GKSS
FORSCHUNGSZENTRUM
in der HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee

Autoren:

J. Kappenberg
H.-U. Fanger

wissen schafft nutzen

ISSN 0344-9629

HELMHOLTZ | GEMEINSCHAFT

GKSS 2007/20

GKSS 2007/20

Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee

Autoren:
J. Kappenberg
H.-U. Fanger
(Institut für Küstenforschung)

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Geesthacht · 2007

Auftraggeber:

Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg

Die Berichte der GKSS werden kostenlos abgegeben.
The delivery of the GKSS reports is free of charge.

Anforderungen/Requests:

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Bibliothek/Library
Postfach 11 60
21494 Geesthacht
Germany
Fax: (49) 04152 871717

Als Manuskript vervielfältigt.
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152) 87-0
Max-Planck-Straße 1 · 21502 Geesthacht / Postfach 11 60 · 21494 Geesthacht

GKSS 2007/20

Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee

Jens Kappenberg, Hans-Ulrich Fanger

123 Seiten mit 81 Abbildungen und 4 Tabellen

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse einer von Hamburg Port Authority (HPA) beauftragten Untersuchung zum Kenntnisstand über die relevanten Prozesse und die Größenordnung des Feststofftransports in der Tide-Elbe, der angrenzenden Deutschen Bucht und in der gesamten Nordsee vorgestellt. Die Studie basiert einerseits auf einer Zusammenstellung und Sichtung der einschlägigen Literatur, andererseits auf der Auswertung einer Reihe von Fachgesprächen mit Experten aus dem deutschen Küstenraum. Nach einer Erläuterung grundlegender Fachbegriffe werden zunächst für das Elbe-Ästuar die Kenntnisse über die geologische Entwicklung und die natürlichen Verhältnisse beim Feststofftransport zusammengestellt. Die für den Feststofftransport relevanten geomorphologischen, sedimentologischen und hydrodynamischen Prozesse werden im Einzelnen kurz erläutert und hinsichtlich ihrer Bedeutung diskutiert. Im Vordergrund stehen hier Mechanismen, die zu einem Stromauftransport von Feststoff führen und Abschätzungen für den Feststoffaustausch zwischen der Elbe und der Deutschen Bucht. Es folgt eine Darstellung des Wissens über den großräumigen Transport von Feststoffen in der Nordsee und der Deutschen Bucht, sowie über die Ursachen der Existenz des Schlickgebietes südöstlich von Helgoland. Die durch den Menschen in und an der Tide-Elbe vorgenommenen morphologischen Veränderungen und ihre Auswirkungen auf den Feststofftransport werden in den nächsten Abschnitten diskutiert. Wissensdefizite zeigen sich besonders bei der Quantifizierung des Feststofftransportes und der relativen Bedeutung der beteiligten Prozesse. Die gegenseitige Information und die Koordinierung der Forschung zwischen den in diesem Bereich tätigen Ämtern und Forschungseinrichtungen sollte verbessert werden.

Sediment Transport Processes in the Elbe Estuary, German Bight, and North Sea

Abstract

This report presents the results of an investigation on the current state of knowledge concerning the transport of sediments in the Elbe Estuary and the adjacent German Bight and the North Sea as a whole. The study, carried out on behalf of Hamburg Port Authority, is based on a review of the relevant literature and on the results of a series of interviews with German experts in this particular field. Most of the published material is only available as

grey literature. The past development and the natural state of the suspended sediment regime in the Elbe Estuary are discussed in relation to the present situation. A variety of processes which contribute to sediment transport are presented in the next chapter. Special attention is given to mechanisms which lead to an upstream transport of sediment. Estimates of sediment fluxes between the estuary and the German Bight show that the estuary is importing fine grained sediment. Sediment transport in the North Sea is characterized by and anti-clockwise circulation with inputs from the Atlantic, the English Channel, erosion of the English coastline and inflow from rivers. The genesis and persistence of the mud area southeast of Heligoland is discussed in relation to the fate of dredged material disposed in the region. The effects of civil engineering works on the sediment regime in the Elbe Estuary are considered in the following chapters. At the present state it is not possible to give reliable quantitative predictions of the effects of such works on the sediment transport. The relative contribution of the various sediment transport processes is also unclear. A future sediment management strategy in the Elbe Estuary should be based on the results of a combination of long-term measurements and modelling exercises.

Manuskripteingang in TKP: 21. November 2007

Inhalt

Einleitung 7

1.Grundlagen zum Feststofftransport 9

1.2 Varianten des Feststofftransportes 10
1.3 Die Bedeutung der Schwebstoffe 11
1.4 Messung von SPM im Ästuar- und Küstenbereich – Instrumente und Methoden 11

2. Entwicklung und natürlicher Zustand des Elbe-Ästuars 13

3. Feststofftransport in der Tide-Elbe 16

3.1 Mechanismen des Feststofftransportes in Ästuaren – die Trübungszone 16
3.2 Wechselwirkung und Vermischung von Süß- und Salzwasser und deren Einflüsse auf den Feststofftransport - die ästuarine Zirkulation 17
3.3 Oberwasserwirkungen auf das Schwebstoffregime des Elbe-Ästuars 20
3.4 Saisonale Effekte im Schwebstoffregime des Elbe-Ästuars 25
3.5 Das Feststoffregime der Tide-Elbe während Hochwasserereignissen 25
3.6 Einflüsse der Gezeiten auf den Feststofftransport im Elbe-Ästuar 29
3.6.1 Die Deformation der Tidewelle im Ästuar 29
3.6.2 Stehende Gezeitenwellen und Obertiden 31
3.6.3 Periodische Änderungen der Gezeitenströme und Tide-Asymmetrien 33
3.6.4 Messungen der gezeitenbedingten Sedimentdynamik im Elbe-Ästuar 35
3.7 Sandtransport im Elbe-Ästuar 39
3.8 Der Austausch von Feststoffen zwischen der Deutschen Bucht und dem Elbe-Ästuar 41
3.8.1 Messungen des Schwebstofftransportes an Querschnitten im Elbe-Ästuar 42
3.8.2 Nutzung von Spurenstoffen als Tracer für die Vermischung von marinem und fluvialem Material 44
3.8.3 Bestimmung des Schwebstofftransportes aus naturähnlichen Modellrechnungen 48

4. Feststofftransport in der Deutschen Bucht und der Nordsee 49

4.1 Das Schwebstoffregime in der Nordsee 49
4.2 Der Schwebstofftransport in der Nordsee 53
4.3 Das Schwebstoffregime in der Deutschen Bucht 56
4.4 Der Sand- und Geschiebetransport in der Nordsee und in der Deutschen Bucht 58
4.5 Das Schlickgebiet südöstlich von Helgoland 60
4.6 Messungen zum Schwebstoffregime und zur Sedimentdynamik in der Nordsee und der Deutschen Bucht 66
4.7 Numerische Modelle für die Schwebstoff- und Sedimentdynamik in der Nordsee und der Deutschen Bucht 67

5. Morphologische Eingriffe in der Tide-Elbe 68

6. Auswirkungen der Eingriffe 71

7. Umlagerungen in der Tide-Elbe 89

8. Zum Anstieg der Baggermengen auf der Hamburger Delegationsstrecke 95

9. Wissensdefizite und Forschungsbedarf 99

Literatur 101

Einleitung

Die morphologische Strukturvielfalt des Elbe-Ästuars wird maßgeblich beeinflusst von den Gezeiten und Gezeitenströmungen und ist durch einen intensiven Feststofftransport – verbunden mit einer ständigen Umformung von Gewässersohle und Vorland – gekennzeichnet. Neben den morphologischen Auswirkungen des Feststofftransportes (Auskolkung, Versandung, Verschlickung) ist dessen feinkörniger Anteil durch die an die Partikel angelagerten Spuren- und Schadstoffe auch von ökologischer Bedeutung. Seit längerem ist zu beobachten, dass geänderte Randbedingungen eine Verlagerung der Sedimentationsprozesse weiter in das System hinein und damit in Richtung Hamburg bewirkt haben. Die Sedimentdynamik ist nicht nur von natürlichen geänderten Randbedingungen abhängig, sondern reagiert auch auf menschliche Eingriffe.
Die hohen Unterhaltungsaufwendungen sowie die ökologischen Auswirkungen des Baggergutmanagements, das Erreichen geforderter Ziele des Natur- und Gewässerschutzes und auch die öffentliche Akzeptanz machen es erforderlich, das Systemverständnis des Feststofftransportes weiter zu verbessern.

Heute liegt eine Fülle von Untersuchungen zum Transport von Feststoffen in der Tide-Elbe vor. Was allerdings fehlt, ist eine Zusammenfassung bzw. Zusammenschau. Es wurde daher im Rahmen einer von HPA in Auftrag gegebenen Synopse zum Feststoff-Transport in der Tide-Elbe und der angrenzenden Nordsee versucht, die verfügbaren Kenntnisse unter Würdigung ihrer Quellen und Datengrundlagen fachdisziplinübergreifend zusammenzutragen. Die Ergebnisse dieser Erhebung werden hier vorgestellt.

Diese basieren einerseits auf einer Literaturstudie, andererseits auf Interviews mit Experten relevanter Dienststellen oder Institutionen, die sich mit der Elbe „beschäftigt“ haben. Die Interviews wurden anhand einer Reihe von Fragenkomplexen strukturiert, zu denen die Experten gebeten wurden, ihr Fachwissen, aber auch ihre Hypothesen und Meinungen einzubringen. Zu diesen Fragenkomplexen gehören u.a. der Wissensstand über die natürlichen Verhältnisse und die entscheidenden Prozesse beim Feststofftransport, über die Auswirkungen morphologischer Veränderungen (insbesondere Fahrrinnenanpassungen) in bezug auf die Sedimentdynamik und über die Auswirkungen der Sedimentumlagerungen in der Tide-Elbe, sowie über die Feststoffdynamik im Bereich des Schlickgebiets bei Helgoland. Ferner wurde versucht, ein Inventar der vorhandenen Messungen und Modelle/Modellergebnisse zu dieser Thematik zu erstellen.

Wir danken den Kollegen und Experten für ihre Bereitschaft, sich intensiv mit den Fragen auseinander zu setzen und uns wertvolles Informationsmaterial, darunter auch unveröffentlichte Studien, zu überlassen. Auch manche offene Einschätzung einer Sachlage wurde in den Gesprächen vorgebracht, die man schriftlich vermutlich sehr viel vorsichtiger formuliert hätte.

In der zeitlichen Reihenfolge waren unsere Interviewpartner :

Herr Dr. Christiansen, Herr Maaß, Herr Netzband, Herr Ohle, Hamburg Port Authority, HPA

Herr Michael Bergemann, Wassergütestelle Elbe, Hamburg

Herr Dr. Ackermann, Frau Habermann, Herr Dr. Hentschke, Frau Dr. Schubert, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Herr Dr. Eichweber, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Kiel

Herr Dick, Herr Frohse, Herr Klein, Herr Dr. Nies, Herr Dr. Schmolke, Herr Dr. Zeiler, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg

Herr Prof. Dr. Irion, Forschungsinstitut Senckenberg, Wilhelmshaven

Herr Dr. Dammschneider, ehemals Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg

Herr Dr. Heyer, Herr Dr. Weilbeer, Herr Dr. Winkel, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg-Rissen

Herr Werner, Hamburg Port Authority

Herr Neumann, Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg

Herr Dr. Kerner, SSC, Hamburg

Herr Prof. Dr. Förstner, Technische Universität Hamburg-Harburg

1. Grundlagen zum Feststofftransport

Sedimenttransport entsteht wenn das bewegliche Flussbett versucht, seine Form und Oberfläche den durch die Strömung angreifenden Kräften anzupassen um diesen besser entgegenzuwirken. Dadurch bewegen sich Sandkörner von einem ebenen Flussbett und bilden Riffel, aus der Riffelbewegung bilden sich Sandbänke, und Erosion sowie Deposition verändern die Küstenlinie. Die Kenntnis und die Vorhersagemöglichkeit dieser Prozesse ist grundlegend für einen erfolgreichen Küstenschutz, den Erhalt der Schiffbarkeit von Wasserstraßen und die Optimierung von Bagger- und Umlagerungsaktivitäten. Trotz schon vieler Jahrzehnte andauernder Forschung auf diesem Gebiet ist man noch weit davon entfernt, dies in zufriedenstellender Weise zu erreichen.

1.1 Sand, Schwebstoff, Schlick und fluid mud

Nach Christiansen (in Netzband, 1996) werden die folgenden Begriffsfestlegungen für Feststoffe unterschiedlicher Zusammensetzung verwendet:

- Sand ist Feststoffmaterial mit einem hohen Anteil der Kornfraktion > 63 µm. Sand setzt sich hauptsächlich aus Quarzkörnern zusammen und wird im Gewässer überwiegend sohlnah transportiert.
- Schwebstoffe sind mit pflanzlicher und tierischer Organik angereicherte Feststoffe, die sich in Suspension in der Wassersäule befinden. Sie bestehen überwiegend aus den Feinkornfraktionen < 63 µm (Ton und Schluff). Besonders bedeutend für den Schadstofftransport ist die Schwebstofffraktion < 20 µm.
- Schlick bezeichnet Sedimentmaterial mit einem Anteil der Feinkornfraktion < 63 µm von über 50 %. Schlick entsteht aus Schwebstoffen, sobald sich dieses Material als hochkonzentrierte Suspension (fluid mud) oder Ablagerung an der Gewässersohle befindet.

1.2 Varianten des Feststofftransportes

Der Feststofftransport im Gewässer erfolgt in drei Varianten: Rollen, Springen und in Suspension. Die ersten beiden Varianten werden auch als Bedload bezeichnet, das suspendierte partikuläre Material (SPM, englisch: suspended particulate matter) nennt man Schwebstoff. Das Sinkverhalten der Feststoffe wird durch ihre Sinkgeschwindigkeit charakterisiert. Sie lässt sich für sphärische Partikel aus dem Radius, der Dichte und molekularen Viskosität des Wassers berechnen (Stokes Gesetz).
Der Schwebstoff in der Tide-Elbe und der Deutschen Bucht besteht aber überwiegend aus Flocken, in die mineralische und organische Bestandteile eingelagert sind (Abb. 1.1). Ihre Sinkgeschwindigkeit muss experimentell bestimmt werden.

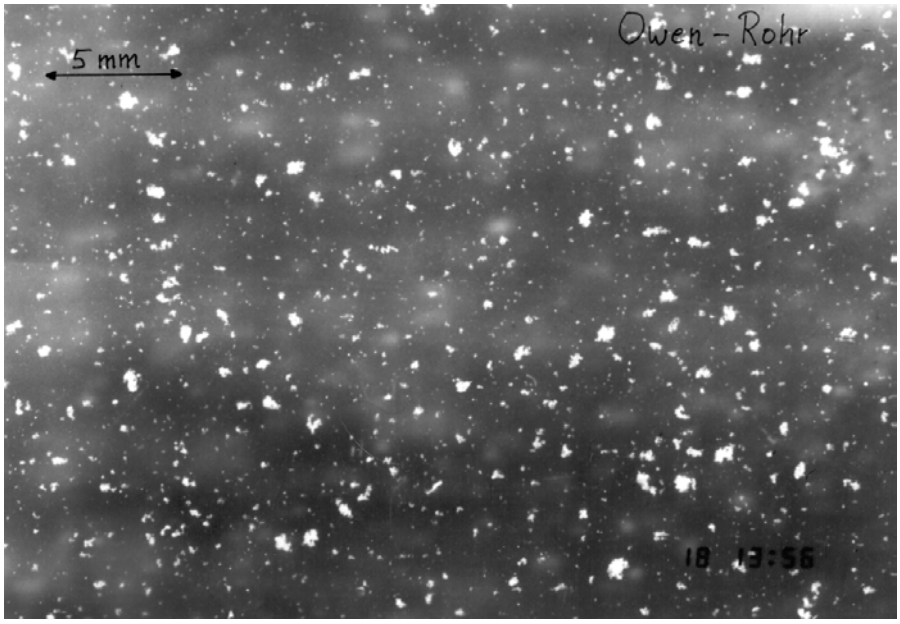
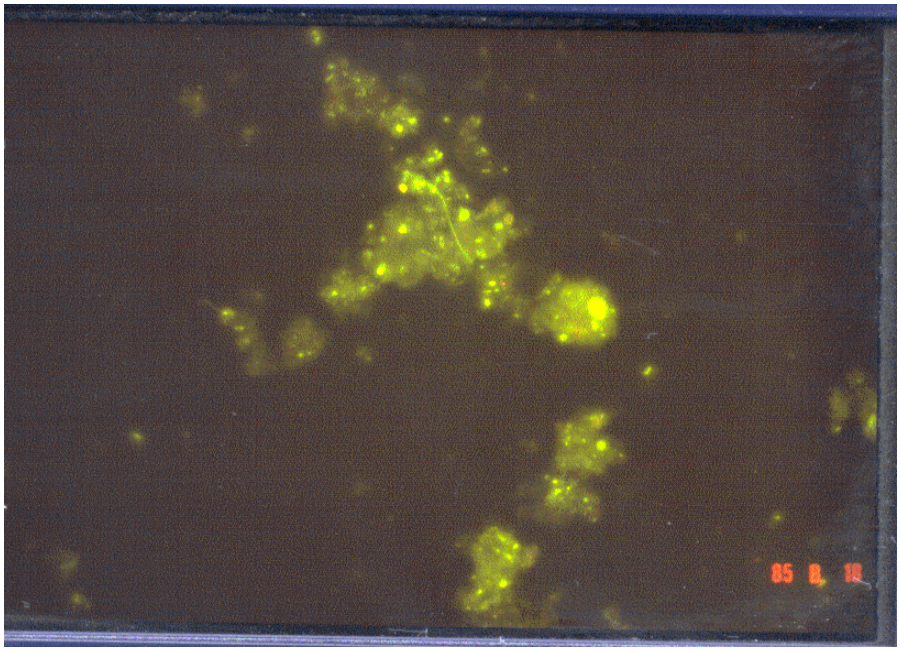


Abb. 1.1:

a)

Schwebstoff-Flocken in der Tide-Elbe (Aufnahme W. Puls),



b)

Mikroskopische Vergrößerung einer Flocke mit mineralischen und organischen Bestandteilen (Aufnahme N. Greiser).

1.3 Die Bedeutung der Schwebstoffe

Sowohl bezüglich des Transports als auch der Wirkungen unterscheiden sich Schwebstoffe, also durch die Turbulenz fließenden Wassers in Suspension gehaltene Feststoffe, auf der einen Seite und gelöste Stoffe auf der anderen Seite deutlich. Während sich gelöste konservative (also keiner Umsetzung unterliegende) Stoffe exakt mit dem Wasserkörper mitbewegen und daher auch als Tracer für den Wassertransport betrachtet werden, zeigen Schwebstoffe einen „Schlupf" und weisen mit Vertikalbewegungen, d.h. Sedimentation und Resuspension, ein eigenes Transportverhalten aus.

Die Wirkungen der im strömenden Wasser mitgeführten und der abgesetzten Schwebstoffe hängen von Menge und Zusammensetzung ab. In Gebieten hoher Schwebstoffkonzentrationen wie in der Trübungszone der Tide-Elbe beeinträchtigen nur die Mengen des Materials das Lichtklima und damit die biologische Primärproduktion. Ebenso kann in Gebieten mit Benthosbesiedlung – und natürlich in wasserbaulichen Anlagen – das Aussedimentieren des Schwebstoffes schon allein über die Mengen des den Boden bedeckenden Materials Wachstum und Bestand beeinflussen. Eine zusätzliche Schadstoffbelastung der Feststoffe ist durch die Aufnahme in Organismen (z.B. Filtrierer, Muscheln ...) und die damit verbundene biologische Anreicherung in der Nahrungskette ungünstig zu beurteilen, hat aber wegen der Konzentrationswerte im Spurenbereich nach vorherrschender Meinung der Fachwelt eher sekundäre Bedeutung. Ähnliches gilt für die Aufnahme von gelösten Schadstoffen, z.B. durch Algen und Bakterien. Im Feststoff gebundene und im Wasser gelöste Substanzen stehen in einem Gleichgewicht zueinander; damit werden durch Änderungen der Schwebstoffkonzentrationen auch die Gehalte an gelösten Stoffen beeinflusst. In der öffentlichen Diskussion ist die Schadstoffkonzentration der Schweb-stoffe sowie des aus ihnen gebildeten Schlicks – und damit auch des entsprechenden Baggergutanteils – besonders relevant. Ferner können mitgeführte oder abgesetzte Schwebstoffe mit unterschiedlicher bakterieller Aktivität bei gleichen Mengen an Schwebstoff eine geringe oder starke Sauerstoffzehrung im Wasserkörper oder im Sediment verursachen. Schwebstoffe mit sauerstoffproduzierenden Algen können andererseits auch eine Sauerstoffübersättigung im Wasserkörper bewirken.

Die ökologische Bedeutung der Schwebstoffe besteht also in folgenden Punkten:

- Sie beeinflussen in hohen Konzentrationen das Lichtklima und drosseln die Primärproduktion.
- Bei hoher Sedimentation der Schwebstoffe können sensible mit Benthos besiedelte Bereiche beeinträchtigt werden.
- Sie sind das wesentliche Transportvehikel für Umweltschadstoffe, die je nach Verbleib in Stromabschnitten der Tide-Elbe bzw. in der Deutschen Bucht die Gewässergüte beeinflussen und durch ihre Wechselwirkung mit den im Wasser gelösten Stoffen auch deren Konzentrationen mitsteuern.
- Die in ihnen enthaltenen Tonpartikel und partikulären organischen Substanzen (Detritus) zusammen mit den in den Partikeln gebundenen Schadstoffen liefern das Material für den im System abgelagerten Schlick, der sich teilweise auch im Baggergut wieder findet.
- Die im Schwebstoff enthaltenen Bakterien und Algen steuern in hohem Maße den Nährstoff- und Sauerstoffhaushalt im Wasser und Sediment.

1.4 Messung von SPM im Ästuar- und Küstenbereich – Instrumente und Methoden

Schwebstoffbestimmungen können auf verschiedene Weise vorgenommen werden: Üblich sind heute mechanische, optische und akustische Methoden.

Mechanische Verfahren (ex situ)

Diese beruhen auf der Entnahme eines bestimmten Wasservolumens und der anschließen-

den Bestimmung der Masse des enthaltenen Feststoffs. Wilken et al. (1991) bezweifeln allerdings, dass die Trockenmassenbestimmung des Schwebstoffs ein geeignetes Maß für eine Aussage zum Transportverhalten des Schwebstoffs darstellt. Die Zustandsgrößen Volumen, Dichte und Zusammensetzung sind von größerer Bedeutung.

Filtrationsverfahren von Wasserproben mit Membranfiltern durch Druck oder Vakuum. Die anschließende Trocknung der Filter hat dabei auch einen Einfluss auf die Bestimmung der Trockenmasse.

Zentrifugen: Ansaugen von Wasser, Zentrifugieren und anschließendes Auswiegen der Trockensubstanz.

Sedimentfallen geben den zeitintegrierten Gehalt an frischem Schwebstoffbürtigem Sediment.

Optische Verfahren (in situ)

Diese beruhen auf der Lichtstreuung durch SPM im Wasser. Man unterscheidet Transmissionssensoren (transmissiometers) und Rückstreusensoren (optical back-scattering sensors, OBS). Sie müssen durch Proben (siehe: mechanische Verfahren) kalibriert werden und sind von den optischen Eigenschaften des lokalen Schwebstoffs abhängig.

Akustische Verfahren (in situ)

Wie bei den optischen Verfahren lässt sich auch bei akustischen Signalen aus der Rückstreuung auf die Konzentration der streuenden Teilchen schließen. Durch die allgemeine Verwendung der ursprünglich nur zur Strömungsmessung eingesetzten ADCPs (Acoustic Doppler Current Profiler) lag es nahe, die als „Nebenprodukt" anfallende Rückstreuintensität des akustischen Signals in Bezug zur Schwebstoffkonzentration zu setzen. Diese Methode hat den Vorteil, dass wie bei der Strömung fast simultan ein ganzes Profil der Konzentration zwischen dem Schallkopf und der Sohle bzw. Oberfläche aufgenommen werden kann. Die Schwierigkeit besteht in der Kalibrierung des Verfahrens, welche noch immer Gegenstand der Forschung ist.

Fernerkundung

Schiffs- und Stationsmessungen liefern sehr genaue Informationen über die Verteilung des Schwebstoffs in der Wassersäule, jedoch nur an der jeweiligen Position. Durch Fernerkundung von Flugzeugen und Satelliten aus lassen sich hingegen flächenhafte, quasi synoptische Bilder der Schwebstoffverteilung im Untersuchungsgebiet erzeugen. Durch die geringe Eindringtiefe des Lichtes in trüben Gewässern liefert die Fernerkundung allerdings nur oberflächennahe SPM-Konzentrationen. Auch hier besteht das Problem der Kalibrierung zum Erlangen quantitativer Ergebnisse.

Schwebstoffqualität, Größenspektrum und Sinkgeschwindigkeit

In den Ästuaren und der Nordsee, aber auch im offenen Ozean besteht SPM in der Hauptsache aus Flocken, die sehr empfindlich auf zusätzliche Turbulenz oder Schockwellen reagieren, die durch einige Probenahmeverfahren hervorgerufen werden.

Um das Größenspektrum von Flocken zu analysieren, sind deshalb heute In-situ- Unterwasservideokameras mit nachgeschalteter Bildverarbeitung im Einsatz. Eine wichtige Kenngröße des Schwebstoffs, durch die dieser auch in den numerischen Modellen charakterisiert wird, ist die Sinkgeschwindigkeit. Um diese in situ zu messen, sind das Owen-Rohr und seine Varianten bzw. Nachfolger geeignete Instrumente, die verhindern, dass die Flocken bei der Probenahme zerbrechen. Durch Kombination von solchen Instrumenten mit Laser-in situ-Streu- und Transmissionsmessungen erhält man bei den LISST-ST-Geräten die Sinkgeschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Flocken- oder Partikelgröße.

2. Entwicklung und natürlicher Zustand des Elbe-Ästuars

Als Ästuar bezeichnet man den offenen Übergangsbereich zwischen Fluss und Meer. Das Wort leitet sich ab vom lateinischen Aestuarium („niedere Flussmündung") und bezeichnet die Trichtermündung eines Flusses oder Stroms. Häufiger sind allerdings die geschlossenen Deltamündungen, die bei steileren Küsten und/oder großer Geschiebefracht vorherrschen. Ästuare bilden sich in Flachküsten mit großem Tidenhub. Typische Beispiele sind Elbe, Weser, Themse, Ob, Jenissei, Sankt-Lorenz-Strom etc.; „Ästuare sind wie Deltas gekennzeichnet durch den Übergang des Süßwassers zum Salzwasser (Brackwasser), einer Stoffverfrachtung infolge der Wasserbewegungen und durch einen Wechsel der Tier- und Pflanzenwelt vom Flussbereich zum Meer." (Wikipedia).

Die beiden gängigsten geomorphologischen Definitionen der flussseitigen Ästuargrenze stammen von Fairbridge (1980), der das Ästuar als Meeresbucht, die bis zur Tidegrenze in ein Flusstal hineinrecht, einführt, sowie von Pritchard (1967): „a semi-enclosed coastal body of water which has a free connection with the open sea and within which sea water is measurably diluted with fresh water derived from land drainage". Der Unterschied zwischen den Definitionen von Pritchard und Fairbrigde zeigt sich in zweierlei Hinsicht. Pritchards Klassifikation ist ein kurzfristiges dynamisches Schema. Durch die saisonale Variation des Süßwasserzuflusses (Oberwasser) verändern sich Ausdehnung und Lage des Ästuarbereiches. Obwohl auch Pritchard kurzfristige Effekte berücksichtigt, ist seine Klassifikation ausdrücklich auf die Bedeutung langfristiger Prozesse (klimatisch bedingter Meeresspiegelanstieg) hin angelegt. Ein zweiter Unterschied besteht darin, dass Pritchards Definition eine chemische ist (wo der Chloridgehalt unter 0,01 Promille fällt und sich die Ionen-Zusammensetzung von See- zu Flusswasser ändert), während Pritchards Definition physikalischer Natur ist (die Oberstromgrenze eines messbaren Gezeitenhubs). Im Fall der Elbe liegt die natürliche flussseitige Grenze des Ästuars nach Fairbridge ungefähr 110 km stromauf von der Grenze nach Pritchard. Das Wehr bei Geesthacht verringert diese Differenz auf 60 km. Weder Fairbridge noch Pritchard behandeln die geologisch wichtige see-seitige Begrenzung des Ästuars in akzeptabler Weise. Auch in neuerer Zeit ist hier keine Klärung erfolgt. Simpson et al. (1992) führen zwar den Begriff des ROFI (regions of fresh water influence) im mündungsnahen Schelfmeer ein, der Übergang des ROFI zum Ästuar ist aber fließend. Geht man von den Sedimenteigenschaften aus, so lassen sich ästuarine Verhältnisse in bestimmten Fällen sogar bis zu 100 km seewärts von der geomorphischen Mündung feststellen.

Im Sinne von Fairbridge klassifizierten Davies (1973) und Hayes (1975) Ästuare und Küstengewässer nach dem Tidenhub. Mikrotidal werden Gewässer unter 2 m Tidenhub genannt, zwischen 2 und 4 m spricht man von mesotidalen und darüber von makrotidalen Verhältnissen. Im Sinne von Pritchards Definition unterteilt Simmons (1966) nach dem Verhältnis von Tideprisma (Volumen des während der Flutphase über den Mündungsquerschnitt einströmenden Wassers) und Oberwasser in „gut", „teilweise" und „schlecht" durchmischte Ästuare. Die Elbe ist demgemäß ein „teilweise bis gut durchmischtes mesotidales Ästuar".

Ästuare werden durch das Zusammenspiel von Sediment(Feststoff-)transport und Meeresspiegelanstieg bzw. Küstenabsenkung (an der deutschen Nordseeküste waren es zumindest temporär beide Faktoren) geformt. Die heutigen Ästuare an der Nordsee entstanden nach dem Abschmelzen der Gletscher der Weichselkaltperiode während der Flandrischen Transgression (der Periode des letzten Anstiegs des Meeresspiegels), die vor ca. 15.000 Jahren begann. In dieser beginnenden Warmperiode (dem Holozän) stieg der Meeresspiegel um 100 bis 130 m. Zur Zeit des niedrigsten Niveaus, als die Küstenlinie am Schelfrand verlief, gab es wahrscheinlich nur wenige Ästuare in Tälern in der Nähe des Schelfrandes. Als bei zunächst langsam ansteigendem Meeresspiegel sich die Küstenlinie langsam auf das flache äußere Schelf vorschob, bildeten sich dort zunächst flache Lagunen. Ein schnellerer Anstieg vor 12.000 bis 6.000 Jahren brachte dann die Küstenzone zu den steileren Hängen des Schelfs. Zu dieser Zeit bildeten sich in überfluteten Schelftälern die Ästuare. Der Höhepunkt der Ästuarentwicklung in Anzahl und Ausdehnung war vor 5.000 bis 3.000 Jahren, als sich der Anstieg des Meeresspiegels wieder verlangsamte.

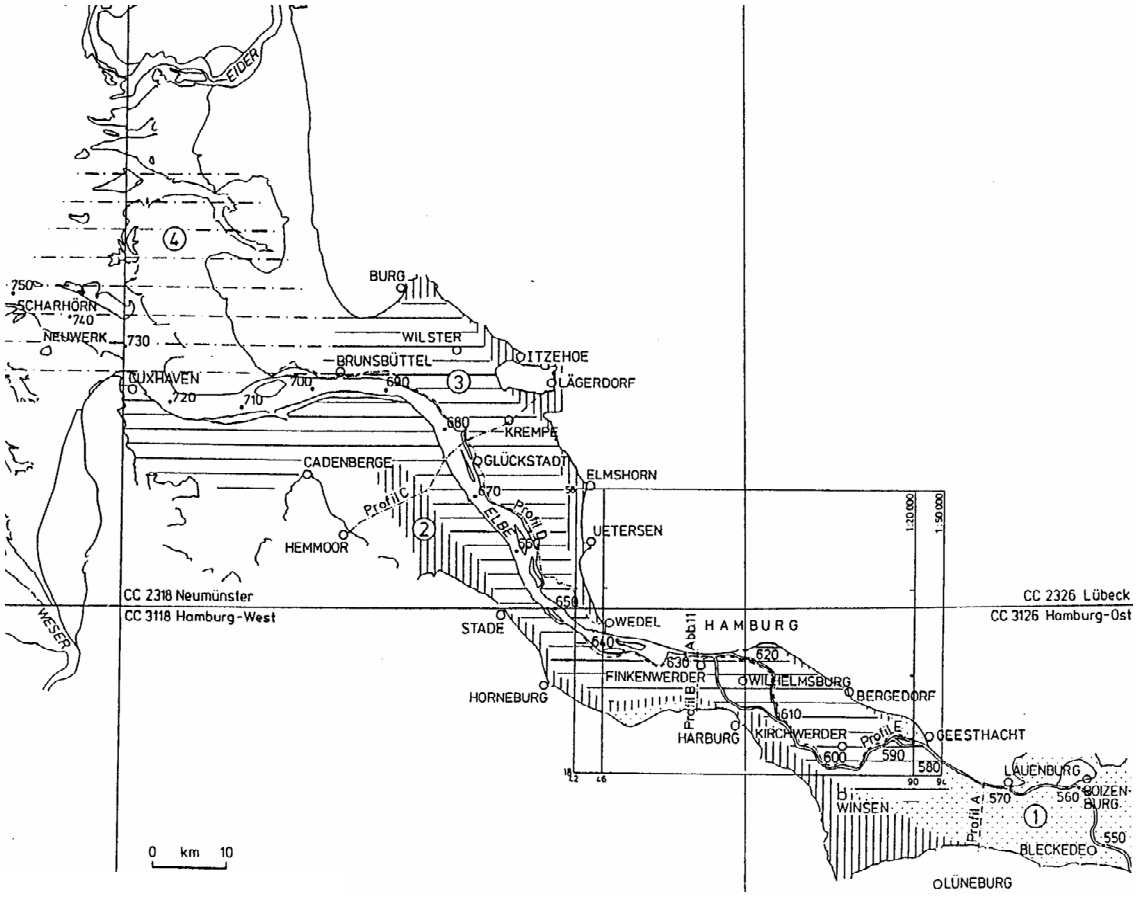


Abb. 2.1: Übersichtskarte des rezenten Elbe-Ästuars, Blatt Hamburg
Fazielle Gliederung des Raumes vor den anthropogenen Eingriffen:
1 – überwiegend fluviale Fazies,
2 – Randmoorbildungen,
3 – perimarine Verlandungsfazies,
4 – Wattmeer-Fazies.
Lage der geologischen Schnitte (Profile A bis E).
Aus dem Hamburger Raum liegen außerdem noch viele detailliertere Darstellungen in Maßstäben 1:50000, 1:20000 und 1:5000 vor. (Aus: Paluska, 1992).

Ästuare sind gute Sedimentfallen. Sie füllen sich rasch durch Sedimenttransport sowohl von Land als auch von See. Sie nehmen an Tiefe, Volumen und Oberfläche ab, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Gezeitenströmung, Wellen und Oberwasser einstellt. Schubel und Hirschberg (1978) weisen auf den Aspekt der geologischen Kurzlebigkeit (wenige tausend Jahre) von Ästuaren hin. Dyer (1986) bemerkt, dass ein sofortiger Ausgleich des Meeresspiegelanstiegs durch Sedimenttransport unwahrscheinlich ist.

So ist es generell auch schwierig, langfristige Trends zur Ästuarentwicklung und zum residuellen Sedimenttransport anzugeben, weil sie durch große Variabilität überlagert sind. Auch kann bereits ein geringer Anstieg des Meeresspiegels lokale Gleichgewichtssituationen zerstören. Mit dem Eindringen des Meeres in das Ästuar treten an Stelle des ursprünglichen fluvialen Transportes und der Sedimentation tideabhängige perimarine Mechanismen ein. Solche Veränderungen weisen zwar im allgemeinen eine Vielzahl lokaler Variationen auf, doch die norddeutschen Ästuare (Elbe-, Weser/Ems-, und mit Einschränkungen auch das Eider-Ästuar) zeichnen sich durch signifikante Gemeinsamkeiten aus, so z.B. durch die Existenz einer Brackwasser- und Trübungszone. Man kann daher die Problematik der ästuarinen Forschung am Beispiel der Elbe modellhaft auch für andere Gebiete erläutern. Die wichtigsten Fazies des Elbe-Ästuars sind aus der Abb. 2.1 ersichtlich. Diese Darstellung gibt den Zustand vor der anthropogenen Nutzung wieder, d.h. etwa zwischen der nachchristlichen Eisenzeit und dem Frühmittelalter. Paluska (1992) unterscheidet vier Stadien des anthropogenen Einflusses auf die geologische Entwicklung des Elbe-Ästuars:

„Schilf-Elbmarsch

Das in der mittelholozänen Elbmarsch-Landschaft dominierende Element waren ausgedehnte, mit Schilf dicht bewachsene Sümpfe. Solche Täler stellten für die damalige Bevölkerung eine so bedeutsame Naturerscheinung dar, dass man für sie sogar einen eigenen Namen parat hatte: Albis (später Elbe) hieß nämlich der „lichte" oder "helle" Ort. In den Schilf-Sümpfen setzte sich die feine Trübe aus dem Fluss ab; infolge dessen bildeten sich im Elbe-Ästuar flächendeckend bis über 15–20 m mächtige Kleischichten. ... In den ersten Jahrhunderten unserer Zeitrechnung erreichte eine neue technische Errungenschaft – die Eisenproduktion mit ihrem enormen Bedarf an Holz – auch Mitteleuropa. Intensive Abholzung am Ober- und Mittellauf der Elbe war die Folge, die eine zunehmende Abtragung der freigelegten Böden nach sich zog. Die Flüsse führten plötzlich viel mehr Schwemmstoffe als je zuvor, und ein großer Teil setzte sich dann am Unterlauf ab. Die hier seit dem Altholozän vorhandenen Schilf-Sümpfe erstickten unter dieser Sedimentlast innerhalb von kaum mehr als 200 Jahren und versanken regelrecht im Schlamm.

Auenwald-Elbmarsch

Höhere Vegetation nutzte die Verdrängung der Sümpfe aus und siedelte sich in der Elbmarsch an. Dichte Auenwälder sind entstanden. Sie haben die Zeit der Völkerwanderung überlebt und existierten noch im frühen Mittelalter. In Moorfleet sind beim Autobahnbau große Baumstämme aus dieser Zeit freigelegt worden. Ein letzter Rest, der an diesen Landschaftstypus noch erinnert, ist im NSG Achtermoor am Rande der Boberger Dünen erhalten.

Weideland-Elbmarsch

Etwa im 7. Jhdt. n. Chr. wurde das Elbtal zum ersten Mal als ein potenzieller Nutzraum entdeckt. Die ersten Rodungen wurden vorgenommen, kleine Siedlungen sind entstanden. Die sich in der darauf folgenden Zeit rasch vergrößernde Freifläche diente zunächst vornehmlich als Weideland. Die Rodung ermöglichte dies zwar, doch sie schuf zugleich auch die Gefahr von Überflutungen, die eine anderweitige Nutzung der Elbmarsch, z.B. als Anbaufläche oder Siedlungsraum größeren Ausmaßes unmöglich machten oder zumindest stark einschränkten. Wirksame Schutzmaßnahmen erschienen erforderlich. Etwa im 12. bzw. 13. Jahrhundert begann man auch im Elbe-Ästuar mit dem Deichbau, nachdem sich diese Technologie im Küstenbereich bewährt hatte. Mit den Deichen wurde bereits ein dritter menschlicher Eingriff in das Ökosystem der Elbmarsch eingeleitet. Die durch die Nutzung begünstigten Überflutungen erschienen einfach als Naturkatastrophen, die man durch geeignete technische Maßnahmen abwehren kann. Der Anspruch auf die uneingeschränkte Inanspruchnahme des Elbtales erschien als legitim und selbstverständlich.

Polder-Elbmarsch

In den durch Deiche geschützten Teilen der Elbmarsch wurde etwa seit dem Hochmittelalter Ackerbau betrieben. Allerdings waren hierzu ausgedehnte Entwässerungs-maßnahmen erforderlich. Ein System von Gräben wurde angelegt. Die sogen. „Polder", d.h. landwirtschaftlich nutzbare Ländereien (wörtlich: Felder), sind entstanden. Auch eine dauerhafte Ansiedlung in der Marsch war auf dem trockengelegten Land möglich. Doch die Entwässerungsgräben hatten auch negative Folgen – in erster Linie Sackungen der Elbmarsch, die allein im Hamburger Raum (z.B. in der Süderelbmarsch) Beträge von mehr als 1 m erreichten (in der Wilster- und Krempe-Marsch liegt die heutige Marschoberfläche an einigen Stellen bereits um -2 m NN). Die Eindeichung der Elbe erwies sich für die Elbmarsch als eine potenzielle Gefährdung durch Überschwemmungen infolge von Deichbrüchen. Katastrophale Ereignisse begleiteten die dortige Ansiedlung und Nutzung ganze Jahrhunderte und reichen bis in die Gegenwart hinein.**"** (Paluska, 1992).

Abbildung 2.2 zeigt den Zustand des durch Strombaumaßnahmen noch unbeeinflussten Elbe-Ästuars in einer der ersten Karten aus dem Jahr 1695. Die Flussquerschnitte sind breiter und flacher, es existieren natürliche Inseln und Nebenelben, und der Gezeiteneinfluss reichte (wegen des noch nicht vorhandenen Wehres bei Geesthacht) viel weiter stromauf als heute.

Abb. 2.2: Historische Karte des Elbe-Ästuars von Sörensen, 1695.

3. Feststofftransport in der Tide-Elbe

3.1 Mechanismen des Feststofftransportes in Ästuaren – die Trübungszone

In den oberen und mittleren Abschnitten vieler Ästuare (besonders bei teilweise und bei gut durchmischten) sind die Schwebstoffkonzentrationen um ein bis zwei Größenordnungen höher als im restlichen Flussverlauf wie auch stromab im seewärtigen Bereich. Dieses Phänomen wird als Trübungszone oder Trübungsmaximum (Estuarine Turbidity Maximum, ETM) bezeichnet und findet sich in vielen Ästuaren der Welt, die sich sonst in Größe und Form unterscheiden.

Die Trübungszone der Elbe (Abb. 3.1) befindet sich im Bereich zwischen Hamburg und Brunsbüttel und ist von zentraler Bedeutung für die Verteilung und den Transport von Feststoffen im Ästuar, sowie für den Austausch von partikulärem Material zwischen dem Fluss und der Küste. Die Trübungszone der Elbe weist eine in mehrere lokale Maxima gegliederte Struktur auf, die sich so z.B. bei der Trübungszone der Weser nicht findet. Die beiden Hauptmaxima bei Elbe-km 670 und 690 sind auch in den langjährigen Längsprofilmessungen der ARGE Elbe im Ästuar (Abb. 3.6) immer wieder zu finden.

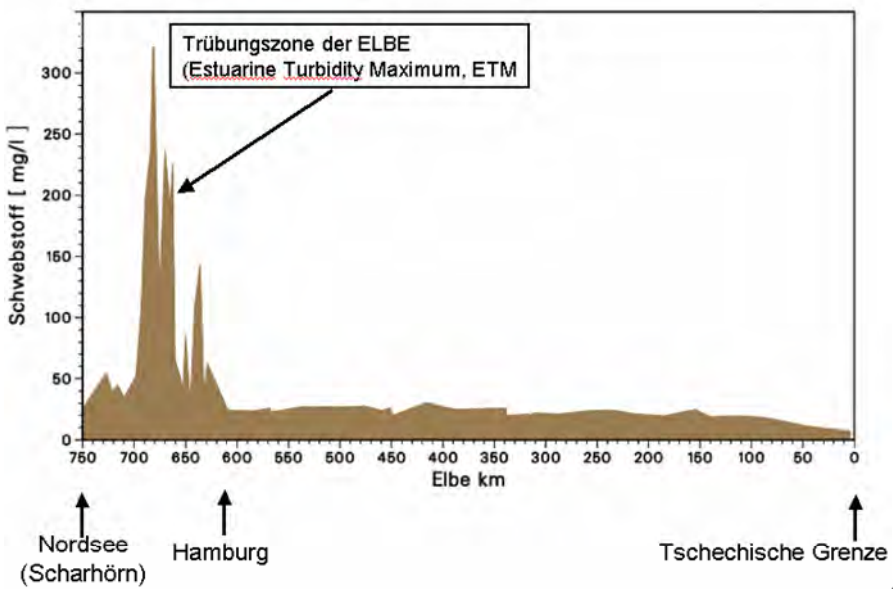


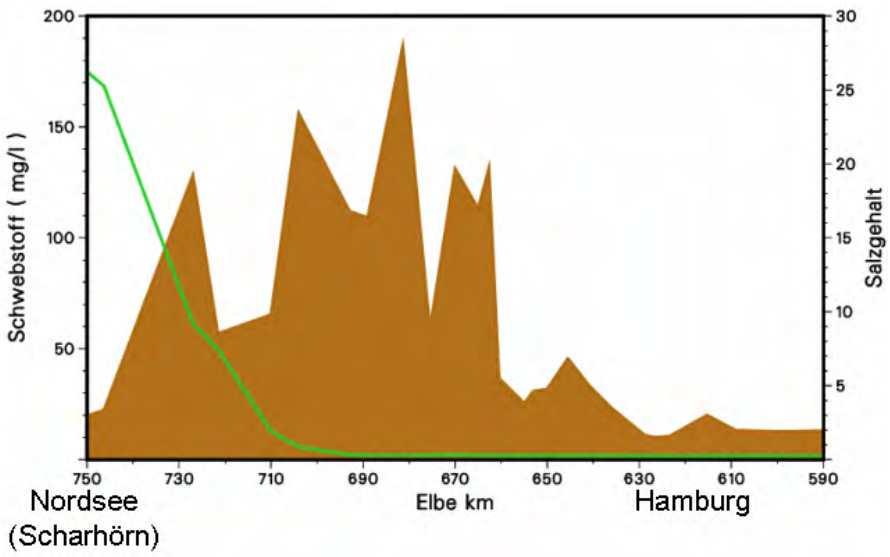
Abb. 3.1: Schwebstoffverteilung in der Elbe: Oberflächennahes Längsprofil der Schwebstoffkonzentration von Schmilka bis Scharhörn (Probenahme vom Hubschrauber aus, 5. bis 7. Oktober 1993).

In den Trübungszonen sammeln sich über längere Zeiten ernorme Schwebstoffmengen an, obwohl zu erwarten wäre, dass die aus dem Oberwasserabfluss resultierenden Strömungen den Austrag des Schwebstoffs aus dem Ästuar in die angrenzenden Seegebiete bewirken. Das Inventar des Elbe-ETM beträgt nach Grabemann et al. (1995) ca. 80.000–100.000 t und entspricht damit ca. 10–30 % des jährlichen Eintrags aus dem Einzugsgebiet (s. Kap. 8) . Die dauerhafte Existenz des ETM ist auch deshalb erstaunlich, weil die im Ästuar vorherrschenden Mischungs- und Verdünnungsprozesse eigentlich die fluviale Schwebstoffkonzentration durch Mischung mit weniger trübem Salzwasser herabsetzen sollten. Die Frage nach dem Grund der Entstehung und dem Bestand der ästuarinen Trübungszonen beschäftigt die Wissenschaft seit über vier Jahrzehnten.

Nach heutigem Wissensstand gibt es eine Reihe von Prozessen, die zur Entstehung und Aufrechterhaltung von Trübungszonen führen. Geographische Gegebenheiten, Oberwasserzufluss und Stärke der Gezeiten bestimmen die Dominanz der einzelnen Prozesse im jeweiligen Ästuar.

Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch die Beziehung von SPM- und Salzgehalt im Elbe-Ästuar, wie sie sich aus einer tidephasengleichen Aufnahme bei vollem Ebb-Strom ergab. Man erkennt, dass sich die Trübungszone überwiegend im Bereich geringer Salzgehalte am flussseitigen Ende des Brackwasserbereichs und im Süßwasserbereich des Ästuars befindet.

Abb. 3.2:
Oberflächennahe Schwebstoff- (braun) und Salzgehaltsverteilung (grün) in der Tide-Elbe von Geesthacht bis Scharhörn (Probenahme vom Hubschrauber, 12.11.2002, Daten: ARGE ELBE).



Die verschiedenen Prozesse, die zu einer solchen Verteilung des Schwebstoffs im Ästuar führen können, werden im Folgenden kurz dargestellt.

3.2 Wechselwirkung und Vermischung von Süß- und Salzwasser und deren Einflüsse auf den Feststofftransport – die ästuarine Zirkulation

Im Ästuar erfolgt der Schwebstofftransport in erster Linie durch die starken Gezeitenströme. Er ist bestimmt vom periodischen Wechselspiel von SPM-Deposition zu den Kenterpunkten und Resuspension von Sediment durch Ebb- und Flutströme. Diesen überlagert sich eine schwache Strömung, die aus dem Ausgleich der bodennahen Druckgradienten längs des Ästuars entsteht (Abb. 3.3). Dieser Druckgradient ist stromauf gerichtet und entsteht aus der höheren Dichte salzhaltigen Wassers. Dies führt im Tidenmittel zu einer stromaufgerichteten Strömung in der unteren Wassersäule, die durch eine stromab weisende Strömung in der

oberen Wassersäule kompensiert wird. Dies wird als Dichteströmung, ästuarine oder auch Gravitationszirkulation bezeichnet.

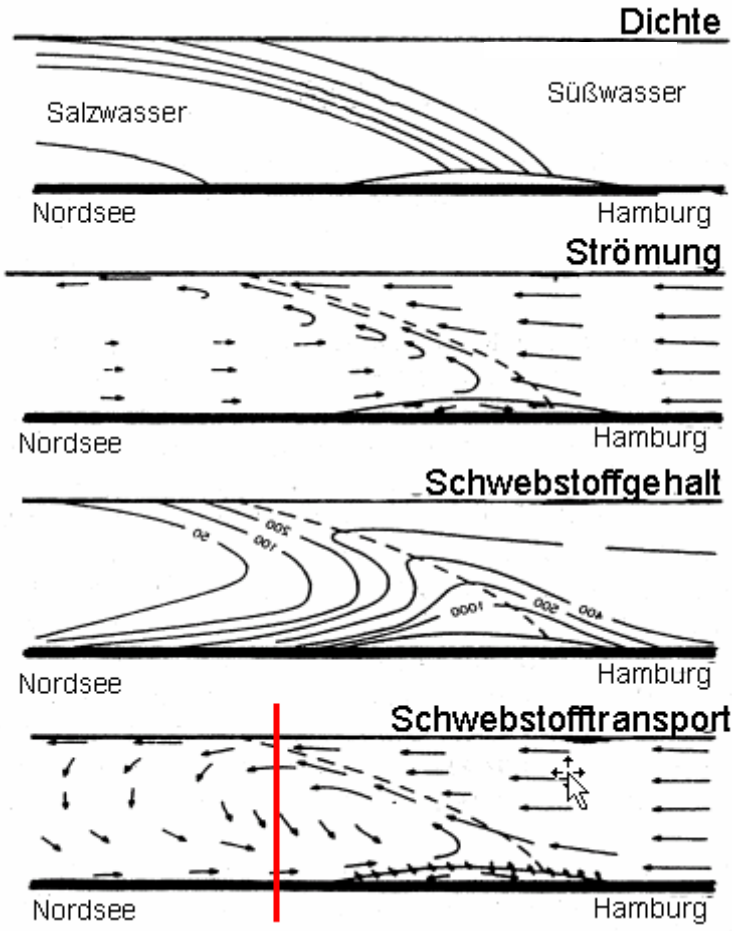


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der ästuarinen Zirkulation im Elbe-Ästuar: Dichtegradient längs des Ästuars, Restströme, resultierende Schwebstoffverteilung und resultierender Schwebstofftransport. Der vertikale Balken im unteren Teil der Abbildung bezeichnet die Lage der Mess-Position von Abb. 3.4. Nach Postma (1980).

Durch den ihr entgegenwirkenden Oberwasserzustrom kann die bodennahe Strömung nur bis zu einem gewissen Punkt ins Ästuar vordringen, an dem sich dann die Brackwasserzone ausbildet. Wie man aus den Längsprofilmessungen der ARGE Elbe ersieht (Abb. 3.8), ist dies in der Elbe bei mittlerem Oberwasser etwas stromauf von Glückstadt der Fall (Elbe-km 660-667). Die Dichteströmung in der Elbe hat die Größenordnung des im Ästuar durch das Oberwasser verursachten Reststroms von einigen cm/s (siehe Abb. 3.4 und Kappenberg et al. (1995)). Durch die inzwischen vorgenommenen Fahrrinnenvertiefungen sollte sich die Brackwassergrenze und mit ihr der Bereich der ästuarinen Zirkulation tendenziell etwas stromauf verlagern. In den Messungen der Beweissicherung konnte eine solche Stromaufverlagerung nicht nachgewiesen werden. Viel wichtiger ist der um einen Faktor 10 veränderliche Oberwasserabfluss, der zu einer dauernden Verschiebung der Vermischungszone im Längsschnitt der Tide-Elbe führt. Auch die Stärke der ästuarinen Zirkulation fällt und wächst mit dem Oberwasser (Festa & Hansen, 1978).

Für den mit der Dichteströmung transportierten marinen Schwebstoff ergibt sich daraus in Bodennähe eine Senke am Ende der Brackwasserzone, wo er sich mit dem fluvialen, durch den Reststrom transportierten Schwebstoff vermischt. Von der durch die Gezeitenströme generierten Turbulenz wird dieses Depot an der Sohle zweimal pro Tide aufgewirbelt und zeigt sich als Trübungszone in der Wassersäule und an der Oberfläche.

Messungen der ästuarinen Zirkulation sind schwierig, da sie – um das vorherrschende Gezeitensignal herauszumitteln – über mehrere Tideperioden und in mehreren Tiefen kontinuierlich durchgeführt werden müssen. Die Ergebnisse einer solchen von einem bei Büttel (Elbe-km 690) am nördlichen Tonnenstrich verankerten Ponton durchgeführten Messung sind in Abbildungen 3.4 dargestellt.

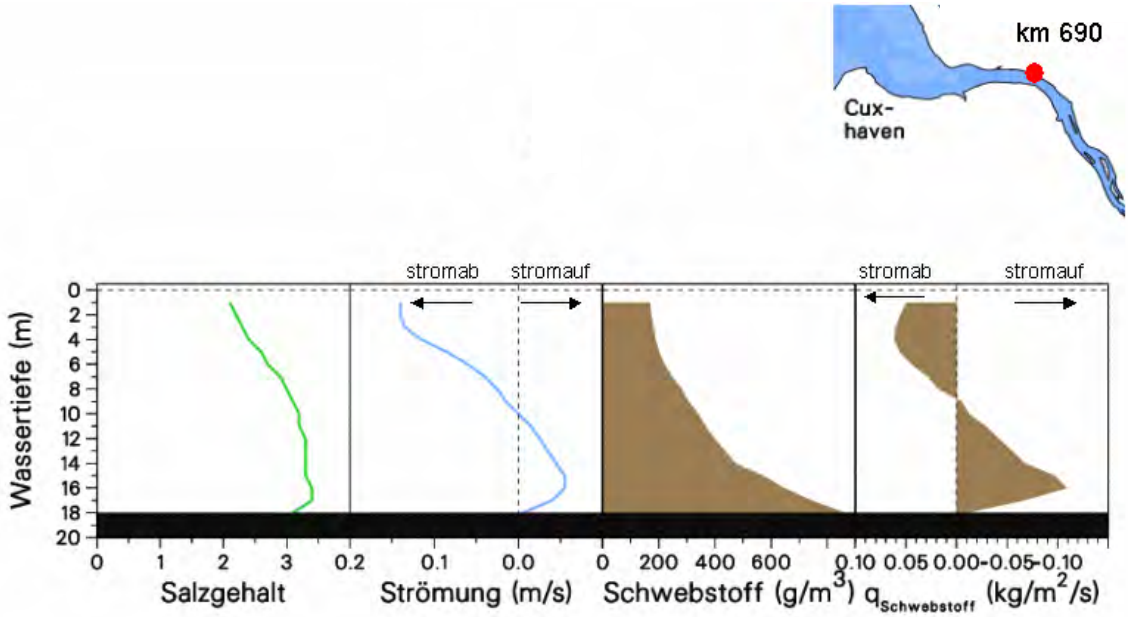


Abb. 3.4: Tidengemittelte Vertikalprofile von Salzgehalt, Strömung, Schwebstoffgehalt und Schwebstofftransport in der Trübungszone der Elbe bei Büttel im April 1993. Nach Kappenberg et al. (1995).

Der ästuarinen Zirkulation überlagern sich – verursacht durch Turbulenz und interne Wellen an den Dichtefronten – Mischungsvorgänge in der Wassersäule. Die treibenden Kräfte sind hierbei die Gezeitenströme.

Den Mischungsvorgängen wirkt die Dichteschichtung (im Ästuar primär durch den Salzgehalt bedingt) entgegen, deren Stärke vom Oberwasserzufluss abhängt.

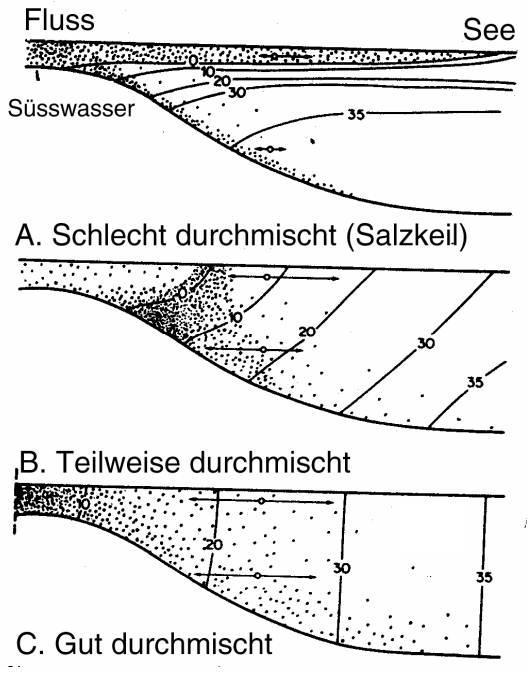


Abb. 3.5:
Schematische Darstellung von verschiedenen Typen der ästuarinen Zirkulation. Die punktierten Bereiche zeigen die relativen SPM-Konzentrationen an. Die Pfeile geben die Ebb- und Flutwege an.

A: Salzkeil-Ästuar, permanent geschichtet. Fluvialer Schwebstoff wird oberflächennah in die See eingetragen.

B: Teilweise durchmischtes Ästuar: Schwebstoff sammelt sich in der Trübungszone.

C: Gut durchmischtes Ästuar (kaum Süßwassereinfluss): Schwebstoff sammelt sich an der Tidengrenze. Nach Postma (1980).

Bei vorgegebener Bathymetrie des Ästuars bestimmt dann das Verhältnis von Oberwasserzufluss und Stärke der Gezeitenströme (Tidenhub) Art und Stärke der ästuarinen Zirkulation (Abb. 3.5) und damit auch des Schwebstofftransportes und der Ausprägung der Trübungszone. Die Elbe gehört je nach Oberwassersituation zu den „teilweise“ bis „gut“ durchmischten Ästuaren.

3.3 Oberwasserwirkungen auf das Schwebstoffregime des Elbe-Ästuars

Der Haupteinflussfaktor auf die langfristige Schwebstoffdynamik im Elbe-Ästuar ist das Oberwasser. Das Oberwasser hält den Dichtegradienten längs des Ästuars aufrecht und beeinflusst damit maßgeblich die Stärke der ästuarinen Zirkulation und damit die Ansammlung von SPM in der Trübungszone. Aus Schwebstoffmessungen an Stationen in der Trübungszone ist bekannt, dass bei hohem Oberwasser (Hochwasserwellen) die Schwebstoffkonzentration innerhalb kurzer Zeit (wenige Tiden) zurückgeht. Dies wird als seewärtige Verlagerung der Trübungs- und Brackwasserzone interpretiert. Bei Grabemann et al. (1995) werden solche Messungen für die Elbe und die Weser dargestellt und diskutiert. Unsicher ist jedoch wegen fehlender Messungen im Außenästuar, wie weit die seewärtige Verschiebung der Trübungszone reicht und ob diese Hochwasserwellen Schwebstoff in merklichen Mengen in die Deutsche Bucht und die Watten austragen. Schon Knauth et al. (1993) stellen fest: „Eine Bewertung des Elbeästuars hat dem Umstand Rechnung zu tragen, dass ein großer Teil des Schwebstoffmaterials und mit ihm das daran gebundene Schadstoffinventar längere Zeit im Übergangsbereich in der sogenannten Trübungszone verweilt und ein Austrag dieser Materialien keineswegs gleichmäßig, sondern episodenhaft erfolgt“.

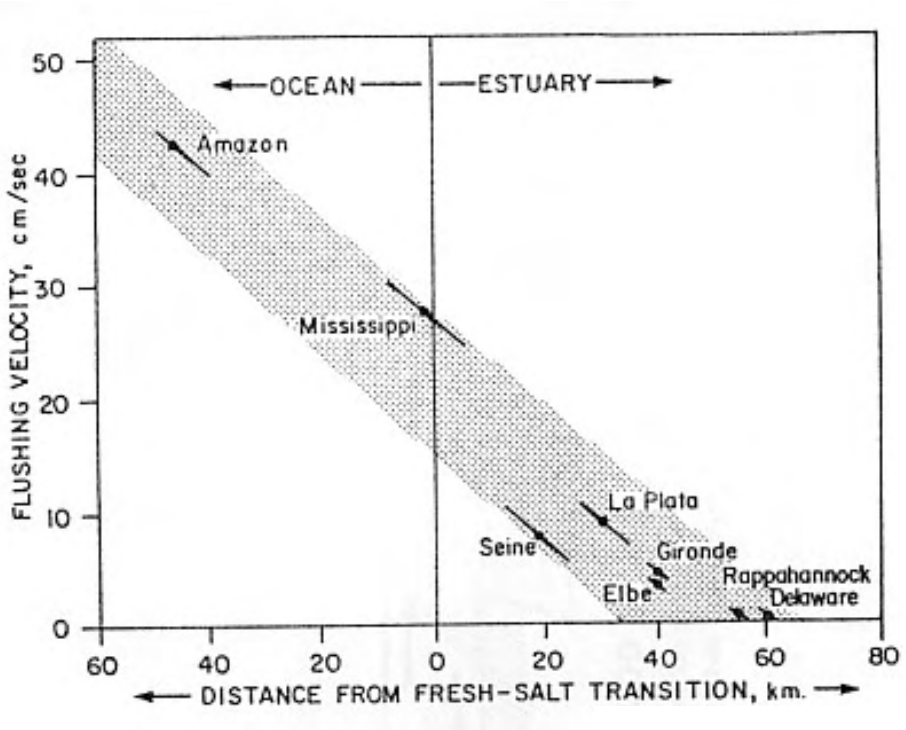


Abb. 3.6: Position der Brackwassergrenze (freshwater-saltwater transition), Bereich der Trübungszone (punktiert) als Entfernung von der Flussmündung und flushing velocity. Die Punkte geben die mittlere Position an, die Fehlerbalken markieren den Bereich der jahreszeitlichen Variabilität. Nach Gibbs (1977).

Die Entfernung, bis zu der über den Oberwasserzufluss Süßwasser und mit ihm fluvialer Schwebstoff ins Ästuar vordringen können, wird mit dem Parameter „flushing velocity“ (Gibbs, 1977) quantifiziert. Diese Geschwindigkeit ist als Verhältnis des jährlichen mittleren Oberwassers und der Fläche des Querschnitts an der Brackwassergrenze (1 Promille Salz-

gehalt) des Ästuars definiert. Er gibt also den dort durch das Oberwasser verursachten Reststrom an und ist auch ein Maß für die Fähigkeit des Flusses, das Vordringen des Seewassers zu verhindern. In Abbildung 3.6 ist dieser Parameter für die Elbe im Vergleich mit anderen Ästuaren dargestellt. Große Flüsse wie der Amazonas sind in der Lage, Süßwasser und Schwebstoff auf den Kontinentalschelf vor ihrer Mündung zu schwemmen, während kleine Flüsse wie die Elbe nur den landseitigen Bereich ihrer Ästuare beeinflussen.

Durch den Oberwasserzufluss gelangt fluvialer Schwebstoff aus dem Einzugsgebiet der Elbe über das Wehr bei Geesthacht ins Ästuar. Dieser Zustrom beträgt im langjährigen Mittel 16–18 kg/s. Demgegenüber werden im Ästuar z. B. durch einen Querschnitt bei Bielenberg (Elbe-km 669) bei maximalem Ebb- oder Flutstrom pro Sekunde mehr als 10 Tonnen Schwebstoff bewegt, von denen bis zu über 80 % marinen Ursprungs sind (Puls et al., 1997). Als Schwebstofflieferant ist das Oberwasser somit nur von zweitrangiger Bedeutung. Die saisonale Variation des Oberwasserzuflusses, der fluvialen Schwebstoffkonzentration und des fluvialen Schwebstoffeintrags (als Produkt des Oberwasserabflusses bei Neu-Darchau und der bei Hitzacker gemessenen Schwebstoffkonzentration) ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

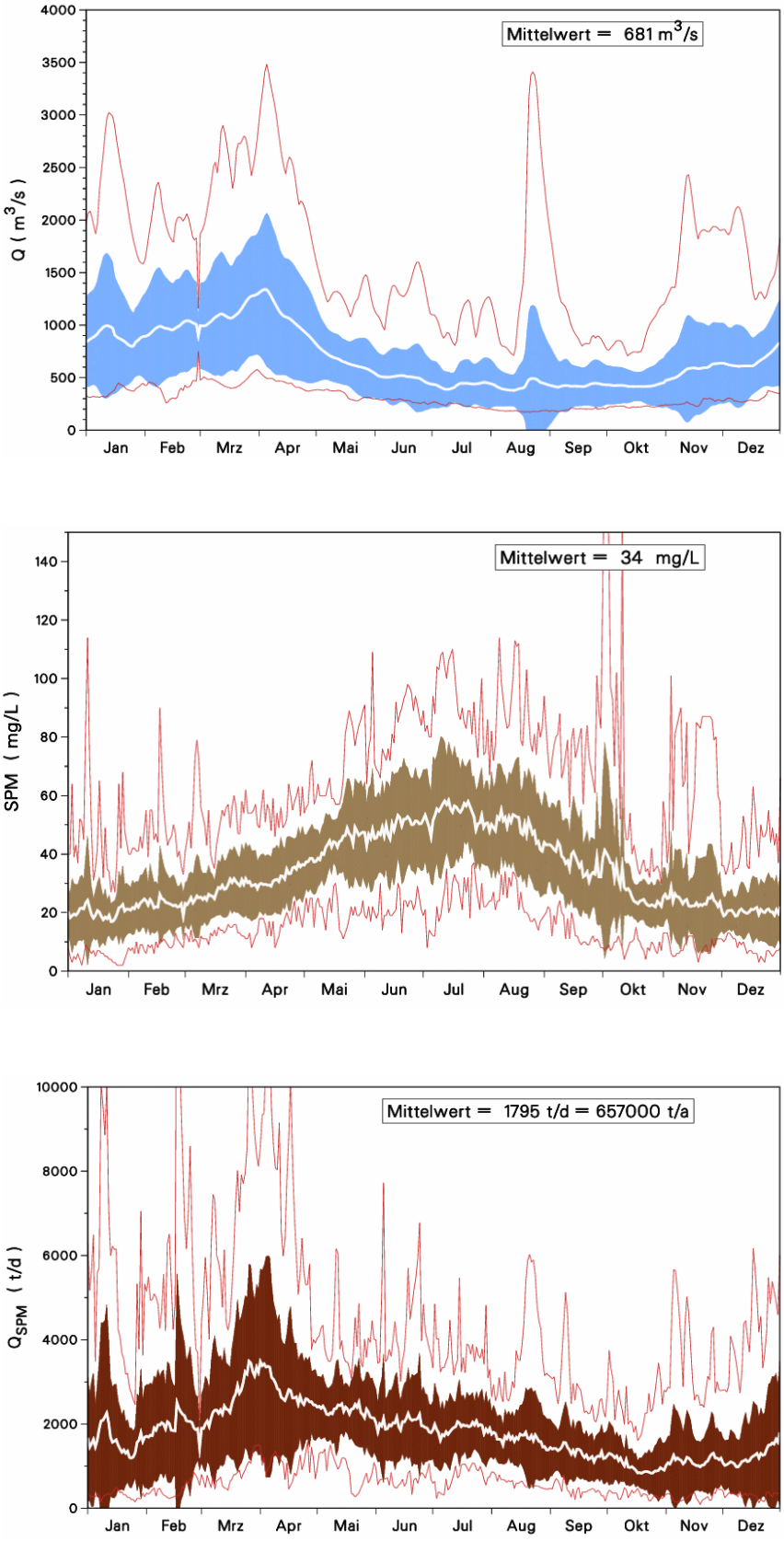


Abb. 3.7: Jahresgänge des Oberwassers (oben), der fluvialen Schwebstoffkonzentration bei Hitzacker (Mitte) und des fluvialen Schwebstoffeintrags (unten). Mittelwerte von 1987 bis 2005 (durchgezogene weiße Linien), Variationsbereich von einer Standardabweichung (farbige Flächen) und Extremwerte (rote Linien).

Man erkennt die unterschiedliche Verteilung von Wasserzufluss (Abb. 3.7 oben) – mit maximalen Werten Anfang April – und Schwebstoffkonzentration (Abb. 3.7 Mitte), die ihr Maximum im Juli erreicht. Im Sommerhalbjahr besteht der fluviale Schwebstoff überwiegend aus Biomasse (Algen). Wegen der höheren Variationsbreite im Abfluss zeigt der Schwebstoffeintrag (Abb. 3.7 unten) eher den Jahresgang des Oberwassers als den der Schwebstoffkonzentration.

Aus den Längsprofilmessungen der ARGE Elbe (Abb. 3.8) erkennt man deutlich eine hohe Korrelation zwischen Position und Stärke (Schwebstoffinventar) der Trübungszone und dem Oberwasser. Seit 1979 werden diese Messungen durch Probenahme vom Hubschrauber 6 bis 12-mal jährlich durchgeführt und bilden (abgesehen von Probenahmen an Uferstationen) den längsten homogenen Datensatz zum Schwebstoffregime im Ästuar.

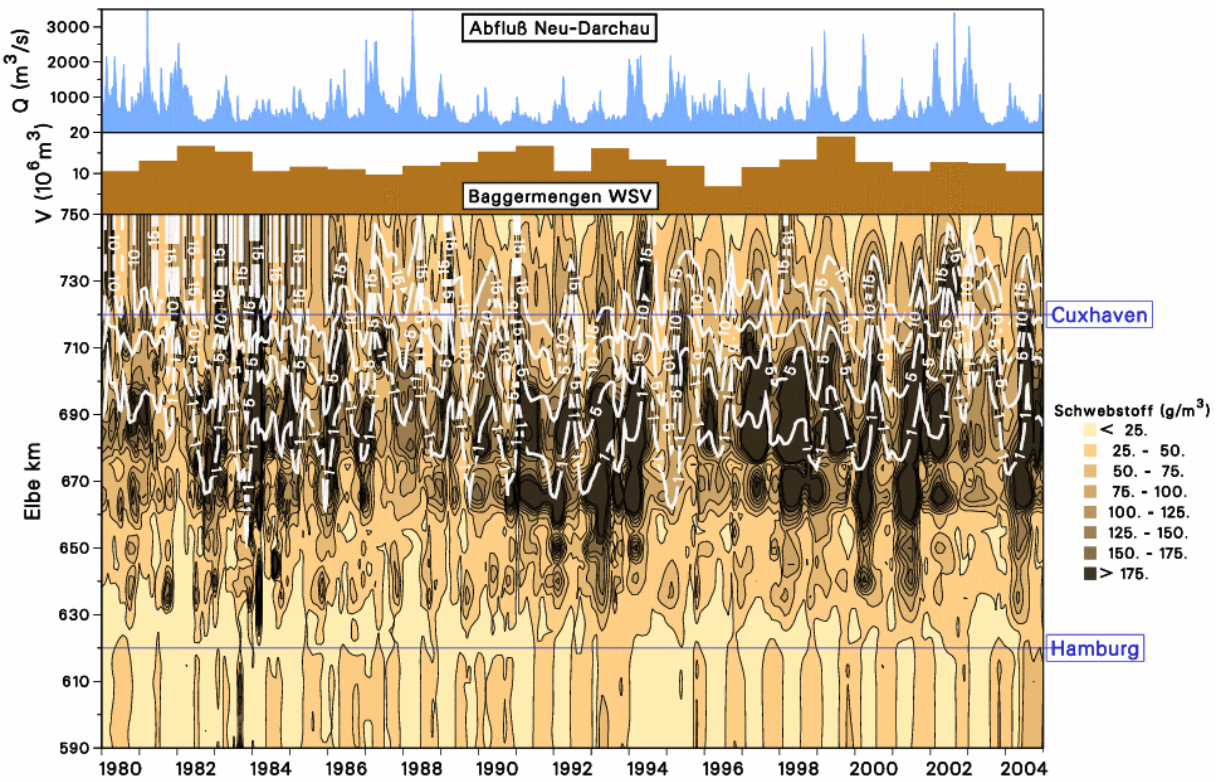


Abb. 3.8: Saisonale Variation der Verteilung von Salzgehalt und Schwebstoff in der Tide-Elbe von 1979 bis 2005. Oberes Bild: Zeitreihe des Oberwassers in Neu-Darchau. Mittleres Bild: Jährliche Baggermengen im Bereich der WSÄ Hamburg und Cuxhaven. Oberflächennahe Schwebstoffkonzentration (Flächen gleichen Schwebstoffgehaltes) und Salzgehalt (weiße Linien gleichen Salzgehaltes – Isohalinen). (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE).

Bildet man aus allen diesen Längsprofilen des Schwebstoff- und Salzgehaltes Mittelwerte und Varianzen, so erhält man das in Abbildung 3.9 dargestellt Bild. Wieder zeigen sich die lokalen Schwebstoffmaxima bei Elbe-km 690 und 670. Obwohl die absolute Varianz des Schwebstoffgehaltes im Zentrum der Trübungszone am höchsten ist, zeigt sich die maximale prozentuale Varianz im Bereich von Elbe-km 645 bis 665 in der landseitigen Flanke der Trübungszone. Im gesamten Ästuar zeigt sich eine hohe Variabilität von 40 bis 80 Prozent. Statistische Analysen haben gezeigt, dass 18 % dieser Varianz allein durch das Oberwasser erklärt werden können (Kappenberg & Grabemann, 2001).

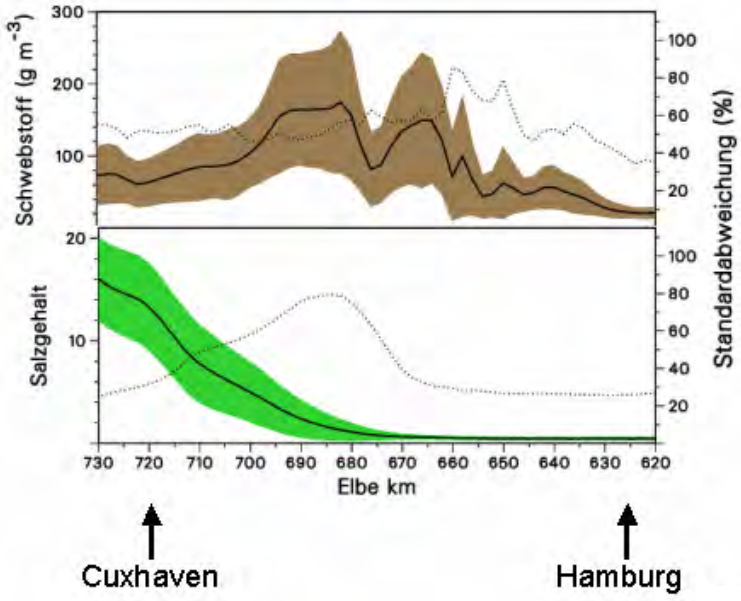


Abb. 3.9: Statistik von Schwebstoff- und Salzgehalt im Längsschnitt der Tide-Elbe: Mittelwerte von 1979 bis 2005 (durchgezogene schwarze Linien), Variationsbereich von einer Standardabweichung (farbige Flächen) und prozentuale Variation (punktierte Linien, rechte Achse). (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE).

Weiterhin besteht eine hohe Korrelation zwischen der Position (Schwerpunkt) der Trübungszone und dem Oberwasser (Abb. 3.10a). Die Gleichung unter der Abbildung gibt dabei den Elbe-Kilometer des Schwerpunktes als Funktion des Oberwassers (in m^3/s). Diese Funktion wird durch die schwarze Linie in der Abbildung dargestellt.

Teilt man die Längsprofile in 5 Oberwasserklassen (Abb. 3.10b), so erkennt man mit steigendem Oberwasser eine seewärtige Verlagerung des lokalen Maximums, das sich bei niedrigem Oberwasser bei km 690 bildet. Das Maximum bei km 670 verhält sich anders: Mit steigendem Oberwasser bleibt es fast ortsfest, nimmt aber an Stärke ab. Das führt zu der Hypothese, dass die lokalen Schwebstoffmaxima der Trübungszone der Elbe ihre Existenz unterschiedlichen Prozessen verdanken. Berücksichtigt man, dass mit steigendem Oberwasser auch die Brackwasserzone seewärts wandert (Salzgehalt in Abb. 3.10b), so könnte man die Existenz des stromab bei km 690 liegenden Maximums der ästuarinen Zirkulation zuschreiben, da diese zur Schwebstoffansammlung am Anfang der Brackwasserzone führt.

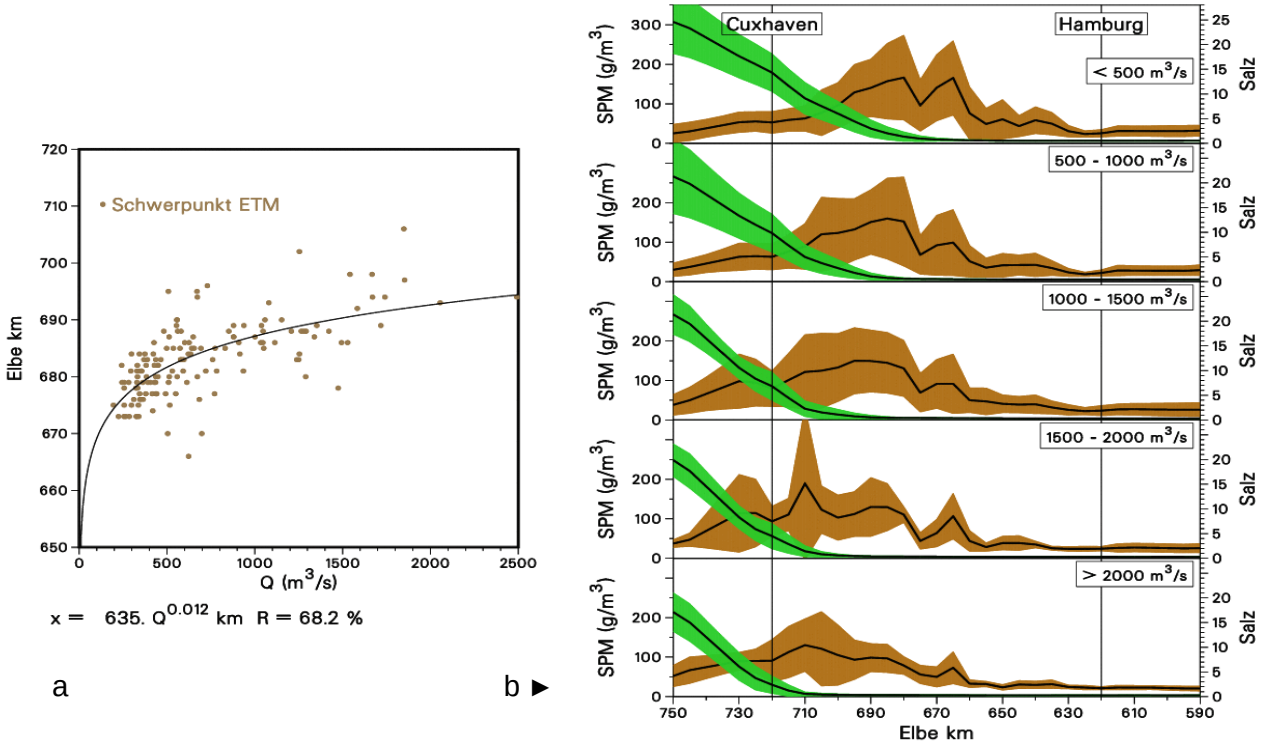


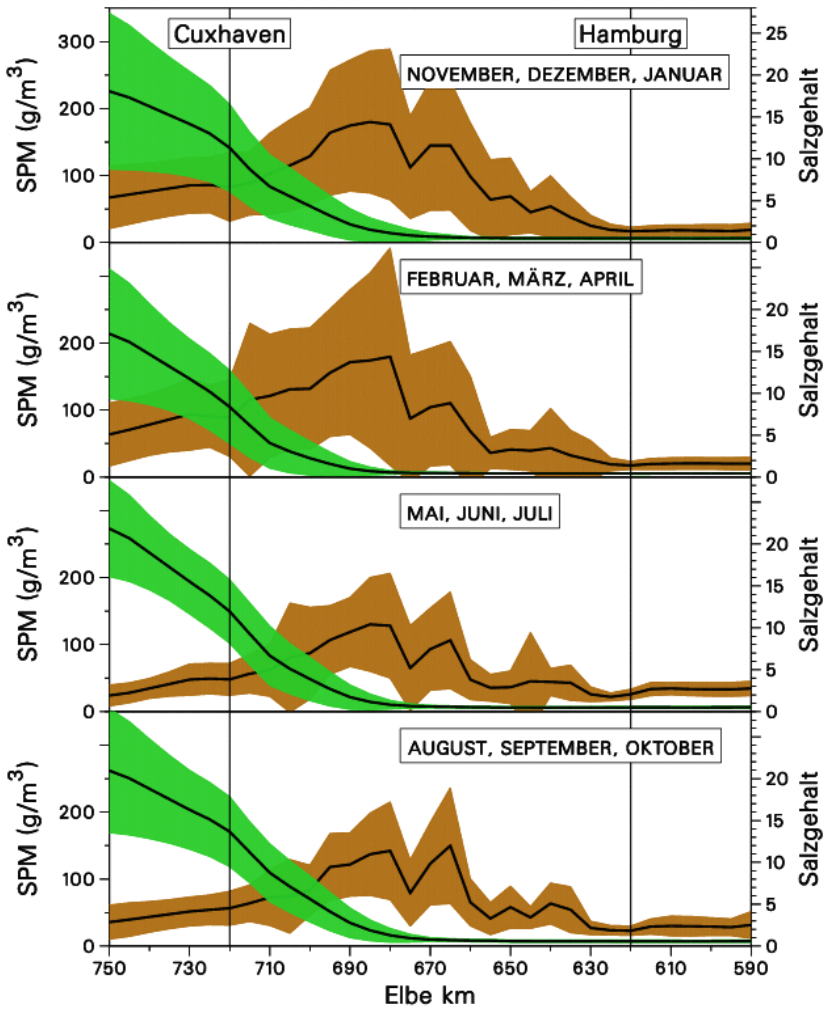
Abb. 3.10: (a) Position der Trübungszone (ETM) und (b) Verteilung von Schwebstoff- und Salzgehalt in Abhängigkeit vom Oberwasser. (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE).

Bei diesen und den im Vorhergehenden angestellten Betrachtungen sollte man aber stets auch die vielen Unsicherheiten beachten. Obwohl die Probenahmen der ARGE Elbe immer an denselben Stationen und zur gleichen Tidephase (bei voll entwickeltem Ebbstrom) erfolgen, besteht ein gewisses Zufallselement in der inhomogenen Verteilung des Schwebstoffs im Wasser, die oft in Form von Wolken und Turbulenzballen gegeben ist. Auch sind die 5 Oberwasserklassen in Abbildung 3.10b nicht gleich mächtig. Mit steigendem Oberwasser gibt es immer weniger Längsprofile. Ein weiterer Grund von nicht eindeutigen Oberwasserabhängigkeiten ist auch die Tatsache, dass beim Durchgang einer Hochwasserwelle durch das Ästuar beim gleichen Oberwasserwert auf der Anstiegsflanke ganz andere Schwebstoffverhältnisse anzutreffen sind als auf der Abstiegsflanke.

3.4 Saisonale Effekte im Schwebstoffregime des Elbe-Ästuars

Unabhängig vom Oberwasser findet man in den Herbst- und Wintermonaten höhere Schwebstoffgehalte im Ästuar als in den Sommermonaten. Mögliche Ursachen hierfür sind die höhere Viskosität des Wassers bei niedrigeren Temperaturen und damit kleinere Sinkgeschwindigkeiten des Schwebstoffs und der verstärkte Eintrag von abgestorbenem organischem Material (Blätter) im Herbst. In Abbildung 3.11 wurden die Längsprofile in vier saisonale Klassen verteilt. Die höchsten Konzentrationen treten demnach in den ersten drei Monaten des hydrologischen Jahres auf. In den folgenden drei Monaten geht die Konzentration im landseitigen Bereich der Trübungszone leicht zurück und die Variabilität wird maximal. In dieser Jahreszeit finden die meisten Hochwasserereignisse statt. Von Mai bis Juni erreichen die Konzentrationen ein Minimum (auch die Variabilität geht zurück) und steigen dann im Spätsommer und Herbst wieder langsam an. Ein jahreszeitlicher ähnlicher Verlauf zeigt sich auch in Langzeitmessungen des Schwebstoffs an festen Stationen (Abb. 3.15).

Abb. 3.11:
Saisonale Verteilung von Schwebstoff- und Salzgehalt in der Tide-Elbe. (Daten: Hubschrauberlängsprofile ARGE ELBE).



3.5 Das Feststoffregime der Tide-Elbe während Hochwasserereignissen

Der gewichtigste Einflussfaktor auf das Schwebstoffregime der Tide-Elbe ist der Süßwasserzufluss aus dem Einzugsgebiet, gekennzeichnet durch den bei Neu-Darchau gemessenen Abfluss, das sogenannte Oberwasser. Das Oberwasser steuert die Stärke der Dichtezirkulation und damit Lage und Stärke der Trübungszone sowie den Eintrag von Elbe-Schwebstoff in die Deutsche Bucht. Es gibt nur wenige detaillierte Messungen der Auswirkungen einer plötzlichen Veränderung des Oberwassers (sog. Hochwasserwelle) im Längsschnitt der Elbe. Eine erste Messkampagne wurde im Dezember 1989/Januar 1990 zur Untersuchung

der Auswirkungen von Hochwasserwellen auf das Sedimentinventar des Stauraums hinter dem Wehr Geesthacht durchgeführt (Puls et al. 1991). Die von Christiansen und anderen (1987) aufgestellte Hypothese, dass die bei einer Hochwasserwelle in der Stauhaltung erodierten und über das Wehr transportierten Schwebstoffe relativ hohe Sinkgeschwindigkeiten haben und deshalb „auf dem weiteren Weg stromab ... vergleichbar mit fluid mud“ nur relativ langsam transportiert werden können, konnte dabei nicht bestätigt werden. Der Oberwasserabfluss war nicht groß genug, um in der Stauhaltung Erosion auszulösen. Eine zweite Mess-Aktion fand im Frühjahr 1992 entlang einer Reihe von Stationen zwischen Magdeburg und Glückstadt statt. Zufälligerweise war während dieser Zeit auch eine zweitägige GKSS-Messkampagne auf dem Querschnitt Bielenberg (Elbe-km 669) angesetzt, so dass erstmalig die Auswirkungen einer Hochwasserwelle auf die Vertikal- und Querverteilung des Schwebstoffs im Ästuar beobachtet werden konnten.

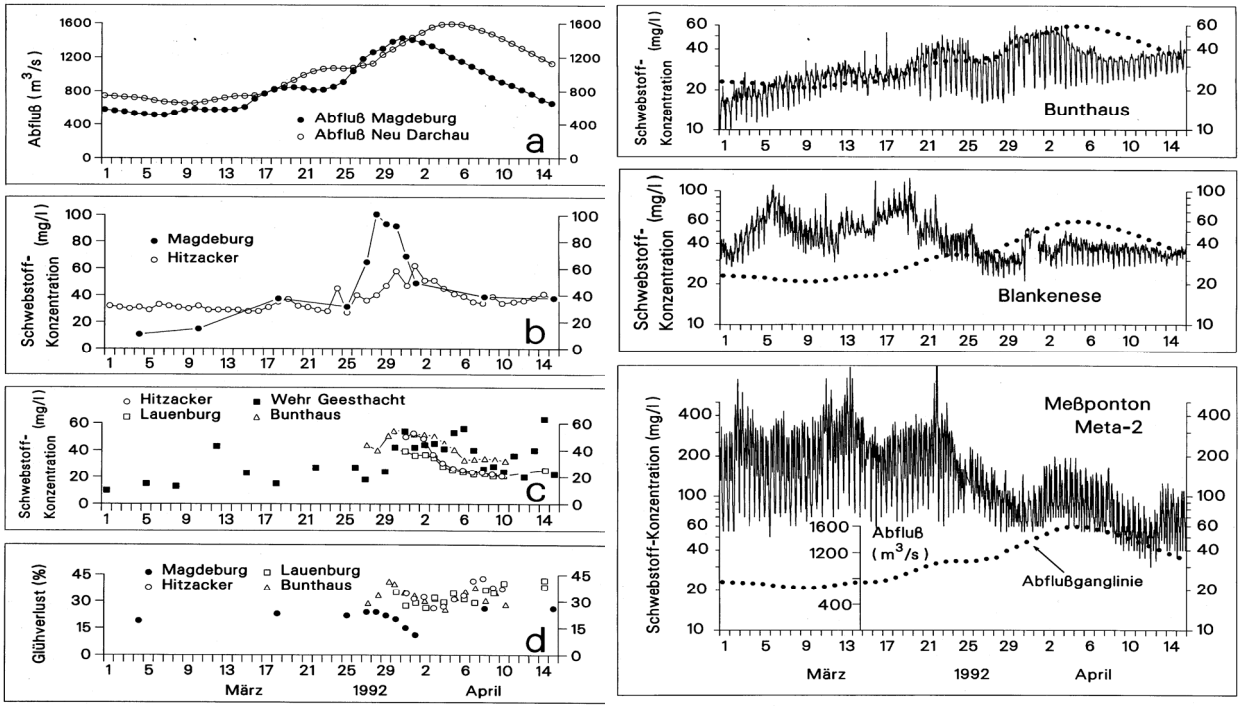


Abb. 3.12: Zeitliches Verhalten von Wasserführung, Schwebstoffkonzentration und Glühverlust zwischen Magdeburg und der Brackwassergrenze der Elbe (Messponton Meta 2, Bielenberg, Elbe-km 669) im März – April 1992 (Aus Puls et al. (1995)).

Bekannt ist auch von anderen Flüssen, dass bei einer erhöhten Wasserführung die höchsten Schwebstoffkonzentrationen in den meisten Fällen einige Tage vor dem Hochwasserscheitel auftreten. Die Erhöhung der Konzentration ist im betrachteten Abschnitt der Mittelelbe hauptsächlich auf die Aufnahme von Sedimenten an der Fluss-Sohle und durch Erosion der Ufer und weniger auf einen vermehrten Boden- bzw. Flächenabtrag von Landboden zurückzuführen. Im Abschnitt zwischen Lauenburg und dem Wehr Geesthacht (Abb. 3.12) zeigen die zwischen dem 31. März und dem 7. April 1992 in Geesthacht beobachteten höheren Konzentrationen, dass Feinsediment in der Stauhaltung erodiert wurde (ca. 17.000 t oder 3 % der Jahresfracht bei Hitzacker). Zwischen dem Wehr und der Station Bunthaus am Eingang des Hamburger Stromspaltungsgebietes wird Schwebstoff weder abgelagert noch erodiert. Die Station Blankenese befand sich vor der Hochwasserwelle am limnischen Rand der Trübungszone. Als Folge des erhöhten Abflusses nimmt die Konzentration bei Blankenese ab, d.h. die Trübungszone wird durch den erhöhten Abfluss Richtung Nordsee gedrückt. Ab dem 1. April ist bei Blankenese das gleiche Schwebstoff-Regime wie bei Bunthaus und Geesthacht anzutreffen, d h. das vorher nur bis zum Hamburger Hafen reichende Schwebstoff-Regime der Mittelelbe reicht jetzt über den Hafen stromab hinaus.

Im zentralen Ästuar auf dem Querschnitt Bielenberg konnte das Hochwasserereignis sowohl auf dem dort für Langzeitmessungen verankerten Ponton META 2 als auch vom dort vom 23. bis 25. März operierenden Mess-Schiff LUDWIG PRANDTL beobachtet werden. Abbildung 3.13 zeigt die rapide seewärtige Verlagerung der Trübungszone, die sich in zurückgehenden Schwebstoffkonzentrationen äußert. Während nur 2 Tideperioden verschwinden außerdem die für stationäre Verhältnisse typischen Muster der Schwebstoffverteilung in der Wassersäule.

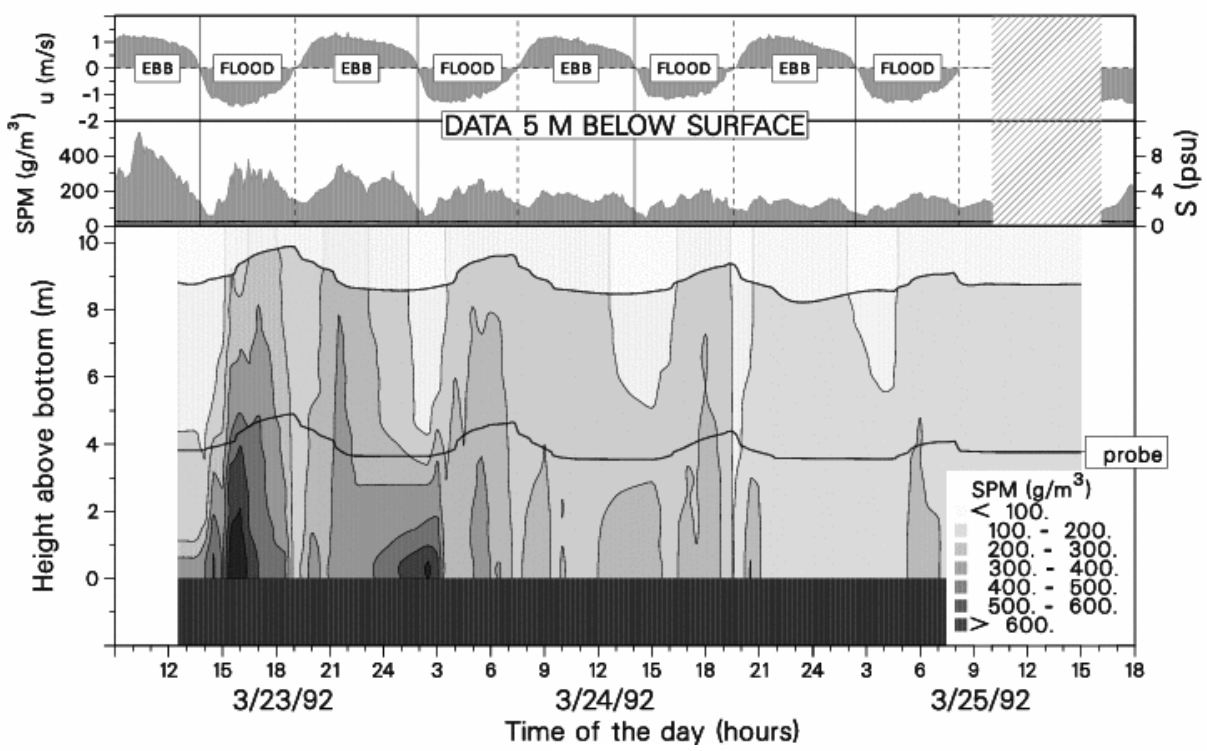


Abb. 3.13: Auswirkungen des Frühjahrshochwassers 1992 bei Bielenberg (Elbe-km 669) am Ende des ästuarinen Süsswasserbereichs. Zeitreihen von Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration 5 m unter der Oberfläche (obere Grafik) und Schwebstoffverteilung in der Wassersäule (untere Grafik) über 4 Tiden (Messungen vom Ponton META 2).

Dieses zeigt sich auch bei der Konzentrationsverteilung im Querprofil (Abb. 3.14). Nur die Konzentrationen am rechten (nördlichen) Flussufer sind vergleichsweise gering verändert, da die Elbe in diesem Abschnitt eine Rechtskurve durchläuft und somit der Prallhang am linken Ufer liegt.

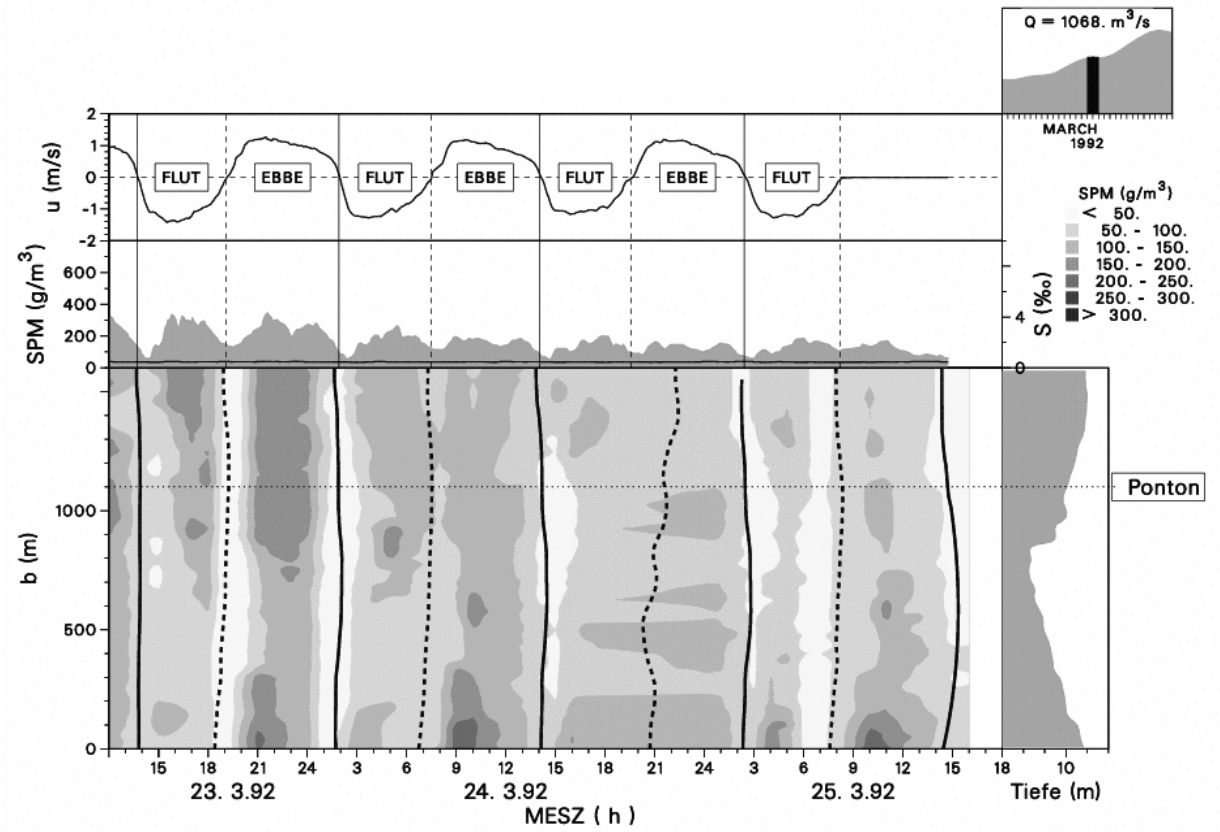


Abb. 3.14: Auswirkungen des Frühjahrshochwassers 1992 im Elbequerschnitt bei Bielenberg (Elbe-km 669) am Ende des ästuarinen Süßwasserbereichs. Zeitreihen von Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration in 5 m Tiefe stationär (mittlere Grafik) und 1,5 m unter der Oberfläche im Elbe-Querschnitt aus Messungen vom Ausleger des Messschiffs LUDWIG PRANDTL (untere Grafik) über 4 Tiden. Die kleine Grafik rechts oben zeigt den Verlauf des Oberwassers bei Neu-Darchau während der Messungen.

Die Langzeitauswirkungen der Oberwasserwellen zeigen sich im Jahresgang des Schwebstoffgehaltes bei Bielenberg in Abbildung 3.15. Vergleichbare Konzentrationen wie vor der Abfluss-Welle stellen sich erst Ende Oktober wieder ein, obwohl (wie der Salzgehalt zeigt) schon ab Mai Wasser aus stromab gelegenen Abschnitten die Mess-Position erreicht. Die Trübungszone kommt bei zurückgehendem Oberwasser nicht einfach zurück, sondern muss über Monate neu aufgebaut werden.

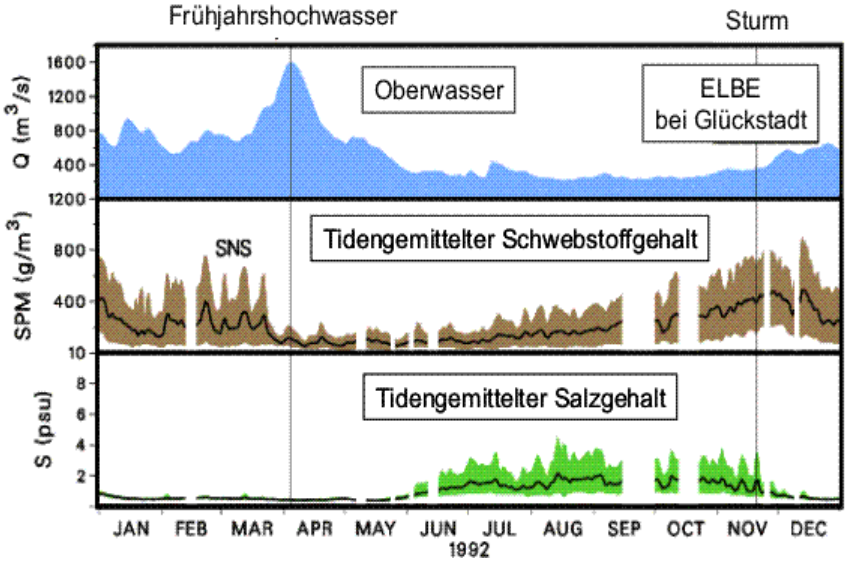


Abb. 3.15: Jahresgang von Oberwasser, Schwebstoff- und Salzgehalt in 5 m Wassertiefe am Beginn des Brackwasserbereichs bei Bielenberg (Elbe-km 669). Dargestellt sind Tidemittelwerte (schwarze Linien) und Variationsbereiche zwischen Minimum und Maximum (farbige Bänder). Erkennbar sind neben dem Frühjahrshochwasser im März, April die Auswirkungen des Spring-Nipp-Zyklus (SNS) und eines Sturms im November.

3.6 Einflüsse der Gezeiten auf den Feststofftransport im Elbe-Ästuar

In der Elbe, wie in vielen anderen Ästuaren, sind die Gezeiten die Hauptenergiequelle für die turbulenten Mischungsprozesse, für die Erosion und Resuspension von Sediment und für den Sedimenttransport. Die Gezeiten dringen als Welle von See her in das Elbe-Ästuar vor. Der Elbabschnitt zwischen Cuxhaven und Hamburg entspricht dabei ungefähr einem Viertel einer Tidenwellenlänge. Die periodische Veränderung des Wasserstandes durch die Gezeiten führt zu horizontalen Gezeitenströmungen, deren Stärke sich längs des Ästuars ändert. Die Gezeiten haben ihre Ursache in der Astronomie des Zweikörpersystems Erde/Mond, dem sich noch die Anziehungskraft der Sonne und – in weit geringerem Maße – die der anderen Planeten überlagert. Die globalen Gezeiten regen Schwingungen in den Schelfmeeren an, so auch in der Nordsee, die wiederum Schwingungen induzieren, die sich aus den speziellen geometrischen Verhältnissen des Elbe-Ästuars ergeben.

Die Gezeiten beeinflussen die Sedimentdynamik durch drei fundamentale Prozesse:

- Die Deformation der Tidewelle entlang des Ästuars durch die Bathymetrie,
- Wechselwirkungen zwischen den Gezeitenströmungen und dem Flussbett,
- Periodische Änderungen der Gezeitenströme.

3.6.1 Die Deformation der Tidewelle im Ästuar

Im Ozean ist die Tidewelle eine harmonische, fortschreitende Sinuswelle mit einer Periode von 12 Stunden und 25 Minuten. Diese Tidewelle wird durch die gravitativen Kräfte des Mondes erzeugt; sie wird mit M_2 bezeichnet. Ebb- und Flutphase sind von gleicher Dauer, die Gezeitenströmungen sind maximal bei Hoch- und Niedrigwasser und sie verursachen keinen Reststrom. Wenn diese Gezeitenwellen in ein Ästuar eindringen, werden sie verformt und verursachen dadurch einen land- oder seewärtigen Transport. Salomon und Allen (1983) unterscheiden drei Hauptprozesse, die die Tidewelle im Ästuar beeinflussen:

1. Dissipative Dämpfung durch Bodenreibung,
2. Konvergenz durch landseitige Verengung des Ästuarquerschnittes,
3. Reflektion an Untiefen und am Ende des Ästuars (Wehr).

Die Bodenreibung führt zur Dissipation der Energie der Tidewelle, so dass ihre Amplitude stromauf exponentiell abnimmt. Die Abnahme des Tidenhubs und der Gezeitenströmungen führt dann tendenziell zur Ansammlung und Deposition von Feststoffen im oberen Ästuar. Die Dissipation führt ferner zu Asymmetrien im zeitlichen Verlauf der Gezeiten. Da im Ästuar der Tidenhub von der gleichen Größenordnung wie die Wassertiefe ist, breitet sich die Tidewelle als Flachwasserwelle mit der Wellengeschwindigkeit

$$c = (g(h+z))^{0.5}$$

aus (g = Gravitationsbeschleunigung, h = Wassertiefe in bezug auf NN, z = lokale Amplitude der Tidewelle). Daraus ergibt sich, dass sich das Tidehochwasser schneller als das Tideniedrigwasser ausbreitet. Dieser Effekt deformiert die Tidewelle mit dem Ergebnis einer Verkürzung der Flut- und einer Verlängerung der Ebbdauer (Abb. 3.16). Da hierdurch auch die Steilheit des Anstiegs des Wasserstandes größer wird und sich die Steilheit des Abfalls zum Niedrigwasser verringert, ergeben sich höhere Flut- und geringere Ebbströmungen. Die höheren Flutströme führen zu längeren Intervallen des Überschreitens kritischer Schubspannungen („threshold“ in Abb. 3.16) für Bodenerosion und einem gegenüber der Ebbe verstärkten Schwebstofftransport und damit zu stromauf gerichtetem residuellem Sedimenttransport („tidal pumping").

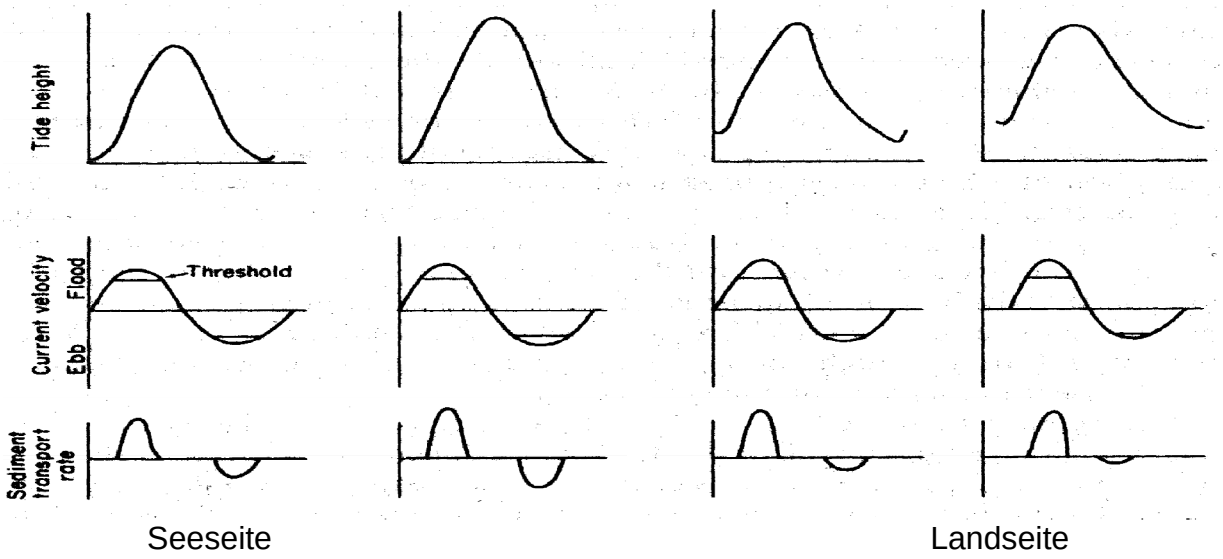


Abb. 3.16: Verformung der Tidewelle im Ästuar und daraus resultierender Feststofftransport. Nach Salomon & Allen (1983).

Der Abnahme der Amplitude der Tidewelle im Ästuar durch die Bodenreibung wirkt die Abnahme des Ästuarquerschnitts, die zu einer lokalen Energiekonzentration führen kann, entgegen. Salomon und Allen (1983) unterscheiden danach drei Ästuartypen :

a. Hypersynchrone Ästuare: Der Energiegewinn durch Konvergenz überwiegt den Verlust durch Reibung. Der Tidenhub steigt von der Mündung stromauf zunächst an und sinkt dann nach Durchlaufen eines Maximums landwärts.
b. Synchrone Ästuare: Konvergenz und Reibung halten sich die Waage. Der Tidenhub ist längs des Ästuars konstant, bevor er landwärts abnimmt.
c. Hyposynchrone Ästuare: Die Reibung überwiegt die Konvergenz. Der Tidenhub längs des Ästuars nimmt kontinuierlich ab.

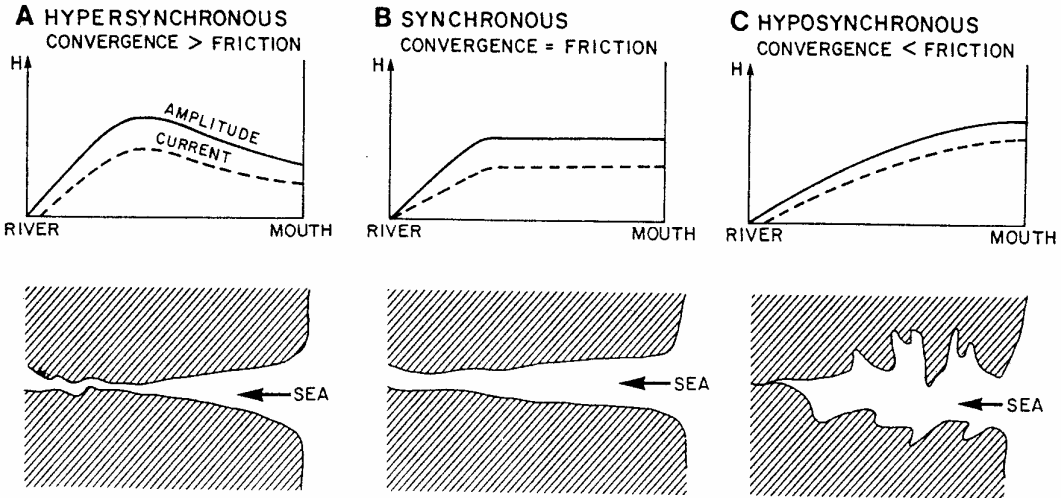
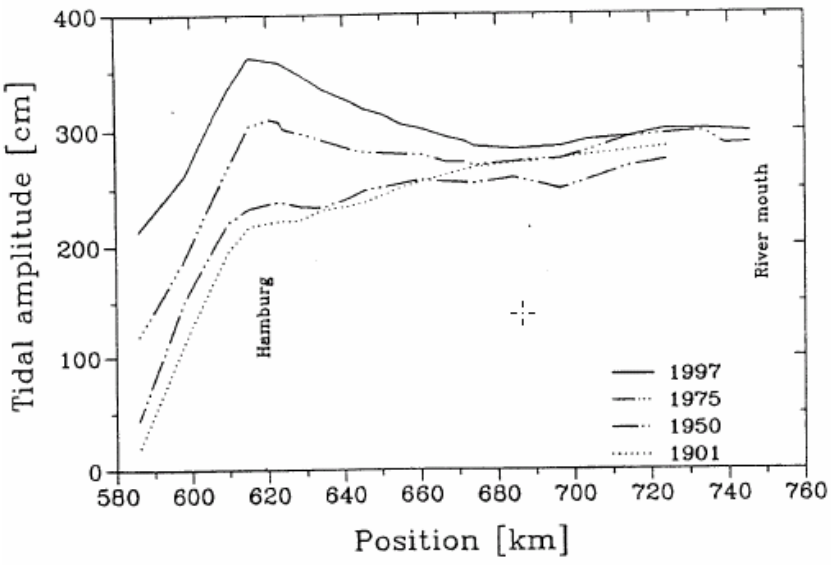


Abb. 3.17: Verlauf des Tidenhubs im Ästuar für verschiedene Werte des Verhältnisses von Konvergenz und Bodenreibung. Nach Salomon & Allen (1983).

Die Elbe ist wie die meisten Ästuare vom hypersynchronen Typ mit einem Maximum des Tidenhubs in Hamburg (Abb. 3.18).

Abb. 3.18:

Verlauf des Tidenhubs entlang des Elbe-Ästuars. Durch Strombau- und Hochwasserschutzmaßnahmen wandelte sich der Charakter des Ästuars vom hyposynchronen (1901) zum hypersynchronen Typ. Aus Eichweber & Lange (1998).



3.6.2 Stehende Gezeitenwellen und Obertiden

Die Reflektion der fortschreitenden Tidewelle an Untiefen, Ufern und am Ende (Kopf) des Ästuars kann deren Amplitude verstärken, während sich ihr Charakter von einer fortschreitenden zu einer stehenden Welle verändert. An die Stelle der Fortbewegung tritt dann eine stationäre Wellenform entlang des Ästuars, durch die das Wasser hindurchfließt. Im Gegensatz zur fortschreitenden Welle verschwinden dann die Gezeitenströmungen bei Hoch- und Niedrigwasser. Eine stehende Welle kann im Ästuar durch Reflektion nur dann entstehen, wenn die Entfernung von der Mündung bis zur Stelle der Reflektion ein ungeradzahliges Vielfaches von einem Viertel der Tidewellenlänge ist.

Durch Wechselwirkung mit der Bathymetrie werden im Ästuar zusätzlich Oberschwingungen der einlaufenden M_2-Welle angeregt, die auch als Partialtiden bezeichnet werden. Auch diese kürzerperiodischen Wellen können bei Erfüllung der Reflektionsbedingung den Charakter stehender Wellen annehmen. In der Elbe wie in den meisten Ästuaren existieren mehrere Orte, an denen die Tidewelle reflektiert wird. Auch ist die Reflektionsbedingung für die M_2 und ihre Obertiden nicht genau erfüllt, so dass sich eine Überlagerung von stehenden und fortschreitenden Wellen ausbildet. Eichweber und Lange (1998) konnten unter vereinfachten geometrischen Annahmen zeigen, dass die Lage der Hauptbaggerstellen im Elbe-Ästuar mit den Positionen der Knoten der ungeradzahligen Obertiden der M_2-Gezeit (M_6, M_{10}, ...) übereinstimmt, wenn man eine Reflektion der Tidewellen bei Elbe-km 622 annimmt (Abb. 3.19). Tatsächlich findet man in diesem Bereich eine Stufe im Tiefenprofil (Abb. 3.20).

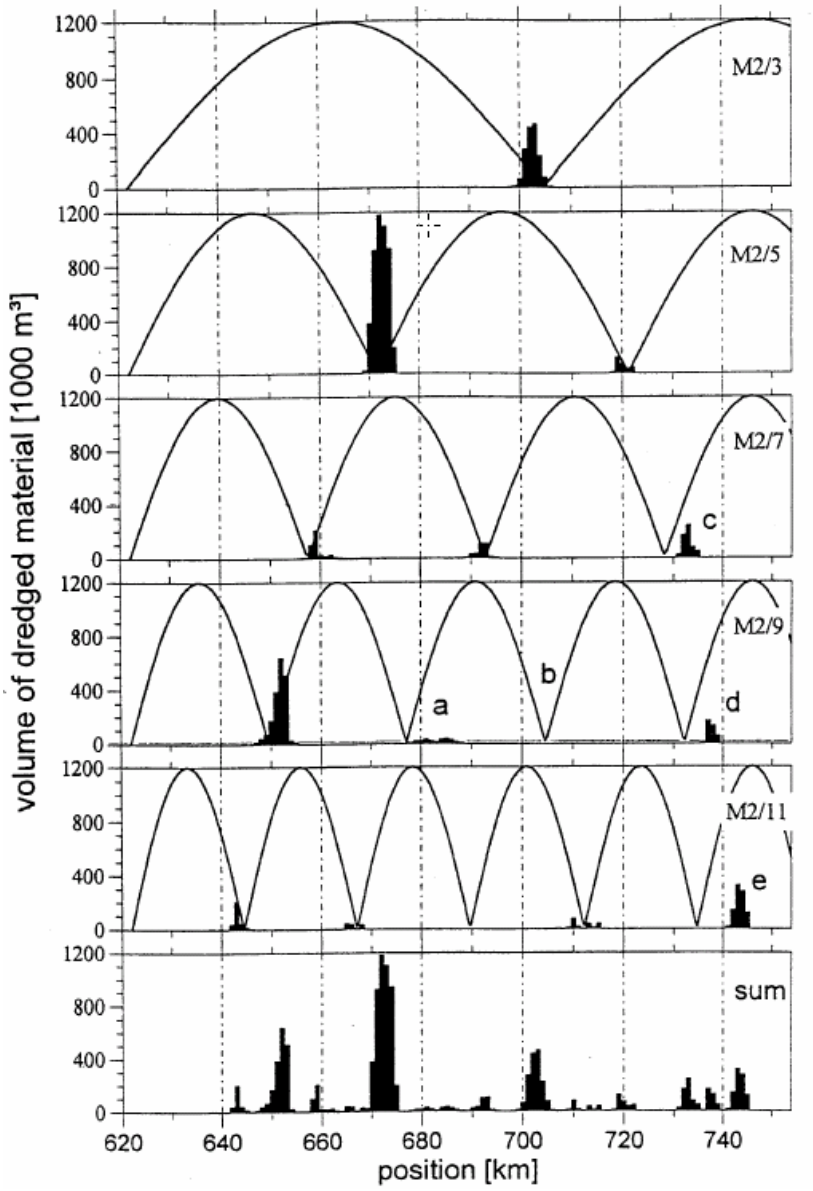


Abb. 3.19: Baggermengen und Knoten der stehenden Obertidenwellen der Strömungsgeschwindigkeit im Elbe- Ästuar, unter Annahme einer konstanten Wellengeschwindigkeit und Reflektion der einlaufenden Tidewelle bei Elbe-km 622 (Alter Elbtunnel). Aus Eichweber & Lange (1998).

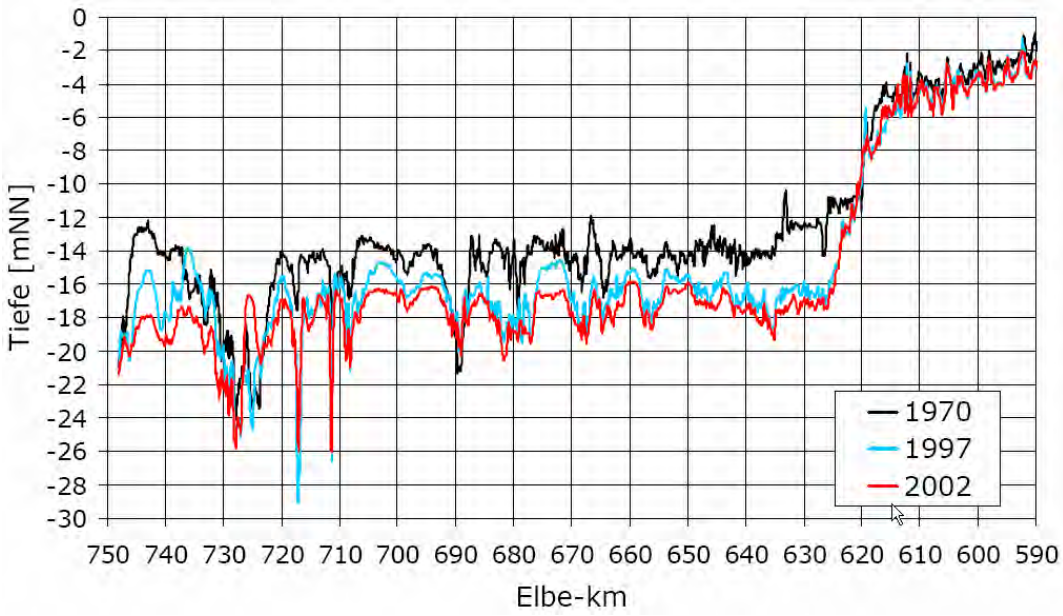


Abb. 3.20: Tiefen entlang des Elbe-Ästuars in Fahrrinnenmitte. Aus Sohrmann (2006).

Interessant ist in diesem Zusammenhang das Maximum der Baggermengen bei Elbe-km 670 (Rhinplatte), das mit einem Knoten der M_{10}-Obertide zusammenfällt. Es korrespondiert mit dem oben diskutierten zweiten lokalen Maximum der Trübungs-zone, das sich bemerkenswert lagestabil bei Änderungen des Oberwassers verhält. Auch numerische Simulationen mit einem Lagrangeschen Schwebstofftransportmodell zeigen eine Aufkonzentration von Schwebstoff in diesem Bereich (Rolinski & Eichweber, 2000). Die Tatsache, dass seit dem Jahr 2000 die Baggermengen bei der Rhinplatte drastisch zurückgegangen sind, ohne dass die Geometrie der Unterelbe im Längsschnitt wesentlich verändert wurde, zeigt dass noch andere Prozesse an der Bildung, der Aufrechterhaltung und dem Verschwinden solcher Sedimentsenken beteiligt sind.

3.6.3 Periodische Änderungen der Gezeitenströme und Tide-Asymmetrien

Wie schon oben erwähnt, wird die Tidewelle im Ästuar verformt, so dass Ebb- und Flutströmungen von ungleicher Stärke, Dauer und Symmetrie sind. Daraus ergeben sich Restströme, die stromauf oder stromab gerichtet sein können. Obwohl sich ein Wasserteilchen mit den Gezeitenströmungen hin- und herbewegt, erreicht es nach einer Tideperiode im Allgemeinen nicht wieder den Ausgangsort. Das kann durch eine Reihe verschiedener Prozesse geschehen:

1. Kenterpunkts-Asymmetrie:

Die aus der Verformung der Tidewelle resultierende Asymmetrie zwischen Ebb- und Flutströmungen begünstigt in der Regel den Stromauftransport, wenn die Dauer des Stauwassers am Ende der Flut länger ist als die am Ende der Ebbe (Abb. 3.21). Die lange Stauwasserzeit am Ende der Flut begünstigt das Absetzen von Schwebstoff aus der Wassersäule. Am Ende der Ebbe steigt die Strömung schneller an und es bleibt mehr Schwebstoff in Suspension, der mit dem Einsetzen der Flut dann stromauf transportiert werden kann. Auch beobachtet man während des Kenterpunktes der Flut eine kleine sohlwärts gerichtete Vertikalkomponente der Strömung, beim Kenterpunkt der Ebbe eine nach oben gerichtete Strömung, die in geringem Maß aber im gleichen Sinne zur Kenterpunktsasymmetrie beitragen.

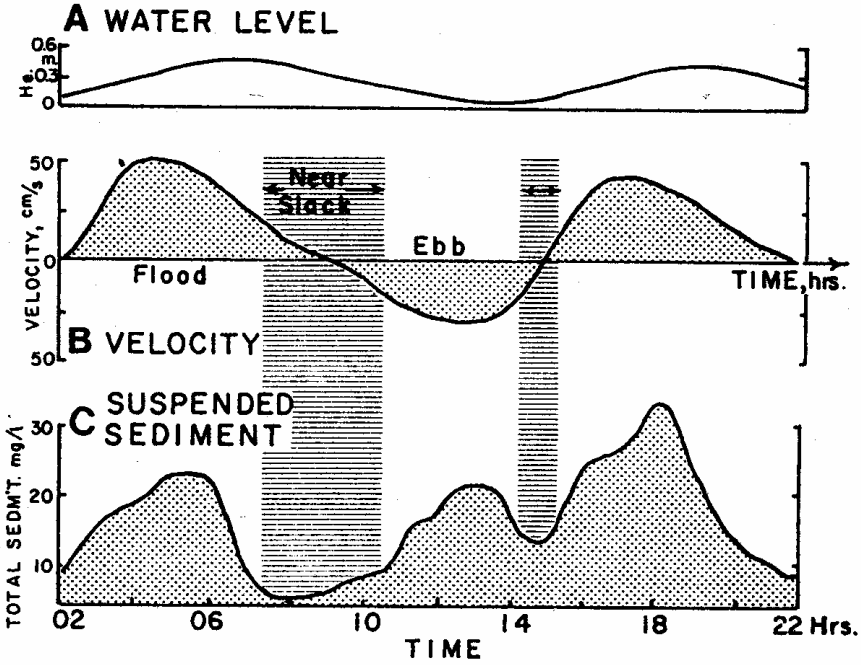


Abb. 3.21: Tideverlauf von Wasserstand (A), Strömung (B) und Schwebstoffkonzentration 0,5 m über der Sohle (C) im oberen Ästuar. Nach Nichols & Poor (1967).

2. Asymmetrie zwischen Ebb- und Flutstrom:

Der Stromauftransport durch die Kenterpunktsasymmetrie wird durch die höheren Flutstromgeschwindigkeiten noch verstärkt. Da die für die Erosion von Sediment verantwortliche Bodenschubspannung quadratisch von der Strömung abhängt, wird die Dominanz des Flutstroms für den Sedimenttransport weiter verstärkt.

3. Asymmetrie von Deposition und Erosion (settling lag, scour lag):

Aus den Gründen (a) der endlichen Sinkgeschwindigkeit von Schwebstoffteilchen, (b) der Existenz einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit für Erosion und Deposition (gestrichelte horizontale Linie in Abb. 3.22) und (c) der Abnahme der Amplitude der Strömungsgeschwindigkeit zum Kopf des Ästuars hin, ergibt sich ein weiterer Mechanismus des Stromauftransportes von Sediment:

Settling lag: Die Abbildung 3.22 zeigt die Geschwindigkeit, mit der sich verschiedene Wasserteilchen im Verlauf der Tide längs des Ästuars von der Mündung (links) zur Gezeitengrenze (rechts) bewegen. Obwohl von einer symmetrischen Gezeitenströmung an jedem Punkt im Ästuar ausgegangen wird, verringert sich deren Amplitude von der Mündung zur Tidegrenze gemäß des Verlaufs der Tangente P. Dadurch ergeben sich Asymmetrien bei der Bewegung von Schwebstoffteilchen mit der Strömung: Ein Teilchen, das an der Position 1 bei einem kritischen Wert der Flutströmung (2) erodiert wird, bewegt sich dann stromauf in einem Wasserkörper, der beim vorhergehenden Kenterpunkt bei Position A gestartet war. Fällt die Flutstromgeschwindigkeit wieder unter den kritischen Wert (2), so beginnt das Teilchen bei noch laufendem Flutstrom zu sinken. Es erreicht die Sohle bei Position 5, während das Wasser noch mit der Geschwindigkeit (4) strömt.

Scour lag: Nach Strömungskenterung kann die ursprünglich bei A gestartete Wassermasse das Teichen nicht wieder resuspendieren, da sie sich an der Position 5 nur mit der Geschwindigkeit (4) bewegt. Das Teilchen wird dann durch eine am Flut-kenterpunkt weiter stromauf bei B' gestartete Wassermasse erodiert und in ihr stromab nach Position B transportiert. Bei Erreichen der kritischen Geschwindigkeit am Punkt 7 beginnt es wiederum zu sinken und erreicht die Sohle bei Position 9. Während einer Tide hat sich das Schwebstoffteilchen damit von Position 1 nach 9 stromauf bewegt.

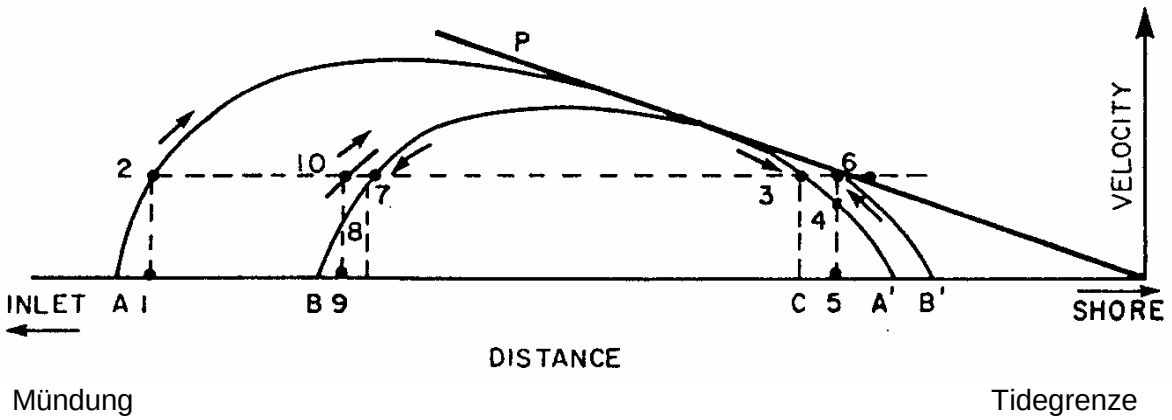


Abb. 3.22: Stromauftransport von Feststoff durch Settling lag und Scour lag. Nach Van Straaten & Kuenen (1959).

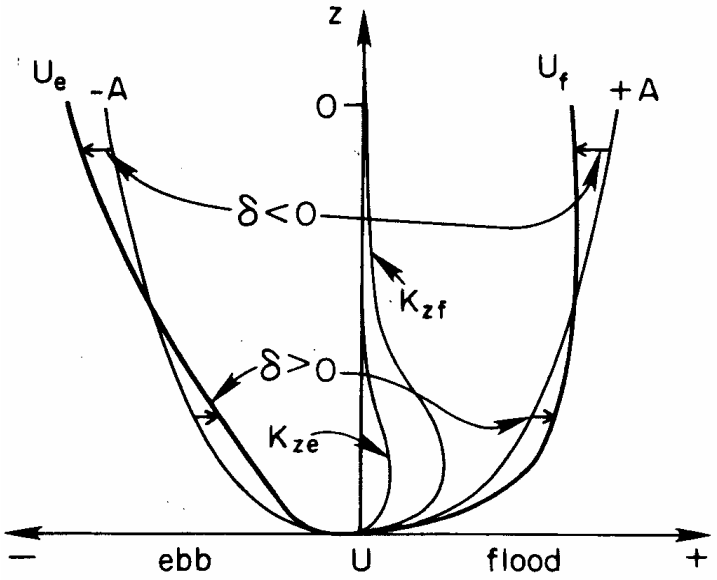
4. Interne Gezeitenasymmetrie

Der Dichteunterschied von Salz- und Süßwasser längs des Ästuars führt neben der schon im Vorhergehenden diskutierten bodennahen Dichteströmung (ästuarine Zirkulation) zu einer unterschiedlichen turbulenten Durchmischung der Wassersäule während der Ebb- und Flutphase. Die Durchmischung wird dabei durch die Größe des tiefenabhängigen vertikalen Austauschkoeffizienten K_z quantifiziert. Dieser Koeffizient beschreibt nicht nur den vertikalen

Austausch von Wasserinhaltsstoffen sondern auch den von Impuls, was sich direkt auf das Vertikalprofil der Strömung auswirkt (Abb. 3.23). Die höhere Turbulenz im Flutstrom führt zu einer besseren Durchmischung der Wassersäule und zu einem homogenen Profil der Strömung, eine geringere Durchmischung bei Ebbstrom verstärkt den vertikalen Gradienten der Strömung. Im Tidenmittel resultiert dabei dann wie bei der ästuarinen Zirkulation ein bodennaher stromauf gerichteter Reststrom, der in der oberen Wassersäule von einem stromab gerichteten Reststrom kompensiert wird. Diese erstmals von Jay und Musiak (1994) beschriebene Gezeitenasymmetrie des vertikalen Strömungsprofils wird von Burchardt und Baumert (1998) anhand von Modelluntersuchungen als primärer Mechanismus der Bildung von Trübungszonen angeführt.

Abb. 3.23:

Schematische Darstellung der internen Gezeitenasymmetrie. U_e und U_f zeigen die tatsächlichen Vertikalprofile der Strömung bei voll ausgeprägtem Ebb- bzw. Flutstrom, gegenüber den Vertikalprofilen einer symmetrischen Gezeitenströmung (A). Die kombinierte Wirkung des horizontalen Dichtegradienten und der Dehnung bzw. Stauchung des Dichtefeldes durch die Gezeitenströmung führt zur vertikalen Homogenität des Flutstroms. Die Behinderung des vertikalen Impulsaustausches, wie sie sich im unterschiedlichen Vertikalprofil der Austauschkoeffizienten (K_{zf} und K_{ze}) ausdrückt, führt zur Intensivierung der oberflächennahen Ebbströmung. Daraus resultiert eine interne Gezeitenasymmetrie der Strömung (δ), die in Bodennähe einen stromauf, an der Oberfläche einen stromab gerichteten Reststrom erzeugt. Im Vertikalmittel addieren sich diese Restströme zu Null. Aus Jay & Musiak (1994).



3.6.4 Messungen der gezeitenbedingten Sedimentdynamik im Elbe-Ästuar

Im Elbe-Ästuar überlagern sich die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Prozesse, welche sich als Auswirkungen der Gezeiten erklären lassen, so dass man ihren jeweiligen Anteil nicht quantifizieren kann. Zum Teil zeigen sich in Messungen auch Ergebnisse, die mit den einfachen konzeptionellen Prozessmodellen nicht in Übereinstimmung stehen.

In Abbildung 3.24 sind exemplarisch vier Episoden aus den Dauermessungen dargestellt, die im Jahr 1992 unter einem Ponton an der Brackwassergrenze bei Bielenberg (Elbe-km 669) durchgeführt wurden. Diese Messungen wurden in anderem Zusammenhang schon weiter oben (Abb. 3.15) diskutiert. Im oberen Teil der vier Einzelabbildungen ist der Verlauf der Strömung in Elbelängsrichtung (Ebbe positiv, Flut negativ) dargestellt, darunter Salz- und Schwebstoffgehalt. Die Kenterpunkte sind durch vertikale Linien (Flutkenterpunkt punktiert, Ebbekenterpunkt durchgezogen) markiert.

Obwohl in der Strömung eine Kenterpunkts-Asymmetrie im Sinne von Abbildung 3.21 zu allen Zeiten erkennbar ist, zeigt der Verlauf der Schwebstoffkonzentration durchaus Unterschiede zu der in Abbildung 3.21. Während der ersten Episode Anfang März (vor dem Frühjahrshochwasser) zeigt sich bei reinen Süßwasserbedingungen eine symmetrische Schwebstoffverteilung im Tideverlauf. Die Maximalwerte der Schwebstoffkonzentration während der Ebbe sind gleich hoch wie während der Flut, doch beim Ebbekenterpunkt werden

geringere Konzentrationen als beim Flutkenterpunkt gemessen. Dies steht im Gegensatz zu Abbildung 3.21, obwohl hier Messungen unter einem schwimmenden Ponton gezeigt werden, der sich am Ende der Flut in größerem Abstand zum Boden und damit in tendenziell schwebstoffärmerem Wasser befindet als am Ende der Ebbe.

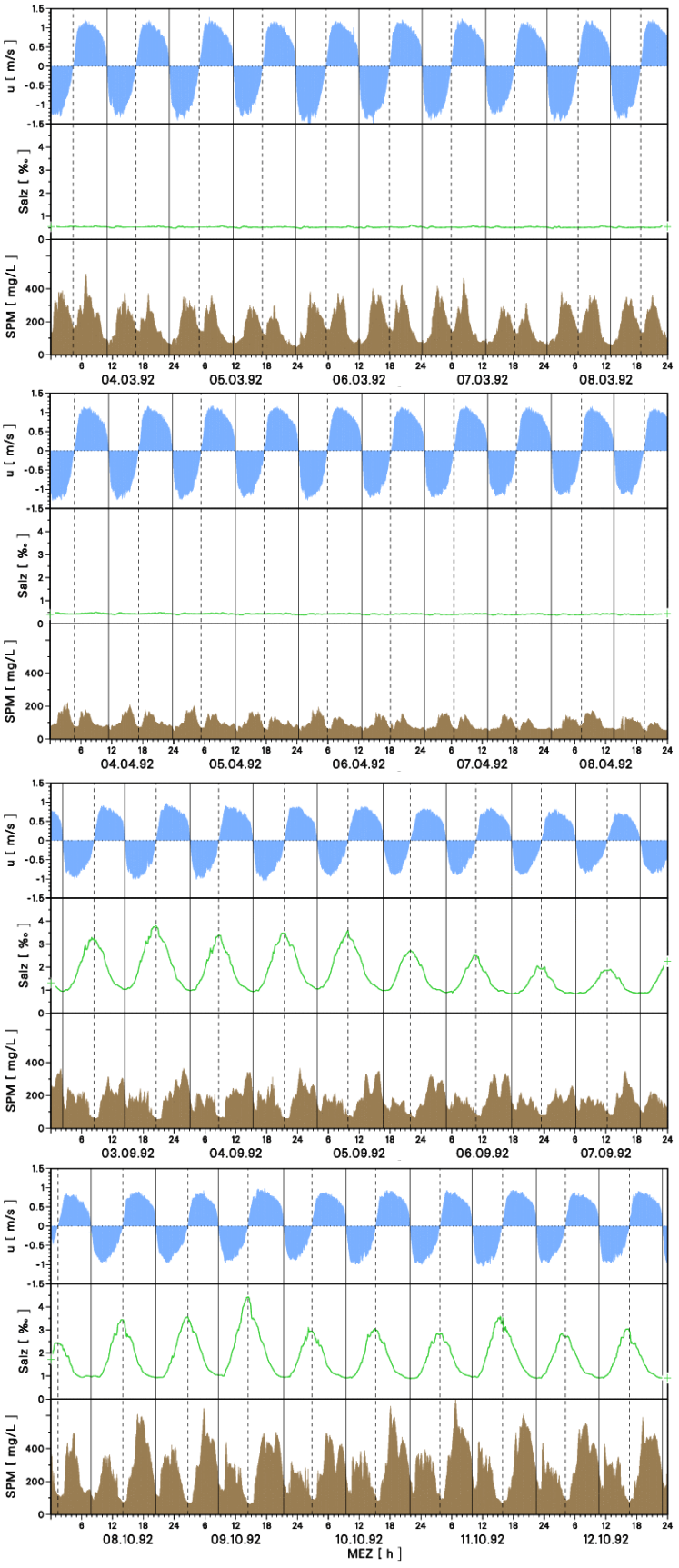
Während der zweiten Episode Anfang April (nach Durchgang der Oberwasserwelle) zeigt sich eine tidesymmetrische Schwebstoffverteilung auf weit niedrigerem Niveau, mit vergleichbaren Konzentrationen während der Ebbe- und Flutkenterpunkte.

Während der dritten Episode Anfang September zeigt sich zu den Kenterpunkten das nach Abbildung 3.21 zu erwartende Bild, aber der Verlauf der Schwebstoffkonzentration während der Tide ist (bei vergleichbaren Maximalkonzentrationen) völlig verschieden von dem im Frühjahr. Die maximalen Konzentrationen treten bei schon deutlich zurückgehender Strömung am Ende der Ebbe auf. Die Verlagerung des relativen Maximums zum Ende der Ebbe verstärkt sich noch (bei weiter ansteigenden Konzentrationen im Tidenmittel) in der Oktoberepisode. Wie übrigens an dem ausgeprägten Salinitätssignal zu erkennen ist, wurde in den Monaten September und Oktober der Oberwassereinfluss zurückgedrängt zugunsten der seeseitigen Verhältnisse.

Diese Messungen zeigen die hohe Variabilität in der Sedimentdynamik im Elbe-Ästuar. Obwohl in jeder Episode die periodische Zeitreihe der Schwebstoffkonzentration quasistationäre Verhältnisse anzeigt, verändert sich das Schwebstoffregime über längere Zeiträume hin zu anderen Gleichgewichtslagen. Hierbei überlagern sich lokale vertikale Erosions- und Depositionsvorgänge mit horizontalen Schwebstofftransporten längs des Ästuars.

Abb. 3.24:

Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit, des Salzgehaltes und der Schwebstoffkonzentration in 5 m Wassertiefe bei Bielenberg (Elbe-km 669) in 4 Episoden aus dem Jahr 1992. (GKSS, unveröffentlicht).



Längerfristige Wirkungen der Gezeiten auf das Schwebstoffregime des Elbe-Ästuars sind am ausgeprägtesten im vierzehntägigen Spring-Nipp-Zyklus zu erkennen, der durch die Überlagerung der gravitativen Wirkungen von Mond und Sonne entsteht. In Abbildung 3.25 sind beispielhaft die Spring-Nipp-Variationen in der Trübungszone der Elbe an Messungen in 5 m Wassertiefe an der Position Bielberg im Jahr 1991 dargestellt. Teilabbildung A zeigt die Beziehung zwischen dem Oberwasserabfluss (schattiert) und dem Reststrom (durchgezogene Linie). In B ist die korrespondierende Beziehung für den fluvialen Schwebstoffeintrag (schattiert) und den residuellen Schwebstofftransport (pro Quadratmeter Querschnittsfläche) an der Messposition dargestellt. Die Diagramme C bis F zeigen die Tidenmittel (schwarze Linien) und den Variationsbereich (schattiert) zwischen den Tidenextremwerten für die Variablen Strömung, Schwebstoffkonzentration, Schwebstofftransport und Salzgehalt.

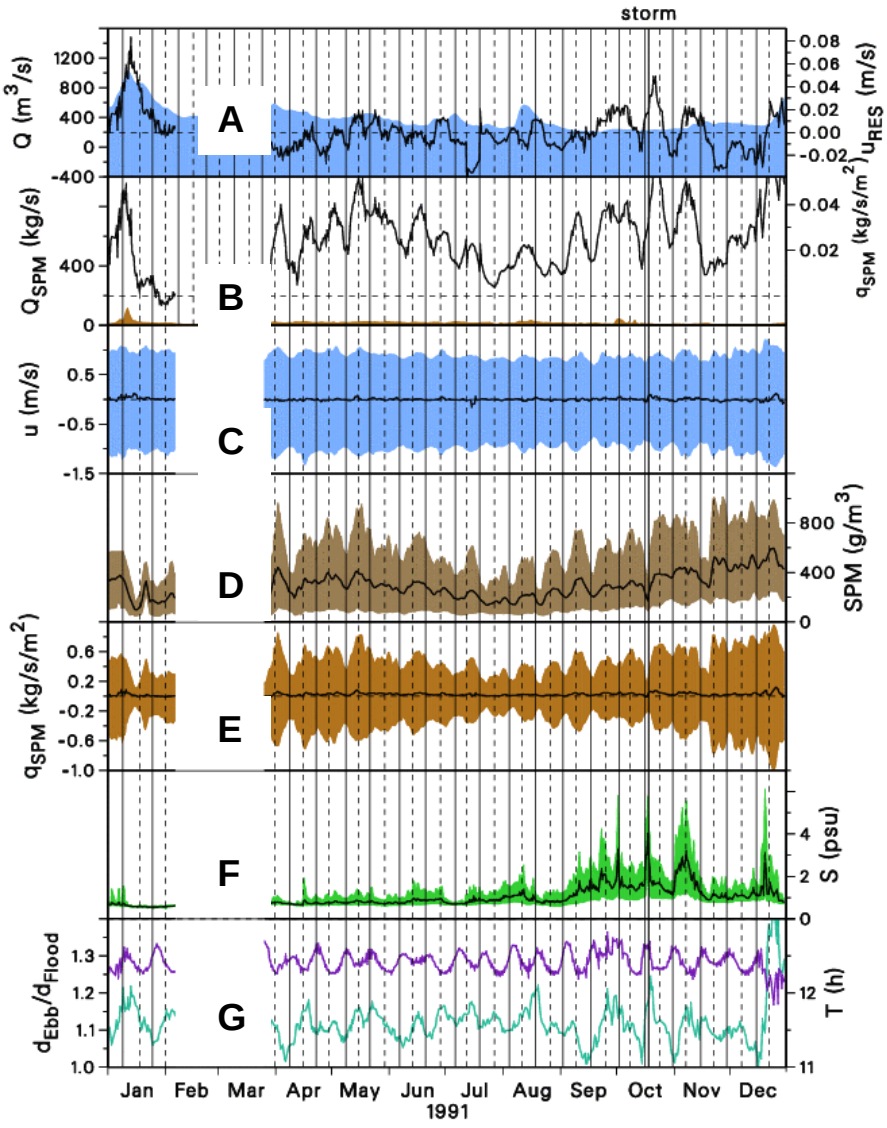


Abb. 3.25: Einfluss des vierzehntägigen Spring-Nipp-Zyklus auf die Hydrodynamik und das Schwebstoffregime an der Brackwassergrenze im Elbe-Ästuar im Jahr 1991. Vertikale Linien: Springtiden (gestrichelt) und Nipptiden (durchgezogen).

A, B: Beziehungen zwischen dem fluvialen Zustrom von Wasser und Schwebstoff und den tidengemittelten Transporten im Ästuar.

C–F: Tidenmittelwerte und Tidenextremwerte im Ästuar.

G: Variation der Tidenlänge T (obere Kurve) und des Verhältnisses Dauer von Ebbe und Flut im Ästuar. Aus Messungen in 5 m Wassertiefe bei Bielenberg (Elbe-km 669). Nach Kappenberg et al. (1996).

Im letzten Diagramm G sind die Variationen der Länge der Tide (zeitlicher Abstand aufeinanderfolgender Flutkenterpunkte) und die Veränderungen des Verhältnisses zwischen Ebb- und Flutdauer dargestellt. Im Ästuar zeigen alle Variablen einen deutlichen Einfluss des Spring-Nipp-Zyklus. Durch den erhöhten Tidehub während der Springtiden erhöhen sich auch die Gezeitenströme, es wird mehr Sediment erodiert und es bleibt auch länger in Suspension. In Kombination bewirkt dieses einen besonders verstärkten Sedimenttransport. Der Einfluss der Spring-Nipp-Variationen kann im Jahresgang durch Oberwasserwellen und Sturmereignisse überdeckt werden. Genau genommen kann man im Elbe-Ästuar nicht von einem Zyklus der Spring-Nipp-Variationen sprechen, da sich keine Spring-Nipp-Periode wiederholt.

3.7 Sandtransport im Elbe-Ästuar

Der Sandtransport im Elbe-Ästuar findet sohlnah und fast ausschließlich in Form der Bewegung von Sandwellen (Transportkörpern) unterschiedlicher Größenordnung wie Rippeln, Dünen (Riesenrippeln) und Bänken statt (Abb. 3.26).

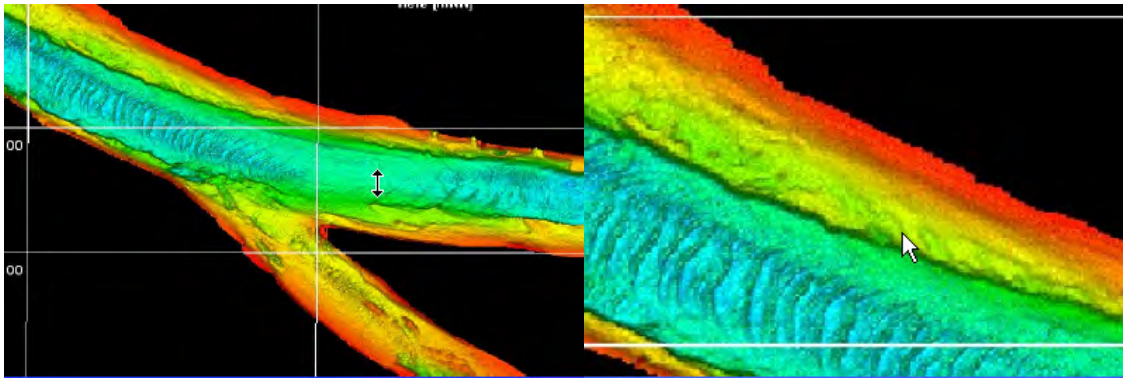


Abb. 3.26: Fächerecholotaufnahmen von Transportkörpern (Dünen, Riesenrippel) im Elbe-Ästuar bei Wedel. Aus Heyer (2006).

Rohde (1971) und Dammschneider (1983, 1985) fassen den Stand der Kenntnis zum Sandtransport in der Tide-Elbe zusammen. Zwei Materialtransportrichtungen sorgen für Sandbewegung mit insgesamt negativer Bilanz, d.h. das Elbe-Ästuar verliert insbesondere Feinsand an die Deutsche Bucht. Die stromab verlaufende Komponente ist demnach durch die Wanderung der Dünen (Länge ca. 50 m, Höhe 2–3 m) bedingt. Dammschneider (1983) stellt demgegenüber in flächenhaften Kartenauswertungen ein System sich tendenziell stromauf verlagernder lokaler Erosions- und Depositionszonen fest. Anhang der Wanderbewegung der Großrippel (Dünen) unmittelbar wahrnehmbar ist hingegen nur die stromab verlaufende Komponente. Mit zunehmendem Oberwasser nimmt dabei die Wandergeschwindigkeit der Dünen stromabwärts stark zu und die Kuppen werden niedriger. Im Ästuar erfolgt hingegen keine Umkehr der Dünenbewegungsrichtung mit dem Gezeitenwechsel.

Dammschneider (1983) stellt im Längsschnitt von St. Margarethen (km 689) bis Schulau (km 640) eine Abfolge von drei 15 bis 20 km langen Superbänken fest (Abb. 3.27). Auf diese aufgesetzt sind Makrobänke, deren Hangneigung auf einen stromaufwärts gerichteten Sandstransport schließen lässt. Auf diesen Makrobänken bewegen sich dann die Dünen stromabwärts (Abb. 3.28). Die über KN aufragenden Sände stehen in keinem Zusammenhang mit diesem System von Sohlbänken.

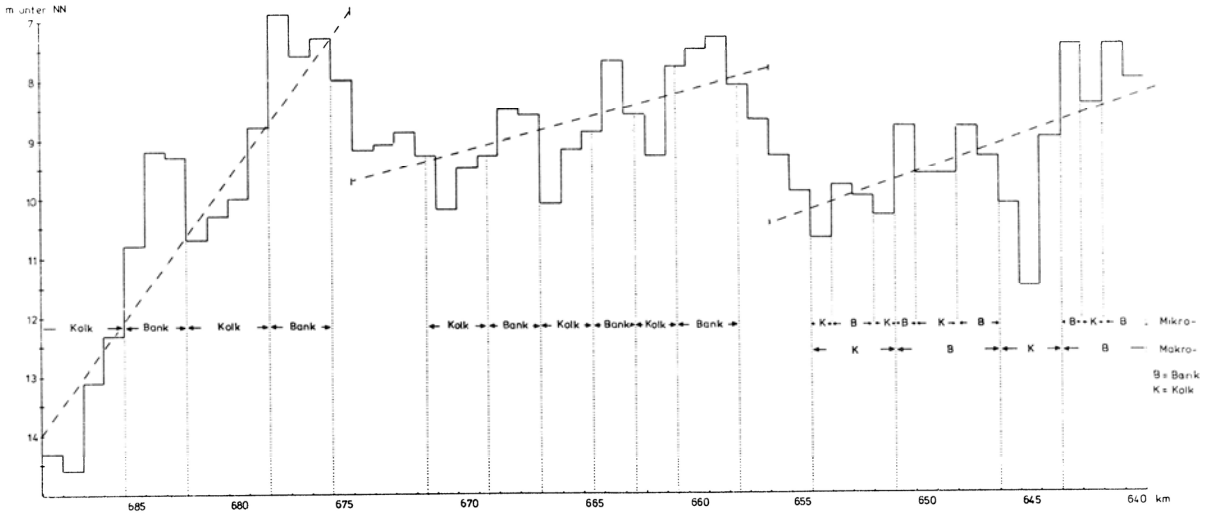
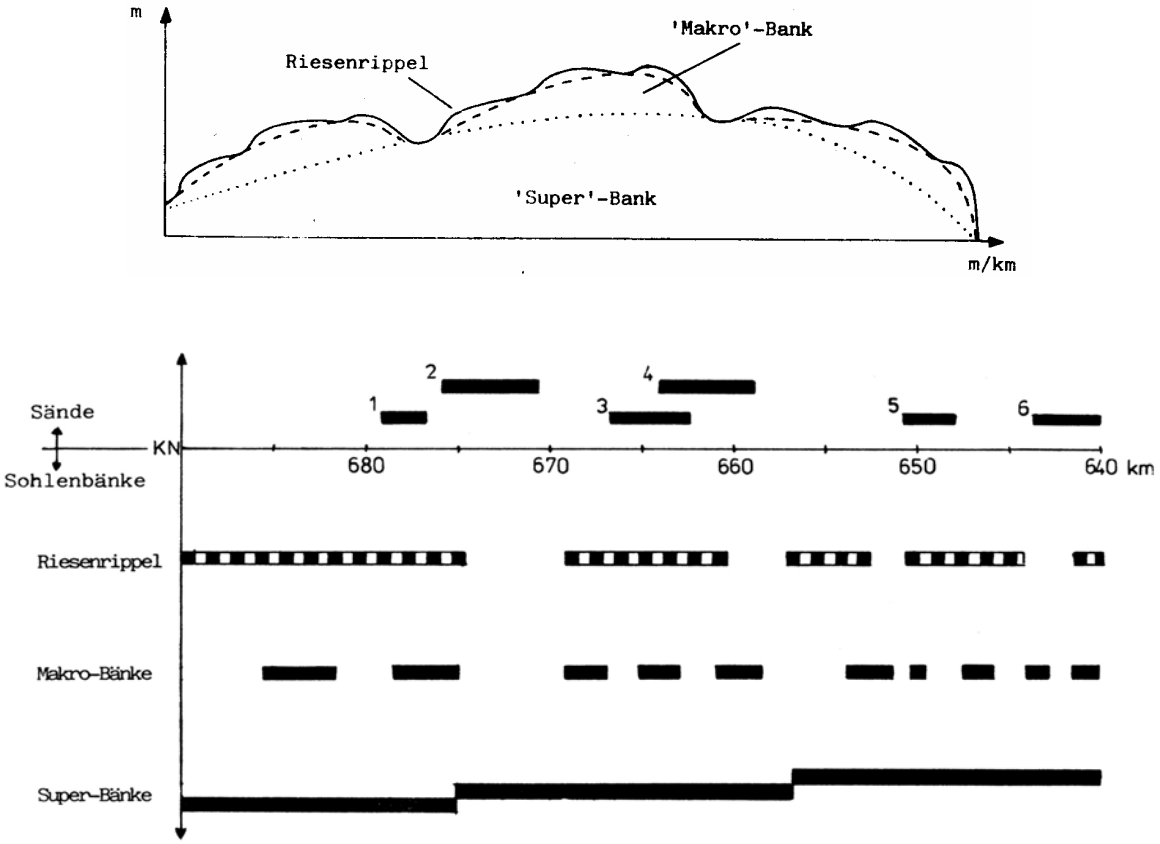


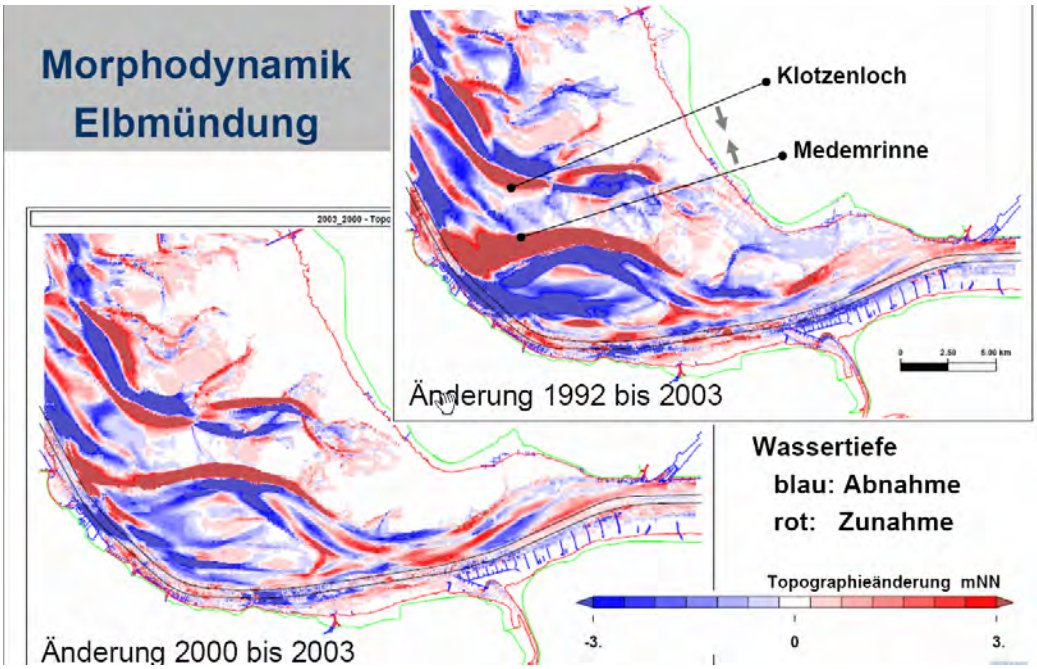
Abb. 3.27: Längsprofil der mittleren Tiefen unter NN und mittleres Sohlgefälle im Elbe-Ästuar. Aus Dammschneider (1983).



1: Brammerbank 2: Rhinplatte 3: Schwarztonnensand 4: Pagensand 5: Lühesand 6: Hanskalbsand

Abb. 3.28: Oben: Dimensionen von Sandwellen in der Unterelbe (schematisch). Unten: Lage der Sände (über KN aufragend) und der Sohlenbänke in der Unterelbe. Aus Dammschneider (1983).

Sehr viel dynamischer als im inneren Ästuar laufen die Sandtransportprozesse im Mündungsbereich ab, wo sich ästuarine Vorgänge mit küstenpararellen Transportvorgängen überlagern (siehe auch Kapitel 4) und zur Verlagerung von Sänden und Rinnensystemen führen können (Abb. 3.29). Auch hier zeigt sich im Allgemeinen eine Tendenz zum Sedimentverlust, die durch eine große saisonale Variabilität (Starkwindereignisse) überlagert wird.



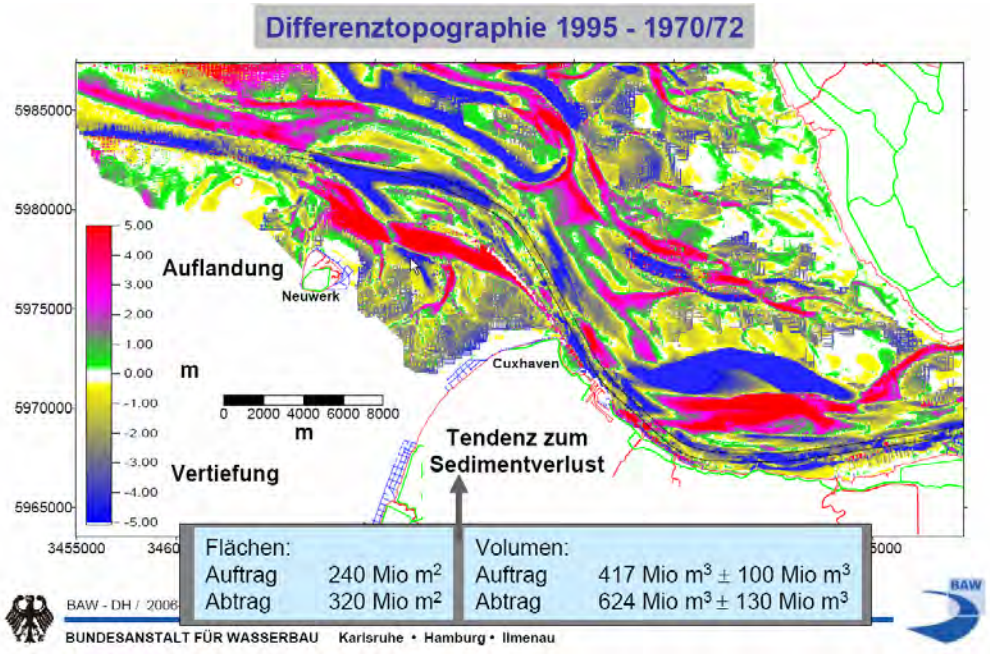


Abb. 3.29: Morphodynamik durch Sandtransport im Elbmündungstrichter. Aus Heyer (2006).

3.8 Der Austausch von Feststoffen zwischen der Deutschen Bucht und dem Elbe-Ästuar

Ein Grund für die wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Verhalten von Schwebstoffen im Ästuar besteht in ihrer Funktion als Träger von Schadstoffen wie toxischen Schwermetallen und organischen Verbindungen sowie als Träger von Nährstoffen (Phosphorverbindungen). Diese Schadstoffe stammen zum überwiegenden Teil aus dem Flusseinzugsgebiet; ein Teil wird auch von Quellen im Ästuar beigetragen. Die Bestimmung des Schadstoffeintrags durch die Elbe in die Deutsche Bucht und in die Nordsee ist daher eng verbunden mit der Bestimmung des residuellen Schwebstofftransports im mündungsnahen unteren Ästuar.

Neben dem Schadstoffaspekt ist die Sedimentbilanz auch in Hinblick auf die Stabilität der Strukturen im Ästuar (Rinnen, Watten, Vordeichsländern ...) sowie die Verschlickung von Häfen und Wasserstraßen von Bedeutung. Zudem ist die Kenntnis der Sedimentbilanz ganz wesentlich für das Sedimentmanagement. Erst die genaue Kenntnis der Zusammenhänge erlaubt optimales Management wasserbaulicher Maßnahmen, Reduzierung der Baggermengen und Festlegung von Verbringstellen für Baggergut.

Zur Bestimmung des Schwebstoff- und partikulären Schadstoffeintrags der Elbe in die Nordsee wurden und werden drei verschiedene methodische Wege beschritten:

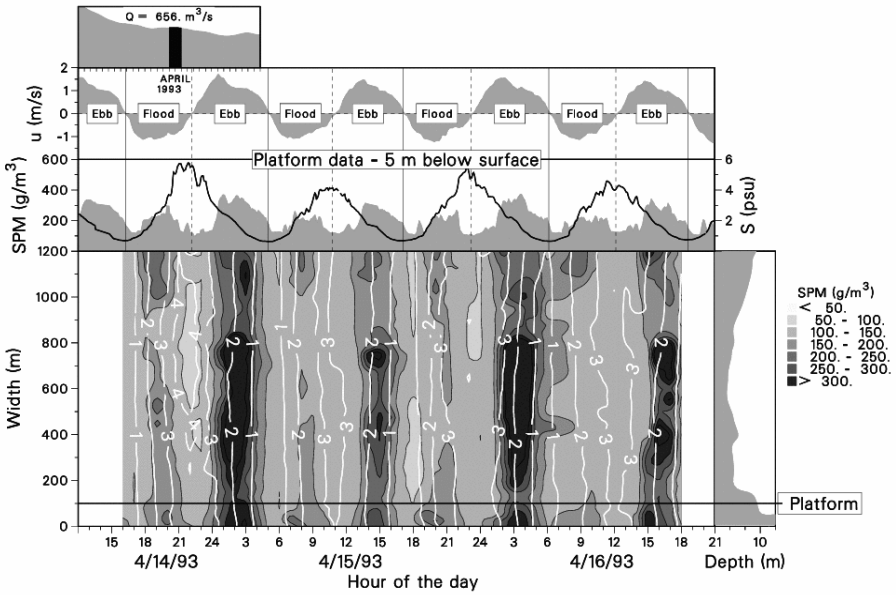
1. Direkte Messungen des Schwebstofftransportes an Querschnitten im Elbe-Ästuar über eine oder mehrere vollständige Tideperioden,
2. Bestimmung des Mischungsverhältnisses von unbelastetem marinen zu kontaminiertem fluvialen Schwebstoff in Schwebstofffallen und Sedimentkernen an verschiedenen Positionen entlang des Ästuars,
3. Naturähnliche Simulation des Schwebstofftransportes mit verifizierten numerischen Modellen.

3.8.1 Messungen des Schwebstofftransportes an Querschnitten im Elbe-Ästuar

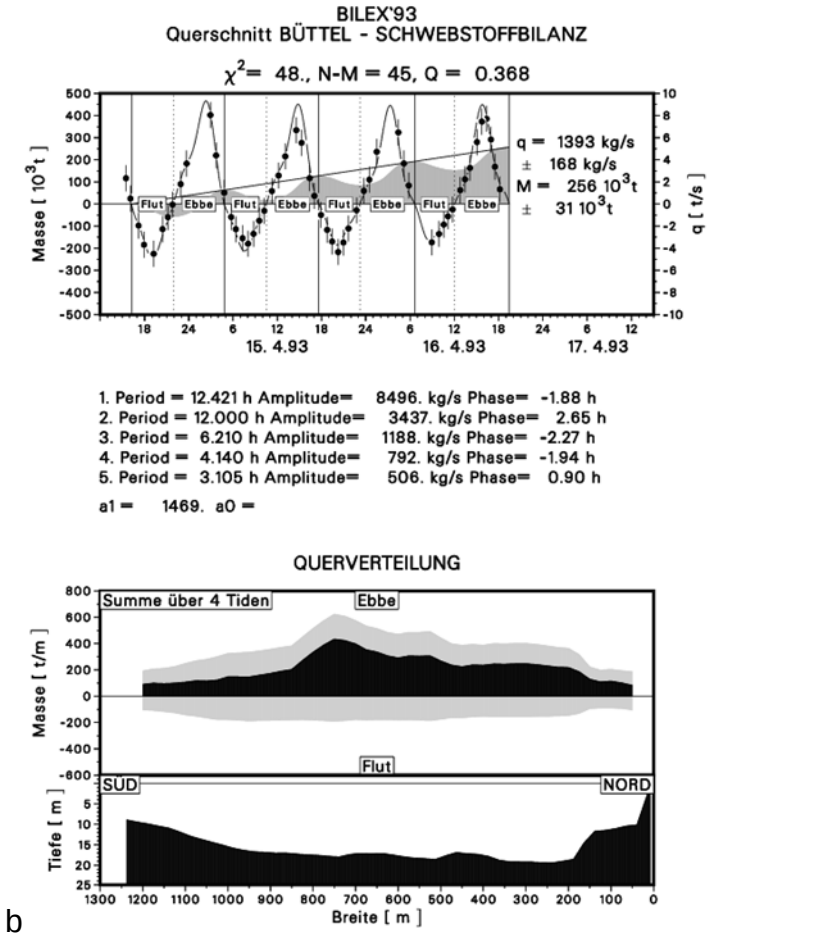
Die ersten Messungen dieser Art wurden von GKSS im Rahmen der BILEX Experimente (Michaelis, 1990) in den Jahren von 1982 bis 1993 an verschiedenen Flussquerschnitten von Oortkaten (Elbe-km 607) bis Brunsbüttel (Elbe-km 695) durchgeführt. Ihre Ergebnisse sind in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert (Fanger et al., 1989, Fanger et al., 1990 Fanger et al., 1996, Kappenberg et al., 1990, Michaelis et al., 1988, Michaelis et al., 1991).

Beispielhaft sind in Abbildung 3.30 die Ergebnisse der Schwebstoffmessungen am Querschnitt Büttel (Elbe-km 689) während BILEX 93 (14.–16. April 1993) dargestellt. Neben Messungen von einem an der Nordseite bei 10 m Wassertiefe verankerten Ponton wurden vom fahrenden Schiff aus stündlich Vertikal- und Horizontalverteilungen von Strömung, Salzgehalt und Schwebstoffkonzentration im Querschnitt gemessen. Man erkennt schon in Abbildung 3.30a die Ebbdominanz (stärkere Strömung und höhere SPM-Konzentrationen), die dann in der Bilanz (Abb. 3.30b) zu einem Nettostromabtransport von Schwebstoff führt.

Die Ergebnisse aus BILEX 93 können so aber nicht auf andere Zeiträume oder Ästuarquerschnitte übertragen werden. Wegen der großen räumlichen und zeitlichen Heterogenität der Feststoffgehalte im Wasserkörper des Elbe-Ästuars liegt der Fehler bei der Abschätzung der Menge des in einer Halbtide transportierten Feststoffes im Allgemeinen bei über zehn Prozent. In der Regel sind die pro Halbtide transportierten Schwebstoffmengen ähnlich groß. Der als deren Differenz resultierende Nettotransport ist demgegenüber sehr klein, mit großen Fehlern behaftet und kann sowohl stromauf wie stromab gerichtet sein. Aus direkten Messungen innerhalb des Ästuars lassen sich deshalb der langfristige Austausch von Schwebstoffen und Schadstoffen zwischen der Elbe und der Deutschen Bucht nicht zuverlässig abschätzen.



a



b

Abb. 3.30: Messung des Schwebstofftransportes während BILEX 93. (GKSS, unveröffentlicht):

(a) Oberwassersituation, Zeitreihen von Strömung, Salzgehalt und Schwebstoff (schattiert) in 5 m Wassertiefe an der Pontonposition (Plattform), Isolinien des Salzgehaltes (weiß) und Bereiche gleicher oberflächennaher Schwebstoffkonzentration (schattiert);

(b) Oben: Schwebstoffbilanz über 4 Tideperioden durch einen harmonischen Fit der Messungen. Unten : Querverteilung des Schwebstofftransportes getrennt nach Ebbe und Flut (grauer Bereich) und Nettotransport (schwarz) dargestellt über dem Tiefenprofil.

3.8.2 Nutzung von Spurenstoffen als Tracer für die Vermischung von marinem und fluvialem Material

Im Elbe-Ästuar wird mariner Schwebstoff aus der Deutschen Bucht mit fluvialem Schwebstoff aus dem Elbeeinzugsgebiet vermischt. Der fluviale Schwebstoff ist gekennzeichnet durch ein höhere Beladung mit anthropogenen Schad- und Spuren-stoffen, die sich als Tracer für die Herkunft der Schwebstoffe verwenden lassen. Aus der Konzentrationen dieser Stoffe im Ästuar lässt sich bei Kenntnis der Konzentrationen in den Ausgangsbereichen Deutsche Bucht und Mittelelbe der fluviale und marine Anteil des Schwebstoffs im Ästuar bestimmen. Dabei ist darauf zu achten, dass nur die Schwebstofffraktion berücksichtigt wird, die als Träger dieser Stoffe fungiert (< 20 µm). Ferner wird davon ausgegangen, dass diese als Tracer wirkenden Stoffe mit dem Schwebstoff verbunden transportiert werden und nicht in Lösung gehen. Bei Kenntnis der jährlich von oberstrom ins Ästuar eingetragenen Schwebstoffmenge lässt sich daraus auch die Größe des marinen Schwebstoffeintrags ins Ästuar berechnen. Da die Mischungsvorgänge im Ästuar eine gewisse Zeit beanspruchen, werden die während dieser Zeit auftretenden Fluktuationen (Oberwasserwellen, Stürme) ausgeglichen. Es erfolgt quasi eine natürliche zeitliche Integration der unterschiedlichen Schwebstoffflüsse.

Puls et al. (1997a) verwendeten den Bleigehalt in der Fraktion < 20 µm als Tracer für eine Sedimentbilanz der Deutschen Bucht in den Jahren 1990 und 1991. Der Feststoffeintrag aus der Elbe ergab sich für diesen Zeitraum zu 90.000 t/a bei einem fluvialen Eintrag über das Geesthachter Wehr von 340000 t/a. Demgegenüber gelangten 300.000 t/a aus der Deutschen Bucht in die Elbe.

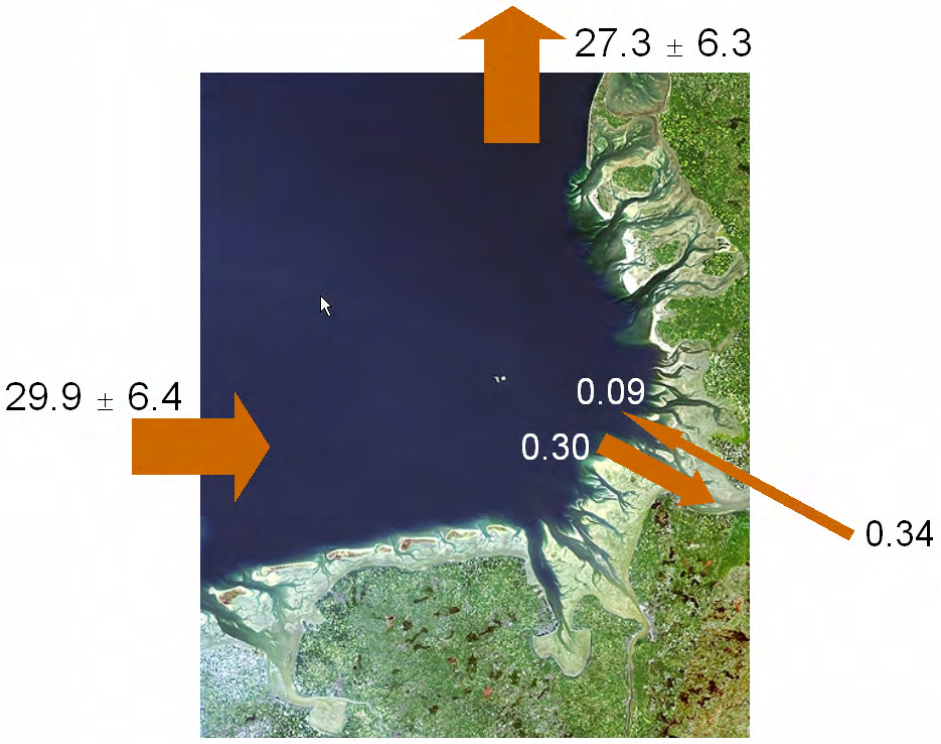
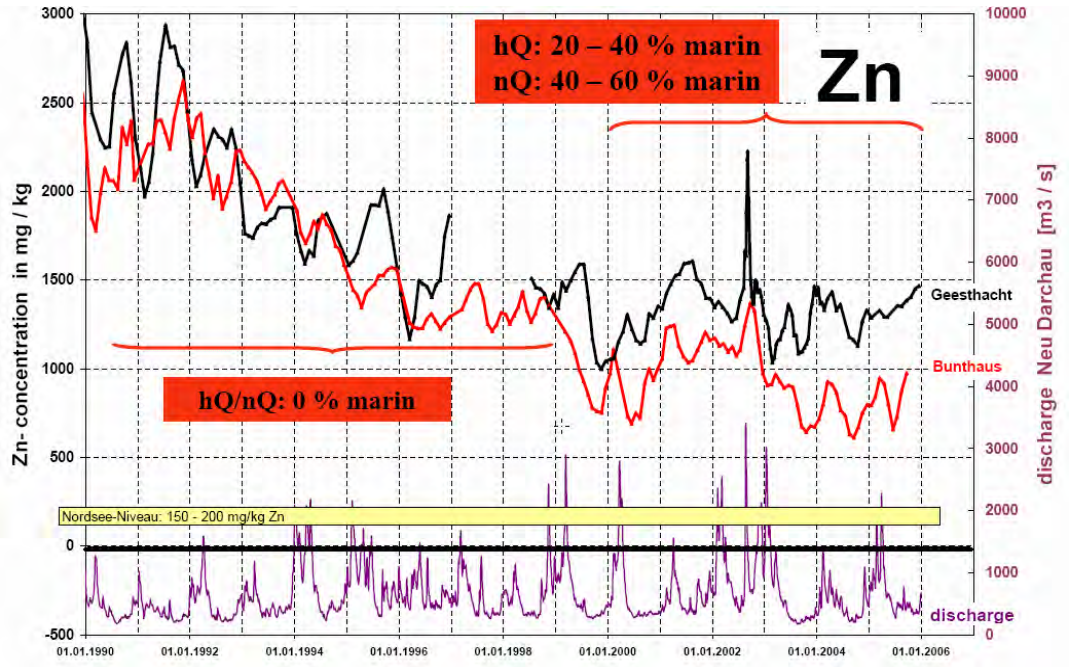


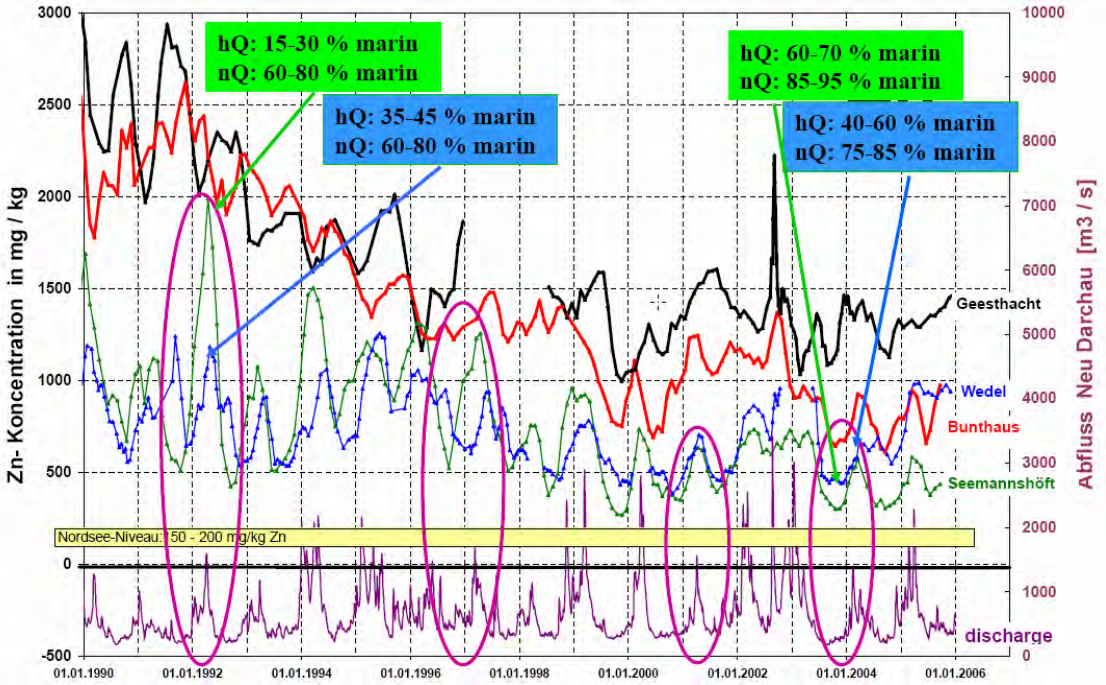
Abb. 3.31: Bestimmung des Schwebstoffeintrags der Elbe in die Deutsche Bucht in Millionen Tonnen pro Jahr über die Bleibeladung von Schwebstoff und Sediment. Nach Puls (1997a).

Bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) verwenden Ackermann und Schubert ähnliche Verfahren mit verschiedenen Schwermetallen als Tracer. Sie lösen die Mischungsvorgänge durch wöchentliche bis monatliche Probenahme an mehren Stationen im Ästuar zeitlich feiner auf und können so Oberwasserabhängigkeiten und Transportzeiten bestimmen. Beispielhaft sind die Ergebnisse aus den Jahren 1990 bis 2005 für das Element Zink in den Abbildungen 3.32 und 3.33 dargestellt. Auch zeigten sie, dass (wahrscheinlich als Folge

der letzten Fahrrinnenanpassung) seit 1999 mariner Schwebstoff bis zum Beginn des Hamburger Stromspaltungsgebiets bei Bunthaus gelangt. Auf der anderen Seite zeigen für die Elbe typische Beladungsmuster, dass Schwebstoff aus der Mittelelbe bis in die Deutsche Bucht vor Sylt transportiert wird (Zeiler et al. 2004).



A

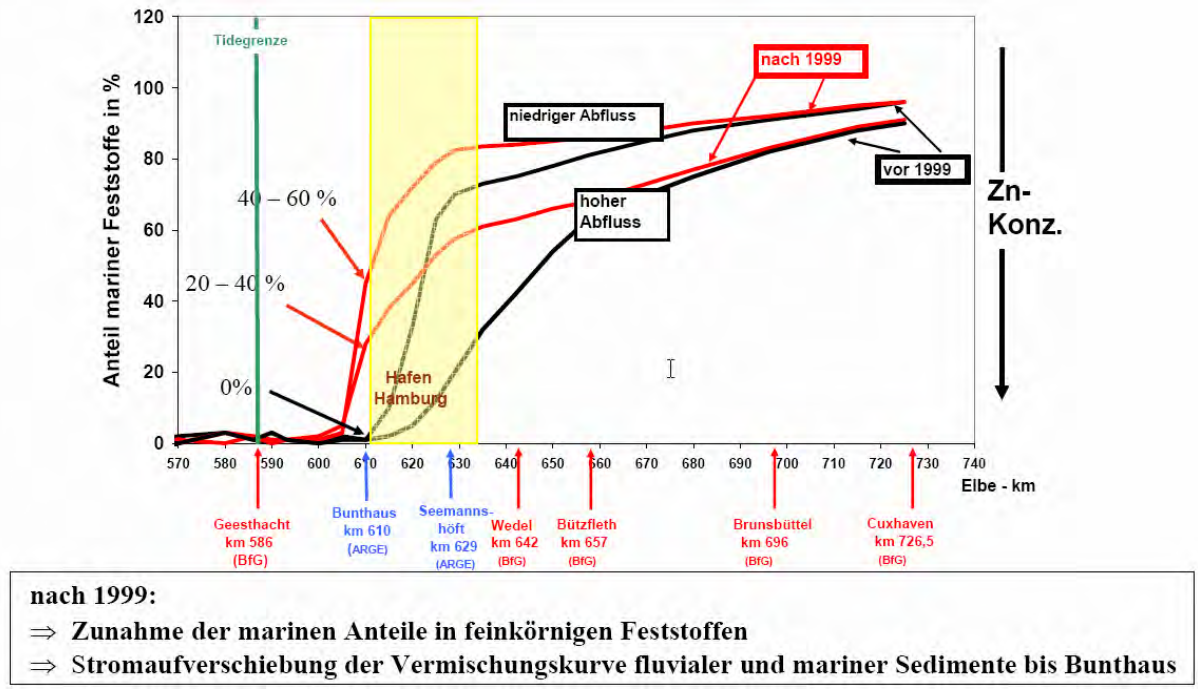


b

Abb. 3.32: Beladung des Schwebstoff und Sediment mit Zink (Zn) als Tracer zur Untersuchungen der Vermischung von marinem und fluvialem Schwebstoff. Aus Schubert (2006):

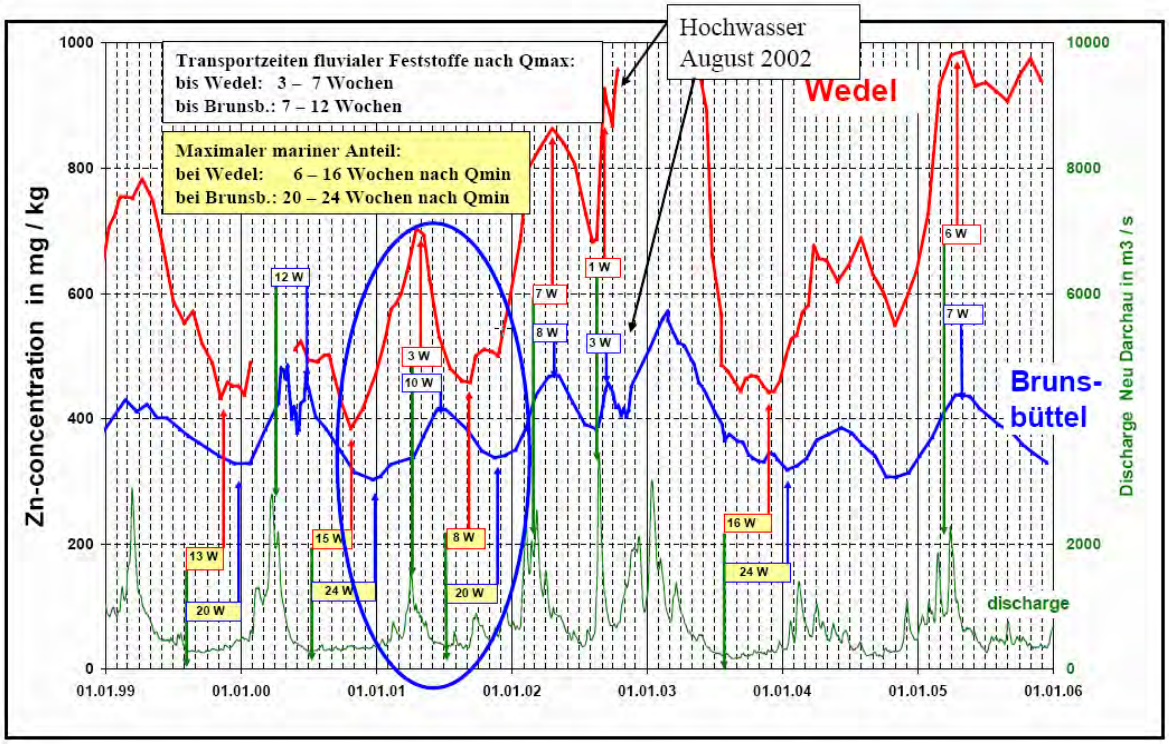
(a) oberwasserabhängige Variation der Zinkgehalte in Festoffen (< 20 µm) in Geesthacht und Bunthaus,

(b) oberwasserabhängige Variation der Zinkgehalte in Festoffen (< 20 µm) in Geesthacht und im Hamburger Bereich von Bunthaus bis Wedel.



nach 1999:
⇒ **Zunahme der marinen Anteile in feinkörnigen Feststoffen**
⇒ **Stromaufverschiebung der Vermischungskurve fluvialer und mariner Sedimente bis Bunthaus**

a



b

Abb. 3.33: Vermischung mariner und fluvialer Schwebstoffe und Transportzeiten von Schwebstoffen im Elbe-Ästuar. Aus Schubert (2006):

(a) Schematische Darstellung der Vermischung mariner und fluvialer Schwebstoffe im Elbe-Ästuar bei verschiedenen Oberwasserverhältnissen vor und nach der letzten Fahrrinnenanpassung 1999;

(b) Transportzeiten feinkörniger Schwebstoffe im Elbe-Ästuar.

Auch die Ergebnisse der BfG über die Mischungsverhältnisse von Nordsee- und Elbeschwebstoff längs des Ästuars lassen sich zur Bilanzierung des Feststofftransportes verwenden:

Der mittlere jährliche Eintrag von Schwebstoff aus der Mittelelbe betrug in den Jahren 1987 bis 2005 660.000 Tonnen (siehe Abb. 3.7 unten), wobei der Haupteintrag in den Monaten Dezember bis April erfolgt, in denen auch die Oberwasserführung am höchsten ist.

Der weitere Transport der 660.000 t Schwebstoff aus der Mittelelbe durch den Hamburger Hafen und die Tide-Elbe wird überschlägig wie folgt abgeschätzt:

1. Von den 660.000 Tonnen aus der Mittelelbe entfernt die Stadt Hamburg durch Deponierung, Verwertung und Umlagerung in die Nordsee (Klappstelle E3) ca. 320.000 Tonnen. Dies entspricht fast der Hälfte des Schwebstoffs, der jährlich über das Wehr in Geesthacht in die Tide-Elbe eingetragen wird.

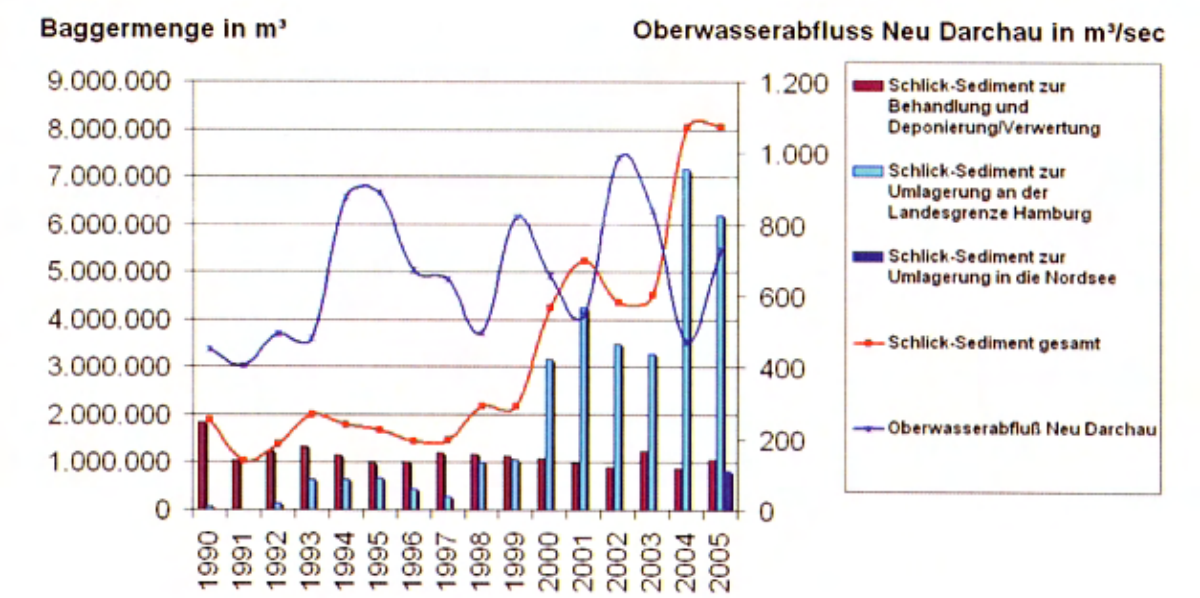


Abb. 3.34: Baggermengen im Hamburger Hafen, Feststoffentnahme und Umlagerung (HPA).

Die 320.000 t ergeben sich aus den im Jahre 2005 entnommenen 2 Millionen Kubikmeter (siehe Abb. 3.34). Bei einem Sandanteil von 20 % hat dieses Volumen eine Masse von 800.000 Tonnen. Der marine Anteil des Schwebstoffs im Hamburger Hafen beträgt nach Untersuchungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ca. 60 % (Abb. 3.33a), d. h. von diesen 800.000 Tonnen stammen nur 320.000 Tonnen aus dem Oberlauf.

2. Der in Hamburg nicht entnommene Schwebstoff (340.000 t) erreicht den unterhalb von Hamburg gelegenen Abschnitt der Tide-Elbe. Die Transportverhältnisse in diesem durch die Existenz der Trübungszone charakterisierten Bereich sind äußerst komplex und variabel. Nach einer Zwischenspeicherung in der Trübungszone wird dieser Schwebstoff im Laufe der Zeit entweder zur Sedimentation in strömungsberuhigten Seitenräumen kommen, oder in die Deutsche Bucht transportiert werden. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass das Inventar der Trübungszone bei aller Variabilität über den Zeitraum von mehreren Jahren gemittelt doch in etwa konstant bleibt.

Geht man von der extremen Annahme aus, dass die gesamte Schwebstoffmasse von 340.000 Tonnen im Elbabschnitt zwischen Wedel und Neufeld im Flachwasser (Wassertiefe kleiner als 2 m unter NN) abgelagert wird (also kein Schwebstoff aus dem Oberlauf die Deutsche Bucht erreicht), so ergäbe sich hierdurch bei einer Trockendichte des Materials von 475 kg/m^3 eine mittlere Auflandung von 1,04 cm auf einer Fläche von insgesamt 69 km^2. Diese wäre durch Peilung nicht nachweisbar.

Wie oben angeführt, berechneten Puls et al. (1997) für die Jahre 1990 und 1991 einen jährlichen Eintrag von 90.000 Tonnen aus der Tide-Elbe in die Deutsche Bucht bei einem gleich-

zeitigen Eintrag über das Wehr von 340.000 Tonnen. Rechnet man dies auf den hier angegeben mittleren Eintrag von 660.000 Tonnen hoch, so entspricht diesem in den Jahren 1987 bis 2005 ein mittlerer jährlicher Eintrag in die Deutsche Bucht von 175.000 Tonnen.

In Anbetracht der erheblichen Variabilität sowohl der jährlich in die Tide-Elbe eingetragenen Schwebstoffmengen als auch des Schwebstoffaustausches der Tide-Elbe mit der Deutschen Bucht muss der Schwebstoffhaushalt des Gesamtästuars über einen mittel- bis langfristigen Zeitraum betrachtet werden.

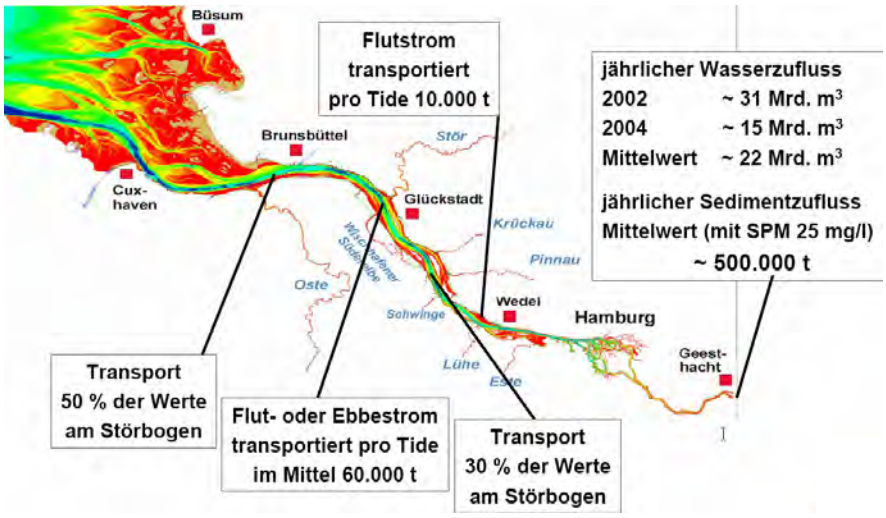
Der marine, aus der Deutschen Bucht stammende, Anteil des Schwebstoffs im Hamburger Hafen beträgt ca. 60 %. Dieses Verhältnis kann nur konstant bleiben, wenn bei ständigem Zustrom von Schwebstoff aus der Mittelelbe auch ein (zumindest im Jahresmittel) ständiger Stromauftransport von Schwebstoff aus der Deutschen Bucht bis in den Hamburger Hafen erfolgt. Etwaige Schlickansammlungen unterhalb von Hamburg sind nur zeitlich begrenzte Speicher von marinem Schwebstoff. Das einmalige Ausräumen solcher „Schwebstoffpools“ würde zu keiner nachhaltigen Verringerung der Baggermengen im Hamburger Bereich führen.

3.8.3 Bestimmung des Schwebstofftransportes aus naturähnlichen Modellrechnungen

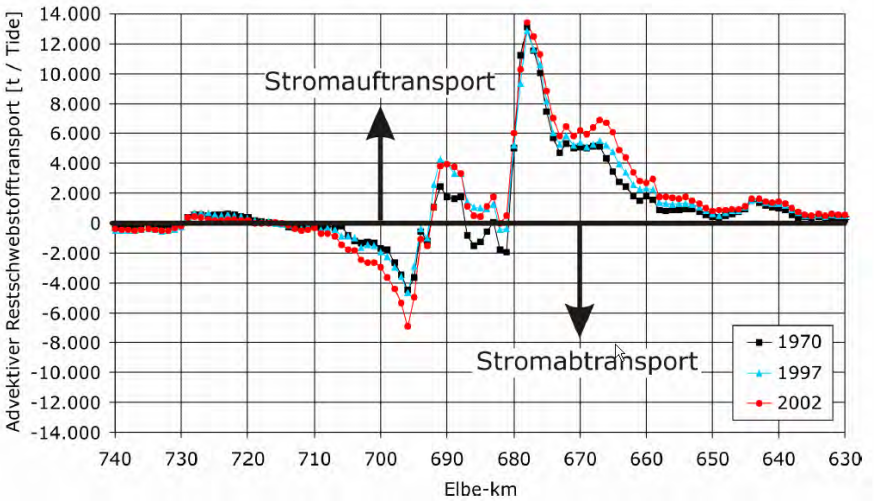
Mittels numerischer Modelle des Schwebstofftransportes lassen sich durch Integration der SPM-Flüsse über eine oder mehrere Tiden an beliebigen Querschnitten im Modellgebiet Nettoschwebstofftransporte berechnen (Abb. 3.35a). Ein besonderer Vorteil der Methode besteht in der Möglichkeit der Nachbildung historischer Zustände (Abb. 3.35b), aber auch in Prognose der Auswirkungen natürlicher und anthropogener Veränderungen im Ästuar. Die Qualität der Modellergebnisse ist dabei einerseits von der naturähnlichen Nachbildung der relevanten Transportprozesse im Modell, anderseits von Eingangsdaten wie Sedimenteigenschaften der Sohle, Schwebstoffeintrag über das Wehr, Schwebstoffkonzentration in der Deutschen Bucht, abhängig.

Abb. 3.35:

(a) Modellierung des Schwebstofftransportes durch verschiedene Querschnitte längs des Elbe-Ästuars.
Aus Heyer (2006).



(b) Tidengemittelter Schwebstofftransport längs des Elbe-Ästuars für verschiedene historische Zustände.
Aus Sohrmann (2006).

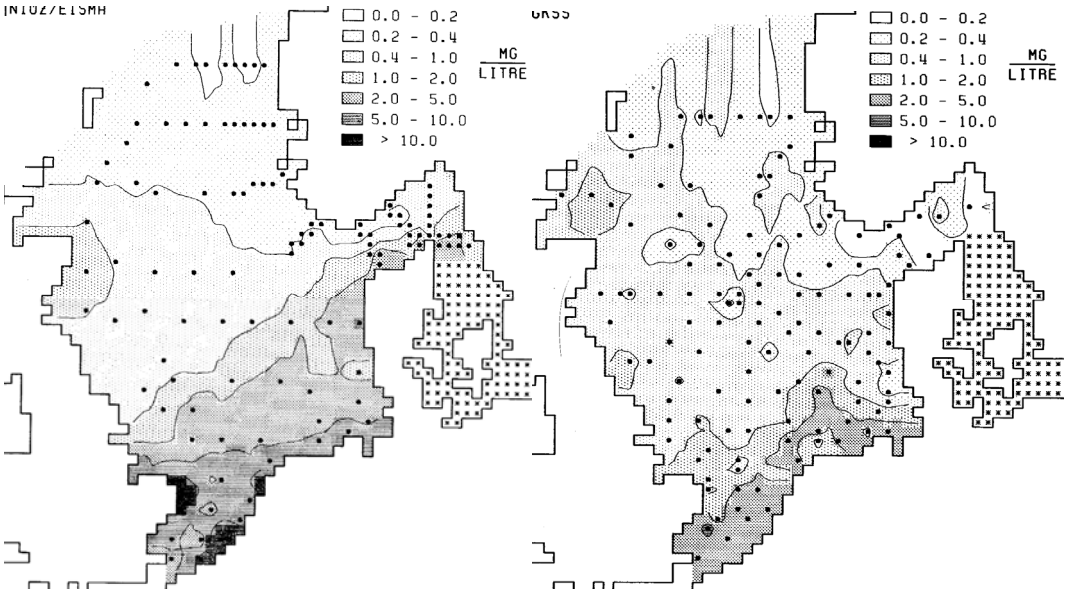


4. Feststofftransport in der Deutschen Bucht und der Nordsee

4.1 Das Schwebstoffregime in der Nordsee

Unter den Seegebieten Nordwesteuropas ist die Nordsee das am besten und detailliertesten untersuchte und erforschte. Trotzdem gibt es erst seit etwa 1980 Messungen der flächenhaften Vereilung von Schwebstoff in der Nordsee. Diese Messungen sind entweder sehr intensiv, jedoch von geringer räumlicher Ausdehnung, oder aber großflächig mit großen Abständen zwischen den einzelnen Mess-Stationen. Abbildung 4.2 (a) zeigt das Ergebnis der ersten mittels Probennahme vom Schiff durchgeführten Untersuchung, das im Wesentlichen mit den später durchgeführten Messungen übereinstimmt (Abbildungen 4.2 (b), 4.3 (a)). Die höchsten Konzentrationen werden in der Südlichen Bucht vor East Anglia, entlang der niederländisch-belgischen Küste und bodennah auch in der Deutschen Bucht erreicht. Sie treten zusammen mit Reststromwirbeln und dort auf, wo Transportpfade sich vereinigen (in Konvergenz-Zonen). Die hohen Konzentrationen in Küstennähe hängen zum Teil mit dem küstenparallelen Transport des Wassers zusammen, der ein Verdriften von Schwebstoff quer zur Küste verhindert.

Abb. 4.1:
Bathymetrie und geographische Bezeichnungen in der Nordsee (nach ICONA, 1992).



(a) (b)

Abb. 4.2: Flächenhafte Verteilung der tiefengemittelten Schwebstoffkonzentration aus Schiffsmessungen (a) von Eisma 3. Januar – 11. Februar 1980 und (b) Schröder 28. Januar – 3. März 1987 (Aus Puls & Pohlmann, 1997a).

In der Deutschen Bucht spielen auch die Gezeitenströme eine Rolle, die südöstlich von Helgoland ein ausgedehntes Schlickgebiet am Leben erhalten (Abb. 4.6). Bodennah ist dort der Flutstrom sehr viel stärker, wenn auch von kürzerer Dauer, als der Ebbstrom, was zu einem Nettotransport von Schwebstoff von der Küste in das Schlickgebiet führt. Der oberflächennahe Nettotransport verläuft zwar aus dem Schlickgebiet heraus, ist aber durch die weit niedrigeren Konzentrationen von untergeordneter Bedeutung, so dass sich Schwebstoff im Schlickgebiet in der inneren Deutschen Bucht ansammelt (Eisma & Irion, 1988). Genauer wird dies in einem folgenden Abschnitt diskutiert.

Obwohl die höchsten Konzentrationen entlang der Küsten der Südlichen Bucht und im Wattenmeer auftreten, sind die Schwebstoffmengen, die durch den Rest der Nordsee transportiert werden, trotz geringerer Konzentration aufgrund der großen Wasservolumina von der gleichen Größenordnung. Im Skagerrak fallen die Konzentrationen auf 0,4 mg/L und erreichen im nördlichen Teil der Norwegischen Rinne mit 0,2 mg/L Werte des offenen Ozeans.

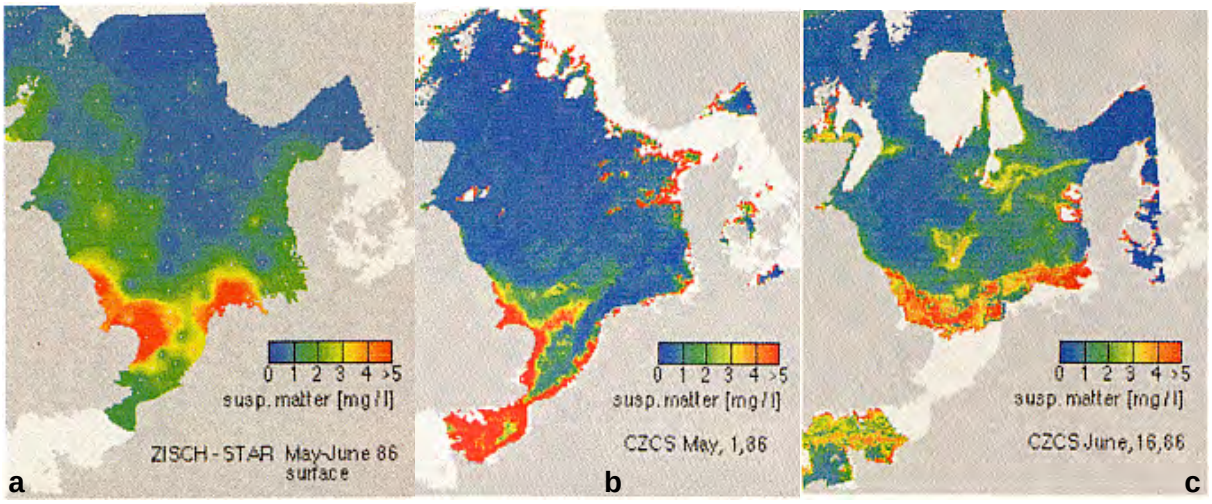
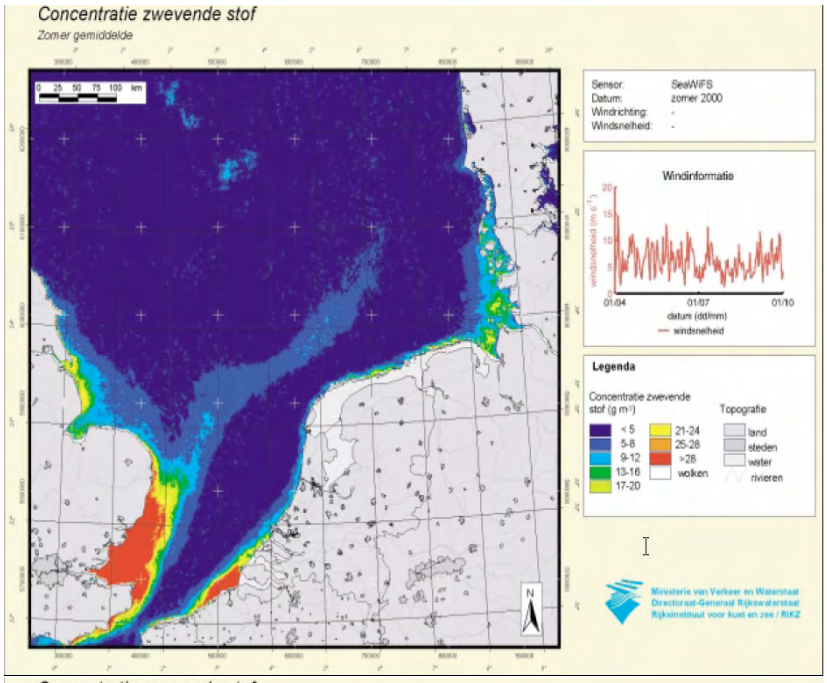


Abb. 4.3: Oberflächennahe Verteilung der Schwebstoffkonzentration im Mai und Juni 1986 (a) aus den Schiffsmessungen des ZISCH-STAR Experimentes; (b, c) aus Satellitenaufnahmen des Coastal Zone Color Scanner (aus Doerffer et al. 1994).

Auf den ersten aus Satellitenmessungen gewonnenen (oberflächennahen) Schwebstoffverteilungen (Abb. 4.3 b) erkennt man das charakteristische Merkmal der Schwebstoffverteilung in der südlichen Nordsee, das sich in den Schiffsmessungen wegen der geringeren räumlichen Auflösung so deutlich nicht zeigte: Von der Küste East Anglias verläuft ein Band erhöhter Konzentration in ostnordöstlicher Richtung entlang einer Kette von flachen Bänken (den Norfolk Banks), deutlich getrennt von den hohen Konzentrationen vor den kontinentalen Küsten. Dieses Band findet sich in unterschiedlicher Stärke sehr häufig auch in späteren Satellitenbilder, so z.B. in den über ein Halbjahr gemittelten Verteilungen aus dem Schwebstoffatlas des niederländischen RIKZ, 2002 (Abb. 4.4).



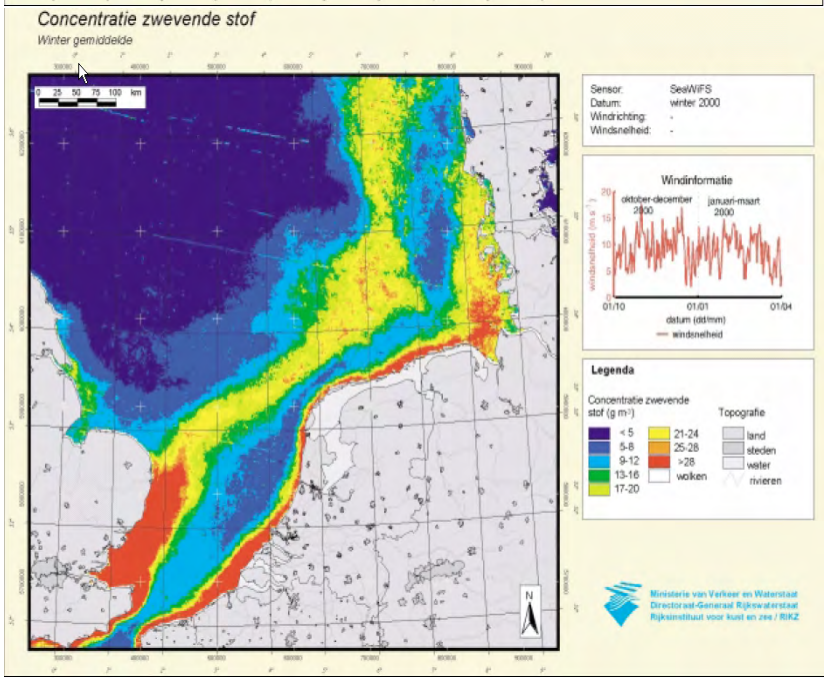
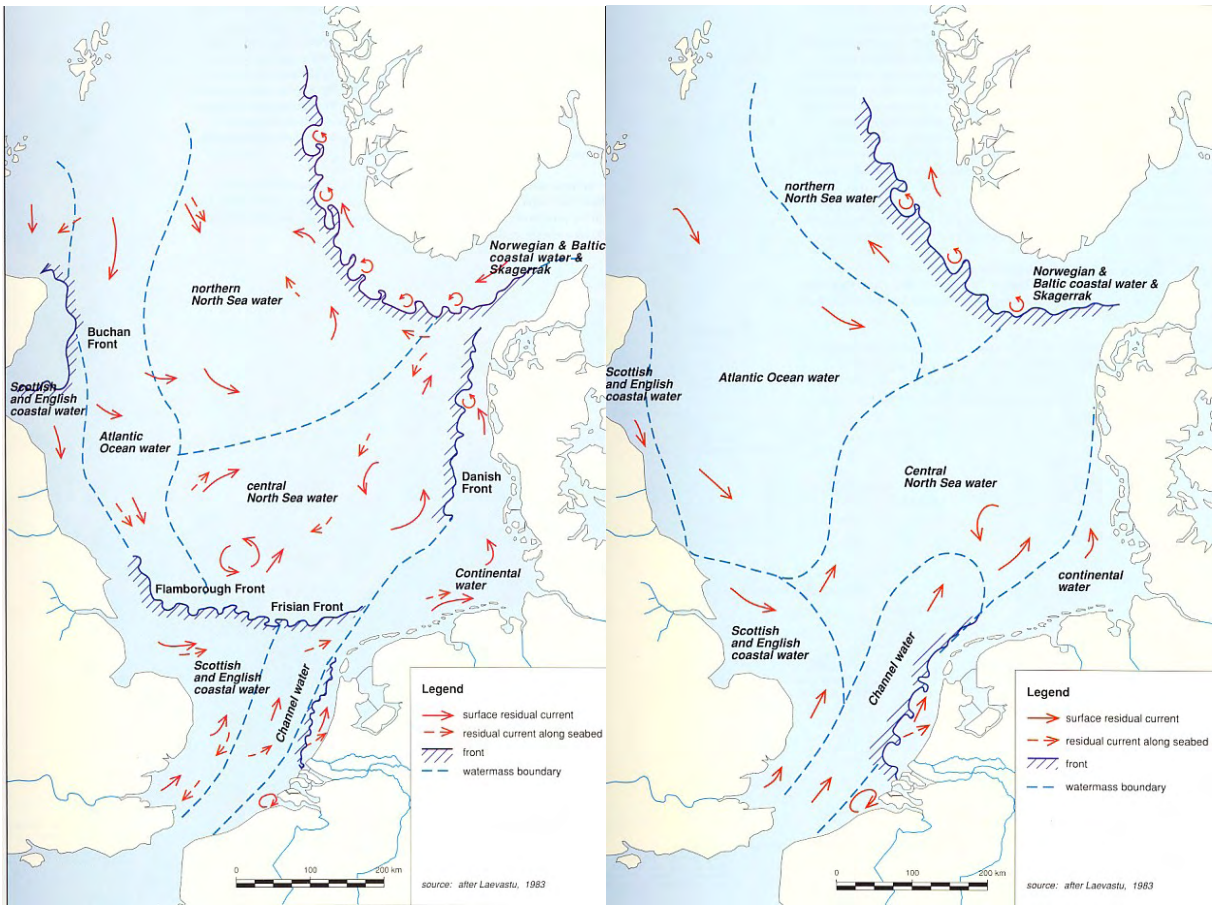


Abb. 4.4: Oberflächennahe Verteilung der Schwebstoffkonzentration (aus RIKZ, 2002):

(a) im Sommer und

(b) im Winter 2002.

Dyer und Moffat (1998) haben für dieses Band den Namen East Anglia Plume (Schwebstoff-Fahne) eingeführt. Die East Anglia Plume ist permanentes Phänomen der SPM-Verteilung in der südlichen Nordsee, stärker ausgeprägt im Winter als im Sommer, wo sie auch in nicht zusammenhängende Einzelabschnitte zerfällt.
Das Material dieses Schwebstoffbandes stammt zum einen Teil aus der Klifferosion von ca. 2 Mio. Tonnen pro Jahr (in Ostengland (Holderness, Norfolk/Suffolk), zum anderen Teil wahrscheinlich aus der Straße von Dover (10 Mio. t/a) über eine Zwischenablagerung vor Suffolk und breitet sich entlang des Verlaufs der Restströme über viele Depositions- und Resuspensionszyklen in Richtung Dänemark aus. Fronten im Wasserkörper sind wahrscheinlich verantwortlich für die Trennung von der kontinentalen Küste (Abb. 4.5)



a b

Abb. 4.5: Fronten und Restströme in der Nordsee im Sommer (a) und im Winter (b) (ICONA, 1992).

4.2 Der Schwebstofftransport in der Nordsee

Eine Reihe von Autoren hat versucht, konzeptuelle Sedimentbilanzen für die Nordsee aufzustellen. Dabei ergibt sich generell das gleiche Bild von Quellen, Zirkulation und Senken des Nordseefeststoffs.

Der Haupteintrag erfolgt demnach aus dem Nordatlantik zwischen Schottland und Norwegen und durch die Straße von Dover (Eisma & Kalf, 1987). Der Schwebstoff aus dem Nordatlantik besteht aus feinem Material mit einer typischen Sinkgeschwindigkeit w_s von $2 \cdot 10^{-3}$ mm/s. Das Material aus dem Ärmelkanal ist gröber, mit Sinkgeschwindigkeiten zwischen 10^{-1} mm/s und mehreren mm/s (Puls et al.,1997).

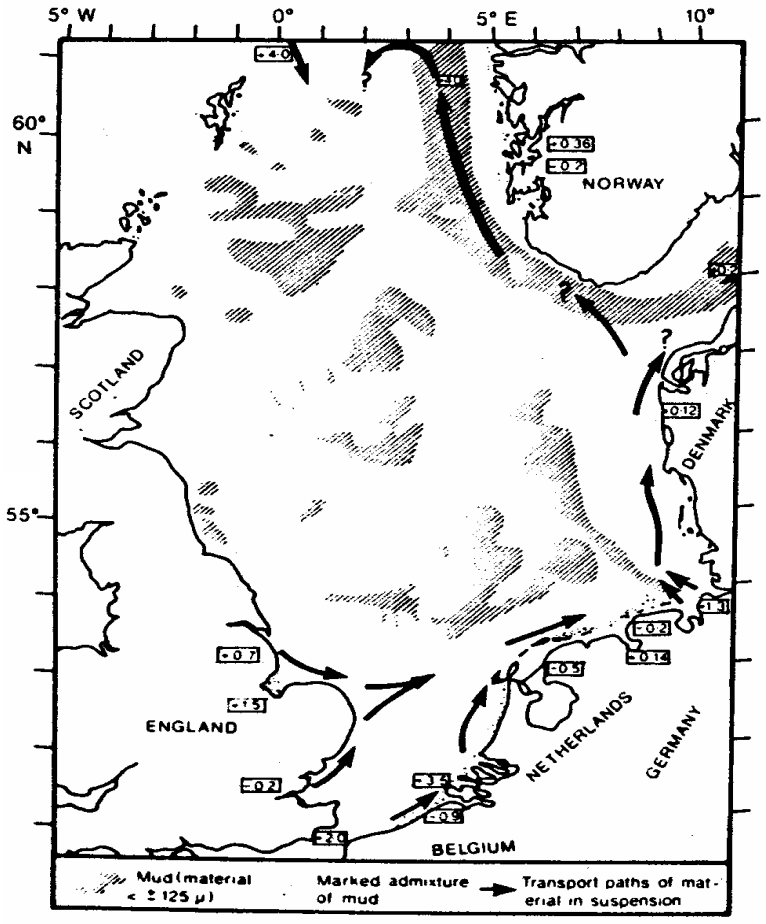
Weitere Schwebstoffquellen sind Flüsse, die Ostsee, die Erosion des Meeresbodens und der Küsten, die biologische Primärproduktion sowie Einträge über die Atmosphäre. Die Menge des jährlich vom Meeresboden erodierten Materials ist sehr unsicher.
Durch biologische Primärproduktion entstehen während des Sommers organische Schwebstoffteilchen, die im Winter fast vollständig mineralisiert werden.

In Tabelle 4.1 sind die Abschätzungen der einzelnen Einträge nach Eisma und Irion sowie nach Puls und anderen wiedergegeben. Dabei ist zu beachten, dass Puls nur die Fraktion < 20 µm und den Bereich südlich von 55°30' nördlicher Breite betrachtet.

Tabelle 4.1: Feststoffeintrag in die Nordsee.

Feststoff-Quelle	Eintrag in Mio. t/a nach Eisma & Irion (1988)	Eintrag in Mio. t/a nach Puls et al. (1997)
Nordatlantik	10	13
Ärmelkanal	10	14
Ostsee	0,5	
Erosion d. Meeresbodens	6–7,5	
Englische Klifferosion	> 2	4
UK Flüsse u. Verklappung	0,2	0,6
Meuse/Schelde/Rhein		0,7
Weser/Elbe		0,7
Alle Flüsse	4,8	
Primärproduktion	1	
Atmosphäre	1,6	

Der Eintrag von SPM wird durch SPM-Export und –Deposition ausgeglichen. Der Hauptexport erfolgt entlang der norwegischen Küste (11,4 Mio. t/a). Im Wattenmeer und der Wash-Bucht (siehe Abb. 4.1) an der Ostküste Englands werden ca. 3.5 Mio. t/a (Eisma & Kalf, 1987) deponiert und die Deposition in den Ästuaren wird mit 2,5 Mio. t/a abgeschätzt. Die größte Deposition von SPM findet aber in der Norwegischen Rinne mit 12 bis 19 Mio. t/a und in der Deutschen Bucht mit 3 bis 7 Mio. t/a statt (Dyer & Moffat, 1998).



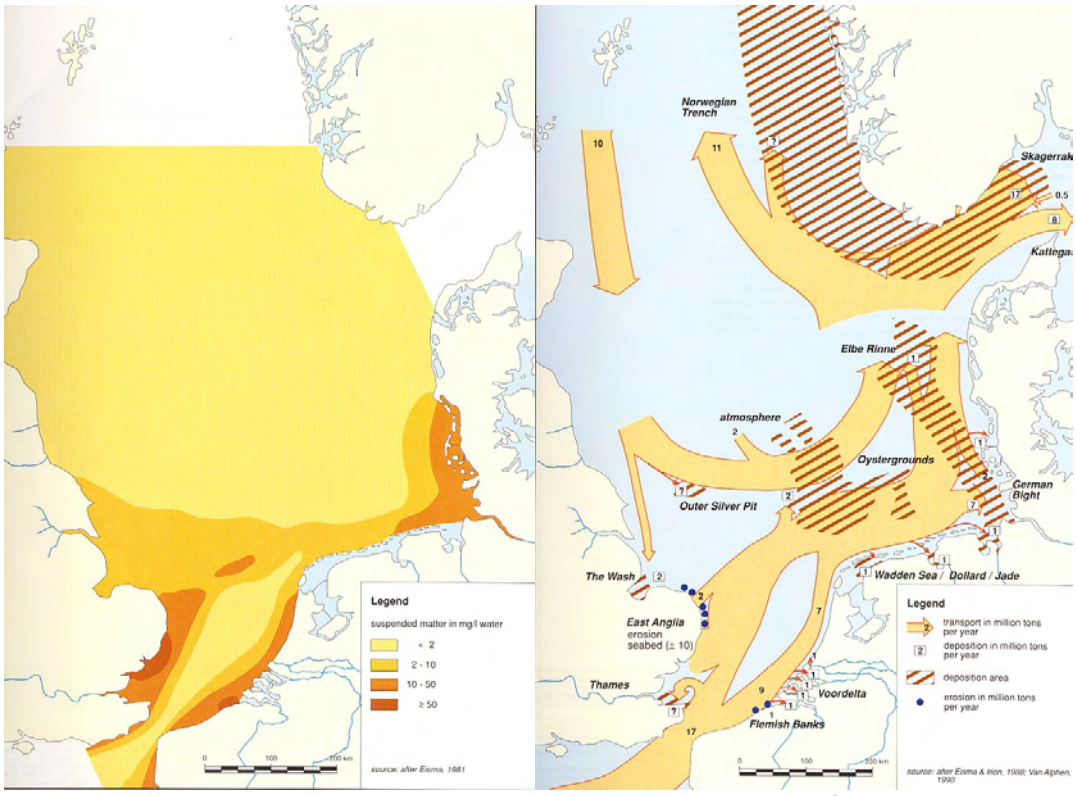
Eisma zeigte schon 1971 (Abb. 4.6), dass es ein generelles Zirkulationsmuster des Schwebstoffs in der Nordsee gibt, das in wesentlichen Zügen mit der langjährigen Reststromverteilung übereinstimmt (Abb. 4.5). Die Restromzirkulation in der Nordsee ist meist ein zyklonal, d.h. gegen den Uhrzeigersinn durchlaufener Wirbel, der durch Stärke und Richtung des Windfeldes beeinflusst wird.

Abb. 4.6:
Verteilung schlickiger Sedimente in der Nordsee und Haupttransportpfade von Nordseeschwebstoff. (Nach Eisma, 1971).

Der Schwebstoff wird zunächst entlang der britischen Ostküste transportiert, zweigt dann in nordöstlicher Richtung vor der Küste East Anglias in Richtung Texel ab, wird wieder küsten-

parallel von Holland bis zum Skagerrak transportiert um letztendlich in der Norwegischen Rinne zur Deposition zu kommen.

McCave (1971) schlug ein ganz ähnliches Bild von Quellen und Transportpfaden vor, stellte aber einen gravierenden Unterschied zwischen den von Eisma angegebenen Einträgen durch die britischen Quellen und den Akkumulationsraten in Bohrkernen aus der Nordsee fest. Seitdem ist die Größe der Einträge in Tabelle 4.1 Gegenstand ständiger wissenschaftlicher Diskussion.



a b

Abb. 4.7: (a) Schwebstoffverteilung in der südlichen Nordsee (Winter), (b) Schwebstofftransporte, Erosions- und Depositionsgebiete (ICONA, 1992 nach Eisma & Irion, 1988).

Alle Autoren stimmen darin überein, dass Holderness und East Anglia wichtige Quellen des Nordseeschwebstoffs sind und dass das Wattenmeer (und vielleicht auch die Wash) als Senke fungiert. Die meisten Autoren behaupten ferner, dass sich weitere küstenferne Senken an den Amphidromien[1] vor der Scheldemündung und in der Deutschen Bucht befinden. Diese Schlussfolgerungen beruhen auf dem Auftreten von Schlickgebieten am Ort dieser Tide-Energieminima und scheinen durch natürliche und anthropogene Tracer in Sedimentkernen aus diesen Gebieten bestätigt zu werden. Kirby (1987) weist darauf hin, dass Schwebstoff, der am littoralen Transport teilnimmt, wahrscheinlich nicht aus den Küstenzonen entkommt, sondern in der nächsten stromabgelegenen Senke zumindest zeitweise deponiert wird. Auch ist die Rolle der Ästuare als Quellen oder Senken von Schwebstoff unklar (so z. B. bei einem so intensiv untersuchten Ästuar wie dem der Themse). Ästuare, die bereits zum überwiegenden Teil mit Sediment verfüllt sind, fungieren dagegen als Quelle. Sie haben das Endstadium ihrer Entwicklung erreicht. So wurde z.B. die Seine durch künstliche Verfüllung innerhalb weniger Dekaden von einer Senke mariner Feststoffe zu einer Quelle fluvialer Feststoffe (was der natürlichen geologischen Entwicklung von mehren tausend Jahren entspricht), die dann auf dem Kontinentalschelf deponiert werden.

[1] Eine Amphidromie ist eine Stelle im Meer, in der sich verschiedene Gezeitenwellen aufheben und an der fast kein Tidenhub auftritt.

Die Konzentration und Zusammensetzung von SPM wird durch jahreszeitliche und kurzfristige Veränderung der Strömungsverhältnisse beeinflusst. Während Sturmperioden (meist im Winter) sind die Konzentrationen durch Resuspension und Erosion um ein Vielfaches höher als im Sommer und unter ruhigen Bedingungen (siehe Abb. 4.4).

4.3 Das Schwebstoffregime in der Deutschen Bucht

Das Schwebstoffregime in der Deutschen Bucht ist in einer Reihe von Forschungsprojekten untersucht worden: (Biogeochemistry and Distribution of Suspended Matter in the North Sea and Implications to Fisheries Biology (1984–1988), ZISCH (1984–1989), SYNDWATT (1989–1991), PRISMA (1990–1993), TUVAS (1989–1992), KUSTOS-TRANSWATT (1994–1997). Wie schon im Vorhergehenden dargestellt, stammt der Schwebstoff in der Deutschen Bucht hauptsächlich aus dem Ärmelkanal. Er wird mit der vorherrschenden zyklonalen Zirkulation entlang der niederländischen Küste transportiert. Der langjährige mittlere Eintrag durch den westlichen Rand der Deutschen Bucht beträgt 13.5 Mt a^{-1} (KUSTOS-TRANSWATT, 1998). In Puls et al. (1997a) wird mit 29.9 Mt a^{-1} nach Ergebnissen von TUVAS ein weit höheren Wert hierfür angegeben (Abb. 4.8). Dieses Ergebnis basiert auf 4 Messfahrten im Winter, von denen 2 nach starken Stürmen stattfanden, durch die viel Material erodiert wurde, was zu diesem für das gesamte Winterhalbjahr nicht repräsentativen Wert führte. Man gewinnt durch solche Diskrepanzen aber einen Eindruck von der starken Variabilität im System.

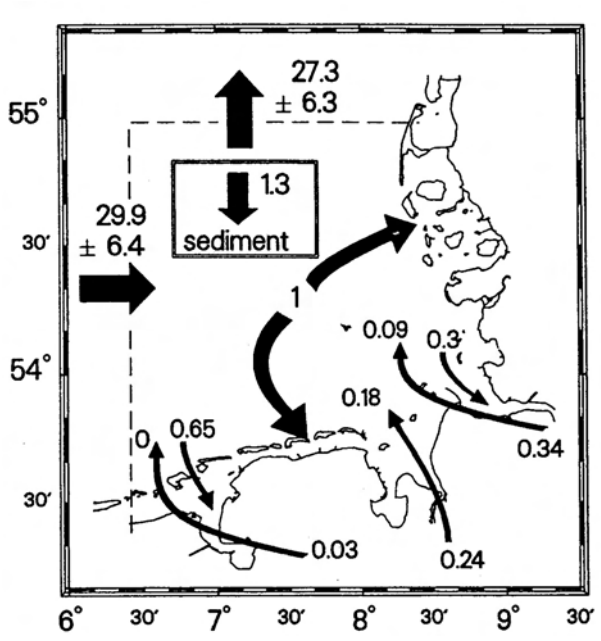


Abb. 4.8:
Geschätzte SPM Transporte (in Mt/a) in der Deutschen Bucht für die Jahre 1990–1991. (Aus Puls et al., 1997a).

In der Deutschen Bucht werden die Schwebstoffgehalte im Wesentlichen durch die Faktoren Distanz zur Küste, Wassertiefe, Art des Meeresbodens, Meteorologie und Planktonabundanz gesteuert. Die Variabilität ist sehr groß, z.T. bis zu 2 Größenordnungen.

Die höchsten Schwebstoffgehalte finden sich zwischen 8° Ost und der nordfriesischen Küste. Innerhalb dieser Zone ist ein abnehmender Gradient von der Elbmündung nach Norden zu beobachten. Die hohen Konzentrationen sind vermutlich nicht nur auf den Eintrag durch die Elbe zurückzuführen, sondern auch auf einen Austrag aus dem Wattenmeer (Heinrich, 1993). Die küstennahe Trübezone vor den ostfriesischen Inseln ist schmaler als die nordfriesische.

Die zweite Gruppe mit mittelhohen Konzentrationen liegt im glazialen Elbe-Urstromtal und auf einem sich über die Weiße Bank SW-NE-erstreckenden Streifen am westlichen Rand der

Deutschen Bucht. Lieferant des Schwebstoffes ist im ersten Fall das relativ feinkörnige Bodensediment der holozänen Füllung des Urstromtales (Figge, 1981). Der Trübestreifen am Westrand der Deutschen Bucht steht nicht im Zusammenhang mit dem Material des Meeresbodens, da dies, mit wenigen Ausnahmen, relativ grobkörnig ist. Vielmehr lässt er sich auf einen Transport durch Strömungen aus der Southern Bight zurückführen, wobei offen ist, ob das Material von der niederländischen Küste oder aus dem Englischen Kanal stammt (Dyer & Moffat, 1992).
Die geringsten Schwebstoffkonzentrationen befinden sich über den Sandflächen zwischen Borkum Riffgrund und Elbe-Urstromtal, westlich der Amrum Bank, und am Südostrand des Dogger Tail End. Im letztgenannten Gebiet wurden die niedrigsten Werte gemessen. Selbst bei stürmischem Wetter überstiegen die Gehalte in Bodennähe nicht 10 mg/L.

Bedingt durch die stärkeren Winde sind die Schwebstoffgehalte im Winterhalbjahr gegenüber denen im Sommerhilbjahr erhöht; unabhängig vom Seegebiet im Mittel um den Faktor 2. Eine unmittelbare Korrelation von Schwebstoffgehalt: und Windgeschwindigkeit oder Seegang ist im Allgemeinen nicht möglich. Wahrscheinlich spielt beim Vertikaltransport von resuspendiertem Bodensediment ins Oberflächenwasser das Andauern einer Windphase eine große Rolle. So sind sommerliche Stürme wegen ihrer kurzen Dauer weniger wirksam als Winterstürme.

Korngrößenmessungen aus der Deutschen Bucht zeigen ein augenfälliges Maximum bei 3–10 µm Korndurchmesser. Dieser Größenbereich ist demnach bei jedem energetischen Zustand im Wasser vorhanden, jedoch mit unterschiedlichen absoluten Gehalten. Mineralogisch handelt es sich bei dieser Größengruppe um Glimmer, neben Quarz dem häufigsten Mineral im Zirkum-Nordseebereich.

Das Schwebstoffregime in der Deutschen Bucht zeichnet sich durch vier Besonderheiten aus:

1. Das Schlickgebiet in der inneren Deutschen Bucht zwischen Helgoland und der Elbmündung. Aufgrund von Schwermetallgehalten in Sedimentkernen schätzten Irion et al. (1987) hier eine Depositionsrate von 3 m Schlick pro Jahrhundert ab. Neuere Schwebstoffmessungen durch das BSH zeigten starke Schlickerosion während eines Sturms. Man muss daher davon ausgehen, dass im Schlickgebiet keine kontinuierliche Deposition von Schwebstoff stattfindet, sondern dass sich Perioden der Deposition und Erosion abwechseln.

2. SPM wird zeitweilig in der Ästuaren der deutschen Flüsse zwischengespeichert. Das durchschnittliche SPM-Inventar des Elbe-Ästuars bei niedrigem Abfluss (< 500 m^3 s^{-1}) beträgt 0,56 Mio. t (Bergemann pers. Mitt.), wovon 85 % marinen Ursprungs sind (Puls et al., 1997). Während einer Hochwasserwelle mit Spitzenwerten von 2.000 m^3 s^{-1} im Frühjahr 1995 wurden 0,32 Mio. t aus der Elbe in die Deutsche Bucht gespült (Bergemann, pers. Mitteilung, zitiert in KUSTOS (BMBF-Projekt 03F0111) – TRANSWATT (BMBF-Projekt 03F0130) Abschlussbericht, 1998, S. 249).

3. SPM sammelt sich in einer 30 km breiten marinen Trübungszone vor der Ostküste der Deutschen Bucht an. Die tiefengemittelten SPM Konzentrationen betragen hier 4 mg/L im Sommer und 18,5 mg/L im Winter (Heinrich, 1993).

4. Der langfristige küstenparallele SPM-Transport wird durch den Austausch von SPM zwischen den Tide-Becken des Wattenmeeres und der vorgelagerten Küstenzone verzögert. In Puls et al. (1997a) wird die langfristige Depositionsrate von SPM im deutschen Wattenmeer mit 1 Mio. t a^{-1} beziffert. Im Gegensatz dazu beobachten Flemming und Bartholomä (1997) einen fortschreitenden Verlust von Schlickgebieten im ostfriesischen Wattenmeer.

Schwebstoff verlässt die Deutsche Bucht in nördlicher Richtung entlang der dänischen Küste. Auf seinem Weg zum Skagerrak und der norwegischen Rinne wird dieser Schwebstoff-Strom durch SPM aus der East Anglia Plume und dem Nordatlantik verstärkt.

4.4 Der Sand- und Geschiebetransport in der Nordsee und in der Deutschen Bucht

In der Nordsee findet Sandtransport in erster Linie küstenparallel in den flacheren Gebieten statt, wo Gezeitenströmungen und Wellen sich stark auf die bodennahe Dynamik auswirken. Sandtransport manifestiert sich in der Bildung von Transportkörpern mit einem Größenspektrum von wenigen Zentimetern bis zu mehreren hundert Metern, flachen Sandböden und in der Entstehung von Prielen und Sandbänken entlang der Küste und in den Seegatten. Im Wattenmeer und der Wash findet der Sandtransport bodennah in Form bewegter Riffel statt. Die größeren Transportkörper in der Nordsee (Sanddünen, Megadünen und Großbänke wie die Doggerbank) sind Überbleibsel der Vergangenheit, d. h. sie wurden im frühen Holozän geformt. Über diese großen Strukturen in der zentralen Nordsee wird Sand hinweg transportiert, besonders bei Starkwindlagen. Ein Teil des Sandes kann dabei durch die kombinierte Wirkung von Seegang und Strömung erodiert werden, aber bei Wetterberuhigung lagert sich das Material wieder ab, so dass dort kaum ein Nettosandtransport entsteht.

Ein residueller Sandtransport findet nur entlang der Küste statt und ist speziell in der Nähe der Seegatten von Bedeutung. Im Unterschied zum Schwebstofftransport gibt es keine einheitliche zyklonale Transportrichtung, sondern Küstenabschnitte mit unterschiedlichem residuellen Transport, getrennt von Konvergenz- und Divergenzbereichen (Abb. 4.9): Ein geringer Teil des Sandes wird auch senkrecht zur Küste entlang des Bodengradienten verlagert. Ein weiterer Teil wandert stromauf in die Ästuare.

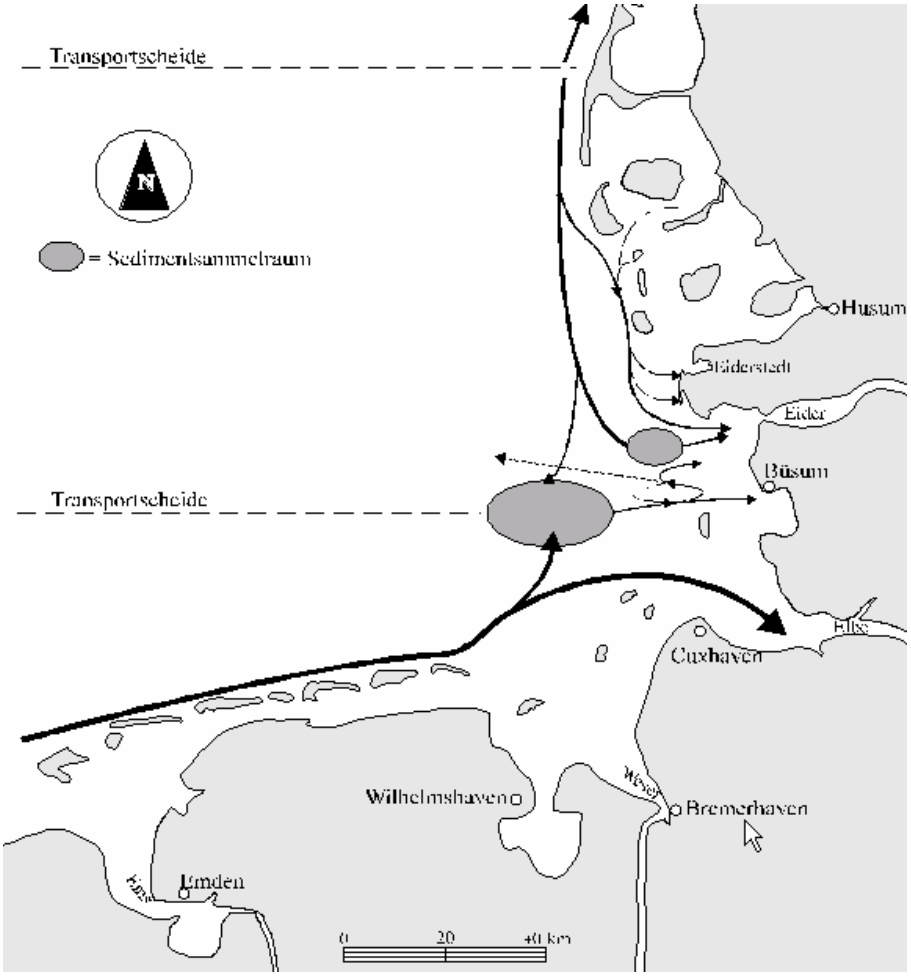


Abb. 4.9 (a): Generelle Richtung der Hauptsedimentströme in der inneren Deutschen Bucht (nach Partenscky, 1983:106; Kartengrundlage: Topographische Karten 1:100.000, 1986).
(Aus: Gönnert, G. Mäandrierung und Morphodynamik im Eider Ästuar. In Berliner Geographischen Schriften, Nr. 41).

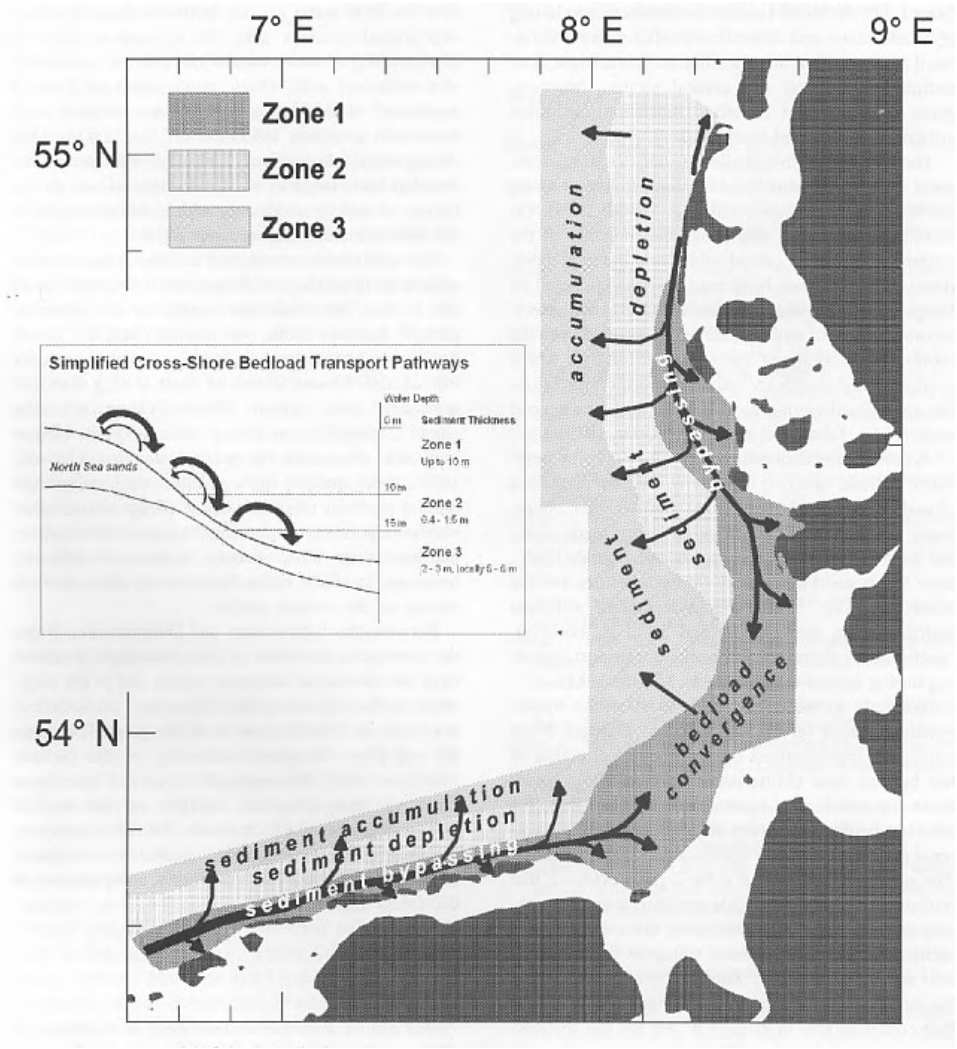


Abb. 4.9 (b): Konzeptionelles Modell der resultierenden Geschiebetransporte an der Deutschen Nordseeküste. Das Model basiert auf der 3-dimensionalen Verteilung mobiler Sedimente und Daten zum Geschiebetransport im Küstenvorfeld. (Aus Zeiler et al., 2000).

4.5 Das Schlickgebiet südöstlich von Helgoland

Mayer (1995) gibt folgende Zusammenfassung zum Kenntnisstand über das Helgoländer Schlickgebiet:

„Das Helgoländer Schlickgebiet bezeichnet einen ca. 500 km^2 großen Bereich süd- östlich von Helgoland (Abb. 4.10), in dem sich seit Jahrtausenden Schwebstoff ablagert. Die Mächtigkeit des Schlickkörpers, der die so genannte „Östliche Depression" füllt, wird mit maximal 29 m beziffert, seine Tiefe unter Wasser reicht von 15 m im Osten bis auf ca. 40 m im Westen.

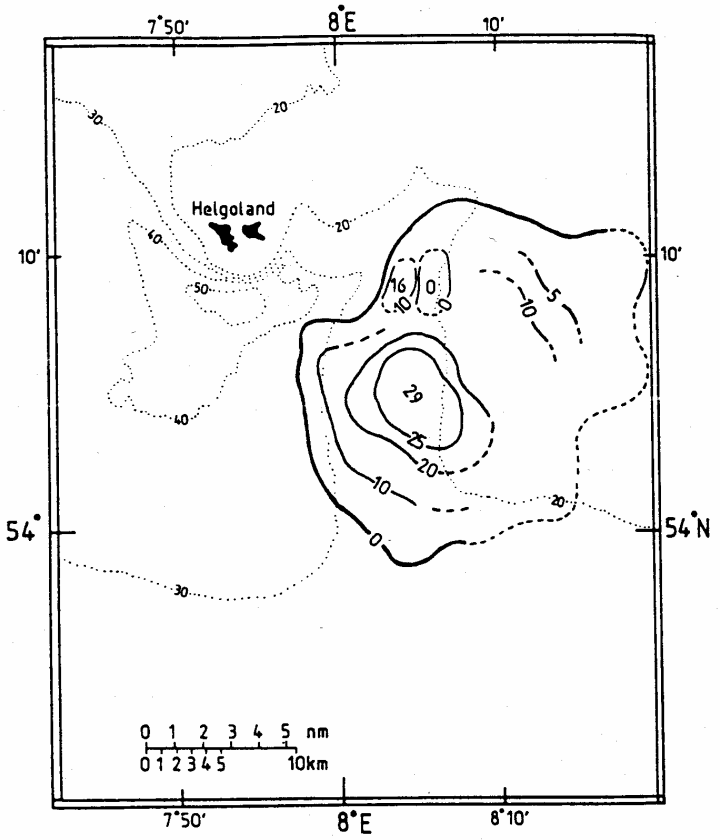


Abb. 4.10:
Das Helgoländer Schlickgebiet: Bathymetrie (punktierte Linien) und Schlickmächtigkeit (durchgezogene Linien) in Metern. (Aus von Haugwitz et al., 1988).

Das Schlickgebiet wird als Produkt relikter, ästuariner Sedimentablagerungen des frühen bis mittleren Holozän angesehen; ein kleinerer Teil besteht aus rezenten Depositionen. Einige Zeit nach Ende der pleistozänen Eiszeit, als vor ca. 8000 Jahren der Meeresspiegel auf -40 m gestiegen war, bildete das Elbe-Weser-Ästuar über dem Schlickgebiet eine tiefe Bucht, bevor es nach Westen, südlich um Helgoland herum und dann nach Nordwesten in das Urstromtal schwenkte. Östlich von Helgoland versperrte eine Moräne, der heutige Steingrund-Rücken, den direkten Weg nach Norden. Pleistozänes, marines Sediment wurde erodiert und lagerte sich, zusammen mit fluvialem Schwebstoff, in jener Bucht ab. Sie ließen den großen, relikten Teil des Helgoländer Schlickgebietes aus mittelsandigem Sediment entstehen.

Dieser Ablagerungsvorgang dauerte an, bis sich die Verbindung, die von der Eiderstedt-Halbinsel fast an Helgoland heranreichte, aufgrund des weiteren Meeresspiegelanstieges und der erosiven Wellenwirkung öffnete. Nach von Haugwitz et al. (1988) geschah das vor ca. 1500 Jahren; Irion et al. (1987) geben 2000 bis 3000 Jahre vor unserer Zeit an. Damals etablierte sich das heutige Strömungsregime der südöstlichen Nordsee mit seinen ostwärtigen Strömungen im Süden und den nordwärtigen Strömungen im Osten der Deutschen Bucht. Nach Reineck et al. (1967) begann in jener Zeit die bis heute andauernde Schwebstoffablagerung, die den kleineren, rezenten Teil des Schlickgebietes mit feinsandigen Sedimenten bildet.

Über die Sedimentationsrate, mit der die Schwebstoffe im Schlickgebiet deponiert werden, ist sich die Wissenschaft nicht einig. Unterschiedliche Untersuchungsmethoden führen offensichtlich zu unterschiedlichen Ergebnissen. So fanden Reineck et al. (1967) in Sedimentkernen Kohle- und Schlackeschichten, die von Dampfschiffen verklappt wurden. Aus deren Tiefe im Sediment schlossen die Autoren auf eine Rate von 2 mm/Jahr. Diese Zahl beinhaltet auch Sturmlagen, die mit durchschnittlich 45 mm/Jahrhundert beitragen. Eine Abschätzung von McCave (1970), die kontinuierliche, nur von extremen Wetterlagen unterbrochene Sedimentation voraussetzt, ergibt eine ähnliche Depositionsrate (1,7 mm/Jahr). Irion et al. (1987) untersuchten die Schwermetallgehalte in verschiedenen Horizonten ihrer Sedimentkerne aus dem Schlickgebiet. Sie kommen auf eine Rate von 10 mm/Jahr, im östlichen Teil auf teilweise über 40 mm/Jahr. Von Haugwitz et al. (1988) schließen aus seismologischen Befunden auf eine Depositionsrate von 3,2 mm/Jahr für den relikten und 5,1 mm/Jahr für den neueren Teil des Helgoländer Schlickgebietes.

Die Schätzungen über die Sedimentationsraten liegen nicht sehr weit auseinander, in der Regel bei einer Größenordnung von 1 bis 10 mm/Jahr. Einigkeit herrscht aber darüber, dass die Deposition durch bestimmte menschliche Aktivitäten nicht unerheblich erhöht wurde und wird. Dazu gehören u.a. die Verklappung von Klär- und Hafenschlamm (Anm. der Autoren: Wesentliche Einflüsse der Klärschlamm-Verklappung 1961–1980 werden von Pröber (1981) auf Grund des Mineralbestandes der Bodensedimente und der Suspensionen ausgeschlossen. Über Verklappung von Hafenschlamm vor 2005 ist nichts bekannt), Erhöhung der SPM-Konzentration in den Ästuaren und damit einhergehend des Flusseintrags von Schwebstoff in die Deutsche Bucht durch Baggerei und Schifffahrt (Turbulenz).
Auch bezüglich der Herkunft des im Helgoländer Schlickgebiet deponierten Materials werden in der Literatur verschiedene Ansichten vertreten, die die Weser- und Elbe-Ästuare als Ursprungsbereich begründen oder widerlegen. Nach Reineck et al. (1967) wird die „Flusstrübe" von Elbe und Weser mit der Gezeitenströmung in das Schlickgebiet transportiert, wo es hin und her driftet, ausflockt und vor allem zu Kenterzeiten sedimentiert. Hertweck (1983) macht auf der Grundlage hydrographischer Daten die Elbe als Hauptlieferant von feinem, suspendiertem Material aus, denn die Grenzen für die Schlickablagerung fallen im Süden und Westen mit der Grenze des Wasserkörpers „Elbwasser" zusammen. Von Haugwitz et al. (1988) meinen, im rezenten Teil des Schlickgebietes würde heutzutage vorwiegend Hafenschlamm, der in der Elbemündung verklappt wird, sedimentieren. Irion et al. (1987) argumentieren, dass die Ästuare Schwebstofffallen sowohl für marines als auch für fluviales Material seien. Deswegen könne das Schlickgebiet nicht überwiegend aus den Flüssen versorgt werden. Sie zitieren dazu einige sedimentologische Untersuchungen.

Zusammenfassend scheint eine Schwebstoffakkumulation im Bereich des Helgoländer Schlickgebietes ein Zusammenspiel folgender Phänomene als Ursache zu haben:

- Im flacheren Bereich südöstlich von Helgoland herrscht vorwiegend eine Strömung mit einer Tendenz in Richtung Schlickgebiet. Damit wird relativ schwebstoffreiches Wasser aus der Küstenregion und aus den Ästuaren tendenziell über das Schlickgebiet hinwegtransportiert. Südlich und südwestlich von Helgoland herrscht im unteren Teil der Wassersäule, der bei einer Tiefe von ca. 20 m beginnt, ebenfalls vorwiegend eine Strömung mit Tendenz zum Schlickgebiet, dieses Mal aber von der seewärtigen Seite. Auch dieses Wasser ist relativ reich an SPM, weil es das Bodenwasser ist.

- Im Bereich über dem Schlickgebiet entstehen wegen des Zusammentreffens unterschiedlicher Wassermassen in der Reststromverteilung häufig horizontale Wirbel, die den Abtransport des suspendierten Materials verhindern.

- Bei fast jeder Windrichtung existieren südlich von Helgoland vertikale Wirbel, deren aufsteigende Seite meist über dem Schlickgebiet liegt. Aufsteigendes Wasser hat immer Schwebstoff-Anreicherung zur Folge, weil die sinkenden Partikel aufgrund der geringen Horizontalgeschwindigkeiten aus solchen Auftriebsgebieten nicht mehr abtransportiert werden.

- Auch wenn der Anteil der aus den Ästuaren kommenden Schwebstoffe im Bereich des Helgoländer Schlickgebietes bei über 50 % liegen kann, wird davon ausgegangen, dass der Beitrag dieser Schwebstoffart zum Sedimentationsgeschehen geringer ist. Simulationen (Anm. der Autoren: siehe Mayer, 1995) haben gezeigt, dass sich der von den Ästuaren kommende Schwebstoff schon vorher ablagert und nur die leichte Fraktion mit der Strömung bis zum Schlickgebiet vordringt.

- Die Deposition von erodiertem Feinsediment findet ebenfalls im Bereich des Helgoländer Schlickgebietes in hohem Maße statt. Das Material stammt vermutlich aus den Sedimentbereichen des südlichen Endes der Elbe-Rinne, z.T. auch aus den Sedimenten der Weser-/Elbe-Außenästuare, die als Zwischenlager für das Gemisch aus fluvialem und marinem Schwebstoff fungieren können."

Wenn es nach diesen Ausführungen plausible Gründe für die Akkumulation von SPM im Schlickgebiet gibt, soll doch noch einmal an die Erosionswirkungen von Starkwindereignissen erinnert werden, die dem Schlickgebiet zeitweise auch SPM durch die dann erhöhten Restströme entziehen können. Auch beobachtet das BSH schon bei geringer Dünung (die Auswirkungen einer signifikanter Wellenhöhe von 3 m lassen sich bis in 50 m Tiefe nachweisen) aufgewirbeltes Sediment in der Wassersäule über dem Schlickgebiet. Im sohlnahen Bereich besteht eine permanente Trübung durch resuspendiertes Sediment, welches dann auch mit dem küstenparallelen Reststrom transportiert werden kann.

Allein die Tatsache der andauernden Existenz des Schlickgebiet im Bereich der küstenparallel Zirkulation von Nordseeschwebstoff zeigt aber, dass Erosion und Sedimentation langfristig zumindest ausgewogen sind.

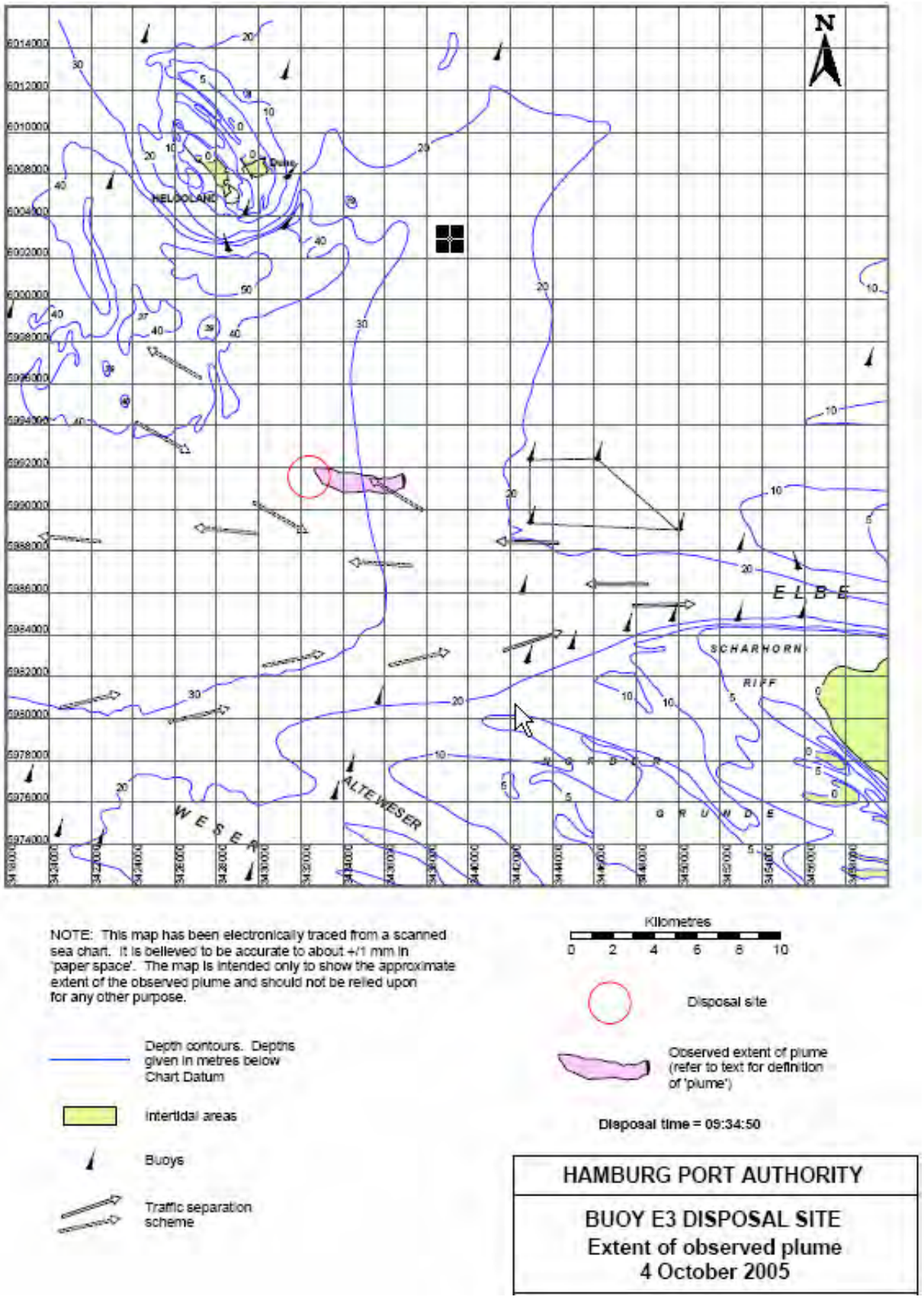
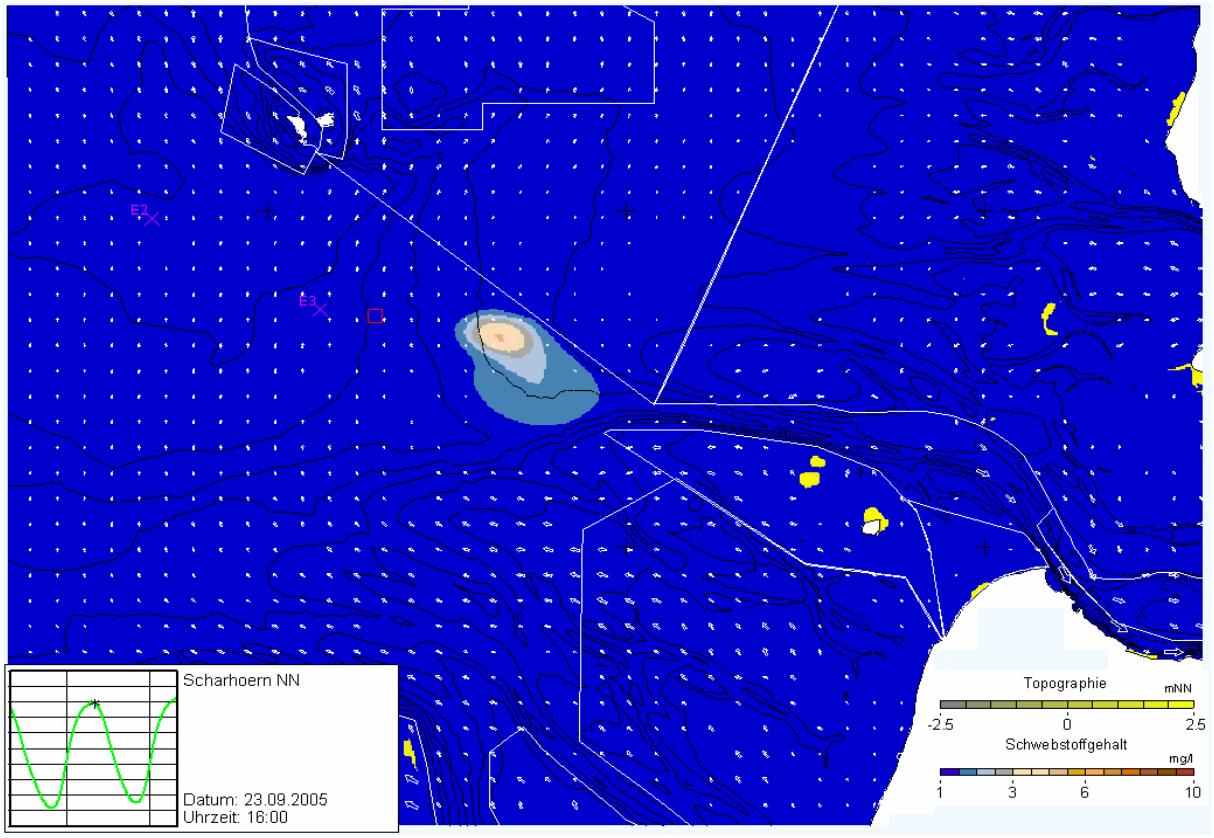
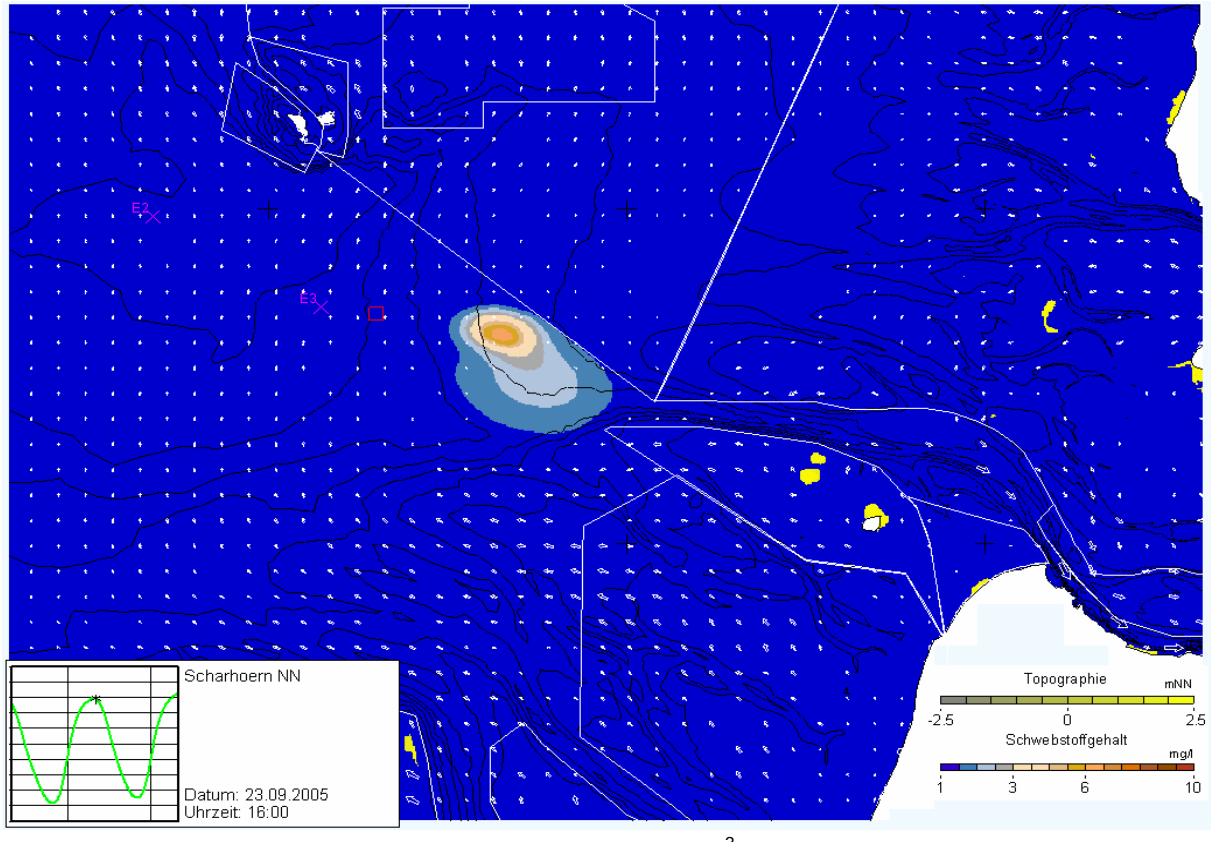


Abb. 4.11: Messung der Schwebstoffausbreitung bei der Umlagerung von Baggergut im Helgoländer Schlickgebiet bei Tonne E3 durch DRL (2005).



Schwebstoffgehalt (mg/L) aus der *Vergleichsrechnung* mit 7000 m^3 Baggergut nach 74 Umlagerungen.



Schwebstoffgehalt (mg/L) für die *Prognose* mit 10.000 m^3 Baggergut nach 74 Umlagerungen.

Abb. 4.12: Modellierung der Schwebstoffausbreitung bei der Umlagerung von Baggergut im Helgoländer Schlickgebiet bei Tonne E3 durch die BAW (aus Stammermann, 2006).

Neuere Arbeiten von DRL (2005) und Stammermann (2006) beschäftigen sich mit dem Verbleib von Baggergut aus dem Hamburger Hafen, das im Schlickgebiet bei Tonne E3 umgelagert wird. DLR setzte dabei das Sediview-System ein, mit dem sich aus der Rückstreuintensität eines ADCPs der Schwebstoffgehalt in der Wassersäule vom fahrenden Mess-Schiff aus bestimmen lässt. Zusammen mit den vom ADCP gemessenen Strömungen lassen sich dann auch SPM-Transporte berechnen. Mit diesem System war es möglich, die durch die Umlagerung entstehenden Schwebstofffahnen zu verfolgen (Abb. 4.11). Ergänzend hierzu sind numerische Simulationen der Umlagerungen mit dem Modell der Bundesanstalt für Wasserbau durch Stammermann durchgeführt worden. Dabei ergaben sich im Nahfeld der Verbringung gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Rechnung in der vertikalen SPM-Verteilung (Abb. 4.12). Das Modell ist darüber hinaus in der Lage die langfristige Ausbreitung des umgelagerten Materials auch dann zu simulieren, wenn es messtechnisch vom natürlichen Hintergrund nicht mehr unterscheidbar ist. Am Ende der Simulation, zwei Wochen nach Einbringen der letzten Baggerladung, ist eine Erhöhung der Konzentration um maximal 0,1 bis 1 mg/L erkennbar, eine vergleichsweise geringe Erhöhung bei Berücksichtigung einer natürlichen Schwebstoffkonzentration von 10–25 mg/L (Abb. 4.13). Auch während der Umlagerungen erreicht die Konzentration nur kurzzeitig Werte über 1 mg/L. Die Darstellung des Schwebstoffgehalts mit einer Skalierung von 1–10 mg/L verdeutlicht, dass zwei Wochen nach der letzten Umlagerung keine Konzentrationen über 1 mg/L mehr zu erkennen sind (Abb. 4.14).

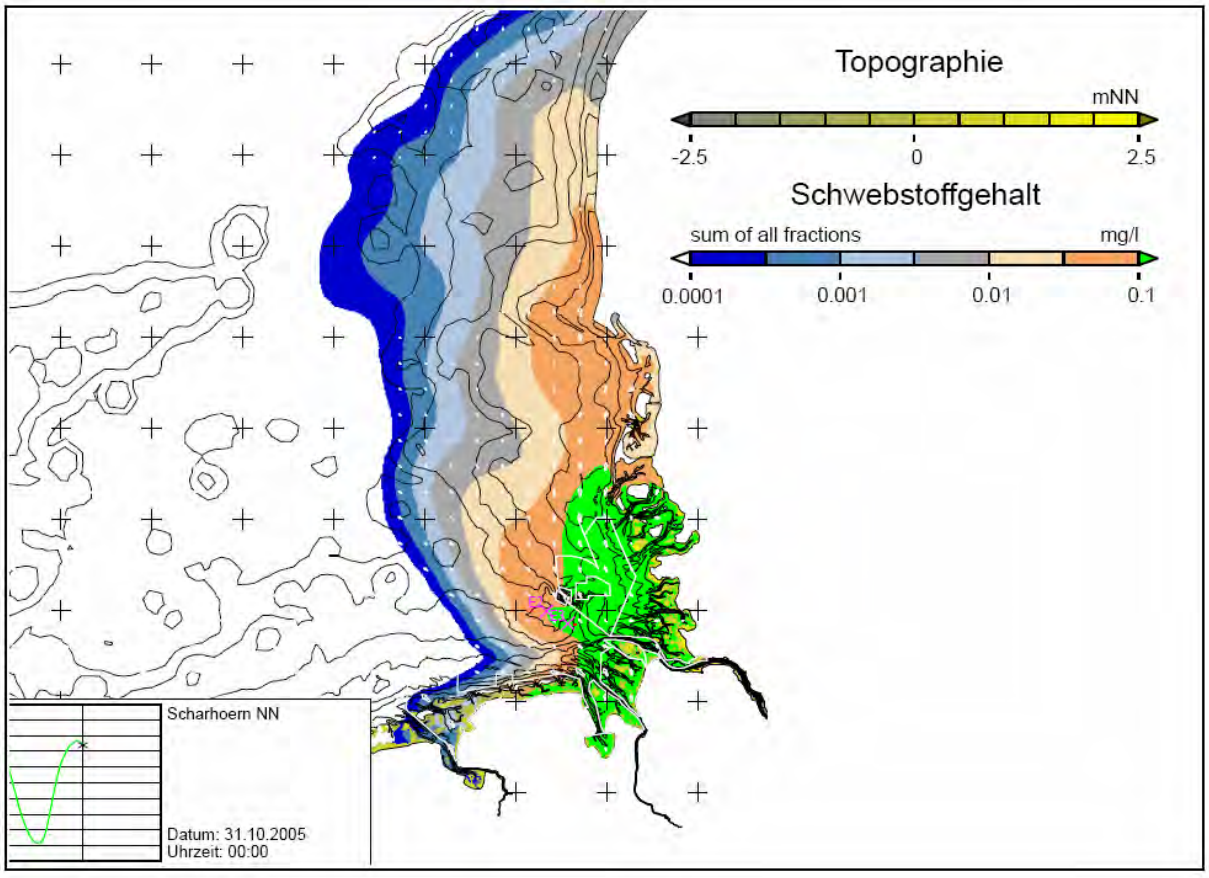


Abb. 4.13: Schwebstoffgehalt (mg/L) aus der Vergleichsrechnung mit Seegang am 31.10.2005 um 00:00 Uhr, 2 Wochen nach Ende der Umlagerungen (logarithmische Darstellung); genaue Auflösung siehe Abbildung 4.14.

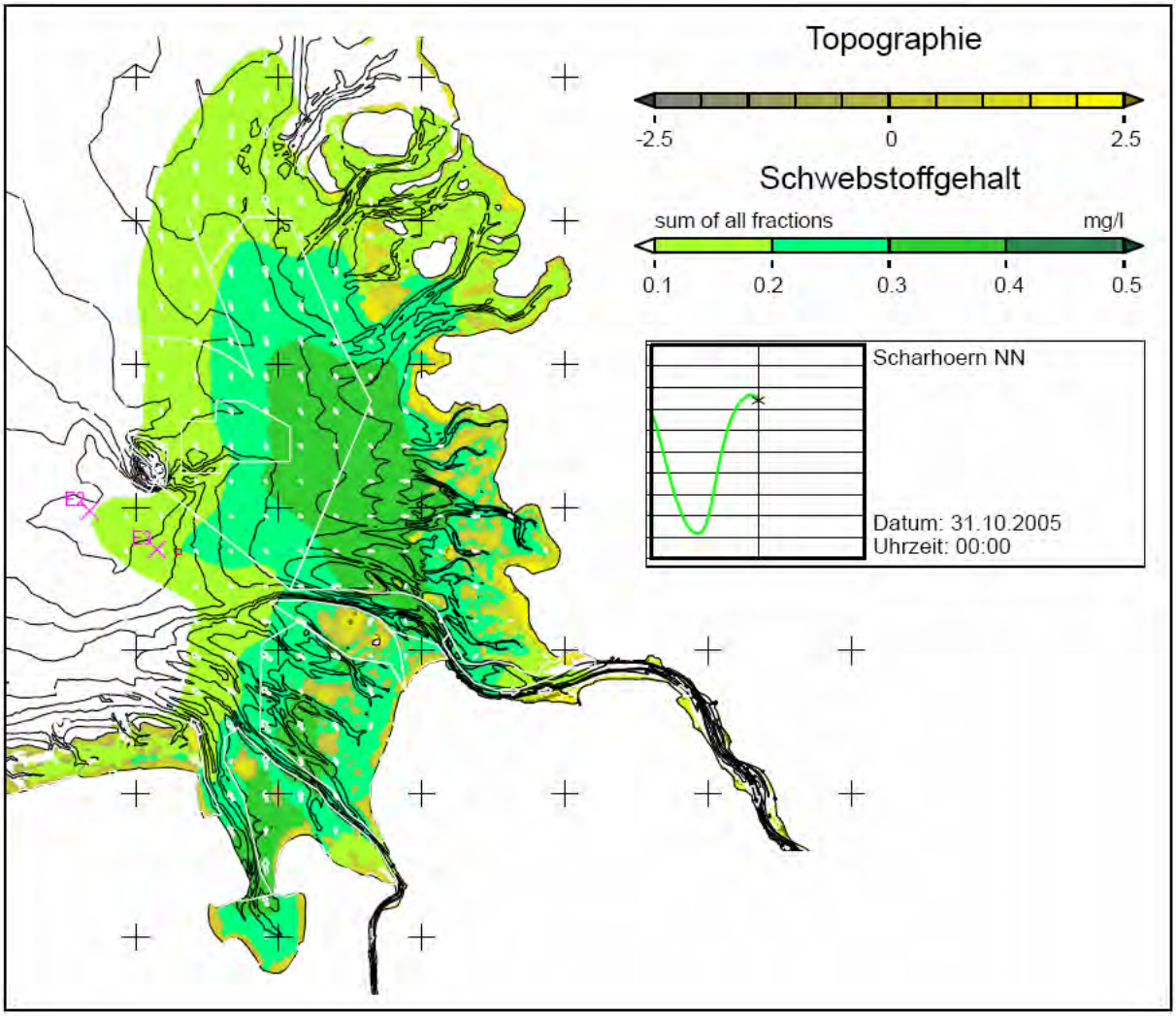


Abb. 4.14: Schwebstoffgehalt (mg/L) aus der Vergleichsrechnung mit Seegang am 31.10.2005 um 00:00 Uhr, 2 Wochen nach Ende der Umlagerungen (lineare Darstellung Skalierung von 0,1–0,5 mg/L).

4.6 Messungen zum Schwebstoffregime und zur Sedimentdynamik in der Nordsee und der Deutschen Bucht

Messungen zum Schwebstoffregime liegen ausgewertet und dokumentiert in den Abschlußberichten der schon oben erwähnten Projekte Biogeochemistry and Distribution of Suspended Matter in the North Sea and Implications to Fisheries Biology (1984–1988), ZISCH (1984–1989), SYNDWATT (1989–1991), PRISMA (1990–1993), TUVAS (1989-1992), KUSTOS-TRANSWATT (1994–1997) vor. In den Jahren 1998 und 1989 wurde durch das britische NERC (National Environmental Research Council) das umfangreiche North Sea Project (NERC-NSP) durchgeführt. Teil dieses Projektes war eine Serie von fünfzehn 12-tägigen Messfahrten in monatlichem Abstand. Dabei wurden an einem Netz von Stationen jeweils drei Schwebstoffproben in unterschiedlichen Wassertiefen entnommen. Die Daten sind über das British Oceanographic Data Centre (BODC) erhältlich. Auswertungen und Nachrechnungen dieser Messungen findet man z.B. bei Dyer & Moffat (1997) und Puls et al. (1997). Ältere Messungen liegen den Publikationen von Eisma zugrunde.

Das BSH hat eine ganze Reihe von Messungen zur Sedimentdynamik in der Deutschen Bucht und der Nordsee durchgeführt, die in der MUDAB Datenbank gespeichert sind. Fortlaufend erfolgt eine jährliche Aufnahme der Schwebstoffverhältnisse in der Nordsee durch

Schiffsmessungen, die im Sommer durch Vergleich mit Satellitenbildern ergänzt werden. Zur Untersuchungen der Auswirkungen von Umlagerungen im Helgoländer Schlickgebiet wurden vom BSH ein Sedimentmonitoringprogramm (Verklappung von Klärschlamm) sowie ADCP- und Schwebstoffmessungen bei der Tonne E3 durchgeführt.

4.7 Numerische Modelle für die Schwebstoff- und Sedimentdynamik in der Nordsee und der Deutschen Bucht

Die Bestimmung von Bilanzen des Feststofftransportes in der Nordsee und der Deutschen Bucht ist wegen der großen räumlichen Ausdehnung der Gebiete allein durch Messungen nicht möglich. Deshalb werden in Kombination mit Messdaten numerische Feststoff-Transportmodelle eingesetzt, die eine Berechnung der Schwebstoff-Flüsse und -Bilanzen ermöglichen. Da die meisten Bereiche der Nordsee zumindest im Sommer eine Schichtung aufweisen, sind seit 1990 fast alle SPM-Transportmodelle dreidimensional. Es gibt zwei unterschiedliche Verfahren bei der Simulation des Schwebstofftransportes:

1. Lagrange oder Tracerverfahren. Hierbei werden die Bahnen einzelner Schwebstoffteilchen im Strömungsfeld verfolgt. Die Teilchen sind Träger von unterschiedlichen Schwebstoffmassen, die sie mit dem Sediment an der Gewässersohle austauschen können. Ferner kann man die Partikel mit Eigenschaften wie Sinkgeschwindigkeit, Schadstoffbeladung, etc. ausstatten. Diffusive Prozesse werden durch Monte-Carlo-Verfahren berücksichtigt, d.h. die Positionen der Teilchen werden nach dem Transport durch die Strömung noch durch Zufallsverfahren verändert.

2. Eulersche Verfahren: Der Schwebstoff wird als Wasserinhaltsstoff wie Salz und Temperatur über seine Konzentration in den Gitterboxen beschrieben. Der Transport über die zeitliche Änderung des Konzentrationsfeldes wird durch (numerische) Lösung der Advektions-Diffusionsgleichung beschrieben. Dabei werden zum Teil mehrere Schwebstofffraktionen nach Korngröße oder Sinkgeschwindigkeit getrennt behandelt. Bei Eulerschen Verfahren ist es einfacher die Auswirkungen der Feststoffkonzentration auf die Dichte des Gewässers zu berücksichtigen. Dies spielt bei den hohen Konzentrationen in Küstenähe eine Rolle.

Alle Modelle beinhalten Prozessformulierungen für Deposition, Resuspension und Erosion, unterscheiden sich aber in deren Detailliertheit. Prozesse, die nur in einigen Modellen berücksichtigt werden, sind: Der Beitrag des Seegangs zur Bodenschubspannung, ein Bodenmodell der Sohle mit Schichten unterschiedlichen Grades der Sedimentkonsolidierung, der Beitrag biologischer Organismen wie Bioturbation und Filtration. Zur Zeit noch in Entwicklung sind Prozessbeschreibungen für den Aufbau und Zerfall von Schwebstoff-Flocken.

Eine Reihe verschiedener Modelle ist in der Vergangenheit zur Simulation von Schwebstofftransporten im Bereich der Deutschen Bucht und der Nordsee eingesetzt worden. Das von Pohlmann und Puls (1994) in den oben angeführten verschiedenen Forschungsprojekten (TUVAS, PRISMA, KUSTOS-TRANSWATT) eingesetzte Modell ist heute nicht mehr betriebsbereit. Zur Zeit betreibt allein das BSH ein operationelles Schwebstofftransportmodell für die Nord- und Ostsee, dessen Schwebstoffmodul bei GKSS entwickelt wurde (Gayer et al, 2004). Weitere für den Einsatz in der Deutschen Bucht geeignete Modelle gibt es beim Institut für Meereskunde der Universität Hamburg (Rolinski, 1999) und den kommerziellen Anbietern Delft Hydraulics (Delft-3D-WAQ) und dhi (MIKE 21).

Frei zugängliche Modellsysteme sind das im Rahmen eines EU-MAST III Projektes entwickelte COHERENS (http://www.mumm.ac.be/~patrick/mast/) und das von Burchard und Bolding entwickelte GOTM/GETM (http://www.bolding-burchard.com/).

5. Morphologische Eingriffe in der Tide-Elbe

„Trotz verschiedener Eingriffe blieb der Zustand der Tide-Elbe in seiner Ursprünglichkeit bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts weitgehend erhalten. Ab 1840 wurde mit dem Ausbau des Hamburger Hafens begonnen. 1845 entstanden die Anlagen im Strom, 1866 mit dem Sandtorhafen der erste künstliche Hafen. In der Folgezeit musste sich die Elbe den immer größer werdenden Schiffen anpassen." (Riedel-Lorjé, 2005)

„Mit Einführung der Dampfbagger um 1850 waren auch die technischen Voraussetzungen für Elbevertiefungen in großem Maßstab gegeben. Ab 1859 erfolgte der erste Ausbau der Elbe von 1,7–2 m im Bereich Blankenese auf 5,3 m unter MTnw (Kausch, 1996). Mit der sich immer weiter entwickelnden Containerschifffahrt, mit höheren Ladungskapazitäten, jedoch auch größerem Tiefgang, sah sich die Freie Hansestadt Hamburg in die Pflicht genommen, durch weitere Ausbaumaßnahmen der Fahrrinne die Stadt als Weltwirtschafts- und Welthandelsstandort zu sichern. Seit 1945 wurde die Fahrrinne dreimal vertieft (die vierte Runde steht bald an). Mit dem ausgebaggerten Sand wurden Elbinseln angelegt und vergrößert, so dass wertvolle Süßwasserwatten zusätzlich verloren gingen. Die ökologischen Belange der Elbe wurden dabei den ökonomischen Interessen selbstverständlich untergeordnet. Die sehr kostenintensive Unterhaltungsbaggerei zur Aufrechterhaltung der abgesenkten Gewässersohle der stark sedimentbefrachteten Elbe stand dabei jedoch nicht in der Kritik.“ (Lange & Bischoff, 2003)

Zusammen mit den Ausbaumaßnahmen der Fahrrinne ging eine tiefgreifende Stromregulierung einher. Sie führten bis in die Gegenwart zur Abnahme der mosaikartigen Strukturen im Fluss sowie der Wattenflächen und Flachwasserbereiche. „Insgesamt wurde die Deichlinie von 1.200 Kilometer im Jahre 1902 auf ganze 602 km bis 1979 verringert. Wertvolles Vordeichland, die potenziellen Überflutungsräume bei Hochwasser und Sturmflut, verschwanden hinter den neuen Deichen. Um 75 Prozent nahmen diese Überflutungsflächen ab: In Schleswig-Holstein von 197 auf 49 km^2, in Niedersachsen von 139 auf 33 km^2. Die alten Nebenarme der Elbe wurden dicht gemacht: Kein Hochwasser kann heute mehr in die Alte Süderelbe, den Ruthenstrom, die Wischhafener Süderelbe, die Haseldorfer Binnenelbe oder die Wedeler Au einfließen. Doch damit nicht genug: Sämtliche Nebenflüsse der Unterelbe wie Stör, Krückau, Pinnau, Oste, Schwinge, Lühe, Este und das Freiburger Hafenpriel wurden mit Sperrwerken versehen, die bei Sturmflutgefahr geschlossen werden.

Die dem Fahrwasser zugekehrten Ufer sind heute fast in der gesamten Länge der Unterelbe durch Steinschüttungen sowie Kaimauern im Bereich von Kraftwerken und Industrieanlagen befestigt, so dass Schlickufer, Sandstrände und Schilfgürtel die Ausnahme bilden. Obwohl die Unterelbe an vielen Stellen immer noch von optisch imposanter Breite ist, bedeuten diese Strombaumaßnahmen eine fortschreitende Kanalisierung." (RdE, 2006)

„Durch die Kanalisierung und Ausbaggerung verstärkte sich der Tidenhub am Pegel St. Pauli zwischen 1850 und 1980 um 1,5 auf 3,5 Meter, und die möglichen Sturmflutwellen erreichen nun Hamburg weitaus schneller und heftiger als in den vergangenen Jahren. Durch die Verringerung der Reibung des Wassers ist es zu einer Beschleunigung der Tidewelle gekommen. Sie benötigt heute von Cuxhaven nach St. Pauli nur noch drei Stunden und vierzig Minuten, zwanzig Minuten weniger als bei der großen Flut von 1962. Und die Sturmflutsicherheit? Schon 1976, als die neue Deichlinie noch nicht ganz fertig war, trat wieder eine „Jahrhundertflut" ein, die einen noch höheren Pegel entlang der Unterelbe erreichte (in St. Pauli + 6,45 m NN), dann 1981 mit + 5,80 m NN, dann. . Bis heute ist keine Obergrenze für die Sturmflutscheitel bekannt bzw. voraussagbar. Die drei Faktoren, die eine Sturmflut bedingen (Fernwelle aus dem Atlantik, maximaler Windstau und Springtide) sind nie gleichzeitig aufgetreten, so dass die „höchstmögliche Sturmflut" (also die „Jahrtausendsturmflut") noch nicht vorgekommen ist.“ (RdE, 2006).

Die Tabelle 5.1 vermittelt eine Übersicht über die baulichen Maßnahmen an der Elbe vom 9. Jahrhundert an.

Tab. 5.1: Baumaßnahmen in der Tide-Elbe. Nach: PG ÖKOL. + UMWELT NORD ET AL. 1997, ARGE ELBE 1984, www.wsa-hamburg.de, www.rettet-die-elbe.de.

Jahr	**Baumaßnahme**
9. Jh.	erste Hafenanlagen
ab 11. Jh.	Entstehung erster Runddeiche
12./13. Jh.	Geschlossene Deichlinie um die Elbe
nach 1300	Abdämmung der Gose Elbe
1471	Abdämmung der Dove Elbe
15. Jh.	Erste Inseldurchstiche und Flussregulierungen (Norderelbe, Alster)
1616	Verwendung von Steinschüttungen bei Scheelenkuhlen, Brokdorf, Hollerwettern
1730	Leitdamm bei der Kugelbake in Cuxhaven
1859	Erster Elb-Ausbau auf 5,3 unter MTnw
1886/1887	Fahrwasservertiefung im Bereich Blankenese auf 6 m unter MTnw; Elbevertiefung im Bereich zwischen Altona und Branshausen (Stadersand) auf 8 m unter MTnw
1887–1910	Elbevertiefung (teilweise) bis zu 10 m unter MTnw
1906–1914	Festlegung und Aufspülung von Schweinesand, Hanskalbsand
1914–1920	Festlegung und Aufspülung von Lühesand
1922–1930	Festlegung und Aufspülung vom "Hungrigen Wolf/Pagensand
1934–1936	Errichtung des Trischendamms
1936–1950	(mit Kriegsunterbrechung) Ausbau durchgängig auf 10 m unter MTnw
1951	Abtrennung der Gose- und Doveelbe durch Bau der Tatenberger Schleuse
1953–1959	Ausbau der Rhinplatte als Maßnahme des 10-m-Ausbaus der Elbe
1960	Bau des Wehres Geesthacht
1957–1961(1962)	Fahrrinnenvertiefung auf 11 m unter MTnw
1962	Abdämmung der Alten Süderelbe im Bereich Finkenwerder zum Mühlenberger Loch
nach 1962	Eindeichung mehrerer Nebenelben: Borsteler Binnenelbe mit Hahnöfer Sand (1975), Bützflether Sand (1971), innerer Haseldorfer Binnenelbe (1978)
1967/1968	Verbindung der beiden Inseln Hanskalbsand und Neßsand durch einen ca. 1 m über MThw liegenden Spüldamm, dadurch Unterbindung des Durchflusses durch die Schladermundsche Allee (Leitwerkfunktion).
1967	Sturmflutsperrwerk an Este, Lühe, Freiburger Hafenpriel
1968	Sturmflutsperrwerk Oste
1964–1969	Vertiefung der Elbe auf 12 m unter MTnw
1966–1969	Sturmflutsperrwerk an Pinnau und Krückau
1964–1969	Ufervorspülung vom Störleitdamm bis zum Bütteler Hafenpriel

und 1975–1976	Weitere Ufervorspülungen vom Störleitdamm bis zum Bütteler Hafenpriel
Mitte–Ende der 60er	Aufspülung umfangreicher Außendeichsländereien auf Bützflether Sand
1971	Sturmflutsperrwerk Schwinge
1970–1974	Ufervorspülung/Befestigung u. Aufspülung einer Pionierinsel in der Lühesander Süderelbe
1973/1974	Entstehung eines Zweistromsystems aus Hauptelbe und Hahnöfer Nebenelbe
1971–1974	Sturmflutsperrwerk Ilmenau
1972–1975	Sturmflutsperrwerk Stör
1972–1977	Aufspülung der Wattfläche „Schwarztonnensand"
1978	Sturmflutsperrwerk Wedeler Au
1974–1978	13,5-m-Ausbau – MTnw und Aufspülungen: Hollerwettern-Scheelenkuhlen, Vorland Glückstadt, Fährmannssand, Hanskalbsand-Neßsand; Vordeichung von Wedel bis Scholenfleth/Haseldorf (Abtrennung Haseldorfer Binnenelbe)
1975–1977	Vordeichung/Deicherhöhung Nordkehdingen von der Ostemündung bis Freiburg
1976–1978	Vordeichung/Deicherhöhung vom Asseler Sand und Krautsand
1978	Sturmflutsperrwerk Wischhafener Süderelbe & Siel am Ruthenstrom auf Krautsand
1978–1981	Aufspülung von Pagensand
1983–1985	Errichtung von Flügeldämmen zur Nebenelbe im Bereich Rhinplatte
1987–1989	Instandsetzung des Leitdammsystems Pagensand-Nord & neuer Leitdamm von Ende des Flügeldammes an der Nebenelbe bis zur Fahrwasserseite der Insel
–1992	Abgrabungen des Schwarztonnensandes (Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse)
1993	Fahrrinnenanpassung durch das Freiburger Watt an Fahrrinnentiefen des Freiburger Hafenpriels
1991–2000	Fahrrinnenanpassung der Elbe auf 14,4 m (Sockel) mit Umweltverträglichkeitsprüfung).

6. Auswirkungen der Eingriffe

Es ist sicherlich nicht zu bestreiten, dass alle die oben erwähnten Baumaßnahmen die Unterelbe mehr und mehr von ihrem natürlichen Zustand entfernt haben. Um noch einmal die in Kap. 5 zitierten Beschreibungen der Veränderungen in eigenen Worten zusammenzufassen:

– die Unterelbe wurde tiefer, gerader und schneller; der Fluss wurde kanalartig;
– natürliche Ufer wie Sandstrände, Schilfgürtel und Schlickgebiete wurden zurückgedrängt durch Kaimauern, Steinschüttungen und andere Befestigungen;
– Watten und Flachwasserbereiche wurden stark reduziert;
– ein hoher Prozentsatz von Vordeichsland und damit von potenziellem Überflutungsraum wurde preisgegeben;
– die Nebenflüsse wurden durch Sperrwerke abgetrennt.

Im WWF-Papier vom März 2003 (Lange und Bischoff, 2003) heißt es summarisch: „Zusammenfassend ist festzustellen, dass an der Elbe seit der Hafenerweiterung südlich der Norderelbe und der ersten Elbvertiefung 1859 kontinuierlich – abgesehen von der kriegsbedingten Pause – gebaut, erweitert, gesichert und vertieft wurde. Jede einzelne Maßnahme hat die Gewässermorphologie, die hydrologischen Verhältnisse, Wasserbeschaffenheit, Böden und Sedimente und die Biozönose beträchtlich beeinflusst und verändert."

Die Veränderung der Gewässermorphologie kann durch Vergleich heutiger mit historischen Karten (z.B. Waghenaer 1585; Sörensen 1695; Beautemps-Beaupré 1812 mit bereits präzisen Angaben zur Bathymetrie) leicht verfolgt werden, während die Entwicklung der hydrodynamischen Verhältnisse, die in komplexer Weise nicht nur von wasserbaulichen Maßnahmen, sondern auch von meteorologischen und ozeanographischen Randbedingungen abhängen – abgesehen von Pegel- und bathymetrischen Daten bis zurück ins frühe 19. Jahrhundert – allenfalls über Modellrechnungen nachvollziehbar ist. Die Wasserbeschaffenheit – soweit sie die gelösten und partikulären Inhaltsstoffe betrifft – wurde erst ab 1979 einigermaßen systematisch untersucht: von der ARGE-Elbe, seit den 1980er Jahren teilweise von der Bundesanstalt für Gewässerkunde, und in Einzelaktionen von Strom- und Hafenbau (Cuxsampler), vom GKSS-Forschungszentrum Geesthacht (BILEX-Kampagnen und Querschnittsrepräsentanzuntersuchungen) sowie von den Wasser- und Schifffahrtsämtern Hamburg, Brunsbüttel und Cuxhaven. Leider lassen sich aber auch die vier- bis höchstens 12mal im Jahr per Hubschrauber durchgeführten Probenahmen der ARGE im Elbelängsprofil wegen der vielfältigen Einflussfaktoren (Oberwasser, Meteorologie, Vegetation, Temperatur) nicht bzw. nur sehr eingeschränkt für eine Beurteilung der Auswirkungen der letzten Baumaßnahmen in der Tide-Elbe heranziehen.

Bereits sechs Jahre vor der letzten Fahrrinnenanpassung 1999 macht das Amt Strom- und Hafenbau in einem Informationspapier vor Einleitung der Umweltverträglichkeitsuntersuchung (s. u.) eine vorsichtige Prognose zu den möglichen aquatischen und ökologischen Auswirkungen der Vertiefung (Strom- und Hafenbau, 1993):

„Die durch die Fahrrinnenanpassung bedingten hydrologischen Auswirkungen können ihrerseits Folgewirkungen auf den aquatischen und terrestrischen (Vordeichsland) Lebensraum hervorrufen.

So können durch einen Anstieg des MThw die hydrologischen Verhältnisse der Vordeichsländereien und damit die dortige Lebensgemeinschaft verändert werden. Der Abfall des MTnw, der erfahrungsgemäß größer ist als der Anstieg der MThw, vergrößert den Anteil der Wattflächen zu Lasten der dauernd überfluteten Flachwasserbereiche. In gleicher Weise können Verminderungen der Strömungsgeschwindigkeiten mit den damit verbundenen Sedimentationstendenzen wirken, während Geschwindigkeitserhöhungen gegenteilig wirken.

Damit kann in der Tendenz nicht nur der Anteil eines für Organismen als Reproduktions- und

Rückzugsgebiet unverzichtbaren Teilhabitats vermindert, sondern möglicherweise auch der Sauerstoffhaushalt verändert werden, da in den relativ gut lichtdurchfluteten Flachwasserbereichen eine hohe Sauerstoffproduktion durch das Phytoplankton zu beobachten ist.

Die Brackwasserzone kann sich möglicherweise weiter stromauf verschieben. Durch den daraus folgenden Anstieg des Salzgehaltes in vorher rein limnischen Bereichen kann sich dann die Artenzusammensetzung verändern und so die Bioproduktivität vermindert werden." (Strom- und Hafenbau, 1993)

Zu den Begriffen Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) und Beweissicherung, die im Folgenden eine wichtige Rolle spielen, seien an dieser Stelle einige Anmerkungen gemacht. Eine neue gesetzliche Situation hat ab 1990 die systematische Untersuchung der durch Baumaßnahmen verursachten Veränderungen nicht nur für wünschenswert, sondern zur unabdingbaren Pflicht gemacht: die *Beweissicherung* im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung.

„Der Zweck einer Beweissicherung bestand ursprünglich darin, aus einem Vorhaben möglicherweise resultierende, bei der Zulassung aber nicht eindeutig vorhersehbare, nachteilige Wirkungen für bestehende Rechte Einzelner festzustellen und nachfolgend, in Kenntnis des tatsächlichen Ausmaßes, einen sachgerechten Interessenausgleich herbeizuführen.

Nach Erlass der Richtlinie der Europäischen Gemeinschaften über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) im Jahre 1985 und insbesondere nach In-Kraft-Treten des UVP-Gesetzes des Bundes im Jahre 1990 ordnen die Zulassungsbehörden Beweissicherungen zunehmend auch im Interesse des Allgemeinwohls an. Dies trifft insbesondere für die Beweissicherungsauflagen des Planfeststellungsbeschlusses zum Ausbau auf 14,4 m Solltiefe zu, die den im Zuge der Umweltverträglichkeitsuntersuchung dokumentierten Kenntnislücken bei den komplexen Wirkungszusammenhängen in der Unter- und Außenelbe Rechnung tragen und die nach Auffassung der Landesregierung dem damaligen Kenntnisstand angemessen sind." (zitiert aus der Antwort der Schleswig-Holsteinischen Landesregierung auf eine Anfrage des Abgeordneten Klaus Müller – Bündnis90/Die Grünen – am 21.12 2005).

Tabelle 6.1 zeigt die Beziehung zwischen Elbvertiefungen und Beweissicherungsverfahren.

Tab. 6.1: Elbvertiefungen und Beweissicherungsmaßnahmen.

Ausbauzeitraum	**Solltiefe unter KN**	**geplante Beweissicherung**
1936–1950	10 m	unbekannt
1957–1962	11 m	unbekannt
1964–1969	12 m	unbekannt
1975–1978	13,5 m	1975 bis in die 1990er Jahre
1998–2000	14,4 m	2000–2010 (hydrologische Parameter bis 2015)

Zum 13,5-Meter-Ausbau liegen nicht öffentlich zugängliche Einzelberichte bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, der Hamburg Port Authority (ehemals Amt Strom- und Hafenbau), dem Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg sowie den Einvernehmensbehörden der Länder vor. Daraus geht hervor, dass nach dieser Baumaßnahme Wasserstandsänderungen von bis zu vier Dezimeter eingetreten sind; bis zu zwei Dezimeter waren prognostiziert worden.

Die Ergebnisse der Beweissicherung zum 14,4-Meter-Ausbau sind im Internet (www.cux.wsd-nord.de/htm/zustimm.asp) einschließlich der jährlich fortgeschriebenen zusammenfassenden Berichte allgemein zugänglich. Im Rahmen dieser Baumaßnahme wurden die zu erwartenden Veränderungen des Tidehubes mit maximal 11 cm in Hamburg prognostiziert. Auf dieser Grundlage wurde der Umfang der Auswirkungen abgeleitet. Hierzu zählen z.B. die Änderung der Flächenverteilung von Vorland, Watt, Flach- und Tiefwasserbereichen.

Diese sind, einschließlich zulässiger Schwellenwerte, Gegenstand der Beweissicherung. Zum Nachweis der morphologischen Stabilität des Ausbaus, insbesondere im Bereich der Fahrwassersohle, sind konkrete Erhebungen, Auswertungen und zulässige Schwellenwerte im Planfeststellungsbeschluss festgesetzt worden. Die im Planfeststellungsbeschluss vorgegebenen Schwellenwerte wurden bisher (/2005) nicht erreicht. Zum Parameter Wasserstand werden derzeit (Dez. 2005) zwischen Maßnahmenträger und Ländern Fragen der Datenaufbereitung geklärt.

Der WWF stellt in seinem Papier vom Dezember 2005 „Die Elbevertiefung von 1999" folgendes fest (Kerner und Jakobi, 2005):

– Die Änderung der Tidewasserstände bewegt sich im Rahmen der UVU-Prognose.

– Über die UVU-Prognose hinausgehende Änderungen betreffen:
  a) Vertiefung und Verbreiterung des Sauerstoffdefizits in der Tide-Elbe,
  b) Zunahme der Feinkornfraktion im gesamten Süßwasserbereich der Tide-Elbe mit besonders gravierenden Auswirkungen auf die ökologische Funktion der Seitenräume,
  c) Erhöhter Sedimentauftrag (Verschlickung) im Bereich der Nebenelben,
  d) Erhebliche Zunahme der Unterhaltungsbaggerung im Hamburger Hafen,
  e) Nicht quantifizierbare Zunahme des Stromauftransports von Sedimenten durch Veränderung der hydrologischen Verhältnisse.

– Auswirkungen, die nicht prognostiziert worden sind:
  f) Abnehmender Austrag von Feinsedimenten aus dem Süßwasserbereich der Tideelbe.

– Auswirkungen, die aufgrund fehlender Daten bisher nicht in Art und Umfang nachgewiesen werden konnten:
  g) Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen in den Flachwasserbereichen,
  h) Verlagerung der Brackwasserzone stromaufwärts,
  i) Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände.

Obwohl diese Statements interessanterweise nach Art einer „self-fulfilling prophesy" an das Informationspapier von Strom- und Hafenbau (1993) erinnern, können sie nicht unwidersprochen bleiben. Auf dieses Papier in der oben erwähnten „Kleinen Anfrage" im Schleswig-Holsteinischen Landtag angesprochen, konstatiert die Landesregierung, dass – nach ihrer Auffassung – die in der WWF-Studie „Die Elbvertiefung von 1999" dargelegten Kausalitäten nicht durchgehend als gegeben angesehen werden können. So sei beispielsweise der Sauerstoffhaushalt vielfältigen Einflussgrößen unterworfen, die sich aufgrund der vorliegenden Daten kaum – statistisch abgesichert – voneinander trennen ließen.

Dies gelte in ähnlicher Weise auch für den nach der WWF-Studie über die UVU-Prognose hinaus gehenden Sedimentauftrag in den Bereichen der Nebenelben. Nach Auffassung der Landesregierung könne eine Überschreitung der Schwellenwerte nur dann als gegeben angesehen werden, wenn sich der flächenmäßige Anteil der Flachwasserbereiche um mehr als 10 Prozent verändert habe, was bisher (2005) nicht der Fall sei.

Anlass zur Besorgnis sehe die Landesregierung allerdings in der räumlichen Veränderung der im Zuge der Unterhaltung anfallenden Baggermengen – unabhängig von einem nicht kausalen Zusammenhang mit der letzten Elbvertiefung.

Im Folgenden soll auf die Statements (a) bis (e) im WWF-Papier im Detail eingegangen werden. Die Aussage (f) – *abnehmender Austrag von Feinsedimenten* – ist gekoppelt mit Aussage (b) – *Zunahme des Feinkornanteils im Süßwasserbereich* – und wird dort behandelt. Statement (g) – *Erhöhung der Schwebstoffkonzentration in den Flachwasserbereichen* – wird

in Verbindung mit den Nebenelben diskutiert. *Die Verlagerung der Brackwasserzone stromaufwärts* (h) ist bei einem oberwasserabhängigen Variationsbereich von 80 km und einer Stromaufverschiebungstendenz von 5–20 km, wie in der Studie von Bergemann (Bergemann, 1995) für die Jahre 1953 bis 1994 festgestellt, auch nach der letzten Fahrrinnenvertiefung im Prinzip möglich, aber sicherlich nicht nur „bisher noch nicht", sondern generell nicht quantifizierbar. Ähnliches gilt für die Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände, wofür es keinerlei Anhaltspunkte gibt.

a) Sauerstoffdefizit

Ein nach Daten der ARGE-Elbe von der BfG aufbereitetes Diagramm zeigt das räumliche Auftreten von Sauerstoffgehalten unter 4 mg O_2/l in der Tide-Elbe für die Jahre 1990 bis 2004. Abgesehen vom Jahr 2002, in dem die Elbe vom August-Hochwasser geprägt war, ist nach der Fahrrinnenanpassung von 1999 keine einschneidende Veränderung im Auftreten von Sauerstoffmangelsituationen zu erkennen. Die BfG kommt zu dem Schluss: „Eine signifikante Verschlechterung (der Sommermittelwerte des Sauerstoffgehalts in der Unterelbe) nach dem Bezugsjahr 1999 ist statistisch nicht zu belegen." (BfG, 2006).

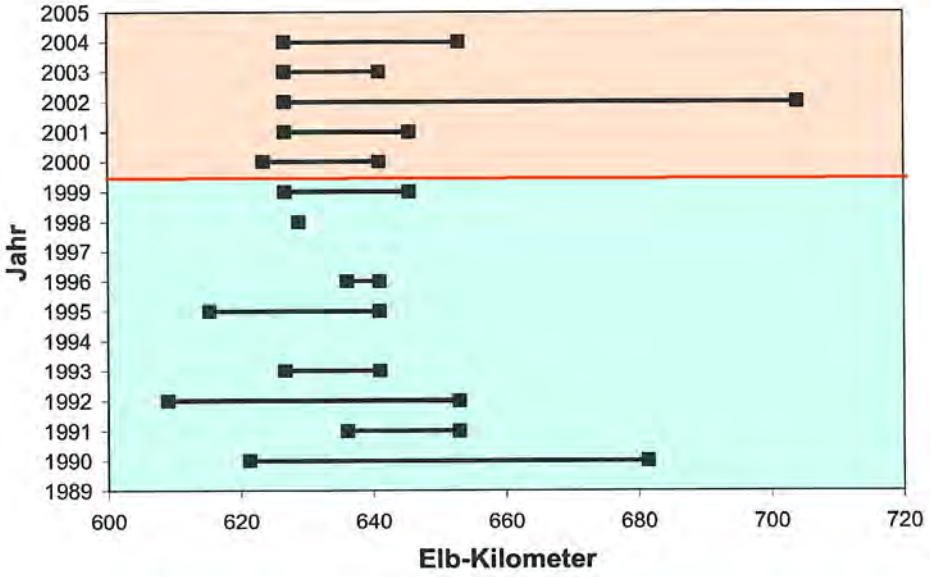


Abb. 6.1: Räumliches Auftreten von Sauerstoffgehalten unter 4 mg O_2/l in der Tide-Elbe für die Jahre 1990 bis 2004. (Nach BfG, 2006).

b) Feinkornfraktion

In einer ersten Fassung des WWF-Papier wurden die Feinkornanteile unter 63 µm des Sediments aus dem Hamburger Hafen bzw. des schwebstoffbürtigen Sediments von Grauerort und Seemannshöft in zwei Gruppen zusammengefasst: 1996–1998 und 1999–2002 (s. Diagramm Abb. 6.2), und dieses Diagramm suggeriert – abgesehen von den durch die Fehlerbalken angedeuteten großen Schwankungen – vor allem für Seemannshöft eine Erhöhung des Feinkornanteils.

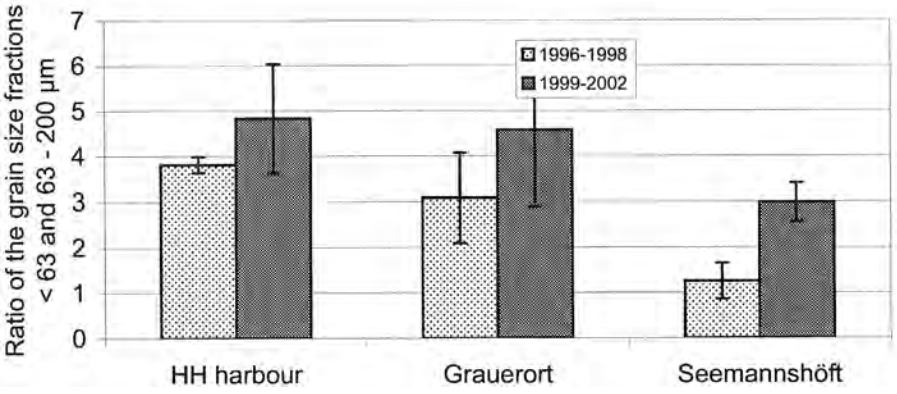


Abb. 6.2: Feinkornanteile unter 63 µm des Sediments aus dem Hamburger Hafen bzw. des schwebstoffbürtigen Sediments von Grauerort und Seemannshöft.

Stellt man die Daten des prozentualen Feinkornanteils in den schwebstoffbürtigen Sedimenten über einen größeren Zeitraum und in feinerer Auflösung dar, kann man statt eines längerfristigen Trends neben einer hohen Fluktuation eine starke Abhängigkeit vom Oberwasser erkennen, wobei erwartungsgemäß mit dem höheren Abfluss gröbere Korngrößen bzw. ein geringerer Feinkornanteil verbunden sind.

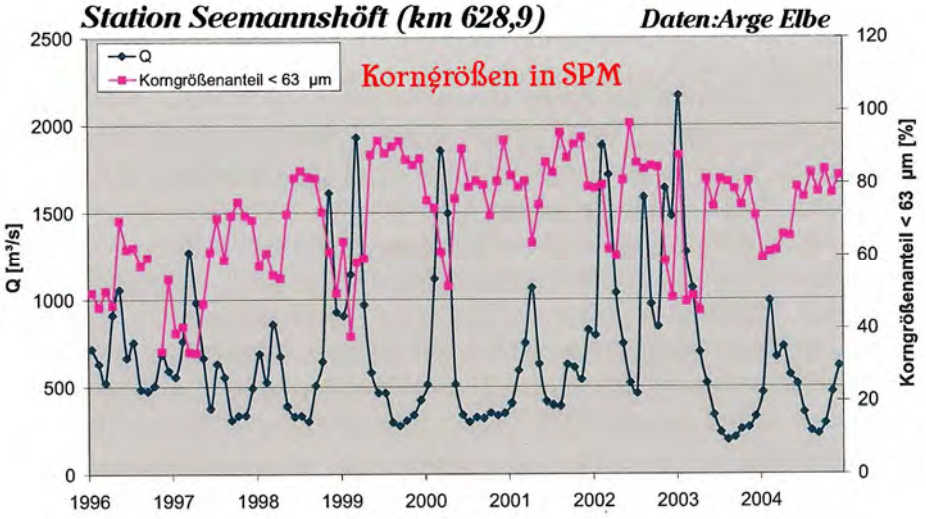


Abb. 6.3:
Abfluss Neu Darchau und relativer Korngrößenanteil unter 63 µm von schwebstoffbürtigem Sediment bei Seemannshöft (BfG, 2006 nach ARGE Elbe).

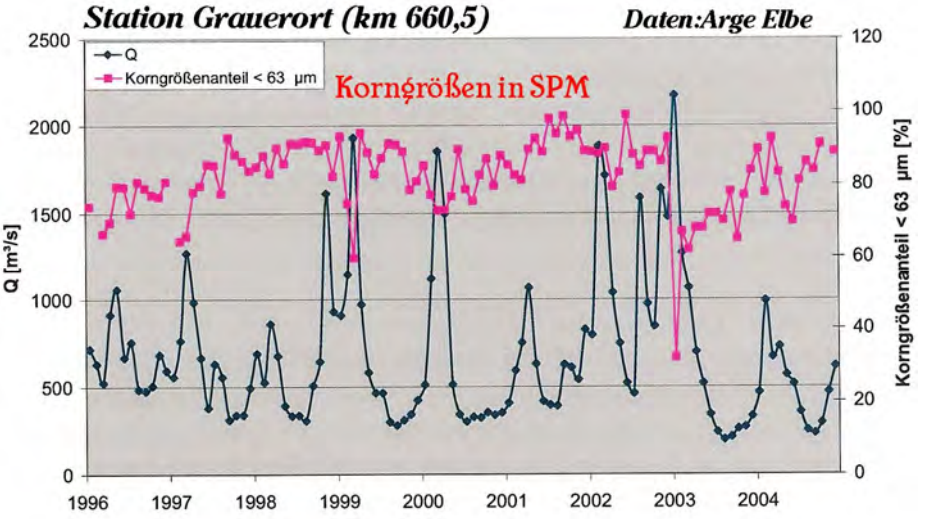


Abb. 6.4:
Abfluss Neu Darchau und relativer Korngrößenanteil unter 63 µm von schwebstoffbürtigem Sediment bei Grauerort (BfG, 2006 nach ARGE Elbe).
.

Aus den jährlich durchgeführten Körnungsanalysen des Baggerguts aus der Hamburger Delegationsstrecke erkennt man ebenfalls große Schwankungen, ohne dass man einen Trend daraus ableiten könnte (BfG, 2006). – Ähnliche Ergebnisse resultieren auch aus den Sedimentuntersuchungen von Bioconsult für die Abschnitte km 647–653 von 1998 bis 2003 (Schuchardt & Scholle, 2004).

c) Verschlickung der Nebenelbe

Abb. 6.5: Geographie der Nebenelben (Beweissicherung, 2005).

Eine Vertiefung der Fahrrinne führt zwar prinzipiell zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit in den Seitenräumen und fördert damit die Sedimentation in den Nebenelben. Allerdings ist dieser Effekt im Vergleich zu den natürlichen Fluktuationen, die durch eine hohe Dynamik des Oberwasserabflusses (> 10:1) sowie unterschiedliche Gezeiten und Windverhältnisse (aus Messungen der GKSS in der Hahnöfer Nebenelbe, unveröffentlicht) geprägt sind, eher vernachlässigbar, geschweige denn messbar.

So zeigen denn erwartungsgemäß die im Rahmen der Beweissicherung einmal jährlich über einen Spring/Nipp-Zyklus durchgeführten Strömungsmessungen keine ausbaubedingten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten. Ähnlich geht auch aus den jährlich durchgeführten Längspeilungen im Mühlenberger Loch, in der Hahnöfer-, Glückstädter-, Lühesander-, Pagensander- und Schwarztonnensander-Nebenelbe kein Trend im Zusammenhang mit dem 14,4-m-Ausbau hervor, wenn auch von Jahr zu Jahr und in kleineren Abschnitten der Nebenelben durchaus sowohl Sedimentation wie Erosion erkennbar sind. Das Wischhafener Fahrwasser weist im Zeitraum 1995 bis 2004 eine Abnahme der Wassertiefe auf, ohne dass hier der Ausbau von 1999 einen besonderen Einschnitt bedeutet. Die aus den jährlichen Hauptpeilungen abgeleiteten Differenzgeländemodelle für die Haseldorfer Binnenelbe, das Mühlenberger Loch und die Hahnöfer Nebenelbe lassen ebenfalls zwar kleinräumige Sediment-Ablagerungen bis zu 0,8 m sowie auch Erosion bis zu 1,4 m (in der Hahnöfer Nebenelbe) erkennen, aber offensichtlich nicht in Zusammenhang mit dem 14,4-m-Ausbau. Das Mühlenberger Loch mit seinen Verlandungstendenzen östlich der Este wurde u. a. durch den Bau des Airbus-Geländes beeinflusst und nimmt daher eine Sonderstellung ein.

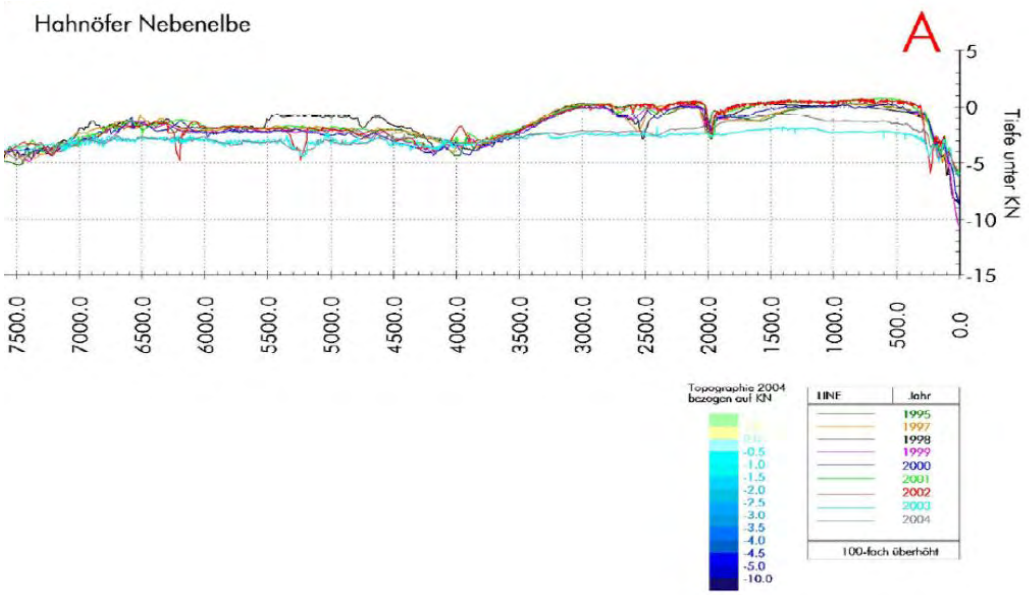


Abb. 6.6: Längspeilungen des WSA Hamburg in der Hahnöfer Nebenelbe von 1995 bis 2004 (Beweissicherung, 2005).

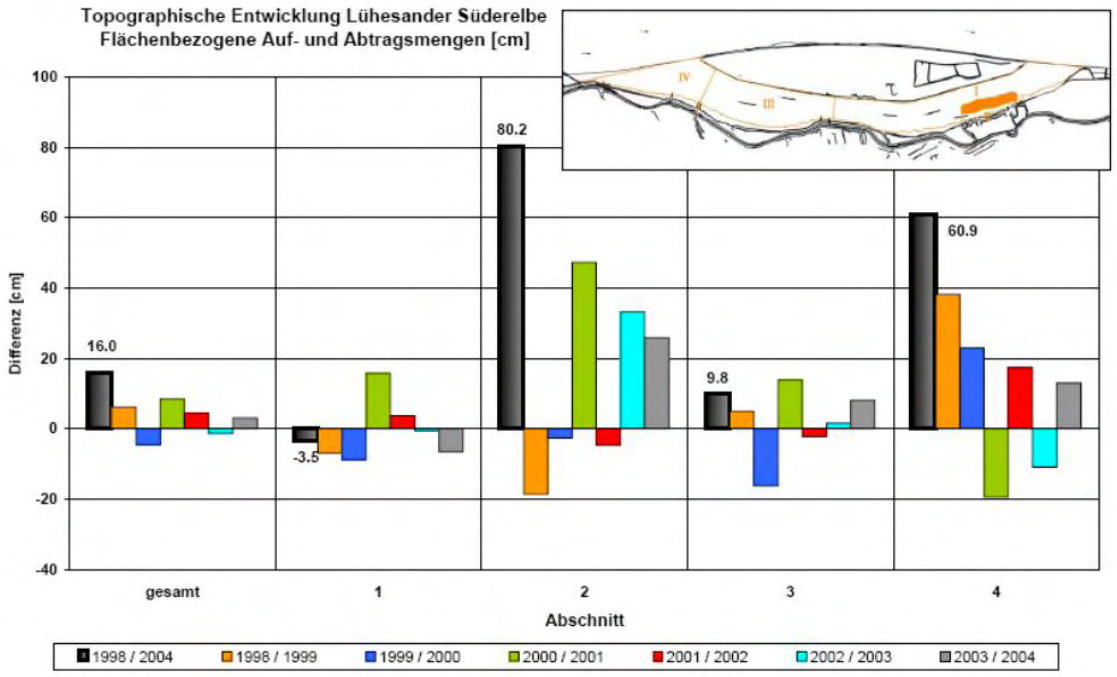


Abb. 6.7: Mittlere Sohlhöhenänderungen in vier Abschnitten der Lühesander Süderelbe über die Jahre 1998 bis 2004 (Beweissicherung, 2005).

Es wurden mehrfach auch Untersuchungen darüber angestellt, wieweit Baumaßnahmen an der Tide-Elbe in weiter zurückliegender Zeit zu Änderungen in der Sohlhöhe bzw. erhöhter Sedimentation oder Erosion in Seitenbereichen der Unterelbe geführt haben. So berechnete U. Marnitz (Marnitz, 1991) auf der Grundlage von Peilkarten des WSA Hamburg zwischen 1950 und 1990 – über Zweijahresvergleiche – mittlere Sedimentbilanz- und Umsatzhöhen für die Hahnöfer Nebenelbe und das Mühlenberger Loch. Leider war eine genauere Analyse dadurch erschwert, dass die Peilungen unregelmäßig stattfanden: für manche Jahre ein- bis zweimal, für andere Jahre gar nicht bzw. nicht vollständig, und die Karten der Jahre 1958 und 1959 waren nicht mehr vorhanden.

Zwei Beispiele aus dieser Arbeit (Marnitz, 1991) seien hier herausgegriffen:

(I) Mühlenberger Loch:

Bis zum Vergleichszeitraum 1977/1979 liegen die Umsatzhöhen (nämlich die jeweiligen Summen der Sedimenthöhenänderungen ohne Berücksichtigung des Vorzeichens) im Bereich des westlichen Mühlenberger Lochs (Feld 4, Abb. 6.8) relativ stabil bei ca. 4 dm, danach gehen sie auf Werte um 2 dm zurück. Bis 1963 sind Sedimentation und Erosion ungefähr im Gleichgewicht, wobei die Sedimentation geringfügig überwiegt. Nach 1965 setzt starke Sedimentation ein, die erst nach 1981 wieder zurückgeht. Eine Begründung für die nach 1965 einsetzende starke Sedimentation wird sowohl in der Absperrung der alten Süderelbe als auch im 13,5-m–Fahrwasserausbau gesehen. Das Nachlassen der Sedimentation nach 1979/1981 weist auf eine Annäherung an einen Gleichgewichtszustand hin. Der auffällig hohe Umsatzwert um 1963/1965, der an starke Erosion gekoppelt ist, befindet sich nur in diesem Feld und ist somit als lokale Erscheinung zu bewerten (Sandentnahme von 300.000 m^3 zum Bau des neuen Hauptdeichs von Cranz).

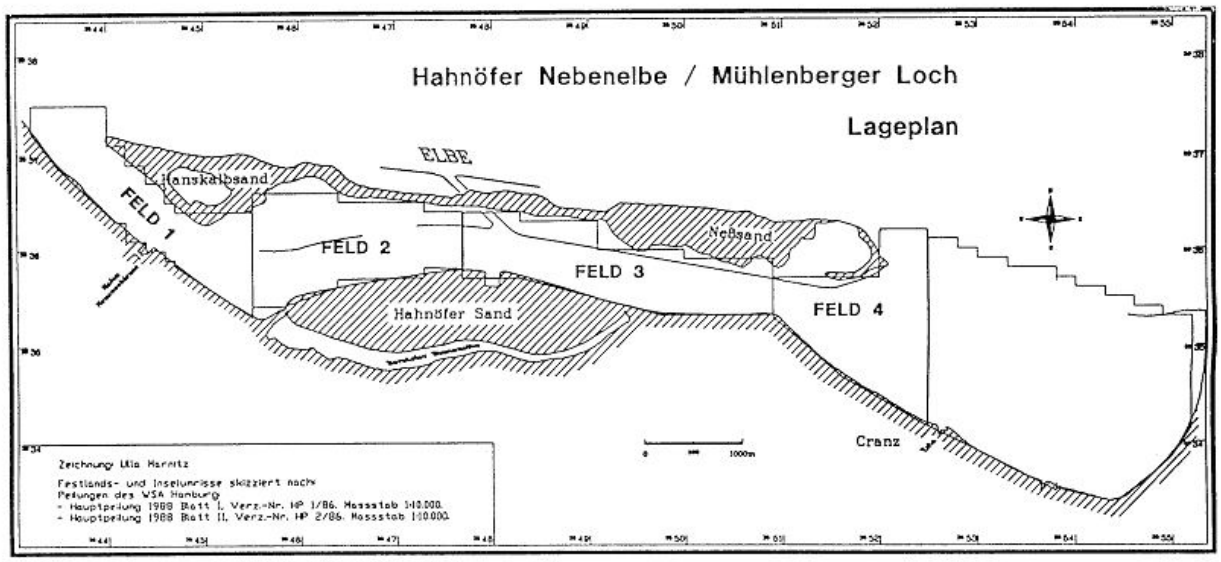
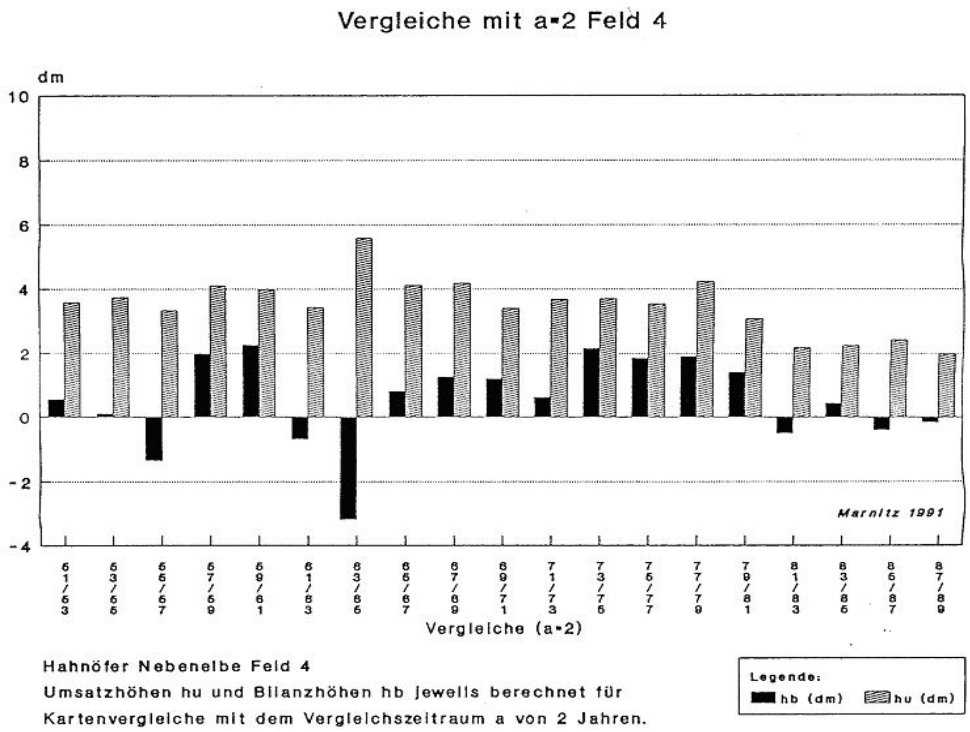


Abb. 6.8: Feldeinteilung für die Bestimmung der Bilanz- und Umsatzhöhen in der Hahnöfer Nebenelbe und dem Mühlenberger Loch (Marnitz, 1991).

Abb.6.9:

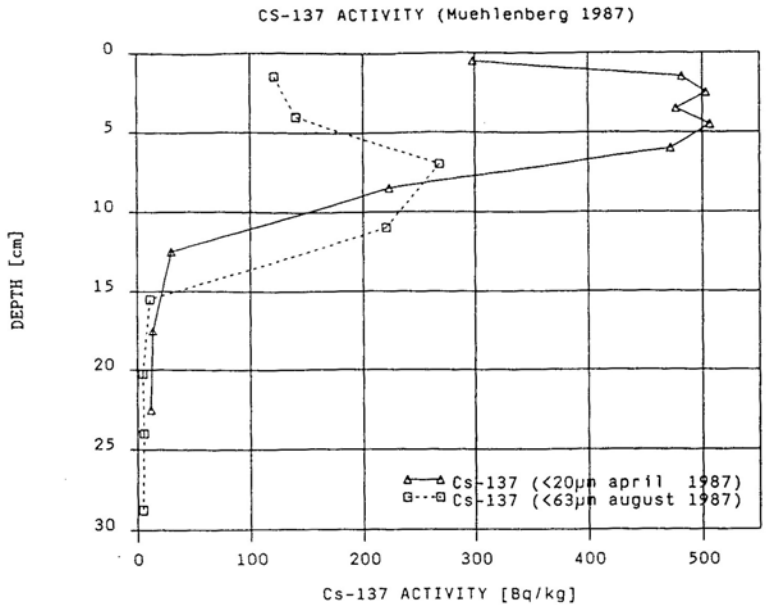
Umsatz- und Bilanzhöhen für den Westteil des Mühlenberger Lochs.



Da methodisch von Interesse, sei an dieser Stelle vermerkt, dass nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl 1986 vom GKSS-Forschungszentrum (Petersen et al., 1991) die Möglichkeit genutzt wurde, über die Messung der Radioaktivität von Cs^{137} in Sedimentkernen (s. Abb. 6.10) die Sedimentationsrate direkt zu bestimmen. Für das Mühlenberger Loch ergab sich so für 1986/1987, einer Zeitspanne mit relativ hohem Oberwasser, eine Rate von ca. 7 cm/a. Bei mittlerem bzw. niedrigem Oberwasser wäre sicherlich eine höhere Sedimentationsrate aufgetreten. Leider war der Zeitraum für eine generelle Aussage etwas kurz.

Abb. 6.10:

Caesium-Profile von Sedimentkernen (I) aus dem Mühlenberger Loch (II) Hahnöfer Nebenelbe.



Caesium profiles from Mühlenberger Loch cores, 1987 (measurements of April 1987 standardized to the fraction $\leq 20\,\mu m$).

Im Feld 2 (Abb. 6.10) zeigen die Umsatzhöhen während des betrachteten Zeitraumes relativ gleichförmige Werte zwischen 3 und 5 dm. Ausnahmen sind die Perioden nach dem 12-m-Fahrwasserausbau und den Aufspülungen bei Hanskalbsand, die sich in diesem Feld in

erhöhten Umsatzwerten widerspiegeln. Die erhöhten Werte in den Jahren 1971–1977 treten nur in diesem Feld auf und deuten auf eine lokale Erscheinung hin. Im Gegensatz zu Feld 1 überwiegt in diesem Abschnitt geringfügig die Sedimentation (Marnitz, 1991).

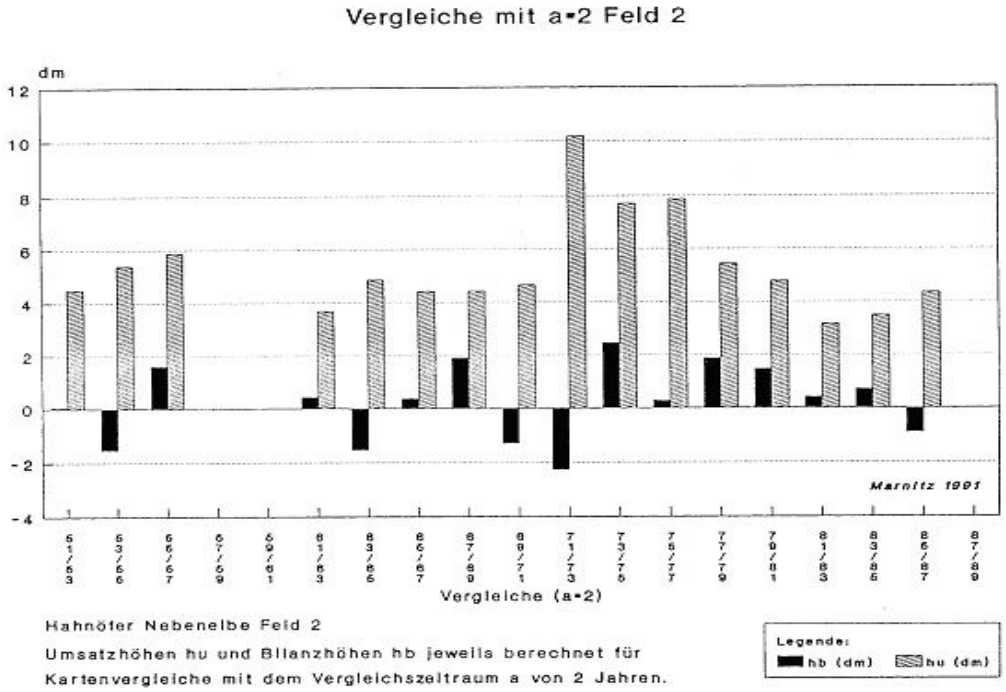


Abb. 6.11: Umsatz- und Bilanzhöhen für Feld 2 der Hahnöfer Nebenelbe.

Dafür, dass für die Sedimentablagerungen in den Seitenräumen der Tide-Elbe ganz andere Einflussgrößen maßgeblich sind als prozentual geringfügige Vertiefungen der Fahrrinne, werden im Folgenden die Beispiele Wedeler Au und Rhinplatte aufgeführt.

Vom 1.11.1988 bis 31.10.1989 wurde in Flachwassergebieten der Buhnenfelder vor Fährmannsand und der Wedeler Au von Th. Gabriel (Gabriel, 1990) die Variabilität von Sedimentniveaus untersucht. Die Schwankungen können gut mit relativ kurzfristigen Veränderungen der hydrologischen Randbedingungen, wie z.B. des Tidemittelwassers korreliert werden. Wie in der Abbildung 6.12 belegt, haben hohe Pegelstände erosive Effekte für das Sediment.

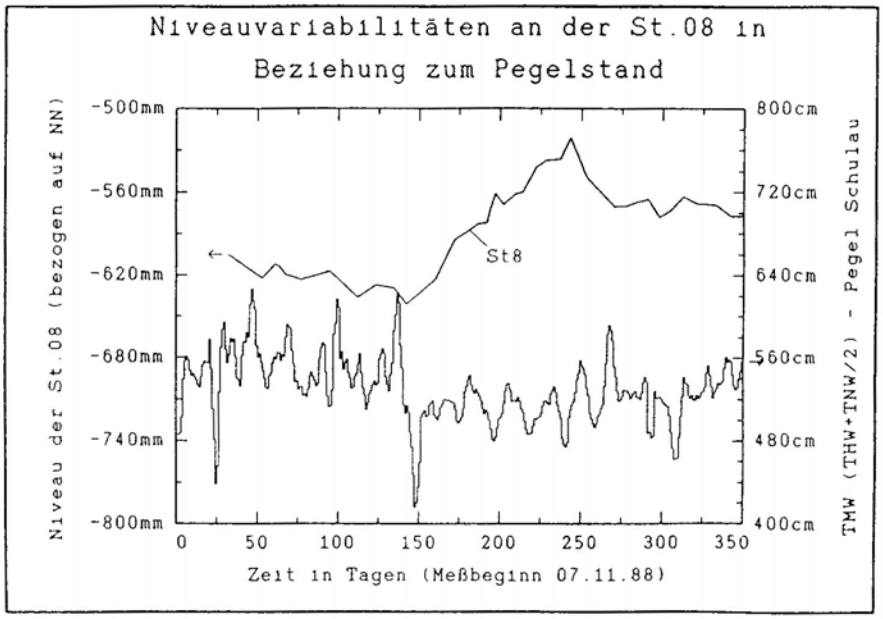


Abb. 6.12: Sedimentniveau-Änderungen und der zugehörige Verlauf des TMW.

Mit den Sedimenten im Bereich Rhinplatte beschäftigte sich H.-J. Dammschneider (Dammschneider, 1989). In den knapp 2 Jahren Beobachtung von 1987 bis 1989 stieß er auf folgende Phänomene:

(1) Die differentielle Veränderung des Oberwassers entspricht derjenigen des Sedimentniveaus an einer der Messstellen (Stat. 1):

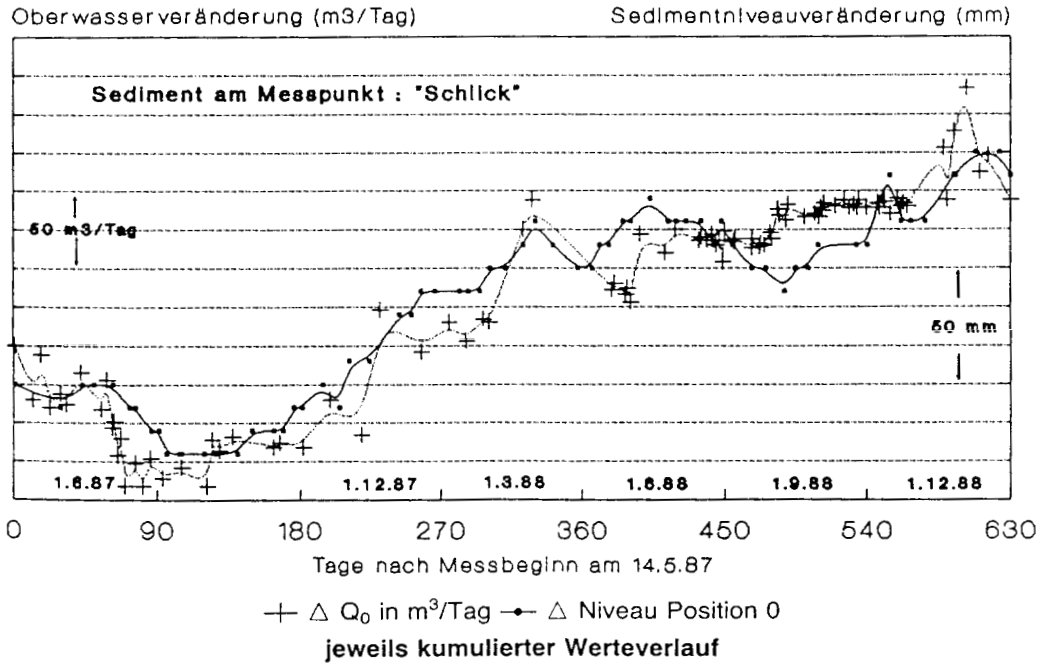


Abb. 6.13: Kumulativer Verlauf von Oberwasser und Sedimentsohle über knapp zwei Jahre.

(2) Das Sandniveau an einer anderen Messstelle (Stat. 5) ist kongruent zum Verlauf der Zeitdifferenz von Ebbe- und Flutphase (Ebbdauerüberschuss):

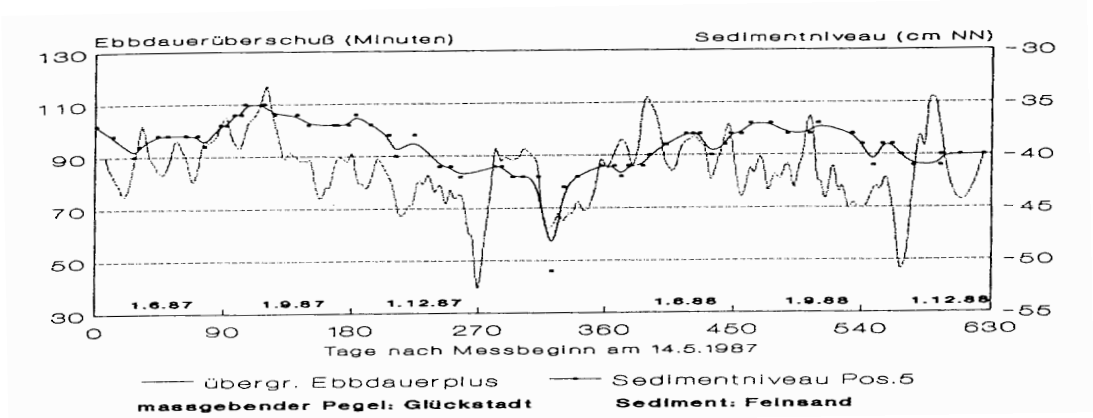


Abb. 6.14: Verlauf der Sediment-Niveau-Änderungen und der Ebbdauer-Überschüsse.

Generell scheint eine potenzielle Auswirkung der Baggeraktivitäten auf das Sedimenttransportgeschehen überschätzt zu werden. Vergleicht man nämlich – wie in den folgenden Abbildungen 6.15 und 6.16 dargestellt – die jährlichen Baggermengen mit den aus Differenzpeilungen bestimmten natürlichen Umlagerungen, wird deutlich dass es sich um verschiedene Größenordnungen handelt. Insofern verwundert es nicht, dass Oberwasser, Tide, Wasserstände und Meteorologie den maßgeblichen Einfluss auf die Sohlhöhen in den Nebenräumen der Elbe haben.

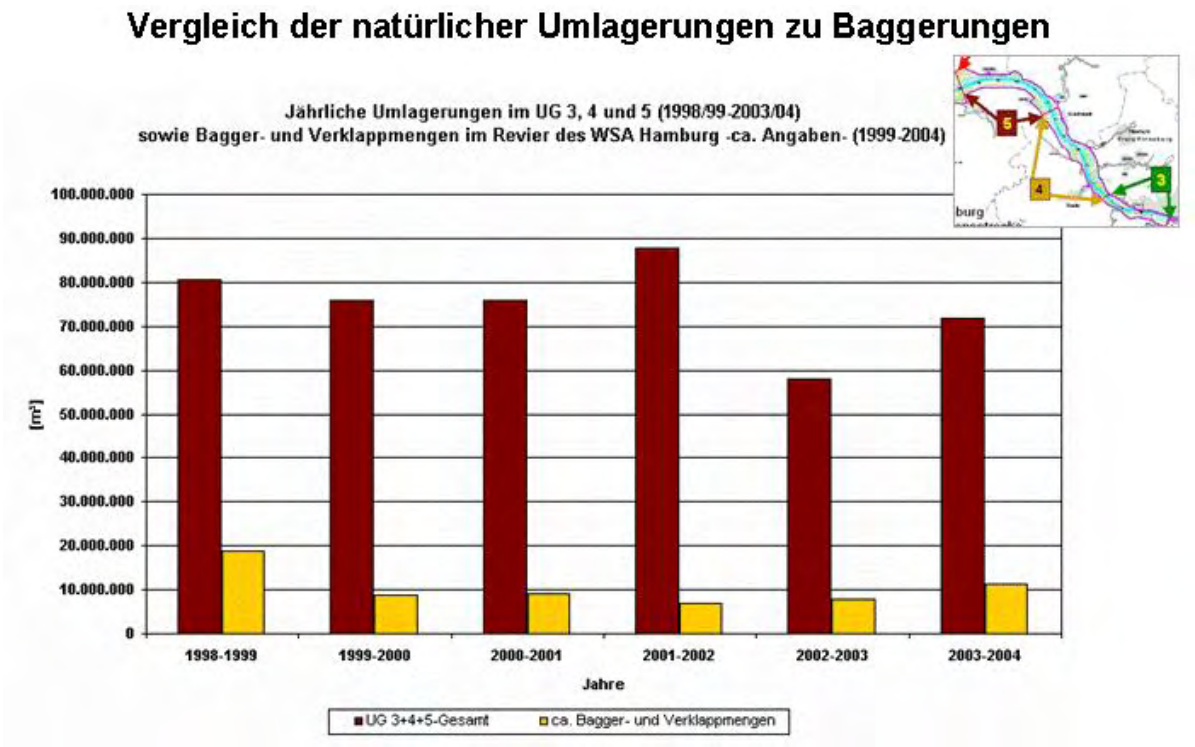


Abb. 6.15: Jährliche Umlagerungen und Baggermengen von Hamburg bis zur Ostemündung (Beweissicherung, 2005).

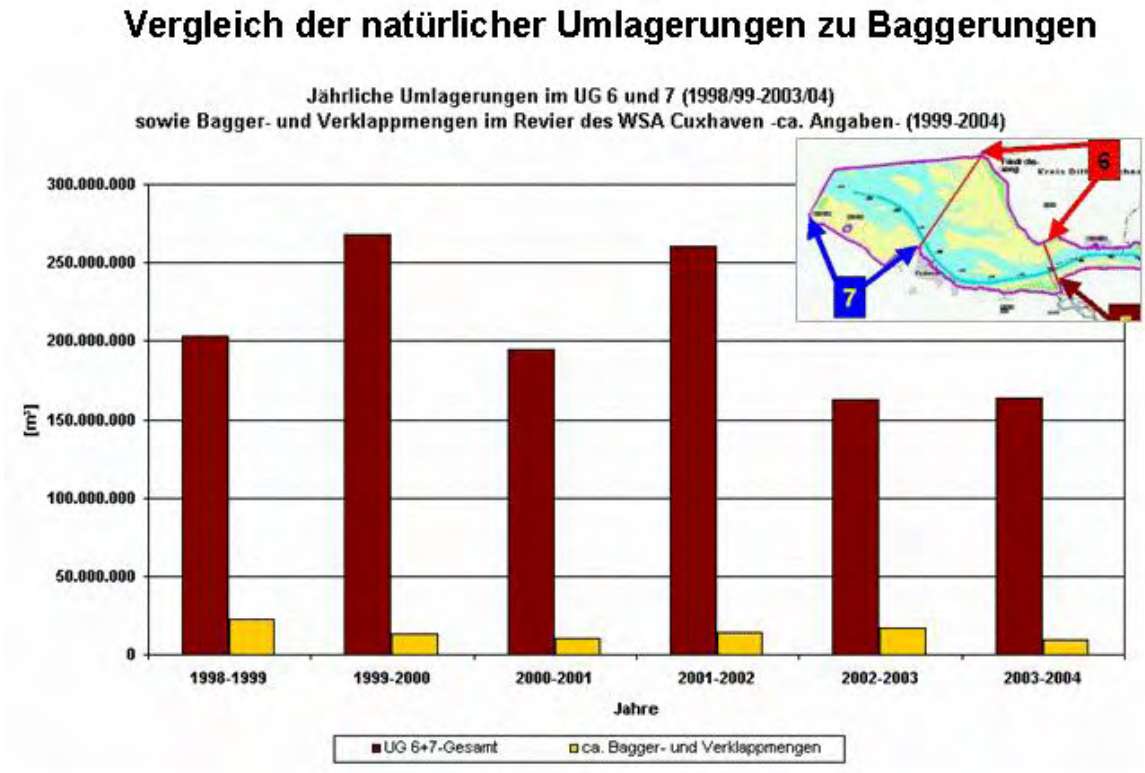


Abb. 6.16: Jährliche Umlagerungen und Baggermengen von der Ostemündung bis zur seewärtigen Grenze (Beweissicherung, 2005).

c+) Nebenflüsse verlanden:

Ähnlich wie bei den Nebenelben wurde auch für die Zuflüsse der Unterelbe die Vermutung artikuliert, dass sie generell wegen Abnahme des Binnenschiffsverkehrs[2] (und damit verbundener ungestörter Sedimentation) sowie wegen eines durch Baggeraktivitäten vermehrten Schwebstoffangebots und infolge der Fahrrinnenanpassung zunehmend verlanden. Dabei könnte sich die durch den 14,4-m-Ausbau veränderte Hydrodynamik der Tide-Elbe insofern auswirken, als sich die ausbaubedingten Niedrigwasserabsenkungen vor allem im Mündungsgebiet der Nebenflüsse bemerkbar machen, während sich die Veränderungen im Tidehochwasser nahezu bis zur Tidegrenze der Zuflüsse durchsetzen.
Im Rahmen der Beweissicherung wurden sowohl jährliche Pegel- und Strömungsmessungen als auch topographische Messungen mittels Peilungen durchgeführt. Bei den Peilungen wurden jährliche Längsprofile (jeweils an den tiefsten Stellen) und Querprofile in unterschiedlichen Abständen voneinander gefahren: alle 500 m auf den ersten 5 km ab der Mündung, alle 1000 m ab 5–10 km ab der Mündung und alle 5000 m ab der Mündung bis zur Tidegrenze. Beispiele sind in den folgenden Abbildungen gegeben.

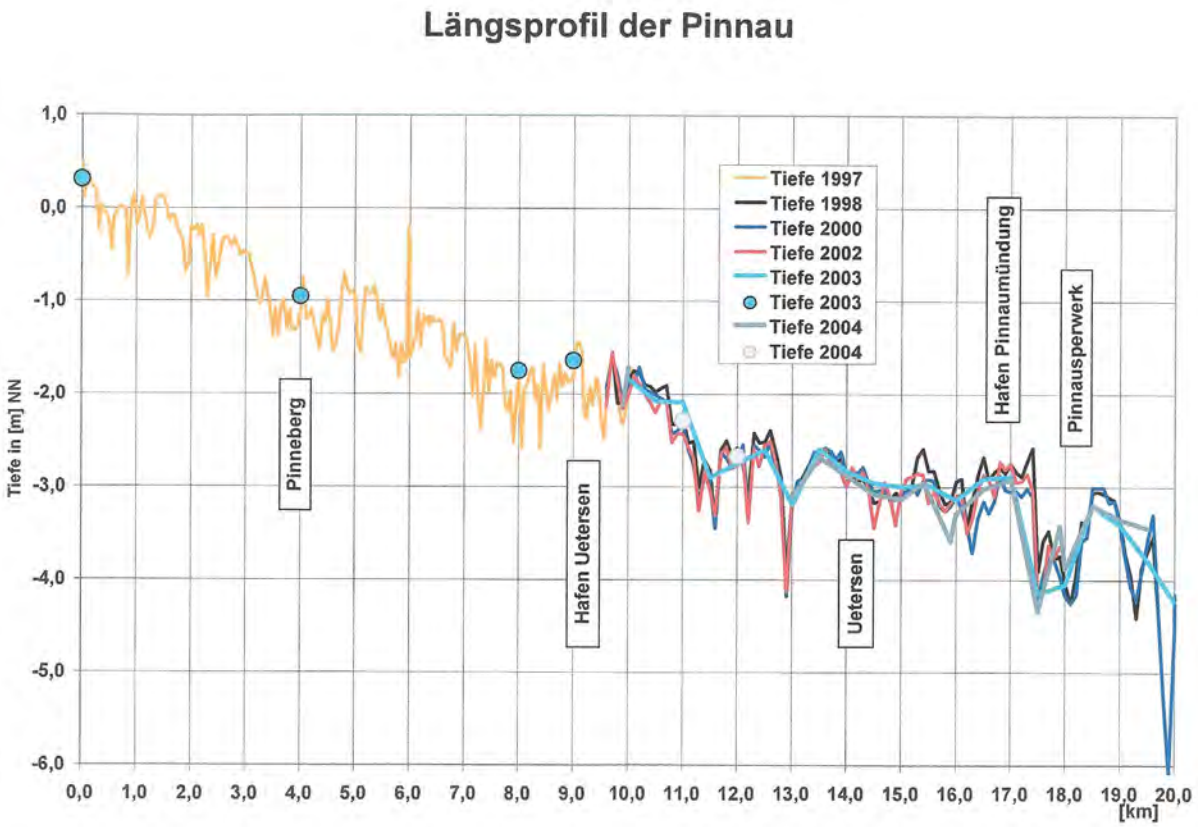
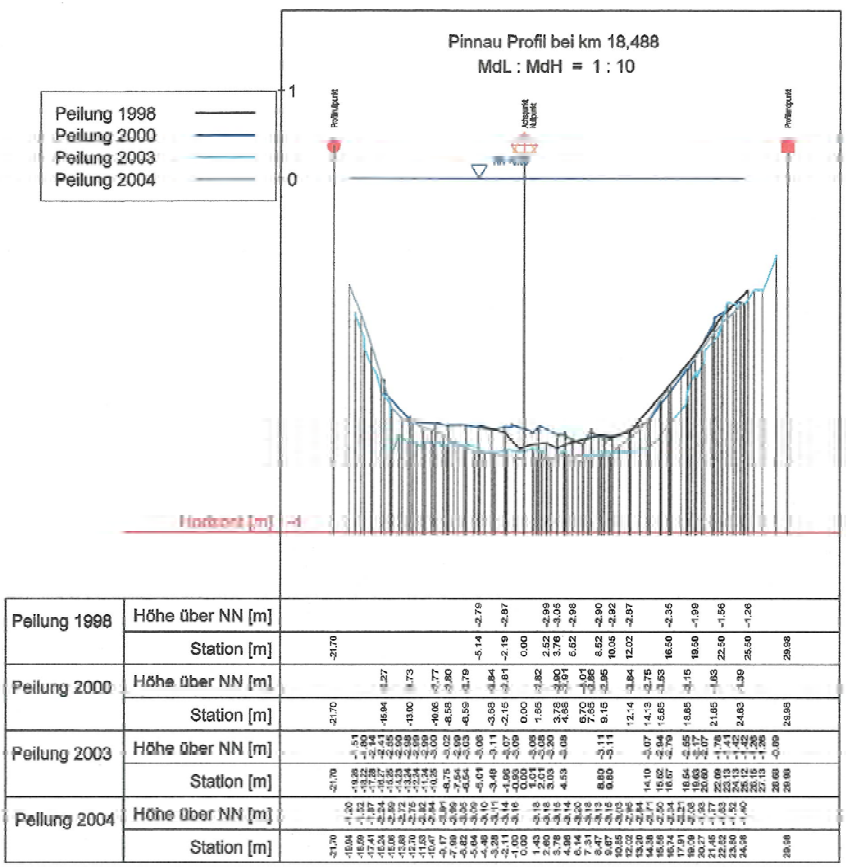


Abb. 6.17: Längsprofil der Pinnau von 1987 bis 2004 (Beweissicherung, 2005).

[2] Eichweber, persönliche Mitteilung



Peilung 1998	Höhe über NN [m]	-2.79 -2.87 -2.99 -3.05 -2.98 -2.90 -2.92 -2.97 -2.35 -1.99 -1.56 -1.26
	Station [m]	-21.70 -5.14 -2.19 0.00 2.52 3.76 6.62 8.62 10.06 12.02 16.50 19.50 22.50 25.50 29.98
Peilung 2000	Höhe über NN [m]	-1.27 -0.73 -0.77 -0.80 -0.79 -0.84 -0.81 -0.82 -0.95 -0.84 -0.75 -0.53 -0.15 -1.03 -1.39
	Station [m]	-21.70 -16.94 -13.00 -10.06 -8.58 -8.59 -3.68 -2.15 0.00 1.85 3.76 6.62 9.15 12.14 15.65 18.85 21.85 24.63 29.98
Peilung 2003	Höhe über NN [m]	-1.51 -1.80 -2.41 -2.65 -2.69 -2.69 -3.00 -3.02 -3.06 -3.11 -3.07 -3.09 -3.06 -3.08 -3.09 -3.11 -3.11 -3.07 -2.94 -2.85 -2.77 -1.78 -1.43 -1.25 -1.38 -0.89
	Station [m]	-21.70 -19.28 -16.94 -15.35 -13.34 -11.14 -10.35 -9.75 -8.54 -7.69 -5.61 -3.49 -1.86 -0.93 1.01 2.01 3.76 4.53 8.63 8.63 14.19 15.92 16.67 18.64 19.63 20.60 22.69 23.13 24.12 25.15 27.13 28.68 29.98
Peilung 2004	Höhe über NN [m]	-1.20 -1.52 -2.37 -2.54 -2.80 -2.72 -2.69 -2.64 -2.60 -3.05 -3.10 -3.15 -3.14 -3.16 -3.18 -3.18 -3.14 -3.13 -3.15 -3.15 -2.95 -2.84 -2.50 -2.54 -2.25 -1.88 -1.77 -1.62 -1.52 -1.40
	Station [m]	-21.70 -16.94 -15.99 -15.24 -15.06 -13.80 -13.00 -11.03 -10.47 -9.17 -7.69 -5.82 -5.64 -3.49 -2.11 -1.03 0.00 1.43 2.80 3.78 4.53 6.14 7.31 8.47 8.63 10.55 12.02 13.20 14.19 15.58 16.74 17.91 18.64 20.27 21.46 22.52 23.13 24.09 29.98

Abb. 6.18: Ein Querprofil der Pinnau oberhalb des Sperrwerks 1998 bis 2004 (Beweissicherung, 2005).

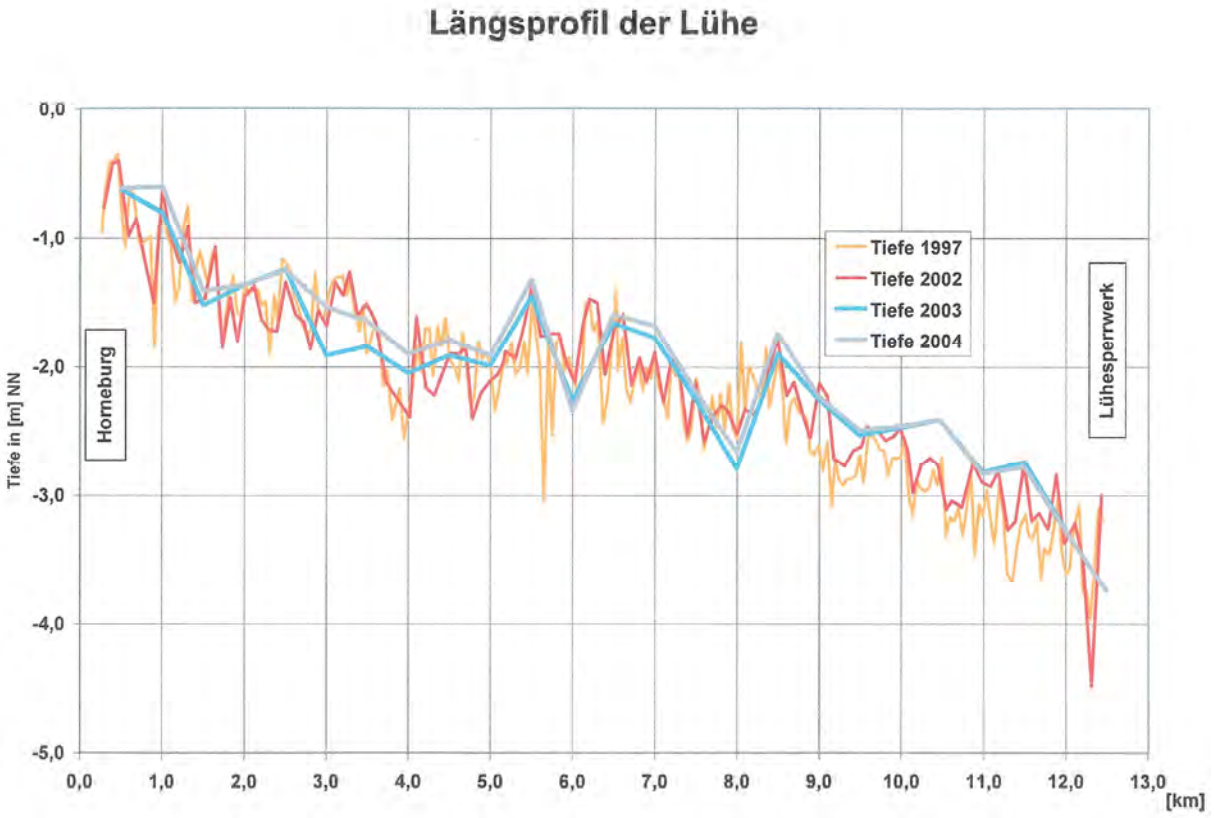


Abb. 6.19: Längsprofil der Lühe von 1987 bis 2004 (Beweissicherung, 2005).

Die Ergebnisse dieser Messungen (Beweissicherungsbericht 2004) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei den Nebenflüssen, für die im Beweissicherungsverfahren Wasserstandsmessungen vorgesehen sind – nämlich Ilmenau, Este, Lühe, Oste, Pinnau, Krückau und Stör – ist „eine augenfällige Beeinflussung der Wasserstände durch den letzten Fahrrinnenausbau nicht erkennbar."

Aus den Längs- und Querpeilungen lassen sich – trotz unterschiedlicher Variabilitäten – ausnahmslos keine ausbaubedingten Änderungen der Sohltiefe ablesen. Im Einzelnen:

– Este:	Keine signifikanten Änderungen zwischen 1997 und 2004.
– Lühe:	Geringfügige Sohlerhöhung von 20–40 cm (1–5 km oberhalb Mündung) zwischen 2002 und 2003.
– Schwinge:	Kontinuierliche Vertiefung von 1997 bis 2002 um bis zu 100 cm ab 1 km oberhalb Sperrwerk.
– Ruthenstrom:	Oberhalb Sperrwerk keine signifikanten Änderungen der Tiefenlage;zwischen 2002 und 2003 geringfügiger Anstieg der Sohllage.
– Wischhafener Süderelbe:	Im Wesentlichen Querschnittseinengungen. Zwischen 2002 und 2003 geringfügiger Anstieg der Sohllage.
– Oste:	Aus Längsschnitten keine signifikanten Änderungen im Oberlauf ersichtlich; Querschnittsmessungen wegen nicht identischer Lagen nicht vergleichbar.
– Pinnau:	Oberhalb Sperrwerk kaum Tiefenänderungen, keine Tendenzen.
– Krückau:	Sohle 2002 gegen 1995 im oberen Abschnitt bis zu 50 cm vertieft, 2003 wieder leichte Erhöhung.
– Stör:	Tiefe oberhalb Sperrwerk unverändert.

Damit haben sich die Vermutungen nicht bestätigt.

d) Erhebliche Zunahme der Unterhaltungsbaggermengen im Hamburger Hafen

Nach einem in der Vergangenheit üblichen jährlichen Baggermengenanfall von 1–2 Mio. m^3 im Bereich der Hamburger Delegationsstrecke (km 607,5 bis 638,9) zeigt sich seit 2000 ein signifikanter Anstieg, der in den Jahren 2004 und 2005 auf die besorgniserregende Höhe von über 8 Mio. m^3/a kletterte (Abb. 6.20). Für das Jahr 2006 fiel die Baggermenge allerdings auf 6,5 Mio. m^3 zurück (G. Werner HPA, persönliche Mitteilung), so dass möglicherweise in den kommenden Jahren wieder eine Beruhigung eintritt, die in die Nähe des früheren Baggermengenanfall führt.

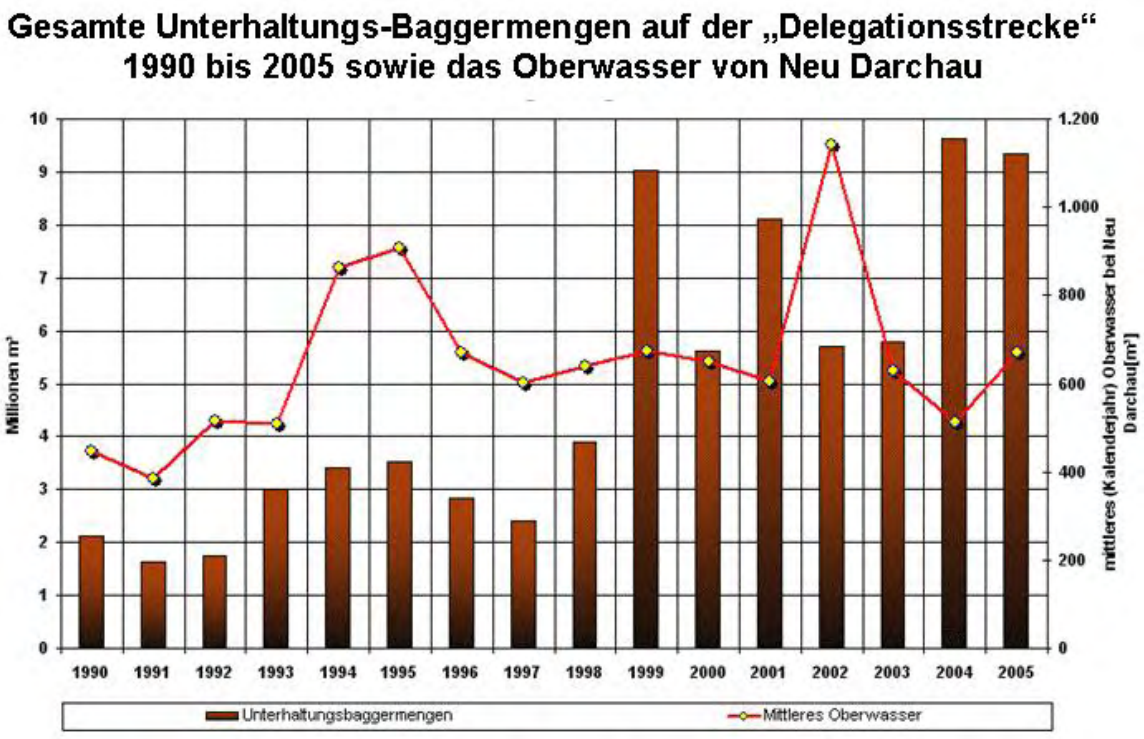


Abb. 6.20: Entwicklung der jährlichen Baggermengen im hamburgischen Tide-Elbe-Gebiet; 1999 ist ein Anteil von 5,4 Mio. m^3 aus der Fahrrinnenanpassung enthalten. (Beweissicherung, 2005).

Es ist nicht auszuschließen, dass die ungewöhnliche Abfluss-Situation mit einem durch das August-Hochwasser 2002 geprägten Oberwasser und mit darauf folgenden „Trockenjahren" eine Ursache für den hohen Schlickanfall war. (Allerdings gilt eine solche Antikorrelation – wenn es denn eine solche gibt – für die Jahre 1993 bis 1997 offensichtlich nicht.)

Die Antikorrelation erscheint ausgeprägter für die jährlichen Baggermengen im Gebiet des WSA Hamburg, also von Tinsdal (km 640) bis St. Margarethen (km 689) (s. Abb. 6.21). Hier zeigen aber gerade die Jahre 2000 bis 2004 keine auffällig hohen Werte, so dass weder eine Auswirkung der Fahrrinnenanpassung von 1999 noch eine solche der Trockenjahre zu erkennen ist. Ein interessantes Faktum in diesem Abschnitt ist, dass ein ehemaliger Baggerschwerpunkt bei der Rhinplatte seit 2000, also nach der letzten Fahrrinnenanpassung, nicht mehr existiert; eine mögliche Ursache dafür ist die durch die benachbarte Baggergutablagerungsfläche Krautsand erhöhte Räumkraft der Strömung in diesem Flussabschnitt. Möglicherweise hat sich der Baggerschwerpunkt aber stromauf verschoben und trägt damit zu den erhöhten Baggermengen auf der Hamburger Delegationsstrecke bei. – Eine eher positive Korrelation – also erhöhte Baggermengen bei größerem Abfluss – kann man aus der Entwicklung der Baggermengen im Bereich des WSA Cuxhaven über die Jahre 1985 bis 2004 ablesen (Abb. 6.22). Betrachtet man daher die Entwicklung für die WSÄ Hamburg und Cuxhaven in der Summe (Abb. 6.23), geht die Korrelation zum Abfluss verloren, und die jährlichen Baggermengen bewegen sich mit Schwankungen um ein Mittel von 11 bis 12 Mio. m^3/a.

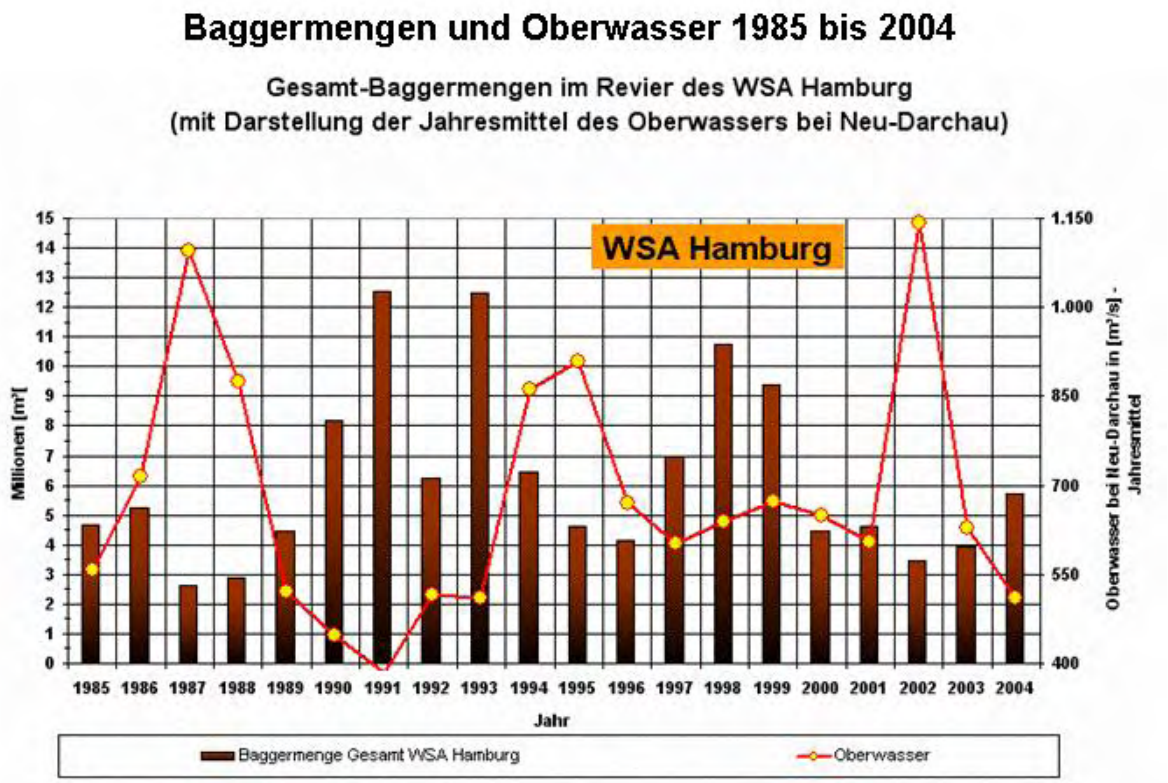


Abb. 6.21: Entwicklung der jährlichen Baggermengen im Elbe-Abschnitt von km 639 bis km 689 (Bereich WSA Hamburg). Der überhöhte Wert bei 1999 enthält wieder den Anteil der Fahrrinnenanpassung. (Beweissicherung, 2005).

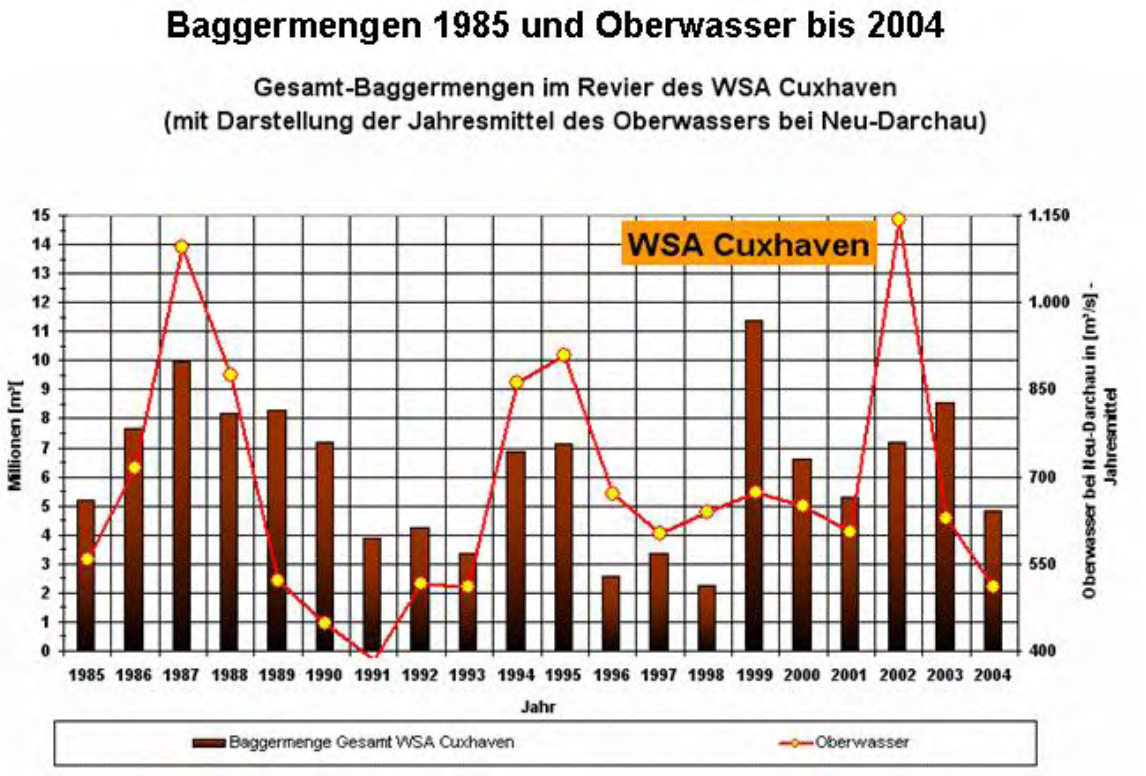


Abb. 6.22: Entwicklung der jährlichen Baggermengen im Elbe-Abschnitt von km 689 bis zur seewärtigen Grenze (WSA Cuxhaven). Der überhöhte Wert bei 1999 enthält wieder den Anteil der Fahrrinnenanpassung. (Beweissicherung, 2005).

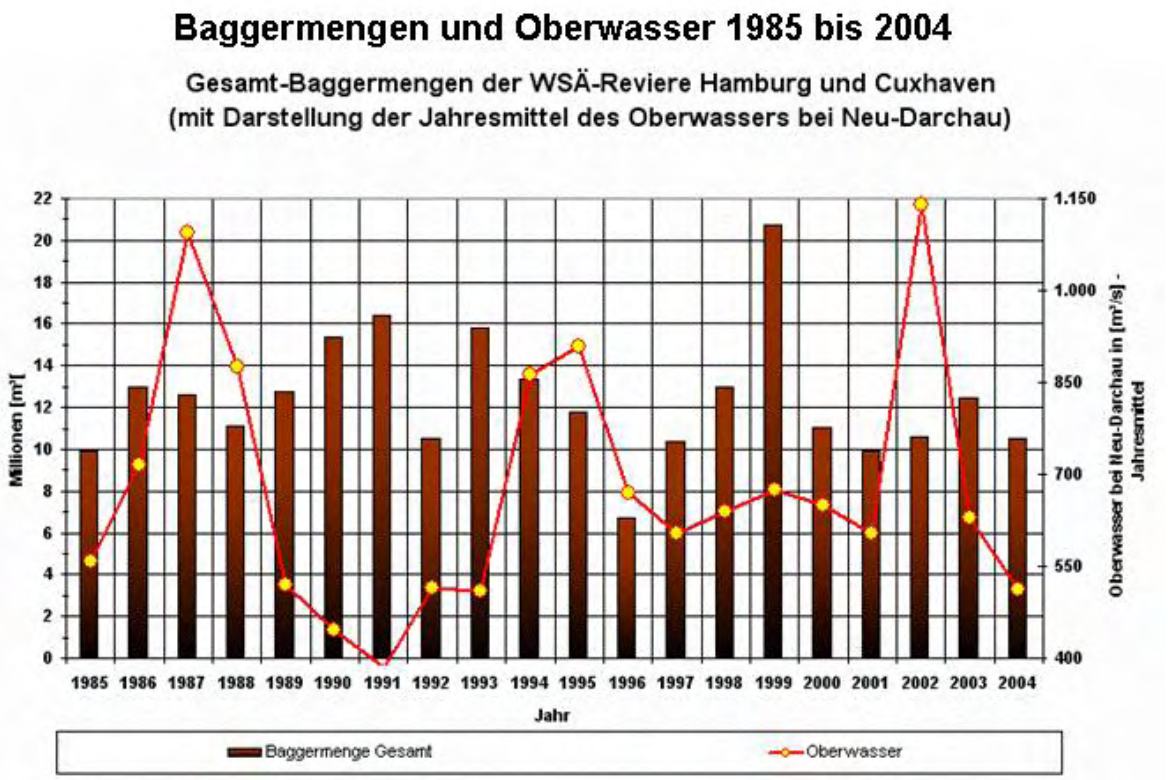


Abb. 6.23: Entwicklung der jährlichen Baggermengen im Bereich der WSÄ Hamburg und Cuxhaven. Der überhöhte Wert bei 1999 enthält wieder den Anteil der Fahrrinnenanpassung. (Beweissicherung, 2005).

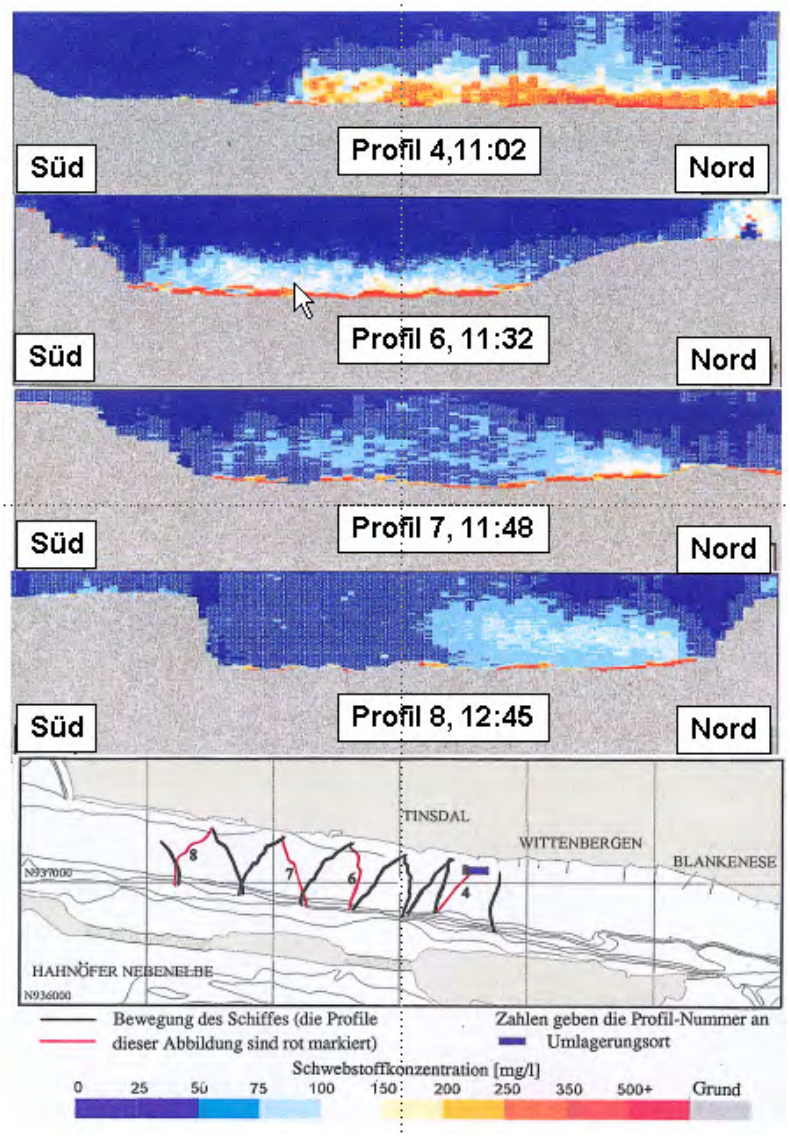
Die Problematik des Anstiegs der Baggermengen auf der Hamburger Delegationsstrecke wird in Kap. 8 ausführlich diskutiert.

7. Umlagerungen in der Tide-Elbe

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, den Transport der Feststoffe bei und nach Verklappungen mit Schiffen messtechnisch zu verfolgen. Dabei haben sich neben konventionellen optischen Trübungsmessgeräten (sowohl in Transmissions- als auch in Streulichtgeometrie) zunehmend ADCP-Geräte bewährt, mit denen die Rückstreusignale nicht nur auf Laufzeit und Frequenzverschiebung, sondern auch auf Intensitäten analysiert wurden. Trotz der nicht ganz einfachen Kalibrierung ist damit die simultane Erfassung größerer Wasservolumina möglich.

Ein Beispiel für die nach dieser Methode nachgewiesene Entwicklung einer Trübungswolke nach einer Verklappung vor Wittenbergen im November 1995 gibt Abb. 7.1 (Kappenberg & Witte 1998, Witte 1999).

Abb. 7.1:
Verfolgung des bei Wittenbergen (am Nordufer) verklappten Baggerguts bei ablaufendem Wasser und einem Oberwasser von 570 m^3/s. Die oberen vier Teilbilder geben qualitativ die Schwebstoffkonzentrationen über die im unteren Bild dargestellten Querschnitte wieder.



Die Messungen (Profile 4–8) zeigen das Entstehen einer bodennahen Dichteströmung nach der Schutenentleerung, ihre Ausbreitung entlang des Gefällegradienten über die Fahrrinnenbreite und die nachfolgende Einmischung des Materials in den Wasserkörper. Dies konnte auch im Modell reproduziert werden. Nach etwa einer halben Stunde hat sich die Dichteströmung bodennah über den gesamten Flussquerschnitt ausgebreitet (Profil 6). Im südlichen Teil erfolgt dann eine rasche Einmischung in den Wasserkörper (Profil 7), während in der Nordhälfte auch noch nach fast 2 Stunden hohe bodennahe Konzentrationen erhalten bleiben (Profil 8). Es zeigt sich hierin eine Nord/Süd-Teilung des Wasserkörpers, die in die-

sem Elbabschnitt stets bei hohem Oberwasserabfluss beobachtet wird und sich auch in deutlich höheren Schwebstoffgehalten am Nordufer äußert.

Die Simulation mit dem erwähnten zweidimensionalen, tiefengemittelten Modell konnte die hier gemessenen Ausbreitungsvorgänge in der Horizontalen mit ausreichender Genauigkeit reproduzieren. Die mit demselben Modell berechnete Reststromverteilung bei diesem Umlagerungsexperiment zeigt Abb. 7.2.

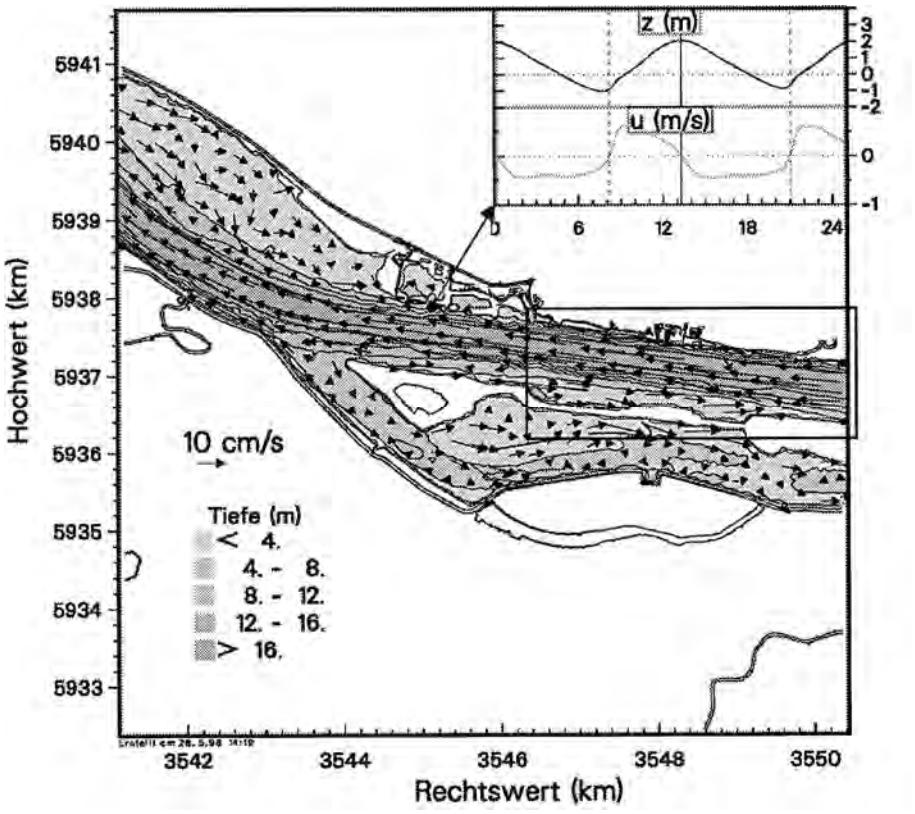


Abb. 7.2: Aus zwei Tiden am 17. Nov. 1995 berechnete Reststromverteilung für das Umlagerungsgebiet und das sich stromab anschließende Gebiet unterhalb Blankenese.

Hieraus wäre der Schluss zu ziehen, dass durchaus ein kleiner Anteil des verklappten feinkörnigen Baggerguts mit dem stromauf gerichteten Reststrom um die Insel Hanskalbsand elbaufwärts transportiert werden könnte. Allerdings entzieht sich der einerseits recht rasch zu Boden sinkende, andererseits im natürlichen hohen Untergrund verschwindende Schwebstoff einem experimentellen Nachweis.

Ähnlich ist es auch bei anderen Umlagerungsexperimenten nie gelungen, den bei einer Verklappung freigesetzten Schwebstoff länger als eine Halbtide, entweder bei Ebbe oder bei Flut, zu verfolgen. In einem weiteren Beispiel sind in Abb. 7.3 die bei einem im Frühjahr 1995 durchgeführten Experiment beobachteten Transportwege des Schwebstoffs dargestellt (GKSS-DRL-RCL, 1995).

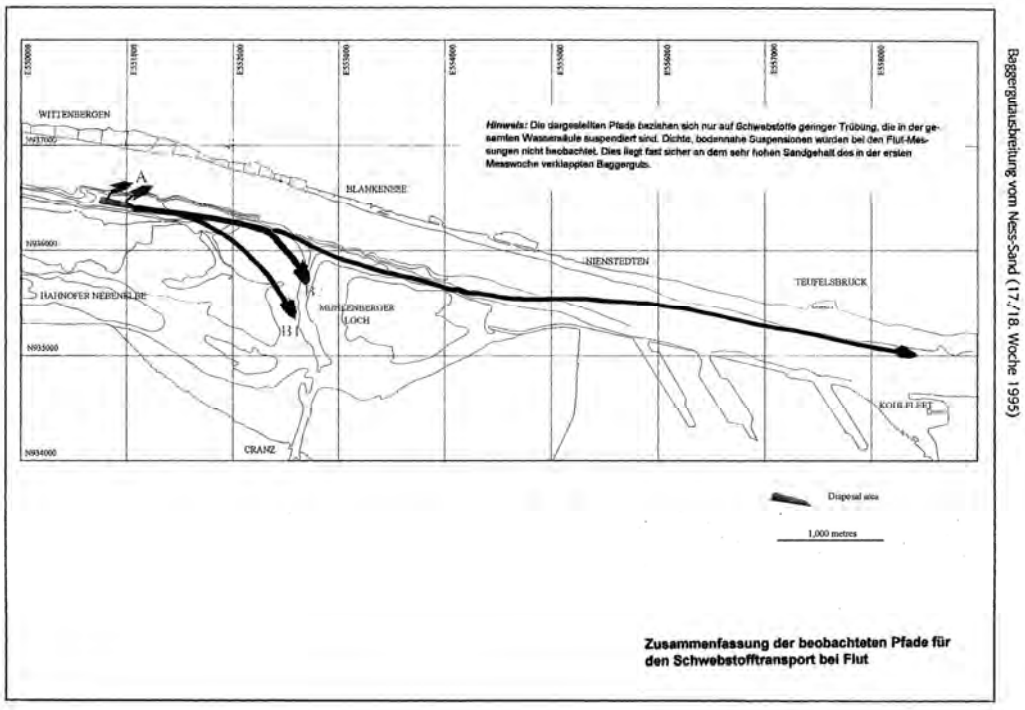


Abb. 7.3: Die bei einer Verklappung vor Ness-Sand (am Südufer der Elbe) nach Kenterpunkt Ebbe, also in der Flutphase beobachteten Pfade des Schwebstoffs.

In der Flutphase (nach Verklappung zum Kenterpunkt Ebbe) ergibt sich folgendes Bild: Die gesamte Wassersäule wird von einer ausgebreiteten Fahne eingenommen. „Im Nahfeld erleidet die Fahne geringe Verluste über die Böschung zur Fahrrinne hin, während die Hauptfahne mit der Flut ostwärts mitgeführt wird. Beim Erreichen des Mühlenberger Lochs spaltet sich die Fahne in Teilarme auf. Einer davon wird durch die Flutfüllung auf mindestens zwei Pfaden in das Mühlenberger Loch gezogen, so dass schätzungsweise bis zu 35 % der freigesetzten Feinbestandteile hier zurückbleiben."

Das Verhalten in der Ebbphase (nach Verklappung zum Kenterpunkt Flut) ist in Abb. 7.4 gezeigt. „Es treten drei Anfangs-Transportpfade auf: Ein unterschiedlicher, aber kleiner Bruchteil fließt unmittelbar die Böschung hinab in die tiefe Elbe. Eine von der Verklappstelle ausgehende „Rinne", in Form eines sich nach Westen öffnenden Tals, das möglicherweise durch die Verklappungen gebildet oder vertieft ist, leitet einen zweiten, größeren Bruchteil unmittelbar hinab in die Südseite der Fahrrinne. Der dritte und größte Bruchteil hält sich dicht unter dem Ufer des Ness-Sand. Im Unterschied zur Flutsituation, in der das Material das Mühlenberger Loch passiert, in die es von der Flut getragen wird, gibt es für die Ebbe nicht diese Möglichkeit Die besonders gegen Ende der Ebbe abnehmenden Wassertiefen lenken diese ufernahe Fahne nach einigen Kilometern in die Südseite der Fahrrinne. Zur folgenden Flut sind diese Fahnen im Umgebungshintergrund verschwunden, ihr anschließender Verbleib könnte möglicherweise mit anderen Verfahren noch nachgewiesen werden (Tracermethoden, Modellrechnungen)."

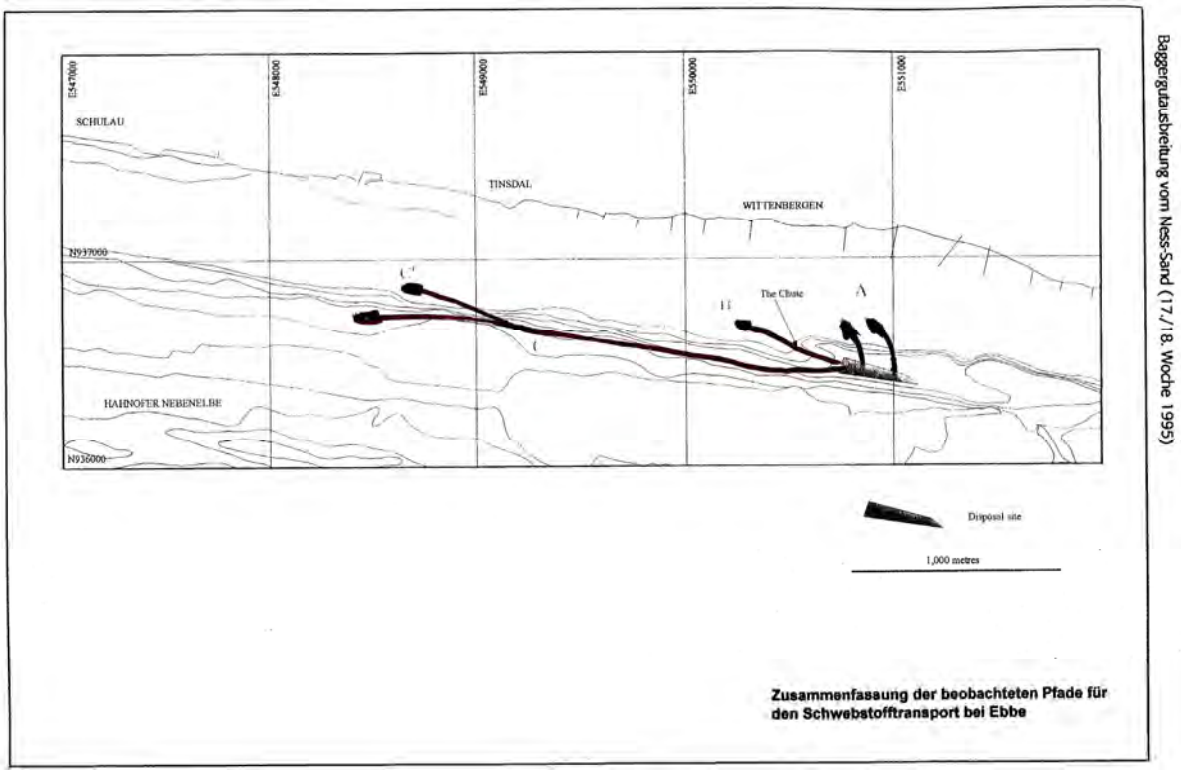


Abb. 7.4: Die bei einer Verklappung vor Ness-Sand (am Südufer der Elbe) nach Kenterpunkt Flut, also in der Ebbphase beobachteten Pfade des Schwebstoffs.

Gegen Ende dieses Experiments wurde wesentlich schlickigeres Baggergut (von der Vulkanhafeneinfahrt) verklappt. Dabei trat ein komplexeres Verhalten mit zwei „Phasen" auf: „Eine Phase geringer Trübheit, die sich über die gesamte Wassersäule erstreckte und anfangs eine höhere Schwebstoffkonzentration besaß als nach der Verklappung des sandigeren Baggerguts von früher, sich sonst aber wie jenes Material verhielt. Zusätzlich trat jedoch eine stark ausgeprägte zweite Phase auf in Form einer sohlnahen Schwebstoffschicht hoher Konzentration. Schichten dieses Typs konnten mit Dicken von wenigstens 1,6 m und Konzentrationen von 25 g/l nachgewiesen werden. Sie flossen relativ schnell, und zwar durch eine „Rinne" nach Westen in die Fahrrinne der Elbe. Diese Schwebstoffschichten können 80 % und mehr des verklappten Materials enthalten. Die hohe Anfangsgeschwindigkeit für diese Schichten rührte her vom verklappungsverursachten Impuls, vom geneigten Bett der "Rinne" und zusätzlich von den ebbebedingten Kräften. Die weitere Ausbreitung der Phase hoher Konzentration ließ sich in der verfügbaren Zeit nicht weiter untersuchen."

In einem weiteren Experiment war es bei einem Folge-Auftrag von Strom- und Hafenbau an GKSS (im Rahmen einer Hochschulzusammenarbeit mit Uni Kiel) möglich, die Ausbreitung des verklappten Materials auf dem Gewässerboden zu verfolgen. Dabei wurde das Material einer Ebb-Verklappung mit einem Luminiszenz-Tracer markiert. Eine erste Sedimentbeprobung nach 10 Tagen ergab bis etwa 4 km stromab deutlich nachweisbare Tracerkonzentrationen mit ausgeprägten Maxima in 1,5 bis 2 km Entfernung.

In der Verwendung von Tracern scheint vom Ansatz her die bessere Möglichkeit zur Klärung der Frage zu bestehen, wie gravierend das „Recycling", also die Kreislaufbaggerung, bei den gestiegenen Baggermengen wirklich ist. Allerdings muss der Tracer eine Reihe von Bedingungen erfüllen, die sehr schwer zu erreichen sind: er muss hochempfindlich nachweisbar sein; er darf nicht ohnehin schon – auch nicht in Spuren – im Baggergut, Sediment oder Schwebstoff vorhanden sein; er darf sich nicht in Wasser lösen, sondern soll sich beim Transport genau so wie der Schwebstoff des Baggerguts verhalten; er muss ökologisch-gesundheitlich unbedenklich sein und sollte eine ausreichende, aber nicht zu große Lebensdauer haben. Hier ist die Begründung, warum diese Methode nicht schon lange eingesetzt wurde.

H. Christiansen fasst die Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Baggergutumlagerungen folgendermaßen zusammen (Netzband, 1996):

„Die Untersuchungen im Rahmen der durchgeführten Großversuche zur Umlagerung von Baggergut haben gezeigt, dass sich das eingebrachte Material nach kurzer Zeit so in den turbulent fließenden Elbestrom eingemischt hat, dass keine Konzentrationserhöhungen der natürlichen Hintergrundwerte mehr gemessen werden konnten. Auch der Sandanteil des umgelagerten Baggergutes, der sich kaum als Schwebstoff in die Wassersäule einmischt, sondern sohlnah transportiert wird, ist so schnell im Strombereich verfrachtet worden, dass sich Sohlhöhenveränderungen unmittelbar nach einer Umlagerung nicht von natürlichen Schwankungen im Riffelbett der Elbe unterscheiden lassen. Auch nach Umlagerung von mehreren 100.000 m^3 konnten aus Vor- und Nachpeilungen keine darauf zurückzuführenden markanten Veränderungen an der Gewässersohle festgestellt werden. Die Transportkraft der Elbe ist offensichtlich so stark, dass das dynamische Gleichgewicht zwischen den turbulenten Strömungskräften und der Form der Gewässersohle sehr kurzfristig immer wieder hergestellt wird.

Bei den Umlagerungsversuchen wurden die zeitliche und räumliche Ausbreitung und Verteilung der durch das eingebrachte Baggergut entstehenden Trübungsfahnen erfasst. Eine Bilanzierung von natürlichen und durch Umlagerungen eingebrachten Feststoffmengen war dabei nicht möglich."

Christiansen versucht aber, die Größenordnung der durch Umlagerung bewirkten Erhöhung der Feststofffrachten abzuschätzen, wobei er die Ergebnisse von 39 Messungen der Schwebstofffrachten über volle Tiden an der Station Nienstedten aus den Jahren 1986 bis 1991 heranzieht. Bei dieser Rechnung wird vorausgesetzt, dass (1) jährlich eine Baggergutmenge von 2 Mio. m^3/Jahr mit 50 % Sand und 50 % Schlick anfällt, (2) dass nur der Schlickanteil von 1 Mio. m^3/Jahr entsprechend 0,6 Mio. t/Jahr oder 850 t/Tide als Schwebstoff in der Wassersäule verfrachtet wird und (3) dass bei Nienstedten gleichmäßig über alle Tiden (und zwar entweder bei Ebbe oder bei Ebbe und Flut) im Jahr umgelagert wird. Die Ergebnisse der Abschätzung sind in der nachstehenden Tabelle (Tab. 7.1) zusammengefasst.

Selbst bei der ungünstigen Annahme des hohen Schlickanteils im Baggergut ergeben sich relativ kleine Werte für die Erhöhung der Schwebstofffrachten. Dabei ist erwartungsgemäß die prozentuale Erhöhung der natürlichen Frachtraten bzw. Konzentrationen dann am geringsten, wenn bei geringem Abfluss (< 500 m^3/s) schon die natürlichen Werte hoch sind, und umgekehrt am höchsten, wenn bei großem Abfluss (> 900 m^3/s) die natürlichen Werte gering sind. Verglichen mit den Frachtraten in der Trübungszone der Unterelbe können die hier ermittelten Erhöhungen vernachlässigt werden. „Es ist aber davon auszugehen (Christiansen in Netzband, 1996), dass ein Teil des umgelagerten Schlicks mit dem Flutstrom Richtung Hamburg zurücktransportiert wird und sich dort vorwiegend in den Hafenbecken erneut absetzt. Bei geringer Oberwasserführung, d. h. im Mittel zu 40 % des Jahres, wird der Rücktransport relativ hoch sein. … Tendenziell weist gebaggerter und umgelagerter Schlick aus dem Hamburger Hafen in Abhängigkeit von der Ablagerungsdauer eine veränderte Zusammensetzung und ein höheres Absinkverhalten auf als der übrige Schwebstoff (s. a. Greiser et al., 1996). Damit wird dieser Schlick auch in verstärktem Maße an den Ablagerungsprozessen teilnehmen."

Tab. 7.1: Abschätzung der Schwebstofffracht-Erhöhung bei Umlagerung.

Oberwasser	**Natürliche Schwebstofffracht bei Nienstedten (in t/Halbtide)**		**Umlagerungs-mengen (t/Tide)**		**Erhöhung der natürlichen Fracht durch Umlagerung (%)**		
	Ebbe	*Flut*	*nur bei Ebbe*	*bei Ebbe und Flut*	*nur bei Ebbe*	*bei Ebbe und Flut*	
						Ebbe	*Flut*
< 500 cbm/s (40 % Häufigkeit)	6100	6300	850	je 425	14	7	7
500–900 cbm/s (35 % Häufigkeit)	4900	3900	850	je 425	17	9	11
> 900 cbm/s (25 % Häufigkeit)	3100	1600	850	je 425	27	14	27
Jahresmittel	5000	4400	850	je 425	rd. 18	rd. 11	

Führt man diese Abschätzung für die Verhältnisse von 1999 weiter, wo statt 2 Mio. m^3 einschließlich der durch die Fahrrinnenvertiefung anfallenden Baggermengen 9 Mio. m^3 (s. Abb. 6.20) abzüglich ca. 1 Mio. m^3 Landverbringung (METHA) umgelagert wurden, so ergibt sich eine Vervierfachung der in der Tabelle gezeigten Zahlenwerte. Beispielsweise ergäbe sich bei Umlagerung (bei Ebbe und Flut) in der Flutphase bei hohem Oberwasser ($Q_o > 900$ m^3/s) nicht eine Erhöhung der Schwebstofffracht um 27 %, sondern um ca. 100 %, also eine Verdopplung. Es wäre interessant, die Ergebnisse solcher Überlegungen zu vergleichen mit einer an diese Verhältnisse angepassten Simulationsmodellrechnung von der Art, wie sie von A. Sohrmann bei der BAW für die gesamte Unterelbe (s. Abb. 8.1) durchgeführt wurde (Sohrmann, 2006). Ob damit die Basis für ein quantitatives Verständnis der sog. Kreislaufbaggerung gefunden werden kann, ist derzeit nicht zu beurteilen.

8. Zum Anstieg der Baggermengen auf der Hamburger Delegationsstrecke

Wie bereits in Kapitel 6 mit den Abbildungen 6.20 bis 6.23 gezeigt, haben die Baggermengen im Hamburger Zuständigkeitsbereich von HPA nach dem 14,4-m-Ausbau der Tide-Elbe alarmierend zugenommen, während in den weiter stromab gelegenen Bereichen, für die das WSA Hamburg bzw. WSA Cuxhaven zuständig ist, - mit Ausnahme des bereits erwähnten Wegfalls des ehemaligen Baggerschwerpunktes Rhinplatte - keine nachhaltigen Veränderungen erkennbar sind. Der Umstand, dass die Baggermengendiskussion bereits unter der Überschrift von Kapitel 6 „Auswirkungen der Eingriffe" eingeordnet wurde, soll nicht suggerieren, dass zwangsläufig eine Ursache-Wirkungs-Beziehung angenommen werden muss. Dennoch handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht um eine zufällige Koinzidenz. Allerdings scheint der Zusammenhang solch komplexer Natur zu sein, dass die Gründe auf der Basis bisher vorliegender Daten nicht explizit genannt werden können.

Bei der Diskussion der Hypothesen soll der Argumentationslinie von Neville Burt gefolgt werden (Burt, 2006):

(a) Die letzte Fahrrinnenvertiefung („capital dredging") setzte eine Menge an Feststoffen frei, die über große Zeiträume in Stillwasserzonen über die ganze Wassersäule in der Schwebe bzw. in Bodennähe in hochkonzentrierter Form als *Fluid Mud* existieren und damit als Sedimentationspotenzial zur Verfügung stehen. Wie man von der Injektionsbaggerung weiß, genügt ein minimales Bodengefälle oder ein hydraulischer Gradient, um eine solche hochkonzentrierte Suspension in tiefer gelegene Stellen zu befördern. Als ein Beispiel hierfür wird von Burt angeführt, dass im Köhlbrand bei einer Baggeraktion von knapp zwei Monaten ab September 2004 eine Menge von 680.000 m^3 ausgehoben wurde, aber das aus Differenzpeilungen ermittelte Volumen sich lediglich um 100.000 m^3 änderte. Bei einer in 2005 wiederholten Aktion war allerdings das Verhältnis zwischen Bagger- und Differenzpeilungs-Volumen nicht mehr knapp sieben, sondern weniger als zwei. In der Interpretation von Burt erzeugte die Baggerung in 2004 eine Vertiefung, in die sich Fluid Mud ergoss. 2005 war bereits eine gewisse Konsolidierung erreicht, so dass dieser Effekt wesentlich schwächer ausfiel.

Diese Hypothese leidet darunter, dass nach Aussage von G. Werner (Werner, 2006: persönliche Mitteilung) auch mit differenzierten Peilungen (Verwendung verschiedener Frequenzen) im Köhlbrand kein Fluid Mud nachgewiesen werden konnte. Allerdings gaben die vor Ness-Sand durchgeführten Untersuchungen (s. Kap. 7) einen Hinweis auf die Bildung hochkonzentrierter Suspensionen in Bodennähe nach einer Verklappung von schlickreichem Material, die in Richtung Fahrrinne wanderten und sich dort verloren bzw. der Beobachtung entzogen. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass solche Effekte – insbesondere in Verbindung mit dem sog. Tidal Pumping – zu einer Erhöhung der Sedimentbildung im Hamburger Hafen bzw. auf der Delegationsstrecke führen. Es ist jedoch zweifelhaft, dass diese hochkonzentrierten Suspensionen so langlebig sind, dass sie fünf bis sechs Jahre nach der Fahrrinnenanpassung zu derart erhöhter Sedimentbildung beitragen.

b) Durch die Fahrrinnenvertiefung unterhalb Hamburgs verlangsamt sich prinzipiell – wenn auch, gemessen am Effekt auf den gesamten Querschnitt, nur minimal – die Strömung, und damit erhöht sich die Sedimentation. Man kann aus den langjährigen Messreihen, z. B. bei Schnackenburg, abschätzen, wie hoch das *Feststoffangebot von Oberstrom* ist, das maximal für die Sedimentbildung im Hamburger Bereich verfügbar ist. Für die Jahre 1985 bis 2004 variierte die Jahresfracht zwischen 320.000 t (1991 sowie 2001) und 1.100.000 t. Bei einem angenommenen Feststoffanteil von 250 kg pro Kubikmeter Baggergut ergeben sich damit maximal 1 bis 4 Mio. Kubikmeter pro Jahr für den unwahrscheinlichen Fall, dass die gesamte Feststofffracht im Hamburger Bereich deponiert wird. Dies kann daher auch nicht annähernd die angestiegenen Baggermengen erklären.

c) Wie schon Ackermann (BfG) feststellte, lassen sich die beobachteten Elbe-Längs-Gradienten von Schwermetallkonzentrationen in Schwebstoffen am einfachsten dadurch deuten, dass Feststoffe stromauf transportiert werden. Dieser Effekt hängt stark vom Oberwasser ab (Ackermann, 1994). So berechnete Ackermann bei Abflüssen zwischen 200 und 300 m^3/s am Beispiel des Hg-Gehalts im Schwebstoff bei Wedel einen marinen Anteil von mindestens 90 %, während dieser marine Anteil bei Abflüssen um 1500 m^3/s bis auf 50 % zurückgeht.

Inzwischen sind mathematisch-numerische Sediment-Transportmodelle bei der BAW so weit entwickelt, dass der Stromauf-Transport quantitativ nachvollzogen werden kann. So zeigt eine Modellrechnung von A. Sohrmann, dass ab Elbe-km 690 bzw. Elbe-km 680 aufwärts ein advektiver Restschwebstofftransport vorherrscht, der sich vor allem zwischen 1997 und 2002 noch verstärkt hat (Sohrmann, 2006):

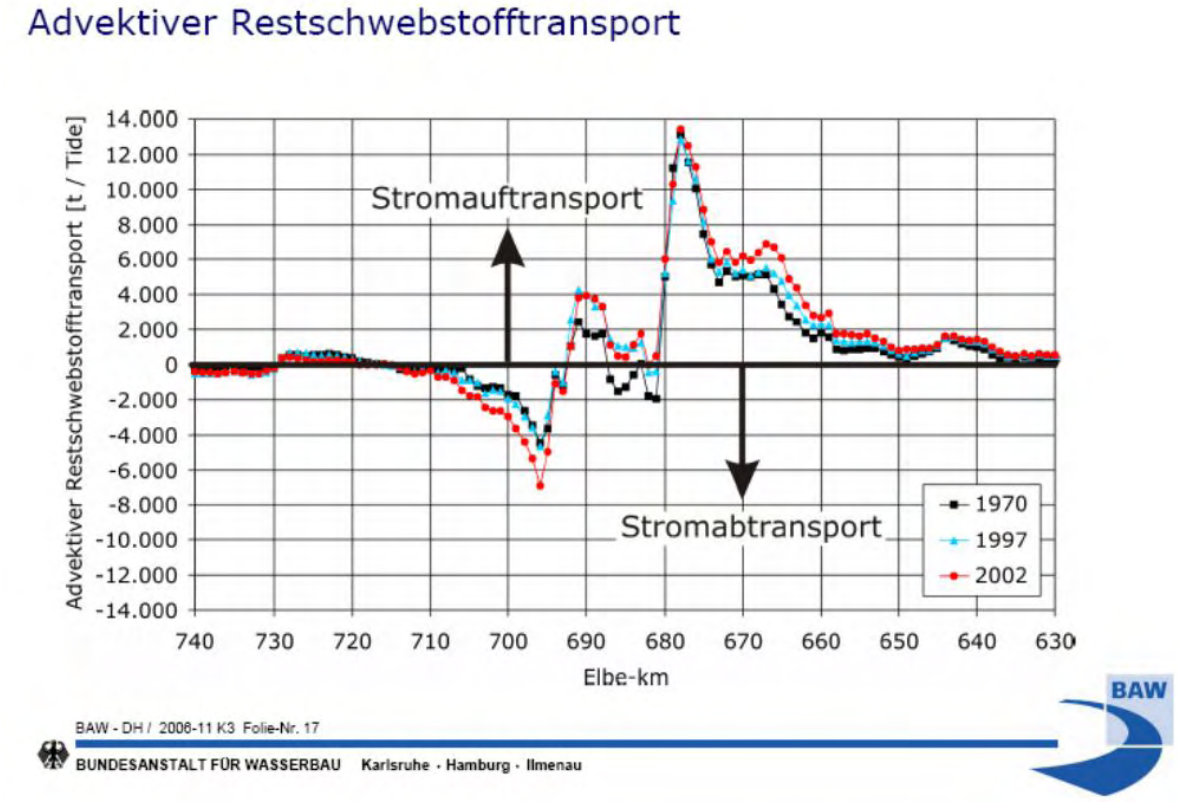


Abb. 8.1: Advektiver Reststromtransport in der Tide-Elbe für die Jahre 1970, 1997, 2002.

Danach werden – gemittelt über einen Spring-Nipp-Zyklus – pro Tide bei der Störmündung ca. 13.000 t, bei Schulau noch über 1.000 t elbaufwärts befördert. Hochgerechnet auf ein Jahr ergäbe diese stromauf gerichtete Restschwebstofffracht bei Schulau einen Wert von 700.000 t, was die aus der Mittelelbe zugeführte mittlere Jahresfracht von ca. 500.000 t Schwebstoff noch übertrifft. Hierbei ist allerdings zweierlei zu bedenken: (1) Bei der Simulationsmodellrechnung wurde die Erhöhung der Schwebstofffrachten durch Umlagerungen nicht einbezogen; (2) der bei Schulau stromauf beförderte Schwebstoff lagert sich natürlich nicht quantitativ in Hafenbecken und Fahrrinne des Hamburger Delegationsgebietes ab.

Im Gegensatz zur Behauptung in b) haben sich nach dieser Modellrechnung die Strömungsgeschwindigkeiten (sowohl Ebbe wie Flut) nach dem 14,4-m-Ausbau leicht erhöht, was auf den verringerten Einfluss der Reibung durch größere Wassertiefe zurückzuführen ist. Auch die über die Wassersäule gemittelten Schwebstoffkonzentrationen sind gemäß Modell (Abb. 8.2) zwischen 1997 und 2002 im Hamburger Bereich um 25 bis 50 % angestiegen (leider ist es wegen der hohen zeitlichen Variabilität und der räumlichen Heterogenität sehr schwierig, hierfür den Beweis durch Messungen erbringen).

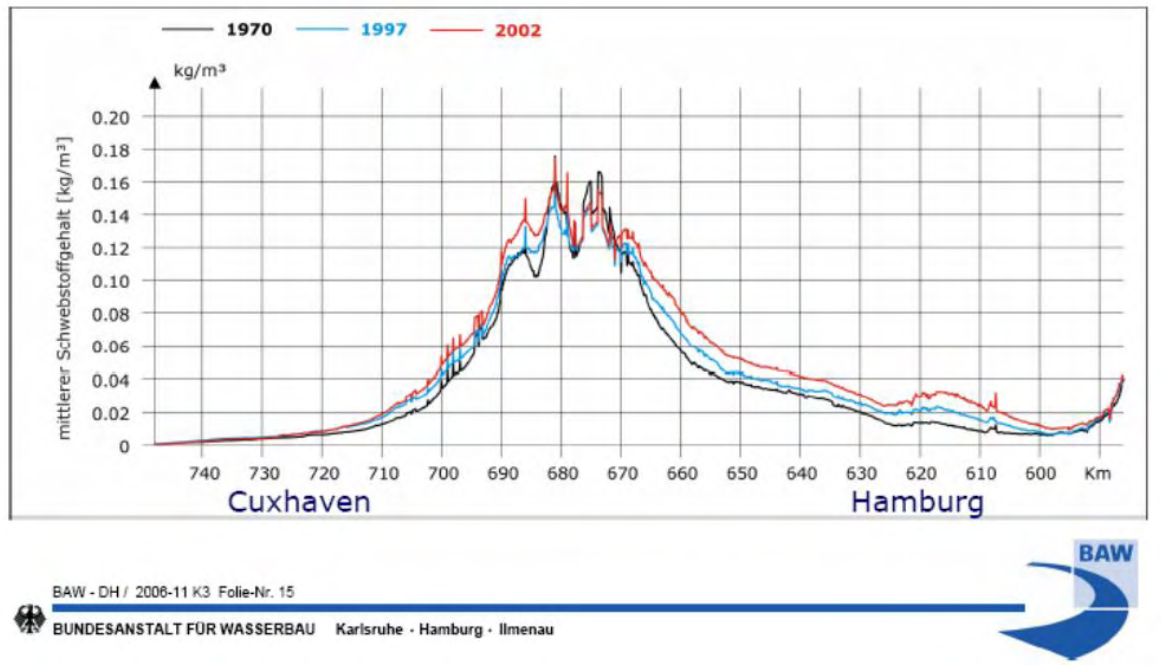


Abb. 8.2: Entwicklung des tiefengemittelten SPM-Gehalts in der Tide-Elbe.

Alle diese transportmodellbasierten Aussagen weisen – wenn auch bislang noch nicht fallbezogen quantitativ – darauf hin, dass der vermehrte Baggergutanfall mit dem „Tidal Pumping" zusammenhängt. Tidal Pumping wiederum ist in kritischer Weise mit dem Abfluss verknüpft, indem dieser Effekt nämlich vor allem bei niedrigem Oberwasser unter 600 m^3/s zum Tragen kommt. Damit wäre auch plausibel, weshalb in den abflussarmen Jahren 2004 und 2005 extrem hohe Baggergutmengen auftraten.

Der Mechanismus des Tidal Pumping funktioniert natürlich nicht erst seit der letzten Fahrrinnenanpassung; auch früher schon muss er in erheblichem Maße zur Sedimentbildung im Hafenbereich beigetragen haben. Die Besonderheit der letzten Jahre besteht darin, dass (1) beim 14,4-m-Ausbau mehr Baggermaterial anfiel und an der unteren Grenze der Hamburger Delegationsstrecke umgelagert wurde und dass (2) die extrem niedrigen Abflussverhältnisse einen verstärkten Stromauf-Transport bewirkten. Außerdem wäre freilich auch das von Oberstrom kommende Material am Tidal Pumping beteiligt, was in einer Spätwirkung der beim August-Hochwasser 2002 mobilisierten Feststoffe möglicherweise nicht ganz zu vernachlässigen ist. Letztlich wäre aber das „Recycling" (wie Burt es nennt) oder die „Kreislaufbaggerung" die Ursache für den vermehrten Baggergutanfall.

Die Modellierung des BAW hat bereits wesentlich zum Prozessverständnis beigetragen, wenn auch noch etwas fehlt, was man in der Fernerkundung mit „Ground-Truth-Messung" bezeichnet, also eine Art experimenteller Verifikation. Man darf sicher trotzdem weitere aufschlussreiche Aussagen erwarten. Auch Burt, der wohl die Rechenergebnisse von Sohrmann noch nicht kannte und daher Zweifel hegte, ob Tidal Pumping wirklich die ganze Wahrheit sei, verspricht sich viel von weiteren Modell-Studien.

d) Unabhängig von den zuvor genannten Effekten besteht noch eine gewisse Möglichkeit, dass das Flussbett durch die letzten Bauaktivitäten destabilisiert wurde.

Der Förderkreis „Rettet die Elbe" (RdE, 2006) formuliert das Phänomen beispielsweise wie

folgt: „Baggert man jetzt noch 25 Mio. Kubikmeter Sediment vom Grund der Rinne, gräbt die Elbe durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit nochmals und gratis bis zu 50 Mio. Kubikmeter weg. Das ist das Ergebnis der Berechnungen der Bundesanstalt für Wasserbau in Wedel, von der es „morphologischer Nachlauf" genannt wird. Für mehrere Millionen DM (insgesamt wurden an alle Gutachter über 10 Mio. DM ausgeschüttet) wurden dort die Folgen der Vertiefung für die Hydrodynamik der Elbe berechnet. Der morphologische Nachlauf setzte bereits bei der Vertiefung auf -15 m NN (entspricht -13,5 m Kartennull) in den siebziger Jahren ein. Dass er sich nicht auf eine Gleichgewichtstiefe eingependelt hat, zeigt das heutige Ist-Profil, und die Freilegung der Autobahn-Elbtunnel-Röhren. – Am 18. August 1997 berichtete das Hamburger Abendblatt als Titelgeschichte, der Autobahntunnel zwischen Waltershof und Övelgönne sei schon häufiger freigespült worden. Um ihn gegen eventuelle Schiffsunfälle zu sichern, seien Schlackensteine als Schutzmantel daraufgepackt worden …" Dass solche Effekte lokal auftreten können setzt voraus, dass das Flussbett aus einem leicht erodierbaren Material besteht und dass die Strömungsgeschwindigkeit vor Ort hoch genug ist. Es ist nicht auszuschließen, dass dies an einigen Stellen in der Tide-Elbe der Fall ist.

Bei der Fahrrinnenanpassung mussten zur Erreichung der Soll-Tiefe partiell in einigen Bereichen die Rippelspitzen weggebaggert werden. Da aber die Rippel-Struktur – wie man weiß – eine morphologische Konstante zu sein scheint, werden nach der Kappung der Spitzen durch die Strömung die Rippel-Täler durch Erosion so lange vertieft, bis wieder das alte Peak-to-Valley-Verhältnis erreicht ist. Dies kann eine weitere Quelle für Material sein, das sich in anderen Bereichen absetzt.

Die genannten Effekte, die man zum „morphologischen Nachlauf " zählt, können durchaus ihren Anteil an den gestiegenen Baggermengen haben. Sie müssten jedoch im Laufe der Zeit ausklingen; die Situation müsste sich „beruhigen".

Die Tatsache, dass der Baggergutanfall im HPA-Bereich bereits im Jahr 2006 wieder deutlich weniger wurde, könnte drei Ursachen haben:

(1) Der morphologische Nachlauf bzw. die Auswirkung der Störung des Systems klingt ab.

(2) Der Oberwasserabfluss hat sich wieder normalisiert; damit erreicht auch der Stromauftransport bzw. die Kreislaufbaggerung kleinere Werte.

(3) Die Entfernung von jährlich 1,5 Mio. Kubikmeter aus dem System, die nach E3 in der Deutschen Bucht umgelagert werden dürfen, zeigt bereits eine Wirkung.

Es bleibt spannend abzuwarten, ob der Trend zur weiteren Verringerung des Baggergutanfalls anhält und ob durch Prozessuntersuchungen festgestellt werden kann, welche der vermuteten Ursachen wirklich verantwortlich ist.

9. Wissensdefizite und Forschungsbedarf

Die nach der letzten Fahrrinnenanpassung von 1999 im Amtsbereich der Hamburg Port Authority (HPA) extrem gestiegenen Baggermengen und die damit verbundenen Probleme der Umlagerung haben die Fragen nach den zugrunde liegenden Feststofftransportprozessen im Regime der Tide-Elbe und der Deutschen Bucht drängender werden lassen. Auch im Amtsbereich des WSA Hamburg beobachtet man seit 1999 erhebliche Veränderungen: Die Baggermengen für den Abschnitt Rhinplatte gingen drastisch zurück, während sie in den Abschnitten Lühesand, Wedeler-Au und besonders Wedel stark angestiegen sind. Insgesamt ergibt sich eine Verlagerung der Baggerschwerpunkte stromauf in den Hamburger Bereich.

Über die Ursachen dieser Entwicklung werden derzeit mehrere Hypothesen diskutiert; aber keine kann voll überzeugen geschweige denn durch schlüssige Beweise erhärtet werden. Das Wissen um die quantitativen Feststofftransporte in der Tide-Elbe ist noch sehr lückenhaft. Nicht einmal die relative Bedeutung der unterschiedlichen Transportprozesse, wie sie in dieser Synopse vorgestellt wurden, ist ausreichend bekannt.

Sohlnahe Transportprozesse, die für den Eintrag von Feststoffen aus der Deutschen Bucht in das Ästuar von herausragender Bedeutung sind, können mit der heutigen Messtechnik kaum erfasst werden und sind deshalb in ihrer Größe sowie ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität nicht bekannt. Das betrifft besonders den grobkörnigen Feststoff, den Sand. Zwar lassen sich durch Peilungen aus der zeitlichen Veränderung der Gewässersohle Sandtransportraten bestimmen, die sie verursachenden Prozesse sind jedoch nicht genau genug bekannt, um für zuverlässige Prognosen genutzt zu werden. Der sohlnahe Feststofftransport (in der Form von „Fluid Mud") kann auch beim Eintrag aus dem Oberlauf sowie bei Umlagerungen eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen; hierfür gibt es – wie in der Synopse erwähnt – Hinweise aus einem im Frühjahr 1995 durchgeführten Verklappungsexperiment vor Ness-Sand. Allerdings ist auch hier die experimentelle Datenbasis viel zu gering, als dass daraus quantitative Schlüsse für den Anteil am Gesamttransport bzw. am Rücktransport, einem Phänomen der „Kreislaufbaggerung", gezogen werden könnten.

Die Verweilzeiten der aus dem Oberlauf in das Ästuar eingetragenen Feststoffe und der Austausch von Feststoffen aus der Elbe mit denen aus der Deutschen Bucht lassen sich nur im längerfristigen Mittel aus Veränderungen der Schad- und Spurenstoffbeladung abschätzen. Die direkten Auswirkungen von Oberwasserwellen konnten aufgrund fehlender Messstationen bisher nur im oberen Teil des Ästuars beobachtet werden. In welchem Ausmaß dabei ein Eintrag in die Deutsche Bucht erfolgt, ist weitgehend unbekannt. Basierend auf Längsprofilmessungen der ARGE Elbe vor und nach einer Oberwasserwelle gibt es anhand der Veränderungen des Inventars der Trübungszone lediglich Abschätzungen für die Obergrenze des Feststoffeintrags in die Deutsche Bucht.

Zur Beseitigung von Wissenslücken und zur Prognose der Auswirkungen künftiger Baumaßnahmen auf das Feststoffregime wird die sich ergänzende Kombination von langfristigen Messungen mit Simulationen des Feststofftransportes mittels numerischer Modelle von immer größerer Bedeutung werden. Nur langfristige Messungen erfassen die vielen Zeitskalen der natürlichen Variabilitäten der Feststoffdynamik. Aus der Statistik dieser Variabilitäten lassen sich dann Trends und kausale Systemzusammenhänge ableiten. Einerseits können durch Messungen Modelle kalibriert und verifiziert werden. Andererseits liefern Modellergebnisse Hinweise auf repräsentative Messgrößen und Messpositionen und können zur raumzeitlichen Interpolation von Messungen verwendet werden. Dieses Zusammenwirken bildet die Grundlage eines künftigen modellbasierten Monitorings des Feststofftransports.

Die an der Tide-Elbe und in der Deutschen Bucht bestehenden Messstellen (z.B. in Zusammenhang mit der Beweissicherung zu letzten Fahrrinnenanpassung) sollten weiter betrieben und durch kontinuierliche Schwebstoffmessungen ergänzt werden. Von Vorteil wäre auch eine zentrale Datensammelstelle aller beteiligten Institutionen.

Messtechnisch sollte dem sohlnahen Feststofftransport größere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Zur Klärung des Problems der Kreislaufbaggerung wären gezielte Tracer-Experimente in Verbindung mit kleinskaligen Modellrechnungen vonnöten.

Den Forschungs- und Entwicklungsbedarf kann man wie folgt zusammenfassen:

1. Erarbeitung homogener und repräsentativer Datensätze zur Erkennung des Einflusses von Baumaßnahmen;

2. Dokumentation und Analyse raum-zeitlicher Veränderungen in der Tide-Elbe und der Deutschen Bucht;

3. Entwicklung von Modellen und integrativen Szenarien im Hinblick auf die erfassten Veränderungen;

4. Identifizierung von Quellen, Transportwegen und Senken der Feststoffe sowie Quantifizierung der einzelnen für den Feststoffhaushalt relevanten Prozesse;

5. Untersuchungen zur Erfassung des sohlnahen Feststofftransports;

6. Quantifizierung der Kreislaufbaggerung;

7. Untersuchungen zu individuellen und kumulativen Effekten von Baumaßnahmen auf Hydrodynamik, Feststoffhaushalt und Schichtung des Wasserkörpers.

Literatur

Ackermann, F. (1993): Die Schwermetallbelastung von Schwebstoffen und Sedimenten der Tide-Elbe von 1980 bis 1992. BFG-Nr.0904 (Poster-Vortrag zum 4. Magdeburger Gewässerschutzseminar).

Ackermann, F. (1994): Zum Transport kohäsiver Feststoffe im Tidebereich. Poster, 6. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Cuxhaven, 12.11.1994.

Ackermann, F. (1995): Untersuchung der Einbringung von Baggergut aus dem Bereich der Schleuse Brunsbüttel in die Außenelbe. BfG - 0874. Koblenz Dez. 1995. S. 1–76.

Ackermann, F.; Stammerjohann, D. (1996): Schwermetallbelastung im Sediment des Mühlenberger Lochs (Tide-Elbe). BFG-Nr. 1017, S. 1–4.

Amt Strom- und Hafenbau, Hamburg: Akten und Archivmaterial unterschiedlicher Jahre (1979–1993).

Amt Strom- und Hafenbau (1994): Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe. Grundlagen für die technische Planung auf der Delegationsstrecke. Ref. Hydrologie, Studie Nr.72.

Anonymus (1991): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Ökologische Voruntersuchung –. Materialienband und Ergebnisbericht zur Expertenanhörung am 12./13.08.1991 in Hamburg.

ARGE ELBE (1979–1993): Zahlentafeln der Jahre 1979 bis 1993. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (Hrsg.).

ARGE ELBE (1980): Schwermetalldaten der Elbe – von Schnackenburg bis zur See – 1979–1980. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (Hrsg.), S. 1–66.

ARGE ELBE (1984): Gewässerökologische Studie der Elbe – von Schnackenburg bis zur See. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (Hrsg.), S. 1–98.

ARGE ELBE (1988): Schwermetalldaten der Elbe– von Schnackenburg bis zur See – 1984–1988. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (Hrsg.), S. 1–193.

ARGE ELBE (1990): Gewässergütebericht Elbe 1985–1990. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (Hrsg.), S. 1–44.

ARGE ELBE (1992): Salzgehalts- und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe. Riedel-Lorje, J.C., Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (Hrsg.), S. 1–121.

ARGE ELBE (1994): Zahlentafel 1994. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe

ARGE ELBE (1996): Wassergütedaten der Elbe von Schmilka bis zur See – Zahlentafel 1994. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (Hrsg.), S. 1–255.

Aue, D. (1991): Angewandte Fernerkundung in der Geographie – Interpretation der Karten aus dem Projekt Trübungsbefliegung der Elbe. Unveröffentl. Magisterarbeit, TU-Berlin, 1991.

AWU (1994): Meßtechnische Begleitung einer Baggergutverklappung in Übertiefen am Fahrwasserrand der Unterelbe. Erläuterungsbericht, Hamburg 1994.

Barg, G. (1979): Untersuchungen über Salzgehaltsverteilungen in Brackwassergebieten von Tideflüssen am Beispiel der Unterweser. Mitt. Franzius-Institut. 49, S. 1–107.

BAW (1984): Bericht über ergänzende Auswertungen zu den Untersuchungen der Sandbewegungen an der Klappstelle Spitzsand-West in der Außenelbe mit Hilfe von radioaktiven Tracern. Bundesanstalt für Wasserbau-Außenstelle Küste. BAW 4835500.

BAW (1996): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Gutachten zur morphologische Entwicklung der Nebenelben und Nebenrinnen. Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste. BAW 9453 3417.

BAW (1996): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Zusammenfassendes Gutachten der Hydromechanik. Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste. BAW 9553 3417/34.

BAW (1996): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Gutachten. Ausbaubedingte Änderungen der Tidedynamik – Hauptbericht. Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste. BAW 9353 3387. Mit CD-ROM.

BAW (1996): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Ausbaubedingte Änderungen der Tidedynamik in den Elbenebenflüssen Ilmenau, Este, Lühe, Schwinge, Pinnau, Krückau, Stör und Oste. Bundesanstalt für Wasserbau, Außenst. Küste. BAW 9453 33+91-92/98-99, BAW 9453 34+01-04/06-13.

BAW (I 997): Untersuchungen einiger Strombaumaßnahmen in der Unterelbe, UVU Fahrrinnenanpassung Unter/Außenelbe.

Behre, K.-E. (1983): Die ursprüngliche Vegetation in den deutschen Marschgebieten und deren veränderung durch prähistorische Besiedlung und Meeresspiegelbewegungen. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Bd. XIII, S. 85–96.

Behre, K.-E. (1987): Meeresspiegelbewegungen und Siedlungsgeschichte in den Nordseemarschen. Vorträge der Oldenburgischen Landschaft, H.17, S. 7–46.

Behre, K.–E. (2001): Holozäne Küstenentwicklung, Meeresspiegelbewegungen und Siedlungsgeschehen an der südlichen Nordsee. Bamberger Geographische Schriften, Bd. 20, S. 1–28.

Bergemann, M. (1995): Die Lage der oberen Brackwassergrenze im Elbeästuar. DGM 39, H. 4/5, S. 134–137.

Bergemann, M.; Blöcker, G.; Harms, H., Kerner, M.; Meyer-Nehls, R.; Petersen, W.; Schroeder, F. (1996): Der Sauerstoffhaushalt der Tide-Elbe. Die Küste Nr. 58.

Bernhard, M. (1996): Die Entwicklung an der Fahrrinnensohle in Übertiefen der Unter- und Außenelbe anhand einiger ausgewählter Streckenabschnitte. SB4-Studie Nr. 3, WSA Hamburg. S. 1–36.

Beweissicherung (2005): Bericht zur Beweissicherung 2004 der Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Aussenelbe an die Containerschifffahrt, Version 3.0, WSA Hamburg und HPA.

BfG (1984): Untersuchungen zur Umlagerung von Baggermaterial im Tidegebiet der Unterelbe. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz: BfG-0171.

BfG (1992): Handlungsanweisung. Anwendung der Baggergut-Richtlinien der Oslo- und der Helsinki-Kommission in der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung des Bundes (HABAK-WSV). Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz: BfG-0700.

BfG (1994): Bewertungsverfahren in der Umweltverträglichkeitsuntersuchung an Bundes-

wasserstraßen. Bearbeitet durch die Arbeitsgruppe „Bewertung in der UVU" der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz: BfG-0796.

BfG (1995): Untersuchung der Einbringung von Baggergut aus dem Bereich der Schleuse Brunsbüttel in die Außenelbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde. BfG-0874.

BfG (2006): Die Elbevertiefung 1999 – Ökologische Zusammenhänge zu Sauerstoffhaushalt und Sedimentdynamik –. BfG-1523.

Bittner, K. (1991): Eine Langzeituntersuchung über Strömung und Schwebstoff im Elbeästuar. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 91/E/81.

BLAK-QZ (1992): Konzeption zur Ableitung von Ziel vorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen. Länderarbeitsgemeinschaft, Bund-Länder-Arbeitskreis „Qualitätsziele" , ZV-Konzeption, Entwurf, Stand 05.08.92, unveröff.

Boehlich, M.; Ruland, P. (1996): Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe. Gutachten Ausbaubedingte Änderung der Tidedynamik. Hauptbericht. BAW 9353 3387, S. 1–112.

Boehlich, M. J. (2003): Tidendynamik der Elbe. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 86, S. 55–60.

Borchert, G. (1978): Klimageographie in Stichworten. Kiel 1978.

Bornhold, J.; Puls, W.; Kühl, H. (1992): Die Flockenbildung von Elbeschwebstoff: Untersuchungen mit Fraktionen unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeit. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 92/E/88.

Brügmann, L. (1995): Metals in sediments and suspended matter of the river Elbe. The Science of the Total Environment, 159, 53–65.

Brunhoeber, S. (1990): Verteilung und Stoffwechselaktivität nitrifizierender Bakterien in der Elbe bei Hamburg. Diplomarbeit, Inst. f. Allgemeine Botanik, Universität Hamburg.

Burchard, H.; Baumert, H. (1998): The formation of estuarine turbidity maxima due to density effects in the salt wedge. A hydrodynamic process study. Journal of Physical Oceanography, 28, S. 309–321.

Burchard, H. (1995): Turbulenzmodellierung mit Anwendung auf thermische Deckschichten im Meer und Strömungen in Wattengebieten. Dissertation, Universität Hamburg.

Burt, N. (2006): Sediment Management Strategies in the Elbe Estuary. Final Report, 12 May 2006.

Busquets, T.; Irion, G.; Kröncke, I.; Pino, M. (2001) Tonmineralogische und geochemische Untersuchungen zum Sedimenttransport im Elbe Ästuar. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Sediment 13, 27.

Busquets Püschel, T. P. (2003): Tonmineralogische, geochemische und makrofaunistische Untersuchungen zum Sedimenttransport im Elbeästuar (Deutschland) und im Ästuar des Rio Valdivia (Chile). Dissertation, Naturwissenschaftliche-Mathematischen Gesamtfakultät, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.

Busquets Püschel, T. P.; Irion, G.; Kröncke, I. (2005): Recent and Mid- to Late Holocene sediment transport in the Elbe estuary as revealed by mineralogical and faunistic methods.. System Earth – Biosphere Coupling/Regional Geology of Central Europe, 59.

Calmano, W.; Ahlf, W.; Förstner, U. (1990): Exchange of heavy metals between sediment components and water. NATO ASI Series 23, Springer, Berlin. S. 503–522.

Caspers, H. (1958): Biologie der Brackwasserzone im Elbeästuar. Intern. Verein. Limnol. 13, S. 687–698.

Caspers, H. (1959): Vorschläge einer Brackwassemomenklatur (The Venice System). Int. Rev. ges. Hydrobiol. 44, S. 313–316.

Caspers, H. (1984): The oxygen production in a bay within the freshwater section of the Elbe Esutary. An investigation of the „Muehlenberger Loch" in Hamburg. Arch. Hydrobiol. Suppl. 61 (1984) S. 509–542.

Chen, S.; Eisma, D.; Kalf, J. (1994): In situ distribution of suspended matter during the tidal cycle in the Elbe estuary. Netherlands Journal of Sea Research 32, 1, S. 37–48.

Christiansen, H.: Erste Ergebnisse aus Schwebstoffmessungen mit dem CUX-SAMPLER in der Elbe. Die Küste 42, 1985.

Christiansen, H. (1985a): Das Forschungsvorhaben Schlick/Schwebstoffe in Ästuaren. Die Küste 42, 1985, S. 115–121.

Christiansen, H. (1985b): Erste Ergebnisse aus Schwebstoffmessungen mit dem CUX-SAMPLER in der Elbe. Die Küste 42, 1985, S. 123–134.

Christiansen, H. (1987): Wasserflächen und Tidevolumen im Hamburger Hafen. Strom- u. Hafenbau, Gewässerkundliche. Studie Nr. 8, 1987.

Christiansen, H.; Haar, S.; Radtke, G. (1985): Zur Sedimentation in Hamburger Hafenbecken. Gewässerkundliche Studie Nr. l, Strom- und Hafenbau, Hamburg, S. 1–16.

Christiansen, H.; Kamps, A. (1985): Sedimentationsverhältniss in Hamburger Hafenbecken Auswertung von Peilungen der Jahre 1977–1984. Strom- und Hafenbau, Hamburg: Gewässerkundliche Studie Nr. 3, 1985

Christiansen H.: Suspended Sediment Measurements in the Elbe Estuary of Hamburg using a CUX-SAMPLER. Proc. Euromech 192, A. A. Balkema, Rotterdam, 1986.

Christiansen, H.; Oehlmann, G.; Tent, L. (1987): Neue Erkenntnisse über Schlickbildungs- und Sedimentationsprozesse im Hamburger Hafen. In: Jahrbuch der HTG, Bd. 42, 1987, S. 279–292.

Christiansen, H.; Haar, S. (1991): Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken. Auswertungen der Peilungen von 1977 bis 1990. Strom- und Hafenbau, Hamburg: Gewässerkundliche Studie 12.

Christiansen, H.; Greiser, N.; Toppe, A. (1995): Abschätzungen der Sedimentationen durch die geplanten Strombaumaßnahmen in Altenwerder. Int. Studie, Strom- und Hafenbau, Hamburg, vom 23.11.1995.

Dammschneider, H.-J. (1983): Morphodynamik, Materialbilanz und Tidewassermenge der Unterelbe. Berliner Geogr. Studien, Bd. 12, 1983.

Dammschneider, H.-J. (1984): Bericht zur quantitativ-morphologischen Analyse des Unterelbe-Peilbereichs km 647.8 – km 649.0 für den Zeitraum vom 20.7. bis 7.9.1983, Klappversuchsauswertung im Maßstab 1:2000. Unveröffentlichtes Gutachten, Berlin 1984.

Dammschneider, H.-J. (1985): Quantitative Morphodynamik im Sohlenregime der Unterelbe. Die Küste, H.42, 1985, S.245–267.

Dammschneider, H.-J.; Felshart, Th. (1985): Querschwingungen in der Unterelbe – ein Beispiel für aktuelle Mäanderbildung in Tideflüssen? Die Küste, H. 42, 1985, S.101–114.

Dammschneider, H.-J. (1986a): Influviale Schwemmfächer – Über die lokalen Folgen natürlicher Materialumlagerungen im Bereich der Unterelbe. Die Küste, H.43, 1986.

Dammschneider, H.-J. (1986b): Flächenhafte Materialanalyse und Sohlformeninterpretation – Grundlagen zur Bestimmung der gerichteten Morphodynamik im Elbeästuar. Unveröffentl. Untersuchung, Hamburg 1986.

Dammschneider, H.-J. (1988): Luftbildkartierung von Schwimmerbahnen – Eine Methode zur iterativen Aufnahme von flächenhaften Strömungsverteilungen und ihr Vergleich zur punktuellen In-situ-Meßwertgewinnung. Die Küste, H. 47, 1988.

Dammschneider, H.-J. (1989): Die Höhenvariabilität einer Sedimentoberfläche– über den Einfluss hydrographischer Parameter auf morphologische Veränderungen in der Unterelbe. Die Küste, H. 50, S. 231–257.

Dammschneider, H.-J. (1991): Hydrographie des Wedeler Jachthafens – Begleitende Untersuchungen während des Einsatzes einer hydrodynamischen Egge im März 1991. Unveröffentl. Gutachten, Hamburg, 1991.

Dammschneider, H.-J. (1992a): Der Unterelbe-Salzkeil – Eine morphodynamische Bewertung. Die Küste, H. 53, 1992.

Dammschneider, H.-J. (1992b): Hydrographische Untersuchungen über quantitative Trübungs und Schwebstoffveränderungen bei Baggerguteinleitungen in die Elbe. Unveröffentlichtes Gutachten, Hamburg, 1992.

Dammschneider, H.-J.; Hartmann, P. (1993): Baggergutstudie Glückstadt, Abschlußbericht. Unveröffentlichtes Gutachten, Hamburg, 1993.

Davies, J. L. (1973): Geographical variation in coastal development. Hafner, New York, S. 204.

Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (1989), Unteres Elbegebiet. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Strom- und Hafenbau, Hamburg (Hrsg.).

DHI (1983): Hamburger Hafen – Wasserstände, Durchflussmengen, Geschwindigkeiten. Danish Hydraulic Institute. Auftrag des Amtes Strom- und Hafenbau, Hamburg, 1983.

Dieckmann (1996a): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Gutachten zur morphologischen Entwicklung der Hauptabflussrinne der Elbe nach dem KN – 13,5-m Ausbau. BAW 9453 3417, S. 1–81.

Dieckmann (1996b): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Gutachten zur morphologischen Entwicklung der Nebenelben und Nebenrinnen seit 1945/1950. BAW 9453 3417. S. 1–121.

Doerffer, R.; Puls, W.; Pan; D., Essen, H.-H.; Gurgel, K.-W.; Hessner, K.; Pohlmann, T.; Schirmer, F.; Schlick, T. (1994): Evaluation of the North Sea, joining in situ and remotely sensed data with model results. In: Sündermann, J. (Ed.): Circulation and contaminant fluxes in the North Sea, Springer Verlag, Berlin. S. 434–457.

DRL (2005): Measurement of sediment transport at the buoy E3 dredged material disposal site, German Bight, North Sea, Dredging Research Ltd, 3 Godalming Business Centre, Woolsack Way, Godalming, Surrey GU7 1LG, UK, Report 348.EU.0905.1.

Dücker, H. P.; Glindemann, H. (2006): Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg. HPA – Hamburg Port Authority und Wasser- und Schiffahrtsverwaltung des Bundes.

Dillo, H.-G. (I960): Sandwanderung in Tideflüssen. Mitteilungen des Franzius-Inst. Hannover, H. 17, 1960.

Dyer, K. R. (1986): Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. John Wiley & Sons, Chichester.

Dyer, K. R.; Moffat, T. J. (1998): Fluxes of suspended matter in the East Anglian plume, southern North Sea. Continental Shelf Research, 18 (11), S. 1311–1331.

Eichweber, G.; Lange, D. (1996): Über die Bedeutung der Reflexion von Obertiden für die Unterhaltsaufwendungen in der Tide-Elbe, Die Küste, 58, S. 179–198.

Eichweber, G.; Lange, D. (1998): Tidal subharmonics and sediment dynamics in the Elbe Estuary, Proc. 3rd International Conf. On Hydroscience and Engineering, Cottbus/Berlin, 31.8–3.9.1998.

Eisma, D. (1971): Sediment distribution in the North Sea in relation to marine pollution. In: Goldberg, E. D. (Ed.) , North Sea Science. NATO North Sea Science Conference 1971. MIT Press, Cambridge, S. 31–52.

Eisma, D.; Kalf, J. (1987): Distribution, organic content and particle size of suspended matter in the North Sea. Netherlands Journal of Sea Research, 13 (2), S. 265–285.

Eisma, D.; Irion, G. (1988): Suspended matter and sediment transport. In: Salomons, W.; Blayne, B. L.; Duursma, E. K.; Förstner, U. (Ed.): The Pollution of the North Sea – An assessment. Springer Verlag, Berlin, S. 20–35.

Erhardt, I. (1991): Mineralogische/Geochemische und Sedimentologische Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Wattgebiet südlich der Insel Spiekeroog (Ostfriesland). Diplomarbeit, Geologisch-Paläontologischen Institut, Universität Heidelberg.

Ernst, A. (1995): Hamburger Elbschlick – Untersuchungen zur Charakterisierung des anorganischen Phasenbestandes. Im Auftrag des Amtes Strom- und Hafenbau, Hamburg, April 1995, S. 1–50.

Ernst, A. (1998): Tonminerale in Schwebstoffen und schwebstoffbürtigen Sedimenten der Elbe. Dissertation, Naturwissenschaftliche-Mathematischen Gesamtfakultät, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Exner, F. M. (1925: Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. In: Sitzungsbericht d. Akad. d. Wissenschaft in Wien, Abt.IIa, Bd.134.

Exner, F. M.(1931): Zur Dynamik der Bewegungsformen auf der Erdoberfläche. In: Ergebnisse d. Kosm. Physik, Bd. L.

Fairbridge, R. W. (1980): The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: Olaussen, E.; Cato, I. (Eds.): Chemistry and Biochemistry of Estuaries, S. 1–36.

Fanger, H.-U. et al. (1989): A Study on the Transport of Pollutants through the Hamburg Harbour. In: Umweltbehörde Hamburg (Ed.): Der Hafen, eine ökologische Herausforderung.

S. 120–125. (GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 89/E/32).
Fanger, H.-U.; Kappenberg, J.; Männing, V. (1990): A study on the Transport of Dissolved and Particulate Matter through the Hamburg Harbour. In: Michaelis, W. (Ed.):Estuarine Water Quality Management-Monitoring, Springer Verlag Berlin. Coastal Estuarine Management 36, S. 127–134.

Fanger, H.-U.; Amann V., Brockmann, U.; Gege, P.; Herbers, D.; Jablonski, R.; Prange, A.; Rybaczok, P. (1996): Spatial and Tidal Distributions of Suspended Particulate Matter along the Lower Elbe River – First Results from a Joint Venture including Airborne Remote Sensing, Helicopter and Shipborne Investigations: BILEX 93. Advances in Limnology, 47, Particulate Matter in Rivers and Estuaries, Archiv für Hydrobiologie, S. 207–219.

Felshart, Th. (1985): Quantitative Untersuchungen zur Morphodynamik im Sohlenregime der Unterelbe zwischen Cuxhaven und St. Margarethen. Unveröffentl. Magisterarbeit, Berlin 1985.

Ferk, U. (1995): – Fahrrinnenanpassung von Unter und Außenelbe – Konzeption eines Monitoringprogramms für den Bereich der Hamburger Delegationsstrecke, Strom- und Hafenbau, Hamburg, Studie Nr. 79, S. 1–23.

Festa, J. F.; Hansen, D. V. (1978): Turbidity maxima in partially mixed estuaries – a two-dimensional numerical model. Est. Coast. Mar. Sci. 7, S. 347–359.

Ferk, U. (1995b): – Fahrrinnenanpassung von Unter und Außenelbe – Übersicht über geplante Baumaßnahmen im Bereich des Hamburger Hafens als Grundlage für die Erstellung der „Null-Variante" der UVU. Strom- und Hafenbau, Hamburg: Studie Nr. 75. S. 1–18.

Figge, K. (1980): Das Elbe-Urstromtal im Bereich der Deutschen Bucht (Nordsee). Eiszeitalter und Gegenwart, 30, S. 203–211.

Figge, K. (1981): Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht, 1:250000, Deutsches Hydrographisches Institut (Ed.), Hamburg.

Flemming, B. W.; Bartolomä, A. (1997): Response of the Wadden Sea to a rising sea level: a predictive empirical model, Deutsche Hydrographische Zeitung, 49(2/3), S. 343–353.

Flemming, B. W.; Bartolomä, A.; Irion, G.; Kröncke, I.; Wehrmannn, A. (2002): Naturraum Wattenmeer. Akad. Geow. Hannover, Veröffentl. 20, S. 150–159

Flügge, G. (1994): Untersuchungen abiotischer Systemparameter als Grundlage für die UVU. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 131. Jg , Nr. 9, S. 220–224.

Flügge, G. (1996): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Zusammenfassendes Gutachten Hydromechanik. BAW 95 53 34 17 / 34, S. 1–33.

Förstner, U.; Calmano, W.; Schoer, J. (1985): Verteilung von Spurenmetallen zwischen Lösung und Feststoffen – aktuelle Fragen der Gewässergüte-Praxis an die Sedimentforschung. Vom Wasser, 64, S. 1–16.

Förstner, U.; Ahlf, W. (1991): Metalle und ihr chemisch physikalisches Verhalten in Ästuarien. ZMK Hamburg-Bericht 19, Die Unterelbe: natürlicher Zustand und Veränderungen durch den Menschen, S. 93–104.

Fredsoe, I. (1978): Sedimentation of River Navigation Channels. In: Journal of the Hydraulics Div., Feb. 1978.

Führböter, A. (1967): Zur Mechanik der Strömungsriffeln. In: Mitteilungen des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 29, 1967.

Führböter, A. (1980): Strombänke (Großriffel) und Dünen als Stabilisierungsformen. In: Mitteilungen des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 67, 1980.

Gabriel, T. (1990): Sedimentologie und morphodynamische Prozesse in tidebeeinflußten Buhnenfeldem des inneren Eibästuars. Diplomarbeit, Fach Geographie, Universität Hamburg.

Gaumert, T. (1992): Entwicklung der Schadstoffgehalte in frischen schwebstoffbürtigen Sedimenten der Elbe bei Schnackenburg von 1984–1991. Wassergütestelle Elbe, Hamburg, 1992.

Gayer, G.; Dick, S.; Pleskachevsky, A.; Rosenthal, W. (2004): Modellierung von Schwebstofftransporten in Nordsee und Ostsee, Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, 36, ISSN 0946-6010.

Gibbs, R. (1977): Suspended sediment transport and the turbidity maximum. In: Officer, C. (Ed.): Estuaries, Geophysics, and the Environment. National Academy of Sciences, Washington D. C., S. 104–109.

Giere, 0. (1968): Die Fluktuation des marinen Zooplanktons im Elbeästuar. Beziehungen zwischen Populationsschwankungen und hydrographischen Faktoren im Brackwasser. Arch. Hydrobiol. Suppl. 31 (Untersuch. Elbeästuar 3), S. 379 –546.

GKSS, Dredging Research Ltd, Ravensrodd Consultants Ltd: Erfassung von Baggergutausbreitungen nach Verklappung vor dem Ness-Sand. Gutachten für Strom- und Hafenbau, Wirtschaftsbehörde, Hamburg. August 1995. S. 1–26. (Vergabe-Nr. SB 70/95 F).

Golombek, P.; Greiser, N.; Bornholdt, J.; Peters, C.-P. (1996): Der Wrauster Bogen – Eine ökologische Studie über neugewonnenes Vorland an der Elbe: Auswirkungen der Umbaumaßnahmen am Deichvorland des Wrauster Bogens auf die Ökologie, Hydrologie und Sedimentologie des Gebietes. Gutachten im Auftrag der Baubehörde Hamburg, Amt für Wasserwirtschaft, 1996; Textteil: 30 S.

Grabemann, I.; Kappenberg, J.; Krause; G.. (1995): Aperiodic variations of the turbidity maxima in two German coastal plain estuaries. Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 29 (3-4), S. 217–227.

Grabemann, I.; Kappenberg, J.; Krause, G. (1996): Comparison of the dynamics of the turbidity maxima in two coastal plain estuaries, Arch. Hydrobiol., Spec. Issues Advanc. Limnol., 47, S. 195–205.

Grasshoff, K.; Ehrhardt, M.; Kremling, K. (1983): Methods of seawater analysis. Verlag Chemie Weinheim.

Greiser, N. (1985): Die Bedeutung biologischer Faktoren für die Schwebstoffbildung in der Elbe – Untersuchungsmethoden und erste Ergebnisse. Die Küste, H. 42, 1985, S.135–149.

Greiser, N. (1988): Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihren biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg. Hamburger Küstenforschung, Heft 45, S. 1–144.

Greiser, N. (1995): Oberwasserwirkung in Tideflüssen auf die Sedimentation. KFKI-Projekt, Hamburg 1995.

Greiser, N.; Christiansen, H. (1996): Oberwasserwirkung in Tideflüssen auf die Sedimentation. Abschlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben 515-3892 MTK 0540, Mai 1996 – in Zusammenarbeit mit dem Amt Strom- und Hafenbau Hamburg und dem Wasser- und Schiffahrtsamt Hamburg. 71 S.

Groengroeft A.; Jaehnig U.; Miehlich G.; Lueschow R.; Maass V.; Stachel B. (1998): Distribution of Metals in Sediments of the Elbe Estuary in 1994. Wat. Sci. Tech., 37, 6-7, S. 109–116.

Haar, S. (1985): Sedimentuntersuchungen im Walzenbereich ausgewählter Hafeneinfahrten. Strom- und Hafenbau, Gewässerkundliche Studien Nr. 2, 1985.

Hahlbrock, U.; Wünsche, B. (1994): Messprogramm Nesssand – Messtechnische Begleitung einer Baggergutverklappung in Übertiefen am Fahrwasserrand der Unterelbe. AWU Consult GmbH. Studie im Auftrag des Amtes Strom- und Hafenbau, Hamburg.

Hamburger Umweltberichte (1994): Gewässergütebericht Hamburg 1994 – Beschaffenheit der Oberflächengewässer in Hamburg. Heft 48. Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg.

Harms, S.; Nehls (1995): Bestimmung der Sedimentherkunft im Hamburger Hafen aus stromabliegenden Elbabschnitten. Forschungsvorhaben im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der Wirtschaftsbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg, Amt Strom- und Hafenbau; Abschlussbericht Dezember 1995.

Hayes, M. O. (1975): Morphology and sand accumulations in estuaries. In: Cronin, L. E. (Ed.), Estuarine Research, 2, Geology and Engineering. Academic Press, New York, S. 3–22.

Heininger, P.; Pelzer, J.; Claus, E.; Tippmann, P. (1998): Contamination and Toxicity Trends for Sediments – Case of the Elbe River. Wat. Sci. Tech., 37, 6-7, S. 95–102.

Heinrich, H.. (1993): Teilprojekt Schwebstoffgehalte. In: Transport, Umsatz und Variabilität von Schad- und Nährstoffen in der Deutschen Bucht 1990–1992 (TUVAS) Abschlußbericht. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.). S. 36–42.

Hensen, W. (1942): Rechtsablenkung. Vergleich mit Erdbeschleunigung und Zentrifugalbeschleunigung. Kleine Studie der WSD Hamburg, Nr.36, 1942.

Hensen, W. (1948): Über den Wert der Kenntnis von der wahren Gestalt einer Flusssohle. Die Wasserwirtschaft, H. l, 1948.

Hensen, W. (1953): Das Eindringen von Salzwasser in die Gezeitenflüsse und ihre Nebenflüsse, in Seekanäle und Häfen. Mitt. Hann. Versuchsanst. Grundbau und Wasserbau, 3, 1953, S. 20–50.

Heyer, H. (2006): Überlegungen zur Beeinflussung des Sedimenttransportes in Ästuaren. Vortrag beim gemeinsamen Kolloquium von BfG und BAW am 8. und 9. November 2006 in Rissen, http://www.baw.de/vip/programm.php?veranstaltung=81.

Hinrich, H. (1975): Die Schwebstoffbelastung der Weser und der Vergleich mit Elbe und Ems. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen, S. 113–120.

Hülsemann J.; Eden H.; Ricklefs K. (1995): Echo Sounding on Suspended Particulate Matter in the Elbe Estuary. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 47, 1, S. 23–45.

Humann, K. (1992): Stoffwechselaktivität verschiedener Bakteriengruppen in der Elbe bei Hamburg. Diplomarbeit Inst. F. Allg. Botanik der Universität Hamburg.

ICONA (1992): North Sea Atlas for Netherlands Policy and Management. Interdepartmental Co-ordinating Committee for North Sea Affairs, Amsterdam, ISBN 90-5366-047-X.

Imhoff, K.; Imhoff, K. R. (1976): Taschenbuch der Stadtentwässerung. R. Oldenbourg Verlag München.

International Association for the Physical Sciences of the Oceans (IAPSO) (1979): Publication Scientifique No. 31, SUN Report, December 1979, IUGG Publications Office, 39ter, Rue Gay-Lussac, 75005 Paris.

Internationale Konferenz zum Schutz der Elbe (IKSE) (1995): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet, Magdeburg, 8.10.1995.

Irion, G.; Müller, G. (1990): Lateral distribution and sources of sediment-associated heavy metals in the North Sea. In: Ittekkot V; Kempe S; Michaelis W; Spitzy A [Eds.] Facets of Modern Biogeochemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 175–201.

Irion, G.; Zöllmer, V. (1990): Pathways of fine-grained clastic sediments – Examples from the Amazon, the Weser estuary, and the North Sea. In: Heling D.; Rothe P.; Förstner U.; Stoffers P. [Eds.] Sediments and Environmental Geochemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 351–366;

Irion, G. (1990): Minerals in rivers. In: Degens, E.; Kempe, S.; Richey, J. E. [Eds.]: Biogeochemistry of Major World Rivers. S. 265–281; Wiley, Chichester, New York, Brisbane, Toronto Singapore.

Irion, G. (1994): Schwermetalle in Nordseesedimenten. Natur und Museum 124, S.146–159.

Irion, G. (1994a): Transportwege und Ablagerungsgebiete von Schwebgut im Küstenbereich der südöstlichen Nordsee aus der Sicht der Umweltbelastung. In: Niedermeyer, R. O.; Hüneke, H.; Scholle, T. (Hrsg.): Kurzfassung – SEDIMENT 94: S. 85–86

Irion, G. (1994b): Morphological, Sedimentological and Historical Evolution of Jade Bay, Southern North Sea. Senckenbergiana marit. 24, S. 171–186

Irion, G.; Schindler, T.; Dünnebier, J. (1996): Trends der Schadstoffakkumulation und der Sedimentbildung in den Wattflächen des Jadebusens (SE Nordsee). Schriftenreihe Deutsch. Geol. Ges. 1, S. 46–47

Irion, G. (1998): Die weite Herkunft der Watt-Schlicke. In: Türkay, M. (Hrsg.): Wattenmeer. Kleine Senckenberg-Reihe 29, S. 31–34

Irion, G. (1998a): Schwermetalle im Watt. In: Türkay, M. (Hrg.): Wattenmeer. Kleine Senckenberg-Reihe 29, S. 35–43

Irion, G.; Zöllmer, V. (1999): Clay mineral associations in fine-grained surface sediments of the North Sea. Journal of Sea Research 41, S. 119–128

Irion, G. (2006): Schlammlawine aus der Elbe bedroht die Nordsee – Die Verklappung von Schlickmassen südöstlich von Helgoland hat Folgen: Erste Messergebnisse zu Schadstoffen. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 57, N2.

Irmer, U.; Weiler, K.; Wolter, K. (1986): Untersuchungen zur Schwermetall- und Schwebstoffdynamik im Elbeästuar – Mögliche Folgerungen für die Überwachungspraxis. Vom Wasser, Bd. 67, S. 111–123.

Irmer, U.; Knauth, H.-D.; Weiler K. (1988): Einfluss des Schwebstoffregimes auf die Schwermetallbelastung der Tideelbe bei Hamburg. Z. Wasser-Abwasser-Forschung, 21, S. 236–240.

Jacobs, M.; Krebs, S. (1990): Untersuchungen der Sedimente eines Wattgebietes der fluviatilen Zone des Elbe-Ästuars. Diplomarbeit. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 90/E/7.

Jantzen, E.; Wilken, R.-D. (1991): Zinnorganische Verbindungen in Hafensedimenten – Analytik und Beurteilung. Vom Wasser, Bd. 76, S. 1–11.

Jay, D.; Musiak, J. D. (1994): Particle trapping in estuarine tidal flows. J. Geophys. Res. 99, C10, S. 20.445–20.461.

Kappenberg, J.; Fanger, H.-U.; Männing, V.; Prange A. (1990): Suspended Matter and Heavy Metal Transport in the Lower Elbe River under different Flow Conditions. Estuarine Water Quality Management-Monitoring, Springer-Verlag Berlin, Coastal and Estuarine Studies No. 36, S. 147–152.

Kappenberg, J.; Schymura, G.; Fanger, H.-U. (1995): Sediment dynamics and estuarine circulation in the turbidity maximum of the Elbe river, Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 24 (5), S. 699–706.

Kappenberg, J.; Schymura, G.; Kuhn, H.; Fanger, H.-U. (1996): Spring/neap variations of suspended matter concentration and transport in the turbidity maximum of the Elbe Estuary. Advances in Limnology, 47, Particulate Matter in Rivers and Estuaries, Archiv für Hydrobiologie, S. 323–332.

Kappenberg, J.; Witte, G. (1998): Messung und Modellierung der Ausbreitung feinkörnigen Baggerguts nach Umlagerungen in der Tide-Elbe unterhalb des Hamburger Hafens; "Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe"; 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, UFZ Leipzig-Halle, Leipzig 1998)

Kappenberg, J.; Grabemann, I. (2001): Variability of the mixing zones and estuarine turbidity maxima in the Elbe and Weser estuaries, Estuaries, 29 (3-4), S. 229–237.

Kausch, H. (1992): Die Unterelbe – Natürlicher Zustand und Veränderungen durch den Menschen. Zentrum für Meers- und Klimaforschung der Universität Hamburg, 19.

Kerner, M.; Kausch, H.; Kersten, M. (1986): Der Einfluss der Gezeiten auf die Verteilung von Nährstoffen und Schwermetallen in Wattsedimenten des Elbe-Ästuars. Arch. Hydrobiol./ Suppl. 75, 118–131.

Kerner, M.; Wallmann, K. (1992): Remobilization Events Involving Cd and Zn From Intertidal Flat Sediments in the Elbe Estuary during the Tidal Cycle. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 35, 371–393.

Kerner, M.; Krogmann, D. (1994): Partitioning of Trace Metals in Suspended Matter from the Elbe Estuary, Fractioned by a Sedimentation Method. Netherlands Journal of Sea Research, 33, 1, 19–27.

Kerner, M.; Kappenberg, J.; Brockmann, U.; Edelkraut, F. (1995): A case study on the oxygen budget in the freshwater part of the Elbe estuary. I. The effect of changes in physicochemical conditions on the oxygen consumption. Arch. Hydrobiol./Suppl. 110, 1, S. 1–25.

Kerner, M.; Jacobi, A. (2005): Die Elbevertiefung von 1999. Hsgb. WWF Deutschland, Frankfurt am Main, 1. Auflage Dez. 2005.

Kerner, M. (2007): Effects of deepening the Elbe Estuary on sediment regime and water quality – consequences for monitoring strategies. Accepted for publishing in: Estuarine, Coastal and Shelf Science.

Kirby, R. (1987): Sediment exchanges across the coastal margins of NW Europe. Journal of the Geological Society, London, 144, S. 121–126.

Knauth, H.-D.; Sturm, R. (1990): Use of nonvolatile chlorinated hydrocarbons as anthropogenic tracers for estimating the contribution of the rivers Weser and Elbe to the pollution of the German Bight. In: Michaelis, W. (Ed.): Estuarine Water Quality Management-Monitoring, Springer Verlag Berlin. Coastal Estuarine Management 36.

Knauth, H.-D.; Sturm, R.; Milde M.-P. (199l): Schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe in Elbe, Weser und der deutschen Bucht, Tagung der AGF zur Belastung von Böden und Gewässern, 28. – 29.11.1991.

Knauth, H.-D.; Schröder, F. (1992): Nährstoffbelastung und Stoffkreisläufe in der Tideelbe. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 92/E/2.

Knauth, H.-D.; Gandraß, J.; Sturm, R. (1993): Vorkommen und Verhalten organischer und anorganischer Mikroverunreinigungen in der mittleren- und unteren Elbe, Forschungsbericht 102 04 363 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hrsg. UBA Berlin, 8/93.

Knauth, H.-D.; Schröder, F. (1994): Austauschvorgänge in Sedimenten des Gewässers und im Boden des Vordeichlandes. SFB 327, Tätigkeitsbericht: 1992–1994, TP A3/1.

Koch, R.; Schoer, J.; Sioulas, A. (1982): Semiquantitative Mineral Analysis of Grain Size Fractions <63µ, <2µ, and Suspended Matter from the Rivers Elbe, Weser, Ems and the North Sea. Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, H.52, 703–718.

Kolb, M. (1991): Flutstrom und Tideprisma – angewandt auf die Unterelbe. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, unveröffentlichtes Manuskript.

König, P. and Frohse, A. (1996): Dynamics and Transport Processes of Suspended Particulate Matter in the German Bight. Arch. Hydrobiol.Spec. Issues Advanc. Limnol. 47, S. 221–228

Koopmann, C. (1989): Röntgendiffraktometrische und chemische Untersuchungen an Schwebstoffen aus der Unterelbe. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. (GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 89/E/15).

Koppe, P. (1983): Untersuchungen über den Einfluss der Stauhaltung eines Flusses auf seine Wasserbeschaffenheit. Forschungsbericht BMFT-FB 02-WT 854 des Ruhrverbandes Essen.

Kothé, P.; Sindem, J. (1973): Die Verbreitung des Makrozoobenthos im Nord-Ostsee-Kanal und ihre Abhängigkeit vom Salzgehalt. II. Organismenverbreitung und biologische Indikation des Seewassereinflusses. DGM l, S. 21–25.

Krüger, S. (1997): Chronologie der Schwermetallbelastung der südöstlichen Nordsee. Diplomarbeit, Fachhochschule Wilhelmshaven

Kühbacher, M. (1994): Untersuchungen zum Elementmuster von Elbe-Schwebstoff oberhalb und unterhalb des Hamburger Hafens. Diplomarbeit bei GKSS, Universität der Bundeswehr Hamburg Aug. 1994, S. 1–121.

Kühl, H.: Elbekorn ´89, Korngrößenanalysen im Nasssiebverfahren an Proben aus der Unterelbe. Private Mitteilung.

Kunz, P. (1995): Behandlung von Abwasser. 4. überarbeitete Auflage; Vogel Buchverlag, ISBN 3-8023-1562-6; 318 S.

KUSTOS (BMBF-Projekt 03F0111) – TRANSWATT (BMBF-Projekt 03F0130) Abschlussbericht (1998), Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Universität Hamburg, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Büsum

Lang, A. W. (1976): Untersuchungen zur historisch-morphologischen Entwicklung des Elbe-Ästuars. In: Hamb. Küstenforschung, H. 3 6, 1976.

Lang, G. (1990): Zur Schwebstoffdynamik von Trübungszonen in Ästuarien. Ber. Inst. Strömungsmechanik u. Elektronisches. Rechnen der Universität Hannover, 26.

Lange, J.; Bischoff, S. (2003): Weniger Natur für mehr Schifffahrt? Ökologische Folgen des geplanten Ausbaus von Elbe, Außen- und Unterweser. Hrsg. WWF Deutschland, Frankfurt am Main, März 2003.

Langenberg, H.; Pohlmann, T. (1994): The Effect of a Front on the General Circulation – A Model Study of the Rhine Plume Area. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 46, No. 4, S. 341–353

Lichtfuß, R.; Brümmer, G. (1977): Schwermetallbelastung von Elbe-Sedimenten. Naturwissenschaften 64, S. 122–125.

Lichtfuss, R.; Brümmer, G. (1977): Schwermetallgehalte von Sedimenten Schleswigholsteiner Fließgewässer (Elbe, Trave, Eider, Schwentine). Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 25, S. 209–216.

Lobmeyr, M.; Puls, W. (199l): Modellrechnungen zum Schwebstofftransport. Vergleich der Ergebnisse eines zweidimensionalen Modells mit Feldmessungen im Elbeästuar. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 91/E/25.

Lucht, F. (1953 a): Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone der Elbe. Deutsch. Hydrogr. Z. 6, S. 18–32.

Lucht, F. (1953 b): Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe. Dtsch. Hydrogr. Z. 6, S. 186–207.

Lucht, F. (1954): Geschiebe- und Sinkstofftransport in der Elbe. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg 23, S. 68–75.

Lucht, F. (1957): Qualitative Untersuchungen des Elbewassers. Monatsberichte der WSD Hamburg.

Lucht, F. (1964): Hydrographie des Elbe-Aestuars. Arch. Hydrobiol./Suppl. 29 (Elbe-Aestuar 2), S. 1–96.

Lüneburg, H. (1951): Über Messung und Bedeutung der Sinkstoffe in der Elbe- und Wesermündung. Vom Wasser 18, 1951, S. 197–207.

Lüneburg, H. (1955): Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung, 4. Teil: Zur Verteilung der Sinkstoffe in den Seitenräumen der Wesermündung. Ibidem 3, S. 228–265.

Marnitz, U. (199l): Über den Einfluss baulicher Veränderungen in der Elbe auf die Morphologie im Gebiet Mühlenberger Loch/Hahnöfer Nebenelbe. Diplomarbeit, Fach Geographie, Universität Hamburg.

Marnitz, U. (1995): Über den Einfluss wasserbaulicher Veränderungen in der Elbe auf die Morphologie im Gebiet Hahnöfer Nebenelb /Mühlenberger Loch. Die Küste 57, S. 95–120.

Materialband I: Hydromechanik – Gutachten der BAW zur UVU Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe, 1996.

Materialband II a: Schwebstoffregime und gelöste Stoffe – Gutachten AG GKSS & HGU (Dr. Fanger) zur UVU Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe, 1996.

Materialband II b: Wasserbauliche Umlagerungen – Gutachten Dr. Dammschneider zur UVU Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe, 1996.

Materialband III: Sedimente – Gutachten des Instituts für Bodenkunde (Prof. Miehlich) der Universität Hamburg zur UVU Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe, 1996.

Materialband VII: Flora und Fauna – aquatische Lebensgemeinschaften – Gutachten des Instituts für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaften (Prof. Kausch) der Universität Hamburg zur UVU Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe, 1996.

Mayer, B. (1995): Ein dreidimensionales, numerisches Schwebstoff-Transportmodell mit Anwendung auf die Deutsche Bucht. Dissertation, Universität Hamburg.

McCave, I. N. (1971): Mud in the North Sea. In: Goldberg, E. D. (Ed.): North Sea Science. NATO North Sea Science Conference 1971. MIT Press, Cambridge. S. 75–100.

Meyer, C. (1994): Hydrographie und Morphodynamik in einem Wattgebiet des Elbe-Ästuars. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg.

Michaelis, W.; Fanger, H.-U.; Müller, A. (1988): Die Bilanzierungsexperimente 1984 und 1985 auf der oberen Tide-Elbe. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 88/E/22.

Michaelis, W. (1990): The BILEX concept – research supporting public water quality surveillance in estuaries. Estuarine Water Quality Management-Monitoring, Springer Verlag, Berlin, Coastal and Estuarine Studies No. 36, S. 79–88.

Michaelis, W. (1991): Transport von Schweb- und Spurenstoffen, SFB 327, Tätigkeitsbericht: 1989–1991, TP Alb, S. 57–116.

Müller, A.; Puls, W. (1996): Modelling of suspended Matter transport in tidal rivers. Advances in Limnology, 47, Particulate Matter in Rivers and Estuaries, Archiv für Hydrobiologie, S. 343–351.

Müller, G.; Förstner, U. (1975): Heavy Metals in Sediments of the Rhine and Elbe Estuaries: Mobilization or Mixing Effect? Environmental Geology, 1, S. 33–39.

Müller, G. and Furrer, R. (1995): Heavy Metals in the Sediments of the Elbe River 1972–1994. Heavy metals in the Environment, 2, S. 83–86.

Müller, G.; Furrer, R. (1998): Pollution of the River Elbe – past, present and near future. Water Quality International, Febr. 1998, 15–18

Müller, G. (2000): Silver in sediments of the Elbe River, its estuary and in the North Sea. In: 11th Ann. Internat. Conf. Heavy Metals in the Environment.

Nasner, H. (1974): Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. In: Mitt. d. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 40, 1974.

Nasner, H. (1992): Sedimentation in Tidehäfen. Die Küste 53, S. 127–169.

Nasner, H. (1994): Sedimentation in Tidehäfen. KfKI-Schlußbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben MTK 0470, Bremen 1994.

Neemann, V. (1993): Zusammenstellung bedeutender Baumaßnahmen in der Tide-Elbe. Gewässerkundliche Beiträge, Kiel Nov. 1993, S. 1–8.

Neemann, V. (1996): Ausbau der Unter- und Außenelbe zur Herstellung der Fahrwassertiefe

von 13,5 m unter Kartennull – Beschreibung der Baumaßnahmen zur Herstellung und Unterhaltung der Fahrrinne – Stand Ende 1993. Bund-Länder-Arbeitsgruppe Beweissicherung, WSD-Nord, Kiel Dez. 1996, S. 1–26.

Nehls, R. (1990): Die Populationsdichte freisuspendierter und schwebstoffgebundener proteolytischer Bakterien an verschiedenen Standorten. Diplomarbeit, Institut für Allgemeine Botanik, Universität Hamburg.

Nehls, R.; Greiser N.; Harms H. (1993): Forschungsvorhaben Mühlenberger Loch: Feststofftransport und Hafenverschlickung – Einfluss des Feststofftransportes auf die Gewässergüte. Forschungsvorhaben im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem Amt Strom- und Hafenbau und der Umweltbehörde Hamburg, Amt für Umweltschutz, Gewässer- und Bodenschutz. Abschlußbericht September 1993.

Netzband, A. (Koordinator) (1996): Umlagerung von Baggergut aus dem Hamburger Hafen in der Tideelbe. Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen in den Jahren 1994 bis 1996. Ergebnisse aus dem Baggergutuntersuchungsprogramm, Heft 7, ISSN 0177-1191. Strom- und Hafenbau, Wirtschaftsbehörde, Hamburg, Sept. 1996. S. 1–93.

Netzband, A.; Christiansen H.; Maaß B.; Werner G. (1998): Relocation of dredged material from Hamburg harbour in the River Elbe. Wat. Sci. Tech. 37, No. 6-7, S. 241–248.

Neumann, L. J. R.; Wolf, G.(1996): Übersicht über geplante Maßnahmen im Bereich der Bundeswasserstraße Elbe und ihre voraussichtlichen Wirkungen als Grundlage für die Beschreibung der Nullvariante im Rahmen der Umweltverträglichkeits-untersuchung, Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. SB4-Studie Nr. 2 des WSA Hamburg.

Nichols, M.; Poor, G. (1967): Sediment transport in a coastal plain estuary. Journal of Waterways and Harbors, Proc. ASCE, No. WW4, paper 5571, 93, S. 83–95.

Niedergesäß, R.; Eden, H.; Schnier, C. (1996): Trace element concentrations in suspended particulate matter fractionated according to settling velocity. Advances in Limnology 47, S. 41–52.

Niedergesäß, R.; Prange, A.; Schnier, C. (1996): Variations of trace element content in suspended particulate matter in the Elbe estuary. Advances in Limnology, 47, Particulate Matter in Rivers and Estuaries, Archiv für Hydrobiologie, S. 235–246.

Nöthlich, I. (1972): Beziehungen zwischen Trübungsverteilung und hydrographischen Faktoren im Süß- und Brackwasser des Elbeaestuars. Arch. Hydrobiol./Suppl. 43, 1972, S. 1–32.

Nöthlich, I. (1990): Hydrobiologische Untersuchungen zur Kennzeichnung der Salzgehaltsverhältnisse im Elbe-Ästuar. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-0535.

Oellerich, J.; Siefert, W.: Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Wasser + Boden 11, 1992.

Osterwald, J. (1994): Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 131. Jg., Nr. 9, S. 226–229.

Paluska, A. (1992): Geographie und geologische Vorgeschichte der norddeutschen Ästuare, erläutert am Beispiel der Elbe. In: Kausch, H. (Hrsg.): Die Unterelbe – Natürlicher Zustand und Veränderungen durch den Menschen, Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung der Universität Hamburg, 19, S. 1–32.

Paul, J. H. (1992): Feststofftransport und Trübung bei der Umlagerung von Baggergut. In: I. Grundseminar Ökologisch verträgliche Unterbringung von Baggergut im Küstenbereich, Bundesanstalt f. Gewässerkunde, Koblenz 1992.

Petersen, W.; Knauth, H.-D.; Pepelnik, R.; Bendler, I. (1990): Vertical distribution of Czernobyl isotopes and their correlation with heavy metals and organic carbon in sediment cores of the Elbe estuary. The Science of the Total Environment, 97/98 (1990), S. 531–547, Elsevier, Amsterdam. (GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 91/E/11)

Petersen, W.; Wallmann, K.; Li, P.; Schröder, F.; Knauth, H.-D. (1995): Exchange of trace elements at the sediment-water interface during early diagenesis processes. Marine and Freshwater Research 46, S. 19–26.

Pohl, H.-J. (1992): Übersicht über die jährlich im Küstenbereich anfallenden Baggerungen. In: I.Grundseminar Ökologisch verträgliche Unterbringung von Baggergut im Küstenbereich, Bundesanstalt f. Gewässerkunde, Koblenz 1992.

Pohlmann, T.; Puls, W. (1994): Currents and transport in water. In: Sündermann, J. (Ed.): Circulation and contaminant fluxes in the North Sea. Springer, Berlin, S. 345–402.

Postma, H.; Kalle, K. (1955): Die Entstehung von Trübungszonen im Unterlauf der Flüsse, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe, Dt. Hydrogr. Z. 8, S. 138–144.

Postma, H. (1980): Sediment transport and sedimentation. In: Olausson, E.; Cato, I. (Eds.), Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries. Wiley, Chichester, S. 153–186.

Prange, A. (1990): Analytik von Schwermetalldaten in der Elbe. 3. Magdeburger Gewässerschutzseminar zur Belastung der Elbe, 28.–30.11.1990.

Prange, A.; Tümpling v., W.; Niedergesäß, R.; Jantzen, E. (1995): Die gesamte Elbe auf einen Blick: Elementverteilungsmuster der Elbe von der Quelle bis zur Mündung, Wasserwirtschaft-Wassertechnik Nr. 7, S. 22–33.

PRISMA (1994): Prozesse im Schadstoffkreislauf Meer-Atmosphäre: Ökosystem Deutsche Bucht. BMFT-Projekt 03F0558A1 (1.1.1990 – 31.10.1993), Abschlußbericht, ZMK-Universität Hamburg, April 1994.

Pritchard, D. W. (1967): Observations of circulation in coastal plain estuaries. In: Lauff, G. H. (Ed.): Estuaries, Amer. Assoc. Adv. Sci., Publ. 83, Washington D. C., S. 3–5.

Pröber, C. (1981): Die Möglichkeit der Fernerkundung in der Küstengeologie. Eine Untersuchung am Beispiel der nordfriesisichen Wattensedimente und der Schwebfracht in der Nordsee. Dissertation, Math.-naturwiss. Fakultät, Universität Kiel.

Puls, W. (1986): Settling Velocity of Mud Flocs: Results of Field Measurements in the Elbe and Weser Estuary. International Symposium Physical Processes in Estuaries, Delft, 1986, S. 1–22.

Puls, W.; Lobmeyr, M.; Müller, A.; Schünemann, M.. (1990): Investigations on suspended matter transport processes in estuaries and coastal waters. Estuarine Water Quality Management-Monitoring, Springer-Verlag Berlin, Coastal and Estuarine Studies No. 36, S. 165–171.

Puls, W.; Kühl, H.; Enge-Ehler, P.: Mohrmann, P. M.; Weiler, K.; Wilken, R.-D. (1991): Schwebstoff-Konzentrationen in der Elbe bei Geesthacht und Bunthaus während der erhöhten Wasserführung im Zeitraum Dezember 1989 – Januar 1990. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 91/E/86.

Puls, W.; Blohm, W.; Brockelmann, H.; Fanger, H.-U.; Kappenberg, J.; Spott, D.; Wilken, R.-D. (1995): Das Schwebstoffregime der Elbe während der erhöhten Wasserführung im März–April 1992. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 39 (3), S. 90–96.

Puls, W.; Kühle, H.; Frohse, A.; König, P. (1995): Measurements of the suspended matter settling velocity in the German Bight (North Sea). Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 47(4), S. 259–276.

Puls, W.; Kühl, H:. (1996): A settling tube for measuring suspended matter settling velocities in the German Bight. Advances in Limnology, 47, Particulate Matter in Rivers and Estuaries, Archiv für Hydrobiologie, S. 381–388.

Puls, W.; Pohlmann, T.; Sündermann, J. (1997): Suspended particulate matter in the southern North Sea: Application of a numerical model to extend NERC North Sea Project data interpretation. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 49, 2/3, S. 307–327.

Puls, W.; Heinrich, H.; Mayer, B. (1997a): Suspended particulate matter budget for the German Bight, Marine Pollution Bulletin, 34(6), S. 398–409.

Puls, W.; Pohlmann, T. (1997b): Currents and transport in water. In: Sündermann, J. (Ed.): Circulation and contaminant fluxes in the North Sea, Springer, S. 345–402.

RdE (2006) „Rettet die Elbe". http://www.rettet-die-elbe.de, 20.11.2006

Riedel-Lorjé, J. C. (1981): Untersuchungen über den Indikationswert von Aufwuchs in Süß- und Brackwasserzonen des Elbe-Aestuars unter Berücksichtigung industrieller Einleitungen. Arch. Hydrobiol./Suppl. 61 (Untersuch. Elbe-Ästuar 5), S. 153 –226.

Riedel-Lorjé, J. C., Möller-Lindenhof, Vaessen, B. (1992): Salzgehalts- und Trübungsverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe. ARGE Elbe, Wassergütestelle Elbe (Juli 1992). S. l–l 45.

Riedel-Lorjé, J. C. (2005): Ökologische Entwicklung der Tideelbe: gestern, heute, morgen. In: Tagungsband Tideelbe: Naturraum oder Wasserstraße?, BUND-Fachtagung 11. März 2005.

RIKZ (2002): Noordzee-atlas voor zwevend stof ob basis van satellietbeelden in 2000, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), Den Haag, RIKZ/IT/2002.102

Rohde, H., (1971): Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. Mitt. Franzius-Institut 36, 1971, S. 216–220.

Rohde, H. (1974): Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstofftransport in einem Tidefluss. In: Die Küste, H. 25, 1974.

Rolinski, S. (1997): Zur Schwebstoffdynamik in der Tide-Elbe – Numerische Simulationen mit einem Lagrangeschen Verfahren, Berichte Zentrum für Meeres- und Klimaforschung Univ. Hamburg, Reihe B, 25.

Rolinski, S. (1999): On the dynamics of suspended matter transport in the tidal river Elbe: Description and results of a Langrangian model, J. Geophys. Res., 1004, C11, S. 26.043–26.056.

Rolinski, S.; Eichweber, G. (2000): Deformations of the tidal wave in the Elbe Estuary and their effects on suspended particulate matter dynamics, Phys. Chem. Earth (B), 25(4), S. 355–358.

Ross, J. (1995): Modellierung der Schwebstoffdynamik in einer Wattenmeerbucht (Königshafen/ Sylt). Dissertation, Universität Hamburg.

Salomon, J. C.; Allen, G. P. (1983): Role sedimentologique de la maree dans les estuaires a fort marnage. Compagnie Français de Petroles. Notes and Memoires, 18, S. 35–44.

Salomons, W.; Schwedhelm, E.; Schoer, J.; Knauth, H. D. (1987): Natural Traces to Determine the Origin of Sediments and Suspended Matter from the Elbe Estuary.

Samu, G. (1987): Geomorphologische Untersuchungen im Bereich der Brammerbank und des Krautsander Watts in der Unterelbe. In: Mitt. d. BAW, Nr. 60, 1987.

Schlichting, H. (1965): Grenzschicht-Theorie, Kap. XI. Karlsruhe 1965.

Schoer, J.; Eggersgluess, D. (1982): Chemical Forms of Heavy Metals in Sediments and Suspended Matter of Weser, Elbe und Ems River. Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, H. 52, S. 667–685.

Schoer, J.; Nagel, U. and Eggersgluess, D. (1982): Metal Contents in Sediments from the Elbe, Weser and Ems Estuaries and from the German Bight (Southeastern North Sea): Grain Size Effects. Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, H.52, 687–702.

Schoer, J. (1990): Determination of the Origin of Suspended Matter and Sediments in the Elbe Estuary Using Natural Tracers. Estuaries, 13, 2, 161–172.

Schöll, F. (1992): Hydrobiologische Untersuchungen zur Kennzeichnung der Salzgehaltsverhältnisse an der Unterelbe im Jahre 1991. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-0652.

Schubel, J. R.; Hirschberg, D. J. (1978): Estuarine graveyards climatic change,and the importance of the estuarine environment. In Wiley, M. (Ed.). Estuarine interactions. Academic Press, New York, S. 48–62.

Schuchard, B. und Scholle J., BIOCONSULT (2004): Beweissicherung Fahrrinnenanpassung 1998–2003.

Schulz, H. (1954): Sedimentation und Erosion im Elbeästuar der Gegenwart. Mitt. Geolog. Staatsinst. Hamburg, H.23, 1954.

Schuppener, B. (1994): Resuspendierung von feinkörnigem Baggergut beim Verklappen – ein bodenmechanisch-hydraulisches Modell. Mitteilung Nr. 6 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 1994.

Schwedhelm, E.; Salomons, W.; Schoer, J.; Knauth, H. D. (1988): Provenance of the sediments and the suspended matter of the Elbe estuary. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 88/E/20.

Simmons, W. G. (1966): Field experiments in estuaries. In: Ippen, A. T. (Ed.): Estuari and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill.

Simon, W. G. (1954): Ergebnisse petrographischer Untersuchungen an Sedimenten der Unterelbe. Mitteilungen aus dem Geologischen Staatsinstitut in Hamburg, H. 23, S. 50–56.

Siedler, G. (1982): SI-Einheiten (Systeme International d'Unites) in der Ozeanographie. Berichte aus dem Institut für Meereskunde Kiel, 101.

Siefert, W.; Nebe, K. (1983): Bibliographie Elbeästuar. Strom- und Hafenbau, Hamburg, Referat Hydrologie Unterelbe, Studie Nr. 55, 1983, S. 17–27.

Siefert, W. (1984): Hydrologische und morphologische Untersuchungen für das Mühlenberger Loch, die Außeneste und den Neßsand. Hamburger Küstenforschung, H. 43, 1984.

Siefert, W. (1987): Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen (Teil I der Ergebnisse eines KFKI-Projektes), die Küste 45, 1987, S. 1–47.

Siefert, W. Havnoe, K. (1989): Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Tide-Elbe auf die Höhe hoher Sturmfluten. Hamburger Küstenforsch. 46, S. 51–101.

Siefert, W. (1993): Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Nr. 4, 1993, S. 69–85.

Siefert, W.; Jensen, J.: Fahrrinnenvertiefung und Tidewasserstände in der Elbe. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 130. Jg., Nr. 10, 1993, S. 119–125.

Siefert, W. (1995): Die Entwicklung des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe von 1950 bis 1994. Strom- und Hafenbau Hamburg, Studie Nr. 76, S. 1–45.

Siefert, W.: Über die Wirkung der Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe auf die Hydrologie der Tideelbe vor dem Hintergrund möglicher Klima- und Meeresspiegel-Änderungen. Studie Nr. 81, Okt. 1995, Strom- und Hafenbau, Wirtschaftsbehörde, Hamburg, S. 1–15.

Siefert, W.: Das Sturmflutgeschehen in der Tideelbe und der Einfluss vo Fahrrinnenvertiefungen. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen- 131. Jg., Nr. 9, 1994, S. 214–218.

Siiro, P.; Räsänen, M.; Gingras, M.; Harris, C.; Irion, G.; Pemberton, S. G.; Ranzil, A. (2005): Application of laser diffraction grain-size analysis to reveal depositional processes in tidally-influenced systems. In: Fluvial Sedimentology VII (Eds. M. Blum, S. Marriott and S. Leclair), IAS Special Publication 35, S. 159–180.

Simpson, J. H.; Sharples, J.; Rippeth, T. P. (1991): A prescriptive model of stratification induced by freshwater runoff. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 33, S. 23–35.

Sohrmann, A.(2006): Erfahrungsaustausch zur Untersuchung und Einschätzung von Transportprozessen in Ästuaren und Wattgebieten und zum Sedimentmanagement in Tidegewässern, BAW/BfG-Kolloquium, Hamburg-Rissen, 8.–9. Nov. 2006.

Sowitzki, S. (1992): Populationsdynamik nitrifizierender Bakterien in der Elbe bei Hamburg sowie serologische Spezifität ihrer antigenen Determinanten für die Zellzahlbestimmung mit der Immunofluoreszenz-Technik. Dissertation Institut für Allgemeine Botanik der Universität Hamburg.

Sowitzki S.; Sobottka T.; Harms H. (1994): Keimbelastung der Elbe. Untersuchungen zur bakteriologischen Belastung der Elbe bei Hamburg – Frachtbilanz der coliformen Bakterien zwischen Artlenburg und Wittenbergen. Studie im Auftrag der Umweltbehörde Hamburg, Amt für Umwelt-, Gewässer- und Bodenschutz. Abschlußbericht Mai 1994.

Spott, D. (1992): Zur Problematik der Trendermittlung in der Elbe. 4. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Spindler Mühle, 22.–26.09.1992, S. 262–267.

Stammermann, R. (2006): Kurzfristiges Sedimentmanagement Tideelbe – Umlagerung an der Tonne E3 im Herbst 2005 – Voruntersuchung Umlagerung Frühjahr 2006, Zwischenbericht, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg.

Storch, K. von (1991) Schwermetallchronologie und Mineralogie der Marschsedimente westlich des Jadebusens. Diplomarbeit, Geologisch-Paläontologischen Institut, Universität Heidelberg.

Strom- und Hafenbau, Wirtschaftsbehörde Hamburg (1993): Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, Hamburger Informationspapier vor Einleitung der Umweltverträglichkeitsuntersuchung, März 1993.

Strom- und Hafenbau (1994): Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, Grundlagen für die technische Planung auf der Delegationsstrecke. Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Hydrologie -SB5-, Studie 72.

Strom- und Hafenbau (1995): Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, Bauablauf der Fahrrinnenanpassung auf der Delegationsstrecke. Strom- und Hafenbau Hamburg, Referat Hydrologie -SB5-, Studie 74.

Strom- und Hafenbau (1995a): Die Entwicklung des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe von 1950–1994. Strom- und Hafenbau Hamburg, Statusbericht Dezember 1995.

Sturm, R.; Knauth, H.-D.; Reinhardt, K.-H.; Gandraß, J. (1986): Chlorkohlenwasserstoffverteilung in Sedimenten und Schwebstoffen der Elbe. Vom Wasser 67, 1986, S. 23–38.

Sturm, R.; Gandraß, J. (1988): Verhalten von schwerflüchtigen Chlorkohlenwasserstoffen an Schwebstoffen des Elbe-Ästuars. Vom Wasser 70, 1988.

Tippner, M. u.a. (1981): Untersuchungen zur Umlagerung von Baggergut (Schlick) im Tidegebiet der Unterweser (WSA Bremen) Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-0006, Koblenz 1981.

Tippner, M. (1982): Untersuchungen zur Umlagerung von Baggergut (Schlick) im Tidegebiet der Unterweser (WSA Bremen) Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-0036, Koblenz 1982.

Tippner, M. (1983): Untersuchungen zur Umlagerung von Baggergut (Schlick) im Tidegebiet der Unterweser (WSA Bremen) Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-0095, Koblenz 1983.

Tittizer, T. (1992): Auswirkungen der Baggerungen und Umlagerungen von Baggergut auf die aquatische Fauna. In: l. Grundseminar Ökologisch verträgliche Unterbringung von Baggergut im Küstenbereich, Bundesanstalt f. Gewässerkunde, Koblenz 1992.

UVP-Förderverein (1993): Umweltvorsorge für ein Fluss-Ökosystem. Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur, S. 1–170.

Van Straaten, L. M. J. U.; Kuenen, P. H. (1958): Tidal action as a cause of clay accumulation. J. Sed. Petrol., 28, S. 406–413.

Veenstra, H. J. (1970): Sediments of the southern North Sea. In: Delany, F. M. (Ed.): The Geology of the East Atlantic Continental Margin, 3, Europe Report 70/15, Inst. Of Geological Sciences, London, S. 10–23.

Vierfuß, U. (1996): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der Tidedynamik in den Elbenebenflüssen Ilmenau, Este, Lühe, Schwinge, Pinnau, Krückau, Stör und Oste. BAW 945333 + 91-92/98-99; BAW 945334 + 01-04/06-13, S. 1–118.

Vollmers, H.; Wolf, G. (1969): Untersuchungen von Sohlenumbildungen im Bereich der Unterelbe. In: Die Wasserwirtschaft, H. 10, 1969.

Vollmers, H. (1977): Strömungsvorgänge in Hafenmündungen. Die Küste, Heft 31, S. 123–138.

von Haugwitz, W.; Wong, H. K.; Salge, U. (1988). The Mud Area southeast of Helgoland: A reflection seismic study. In: Kempe, S.; Liebezeit, G.; Dethlefsen, V.; Harms, U. (Eds.): Biogeochemistry and Distribution of Suspended Matter in the North Sea and Implications for Fisheries Biology. SCOPE/UNEP Sonderband, Mitt. Geol.-Paläontolog. Inst. Univ. Hamburg, 65, S. 409–422.

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Brunsbüttel: Akten und Archivmaterial unterschiedlicher Jahre (1979–1992).

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Cuxhaven: Akten und Archivmaterial unterschiedlicher Jahre (1979–1992).

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Hamburg: Akten und Archivmaterial unterschiedlicher Jahre (1979–1993).

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Lauenburg: Akten und Archivmaterial unterschiedlicher Jahre (1979–1993).

Wasser- und Schiffahrtsamt (WSA) Hamburg (1995): Die morphologische Entwicklung im Tideregime der Unter- und Außenelbe unter Berücksichtigung der Bodenentnahmen und Umlagerungen. SB4-Studie Nr. l.

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Hamburg (1996): Übersicht über geplante Maßnahmen im Bereich der Bundeswasserstraße Elbe. SB4-Studie Nr. 2 zur Maßnahme Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt.

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Hamburg (1996a): Die Entwicklung an der Fahrrinnensohle in Übertiefen der Unter- und Außenelbe anhand einiger ausgewählter Streckenabschnitte. SB4-Studie Nr. 3 zur Maßnahme Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt.

Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Nord (1988): Kubizierung der Elbe. Unveröffentl. Bericht, Kiel 1988.

Wasser- und Schiffahrtsdirektion (WSD) Nord (1993): Zusammenstellung bedeutender Baumaßnahmen in der Tide-Elbe. Beitrag Nr. 9, Kiel 1993.

Wellershaus, S. (1981): Turbidity maximum and mud shoaling in the Weser estuary. Archiv f. Hydrobiologie, 92 (2), S. 161–198.

Wienberg, C.; Bartholomä, A. (2005): Acoustic seabed classification in a coastal environment (outer Weser Estuary, German Bight) – a new approach to monitor dredging and dredge spoil disposal. Continental Shelf Research 25(9), S. 1143–1156.

Wienberg, C. (2003): The impact of dredge spoil dumping on coastal morphodynamics monitored by high-resolution acoustic measuring instruments (outer Weser Estuary, German Bight). PhD-Thesis, Department of Geosciences, University of Bremen, Bremen, 100 S.

Wilken, R.-D. (1984): The influence of antibiotics on the adsorption kinetics of 54-Mn and 59-Fe on suspended particles in river Elbe water. In: Kramer, C. J. M.; Duinker, J. C. (Eds.): Complexation of Trace Metals in Natural Waters. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, The Hague, Boston, Lancester. ISBN 90-247-2973-4. S. 285–288. (GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 84/E/48).

Wilken, R.-D, Hintelmann, H., Ebinghaus, R. (1990): Biologische Quecksilberumsetzung in der Elbe. Vom Wasser, 74, S. 1–10.

Wilken, R.-D.; Christiansen, H.; Fanger, H.-U.; Greiser, N.; Haar, S.; Puls, W.; Reincke, H.; Spott, D.; Vollmer, M. (1991): Facts and hypotheses on the transport of suspended particulate matter and pollutants in the Elbe. Vom Wasser, 76, S. 167–189.

Wilken, R.-D.; Christiansen, H.; Fanger, H.-U.; Greiser, N.; Haar, S.; Puls, W.; Reincke, H.; Spott, D.; Vollmer, M., (199l): Fakten und Hypothesen zum Schwebstoff- und Schadstofftransport in der Elbe. Vom Wasser, 76, 1991, S. 167–189. (GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 91/E/35).

Willamowski, C. (1994): Mobilisierung von Schwermetallen aus anoxischem Sediment durch Resuspendierung im oxischen Millieu. Diplomarbeit, Universität Kiel.

Witte, G.; Kühl, H. (1996): Facilities for Sedimentation and erosion measurements. Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol., Vol. 47, S. 121–125.

Witte, G. (1999): Untersuchung der Schwebstoffausbreitung im Elbstrom bei Sedimentumlagerung unter zeitlich verzögerter Ausbringung. Gutachten für Strom- und Hafenbau, Wirtschaftsbehörde, Hamburg, September 1999, S. 1–54.

Witte, G.; Riethmüller, R. (2000): Untersuchungen zur Schwebstoffausbreitung und Sauerstoffzehrung während der Baggerung und Verklappung im Rahmen der Neubaubaggerungen zur Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Gutachten für WSA Hamburg, Juni 2000, pp 1–51 (Vergabe-Nr. 4-231.2/ 1a)

Witten (1996): Aktenvermerk des Wasser- und Schiffahrtsamtes Hamburg, Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Differenzierung der Mengenberechnung der Ausbaggerung. GZ: 4-231.2-EIA Vor/50-118/96.

Witten (1997): Aktenvermerk WSA Hamburg GZ: 4-231.2-EIA Vor/50-122/97.

Wolfstein, K.; Kies, L. (1995): A case study on the oxygen budget in the freshwater part of the Elbe estuary. Variation in phytoplankton pigments in the Elbe estuary before and during the oxygen minima in 1992 and 1993. Arch. Hydrobiol./Suppl. 110, 1; S. 39–54.

Wuhrmann, K. (1980): Aktuelle Ziele des Gewässerschutzes: Alter Wein in neuen Schläuchen. Münchner Beiträge Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie 32, S. 9–24.

Zanke, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer-Verlag Berlin.

Zauke, G.-P. Meurs, H.-G. (1996): Kritische Anmerkungen zum Einsatz des Saprobiensystems bei der Gewässerüberwachung. In: LOZÀN J. L. KAUSCH, H. (Hrsg.) Warnsignale aus Flüssen und Ästuaren – Wissenschaftliche Fakten. Parey Buchverlag im Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin 1996. ISBN 3-8263-3085-4, S. 329–331.

Zeiler, M.; Schulz-Ohlberg, J.; Figge, K. (2000): Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea), Marine Geology, 170, S. 363–380.

Zeiler, M.; Schulz-Ohlberg, J.; Figge, K. (2000a): Materialinventur an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, 62, S. 53–86.

Zeiler, M.; Figge, K.; Griewatsch, K., Diesing, M., Schwarzer, K. (2004): Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee. Die Küste, 68, S. 67–98.

Zienert, G. (1996): Ein numerisches Modell für den dreidimensionalen Schwebstofftransport in der Unterelbe. Dissertation, Universität Hamburg.

Zimmermann-Timm, H.; Holst, H.; Müller, S. (1998): Seasonal Dynamics of Aggregates and their Typical Biocoenosis in the ELbe Estuary. Estuaries, 21, 4A, S. 613–621.

Zöllmer, V.; Irion, G. (1993): Clay mineral and heavy metal distribution in the northeastern North Sea. Mar. Geol. 111, S. 223–230.

Zöllmer, V.; Irion, G. (1996): Tonminerale des Nordseeraumes, ihr Verteilungsmuster in kreidezeitlichen bis pleistozänen Sedimentabfolgen und in den Oberflächensedimenten der heutigen Nordsee. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 190, S. 1–72.

Zöllmer, V. (1992): Tominerale in Sedimenten des Nordseeraumes. Ihr Auftreten in kretazischen, tertiären und quartären Abfolgen sowie ihr Verteilungsmuster in der heutigen Nordsee. Dissertation, Naturwissenschaftliche-Mathematischen Gesamtfakultät, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.