

Günther EICHWEBER

## **Wasserbauliche und ökologische Bewertungskriterien für Umlagerungsstrategien in der Unterelbe**

### Abstract

The Elbe estuary shows a variety of complex physical phenomena. The development of tidal subharmonics ruling the sediment regime, the instability by effect resonance and residual transports of sand and fines in opposite directions are a big challenge for the maintenance of the river. Concepts of sediment management including the use of controlled cycles of dredged and relocated sand are proposed to regain the morphological stability. To avoid the cycles of dredged fines requires a new approach of assessment of long-term economical and ecological effects.

**Keywords:** Elbe, sediment management, dredging

## **1 Einleitung**

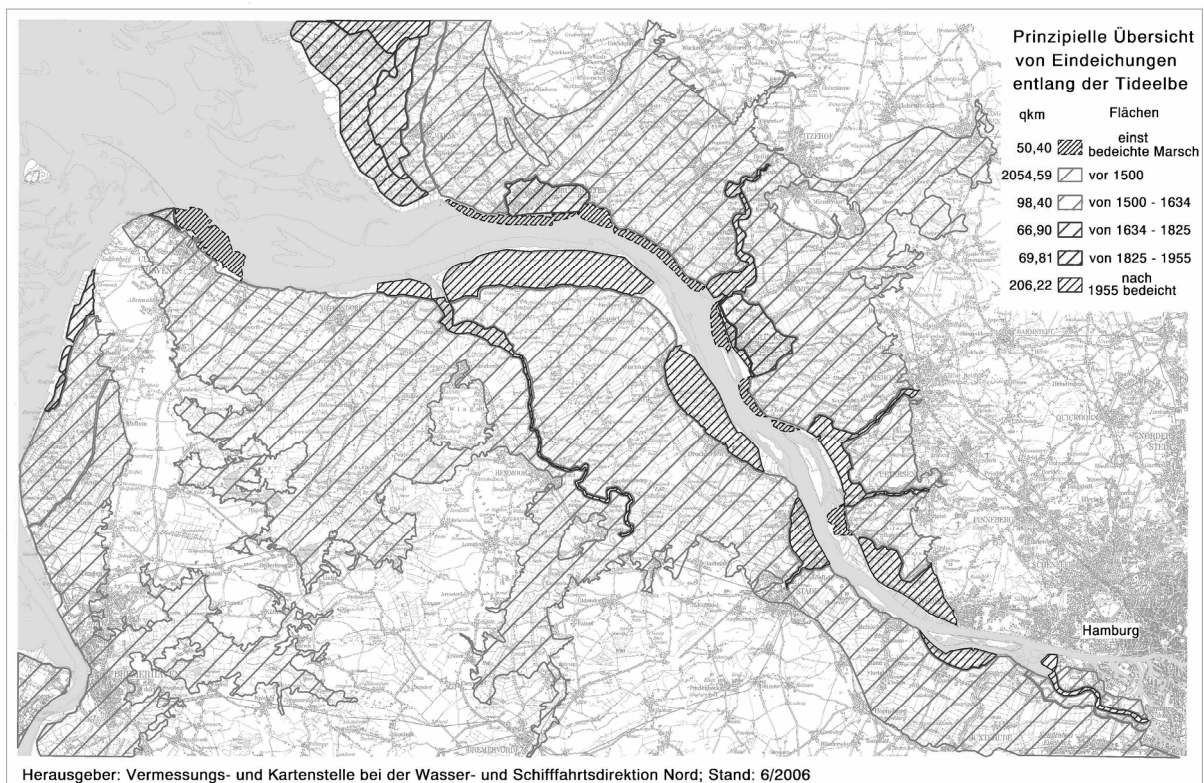
Die Entwicklung der Tideelbe ist seit rund 800 Jahren anthropogen überprägt. In diesem Beitrag soll skizziert werden, welche Folgen die einzelnen Eingriffe auf das Regime hatten und in welcher Weise die Unterhaltung der Fahrrinne zu einer Minderung der negativen Folgen beitragen könnte.

## **2 Geschichte der Veränderungen der Tideelbe**

### **2.1 Deichbau und Flußvertiefungen**

Die Deichbauten begannen vor rund 1000 Jahren; um 1200 n.Chr. bestand an der Tideelbe eine geschlossene Deichlinie. Die Reduzierung des Überflutungsraumes, die dadurch erreicht wurden, betrug rund 95 %. Eine weitere einschneidende Reduzierung des Überflutungsraumes fand erst nach der Sturmflut von 1962 statt, als die Nebenflüsse mit sturmflutkehrenden Sperrwerken versehen und die Deiche auf weiten Strecken vorverlegt wurden. Damit sind von dem verbliebenen Überflutungsraum weitere 74 % auf niedersächsischer und 54 % auf schleswig-holsteinischer Seite eingedeicht worden, so dass, verglichen mit dem Zustand vor den Deichbauten, nur etwa 2 % des ursprünglich bis an die Geest reichenden Überflutungsraumes übrig geblieben sind (Abb. 1).

Die Tideelbe der Nacheiszeit war bis dahin eine Senke für die Sedimentflüsse. Von der Mittelelbe wird ein gleichmäßiger Zustrom von Sediment gefördert, der nur nach Beginn der Eisenzeit etwa mit Beginn der Zeitrechnung durch die einsetzenden Entwaldungen und Bodenerosionen für einige Jahrhunderte noch größere Werte annahm (Paluska 1992). Der überwiegende Teil der Sedimente, die dem Marschland die Anpassung an den Meeresspiegel ermöglichten, muss aus Gründen der Mengenbilanz von See gekommen sein. Die Rinnegeometrie und der Verlauf der Tideströmungen müssen so gewesen sein, dass dieser stromauf gerichtete Transport mit dem Flutstrom auch stattfinden konnte. Die alten Karten, die einen für flutstromgeprägte Rinnen typischen flachen Verlauf zeigen, könnten in diesem Sinne zu interpretieren sein.

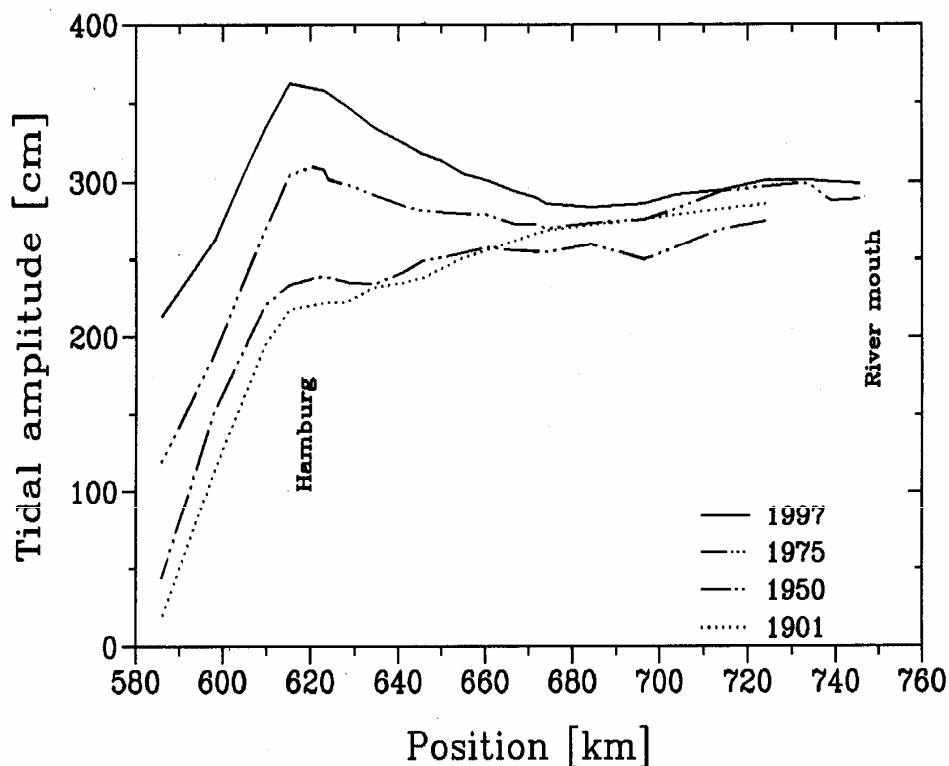


**Abb. 1** Entwicklung des Überflutungsraumes der Unterelbe

Durch die Eindeichungen wurden die Räume, in denen das von See und oberstrom herantreibende Sediment sich ablagern konnte, dem System entzogen. Bei unveränderter Tidedynamik erzeugt dies kurzfristig einen Sedimentüberschuss im System. Dieser führt zu entsprechend rascher Verlandung der verbliebenen Randbereiche, der Vorländer, der Watten und der Nebenarme der Elbe. Die Rinne wird dadurch zwangsläufig schmaler. Ihre Morphologie und die damit entstehende Tidedynamik bewirkten eine Abnahme der flutstromerzeugten und eine Zunahme der ebbedominierten Transporte. Die Elbe zeigte daraufhin das für ebbedominierte Rinnen typische schmale Gewässerbett mit zunehmender Konzentration der Strömung auf eine Hauptrinne.

In diese Entwicklung hinein begannen im 19. Jahrhundert die durch die Dampfbagerei möglichen großen Vertiefungen der Fahrrinne der Tideelbe. Ab 1868 wurde die Elbe im Hamburger Raum auf 5 m vertieft (Köhlbrandvertrag). Die Elbe war bis zum Mittelalter im Stromspaltungsgebiet bei Niedrigwasser zu Fuß passierbar. Dies führte zur Entwicklung eines Süd-Nord-gerichteten Handelsweges nach Lübeck und im 10. Jahrhundert zur Gründung der Stadt Hamburg an der Stelle, wo der Schiffahrtsweg und die Handelsstraße sich kreuzten. Angesichts dieser Tatsache waren 5 m Wassertiefe schon eine große Veränderung. Es folgten 1897 die Vertiefung auf 6 m und 1910 auf 8 m; der 10 m-Ausbau wurde um 1930 begonnen und in den 50er Jahren abgeschlossen. Diese Ausbaumaßnahmen betrafen nur die obere Tideelbe, da in der mittleren und unteren Tideelbe die Tiefen noch ausreichten.

Die Tide wurde verstärkt durch diese Ausbauten; ihre besondere Charakteristik, die darin begründet ist, dass ein großer Teil der Energie in den Untiefen des Stromspaltungsgebietes reflektiert wurde, verstärkte sich. Mit den weiteren Vertiefungen, die 1978 13,5m erreichten, bildete sich der Übergang zu flacheren Hafengebieten stromauf des alten Elbtunnels bei den Landungsbrücken als neue Reflexionsstelle der Tideelbe aus. In der Süderelbe wurde mit dem Ausbau des Fahrwassers für Seeschiffe bis zum Wendebassin ebenfalls eine Reflexionsstelle geschaffen. Die Reflexionen aus Norder- und Süderelbe waren bis zum Ausbau des Containerterminals Altenwerder nahezu phasengleich. Der Tidehub nimmt hier den maximalen Wert in der gesamten Unterelbe an (Abb. 2).



**Abb. 2** Zunahme des Tidehubes im Reflexionsbereich bei Hamburg St. Pauli

Die Hauptrinne ist in ihrer heutigen Form das Ergebnis umfangreichen Strombaus. Die natürliche Dynamik, die auch die wechselnde Aktivierung alternativer Nebenrinnen einschloss, ist weitgehend durch eine gebündelte Strömung in einer festgelegten Rinne ersetzt worden. Dieses ist allerdings nicht vollständig gelungen, so dass qualitativ die Elemente der Ebb- und Flutstromwege und ihrer Ausprägungen im Gewässerbett noch vorhanden sind. Die Rinne gliedert sich in Bereiche sehr unterschiedlicher Strömungskräfte; Abschnitte mit bis zu 3 m hohen Rippelstrukturen folgen im Wechsel solchen mit strukturlosen Schluffsedimenten. Etwa 40 % der Rinnenstrecke werden regelmäßig bis gelegentlich unterhalten; 60 % sind meist tiefer als die Schifffahrt erfordert und benötigen selten eine Unterhaltung. Hier reichen die Tiefen bis zu 30 m unter dem Niedrigwasser.

Die vielleicht wesentlichste Veränderung, die diese Rinne im 20. Jahrhundert erfahren hat, ist die Vertiefung in den Bereich unterhalb der fast überall anstehenden, erosionsstabilen Kleilagen. Diese hatten bis vor dem 10 m-Ausbau streckenweise eine ebene Sohle gebildet, die hydraulisch wie eine betonierte Gewässersohle wirkte und auf der sich kein Sediment lösen konnte. Die Durchbaggerung dieser Kleilage hat die Bildung eines Sandtransportregimes eingeleitet und die Bildung der großen Transportkörper wie auch der Wechsel von Baggerstellen und Übertiefen ermöglicht, die bis auf einige wenige danach entstanden sind. Noch heute ist dieser Sachverhalt auf den Tiefenplänen erkennbar, da die Hauptrinne über weite Strecken seitlich im Tiefenbereich von ungefähr -12 m bis -8 m von steilen, erosionsfesten Böschungen begrenzt wird (Abb. 3).

Eine aktive Mehrrippendynamik ist noch in der Außenelbe anzutreffen, wo die Strömung die Mittelrinne und die Norderinne annimmt. Die Mittelrinne wird dabei durch den Leitdamm Kugelbake so beruhigt, dass für die verlässliche Lage des Schifffahrtsweges keine Gefahr besteht.



**Abb. 3** Die Durchbaggerung der erosionsfesten Kleilage ist noch heute auf den Tiefenplänen erkennbar

## 2.2 Unterhaltungsentwicklung der 80er und 90er Jahre

Die Gezeitenwelle in der Tideelbe weist eine Besonderheit auf, die sie von den meisten anderen Ästuaren unterscheidet: die halbtägige Tide passt in die Länge des Systems so genau, dass sich eine stehende Welle ausbildet. Hierbei dienten früher die flachen Bereiche des Stromspaltungsgebietes oder heute die Sprünge im Tiefenverlauf bei St. Pauli und in der Süderdelbe als Reflektoren am oberen Ende. Die Öffnung der Mündung bei Scharhörn bildet eine Reflexion am offenen Ende aus. Die so entstehende Schwingung des Systems bildet auch Oberschwingungen, die sich in ähnlicher Weise wie im Musikinstrument einstellen. Ihre Überlagerung führt zu der charakteristischen Energieverteilung des Systems; sie bestimmt die Lage der Baggerstellen, Übertiefen (Eichweber & Lange 1996, 1998) und den Kurvenverlauf (Abb. 4, 5).

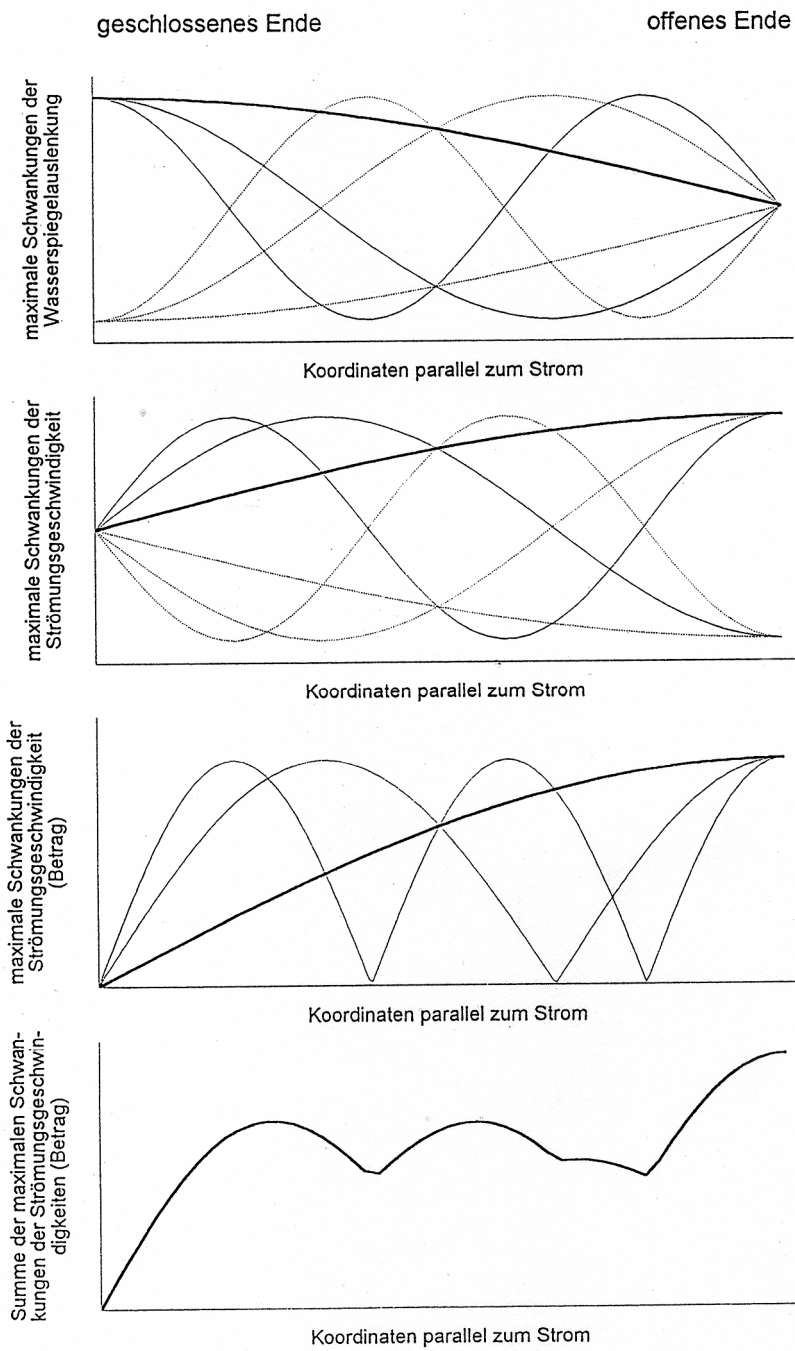
Die Baggerstellen zeigen daher eine Anordnung, die einem einfachen arithmetischen Schema folgt:

Hamburg	Scharhörn
	$2/3$
	$1/3$
	$2/5$
	$1/5$
	$2/7$
	$1/7$
	$2/9$
	$1/9$
	$2/11$
	$1/11$

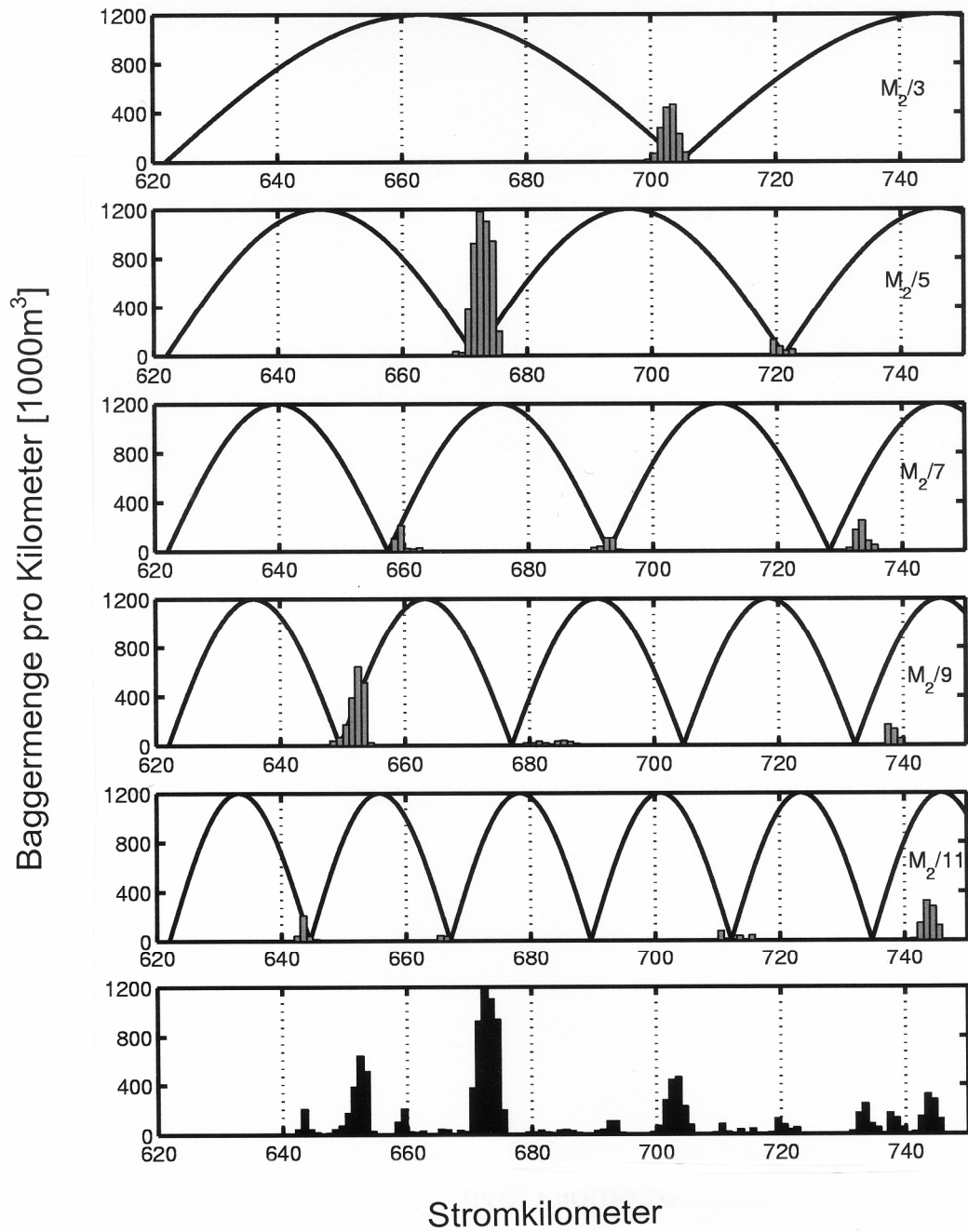
Dort, wo aufgrund der Obertidenresonanz hohe Energie herrscht, bilden sich nicht nur Übertiefen, sondern der Strom weicht auch seitlich aus und zeigt dort besonders scharfe Kurvenkrümmungen. Die Minima der Energie stimmen mit den geraden Abschnitten und den Wendepunkten des Kurvenverlaufs überein (Eichweber 1998). Diese passende Morphologie deutet darauf hin, dass die wichtigsten Obertiden schon einige Jahrhunderte in Resonanz schwingen.

Die Entwicklung der Baggermengen im Längsprofil zeigt in den 80er Jahren deutliche Hinweise auf die zunehmende Bedeutung der Obertiden für die Eintreibungen (Abb. 6). Die Eintreibungen, die in der Vergangenheit als Folge der Kurven und der damit verbundenen unterschiedlichen Wege der Ebbe- und der Flutströmungen (transversale Schwingungen) gedeutet wurden, würden demnach auch in einem geradlinigen System in gleicher Weise auftreten, da sie überwiegend als Folge der Resonanz von longitudinalen Wellen zu interpretieren sind.

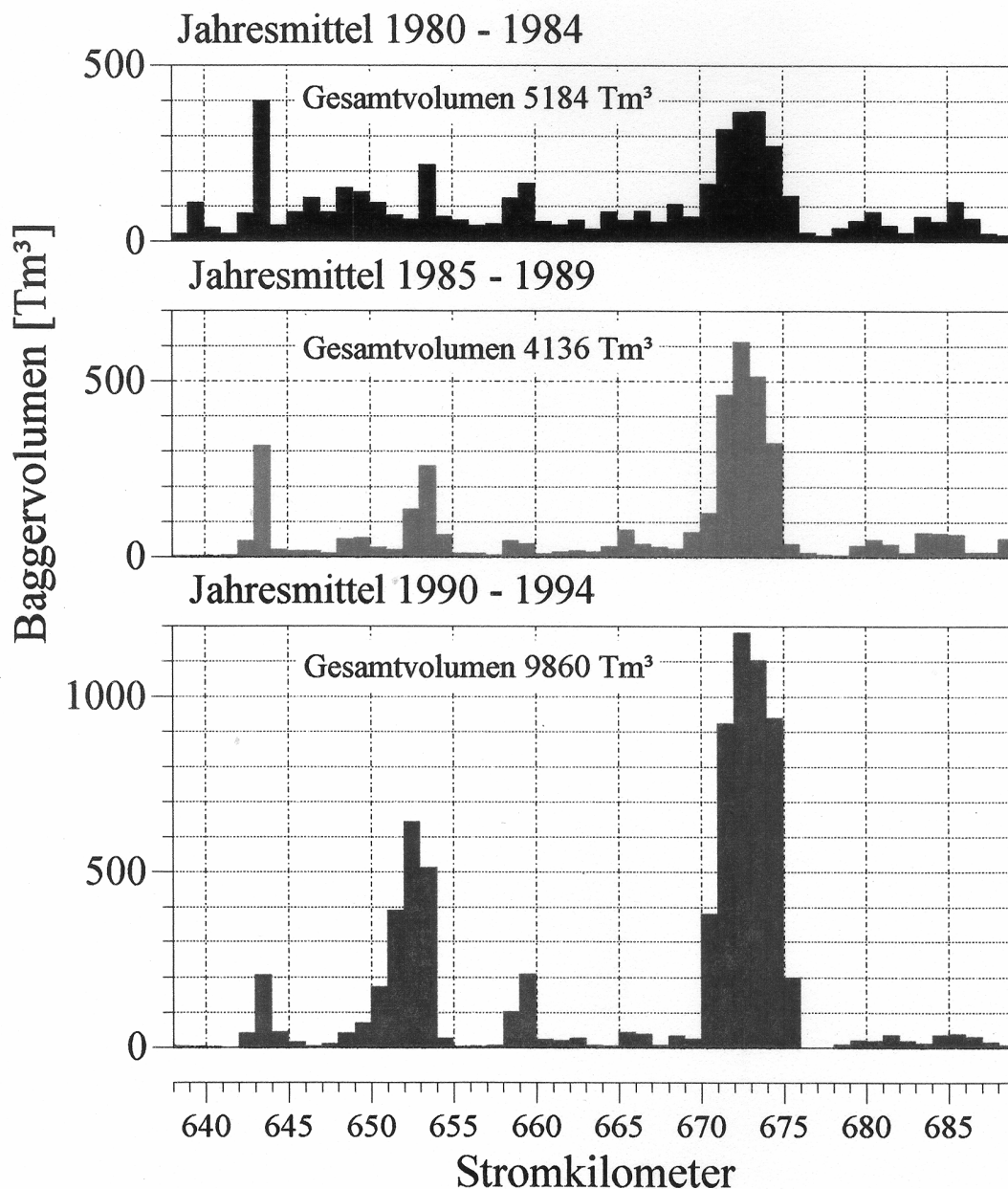
Die Schwebstoffverteilung in der Tideelbe ist bestimmt durch eine Vielzahl biologischer und chemischer Prozesse, bei denen die große Menge der Algen aus der Mittelbe eine bestimmende Größe ist. Früher starben diese bei dem Kontakt mit dem Salzwasser in der Brackwasserzone und bauten dabei die Trübungszone auf. Seit den Fahrrinnenvertiefungen führt die große Wassertiefe ab Hamburg dazu, dass die Algen nicht genug Licht bekommen und absterben. Neben diesen Prozessen ist die lokale Verteilung der Schwebstoffe auch von den Oberschwingungen geprägt: die Konzentrationen sind in den Bereichen geringerer Strömungsgeschwindigkeiten erhöht (Rolinski & Eichweber 2000).



**Abb. 4** Entstehung der Grundschwingung und der ungeraden Oberschwingungen in einem einseitig offenen System (Eichweber & Lange 1996, 1998)



**Abb. 5** Qualitative Verläufe der Strömungskomponenten, die den Obertiden zuzuordnen sind korrelieren mit den Baggerstellen und Übertiefen der Tideelbe (Eichweber & Lange 1998)

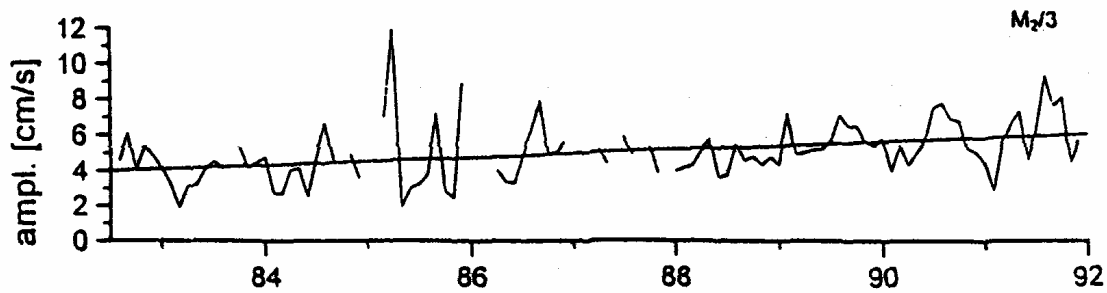


**Abb. 6** Die lokale Konzentration der Eintreibungen ist ein Indiz für die zunehmende Bedeutung der Obertiden (Eichweber & Lange 1996)

### 3 Problembeschreibung

#### 3.1 Sedimenthaushalt heute

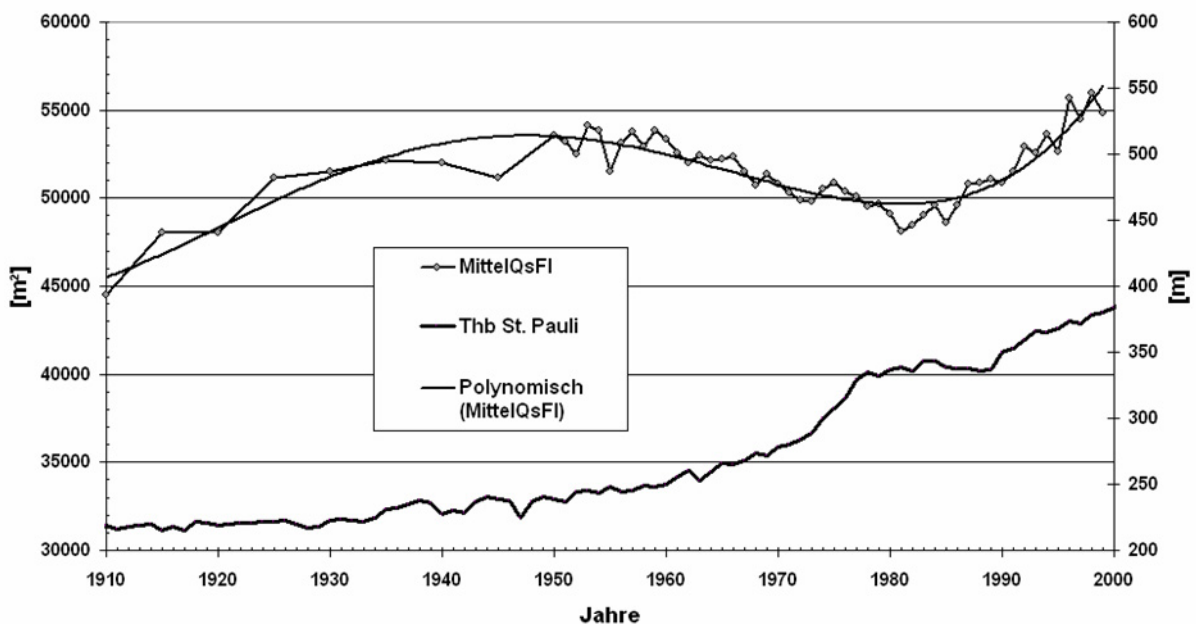
Die Zunahme der Bedeutung der Obertiden kann auf der Basis der Strömungsmessungen nur für die  $M_6$ , die Obertide mit der größten Amplitude in der Tideelbe, bestätigt werden (Abb. 7). Diese hat eine besondere Bedeutung für den steilen Verlauf der Wasserstandskurve nach Niedrigwasser und damit für den besonders starken Flutstrom in dieser Phase (s. 3.2).



**Abb. 7** Die Amplitude der  $M_6$  hat in zehn Jahren um 50% zugenommen. Spektralanalyse von Strömungsmessungen im Bereich Cuxhaven (Eichweber, Lange 1998)

Die damit angesprochene selbstorganisierte Resonanz der Tide in der Tideelbe betrifft natürlich auch die halbtägige Tide. Bakker (Bakker 1998) hat die Resonanzentwicklung als eigenständigen Prozess, der ohne menschliches Zutun zur Verstärkung der Tide führt, beschrieben. Die Erosion im Gewässerbett, besonders der Mündung, und die Tidedynamik verstärken sich dabei gegenseitig (Abb. 8). Die Daten von Mündungsquerschnitt und Wasserstand legen nahe, dass auch insgesamt, nicht nur für die Obertiden, eine solche Entwicklung in der Elbe stattfindet.

Durch Eingriffe, die wie der Fahrrinnenausbau die Dämpfung erniedrigen, kann der Prozess beschleunigt werden. Durch Veränderungen der Reflexion ebenfalls, so dass anzunehmen ist, dass auch Verfüllungen von Hafenbecken in Hamburg die Entwicklung begünstigen.

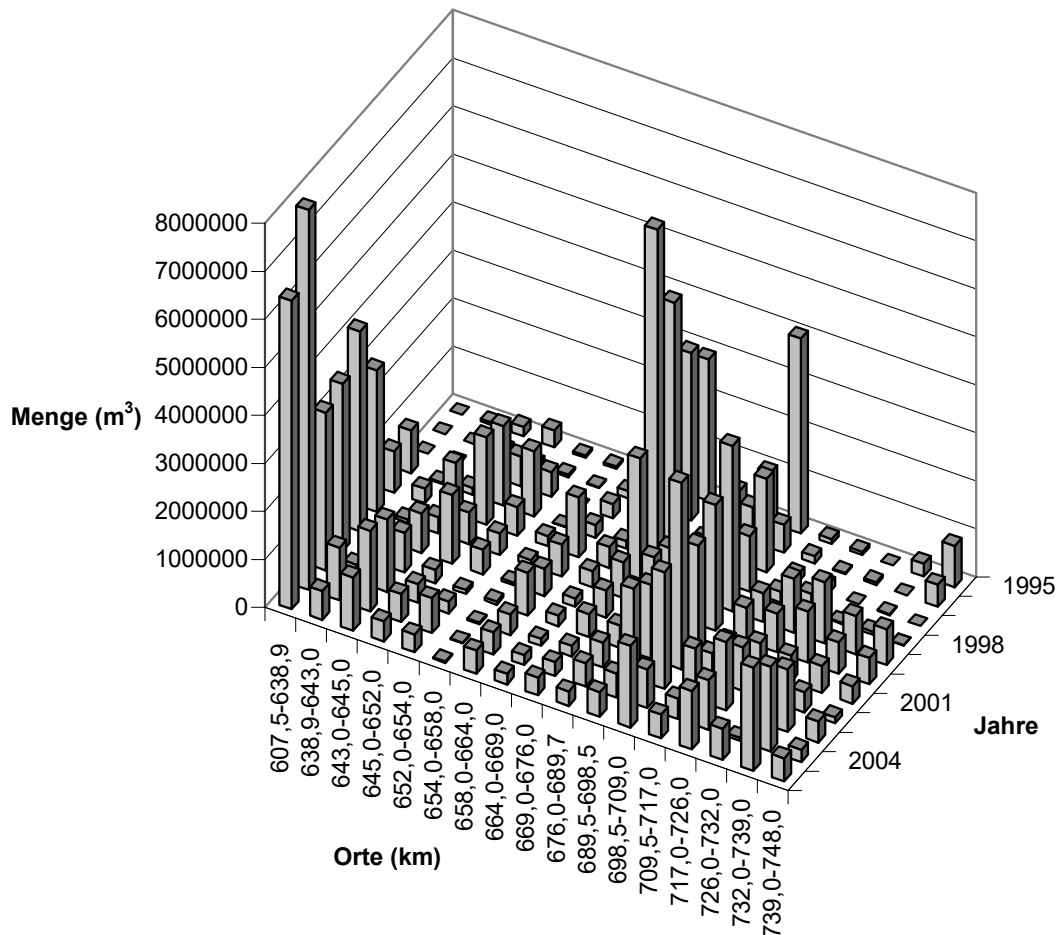


**Abb. 8** Zunahme von ausgewählten Querschnitten der Elbmündung und Tidehub bei St. Pauli

Nach dem Fahrrinnenausbau von 1999 haben sich die Unterhaltungsschwerpunkte verändert. An der größten Baggerstelle bei Glückstadt wurden die Eintreibungen wie beabsichtigt reduziert. Die Baggermengen in den übrigen

Bereichen blieben zunächst stabil (Abb. 9). Nach und nach zeigte sich, dass der Bereich zwischen Stade und Hamburg für sich genommen einen deutlichen Anstieg der Eintreibungen aufwies. Dieses wurde mit einem verstärkten stromauf gerichteten Transport in Verbindung gebracht. Darüber hinaus wird hier der Aspekt der Kreislaufbaggerung bedeutsam, der im nächsten Abschnitt betrachtet wird.

### Baggermengen an der Elbe von 1995 bis 2005 - nur Umlagerung im Gewässer



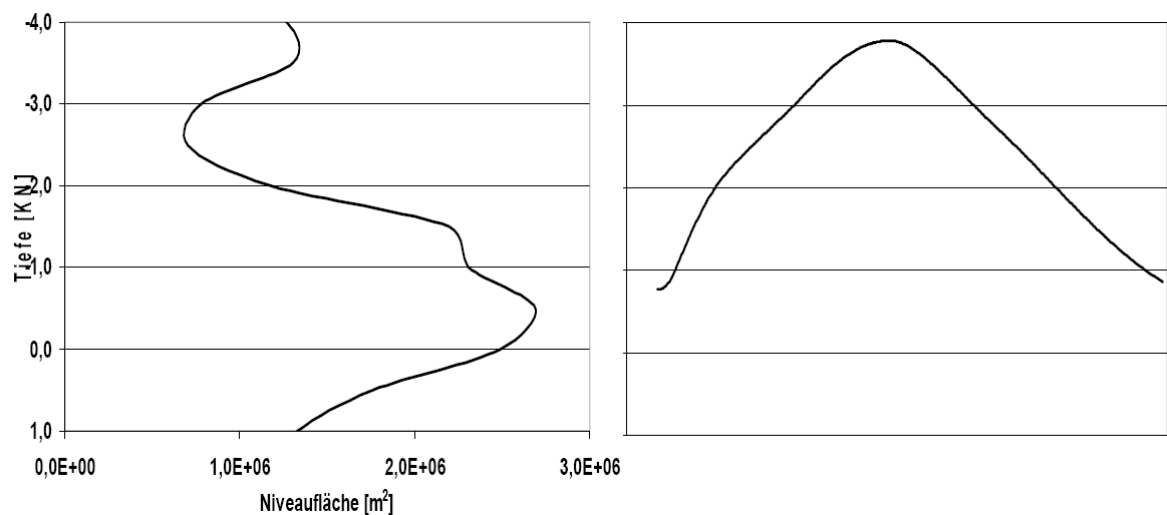
**Abb. 9** Entwicklung der Baggermengen nach dem letzten Fahrrinnenausbau 1999

Die beobachteten stromauf gerichteten Transporte von Schlick und Sand besonders im Abschnitt zwischen Glückstadt und Hamburg können noch nicht umfassend gedeutet werden. Grundsätzlich ist diese Erscheinung als natürliches Phänomen bekannt. Flutstrom geprägte Transporte finden besonders im Flachwasser und auf dem Watt statt. Im Flachwasser sind besonders die Tiefenbereiche durch die Flut geprägt, in denen sich durch den besonders steilen Wasserstandsanstieg während der ersten zwei Stunden nach Niedrigwasser hohe Sohlschubspannungen bilden. Die Zunahme dieser Transporte und die neue Erscheinung, dass auch Feinsand stromauf bewegt wird, deuten an, dass auch in der Fahrrinne flutstrominduzierte Transporte auftreten. Ob dieses allein durch

Veränderungen der Tidedynamik erklärt werden kann, ist unsicher. Untersucht wird auch die Möglichkeit, dass die Mobilisierung von Sediment durch die Schiffspassagen eine Rolle spielt. In tideabhängiger Fahrt befahren diese den zur Diskussion stehenden Stromabschnitt einkommend wie auslaufend jeweils bei Flut.

### 3.2 Partialtiden und residuelle Transporte

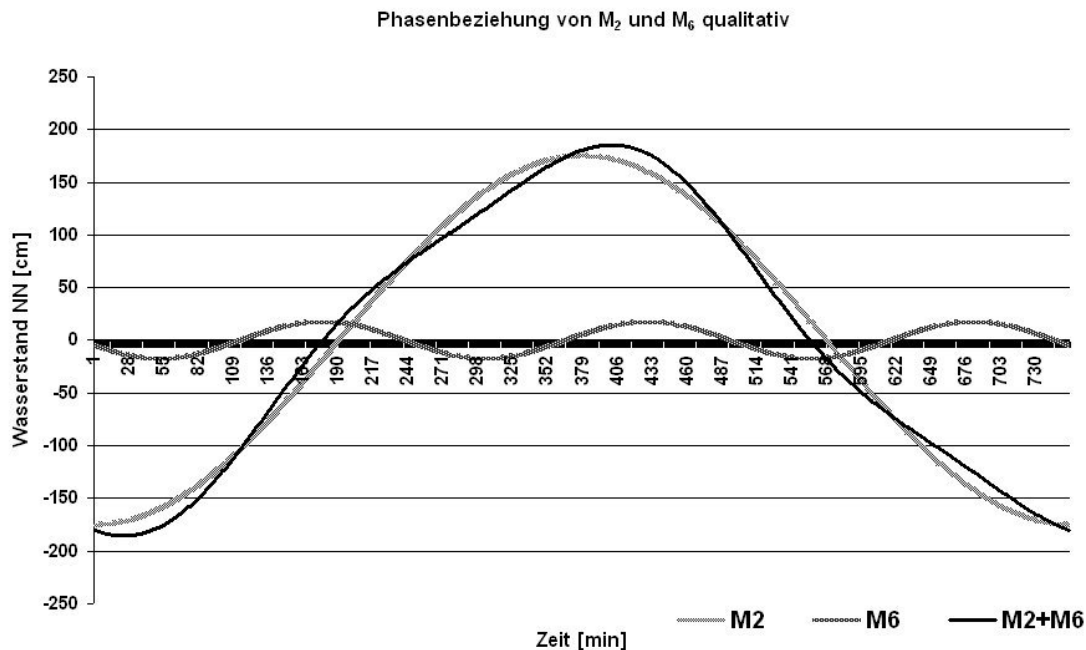
Die residuellen Transporte sind wesentlich bedingt durch die Asymmetrie der Tidekurve und die daraus folgenden Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten. Diese erzeugen sowohl die fortschreitende Mündungserosion mit ihren Folgewirkungen für die Tide als auch die Akkumulation von Feinsedimenten im Hamburger Raum. Der Verlauf der Tidekurve kann in Beziehung zur topographischen Niveauflächenverteilung gesehen werden. Der starke Wasserstandsanstieg am Anfang der Flutphase fällt in den Bereich, wo die Watten noch trocken liegen. Wenn die Watten dann so weit überflutet sind, dass die Wassertiefe eine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit zulässt, wirkt der damit erweiterte Querschnitt und führt dazu, dass sich die Kurve abflacht und auch die Strömungsgeschwindigkeiten zurückgehen (Abb. 10). Die Höhe und Ausdehnung des Flachwassers und Watts hat demnach eine prägende Bedeutung für den Verlauf der Tidekurve.



**Abb. 10** Die Niveauflächenverteilung des Flachwassers und Watts im Raum Hetlingen/Stade gibt an, wie viel Fläche auf ein Tiefenintervall von 1 m entfällt. Sie weist typischerweise im Bereich des Watts ein Flächenmaximum auf; in diesem Beispiel 0,5 m oberhalb Kartennull. Der Verlauf der Tidekurve in diesem Gebiet (hier des Pegels von Stadersand) weist etwa dann, wenn das Watt 1 m hoch überflutet wird, einen Knick auf. Der steile Anstieg des Wasserstandes bei Flut flacht sich ab, wenn durch die Überflutung des Watts der Querschnitt aufgeweitet wird.

Betrachtet man den Prozess in Bezug zu den longitudinalen Schwingungen und ihrer Überlagerung, so ist die Tidekurve auch als Ergebnis der Summe der Partialtiden zu deuten.

An einem Beispiel soll dargestellt werden, welche Bedeutung der amplitudenstärksten Obertide, der  $M_6$ , in diesem Zusammenhang zukommt. Die Tidekurve, die im Raum zwischen Hamburg und Stade typisch ist, wurde schon in der Abbildung 10 gezeigt. Abbildung 11 stellt sie als Ergebnis der Überlagerung der  $M_2$  und der  $M_6$  dar. Wie man sieht, wird die Kurve damit fast vollständig abgebildet, obwohl die weiteren Obertiden vernachlässigt wurden.



**Abb. 11** Die Tidekurve kann auch als Überlagerung von Partialtiden gesehen werden, hier der  $M_2$  und der  $M_6$ . Obwohl die übrigen Partialtiden weggelassen wurden, wird der Verlauf im Raum Stade schon erkennbar

Als Ergebnis der beiden unterschiedlichen Ansätze ist festzuhalten, dass beide begründet sind und damit auf Wirkungszusammenhänge hindeuten, die mit einem Ansatz allein nicht zu erschließen sind:

Es bestehen Wechselbeziehungen zwischen

- der Höhe und Ausdehnung des Watts,
- der Baggerstelle am Osteriff,
- dem stromauf gerichteten Transport von Feinmaterial im Hamburger Raum,
- den seewärts gerichteten Transporten von Sand,
- der Mündungserosion
- der Tidehubzunahme
- und der Auflandung der Randbereiche.

Das verbindende Glied dieser Wechselbeziehungen sind die Partialtiden, allen voran die amplitudenstärkste Partialtide  $M_6$ .

### 3.3 Kreislaufbaggerungen von Feinmaterial

Die Baggerungen an der Tideelbe werden seit Mitte der 80er Jahre so durchgeführt, dass das Material im Strom umgelagert wird. Im Gegensatz zur Entnahme und Aufspülung z.B. auf den Elbinseln trägt die Umlagerung zur morphologischen Stabilität bei. Es kann auch gezeigt werden, dass der Verbleib des Materials im System zur Stabilisierung der Wasserstände beiträgt.

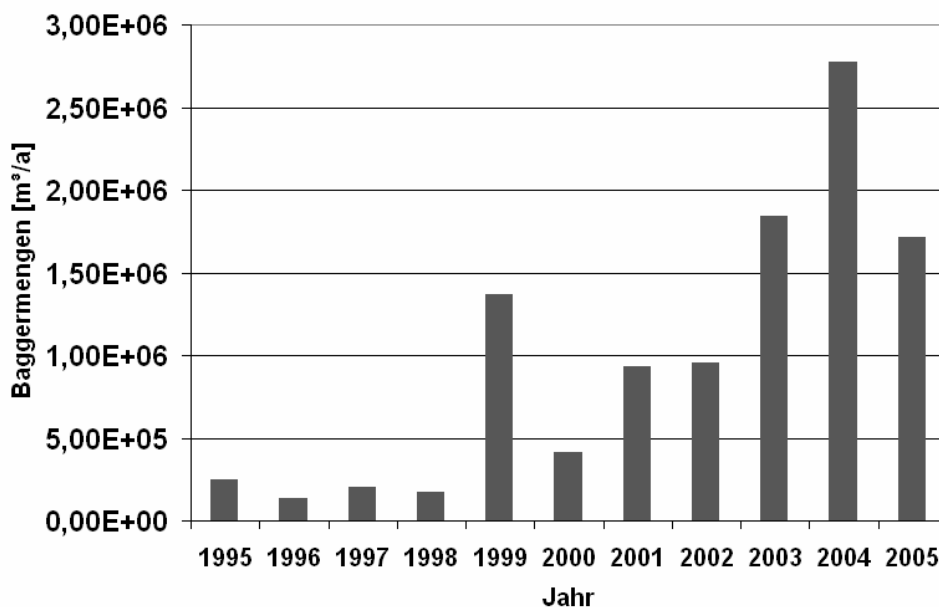
Die Umlagerung kann mit und entgegen der vorherrschenden Transportrichtung ausgeführt werden. Gegenwärtig wird das Baggergut im Bereich von Cuxhaven in der Mündung umgelagert, weil dort eine gute Verfügbarkeit von Klappstellen gegeben ist. Das Material im Bereich von Wedel wird bei Stade und weiter stromab umgelagert. Hierfür sprechen Gesichtspunkte der Kosten bei der Verbringung und der Belastung des Baggergutes. Die Handlungsanweisung Baggergut Binnen (HABAB) und die Handlungsanweisung Baggergut Küste (HABAK) stellen Bedingungen für die Umlagerung. Hiermit wird versucht, das OSPAR-Abkommen zu erfüllen. Die Umlagerungskriterien sind an den Konzentrationen von Schadstoffen im Baggergut und am Verbringungsort orientiert. Es ist demnach nur bedingt möglich, aus dem relativ mehr belasteten Bereich bei Hamburg in den weniger belasteten bei Glückstadt umzulagern.

Als langfristiger Effekt der Kreislaufbaggerung ist die Verlandung der Randbereiche in die Bewertung einzubeziehen. Diese fördert eine weitere Verstärkung der residuellen Transporte. Alternativ ist die Aufwertung, die mit der Auflösung des Kreislaufes verbunden ist, in die Bilanzierung einführen und eine Gesamtbewertung der Belastung des Wasserkörpers und der Randbereiche für die unterschiedlichen Umlagerungsstrategien zu versuchen. Die Kontamination, der Sauerstoffgehalt und die ökologischen Folgen sind langfristig für das gesamte Ästuar zu bilanzieren. Ein neues Bewertungsverfahren sollte sich nicht nur an den Konzentrationen orientieren, sondern an den Schadstoffflüssen des Regimes, den Quellen und Senken sowie deren Modifikation durch die Eingriffe.- Nicht nur einzelne Verbringungen sind zu bewerten, sondern langfristige und großräumige Folgen von Umlagerungsstrategien.

Es ist zu unterscheiden, ob die Umlagerungen mit der Transportrichtung der Schadstoffe stattfinden und diese Transporte damit beschleunigen, oder ob die Umlagerungen gegen die vorherrschende Transportrichtung stattfinden, denn diese können das Regime qualitativ verändern. Es besteht eine Vielzahl ungelöster Fragestellungen bezüglich der seewärtigen Schadstofffrachten, der stromauf gerichtete Feinmaterialtransporte, der Rolle der „Spülstöße“ genannten hohen Oberwasserabflüsse für den seewärtigen Transport der Schadstoffe. Festzustehen scheint, dass Material mit sehr kleinen Sinkgeschwindigkeiten durch die Oberwasserwirkung mit dem Wasserkörper seewärts befördert wird. Die Belastung der Schlickzunge in der deutschen Bucht zeigt, dass die Kontamination durch die Schadstoffeinträge aus den deutschen Ästuaren hier eine Rolle spielt.

Die Umlagerung bei Cuxhaven geschieht mit der Transportrichtung seewärts; die Verbringung bei Hamburg entgegen der hier stromauf gerichteten

Transportrichtung des Baggergutes im Strom. Mit dem Rücktransport in die Baggerstelle wird im Prinzip gerechnet; dieser ist auch nicht grundsätzlich problematisch. Schwierig wird die Umlagerung gegen die Transportrichtung, wenn der Strom außer dem Baggergut noch weitere Sedimente in die Baggerabschnitte befördert. Dadurch entstehen anwachsende Baggergutkreisläufe, die sich an den linear steigenden Baggermengen erkennen lassen (Abb. 12). Durch die hohe Mobilität der Feinsedimente können diese Kreisläufe rasch anwachsen und zeigen zunächst keine Obergrenze, die etwa durch das Transportvermögen des Stromes gegeben sein könnte. Die Kriterien, die zur Durchführung der Umlagerungspraxis geführt haben, gelten weiterhin und verhindern die Auflösung des Kreislaufes: die kurzen Verbringungswege sind augenblicklich betrachtet die billigsten, und die Belastung des Baggergutes verhindert die weiträumige Verbringung. Die langfristigen Effekte, wie die Akkumulation von Feinsedimenten und Schadstoffen in dem Flussabschnitt, wo die Kreisläufe stattfinden, bleiben unberücksichtigt. Generell bleiben bei diesem Ansatz die Schadstofffrachten unberücksichtigt; Grundlage der Bewertungen sind nur die Konzentrationen. Dieses ist für eine vollständige Bewertung der ökologischen Folgen unzureichend.



**Abb. 12** Der nahezu lineare Anstieg der Baggermengen im Raum Hamburg, hier zusammengefasst für Norder- und Süderelbe sowie für Wedel bis Stade, deutet auf eine Kreislaufbaggerung hin, die durch einen Sedimentzustrom gesteigert wird.

Als Nachteile der Kreislaufbaggerung sind zu verzeichnen:

- die Kostenoptimierung findet nicht mehr statt;
- die Baggermengen können so weit ansteigen, dass die großräumige Verbringung wesentlich kostengünstiger wird, wenn sie geeignet ist, den Kreislauf aufzulösen;

- das Regime wird im betroffenen Bereich instabil: durch den Sedimentüberschuß wird die Verlandung der Randbereiche gefördert;
- die zunehmende Menge des im Strom bewegten Material erhöht die Trübung. Auch wenn die Sauerstoffzehrung des umgelagerten Materials gering ist, sind durch die mittelbaren Wirkungen auf die Trübung und die Verlandung negative Wirkungen auf die Primärproduktion möglich.

## **4 Lösungsansätze**

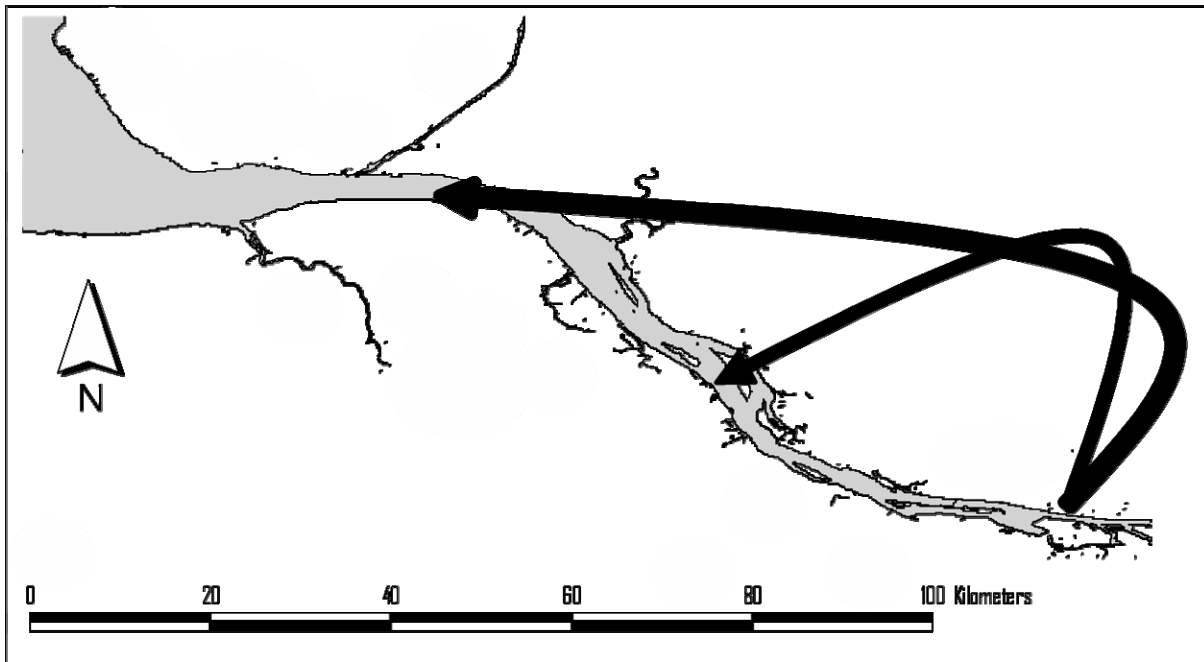
Die Problemanalyse ergab im wesentlichen zwei Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten der Bagger- und Umlagerungsstrategie. Erstens sollte versucht werden, den Bereich mit dem zunehmenden Feinmaterialüberschuss durch geeignete großräumige Umlagerung zu stabilisieren. Zweitens ist es möglich, dass der Bereich mit Sanddefizit durch Umlagerung entgegen der Richtung des residuellen Transportes stabilisiert werden kann. Für beide Aufgabenstellungen soll im folgenden skizziert werden, wie die Lösung aussehen könnte. Die genaue Beschreibung bedarf noch eingehender sedimentologischer Untersuchungen.

### **4.1 Umlagerungsstrategie zur morphologischen Stabilisierung von Verlandungsbereichen**

Aus den vielen Nachteilen der eskalierenden Kreislaufbaggerung folgt die Notwendigkeit der Auflösung des Kreislaufs. Hierzu ist mehr Material als von außen in den Kreislauf strömt, in Bereiche, aus denen kein Rücktransport möglich ist, zu verbringen. Die notwendige Menge ist weder messtechnisch noch rechnerisch zu ermitteln – es bleibt nur das Experiment. Nach Möglichkeit sollte das gesamte gebaggerte Feinmaterial aus dem Kreislauf heraus befördert werden. Schwierig ist es, herauszufinden, unter welchen Bedingungen wie weit umgelagert werden muss. Es existiert kein sicherer „point of no return“. Je nach Wasserständen und Oberwasserabfluss muss das Baggergut verschieden weit verbracht werden. Für einige Feinfraktionen besteht die Möglichkeit, dass sie überall im Ästuar nur stromauf bewegt werden.

Die Alternative der weiträumigen Umlagerung unter Inkaufnahme des Rücktransportes muss alternativ für solche Zeiten berechnet werden, in denen die Möglichkeit der sicheren Entfernung des Material aus dem Kreislauf nicht besteht.

Es müssen Kriterien für die Bewertung der Auflösung des Kreislaufes formuliert werden, um diese Vorgehensweise insgesamt, auch in ökologischer Hinsicht, zu optimieren. Die bisherige Vorgehensweise ließ die negativen Effekte, die durch eskalierende Kreislaufbaggerung entstehen, außer Acht. Eine mögliche Verbringung aus dem Kreislauf heraus wird in Abbildung 13 skizziert.



**Abb. 13** Gegenwärtige und alternative (dicke Linie) Verbringung des Baggergutes bei Hamburg.

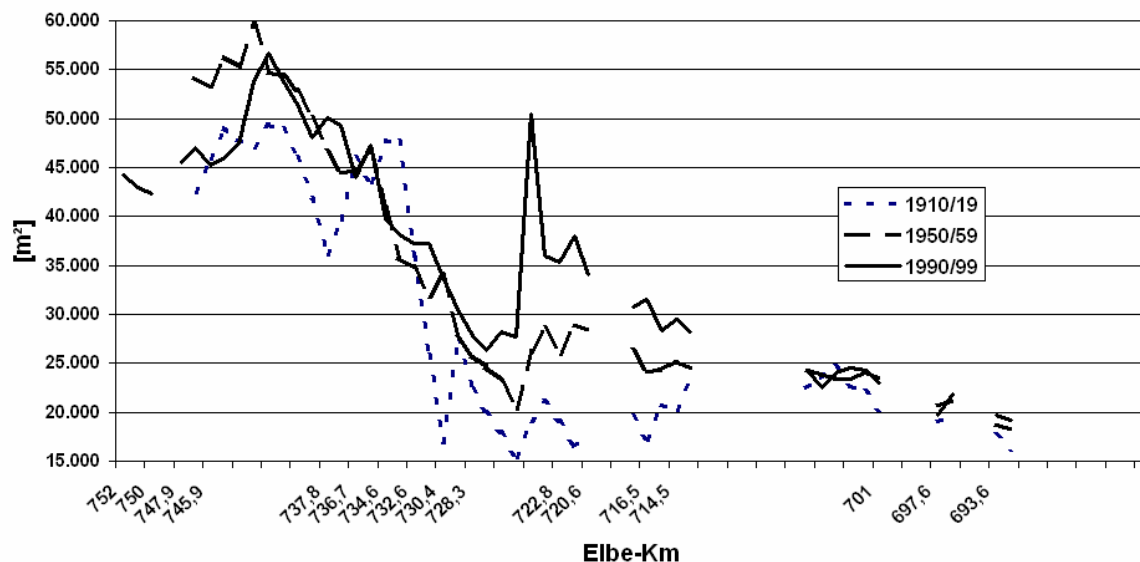
#### **4.2 Umlagerungsstrategie zur morphologischen Stabilisierung von Erosionsbereichen**

Die beschriebene Mündungserosion stellt, insbesondere durch die damit verbundene Förderung der Tidedynamik, ein Problem dar, das wasserbauliche, nautische und ökologische Wirkungen hat. Die Förderung der residuellen Transporte durch die Tideentwicklung berührt alle Bereiche der Tideelbe. Ein Wirkungszusammenhang mit dem stromauf gerichteten Transport von Feinmaterial ist möglich.

Die gegenwärtige Praxis der Umlagerung seewärts auf Klappstellen in der Außenelbe stellt eine Förderung dieser Entwicklung dar. Als naheliegender Lösungsansatz bietet sich an, wie beim Geschiebemanagement in Binnenflüssen den Sedimenthaushalt zu bewirtschaften. Hierzu ist ein mengenmäßig kontrollierter Kreislauf aufzubauen, der mit der Verbringung des Baggergutes aus dem Cuxhavener Bereich in stromauf gelegene Klappstellen, z.B. bei St. Margarethen beginnt.

Die gesamte Geschiebefracht dieses Raumes kann gegenwärtig nicht quantifiziert werden; aus Abschätzungen der Strömungsverläufe bei Baggerstellen und Transportansätzen ist zu schätzen, dass eine mittlere 8-stellige Zahl von Kubikmetern pro Jahr hier bewegt wird. Die Baggermengen stellen relativ dazu nur einen Bruchteil dar. Dennoch ist die Umlagerungsstrategie ein wirksames Werkzeug: ihre Bezugsgrundlage sind die residuellen Transporte. Aus topographischen Analysen ist zu entnehmen, dass die Erosion des Gewässerbettes der Elbe im Mündungsbereich zwischen 3 – 5 Mio m<sup>3</sup>/a beträgt (Abb. 14). Die Baggermengen der Baggerstelle Osteriff von ca. 5 Mio m<sup>3</sup>/a würden bei geeigneter Umlagerung (Abb. 15) ausreichen, um diese residuellen Transporte zu kompensieren und die weitere

morphologische Entwicklung zu stabilisieren. Allerdings müssen die Mengenbilanzen für alle betroffenen Kornfraktionen berücksichtigt werden, da nur die Fraktionen, die die Erosionen ausmachen, diese auch kompensieren können. Feinere Fraktionen würden z.B. in das Watt befördert und dort die Auflandungen verstärken. Es besteht daher noch einiger Untersuchungsbedarf, bis ein auf die residuellen Transporte aller Fraktionen abgestimmtes Umlagerungskonzept aufgestellt werden kann.- Grundsätzlich erscheint es möglich, mit der Umlagerung von Sand kontrollierte Kreisläufe zu unterhalten und damit wirksam das Regime zu stabilisieren.



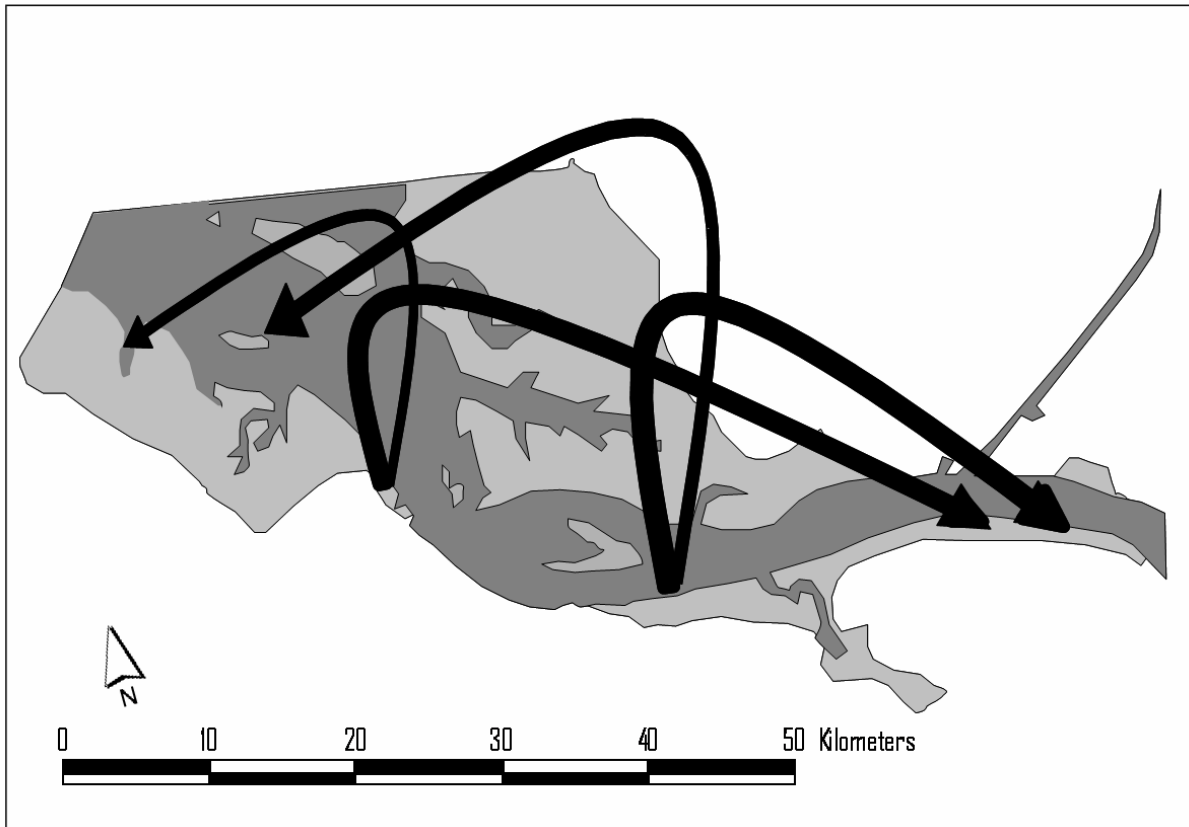
**Abb. 14** Die Querschnittsentwicklung des Raumes von Brunsbüttel (rechts) bis zum Leitdamm Kugelbake (links) weist sehr unterschiedliche Erosionsraten auf.

## 5 Zusammenfassung

Die Tideelbe zeigt eine Reihe komplexer Phänomene, die bei anderen Ästuaren nicht in vergleichbarer Weise zusammentreffen. Es ist die Entwicklung von Eigenschwingungen als dominierend für die Energieverteilung des Ästuars zu beobachten, ein Sachverhalt, der mit der Übereinstimmung der Grundschwingungsperiode mit der halbtägigen Tide zu erklären ist. Selbstorganisierte Resonanz führt zur Verstärkung der Tidedynamik und fortschreitender Erosion. Durch „tidal pumping“ werden Feinsedimente stromauf und Sande seewärts verfrachtet, was zusätzliche Instabilität und besondere Probleme bei der Unterhaltung zu Folge hat.

Diese Entwicklungen zu stabilisieren ist neben den strombaulichen Möglichkeiten auch durch die Umstellung der Umlagerung von Baggergut zu verfolgen. Die Umlagerungsstrategie wird damit zu einem Steuerungsinstrument, das ähnlich wie der Strombau zur Gestaltung des Regimes eingesetzt werden kann.

Neben der konzeptionellen Herausforderung sind dafür sowohl für die Finanzierung als auch für die ökologische Bewertung die Zielsysteme und der zeitliche und räumliche Umfang der Bewertung weiter zu entwickeln. Hierzu sind die langfristige Alternativenbewertung und die Einführung der relativen Aufwertung in die Bilanzierung wichtige Neuerungen.



**Abb. 15** Gegenwärtige und alternative (dicke Linien) Umlagerung von Baggergut bei Cuxhaven (Beispiel)

Die grundsätzliche Vermeidung von Schlickkreisläufen und die gezielte kontrollierte Ausführung von Sandkreisläufen werden sich auf einer derart erweiterten Bewertungsgrundlage auch als ökologisch sinnvoll und langfristig wirtschaftlich erweisen.

### Danksagung

Der Autor dankt Herrn Volker Neemann für viele anregende Diskussionen.

## Literatur

- Bakker T (1998) Effect Resonance on Morphology of Tidal Channels. ICCE Copenhagen 1998.
- Eichweber G & Lange D (1996) Über die Bedeutung der Reflexion von Obertiden für die Unterhaltungsaufwendungen in der Tideelbe. Die Küste 58: 179-198
- Eichweber G & Lange D (1998) Tidal Subharmonics and Sediment Dynamics in the Elbe Estuary. 3<sup>rd</sup> Internat. Conf. Hydroscience and Engineering. Cottbus.  
(<http://kfki.baw.de/conferences/ICHE/1998-Cottbus/210.pdf>)
- Eichweber G (1998) Mäanderbildung und ihre Steuerung durch Gezeitenresonanz am Beispiel der Tideelbe. 65. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Nordwestdeutscher Geologen, Schleswig (Tagungsband)
- 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, Nr. 19: 1-32
- Rolinski S & Eichweber G (2000) Deformations of the Tidal Wave in the Elbe Estuary and their Effect on Suspended Particulate Matter Dynamics. Phys. Chem. Earth (B), Vol.25, No. 4: 355-358

## Autor:

Günther Eichweber  
Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord  
Hindenburgufer 247  
24106 Kiel

email: GEichweber@wsd-nord.de

