von ca. 10,5 m.

Die Tabelle 4.7 – 2 enthält die Fließgeschwindigkeiten, die im Modell für die Knotenpunkte 1116, 1115 und 1113 für die zukünftige Kanaltiefe (im Modell bei Knotenpunkt 1116 14,5 m) verschiedenen Windrichtungen errechnet wurden, sowie die berechneten Wassermengen, die sich aus den Fließgeschwindigkeiten und den jeweiligen Flächen ergeben. In der rechten Spalte der Tabelle 4.7 – 2 sind die Gesamtmengen angegeben, die bei den verschiedenen Windrichtungen dem Modell nach durch den Piastowski-Kanal in die Ostsee abfließen werden, wenn der Kanal auf 14,5 m vertieft wurde.

Knotenpunkt		1116	1115	1113	Gesamtmenge (m ³ /s)
Querschnittsfläche bei 14,5 m Kanaltiefe (m²)		337,0588	2022,3524	337,0588	2696,47
Ostwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,043226	0,092901	0,033955	
	Wassermenge (m ³ /s)	14,5697	187,8786	11,4448	213,89
Nordostwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,02435	0,10955	0,01048	
	Wassermenge (m ³ /s)	8,2074	221,5487	3,5324	233,29
Nordwestwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,0057969	0,13877	0,03283	
	Wassermenge (m ³ /s)	1,9539	280,6418	11,0656	293,66
Nordwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,0047286	0,12796	0,030294	
	Wassermenge (m ³ /s)	1,5938	258,7802	10,2109	270,59
Südostwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,051392	0,090451	0,042659	
	Wassermenge (m ³ /s)	17,3221	182,9238	14,3786	214,62
Südwestwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,039324	0,12759	0,022023	
	Wassermenge (m ³ /s)	13,2545	258,0319	7,4231	278,71
Südwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,049697	0,10129	0,03907	
	Wassermenge (m ³ /s)	16,7508	204,8441	13,1689	234,76
Westwind	Fließgeschwindigkeit (m/s)	0,016294	0,14257	0,0091276	
	Wassermenge (m ³ /s)	5,492	288,3268	3,0765	296,90

Tab. 4.7 – 2: Berechnungen der theoretisch durch den Piastowski-Kanal abfließenden Wassermengen aus dem Strömungsmodell Femflow2D mittels Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit in Bezug auf die theoretischen Kanalquerschnittsfläche bei einer zukünftigen Kanaltiefe von ca. 14,5 m.

Zu erkennen ist, dass die Fließgeschwindigkeiten bei einem zukünftig 14,5 m tiefen Piastowski-Kanal in diesem Bereich dem Modell nach abnehmen werden. Das Modell errechnet bei fast allen Windrichtungen bis auf wenige Ausnahmen für die Knotenpunkte geringere Fließgeschwindigkeiten im Vergleich zu dem Modelllauf mit dem flacheren Kanal von 10,4779 m. Ausnahmen sind die Geschwindigkeiten an Knotenpunkt 1113 bei Nord- und Nordwestwind und an Knotenpunkt 1115 bei Westwind.

5. Diskussion

5.1 Methodenkritik

Probenahme

Die Probenahme wurde von Doc. dr hab. Norbert Wolnomiejski vom Sea Fisheries Institute (Research Station in Swinoujscie) übernommen.

Da die Probenahme nur zu einem einzigen Zeitpunkt durchgeführt wurde, ist die zeitliche Repräsentativität der gewonnenen Daten für die Sedimente des Schifffahrtskanals möglicherweise nicht ohne weiteres gegeben. Alle 11 untersuchten Proben wurden im Oktober 2001 genommen. Die Transportfracht der Oder ist jedoch stark abfluss- und jahreszeitenabhängig. Daher würde die Zusammensetzung der Oberflächenproben zu einer anderen Jahreszeit möglicherweise anders ausfallen. Um eine größere zeitliche Repräsentativität zu erreichen, hätten mehrere Probenahmen zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt werden müssen.

Ein weiterer kritischer Aspekt, ist in der Probenmenge zu sehen. Um mögliche Fehler weitgehend ausschließen zu können, hätten im Kanalverlauf eine größere Anzahl an Proben genommen werden können. Da die gemessenen Werte jedoch nur in sehr seltenen Fällen starke Fluktuationen aufweisen, ansonsten aber regelmäßige Verläufe ergaben, erscheint die Probenmenge durchaus der Fragestellung entsprechend.

Nicht an allen Stellen des Kanals war eine Probenahme möglich. Im nördlichen Kanalbereich zwischen den beiden Inseln Usedom und Wolin (Piaostowski-Kanal) konnte aufgrund des kompakten Substrates keine Probenahme durchgeführt werden. Um den Einfluss der Ostsee und der Oderfracht besser beurteilen und ein vollständiges Bild über den Sedimenttransport gewinnen zu können, wäre eine Probenahme auch in diesem Kanalbereich von Nutzen gewesen.

Laboranalysen

Die Laboranalysen wurden jeweils an einer Probe pro Probenpunkt durchgeführt. Um Messfehler oder zufällige Abweichungen weitestgehend ausschließen zu können, wäre die Analyse von mehreren Proben pro Probenpunkt sinnvoll gewesen.

Bei der Korngrößenanalyse wurde ein Laseranalysegerät verwendet, das durch foto-optische Zählung die Anteile der einzelnen Korngrößenfraktionen bestimmt. Durch die Verwendung dieser Methode könnte es zu Ungenauigkeiten gekommen sein da besonders bei größeren Fraktionen ($> 150 \mu\text{m}$ (Sand)) bei dieser Methode Ungenauigkeiten in den Messungen auftreten können. Exakter wäre hier für die größeren Korngrößenfraktionen das Nasssieben gewesen und die kleineren Fraktionen hätten mit dem so genannten Atterberg-Verfahren unter Anwendung des Stokesschen Gesetzes über die Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Größenfraktionen bei unterschiedlichen Bedingungen abgetrennt werden können (vgl. Kap. 3.5.1).

Vergleichsdaten

Um die gewonnenen Daten besser beurteilen zu können, wurden Daten über die Oderfracht, die Sedimente im Oderhaff und der Ostsee aus verschiedenen Quellen herangezogen. Über die Arten der Probenahme und die Labormethoden lagen hier größtenteils keine Informationen vor. Daher ist die Vergleichbarkeit der Daten kritisch zu sehen. Unterschiedliche Probenahme- und Labormethoden können zu von einander abweichenden Ergebnissen führen und so die Vergleichbarkeit der Daten untereinander einschränken.

Es lagen zudem für gleiche Sachverhalte unterschiedliche Werte vor, die von verschiedenen Stellen ermittelt wurden. Eine Beurteilung über die Genauigkeit und die Glaubwürdigkeit der Daten gestaltete sich wegen mangelnder Informationen über die Arbeitsmethoden schwierig, weshalb eine Entscheidung, welchen Daten der Vorzug gegeben werden sollte, nicht ohne weiteres möglich war. In so einem Fall wurde der Mittelwert aus den vorliegenden Daten verwendet, um Ungenauigkeiten durch die Verwendung von nur einer Quelle zu vermeiden.

Statistik

Ein wesentliches Problem bei den statistischen Analysen lag in der geringen Probenmenge. Um die Daten mit statistischen Methoden zu analysieren, wie es zum Beispiel durch Regressionsanalysen gemacht wurde (siehe Kap. 5.2.6), sollte eine deutlich größere Datenmenge vorliegen, um Verfälschungen oder zufällige Trends möglichst ausschließen zu können. Die geringe Datenmenge hat zur Folge, dass erkannte Tendenzen signifikant erscheinen, sich bei einer größeren Datenmenge bzw. Probendichte jedoch als nicht signifikant herausstellen könnten. Daher sind die gewonnenen Ergebnisse durch die Verwendung dieser statistischen Methoden kritisch zu betrachten.

Ein weiteres Problem stellt die Gleichartigkeit des Probenmaterials dar. Neun der 47 Proben weisen ähnliche Zusammensetzungen in Bezug auf die Korngrößenfraktionierung auf. Dies erschwert den Versuch, einen Zusammenhang zwischen beispielsweise Nährstoffgehalten und Korngrößenzusammensetzung herauszustellen. Besser wären deutlich unterschiedliche Proben, um Zusammenhänge mit bestimmten Gehalten besser aufzeigen zu können, da in dem Fall exaktere Aussagen über je-mehr-desto-mehr-, je-mehr-desto-weniger- oder ähnliche Zusammenhänge gemacht werden könnten.

Bilanzierung

Im Rahmen der Bilanzierung (Kap. 4.6) wurden verschiedene Quellen verwendet. Es handelt sich zum Teil um modellierte Berechnungen oder theoretische Abschätzungen über Wasser-aufenthaltszeiten, Strömungsverhalten und Sinkgeschwindigkeiten, die jeweils nur ein ungefähres Bild der tatsächlichen Gegebenheiten widerspiegeln können. Daher können die berechneten Werte in der Bilanzierung nur als relative Tendenzen betrachtet werden, die Auskunft über die ungefähren Größenordnungen geben. Dennoch erschien es sinnvoll, diese Bilanzierungen durchzuführen, da sie einen Überblick über die ungefähren Mengen geben können. Verwendet wurden die

durchschnittlichen jährlichen Baggergutmengen, die in den vergangenen Jahren entnommen wurden, sowie die mittleren Konzentrationen, die für die Kanalschlicke ermittelt wurden. Da diese Messungen nur in einem Jahr erfolgten und nicht für jedes Jahr die jeweiligen Konzentrationen, die in den Kanalschlickten tatsächlich auftraten, für die Baggergutmengen angesetzt werden konnten, ist hier eine Quelle für Ungenauigkeiten zu sehen. Ein Bezug der Baggergutmengen auf die jeweiligen Oderfrachten, die in einem Jahr zu verzeichnen waren, scheint jedoch fehlerhafter. In dem Kanal lagern sich Sedimente aus den verschiedenen Bereichen des Haffs ab, die durch die Strömungsverhältnisse (Querströmungen) in den Kanal gelangen. Dieses Material ist von unterschiedlichem Alter und stammt aus den verschiedenen Bereichen des Haffs. Es ist stark durchmischt und spiegelt nicht die jeweils zu der Zeit eingetragenen Oderfracht wider. Das Material, das von der Oder eingetragen wird, lagert sich nur in geringem Maße direkt im Kanal ab. Die aktuell in den Kanalschlickten gemessenen Werte könne zwar ebenfalls nicht die Konzentrationen der jeweiligen Jahre wider geben, der Fehler ist bei Verwendung dieser Werte jedoch am geringsten.

FEMFLOW2D-Modellierung

Das Simulationsmodell FEMFLOW2D wird zur theoretischen Modellierung der Strömungsverhältnisse im Oderhaff verwendet. In dieser Arbeit fand das Modell Anwendung zur Modellierung der zukünftigen theoretischen Strömungsverhältnisse bei einem auf 14,5 m vertieften Piastowski-Kanal und Schifffahrtsrinne durch das Haff. Das Modell kann jedoch nur eine grobe Einsicht darüber geben, was sich bei einem tieferen Kanal ändern könnte. Mit der geplanten Kanalvertiefung wird auch eine Verbreiterung des Schifffahrtsweges angestrebt, die in dieser Modellierung nicht berücksichtigt wurde. Ein weiterer kritischer Punkt ist der Umstand, dass das Modell nicht berücksichtigt, dass nicht nur Wasser vom Haff in die Ostsee abfließt, sondern auch Ostseewasser in das Haff einfließt, was bei den verschiedenen Windrichtungen unterschiedlich stark geschieht. Daher können die errechneten Wassermengen, die dem Modell nach durch den Piastowski-Kanal abfließen nur eine ungefähre Richtung der Veränderungen andeuten, jedoch nicht als absolute Werte betrachtet werden.

5.2 Einfluss der Schifffahrtsrinne auf den Stoffhaushalt des Oderhaffs

5.2.1 Sedimenttransportprozesse

Eine der zentralen Fragen der durchgeführten Untersuchungen ist, ob und wie ausgeprägt die für die Schifffahrt angelegte künstliche Rinne im Großen Haff eine Wirkung auf das Ökosystem Haff und seinen Stoffhaushalt hat. Aus diesem Grund werden im Folgenden die im Ergebnisteil dargestellten Daten über die Sedimentbeschaffenheit vor diesem Hintergrund näher beleuchtet. Von Bedeutung sind hierbei die Sedimenttransportprozesse, die von verschiedenen Faktoren

beeinflusst werden. Resuspensionsfördernd wirken beispielsweise die allgemeinen Strömungsverhältnisse in dem flachen Gewässer, Wind, Schiffsverkehr oder die Grundfischerei. Zur Sedimentation kommt es hingegen vorrangig in strömungsschwächeren Bereichen, wie z.B. geschützten Buchten oder Uferzonen mit Makrophytenbewuchs. Die Abbildung 5.2.1 – 1 zeigt die verschiedenen Einflüsse auf Sedimentation und Resuspension, die im Oderhaff eine wichtige Rolle spielen. Getrennt wird zudem nach Faktoren, die eher im Kanal oder im Haff, bzw. in beiden Bereichen, wirksam werden.

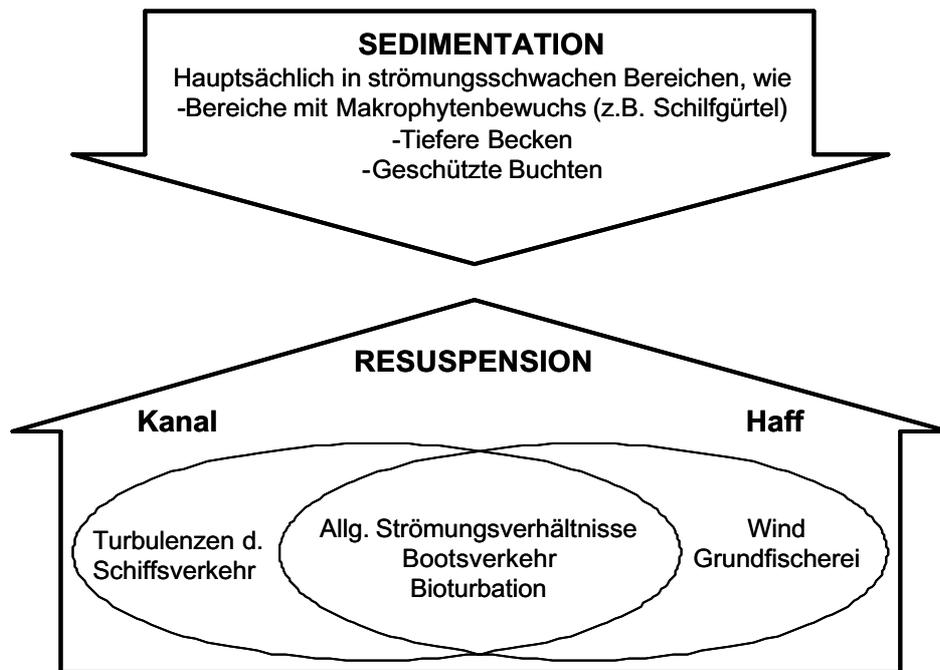


Abb. 5.2.1 – 1: Schematische Übersicht über die verschiedenen Faktoren, die im Oderhaff auf Sedimentations- und Resuspensionsprozesse einwirken.

Im Oderhaff kommt es häufig zur Resuspension und Umlagerung von zuvor bereits abgelagertem Material. Ursachen hierfür liegen vor allem in den allgemeinen morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten. Das Haff ist mit seiner Fläche von 687 km² und der mittleren Tiefe von 3,8 m ein sehr flaches Gewässer. Die Turbulenzen, die beispielsweise durch Wind im Haffwasser hervorgerufen werden, reichen oft bis zum Grund, so dass das Haff von polymiktischem Charakter ist. Die ausgeprägte Durchmischung des Wassers mit seinen Strömungen hat unter anderem eine ständige Materialumlagerung am Grund zur Folge.

In Bezug auf die Sedimentstruktur, die im Haff vorzufinden ist, muss außerdem die lange Zeit praktizierte Grundfischerei erwähnt werden. Diese ist seit dem 13. Jahrhundert aus England bekannt und wurde schon früh (vermutlich 15./16. Jahrhundert; WEICKER, 1927) im Oderhaff eingeführt. Die dabei verwendeten Grundschieppnetze werden hauptsächlich zum Fang am Grund lebender Fische, wie Plattfische, eingesetzt. Verbreitet ist die Anwendung so genannter Scherbretter, die für das Offenhalten des Netzes sorgen, sowie eine Sand- und Schlickwolke produzieren, die von Fischen selten durchschwommen wird und somit ein Zusammentreiben der

Fische bewirken (KROST, 1990). Die Strömungsmechanik hat hohe Strömungsgeschwindigkeiten an den Scherbrettern zur Folge, die etwa einen Meter hinter der Innenkante des Scherbrettes noch 40 bis 80 cm/s betragen (KROST, 1990, nach MAIN & SANGSTER, 1981). Strömungsgeschwindigkeiten in dieser Höhe reichen nach dem Hjulström-Diagramm aus, um Sedimente der Fraktionen Sand bis Ton zu erodieren. Grundfischerei hat nach WERNER et al. (1990) im Wesentlichen die im Folgenden aufgezählten Einflüsse auf ein Gewässer:

- ? Direkte Beeinflussung der Bodenfauna (vorwiegend destruktiv),
- ? Remobilisierung von Nährstoffen erfolgt einerseits direkt als Fischnahrung durch Auswerfen der Endofauna an die Oberfläche, andererseits durch Rückführung fein verteilter partikulärer oder gelöster organischer Substanz ins Bodenwasser,
- ? Resuspension von Sediment,
- ? Störung des Sedimentprofils – zunächst als Störung der natürlichen stratigraphischen Dokumentation von Sedimentationsereignissen über ein Zeitintervall, das der Umlagerungstiefe entspricht. Im besonderen ist hierbei an die Störung der chemischen Konzentrationsprofile zu denken, wie sie zur Untersuchung frühdiagenetischer Prozesse und zur Beurteilung der Verteilung anthropogener Schadstoffe gemessen werden,
- ? Durch die bei der Grundfischerei entstehenden Vertiefungen in Form von Scherbrettspuren kann es zu Materialsortierung kommen (nach WERNER et al., 1990).

Im Oderhaff war besonders die so genannte Zeesbootfischerei verbreitet, bei der mit speziellen Segelbooten (Zeesen) gearbeitet wurde (WEICKER, 1927). Andere Arten der Grundschieppnetzfisherei waren von eher untergeordneter Rolle, bzw. wurden im Oderhaff nicht angewandt. Die Zeesbootfischerei ist bereits seit mehreren Jahrzehnten verboten und hat daher für die Betrachtung rezenter Sedimente so gut wie keine Bedeutung mehr. In Hinblick auf die Ablagerungsprozesse älterer Sedimente sollte die Grundfischerei jedoch Beachtung finden.

Der Schiffsverkehr spielt vor allem im Kanal eine Rolle für die Sedimentationsprozesse, da hier die größeren Schiffe das Haff passieren. Die Schiffsschrauben sorgen mit ihren Verwirbelungen des Wassers für eine gute Sauerstoffdurchmischung im gesamten Wasserkörper, teilsweise sogar bis zum Grund, und für eine Remobilisierung des am Grund abgelagerten Materials. Der Schiffsverkehr im Kanal führt durch die Materialaufwirbelung zu einer Vermischung und relativen Homogenisierung des abgelagerten Sedimentes. Auch der Bootsverkehr in den anderen Teilen des Oderhaffs, wird derartige Auswirkungen haben, jedoch in geringerer Ausprägung.

Die in dem Simulationsmodell FEMFLOW2D errechneten Strömungsverläufe bei verschiedenen Windrichtungen zeigen, dass die Rinne auch bei häufig vorkommenden Windrichtungen, wie Südwestwind, von Querströmungen beeinflusst wird. Dem Modell zufolge erfolgt in den seltensten Fällen ein direkter Abtransport von Oderfracht durch den Piastowski-Kanal in die Ostsee. Der Großteil des Oderwassers durchfließt zunächst verschiedene Bereiche des Großen oder des Kleinen Haffs, bevor es nach einigen Wochen in die Ostsee gelangt. Während des Durchströmens des Haffs kommt es zum Teil zur Akkumulation der mitgeführten Fracht und zur Aufnahme resuspendierten Materials.

In den an den Kanal angrenzenden Bereichen des Großen Haffs wurden im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben, wie beispielsweise für das GOAP-Projekt (Greifswalder Bodden und Oderästuar Austauschprozesse, 1996) und für die Untersuchungen von LEIPE et al., 1998 über die „Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars“, Untersuchungen über die Zusammensetzung und Eigenschaften der Sedimente im Haff durchgeführt. In dem GOAP-Bericht von OSADCZUK et al., 1996 wurden vier verschiedenen Faziestypen für die Sedimente des Oderhaffs bestimmt. Demnach gliedert sich das Haff in einen südwestlichen Teil des Großen Haffs, dessen Sedimente unter großem Odereinfluss stehen und durch hohe Konzentrationen an organischem Material, amorphem SiO_2 und Schwermetallen gekennzeichnet sind, einen nordöstlichen Teil des Großen Haffs mit Meerwassereinfluss, geringeren Konzentrationen an organischem Material, Schwermetallen und SiO_2 , und einen westlichen Teil, der das gesamte Kleine Haff mit seinen Sedimentationseigenschaften umfasst sowie als vierten Faziestyp den Bereich des Kanals, in dem die natürlichen Sedimentationsprozesse durch den Schiffsverkehr und die regelmäßigen Baggerarbeiten gestört sind.

Die Aufteilung des Großen Haffs in einen südwestlichen, oderbeeinflussten und einen nordöstlichen, meerwasserbeeinflussten Bereich spiegelt sich auch zum Teil in den Eigenschaften der Kanalsedimente wider, trotz der Tatsache, dass die Sedimentationsprozesse in diesem Bereich unter besonderen Bedingungen stattfinden. Im nördlichen Bereich des Kanals liegen die Konzentrationen der meisten Schwermetalle ebenfalls unter denen im odernahen Bereich, was auf einen geringeren direkten Einfluss der Oderfracht in diesem Bereich hindeutet. Es ist demnach möglich, dass trotz der ständigen Resuspensions- und Umlagerungsprozesse auch in den Kanalsedimenten Bereiche mit stärkerem und Bereiche mit geringerem Einfluss von Oderfracht erkennbar sind.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Sedimentationsprozesse in der Schifffahrtsrinne vielen unterschiedlichen Einflüssen unterliegen und es sich bei dem dort abgelagerten Material vermutlich um sehr gemischtes Material handelt.

5.2.2 Physikalische Eigenschaften

Das Kap. 4.1 zeigt die analysierten physikalischen Eigenschaften der Sedimentproben aus dem Schifffahrtskanal. Auffällig ist, dass die Proben 1 und 11 in der Regel deutlich von den übrigen Proben abweichende Eigenschaften aufweisen. Der prozentuale Wasseranteil liegt in den Proben 1 und 11 deutlich unter dem der Proben 2 bis 10. Hiermit zusammenhängend verfügen diese Proben über eine größere Trockenraumdichte. Auch die Messungen der Glühverluste zeigen, dass die Proben 1 und 11 von den übrigen abweichen. Sie hatten deutlich geringere Glühverluste zu verzeichnen, was auf deutlich geringere Anteile an organischem Material hindeutet.

Als Ursachen für den andersartigen Charakter dieser beiden Proben kommen verschiedene Faktoren in Frage. In dem Schifffahrtskanal finden regelmäßige Ausbaggerungen statt (siehe Kap. 4.6). Da nicht bekannt ist, an welchen Stellen die jeweiligen Materialentnahmen stattfanden, ist es möglich, dass im Bereich der Proben 1 und 11 in jüngster Zeit vor der Probenahme gebaggert wurde. Die Entnahme von im Kanal abgelagerten Schlickern im Bereich dieser Probestellen, würde den sandigen Charakter der hier genommenen Proben erklären. Die Entfernung des überlagernden Schlicks würde die darunter liegenden sandigen und mergeligen Schichten zu Tage bringen (siehe Abb. 2.2.3 – 1). Gegen diese Theorie sprechen jedoch die durchgeführten Echolotaufnahmen (Kap. 4.5). Im nördlichen Bereich des Kanals zwischen den Inseln Usedom und Wolin traten deutlich unterschiedliche Tiefen auf. Im Bereich der Mündung vom Haff in den Piastowski-Kanal zwischen den Inseln wurde ein tiefes Becken mit einer Tiefe von knapp 17 m festgestellt. Es ist nicht bekannt, ob dieses Becken natürlich durch Strömung und Auswaschung entstanden ist oder künstlich, z.B. als Sedimentfalle, angelegt wurde. Ab diesem Becken in Richtung Süden den Kanal entlang, zeigte sich die Tiefe des Kanals jedoch sehr gleichmäßig. Es waren keine Bereiche erkennbar, die deutlich tiefer waren und somit auf jüngste Baggerungen hinwiesen.

Eine weitere Ursache für die Andersartigkeit der Proben 1 und 11 ist möglicherweise in den dort herrschenden Strömungsverhältnissen zu sehen. Die Betrachtung der durch das Simulationsmodell FEMFLOW2D ermittelten Strömungsfelder (Kap. 4.7) zeigt, dass die Strömung im Bereich der Proben 1 und 11 von etwas höherer Geschwindigkeit ist, als im Bereich der übrigen Proben. Auch das durch die Echolotaufnahmen festgestellte etwa 17 m tiefe Becken, das in der Nähe der Probestellen 1 und 11 liegt, verursacht möglicherweise besondere Strömungsverhältnisse in diesem Bereich. Dies kann zur Folge haben, dass sich hier kein Ablagerungsmilieu für feinkörnigeres Material befindet, das vergleichbar mit dem Material in den Proben 2 bis 10 wäre.

5.2.3 Stickstoff

Die Abb. 4.2.2 - 2 in Kapitel 4.2.2 zeigen einen von Probe 10 bis 2 zunehmenden Trend in den Stickstoffkonzentrationen der Schifffahrtsrinnen-Sedimente mit einem maximalen Wert von 13,7 mg/g in Probe 5 und einem minimalen Wert von 0 mg/g in Probe 1. Die Ursachen für diese Gradientenbildung im Rinnenverlauf liegen unter anderem in den geochemischen Eigenschaften von Stickstoff. Stickstoff tritt in der Natur in vielen verschiedenen Formen auf, wie beispielsweise als gelöstes molekulares N_2 , in verschiedenen organisch gebundenen Formen (z.B. als Aminosäuren), als Ammonium (NH_4^+), Nitrit (NO_2^-) oder Nitrat (NO_3^-) (WETZEL, 2001). In Gewässern spielt es unter anderem als gelöstes Nitrat eine bedeutende Rolle, da es in dieser Form von allen Algenarten leicht aufgenommen werden kann (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (Hrsg.), 1988) und so einen zentralen Faktor in Bezug auf die Primärproduktion und damit auf die Trophie eines Gewässers darstellt. Die Verbindung Nitrat ist das Endprodukt der Mineralisierung, wenn unter oxidischen Bedingungen Ammonium zu Nitrit und schließlich zu Nitrat oxidiert wird. Durch die im Oderhaff vorherrschenden

hydromorphologischen Bedingungen und die im vorigen Kapitel erwähnten Faktoren findet im gesamten Wasserkörper eine gute Durchmischung und damit eine gute Sauerstoffversorgung statt. Dies bietet günstige Voraussetzungen für eine zügige Mineralisierung des Materials am Grund des Oderhaffs.

Als Ammonium ist Stickstoff vor allem für Makrophyten und bestimmte Algenarten verwertbar. Dennoch spielt es auch in dieser Form eine bedeutende Rolle für die Trophie eines Gewässers, da es, wie oben erwähnt, in der Regel zu Nitrat oxidiert werden kann und somit in eine pflanzenverfügbare Form umgewandelt wird (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (Hrsg.), 1988).

Neben diesen Formen tritt Stickstoff in Gewässern in organisch gebundener Form auf, wie z.B. als Zwischenstufen mikrobiellen Eiweißabbaus, als Aminosäuren oder in Organismen, Exkrementen und Detritus, wobei es erst nach dem Abbau zu Ammonium bzw. schließlich Nitrat wieder pflanzenverfügbar ist.

Zudem kommt Stickstoff wie bereits erwähnt in seiner elementaren Form vor, nämlich als gelöstes Gas (N_2). In dieser Form hat Stickstoff nur für einige Blaualgen direkt als Nährstoff eine Bedeutung.

Die gemessenen Werte deuten darauf hin, dass im odernahen Bereich (Probe 10 bis etwa 7) ein recht großer Einfluss der Oderfracht zu verzeichnen ist, während im Bereich der Proben 6 bis 2 zunehmend Material aus dem Haff an Bedeutung gewinnt. Auf diese Vermutung lassen die höheren Stickstoffkonzentrationen im Bereich des offenen Haffs schließen, da sich zu den Stickstoffablagerungen aus der Oderfracht zusätzlich Ablagerungen von Haffmaterial summiert. Die Oder transportiert große Mengen an Stickstoff mit sich, was auf den ersten Blick auf hohe Stickstoffkonzentrationen im odernahen Bereich des Kanals schließen lassen könnte. Es handelt sich bei der transportierten Fracht jedoch unter anderem um gelöste Stickstoffformen, wie z.B. Aminosäuren. In dieser Form kommt es eher selten zu einer direkten Ablagerung. Zu der Akkumulation und Sedimentation von Stickstoff kommt es vorrangig in organisch gebundener Form. Stickstoff, das von der Oder in das Haff transportiert wird, wird dort biogen gebunden und kann anschließend abgelagert werden. Daher lassen die höheren Stickstoffkonzentrationen auf die zusätzliche Ablagerung von autochthon im Haff gebildeten Material schließen.

Die von der Oder in das Haff transportierten Wassermengen weisen hohe Fluktuationen auf und liegen etwa bei 10 bis 20 km³ pro Jahr. Die Differenzen spiegeln sich auch in den jährlichen Mengen der transportierten Fracht wider. In den Jahren 1988 bis 1994 wurden jährlich etwa 39.000 bis 99.000 t Gesamt-Stickstoff von der Oder in das Haff geschwemmt (GRELOWSKI et al., 2000). 1995 lagen die Mengen nach HELCOM, 1998 bei 76.973 t Gesamt-Stickstoff. Im Mittel zeigen die Stickstoff-Einträge aus den Haupteintragsquellen, wie den Fließgewässern und kommunalen Direkteinleitern, in die Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns bei dem Vergleich der Zeiträume 1991-1994 und 1995-1998 einen Rückgang (LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE MECKLENBURG-VORPOMMERN, 2001). Es ist jedoch fraglich, ob die Stickstoffmengen tatsächlich zurückgehen, oder ob es sich lediglich abfluss- bzw. witterungsbedingte Unterschiede in den Transportmengen handelt. In niederschlagsreichen Jahren

kann die transportierte Stickstoffmenge etwa doppelt so hoch sein, wie in vergleichsweise trockenen Jahren (SCHERNEWSKI & WIELGAT, 2001). Der rückläufige Trend im Stickstoffeintrag der letzten Jahre muss daher mit Blick auf die meteorologischen Bedingungen in diesem Zeitraum und die natürlichen Schwankungen betrachtet werden. Es bleibt abzuwarten, ob ein signifikanter Rückgang des Eintrages durch Verbesserungen der Kläranlagen, sorgsameren Umgang mit Düngemitteln und ähnlichen Maßnahmen, zu verzeichnen sein wird. Sollte dies jedoch der Fall sein und eine tatsächliche Reduzierung des Stickstoffeintrages erreicht werden, muss beobachtet werden, wie sich diese Reduzierung des Eintrages auf die Trophie des Haffs auswirkt und ob die Bedeutung des internen Stickstoffdepots Sediment merkbar zunimmt. In der derzeitigen Situation ist Stickstoff im Oderhaff so reichlich vorhanden, dass es nur in kurzen Phasen in den Sommermonaten der limitierende Faktor für die Primärproduktion sein kann.

In Kap. 4.6 wurde eine Bilanzierung zu den Inhalten der entnommenen Baggergutmengen durchgeführt. Es wurde eine jährliche Entnahme von etwa 2.200 t Stickstoff für die Jahre 1986 bis 2000 errechnet. Dies entspricht nur einem geringen Anteil der von der Oder eingetragenen Mengen an Stickstoff (siehe hierzu auch Kap. 5.3).

Der Kanal stellt anscheinend keine direkte Falle für Stickstoff dar, da die in den Kanalsedimenten aufgefundenen Konzentrationen nicht wesentlich über denen in den übrigen Haffsedimenten liegen. Durch die regelmäßigen Ausbaggerungen ist jedoch eine Senkenwirkung für die Ostsee zu bemerken, da große Materialmengen, die durch Resuspension und Strömung ohne die Ausbaggerungen in die Ostsee gelangen könnten, vorher entnommen werden. Zwar ist der Anteil des entnommenen Stickstoffs in Bezug zu dem Eintrag durch die Oder vergleichsweise gering, die Entnahmen sollten jedoch besonders mit Blick auf einen zukünftig möglicherweise weiter abnehmenden Stickstoffeintrag Beachtung finden.

5.2.4 Phosphor

Die Phosphorgehalte in den Sedimenten der Schifffahrtsrinne weisen ebenfalls einen Gradienten auf, wie in Abb. 4.2.2 – 1 zu sehen. Hier ist jedoch im Gegensatz zu den Stickstoffkonzentrationen ein von der Oder- bis zur Swinamündung eher abnehmender Trend erkennbar, mit einem maximalen Wert von 6,13 mg/g in Probe 7 und einem minimalen Wert von 0,3 mg/g in Probe 1. Die Ursachen hierfür liegen unter anderem in der Form, in der Phosphor in Fließgewässern hauptsächlich vorkommt sowie in seinen geochemischen Eigenschaften.

Phosphor liegt in Flüssen im Wesentlichen in partikulärer und somit leicht sedimentierbarer Form vor (BRÜGMANN, 1993), wodurch es in der Nähe der Odermündung vermehrt zur Ablagerung kommt und mit zunehmender Entfernung zur Mündung geringer wird. Zudem spielen die geochemischen Eigenschaften von Phosphor eine Rolle, da es in der Regel sehr leicht Verbindungen mit Eisen oder auch Calcium eingeht. Es bilden sich beispielsweise schwer lösliche Eisen-III-Phosphate oder Apatit (Calciumphosphat), die zunächst im Sediment festgelegt werden.

Im Frühjahr und Sommer, wenn die Photosyntheseaktivität des Phytoplanktons besonders hoch ist, kommt es durch den Entzug von CO_2 aus dem Wasser zur Ausfällung von CaCO_3 . Bei der Calcit-Bildung kann es zur Mitfällung von Phosphor und so zur Bildung von Apatit, einem Calciumphosphat, kommen. Insbesondere diese autochthone Calcitfällung kann unter anderem für den Phosphathaushalt eines Gewässers große Bedeutung haben (SCHWOERBEL, 1999). Bei dieser Calcitfällung und anschließenden Sedimentation können große Anteile des im Wasser vorhandenen Phosphors mitgefällt und zeitweise im Sediment festgelegt werden. Möglicherweise spielt dies im Oderhaff nur eine untergeordnete Rolle, da ein Vergleich des Verlaufes der Calcitkonzentrationen (Abb. 4.3 – 3) mit den Phosphorkonzentrationen im Schifffahrtskanal (Abb. 4.2.2 – 1) auf keinen signifikanten Zusammenhang schließen lässt. Auch die besonders hohen Phosphorkonzentrationen im Wasser in den Sommermonaten weisen darauf hin, dass die Calcitfällung für den Phosphorhaushalt des Oderhaffs zumindest bei den heute vorhandenen Phosphormengen im Haff keine ausschlaggebende Rolle spielt. Dies kann sich jedoch in Zukunft ändern, wenn der Phosphoreintrag weiter rückläufig bleibt.

Die Phosphorkonzentrationen im Haffwasser sind stark jahreszeitenabhängig. Im Frühjahr ist die geringste Konzentration zu verzeichnen, wenn zur Zeit der Diatomeenblüte Phosphor vermehrt von den Kieselalgen aufgenommen wird. Zu dieser Jahreszeit kann Phosphor im Oderhaff der limitierende Faktor für die Primärproduktion sein (WIELGAT & SCHERNEWSKI, 2002a). Die maximalen Konzentrationen sind im Sommer zu finden. In dieser Zeit ist Phosphor in größeren Mengen vorhanden, als biologische Umsetzung stattfindet.

Die hohen Phosphorkonzentrationen im Sommer werden nicht nur durch die Oderfracht, sondern auch durch schnelle Mineralisierungsprozesse und Phosphorfreisetzung unter anoxischen Bedingungen aus dem Sediment, hervorgerufen (BANGEL et al., 2001). Sinkt der Sauerstoffgehalt an der Sedimentoberfläche unter einen kritischen Wert, kommt es zur Reduzierung der Eisen-III-Verbindungen und somit zur Phosphat-Freisetzung aus dem Sediment. Der Sauerstoffgehalt beeinflusst wie folgt die Stabilität oder Instabilität der Eisen-III-Verbindungen:

- ? $> 3 \text{ mg/l O}_2$: Eisen-III-Verbindungen sind stabil, Folge: wenig Phosphatabgabe.
- ? $3 - 1 \text{ mg/l O}_2$: Eisen-III-Verbindungen werden teilweise zu Eisen-II-Verbindungen reduziert. Folge: sprunghafter Anstieg der Phosphatabgabe aus dem Sediment.
- ? $< 1 \text{ mg/l O}_2$: Eisen-III-Verbindungen werden verstärkt reduziert, durch Fäulnis wird Schwefelwasserstoff gebildet, dieser verbindet sich mit Eisen-II-Ionen zu unlöslichem Eisensulfid. Folge: Rasanter Anstieg der Phosphatfreisetzung aus schwerlöslichen Eisenverbindungen (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (Hrsg.), 1988, S. 11).

Die Eisenkonzentrationen in den Sedimenten des Schifffahrtskanals zeigen im Vergleich zu den Phosphorgehalten keinen ähnlich ausgeprägten Gradienten. Eisen tritt in den Sedimenten mit recht gleichmäßigen Werten auf. Demnach wird aus diesem Vergleich kein Zusammenhang zwischen den Eisen- und Phosphorkonzentrationen in den Sedimenten deutlich.

Der Phosphoreintrag über die Fließgewässer in das Haff unterliegt jährlichen Schwankungen, je nach Wassermenge, die von der Oder mitgeführt wird. Wie bereits erwähnt, hat die Wasserführung der Oder jahreszeitlichen und jährlichen Fluktuationen zu verzeichnen, die stark von den jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten abhängen. Damit schwankt auch der Phosphoreintrag durch die Oder in das Haff. 1988 bis 1994 wurden jährlich etwa 4.700 bis 8.400 t Gesamt-Phosphor eingetragen (GRELOWSKI et al., 2000). Nach HELCOM, 1998 wurden im Jahr 1995 ca. 4.922 t Gesamtphosphor von der Oder eingeschwemmt. In feuchten Jahren kann die mitgeführte Phosphormenge doppelt so groß sein, wie es in trockenen Jahren der Fall wäre (SCHERNEWSKI & WIELGAT, 2001).

Auch in Bezug auf den Phosphoreintrag ist, wie beim Stickstoffeintrag auch, bei dem Vergleich der Zeiträume 1991-1994 und 1995-1998 ein Rückgang des Eintrages durch Fließgewässer und kommunale Direkteinleiter in die Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns zu verzeichnen (LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE MECKLENBURG-VORPOMMERN, 2001). Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, ist dieser Trend noch kritisch zu betrachten und nicht unbedingt als eindeutiger Hinweis für eine anthropogen bedingte Verringerung des Phosphoreintrages zu werten. Ursachen für diesen scheinbaren Rückgang können ebenso die Abflussbedingungen der jeweiligen Jahre sein. Im Fall des Phosphoreintrages kann jedoch davon ausgegangen werden, dass verschiedene Maßnahmen, wie zum Beispiel der Aus- und Neubau von Kläranlagen mit einer 3. Reinigungsstufe, zu einer tatsächlichen Reduzierung der Einträge aus diesen Direkteinleitern geführt haben.

Insgesamt deuten die gemessenen Konzentrationen und der Verlauf in der Schifffahrtsrinne auf keinen besonders ausgeprägten direkten Einfluss der Rinne auf den Phosphorhaushalt des Oderhaffs hin. Die jährlich mit dem Baggergut entnommenen Phosphormengen spielten jedoch eine wichtige Rolle, da der Kanal hierdurch eine Art Reinigungsfunktion übernimmt. Etwa 955 t Phosphor wurden in den Jahren 1986 bis 2000 jährlich mit dem Baggergut aus dem Haff entnommen (siehe Tab. 4.6 – 2). Es steht dem biogeochemischen Kreislauf im Haff somit nicht mehr zur Verfügung. Dies hat ebenfalls Auswirkungen auf die Ostsee, denn durch diese Materialentnahme wird die Menge an Phosphor, die von der Oder und aus dem Oderhaff in die Ostsee gelangen kann, verringert.

5.2.5 Kohlenstoff

Die Konzentrationen an organischem Kohlenstoff in den Sedimentproben des Schifffahrtskanals weisen, wie in Kap. 4.2.2 zu sehen, einen von der Odermündung bis in den Bereich des offenen Haffs zunehmenden Trend im Rinnenverlauf auf. Der maximale Wert ist in Probe 5 mit 127,72 mg/g zu verzeichnen und das Minimum wurde mit 3,38 mg/g in Probe 1 gemessen. Es kann festgestellt werden, dass der Verlauf ganz ähnlich dem des Stickstoffs ist. Eine Erklärung hierfür

liegt in der Form, in der Kohlenstoff und Stickstoff in den Haffsedimenten zu finden sind, nämlich oft in organisch gebundener Form, z.B. in Exkrementen und Detritus.

Kohlenstoff ist in Gewässern in der Regel in großen Mengen vorhanden und wird als limitierender Faktor für die Primärproduktion weitgehend ausgeschlossen. Von zentraler Bedeutung sind hier anorganische Kohlenstoffverbindungen, die eine Hauptquelle für Photosynthese und die Bildung organischen Materials darstellen. Wichtige Faktoren im Kohlenstoffkreislauf stellen die CO_2 -Produktion bei Atmungsaktivität der meisten Organismen sowie der CO_2 - und HCO_3^- -Zufluss über Atmosphäre und Fließgewässer dar (WETZEL, 2001).

Im Kanal lagert sich, wie in Kap. 4.1 zu sehen, hauptsächlich schllickiges Material ab. Dieses enthält große Mengen organischen Materials und somit große Mengen an Kohlenstoff. Den Bilanzierungen in Kap. 4.6 zu Folge wurden von 1986 bis 2000 jährlich etwa 21.932 t organischen Kohlenstoffs mit dem Baggergut entnommen.

Insgesamt kann gesagt werden, dass der Kanal durch die regelmäßigen Ausbaggerungen auch in Bezug auf Kohlenstoff eine Reinigungsfunktion für die Ostsee übernimmt, da hierdurch die Menge an Kohlenstoff, die aus der Oder und dem Haff in die Ostsee gelangen kann, reduziert wird. Kohlenstoff ist jedoch sowohl im Haff als auch in der Ostsee in derartigen Mengen vorhanden, dass dieser Entzug durch die Baggerungen keinen direkten Einfluss auf das Ökosystem Oderhaff, bzw. Ostsee, ausübt.

5.2.6 Schwermetalle

Schwermetalle zählen schon lange zu den vorrangigen Schadstoffen aquatischer Systeme. Ein großer Teil der durch anthropogene und natürliche Prozesse in die Umwelt gebrachten Mengen gelangt irgendwann in die Oberflächengewässer und schließlich die Meere. Ihre Verbindungen haben häufig akute bzw. chronisch toxische Wirkungen und es kommt neben Schädigungen der aquatischen Ökosysteme zu einer Anreicherung in der Nahrungskette bis hin zum Menschen (BRÜGMANN, 1993, S. 82).

Sedimente stellen temporäre Senken für Schwermetalle dar. Die Schwermetalle werden dort akkumuliert, da sie nicht immer ohne weiteres chemisch oder biologisch abbaubar sind. Dadurch stellen die Schwermetallgehalte in Sedimenten von Flüssen und Seen einen deutlichen Indikator für die Gewässerbelastung vergangener Jahrzehnte dar. Sie spiegeln je nach Sedimenttiefe die geschichtliche Entwicklung der Gewässerbelastung vergangener Zeit in Bezug auf Schwermetalle wider. Böden und Sedimente sind jedoch keine endgültigen Lagerstätten für Schwermetalle, da diese remobilisierbar sind. Die Schwermetalle werden von Pflanzen aufgenommen oder infolge von Versauerung von Oberflächengewässern, z.B. durch sauren Regen, sowie durch bakterielle Tätigkeiten wieder aus dem Sediment herausgelöst und nehmen weiter am biosphärischen Kreislauf teil.

Verschiedene Mechanismen können zum Herauslösen der Schwermetalle aus den Sedimenten von Seeböden führen:

- ? Durch Bildung eines Aquokomplexes (hydratisiertes Schwermetallion), dessen Konzentration mit abnehmendem pH-Wert des Wassers zunimmt,
- ? durch Komplexierung mit organischen Komplexbildnern, die beispielsweise mit dem Abwasser in die Oberflächengewässer gelangen (z.B. NTA (Nitrilotriacetat) oder EDTA (Ethyldiamintetraacetat), die aus Waschmitteln stammen),
- ? durch Bildung von Chloro-Komplexen bei Gegenwart von Chloridionen (z.B. in Meerwasser),
- ? durch bakterielle Umwandlung von schwermetallhaltigen organischen Sedimentpartikeln in lösliche organische Schwermetallverbindungen (beispielsweise Methylquecksilberchlorid oder Methylcadmium) sowie
- ? durch die Gegenwart von Stoffen, die oxidierend wirken und die beispielsweise schwerlösliche Schwermetallsulfide in erheblich besser lösliche Sulfate umwandeln können (HEINTZ & REINHARDT, 1993, S. 190f).

Die Sedimente der Schifffahrtsrinne des Oderhaffs wurden, wie in Kap. 4.2.1 dargestellt, auf Schwermetalle wie Cobalt, Chrom, Kupfer, Mangan, Nickel, Blei und Zink untersucht. Auffällig ist, dass Cobalt, Chrom, Kupfer, Mangan und Zink einen sehr ähnlichen Verlauf der Konzentrationen in der Rinne aufweisen. Bei allen fünf Schwermetallen ist der maximal gemessene Wert in Probe 7 oder 8 gemessen worden. Zudem nimmt die Konzentration in der Regel jeweils von diesem Punkt ab, sowohl in Richtung des Haffs, als auch in Richtung Oder. Die Metalle Nickel und Blei zeigen etwas abweichende Verläufe der Konzentrationen im Kanalverlauf. Die maximale Nickelkonzentration wurde in Probe 5 gemessen und nimmt Richtung Oder tendenziell ab. Die Blei-Konzentrationen weisen ein unregelmäßiges Bild auf.

Um die unterschiedlichen Konzentrationen erklären zu können, müssen mehrere Aspekte beachtet werden. Zum einen ist es möglich, dass die Konzentrationen den jeweiligen Einfluss der Oderfracht widerspiegeln. Die Oder transportiert jährlich große Mengen an Schwebstoffen und gelösten Stoffen in das Oderhaff und schließlich in die Ostsee. Auf diese Weise gelangen jährlich beispielsweise etwa 55 t Blei und 66 t Kupfer in das Haff (HELCOM 1998; siehe Kap. 2.1.4). Da in den untersuchten Sedimentproben kein eindeutig zur Odermündung zunehmender Trend in den Konzentrationen zu erkennen ist, das Maximum vielmehr im Beginn des Haffs liegt und die Werte Richtung Oder wieder abnehmen, gestaltet sich eine Aussage über die direkte Materialherkunft komplizierter.

In FIEDLER & RÖSLER (1993) S. 350 heißt es: „Biologisches Material kann über 50 Masse-% der Schweb- bzw. Sinkstoffe in Seen bilden. Es ist oft die dominierende Trägerphase partikulärer Formen von Spurenelementen wie Cu, Zn, Cd oder Pb.“. In Brüggemann (1998) wird ein ähnliches Bild aufgezeigt. Hier wurden die Schwermetalle Zink und Blei in verschiedenen Substraten (Sand, sandiger Schlick, Schlick und Detritus an der Sedimentoberfläche) untersucht. Es wurde deutlich, dass sowohl Blei als auch Zink im Schlick und im Detritus an der Sedimentoberfläche mit

signifikant höheren Gehalten vorkommen, als im sandigen Material. Demnach besteht ein Zusammenhang zwischen dem Gehalt an organischem Material und den Schwermetallkonzentrationen. Für die Sedimentproben des Schifffahrtskanals wurde der Glühverlust bestimmt, mit dessen Hilfe die ungefähre Menge an enthaltenem organischem Material abgeschätzt werden kann. In den folgenden Abbildungen wurden die Schwermetallgehalte gegen den Glühverlust aufgetragen. Deutlich wird ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Zusammenhang zwischen der Menge an organischem Material und den Schwermetallkonzentrationen. Proben mit einem geringen Gehalt an organischem Material weisen ebenfalls geringere Schwermetallkonzentrationen auf. Um diesen Zusammenhang erkennbar zu machen, wurden Regressionsanalysen durchgeführt (siehe Abb. 5.2.6 - 1 und Abb. 5.2.6 - 2). Besonders die in Abb. 5.2.6 - 1 aufgeführten Schwermetalle Zink, Eisen, Nickel und Blei zeigen dieses Phänomen recht deutlich. Mangan und Kupfer in Abb. 5.2.6 - 2 zeigen eine größere Streuung und einen weniger ausgeprägten Zusammenhang mit dem Gehalt an Organik. Der etwas abweichende Wert, der in den Graphiken deutlich über der Regressionskurve liegt, stammt von den Messwerten der Probe 7. Diese Probe weist einen vergleichsweise geringeren Gehalt an organischem Material auf.

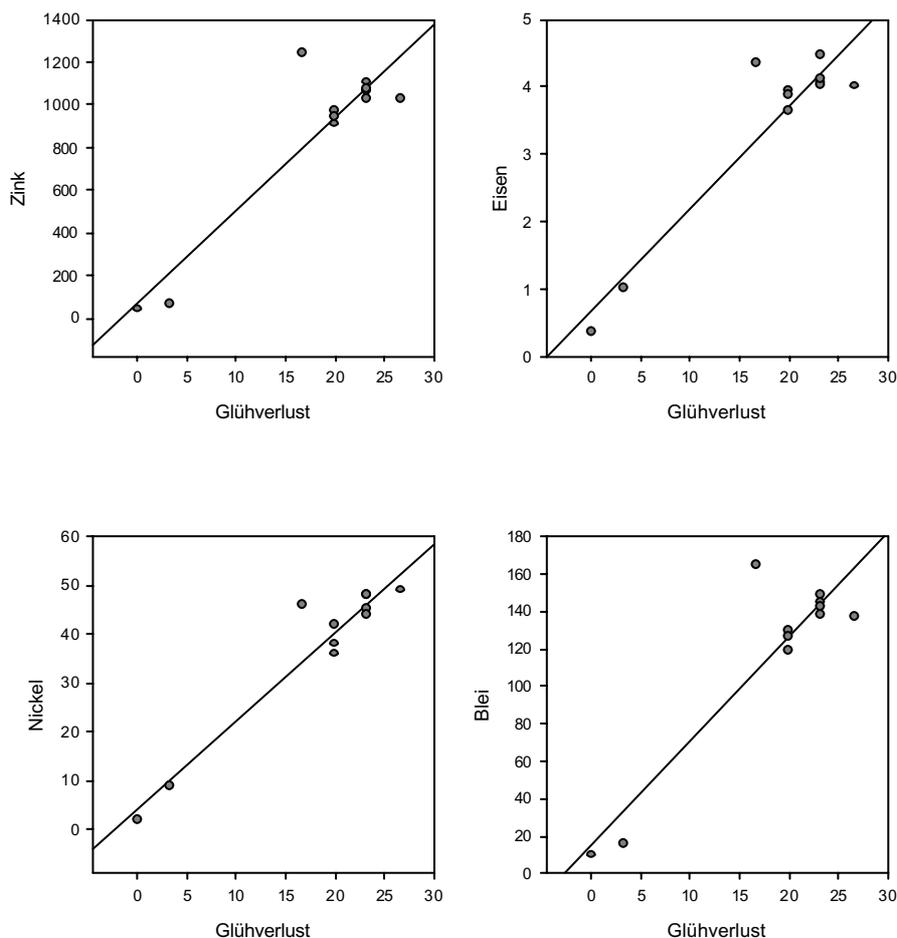


Abb. 5.2.6 - 1: Die Schwermetalle Zink, Nickel, Eisen und Blei im Verhältnis zum Glühverlust der jeweiligen Proben.

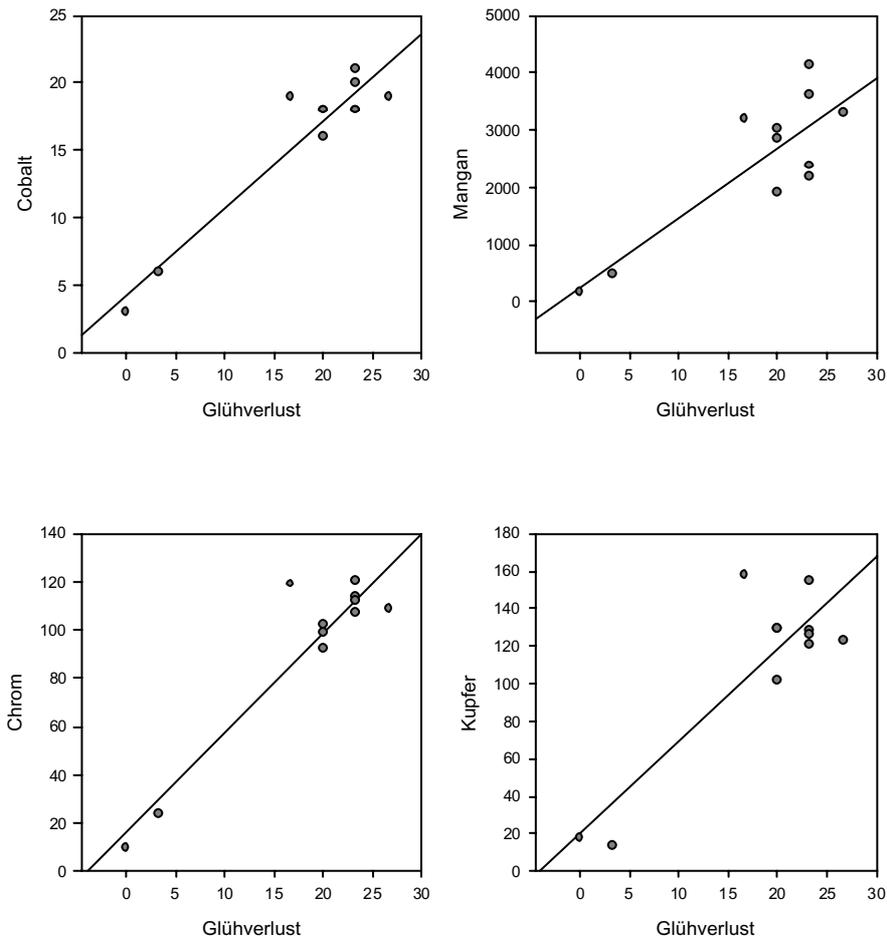


Abb. 5.2.6 - 2: Die Schwermetalle Cobalt, Chrom, Mangan und Kupfer im Verhältnis zum Glühverlust in den jeweiligen Proben.

Um einen möglichen direkten Einfluss der Oderfracht auf die Schwermetallgehalte erkennen zu können, kann die zusätzliche Betrachtung der Sedimente außerhalb des Schifffahrtskanals im Bereich des Großen und des Kleinen Haffs von Interesse sein. Untersuchungen hierzu wurden unter anderem von OSADCZUK et al., 1996 im Rahmen des GOAP-Projektes durchgeführt. Demnach liegt bei Zink, Blei und Kupfer jeweils eine deutliche Südwest-Nordost-Verteilung vor. Wie bereits in vorangegangenen Kapiteln erwähnt, ist das Große Haff im südwestlichen Teil deutlich oderbeeinflusst, während im nordöstlichen Bereich ein größerer Meerwassereinfluss zu bemerken ist. Dies spiegelt sich in den Schwermetallgehalten der Sedimente wider. Die Untersuchungen von OSADCZUK et al., 1996 ergaben Zinkkonzentrationen von etwa 500-750 mg/kg in den nordöstlichen Haffsedimenten und von über 1500 mg/kg im südwestlichen Teil. Ähnlich ist das Bild bei Blei, mit Konzentrationen von 75-100 mg/kg im Nordosten und mehr als 175 mg/kg im Südwesten, sowie bei Kupfer mit Konzentrationen von 0-20 mg/kg im nordöstlichen Bereich und über 100 mg/kg im südwestlichen, oderbeeinflussten Teil. Vergleicht man die hier angegebenen Werte mit den in der Schifffahrtsrinne gemessenen Konzentrationen, wird deutlich, dass Kupfer

und Mangan im Kanal in höheren Konzentrationen auftreten, Blei leicht erhöht vorkommt, während Zink in ähnlichen Konzentrationen wie im übrigen Haff auftritt.

Die durchschnittlichen Schwermetallkonzentrationen in den Haffsedimenten wurden im Rahmen verschiedener Arbeiten mehrfach bestimmt (siehe Tab. 5.2.4 - 1). Ein Vergleich der durchschnittlichen Konzentrationen in den Kanalsedimenten mit den Konzentrationen in Haffsedimenten ergibt, dass Cobalt, Chrom, Kupfer, Zink und Blei im Kanal in erhöhten Konzentrationen auftritt, während Mangan und Nickel in vergleichbaren Konzentrationen gemessen wurden.

	Oberflächensediment Oderhaff ¹⁾	Schlicksedimente des Oderhaffs ²⁾	Oderhaffsedimente ³⁾	Durchschnitt
Co (mg/kg)	13	14,3	18	15,1
Cr (mg/kg)	70	96	127	97,67
Cu (mg/kg)	65	79	101	90,33
Fe (%)	3,2	-	-	3,2
Zn (mg/kg)	800	957	1290	1015,67
Mn (mg/kg)	4700	3080	2690	3490
Ni (mg/kg)	40	47	63	50
Pb (mg/kg)	130	153	157	146,67

1) Brüggemann 1998, S. 62 (nach Leipe & Neumann, 1994)

2) Leipe et al., 1998, S. 22

3) Eidam et al. 1997, GOAP

Tab. 5.2.4 - 1: Schwermetallkonzentrationen in den Sedimenten des Oderhaffs aus verschiedenen Quellen zusammengetragen, sowie das arithmetische Mittel der Konzentrationen.

Ebenfalls mehrfach untersucht wurden die geogenen Hintergrundwerte. Diese geogenen Hintergrund- oder „Background“-Werte geben den Schwermetallgehalt des Sedimentes an, der ohne anthropogene Einflüsse vorliegen würde. Zur Ermittlung dieser Werte wurden die Schwermetallgehalte der Schichten aus der Zeit vor der Industrialisierung herangezogen.

Im Rahmen des GOAP-Projektes (Greifwalder Bodden und Oder-Ästuar Austauschprozesse) wurden von EIDAM et al. 1998 die „Background“-Konzentrationen für Schlicksedimente (Fraktion < 63 µm) verschiedener Gewässer zusammengetragen und auch für das Oder-Ästuar bestimmt. Im selben Jahr wurde von Brüggemann in der Mitteilung Nr. 15 der Bundesanstalt für Gewässerkunde über die „Hintergrundbelastung von Ostsee-Sedimentationsbecken vor der deutschen Küste“ berichtet. In diesem Zusammenhang wurden ebenfalls die Hintergrundwerte für Oderhaffsedimente in einer Tabelle nach LEIPE & NEUMANN, 1994 dargestellt. In einem Bericht von NEUMANN et al., 1996 werden ebenfalls die geogenen Hintergrundwerte für Schwermetalle in den Sedimenten des Oderhaffs aufgeführt. Diese Werte wurden in Tabelle 5.2.4 - 2 zusammengetragen und der Durchschnittswert für das jeweilige Schwermetall ermittelt. Im folgenden wird mit den ermittelten Durchschnittswerten gearbeitet.

Geogene Hintergrundwerte der Haffsedimente nach verschiedenen Quellen				
mg/kg	nach EIDAM et al. 1998 (GOAP)	nach BRÜGMANN, 1998	nach NEUMANN et al. 1996	Mittelwert
Co	10	8	-	9
Cr	59	32	-	45,5
Cu	21	14	27	20,67
Fe (%)	-	4,5	-	4,5
Zn	76	40	100	72
Mn	1220	1000	-	1110
Ni	28	22	-	25
Pb	18	16	35	23

Tab. 5.2.4 - 2: Geogene Hintergrundwerte der Sedimente des Oderhaffs, Zusammenstellung der Angaben aus verschiedenen Quellen.

Im Vergleich zu den „Background“-Werten, sind die Schwermetall-Konzentrationen in den Sedimenten des Haffs und des Schifffahrtskanals teilweise recht deutlich erhöht. Der Hintergrundwert für Blei liegt beispielsweise bei 23 mg/kg, während im Haff Gehalte von durchschnittlich 146,67 mg/kg und im Kanal von 139 mg/kg gemessen wurden. Eine Ausnahme bildet lediglich Eisen. Nach den vorliegenden Daten wurde als geogener Hintergrundwert 4,5 % (BRÜGMANN, 1998) ermittelt, während in den Haffsedimenten nur 3,2 % und im Kanalsediment lediglich 4,05 % gemessen wurden, was unter dem Niveau des Hintergrundwerts liegt.

Etwa 15 bis 20 % des Oderzuflusses fließen in das Kleine Haff (MOHRHOLZ & LASS, 1998, S. 375) und nach einer theoretischen mittleren Wasseraufenthaltszeit von 3 Monaten über den Peenestrom in die Ostsee ab (LEIPE et al., 1998, S. 9). So gelangen auch Anteile der Schwermetallfracht der Oder in das Kleine Haff. Eine Aussage darüber, wie viel Prozent der Schwermetallfracht der Oder in das Kleine Haff gelangt, gestaltet sich kompliziert, da zwar etwa 15 bis 20 % des Oderzuflusses über den Peenestrom abfließt, diese Mengenangabe jedoch nicht für das gesamte Oderwasser gilt, dass in das Kleine Haff fließt. Dieser Anteil liegt vermutlich höher, wobei das Wasser durch die Strömungsprozesse bei verschiedenen Windrichtungen wieder in das Große Haff fließen kann. Zudem kann nicht gesagt werden, dass mit den 15 bis 20 % des Oderwassers auch 15 bis 20 % der Oderfracht in das Kleine Haff gelangen, da es vor dem Erreichen des Kleinen Haffs zu Akkumulations- und Resuspensionsprozessen kommt. Aus diesem Grund können in den folgenden Berechnungen lediglich ungefähre Verhältnisse und keine genauen Zahlen errechnet werden. Nach den oben genannten Überlegungen wird ein Anteil von ca. 20 % der Oderfracht für das Erreichen des Kleinen Haffs zugrunde gelegt, da vermutlich mehr als 15 bis 20 % des Oderzuflusses in das Kleine Haff gelangen, jedoch nicht genau gesagt werden kann, welche Menge der Fracht vor Erreichen des Kleinen Haffs bereits sedimentiert wurde.

Zu diesem Schwermetalleintrag durch die Oder in das Kleine Haff ist noch der Eintrag durch die Zuflüsse Uecker und Zarow zu rechnen. Die Zuflüsse aus der Peene fließen vermutlich größtenteils in die Ostsee ab, ohne in das Kleine Haff zu gelangen, und werden hier daher vernachlässigt.

Die übrigen etwa 80 bis 85 % des Oderzuflusses verbleiben mit einer theoretischen durchschnittlichen Wasseraufenthaltszeit von 0,5 Monaten im Großen Haff und fließen anschließend über Swina und Dzwina in die Ostsee.

t/a	Oder (nach HELCOM, 1998)	Uecker und Zarow (nach HELCOM, 1998)	Großes Haff (Oderfracht abzüglich 20 %)	Kleines Haff (20 % Oderfracht, Uecker, Zarow)
Cr	17,5	0,1	14	3,6
Cu	66,2	0,87	52,96	14,11
Ni	53,5	0,13	42,8	10,83
Pb	55,1	0,1	44,08	11,12
Zn	387,6	0,93	310,08	78,45

Tab. 5.2.4 - 3: Schwermetallzuflüsse in das Oderhaff durch die Flüsse Oder, Uecker und Zarow und Gewichtung nach ihrem Verbleib im Kleinen oder Großen Haff.

Die Einträge über die Oder sind auch für das Kleine Haff die dominierenden, während über Uecker und Zarow nur vergleichsweise geringe Mengen an Schwermetallen eingetragen werden (Tab. 5.2.4 – 3). Es kann gesagt werden, dass in das Kleine Haff etwa ein Fünftel der Schwermetallmenge eingetragen wird, wie in das Große Haff. Dies entspricht bei einer Fläche von 277 km² für das Kleine Haff sowie 409,9 km² für das Große Haff (BUCKMANN et al., 1996 (GOAP)) den in Tab. 5.2.4 - 4 aufgeführten Mengen pro Quadratkilometer.

	Kleines Haff (kg/km ²)	Großes Haff (kg/km ²)
Cr	13	34,15
Cu	50,94	129,2
Ni	39,1	104,42
Pb	40,14	107,54
Zn	283,21	756,48

Tab. 5.2.4 - 4: Schwermetalleinträge in das Kleinen und das Großen Haff bezogen auf die Fläche.

Bei Betrachtung der in Tab. 5.2.4 - 4 errechneten Schwermetalleinträge pro Quadratkilometer wird deutlich, dass das Große Haff einen deutlich höheren Eintrag erfährt. Das Verhältnis der jeweiligen Einträge zueinander beträgt 2,53 bis 2,68. In das Große Haff werden demnach etwa 2,6 mal so große Mengen an Schwermetallen pro Quadratkilometer eingetragen, wie in das Kleine Haff.

Betrachtet man nun im Vergleich dazu die Schwermetallkonzentrationen in den Sedimenten des Kleinen und des Großen Haffs, wie sie in dem GOAP-Bericht von OSADCZUK et al., 1996 ermittelt wurden, stellt man fest, dass sich der deutlich höhere Schwermetalleintrag in das Große Haff nicht ohne weiteres in den Sedimenten widerspiegelt. Die höchsten Konzentrationen an Kupfer, Blei und Zink sind zwar im Großen Haff zu finden (im südwestlichen Gebiet), im Durchschnitt liegen die Konzentrationen jedoch nicht deutlich über denen in den Sedimenten des Kleinen Haffs. Mangan ist im Übergangsbereich zwischen Kleinem und Großem Haff mit den höchsten Konzentrationen

zu finden (0,35 bis 0,4 % TS). In den übrigen Bereichen des Kleinen und des Großen Haffs tritt es mit Konzentrationen zwischen 0,1 und 0,25 % TS auf.

Demnach zeigen die Sedimente des Großen Haffs nicht die dem höheren Eintrag entsprechenden Konzentrationen an Schwermetallen auf. Als Ursache hierfür kommt ein höherer Schwermetallaustrag aus dem Großen Haff im Vergleich zum Kleinen Haff in Frage. Die in Kap. 4.6 durchgeführten Bilanzierungen sowie die in Kap. 5.3 folgende Auswertung zeigen, dass dies der Einfluss der regelmäßigen Ausbaggerungen sein kann. Mit der Entnahme der schwermetallreichen Schlicksedimente aus dem Schifffahrtskanal werden so große Schwermetallmengen entnommen, dass in den Sedimenten des Großen Haffs im Vergleich zum Kleinen Haff kaum höhere Konzentrationen auftreten. Insgesamt wurden pro Jahr etwa 28 t Blei, 27 t Kupfer, 604 t Mangan, 9 t Nickel, 8.300 t Eisen und 213 t Zink mit dem Baggergut aus dem Kanal entnommen (siehe Tab. 4.6 – 2). Hiermit übernehmen die regelmäßigen Ausbaggerungen eine Art Reinigungsfunktion für das Haff und die Ostsee, da diese Mengen an Schwermetallen aus dem Kreislauf dieser Ökosysteme entzogen werden.

5.2.7 Mineralogie

Quarz tritt in den Proben 1 und 11 aus dem Schifffahrtskanal in vergleichsweise hohen Konzentrationen auf. Die Quarzgehalte in den übrigen Proben sind deutlich geringer. Von Probe 10 bis 2 (von der Odermündung bis in das offene Haff) ist ein tendenziell abnehmender Trend in den Quarzkonzentrationen festzustellen. Eine Ursache hierfür liegt in den geochemischen Eigenschaften von Quarz. Quarz ist ein chemisch sehr widerstandsfähiges Mineral und verwittert relativ langsam. Daher tritt Quarz in vergleichsweise hohen Korngrößen auf, die nach dem Hjulström-Diagramm recht schnell sedimentiert werden und nicht so leicht wieder in Resuspension gehen. Aus diesem Grund kommt es im Bereich der Odermündung zur schnellen Ablagerung von mitgeführtem Quarzsand, was mit zunehmender Entfernung zur Odermündung weniger wird. Die hohen Quarzkonzentrationen in den Proben 1 und 11 lassen sich durch die dort vorherrschenden Strömungsverhältnisse erklären. Wie auch in Abb. 4.7 – 1 zu sehen, sind die Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich höher, als im Bereich des offenen Haffs. Dies hat zur Folge, dass sich hier weniger feinkörnigeres Material ablagert, was zu einer Dominanz des Sandes (Quarzes) in diesem Bereich führt. Die Feldspatkonzentrationen in den Kanalsedimenten verhalten sich ähnlich im Verlauf, wie die des Quarzes. Feldspat kommt ebenfalls in den Proben 1 und 11 in den höchsten Konzentrationen vor. Der abnehmende Trend der Konzentrationen von der Odermündung bis in das offene Haff (Proben 10 bis 2) ist jedoch deutlich weniger ausgeprägt als bei Quarz. Eine Ursache für diese ähnlichen Gehalte von Quarz und Feldspat in den Sedimenten des Kanals liegt in der Materialherkunft. Quarz, Feldspat und auch Dolomit wird vielfach mit dem einströmenden Ostseewasser in das Haff transportiert. Daher liegen vor allem die Konzentrationen in Ostseennähe höher. Dieses Material stammt vorrangig aus den Ostseeküstenbereichen, vor allem aus dem Geschiebemergel der Ostseeküsten-Kliffs. Auch mit den Oderfrachten wird Quarz und

Feldspat aus dem glazialen Untergrund mit transportiert. Dieses Material lagert sich vorrangig im Bereich der Odermündung ab.

Calcit kommt in den Proben 1 und 11 nur in vergleichsweise geringen Konzentrationen vor. Es ist jedoch davon abgesehen ein ausgeprägter, zunehmender Trend von Probe 10 an der Odermündung bis Probe 2 im Haff zu erkennen (Abb. 4.3 – 3). Ursache hierfür könnte die autochthone Calcitfällung (SCHWOERBEL, 1999) im Haff sein. Bei der Aktivität von Phytoplankton werden feine Kalkkristalle (Calcit) gebildet, die zum Teil sedimentieren (siehe dazu Kap. 5.2.2). Durch die Primärproduktion kommt es zur Verschiebung des Carbonatgleichgewichtes im Wasser mit einer pH-Verschiebung ins basische, was zu dem Ausfallen der Calcitkristalle führt. Diese Phytoplanktonaktivität scheint im stark eutrophen Oderhaff eine bedeutende Rolle zu spielen und spiegelt sich in den von der Oder bis ins Haff zunehmenden Calcitgehalten wider. Der von der Oder ins Haff zunehmende Trend ist ebenfalls in den reinen Calcium-Konzentrationen ebenfalls deutlich zu erkennen. Auch hier sind in den Proben 1 und 11 geringe Konzentrationen anzutreffen und der Gradient von Probe 10 bis 2 ist deutlich sichtbar (Abb. 4.3.2 – 6). Es ist zu vermuten, dass das gemessene Calcium hauptsächlich in calcitischer Form vorliegt.

Dolomit tritt in stark unterschiedlichen Konzentrationen auf (siehe Abb. 4.3 – 4). Dieses Calcium-Magnesium-Carbonat verhält sich geochemisch ähnlich wie Calcit, ist jedoch leichter löslich (SCHWOERBEL, 1999). In dieser Eigenschaft liegt vermutlich die Ursache für das unregelmäßige Auftreten von Dolomit in den Proben. Schnelle Calcitfällungs-Prozesse bei denen Calcium-Carbonate (Calcit) bzw. Calcium-Magnesium-Carbonate (Dolomit) ausfallen und die leichtere Löslichkeit des Dolomits, haben die unterschiedlichen Konzentrationen zur Folge. Diese Unterschiede zwischen den Proben spiegeln sich nicht in den reinen Magnesiumkonzentrationen wider (Abb. 4.3.2 – 8). Magnesium tritt in den Proben 1 und 11 mit nur geringen Konzentrationen auf und weist einen von Probe 10 an der Odermündung bis Probe 2 im offenen Haff zunehmenden Trend auf. Daher liegt die Annahme nahe, dass die Magnesiumgehalte im Dolomit nur einen geringen Anteil am Gesamtmagnesiumgehalt ausmachen.

Pyrit tritt in den Proben 1 und 11 ebenfalls in vergleichsweise geringen Konzentrationen auf und zeigt den von der Odermündung (Probe 10) bis ins Haff (Probe 2) zunehmenden Trend (Abb. 4.3 - 5). Dieses Eisensulfid ist das weitaus häufigste Sulfidmineral und kommt überall dort vor, wo sich stoffliche Voraussetzungen bieten. Unter anoxischen Verhältnissen im Sediment kommt es zur Sulfatreduktion und Pyritbildung. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Gehalte an Schwefel in den Kanalsedimenten, so ähnelt der Verlauf der Schwefelkonzentrationen stark dem der Pyritgehalte. Dies deutet darauf hin, dass der Großteil des in den Kanalsedimenten enthaltenen Schwefels in pyritischer Form vorliegt. Die Eisenkonzentrationen in den Kanalsedimenten hingegen weisen einen anderen Verlauf auf. Eisen tritt außer in den Proben 1 und 11 mit relativ konstanten Konzentrationen auf und zeigt eher einen leicht von Probe 8 (Odermündung) bis 2 (im offenen Haff) abnehmenden Trend. In den odernahen Proben 9 und 10 sind die Konzentrationen etwas geringer als in den in Richtung Haff folgenden Proben. Dieses relativ gleichmäßige Auftreten von Eisen in den Sedimentproben hängt mit den unterschiedlichen Formen und Verbindungen zusammen, in denen Eisen in Gewässer und Sediment vorkommt. Eine weitere häufig auftretende Verbindung neben Pyrit ist das Eisenphosphat (auch als Mineral Vivianit

($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$). Unter oxidischen Bedingungen kommt es leicht zur Bildung derartiger Eisen-III-Phosphate. Betrachtet man nun die Phosphorgehalte in den Kanalsedimenten, zeigt sich, dass die Konzentrationen im odernahen Bereich am höchsten sind und Richtung offenes Haff abnehmen, sich also genau gegensätzlich zu den Pyritkonzentrationen verhalten. Demnach ist es möglich, dass Eisen im Bereich der Odermündung vorrangig als Eisenphosphat-Verbindung und Bereich des offenen Haff vermehrt als Eisensulfid-Verbindung vorkommt.

5.3 Auswertung der Bilanzierung

Die Berechnungen in Kap. 4.6 zu den jährlichen Baggergutentnahmen zeigen, dass ein erheblicher Anteil des im Haff vorhandenen Materials durch diese Baggerungen entnommen wird. Bisher wurden diese Entnahmen bei Bilanzierungen zum Stoffhaushalt des Oderhaffs nicht mitberücksichtigt, da kaum Informationen über die Mengen vorlagen. In LEIPE et al., 1998 wird eingehend über Massenbilanzen für das Oderhaff diskutiert. Die von LEIPE et al., 1998 durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass im Oderhaff auf 350 km² Schlickfläche ein ca. 15 cm mächtiger Durchmischungshorizont liegt, der sich in den letzten 80 bis 100 Jahren vermutlich parallel zur Periode der Industrialisierung und Intensivierung der Landwirtschaft gebildet hat. Es wird angenommen, dass eine Veränderung der Sedimentdynamik in der Vergangenheit zu der heutigen Situation geführt hat, unter anderem hervorgerufen durch die einsetzende Eutrophierung Mitte des vergangenen Jahrhunderts. Die Eutrophierung eines Gewässers hat in der Regel eine erhöhte Wassertrübung, Absterben der Makrophytenbestände und eine verstärkte Sauerstoffzehrung zur Folge, was insgesamt zu einer Destabilisierung des Sedimentes führen kann. In dem Zusammenhang führen natürliche Strömungsverhältnisse in dem flachen Gewässer sowie Grundfischerei, Baggararbeiten und Schifffahrt zu einer Erhöhung der Sedimentdynamik und Resuspension (vgl. Kap. 5.2.1). In LEIPE et al., 1998 wird davon ausgegangen, dass im Oderhaff keine Netto-Sedimentation stattfindet. Hier heißt es, dass das von der Oder eingetragene Material „zunächst teilweise abgelagert, periodisch in die Sedimentoberfläche eingemischt, resuspendiert und früher oder später in die Ostsee weiter transportiert“ wird (LEIPE et al., 1998, S. 52). Den durchgeführten Berechnungen zufolge befindet sich etwa ein Viertel des Odereintrages im Haff, während das übrige Material in die Ostsee weitertransportiert wurde. Diese Überlegungen zu einer Massenbilanz für das Oderhaff fanden ohne Berücksichtigung der jährlichen Ausbaggerungen statt.

Die in Kap. 4.6 durchgeführten Berechnungen über das Baggergut zeigen jedoch, dass die Menge, die pro Jahr entnommen wird, durchaus von nicht zu vernachlässigender Größenordnung ist. Die Werte der Berechnungen über die stofflichen Inhalte des Baggergutes können zwar nur ungefähr das widerspiegeln, was tatsächlich mit dem Baggergut entnommen wurde, da die Baggergutmengen mangels früherer Untersuchungen der Kanalsedimente lediglich mit den aktuell im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Konzentrationen multipliziert werden konnten. Dennoch scheint die Verwendung dieser Konzentrationen angemessen, da sich das von der Oder mitgeführte

Material vorrangig nicht direkt im Kanal abgelagert. In dem Kanal lagert sich im Wesentlichen resuspendiertes Material verschiedenen Alters aus dem Durchmischungshorizont des Haffs ab. In diesem oberen Durchmischungshorizont vermischen sich die Nährstoff- und Schwermetallfrachten vieler Jahre und verschiedener Konzentrationen, so dass eine Veränderung der Oderfrachten in diesen Sedimenten nicht unmittelbar erkennbar wird. Aus diesem Grund wäre ein Bezug der Konzentrationen in den jährlichen Oderfrachten auf das Baggergut ungenau, da das Haffmaterial, das sich im Kanal abgelagert nicht mitberücksichtigt werden würde. Dennoch muss beachtet werden, dass die Konzentrationen in den Oderfrachten im Laufe der vergangenen Zeit (besonders der letzten Jahre) deutliche Veränderungen zu verzeichnen hatten und dies in den Berechnungen zu den enthaltenen Mengen im Baggergut nicht mitberücksichtigt werden konnte. Die errechneten Werte sind damit nur als ungefähre Abschätzungen über die enthaltenen Mengen zu werten.

In dem Zeitraum von 1986 bis 2000 wurden jährlich knapp 50 % der von der Oder eingetragenen Menge mit dem Baggergut aus der Schifffahrtsrinne entnommen. Legt man die Berechnungen von LEIPE et al., 1998 zu Grunde, dass etwa ein Viertel des gesamten Odereintrages auf den Schlickflächen des Oderhaffs abgelagert wird, muss die Schlussfolgerung, dass $\frac{3}{4}$ des Odereintrages in die Ostsee weitertransportiert wurden, neu überdacht werden. Die Mengen an Baggergut, die in den letzten Jahren (1986 bis 2000) entnommen wurden, deuten eher darauf hin, dass lediglich etwa ein Viertel des Odereintrages in die Ostsee ausgeschwemmt wird, während etwa die Hälfte mit dem Baggergut entnommen wird und nicht in die Ostsee gelangt.

Demnach wird durch die regelmäßige Ausbaggerung der Schifffahrtsrinne Oderfracht zurückgehalten, welches ohne diese Materialentnahmen in die Ostsee weitertransportiert werden oder zu einer Netto-Sedimentation im Haff führen würde. Daher stellt das Oderhaff durch die künstliche Schifffahrtsrinne eine Senke für die Ostsee dar. Das Oderhaff würde heute ohne diese langjährigen Materialentnahmen vermutlich einen anderen Charakter aufweisen. Eine deutliche Netto-Sedimentation könnte im Haff zu verzeichnen sein. Folgen hiervon wären Verflachung des Gewässers mit Verlandungserscheinungen.

5.4 Konsequenzen der geplanten Kanalvertiefung für das Oderhaff

5.4.1 Veränderungen im Stoffhaushalt

Bei der geplanten Vertiefung der Schifffahrtsrinne werden sowohl belastete Schlicke also auch in der Regel unbelastetes sandiges Material entnommen. Legt man die ungefähren Schichttiefen zu Grunde, die sich aus den Sedimentkernen ergeben, die im Rahmen der Arbeiten von LEIPE et al., 1998 genommen wurden, ergibt sich der in Abb. 5.4.1 - 1 dargestellte Querschnitt für den Kanalbereich.

Der oberste Bereich der Sedimente wird aus Schlickten der Brackwasserfazies gebildet, gefolgt von einem Torfhorizont worauf schließlich die spätglazialen mergeligen Sande folgen (siehe auch Kap.

2.2.3). In Abbildung 5.4.1 - 1 wurde eine schematische Darstellung der Sedimente im Bereich des Schifffahrtskanals erstellt, die eine Abschätzung über das anfallende Baggergut bei der geplanten Kanalvertiefung ermöglichen soll. Die Darstellung zeigt einen schematischen Querschnitt durch die Sedimente des Haffs im Kanalbereich und kann nur ein ungenaues Bild der tatsächlichen Situation im Haff widerspiegeln, da die Schichttiefen und -mächtigkeiten je nach Lage im Haff von unterschiedlicher Ausprägung sind. Dennoch gibt sie einen ungefähren Überblick über die unterschiedlichen Materialien, die bei der geplanten Vertiefung und Verbreiterung anfallen werden.

Bei dem anfallenden Baggergut handelt es sich demnach im Wesentlichen um im Allgemeinen unbelastete spätglaziale mergelige Sande sowie um belastete Schlicke in den oberen Sedimentbereichen (Abb. 5.4.1 - 1). Das Maritime Office of Szczecin führt den Ausbau der Schifffahrtsrinne durch und erwartet eine Menge von etwa 200.000 m³ sandigen Materials (schriftliche Mitteilung A. Borowiec, MOS). Über die erwarteten Mengen an schlickigem Material werden keine Angaben gemacht. Bei Durchführung der geplanten Hafenmodernisierungen im Rahmen der Ausbaumaßnahmen werden von der WELTBANK, 2000 die in Tab. 5.4.1 - 1 dargestellten Mengen an Baggergut erwartet.

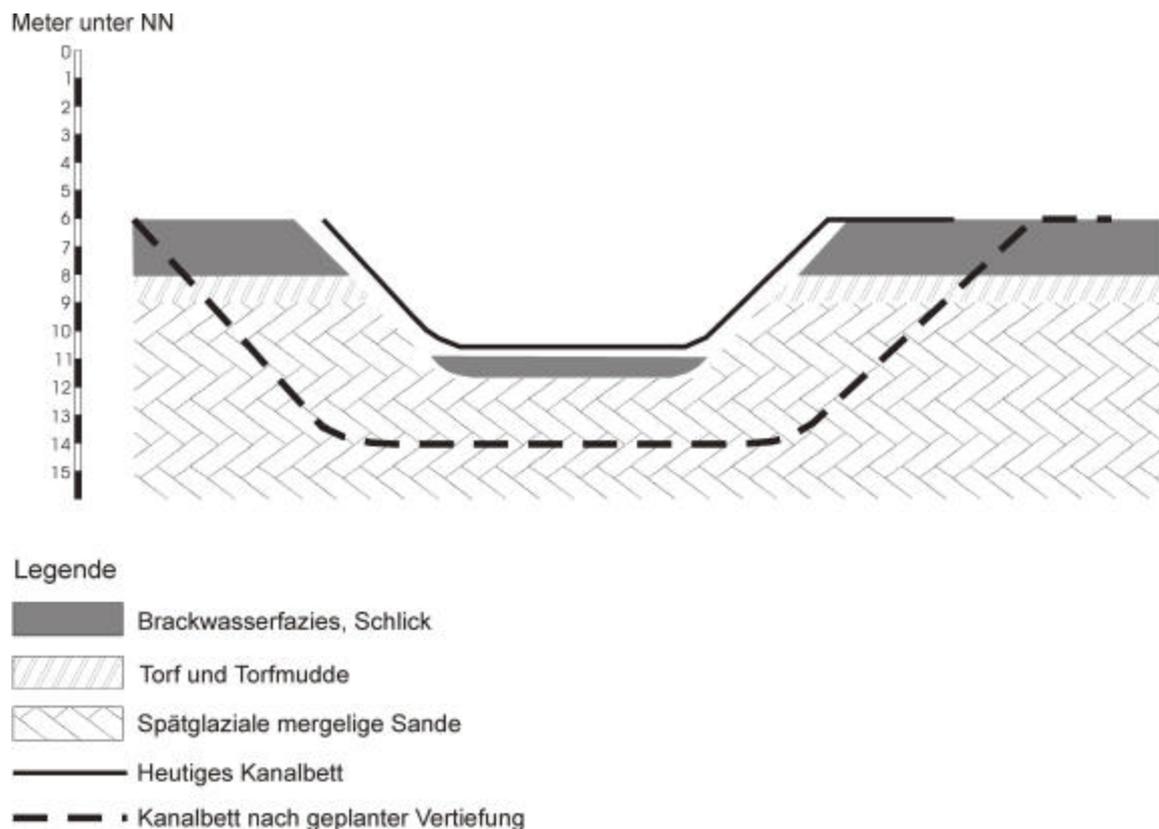


Abb. 5.4.1 - 1: Schematischer Querschnitt des Schifffahrtskanals im Oderhaff vor und nach der geplanten Vertiefung unter Berücksichtigung der verschiedenen Sedimentschichten (ungefähre Schichttiefen nach LEIPE et al., 1998, siehe dazu Abb. 2.2.3 - 1 in Kapitel 1.3; die Sedimentkerne 18122 und 18120 befinden sich in Kanalnähe westlich und östlich des Kanals und dienen als Grundlage für die schematische Darstellung).

Grad der Kontaminierung des Baggergutes	% des Gesamtbaggergutes	Volumen der geplanten Ausbaggerung in m ³	Fläche in km ²
sauber	44,6	564.636	2,62
geringfügig kontaminiert	39,5	500.070	2,32
kontaminiert	10,5	132.930	0,62
stark kontaminiert	5,4	68.364	0,32
gesamt	100	1.266.000	5,88

Tab. 5.4.1 - 1: Erwartete Mengen an kontaminiertem Baggergut, die bei Durchführung der Hafenmodernisierungen anfallen (nach WELTBANK, 2000).

Demnach werden etwa 201.294 m³ kontaminiertes und stark kontaminiertes Material beim Ausbau der Hafenanlagen erwartet. Hierbei wird es sich im Wesentlichen um schllickiges Material handeln, das von ähnlicher Zusammensetzung ist, wie die in der Schifffahrtsrinne untersuchten Schlicke. Weist dieses Material ebenfalls eine Trockenraumdichte von durchschnittlich 0,2 g/cm³ auf, ist eine Menge von 40.258,8 t Trockensubstanz Baggergut zu erwarten. Es ist davon auszugehen, dass die Schwermetallbelastung in Hafenbereichen höher liegt als in der Schifffahrtsrinne und auch die enthaltenen Nährstoffe liegen vermutlich nicht weit unter denen in der Schifffahrtsrinne. Daher werden im Rahmen der Hafenmodernisierungen ungefähr die in Tab. 5.4.1 - 2 dargestellten Mengen an Nährstoffen, Schwermetallen und anderen Inhaltsstoffen mit dem Baggergut entnommen.

Inhaltsstoff	Durchschnittlicher Gehalt im Kanalschlick	Menge in 40.258,8 t TS
TOC	107,05 mg/g	4309,7 t
N	10,74 mg/g	432,38 t
P	4,66 mg/g	187,61 t
S	8,39 mg/g	337,77 t
Mg	5,8 mg/g	233,5 t
Ca	40,4 mg/g	1626,45 t
Pb	139 mg/kg	5,6 t
Cu	130,11 mg/kg	5,24 t
Mn	2948,22 mg/kg	118,7 t
Ni	44 mg/kg	1,77 t
Fe	40,5 mg/g	1630,48 t
Zn	1039,67 mg/kg	41,86 t

Tab. 5.4.1 - 2: Durchschnittsgehalte verschiedener Elemente im Schlicksediment des Schifffahrtskanals sowie Berechnung der im Baggergut aus Hafengebieten enthaltenen Mengen bei Voraussetzung vergleichbarer Konzentrationen wie im Schifffahrtskanal.

In Folge der zukünftigen Kanalvertiefung und -verbreiterung ist mit der Erhöhung der jährlichen Baggergutentnahmen zu rechnen. Um die 14,5 m tiefe Rinnen erhalten zu können, wird durch die Verbreiterung eine insgesamt größere Fläche ausgebaggert werden müssen. Dies wird zu größeren

Baggergutmengen pro Jahr führen, was wiederum die erhöhte Entnahme von Nähr- und Schadstoffen bedeutet. Zudem wird sich das Erosions- und Akkumulationsgeschehen besonders in Kanalnähe in Zukunft verändern. Ein weiterer Faktor, der möglicherweise für Veränderungen im Stoffhaushalt sorgen wird, ist die geplante Verklappung von sandigem Material im Oderhaff. Dies könnte schlickiges Material überlagern und so eine zukünftige Freisetzung der im Sediment vorhandenen Nähr- und Schadstoffe in diesen Bereichen verhindern. Je nach Größe der überlagerten Fläche kann dies die Festlegung großer Mengen an Nähr- und Schadstoffen bedeuten, die somit dem Stoffkreislauf entzogen werden würden.

Es bleibt zu beobachten, ob die oben genannten Punkte die Reinigungsfunktion des Oderhaffs durch den Kanal gegenüber der Ostsee merkbar verändern werden.

5.4.2 Baggergutproblematik

Im Rahmen der geplanten Ausbau- und Modernisierungsmaßnahmen im Bereich der Schifffahrtsrinne und der Häfen werden große Mengen an Baggergut anfallen. Im Wesentlichen handelt es sich um unbelastetes sandiges Material (WELTBANK, 2000). Hierfür ist eine weitere Verwendung für bauliche Maßnahmen geplant. Das Material kann beim Bau oder bei Reparatur von Uferbefestigungen eingesetzt werden. Nicht benötigtes Material wird zum Teil im Meer und zum Teil im Oderhaff verklappt.

Als Baggergut bezeichnet man nach DIN 19731 [7] zunächst „Bodenmaterial, welches im Rahmen von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen aus Gewässern entnommen wird“. Demnach kann Baggergut aus jungen Sedimenten bzw. Unterwasserböden der Gewässersohle, Oberböden im Ufer- bzw. Überschwemmungsbereich des Gewässers sowie Unterböden und deren Ausgangsmaterial (Locker-, und Festgesteine) aus dem Gewässerbettumfeld bestehen.

Sowohl durch das Baggern als auch durch das Ablagern von Baggergut kann die aquatische Umwelt geschädigt werden. In Deutschland ist im Vorfeld der Baggermaßnahmen eine Umweltverträglichkeitsstudie durchzuführen und zu prüfen, ob Baggergut vermieden oder die Menge minimiert werden kann (HABAK-WSV, 1999). Zudem sind mehrere Fachgutachten zu erstellen, wie beispielsweise ein Baugrundgutachten für die Nassbaggerei, ein geologisches Schichtenprofil entlang der Ausbaustrecke, Gutachten über die Bodenarten an den vorgesehenen Klappstellen, Schadstoffbelastungsgutachten und ähnliches, je nach den jeweiligen Gegebenheiten. Diese Untersuchungen und Gutachten bilden die Grundlage für die Entscheidungen über die Durchführung der Baggermaßnahme und deren Konsequenzen in Bezug auf den anschließenden Umgang mit dem Baggergut.

Fällt trotz der Bemühungen, Baggergut möglichst zu vermeiden, Baggergut an, muss über den weiteren Umgang damit entschieden werden. Die Bewertung und die Entscheidung über den Umgang mit dem Baggergut kann folgendermaßen ablaufen:

Umgang mit Baggergut	Maßnahme	Entscheidungsgrundlage
<i>Baggertextatus?</i>	Repräsentative Probenahme, Baggertextuntersuchung, Abwägung von Status und Menge	Natürliche Hintergrunwert, Regionale Belastungswerte
<i>Verklappen?</i>	Weitere Untersuchungen für Auswirkungsprognose	HELCOM-Richtlinie (1992), HABAK (1999)
<i>Verwertung an Land?</i>	Untersuchung gemäß Verwertungsabsicht	z.B. AbfklärV
<i>Lagerung an Land?</i>	Untersuchungen gemäß Ablagerungsabsicht	z.B. LAGA (1994)
<i>Aufbereitung?</i>	Untersuchungen gemäß Aufbereitungsabsicht	Technische Parameter

Tab. 5.4.2 - 1: Entscheidungsablauf bei der Baggertextbewertung (nach HEININGER et al. 1998, S. 14).

Im Folgenden wird der Entscheidungsablauf über den Umgang mit Baggertext nach HEININGER et al. (siehe Tab. 5.4.2- 1) auf die bei der Kanalvertiefung vorliegenden Gegebenheiten angewandt:

Baggertexttatus?

Unter diesen Punkt fällt die Probenahme und Untersuchung der Schlicke des Schifffahrtskanals auf die verschiedenen geochemischen, mineralogischen und physikalischen Parameter, wie sie für diese Arbeit durchgeführt wurden. Es gilt, die gewonnenen Daten mit Berücksichtigung der natürlichen Hintergrunwert und der regionalen Belastungswerte zu bewerten, wie es hier in den vorausgegangenen Kapiteln für die Schlicke des Schifffahrtskanals geschehen ist. Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass die Schwermetall- und die Nährstoffgehalte in den Schlickten des Kanals z. T. erhöht sind. Eine Untersuchung der spätglazialen mergeligen Sande wurde in diesem Rahmen nicht vorgenommen. Dies müsste für eine Entscheidung über den Umgang mit diesem Baggertext noch durchgeführt werden. Aufgrund des vorliegenden Datenmaterials kann davon ausgegangen werden, dass diese Sande unbelastet sind.

Verklappen?

Verschiedene Meeresschutzabkommen regeln die Baggertextverbringung auf See, um eine ökologisch vertretbare Ablagerung zu gewährleisten. Für die Meere weltweit gilt die so genannte *London Convention*, für den Nordost-Atlantik gilt die *OSPAR Convention* und für die Ostsee ist die *Helsinki Convention* zu beachten.

Bei der Verklappung von Baggertext in Gewässern gilt das so genannte Verschlechterungsverbot. Dieses Verbot beinhaltet, dass Baggertext nur auf gleichartiges oder ökologisch weniger wertvolles Material aufgebracht werden darf. Höher belastetes Material darf nicht auf Material mit geringeren

Belastungen aufgebracht werden (Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund, mündliche und schriftliche Mitteilung).

Eine Beurteilung des Baggergutes in Hinblick auf die Verklappung in deutschen Küstengewässern erfolgt nach den *Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut im Küstenbereich* (HABAK-WSV). Hierin ist festgelegt, welche Schritte und Maßnahmen beachtet werden müssen, wenn Baggergut im Küstenbereich verklappt werden soll. In den Anlagen der Handlungsanweisungen befinden sich unter anderem *Informationen zu chemischen, ökotoxikologischen und biochemischen Untersuchungen*, die beispielsweise Richtwerte für die Bewertung von Schadstoffen im Baggergut enthalten. In Bezug auf Schwermetalle sind dies folgende Werte:

Schadstoff	Richtwert RW ₁ ¹⁾ in mg/kg	Richtwert RW ₂ in mg/kg
Arsen	30	150
Cadmium	2,5	12,5
Chrom	150	750
Kupfer	40	200
Quecksilber	1	5
Nickel	50	250
Blei	100	500
Zink	350	1750

Tab. 5.4.2 – 2: Richtwerte RW₁ und RW₂ für die Bewertung von Schwermetallen in Baggergut (nach HABAK-WSV, Anlage 3).

Da die Schwermetallgehalte in den Sedimenten des Schifffahrtskanals für die Gesamtproben und nicht bezogen auf die Fraktion < 20 µm bestimmt wurden, kann hier kein direkter Vergleich erfolgen. Es ist aber anzumerken, dass die Gehalte in den Schlick-Sedimenten des Schifffahrtskanals bei Kupfer, Blei und Zink im Mittel auch bei Untersuchung der Gesamtproben über dem Richtwert RW₁ liegen und es sich demnach um belastetes Material handelt, für das eine Verklappung in der Ostsee nicht in Frage kommt.

Die mergeligen Sande hingegen können verklappt, was auch geplant ist. Teile des Baggergutes werden in der Ostsee und Teile im Oderhaff verklappt (WELTBANK, 2000).

Verwertung an Land?

Unbelastetes Material kann beispielsweise direkt wieder bei wasser- und erdbaulichen Maßnahmen eingesetzt werden, wie zum Beispiel für Strandvorspülungen und ähnliches. Belastetes Baggergut hingegen muss je nach Belastungsgrad als Abfall eingestuft werden und an Land auf geschlossenen Deponien untergebracht oder entsprechend behandelt werden, um eine weitere Verwendung zu ermöglichen. Die Klärschlammverordnung (ABFKLÄRV, 15. April 1992) schreibt genau vor, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit als Klärschlamm zu behandelndes Material

weiter verwendet werden kann. Für das Aufbringen von Klärschlamm auf landwirtschaftlich oder gartenbaulich genutzten Grund heißt es in § 3 Abs. 5: „Klärschlamm darf zum Aufbringen auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden nur abgegeben oder dort aufgebracht werden, wenn in Abständen von längstens sechs Monaten Proben des Klärschlammes durch eine von der zuständigen Behörde bestimmten Stelle auf die Gehalte an Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink, [...] untersucht werden [...]“ (KLÄRSCHLAMMVERORDNUNG, ABFKLÄRV vom 15. April 1992). Der § 4 regelt anschließend die Aufbringungsverbote und Beschränkungen. Hier werden unter anderem die genauen Grenzwerte für Schwermetalle festgelegt, bei deren Überschreitung das Material nicht auf die beschriebenen Flächen aufgebracht werden darf: § 4 Abs. 12: „Das Aufbringen von Klärschlamm auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden ist verboten, wenn sich aus Klärschlammuntersuchungen nach § 3 Abs. 5 ergibt, dass die Gehalte nachstehender Schwermetalle mindestens einen der folgenden Werte übersteigt (Milligramm je Kilogramm Schlamm-Trockenmasse):

<i>Blei</i>	900
<i>Cadmium</i>	10
<i>Chrom</i>	900
<i>Kupfer</i>	800
<i>Nickel</i>	200
<i>Quecksilber</i>	8
<i>Zink</i>	2500

Bei Böden, die im Rahmen der Bodenschätzung als leichte Böden eingestuft sind und deren Tongehalt unter 5 vom Hundert liegt oder deren Untersuchungen gemäß § 3 Abs. 4 einen pH-Wert von mehr als 5 und weniger als 6 ergeben hat, sind in Satz 1 folgende Werte für Cadmium und Zink einzusetzen:

<i>Cadmium</i>	5
<i>Zink</i>	2000“

(KLÄRSCHLAMMVERORDNUNG, ABFKLÄRV vom 15. April 1992).

Vergleicht man nun diese Angaben mit den im Kanal gemessenen Werten, wird deutlich, dass die Gehalte aller gemessenen Schwermetalle unter den Grenzwerten liegen. Nach diesem Kriterium ist demnach eine Verwertung des Baggergutes auf landwirtschaftlichen Flächen möglich. Diese Art der Materialverwertung sind nach schriftlicher Mitteilung des MOS (A. Borowiec) oder in dem Bericht der WELTBANK, 2000 jedoch nicht vorgesehen.

Lagerung an Land?

Probleme bei der Unterbringung auf Deponien treten vor allem auf, wenn es sich um Nassbaggergut handelt, denn es muss vorher entwässert werden. Dies kann auf Entwässerungsflächen, wie Spülfelder oder Polder, oder in Entwässerungsanlagen wie Pressen oder Trockner geschehen.

In den *Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut im Binnenland* (HABAB-WSV) sind unter Anführung der verschiedenen rechtlichen Grundlagen unterschiedliche Möglichkeiten

des Umgangs von Baggergut im Binnenland aufgeführt, wozu auch die Lagerung, Beseitigung und Verwertung an Land zählen.

Im Fall des Baggergutes, dass bei dem Ausbau des Oderhaff-Schiffahrtskanals anfällt, ist die Lagerung des belasteten Materials an Land geplant. Die vorhandenen Spülfelder und Deponien an Land werden hierfür genutzt, sind jedoch weitestgehend ausgelastet. Im Rahmen der Weltbankförderungen ist daher der Bau von Spülfeldern für 2,9 Mio. US\$ vorgesehen (WELTBANK, 2000), um eine umweltgerechte Beseitigung des Materials zu gewährleisten.

Aufbereitung?

Bei der Behandlung des Baggergutes zur Schadstoffverringerng kommen verschiedene technische Verfahren in Frage. Möglich ist die Abtrennung, Zerstörung oder Immobilisierung der Schadstoffe im Baggergut. Nach der entsprechenden Behandlung kann das schadstoffabgereicherte Baggergut beispielsweise als Schluff, Sand oder Kies in der Baustoffindustrie eingesetzt werden sowie als Dammschüttmaterial oder Bodenaustauschmaterial Verwendung finden. Außerdem kann es bei der Herstellung verschiedener Verwertungsgüter, wie etwa Ziegel oder Schaumglas, eingesetzt werden. Verschiedene Gesetze regeln die Verwertung von Baggergut:

- ? in der Land-/Forstwirtschaft und zur Rekultivierung: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung BBodSchV von 1999 [...] als untergesetzliches Regelwerk zum Bundes-Bodenschutzgesetz BBodSchG von 1998 [...],
- ? als Baustoff: Technische Regeln der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen“ [...],
- ? als Untertageversatz im Bergbau: Technische Regeln des Länderausschusses Bergbau „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen als Versatz unter Tage“ [...]

(HABAB-WSV, 2000).

Über eine mögliche Aufbereitung des durch den Ausbau des Oderhaffschiffahrtskanals anfallenden Baggergutes durch Maßnahmen zur Schadstoffverringerng liegen keine Informationen vor.

5.4.3 Veränderungen des Hydrosystems

Die zwei durchgeführten Modellierungsläufe für die Strömungsverhältnisse im Oderhaff in heutigem Zustand sowie mit vertieftem Kanal, sollen Aufschluss darüber geben, ob merkliche Veränderungen im Hydrosystem des Haffs zu erwarten sind. Von Interesse ist insbesondere der

Vergleich der durch den Piastowski-Kanal abfließenden Wassermengen mit den Abflussmengen nach geplanter Vertiefung. In Tab. 5.4.3 – 1 sind die abfließenden Wassermengen, die sich aus den Modellierungen mit FEMFLOW2D errechnet wurden, dargestellt und die Änderung in Prozent angegeben. Deutlich wird, dass der Abfluss durch den Piastowski-Kanal voraussichtlich bei allen Windrichtungen zunehmen wird. Der Anstieg liegt etwa zwischen 5 % bei Ostwind und 19 % bei Nordwestwind. Die durchschnittliche, prozentuale Zunahme kann nicht einfach aus den Prozentangaben der verschiedenen Windrichtungen gemittelt werden, da nicht jede Windrichtung gleich häufig auftritt. In dieser Region überwiegt die Windrichtung Südwest. Bei dieser Windrichtung nimmt der Abfluss durch den Piastowski-Kanal nach den Berechnungen aus der Modellierung um etwa 16 % zu.

Abfluss unter unterschiedlichen Bedingungen (in m³/s)			
Windrichtung	Kanal heute (ca. 10,5 m)	Kanal 14,5 m	Änderung (in %)
Ost	203,36	213,89	+ 5,18
Nordost	216,94	233,29	+ 7,54
Nordwest	246,07	293,66	+ 19,34
Nord	230,39	270,58	+ 17,44
Südost	202,96	214,63	+ 5,75
Südwest	240,92	278,71	+ 15,69
Süd	215,35	234,76	+ 9,02
West	258,76	296,9	+ 14,74

Tab. 5.4.3 – 1: Vergleich der Abflussmengen durch den Piastowski-Kanal bei heutigen Bedingungen und bei vertieftem Kanal.

In Tab. 5.4.3 – 2 wurden die mit Hilfe des Simulationsmodells FEMFLOW2D ermittelten Wassermengen aufgeführt, die durch die drei verschiedenen Mündungsarme Peene, Swina und Dziwna in die Ostsee abfließen. Berechnet wurden die Abflussmengen für die verschiedenen Windrichtungen jeweils für das Oderhaff mit dem Schifffahrtskanal in heutigem Zustand, sowie für die Situation mit einem auf 14,5 m vertieften Kanal. Des weiteren wurden die Gesamtabflussmengen pro Zeiteinheit ermittelt, die durch die drei Mündungsarme abfließen. Berechnet wurden zudem die jeweiligen prozentualen Anteile vom Gesamtabfluss in die Ostsee. Es wird deutlich, dass der Anteil, der durch die Swinamündung und damit durch den Piastowski-Kanal abfließenden Wassermenge bei allen Windrichtungen zunimmt, wenn auch zum Teil nur sehr gering. Die Anteile an der Gesamtabflussmenge, die durch die anderen beiden Mündungsarme Peene und Dziwna abfließen, nehmen zu gleichen Teilen um die entsprechenden Prozentpunkte ab. Für die in dieser Region dominante Windrichtung Südwest, wurde beispielsweise eine anteilige Zunahme des Abflusses durch die Swinamündung um etwa 2,5 Prozentpunkte errechnet.

		Peene	Swina	Dziwna	Gesamtabfluss
Windrichtung	Kanaltiefe				
Ost	10,5 m	68,94	203,36	30,13	302,43 m ³ /s
		22,8	67,24	9,96	100%
	14,5 m	69,34	213,89	28,66	311,89 m ³ /s
		22,23	68,58	9,19	100%
Nordost	10,5 m	43,81	216,94	29,37	290,12 m ³ /s
		15,1	74,78	10,12	100%
	14,5 m	44,23	233,29	28,2	305,72 m ³ /s
		14,47	76,31	9,22	100%
Nordwest	10,5 m	58,2	246,07	31,99	336,26 m ³ /s
		17,31	73,18	9,51	100%
	14,5 m	57,13	293,66	20,65	371,44 m ³ /s
		15,38	79,06	5,56	100%
Nord	10,5 m	18,77	230,39	13,28	262,44 m ³ /s
		7,15	87,79	5,06	100%
	14,5 m	17,2	270,59	12,06	299,85 m ³ /s
		5,74	90,24	4,02	100%
Südost	10,5 m	63,81	202,96	13	279,77 m ³ /s
		22,81	72,55	4,65	100%
	14,5 m	64,52	214,62	11,29	290,43 m ³ /s
		22,22	73,9	3,89	100%
Südwest	10,5 m	35,73	240,92	35,26	311,91 m ³ /s
		11,46	77,24	11,3	100%
	14,5 m	34,73	278,71	36,46	349,9 m ³ /s
		9,93	79,65	10,42	100%
Süd	10,5 m	29,05	215,35	19,28	263,68 m ³ /s
		11,02	81,67	7,31	100%
	14,5 m	30,6	234,76	21,09	286,45 m ³ /s
		10,68	81,95	7,36	100%
West	10,5 m	63,49	258,76	36,14	358,39 m ³ /s
		17,72	72,2	10,08	100%
	14,5 m	62,26	296,9	37,18	396,34 m ³ /s
		15,71	74,91	9,38	100%

Tab. 5.4.3 – 2: Abflussmengen, die durch die drei Mündungsarme Peene, Swina und Dziwna in die Ostsee abfließen, unter Angabe der prozentualen Anteile. Berechnung mittels Simulationsmodell Femflow2D.

Die geplante Vertiefung des Schifffahrtskanals wird demnach voraussichtlich merkliche Folgen für das Oderhaff, aber auch für die Ostsee haben. Die größeren Wassermengen, die pro Zeiteinheit in die Ostsee abfließen, bedeuten möglicherweise eine Verkürzung der Wasseraufenthaltszeit im Oderhaff. Dies wird sowohl Veränderungen im Stoffhaushalt des Oderhaffs nach sich ziehen, als auch Folgen für die Ostsee haben. Eine Veränderung des Schwebstofftransportes in die Ostsee ist bei kürzeren Wasseraufenthaltszeiten und höheren Abflussmengen pro Zeiteinheit zu erwarten.

In dem Modell wird der Salzwasserzustrom aus der Ostsee in das Haff zwar nicht mitberücksichtigt, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass nicht nur der Abfluss von Haffwasser in die Ostsee zunimmt, sondern eine gesamte Zunahme des Wasseraustausches

zwischen den beiden Gewässern erfolgen wird. Dies kann zu höheren Salzkonzentrationen im Wasser des Oderhaffs führen und ein weiteres Vordringen von Ostseewasser in die Oder bedeuten.

6. Zusammenfassung

Küstengewässer wie Bodden und Haffe spielen eine bedeutende Rolle in Bezug auf die Stoffaustauschprozesse zwischen Land und Meer. Sie können beispielsweise als Filter, Senke oder Transformator für fluviale Materialfrachten aus dem Binnenland fungieren. In dieser Arbeit war von Interesse, wie sich der künstlich angelegte Schifffahrtskanal, der das Oderhaff durchquert, auf die Eigenschaften und Funktionen des Haffs in dieser Hinsicht auswirkt. Stellt der Schifffahrtskanal eine Falle für Sedimente, Nähr- und Schadstoffe dar?

Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, wurden Sedimentproben aus dem Kanal untersucht, Echolotaufnahmen von dem Kanal gemacht, Modellierungen mit dem Simulationsmodell FEMFLOW2D durchgeführt und bereits vorhandenes Datenmaterial über das Oderhaff ausgewertet.

Die Untersuchungen der Sedimentproben auf ihre Zusammensetzung haben ergeben, dass sich im Kanal vorrangig schlackiges Material ablagert, das reich an organischen Bestandteilen ist und große Nähr- und Schadstoffmengen enthält. Durch die Analyse der Sedimentzusammensetzung waren zum Teil Rückschlüsse auf die Herkunft des Materials möglich. In der Rinne lagert sich Oderfracht, umgelagertes Material aus dem Haff, das dem Durchmischungshorizont entstammt und verschiedenen Alters ist, sowie aus der Ostsee eingeschwemmtes Material ab. Die allgemeinen Strömungsverhältnisse, Wind, Schiffsverkehr und ähnliches verursachen Resuspensions- und Umlagerungsprozesse und bewirken eine zusätzliche Materialdurchmischung im Kanal.

Um die Auswirkungen des Kanals auf das Haff und schließlich für die Ostsee beurteilen zu können, müssen die regelmäßigen Baggerarbeiten mit berücksichtigt werden, die im Kanal durchgeführt werden, um die Tiefe zu erhalten. Die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen zu den stofflichen Inhalten im jährlich entnommenen Baggergut haben gezeigt, dass es sich hierbei um durchaus relevante Größenordnungen handelt. Ein Vergleich der in den Jahren 1986 bis 2000 durchschnittlich entnommenen Baggergutmenge mit der durchschnittlichen Fracht der Oder nach Berechnungen aus LEIPE et al. (1998) haben ergeben, dass knapp 50 % der Odereintragsmenge durch die Baggerungen entnommen wird. Eine anthropogene Entnahme dieser Größenordnung sollte bei Berechnungen zu Stoffhaushalt des Haffs und Materialtransportprozessen in die Ostsee keinesfalls außer Acht gelassen werden. Der Kanal übernimmt durch diese regelmäßigen Materialentnahmen eine Art Reinigungsfunktion, da unter anderem schadstoffbelastetes Material aus dem Gewässer entnommen wird und somit nicht mehr in die Ostsee weiter transportiert werden kann. Auch im Sediment gespeicherte Nährstoffe werden mit dem Baggergut aus dem Gewässer entnommen. Diese könnten anderenfalls wieder aus dem Sediment freigesetzt werden und sich entsprechend auf die Trophie des Haffs auswirken. Auch in Zukunft ist ein deutlicher Einfluss des Kanals durch die regelmäßig durchgeführten Baggerungen zu erwarten. Schon durch die

Ausbaggerungen für die Kanalvertiefung und –verbreiterung wird es zur Entnahme großer Mengen an Sediment kommen, aber auch in der Folgezeit werden möglicherweise verstärkt regelmäßige Baggerungen nötig sein, um die neue Tiefe von 14,5 m erhalten zu können.

Die Modellierungen der Strömungsverhältnisse im Haff haben gezeigt, dass nach geplanter Kanalvertiefung eine Verstärkung des Wasseraustausches zwischen Haff und Ostsee zu erwarten ist. Dies kann höhere Salzkonzentrationen im Oderhaff und weiter oderaufwärts nach sich ziehen und sich auf die chemischen Prozesse im Gewässer auswirken. Eine Veränderungen im Stoffhaushalt des Oderhaffs ist zu erwarten, die auch für den Materialtransport in die Ostsee von Bedeutung sein wird.

Abschließend ist demnach festzustellen, dass der Kanal durch die regelmäßigen Baggerungen durchaus als Materialsenke bzw. –falle zu bewerten ist. Durch diesen künstlichen Schifffahrtskanal übernimmt das Oderhaff eine Art Filterfunktion zwischen der Oder und der Ostsee. Durchaus relevante Mengen an Nähr- und Schadstoffen werden mit dem Baggergut entnommen und gelangen somit nicht in die Ostsee.

7. Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Herrn PD Dr. G. Schernewski für die intensive und engagierte Betreuung dieser Arbeit. Besonders bedanke ich mich für die Unterstützung bei der Erstellung zweier Posterbeiträge und Artikel für die Tagung des „Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten“ sowie der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie.

Herrn Prof. Dr. H. Sterr danke ich für die Übernahme der Funktion des Zweitprüfers und die stete Gesprächsbereitschaft.

Dr. T. Leipe vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde gebührt ebenfalls mein herzlicher Dank für die Unterstützung bei den geologischen Analysen der Proben und für die Hilfs- und Diskussionsbereitschaft bei wissenschaftlichen Fragen. Insbesondere bedanke ich mich für die Ermöglichung der Teilnahme an einer mehrtägigen Expedition mit dem Forschungsschiff „Professor Albrecht Penck“ in das Gebiet des Oderhaffs sowie das Seegebiet vor Usedom.

Für die Sedimentprobennahme danke ich Doc. dr hab. Norbert Wolnomiejski vom Sea Fisheries Institute, Research Station in Swinoujście, 72-600 Swinoujście, Pl. Slowianski 11, Poland.

Dank gebührt außerdem Frau D. Benesch, und Frau P. Schäning vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde, die mir die Arbeiten im Labor ermöglicht und mich tatkräftig unterstützt haben.

Mein Dank gilt zudem Frau M. Wielgat für die Hilfe bei der Übersetzung polnischer Texte und ihr stetes Interesse an der Arbeit sowie Herrn I. Tejakusuma für die Bereitstellung der Literaturliteraturdatenbank über das Oderhaff und die Hilfe bei dem Simulationsprogramm FEMFLOW 2D.

Des weiteren bedanke ich mich bei Frau A. Ernst vom Wasser- und Schifffahrtsamt Strahlsund, Herrn F. Sonnenburg vom Landesumweltamt in Frankfurt/Oder, bei Herrn S. Schlie von der Heinrich Hirdes GmbH Rostock, Herrn W. Okon vom Regionalen Raumplanungsamt Vorpommern und Herrn A. Borowiec vom Maritime Office of Szczecin für die freundliche Bereitstellung von Informationsmaterial.

Tobias Dolch, Helge Bangel, Juliane Borns und Karen Rinke danke ich für das kritische Lesen der Arbeit und für die konstruktive Kritik. Helge Bangel danke ich außerdem für die Hilfe beim Erlernen des Programms Surfer.

8. Literatur

- (ABFKLÄRV) Anonym (1998): Klärschlammverordnung (AbfKlärV). In: Umweltrecht. 11., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Stand: 15. Juli 1998. München. S. 876.
- ALLOWAY, B. J. & D. C. AYRES (1996): Schadstoffe in der Umwelt – Chemische Grundlagen zur Beurteilung von Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzungen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin, Oxford. S. 382.
- ANSCHUTZ, P., ZHONG, S. & B. SUNDBY (1998): Burial efficiency of phosphorus and the geochemistry of iron in continental margin sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 43 (1). S. 53-64.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E., NIPPER, J. (1990): Statistische Methoden in der Geographie 1: Univariate und bivariate Statistik. Teubner Studienbücher. Stuttgart. S. 233.
- BANGEL, H., SCHERNEWSKI, G. & M. WIELGAT (2001): Spatial, seasonal and long-term changes of phosphorus concentrations in the Oder estuary. In: *Erweiterte Zusammenfassung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie (DGL/SIL); Jahrestagung 2001 in Kiel*. S. 5.
- BRÜGMANN, L. (1993): Meeresverunreinigung. Akademie Verlag. Berlin. S. 294.
- BRÜGMANN, L. (1998): Hintergrundbelastung von Ostsee-Sedimentationsbecken vor der deutschen Küste. In: *Schadstoffbelastung der Sedimente in den Ostseeküstengewässern*. Mitteilung Nr. 15, Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz, Berlin. S. 20-80.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.) (1995): Wasserstraßen und Umwelt. Beiträge zum HTG-Sprechtag am 15. Juni 1994 in Koblenz. BfG Mitteilung Nr. 7. Koblenz. S. 70.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.) (1999a): Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut im Küstenbereich (HABAK-WSV). 2. überarbeitete Fassung 1999. BfG-Nr. 1100. Koblenz. S. 25, Anhang.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.) (1999b): Sedimentbewertung in europäischen Flussgebieten (Sediment Assessment in European River Basins). Beiträge zum internationalen Symposium vom 12.-14. April 1999 in Berlin. BfG Mitteilung Nr. 22. Koblenz, Berlin. S. 189.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.) (2000): Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut im Binnenland (HABAB-WSV). 2. überarbeitete Fassung. BfG-Nr. 1251. Koblenz. S. 32.
- BRANDT, K. (1896): Ueber das Stettiner Haff. *Wiss. Meeresuntersuchungen*. N.F. 1 (1834/96) 2, Band 1 (Heft 2). Kiel und Leipzig. S. 107-141.
- CHOJNACKI, J. C. (1999): Description of Ecosystem of the Lower Odra and the Odra Estuary. *Acta hydrochim. Hydrobiol.* 27, 5. S. 257-267.
- CLASEN, S. (1995): Laborvorschriften zur Tonmineralogie und Röntgendiffraktometrie. – Internes Arbeitsmaterial, Sektion Marine Geologie; Institut für Ostseeforschung Warnemünde.
- CLEVELAND, W. A. (Hrsg.) (1994): *Britannica Atlas – Encyclopædia Britannica Inc., Chicago u.a.*, S. 200.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (HRSG.) (2000): Die Ostseeregion – Chancen und Risiken einer Wachstumsregion von zunehmender weltweiter Bedeutung. Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage der Abgeordneten Wolfgang Bönnsen (Bönstrup), Gunnar Uldall, Ulrich Adam, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der CDU/CSU (Drucksache 14/2293). Drucksache 14/4460. Berlin. 01.11.2002. S. 79.

- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (HRSG.) (1988): Sanierung und Restaurierung von Seen. DK 556.55 Seen. DK .004.67 Wiederherstellung. Bearb. Vom DVWK-Fachausschuss „Seen und Erdaufschlüsse“. Hamburg, Berlin. S. 33.
- EIDAM, J., PUFF, TH., LEHMANN, J. & J. FIETZ (1996): Geochemische Charakterisierung von rezenten Sedimenten im Oder-Ästuar. [Geochemical characterization of rezent sediments of the Oder estuary.] – Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 1995 (1/2): Stuttgart. S. 63-72.
- EIDAM, J., LEHMANN, J. & T. PUFF (1997): Einfluß des Phasenbestandes von Schwebstoffen und Sedimenten des Odermündungsgebietes auf die Bindung und Mobilisierung von Schwermetallen – ein Beitrag zur Bilanzierung von Staffaustauschprozessen. – Abschlussbericht GOAP (Greifswalder Bodden und Oder-Ästuar Austauschprozesse). S. 42. unveröff.
- FIEDLER, H. J. & H. J. RÖSLER (Hrsg.) (1993): Spurenelemente in der Umwelt. 2., überarbeitete Auflage. Jena, Stuttgart. S. 385.
- FIETZ, J. (1996): Die Schwebstoffe des Odermündungsgebietes – geochemische und phasenanalytische Untersuchungen. Unveröffentl. Diss. E.-M.-Arndt-Universität Greifswald, S. 139, 5 Anl.
- FRANKOWSKI, L. & J. BOLAŃEK (1999): Transformations and release of phosphorus forms at the sediment-water interface in the Pomeranian Bay (southern Baltic). *Oceanologia*, 41 (3), S. 279-308.
- GRELOWSKI, A., PASTUSZAK, M., SITEK, S. & Z. WITEK (2000): Budget calculations of nitrogen, phosphorus and BOD5 passing through the Oder estuary. In: *Journal of Marine Systems*, 25, S. 221-237.
- HEININGER, P., MÜLLER, A. & K. GRÜNWARD (1998): Aufgaben und Ziele der Bundesanstalt für Gewässerkunde bei der Untersuchung von Sedimenten und Schwebstoffen der deutschen Ostseeküste. In: *Schadstoffbelastung der Sedimente in den Ostseeküstengewässern*. Mitteilung Nr. 15, Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz, Berlin. S. 8-15.
- HEINRICHS, H. & A. G. HERRMANN (1990): *Praktikum der Analytischen Geochemie*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 669.
- HEINTZ, A. & G.A. REINHARDT (1993): *Chemie und Umwelt*. 3., neubearbeitete Auflage. Braunschweig/Wiesbaden. S. 282.
- HELCOM (1992) Convention on the protection of the marine environment of the Baltic Sea area; Guidelines for the disposal of dredged spoils (HELCOM Recommendation 13/1). – Baltic marine environment protection commission Helsinki, 3.-7. Febr. 1992.
- HELCOM (1993) Second Baltic Sea Pollution Load Compilation. – *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 45, S. 161.
- HELCOM (1998) The Third Baltic Sea Pollution Load Compilation. – *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 70, S. 134.
- HELCOM SCIENTIFIC WORKSHOP (1998): The Effects of the 1997 Flood of the Odra and Vistula Rivers. 12 – 14 January 1998. BSH Hamburg, Germany. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, 13. S. 46.
- HELCOM (1999) Helcom Programme implementation task force. The Baltic Sea joint comprehensive environmental action programme. *Annual Report 1999*. S. 134.
- HUMBORG, C., FENNEL, K., PASTUSZAK, M. & W. FENNEL (2000): Das Oder-Ästuar: Nährstoffbelastung und Modellierung der trophischen Entwicklung. In: *Oder Basin – Baltic Sea*

- Interactions (OBBSI) Endbericht/Final Report. Meereswissenschaftliche Berichte No. 41. Warnemünde. S. 43-55.
- JØRGENSEN, B. B. & K. RICHARDSON (Hrsg.) (1996): Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. In: Coastal and Estuarine Studies. Washington, DC. S. 273.
- KLEEBERG, A. (1995): Die Sanierung/Restaurierung des Großen Müggelsees – mit oder ohne Baggerung der phosphatreichen Sedimentschichten? In: Verfahren zur Sanierung und Restaurierung stehender Gewässer. Limnologie aktuell, Band 8. Hrsg: Jaeger, D u. R. Koschel. Stuttgart, Jena, New York. S. 281-293.
- KOSCHEL, R. (1995): Möglichkeiten und Grenzen von ökotechnologischen Verfahren zur Restaurierung von Standgewässern. In: Verfahren zur Sanierung und Restaurierung stehender Gewässer. Limnologie aktuell, Band 8. Hrsg: Jaeger, D u. R. Koschel. Stuttgart, Jena, New York. S. 11-19.
- KROST, P. (1990): Der Einfluss der Grundsleppnetzfisherei auf Nährsalz-Freisetzung aus dem Sediment und Makrofauna der Kieler Bucht (Westliche Ostsee). Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität Kiel Nr. 200. Kiel. S. 150.
- LAMPE, R. (1999): Das Oder-Ästuar – Filter oder Bypass fluvialer Einträge?, In: BODDEN, Nr. 7, S. 45-62.
- LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (Hrsg.) (1998a): Das Sommerhochwasser an der Oder 1997. Fachbeiträge anlässlich der Brandenburger Ökologietage II. Potsdam. S. 99.
- LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (Hrsg.) (1998b): Untersuchungen der Oder zur Belastung der Schwebstoff- bzw. Sedimentphase und angrenzender Bereiche. Forschungsbericht, Potsdam, S. 199.
- LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE (LUNG) Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.) (2001): Gewässergütebericht 1998 / 1999 - Gütezustand der oberirdischen Gewässer, der Küstengewässer und des Grundwassers in Mecklenburg-Vorpommern. Güstrow. S. 106.
- LEIPE, T., EIDAM, J., LAMPE, R., MEYER, H., NEUMANN, T., OSADCZUK, A., JANKE, W., PUFF, T., BLANZ, T., GINGELE, F.X., DANNENBERGER, D. & G. WITT (1998): Das Oderhaff – Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars. Meereswissenschaftliche Berichte, Institut für Ostseeforschung Warnemünde, S. 61, Anhang.
- LOZÁN, J.L. & KAUSCH, H. (Hrsg.) (1996): Warnsignale aus Flüssen und Ästuaren – Wissenschaftliche Fakten. Berlin, S. 389.
- MATTHES, S. (2001): Mineralogie – Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 6. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. S. 507.
- MEYER, H., LAMPE, R., JONAS, P. U. BUCKMANN, K. (1998) : Nährstoffe im Oderästuar – Transporte und Inventare. Abschlussbericht GOAP (Greifswalder Bodden und Oder-Ästuar Austauschprozesse).
- MOHRHOLZ, V. U. LASS, H. U. (1998) Transports between Oderhaff and Pommeranian Bight – a simple barotropic box model. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Volume 50, Number 4, Hamburg, Rostock, S. 371-382.
- NEUMANN T., LEIPE, T., BRAND, T., U. SHIMMIEDL, G. (1996): Accumulation of Heavy Metals in the Oder Estuary and its Off-shore Basins. In: Chem. Erde, 56. Jena. S. 207-222.

- OSADCZUK, A., WAWRZYNIAK-WYDROWSKA, B. (1998): Sediments in the Szczecin Lagoon: Selected elements and macrozoobenthos. Abschlussbericht GOAP (Greifswalder Bodden und Oder-Ästuar Austauschprozesse).
- PASTUSZAK, M., WIELGAT, M. U. S. SITEK (2001): Nutrient Status in the Szczecin Lagoon – Past, Present and Future Prospects. In: *Oceanological Studies* Vol. XXX, No. 1-2. Gdansk, Szczecin. S. 59-86.
- RHEINHEIMER, G. (Hrsg.) (1996): *Meereskunde der Ostsee*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, S. 338.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (Hrsg.) (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14., neu bearbeitete und erweiterte Auflage von P. Schachtschabel, H.-P. Blume, G. Brümmer, K. H. Hartge, U. Schwertmann. Stuttgart. S. 494.
- SCHERNEWSKI, G. & M. WIELGAT (2001): Eutrophication of the shallow Szczecin Lagoon (Baltic Sea): modelling, management and the impact of weather. In: Brebbia, C.A. (ed.): *Coastal Engineering V: Computer Modelling of Seas and Coastal Regions*. Witpress, Southampton, Boston. S. 87-98.
- SCHWOERBEL, J. (1999): *Einführung in die Limnologie*. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm. S. 465.
- SÉNÉGAS, J. (1999): Hydrodynamical modeling and data assimilation within the Odra estuary. GKSS Forschungszentrum 99/E/42. S. 83.
- SUNDBY, B. BOBEIL, CH., SILERBERG, N. & A. MUCCI (1992): The phosphorus cycle in the coastal marine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 37 (6). S. 1129-1145.
- TUCKER, M. (Hrsg.) (1996): *Methoden der Sedimentologie*. Stuttgart, S. 366.
- WEICKER, H. (1927): Die Schleppnetzfisherei im Stettiner Haff und seinen Nebengewässern – Eine Untersuchung zur Geschichte der Schleppnetzfisherei. In: *Zeitschrift für Fischerei* Nr. 25. Neudamm und Berlin. S. 368-437.
- WELTBANK (Hrsg.) (2000) Poland Szczecin-Swinoujscie Seaway and Port Modernization Project. S. 18, Anhang.
- WERNER, F., HOFFMANN, G., BERNHARD, M., MILKERT, D. & K. VIKGREN (1990): Sedimentologische Auswirkungen der Grundfisherei in der Kieler Bucht (Westliche Ostsee). *Meyniana*, 42. Kiel. S. 123-151.
- WETZEL, R. G. (2001): *Limnology – Lake and River Ecosystems*. Third Edition. Academic Press, San Diego. S. 1006.
- WIELGAT, M. & G. SCHERNEWSKI (2002a): Impact of the Odra River nutrient load reductions on the trophic state of the Szczecin Lagoon: A modelling approach. Proceedings of the International Conference ‘Sustainable Management of Transboundary Waters in Europe’, UNECE, 21 – 24 April 2002, Miedzyzdroje, Poland, S. 347-350.
- WIELGAT, M. & G. SCHERNEWSKI (2002b): Models as tools in coastal water management: eutrophication of the large, shallow Szczecin Lagoon. In: German National IHP-OHP Committee (ed.): *Low-lying Coastal Areas – Hydrology and Coastal Zone Management*. UNESCO International Hydrological Programme (IHP) – Reports special issue 13, S. 147-154.

Internetadressen

AUSWAERTIGES AMT (September 2002): http://www.auswaertiges-amt.de/www/de/laenderinfos/laender/laender_ausgabe_html

FIRMA BIOCLEAR (August 2002): <http://www.bioclear.com.my/aanderaa.html>

BALTIC ENVIRONMENT DATABASE, DEPARTMENT OF SYSTEMS ECOLOGY (September 2002): <http://data.ecology.su.se/models/bed.htm>

POLFRACHT SHIPPING AGENCY LTD. (August 2002): <http://www.polfracht.pl/polfracht/psal/viewszn.htm>

FIRMA A. KLAAS INTERNETSERVICE (August 2002): <http://lexikon.wasser.de>

Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Diplomarbeit „Der Schifffahrtskanal im Oderhaff – Eine Sediment-, Nähr- und Schadstofffalle?“ selbständig ohne fremde Hilfe angefertigt habe, und dass ich alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an Gedanken anderer Autoren eng anlehenden Ausführungen meiner Arbeit besonders gekennzeichnet und die Quellen nach den mir angegebenen Richtlinien zitiert habe.

Kiel, 29.04.2003

.....