

Quantitative Morphodynamik im Sohlenregime der Unterelbe

VON HANS-JOACHIM DAMMSCHNEIDER

Zusammenfassung

Mittels flächenhaft-quantitativer Kartenauswertung und Einbeziehung bekannter Daten aus Baggerungen und Verklappungen wird für den Zeitraum 1972-1979 im Bereich der Unterelbe – Kilometer 640-689 – das sogenannte „morphologische Volumen“ im Sohlenregime unter Karten-null ermittelt. In der Analyse ergibt sich eine rhythmische Verlagerung von Material stromauf. Die Geschwindigkeit der dabei auftretenden relativen Akkumulations- und Erosionszonen ist nach Sohlenregion sowohl im Quer- wie im Längsschnitt unterschiedlich stark. Die sich verlagernden Materialfelder überwandern unterschiedslos Kolk- wie Bankbereiche bisher unbekannter Dimension. Ihre Abfolge ist ausschließlich im gesamtmorphologischen Bild der gemittelten Tiefen feststellbar. Die im Längsriß sichtbare Schwingungsfolge zeigt stromauf abnehmende Frequenz und Amplitude, deren Grundform offenbar bereits in historischer Vergangenheit gleichartig zu verzeichnen gewesen ist. Im flächenhaften Querprofil existiert nachweisbar ein Materialkreislauf, der verklapptes Baggergut teilweise zurück in die Fahrrinne führt und somit den Baggerwirkungsgrad deutlich beeinflusst. Ein Materialverlust in Abhängigkeit von den Baggermengen ist speziell unmittelbar seitlich der Fahrrinne zu beobachten, während die Ufersohlenregionen Akkumulation bzw. gleichbleibende Tendenzen in der Materialbilanz zeigen.

Summary

A so-called "morphological volume" has been calculated for the regime below sea chart null in the Lower Elbe Estuary between kilometer 640-689. This is based on a qualitative areal evaluation of sea charts, dredging data and spoil records from 1972-1979. The analysis shows a rhythmic upstream transport. The development rate of the associated relative accumulation and erosion zones varies both longitudinally and laterally from region to region. The transported material migrates over scoured regions and bank areas of undetermined extent. Its evolution can only be determined from mean depths in the total morphological situation. The frequency and amplitude of the longitudinal oscillations decrease in the upstream direction. This is apparently attributable to the geological history of this region. A closed cycle is apparent, in that dumped dredged material is transported in part back into the shipping channel, thus affecting the dredging efficiency. A loss of material due to dredging is especially apparent near the shipping channel. Accumulation or no net material transport is observed in the near shore bottom region.

Inhalt

1. Einleitung	246
2. Verfahren	246
3. Quantitative Auswirkungen morphodynamischer Prozesse im Sohlenregime der Unterelbe	
3.1 Kolk-Bank-Abfolge	247
3.2 Materialverlagerung als Schwingungsphänomen	253
3.3 Fahrwasserbaggerungen und ihre Wirkung auf die angrenzenden Flachwasserbereiche	259
4. Fazit	265
5. Schriftenverzeichnis	266

1. Einleitung

Weltweit besteht im Bereich seeverkehrsmäßig genutzter Tideästuarien das Problem, das zur Unterhaltung der seeschifftiefen Wasserstraßen ein meist enormer Aufwand an Geld und Technologie erforderlich ist, um die notwendigen Sollwassertiefen zu erhalten.

Die Schwierigkeit liegt dabei vor allem im Sandtransport, den es gilt zu beobachten und, wenn möglich, so zu beeinflussen, daß seine Wirkung für die Schifffahrt ungefährlich bleibt. Allerdings ist es bisher noch nicht gelungen, dieses Phänomen umfassend in seinen Funktionszusammenhängen und Wechselwirkungen zwischen Tidedynamik und Morphologie klarzulegen: Das morphologische Verhalten der Tideflüsse kann bisher nur über notwendigerweise lokale Beobachtungen interpretiert werden. Qualitativ wurden zwar gerade im letzten Jahrzehnt Fortschritte auch mit Hilfe von Modellversuchen erzielt, jedoch können quantitative Aussagen nur mit Einschränkungen gewonnen werden.

Diese offensichtliche Lücke zu füllen ist vorliegende Untersuchung konzipiert: Durch Verwendung vorhandener, flächendeckender Kartenunterlagen soll eine verbesserte und vor allem lokal differenzierte Aussage über quantitative Abläufe im Sohlenregime (Morphodynamik) möglich werden.

2. Verfahren

Die Untersuchung wird am Beispiel der Unterelbe durchgeführt, und zwar auf einer Strecke von rd. 50 Kilometern. Aufgrund des sehr großen Untersuchungsareals (es entspricht dem Amtsbereich des WSA Hamburg, km 689 – km 640) sind repräsentative Ergebnisse zu erwarten, während bisherige Forschungen zum Materialverhalten bzw. zur Morphodynamik durch relativ kleine Teststrecken Gefahr laufen, zur Erfassung singulärer Vorgänge zu kommen. Auch der Untersuchungszeitraum ist mit sieben Jahren, d. h. den Peilkartenjahrgängen 1972, 1974, 1977 und 1979, länger als üblich gewählt worden.

Der Begriff Kartenauswertung bedeutet hier eine Volumen-(Massen-)analyse des Raumpörpers Unterelbe, d. h. eine Analyse der quantitativen Veränderungen am Sohlenbett. Eingearbeitet in die Kartenauswertung werden die Bagger- und Verklappmengen, so daß im Hinblick auf lokale Materialumlagerungen neue Erkenntnisse örtlich differenzierter morphologischer Vorgänge gewonnen werden können. Dies soll im Unterschied zum herkömmlichen Verständnis nicht über Querschnitte erfolgen, da deren Konstruktion notgedrungen morphologische Informationen zwischen den Lageorten unterschlägt. Die gewählte Methode erfaßt das Sohlenbild flächenhaft deckend im Grundriß, womit Raumeinheiten konstruiert und ins Detail gehende Verhaltenskontrollen von Ufer- und Fahrrinnenregionen über längere Abschnitte vorgenommen werden können.

Abb. 1 gibt am Beispiel der Kilometer 657 bis 670 an, daß die getroffene Einteilung in Untersuchungsfelder pro Quadrant eine Größe von 400×1000 m aufweist. Ausgehend von der Fahrrinne mit der Feldbezeichnung F wird das gesamte Areal zwischen den KN-Uferlinien erfaßt. Darin ermittelt werden über einen elektronischen Planimeter bzw. ein digitales Bildverarbeitungsverfahren die Werte der Isobathenflächen. Durch die Verrechnung mit den jeweils zugeordneten mittleren Tiefen gelangt man zu den gewünschten Grunddaten des sogenannten „morphologischen Volumens“: Aufgrund des über die Zeit gleichbleibend gewählten Bezugshorizontes (KN) können Änderungen im Volumen des Wasserkörpers als quantitative morphologische Änderungen interpretiert werden.

Die Fehlerquote des Verfahrens beträgt nach sorgfältiger Überprüfung nicht mehr als

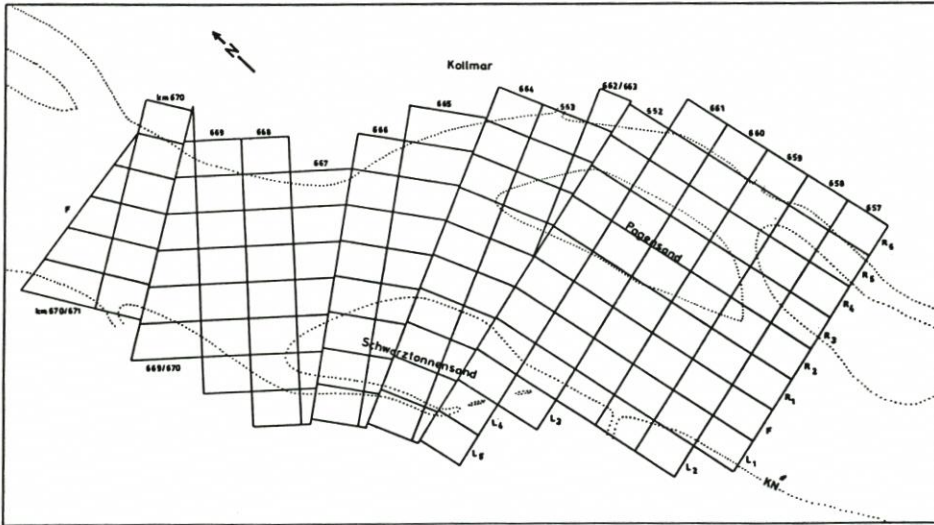


Abb. 1. Einteilung der Untersuchungsfelder im Elbabschnitt km 657 – km 670. Feldgröße jeweils 400×1000 m. F = Fahrwasserbereich, R = rechte Ufersohlenregion, L = linke Ufersohlenregion

1 %, was damit einer morphodynamischen Trendanalyse einen sehr guten Vertrauensbereich schafft.

Da die Auswertefelder in Kurvenabschnitten teilweise kleinere Flächen als 400×1000 m bedecken, trotzdem jedoch in morphologischen Trendinterpretationen von großer Bedeutung sind, ist zunächst mit den gemittelten Tiefen unter KN gearbeitet worden.

Wie die dabei insgesamt ermittelten Untersuchungsergebnisse nach Abschluß der umfangreichen Auswertungen dokumentieren können (es wurden ca. 10 000 Einzel-Volumenwerte errechnet), müssen wir in Zukunft unsere allgemeinen Vorstellungen vom sichtbaren, d. h. unmittelbar wahrnehmbaren morphologischen Gesamtbild der Unterelbe um einen nur nach Volumenanalyse im Bild der gemittelten Tiefen feststellbaren morphologischen Zustand ergänzen.

Die folgenden Abschnitte werden diese bisher unbekanntenen morphologischen Dimensionen näher erläutern sowie die Ergebnisse der quantifizierenden Sohlenanalyse im einzelnen darstellen.

3. Quantitative Auswirkungen morphodynamischer Prozesse im Sohlenregime der Unterelbe

3.1 Kolk-Bank-Abfolge

Bekannterweise tritt bei richtungskonstanten Strömungen in kohäsionslosem Bettmaterial regelmäßig eine im Längsprofil sichtbare Abfolge geringerer bzw. größerer Wassertiefen in Erscheinung. Diese als Kolk-Bank-Abfolge bezeichnete Rhythmik kann allerdings sehr unterschiedlich dimensioniert sein, von kleinsten Strömungsriffeln über Groß-Rippel bis zu ganzen Sandbank-Abfolgen. Daß auch in nicht richtungskonstanten Strömungen eines Tideflusses sich solche typischen Formenfolgen ergeben können, ist ebenfalls durch vielfache

Untersuchungen belegt (FÜHRBÖTER, 1967; DILLO, 1960, u. a.). Zum dabei in Naturmessungen registrierbaren, allerdings nicht näher untersuchten Großformenschatz gehören auch lokale Übertiefen (Kolke), die z. B. in der Unterelbe im Bereich Scheelenkuhlen gut zu beobachten sind, jedoch scheinbar keiner übergeordneten Abfolge zugerechnet werden können.

Ausgehend von letzteren, eben wenig bekannten morphologischen Erscheinungen, wird mit dem vorhergehend beschriebenen methodischen Ansatz der Versuch unternommen, einen besseren Überblick über Großformen im Sohlenregime der Unterelbe zu erhalten und, wenn möglich, über eine Zeitreihenuntersuchung Aussagen zu deren dynamischem Verhalten zu finden. Schon nach Abschluß der ersten Berechnungen stellte sich aus der lokalen Verteilung der Zahlenwerte unerwartet eine deutlich erkennbare, aber bisher unbekannte Dimension von Schwingungslagen im Sohlenlängsprofil dar: eine regelmäßige Folge von K o l k und B a n k im Längsprofil der Unterelbe, die weder den über KN aufragenden und dabei relativ stationären Sandbänken (z. B. Brammer-Bank), noch den leichter beweglichen Riesenrippeln der Fahrwassersohle zuzuordnen ist. Durch Recherchen der veröffentlichten Unterelbeliteratur sind dazu genausowenig Erkenntnisse zu erlangen wie über Durchsicht der Unterlagen des WSA Hamburg.

Es muß sich also um eine mittels herkömmlicher Methoden nicht oder nur vereinzelt (s. o. Scheelenkuhlen) feststellbare Sohlenformation handeln. Anders formuliert: In direkter Aufzeichnung (Echolot) sind diese Kolk-Bank-Abfolgen nicht differenzierbar. Sie müssen sich demnach aus dem gesamt-morphologischen Zustand des Raumkörpers unter KN zusammensetzen, einer morphologischen Einheit, die der unmittelbaren Wahrnehmung weitestgehend entzogen ist.

Zur Dimensionsbeschreibung der zu beobachtenden Makro-Folge Kolk – Bank kann ein digitales Längsprofil der mittleren Tiefen unter KN des ausgewerteten Peiljahres 1979 dienen.

Abb. 2 macht deutlich, daß sich aus der flächenhaften Berechnung eine Größenordnung

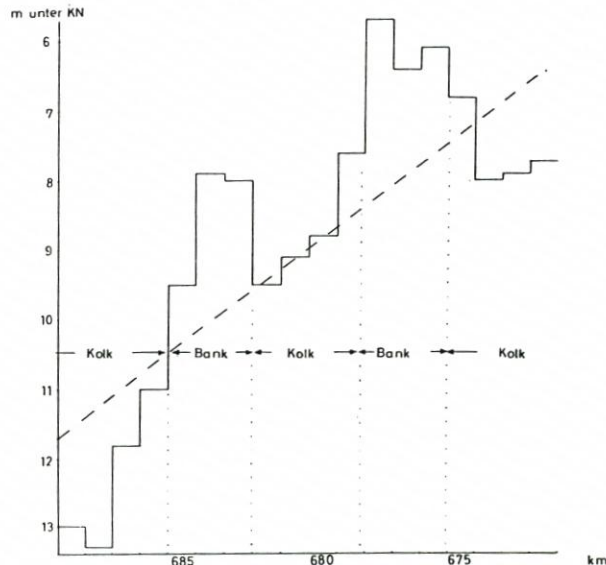


Abb. 2. Digitales Längsprofil der mittleren Tiefen unter KN, km 689 – km 672 (km-Querschnitte, Peiljahr 1979, nach Auswertung der Tiefenkarten der Unterelbe)

der Bänke von rd. 3 km Längserstreckung und ca. 4 m Höhe herausbildet. Damit unterscheiden sie sich signifikant von den ihnen aufgesetzten Riesenrippeln, deren \varnothing Länge 50 m und \varnothing Höhe 2,5 m beträgt. Interessanterweise bleibt die Lage dieser Kolk-Bank-Abfolge über die Zeit relativ stabil: Sowohl 1972, 1974, 1977 als auch 1979 kann bis auf Feinheiten eine identische Aneinanderreihung ermittelt werden.

Da die Längsprofil-Abfolge der gemittelten Tiefen sowohl im rechten Uferbereich R, im Fahrwasser F und auch im linken Ufersohlenbereich L jeweils gleichermaßen auf Kolk- bzw. Bank-Bereich hinweisen, kann keine alleinige Ursache in den sichtbaren (über KN aufragenden) Sandbänken, Freiburg-Bank und Brammer-Bank, gesehen werden.

Interessant ist denn auch, daß sich ebenfalls im gebaggerten Fahrwasser die Tiefenunterschiede erhalten: Die Unterhaltsbaggerungen wirken also keineswegs einebnend bzw. nivellierend im Sinne einer durchgehend identischen Wassertiefe unter KN.

Auch im Bereich km 674 bis km 657, d. h. im stromauf anschließenden Untersuchungsgebiet, ergibt sich im digitalen Längsprofil der gemittelten Tiefen eine Kolk-Bank-Abfolge.

Wie Abb. 3 für das Jahr 1979 zeigt, ändern sich jedoch Frequenz und Amplitude: Während km 689 bis km 675 rd. 3 km Bank auf 4 km Kolk folgen, sind die Verhältnisse hier

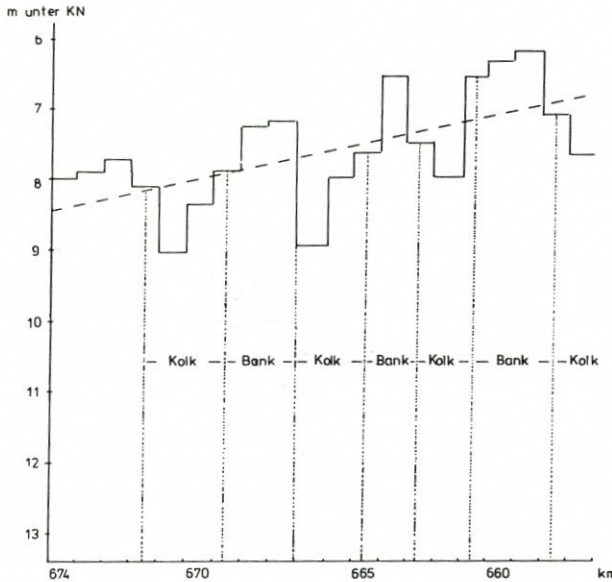


Abb. 3. Digitales Längsprofil der mittleren Tiefen unter KN, km 674 – km 657 (km-Querschnitte, Peiljahr 1979)

differenzierter zu sehen. Es ergibt sich nämlich eine Abnahme der Kolk-Längserstreckung von rd. 3 km auf 2 km, während die Längserstreckung der Bänke im Vergleich zu km 689 bis km 675 zwar auch abnimmt, jedoch weniger kontinuierlich. Ihre mittlere Länge ist bei rd. 2,5 km anzusetzen. Ebenso sinkt die mittlere Höhe der Bänke von rd. 4 m in den km 689–675 auf rd. 2 m in diesem Bereich ab. Entsprechend ist die mittlere Tiefenabnahme ab km 674 stromauf deutlich geringer als im mündungsseitig anschließenden Abschnitt: Während dort die Steigung (1979) 0,3% beträgt, liegt sie ab km 674 stromauf nur noch bei 0,08%.

Unter Berücksichtigung der bisher nicht dargestellten Kilometer 656–640 ergibt sich in der zusammenfassenden Betrachtung des digitalen Längsprofils der gemittelten Tiefen ein

überraschendes Bild, das sonst aus keinem unmittelbar gemessenen Echolotprofil erkennbar wird: Es zeigen sich drei in etwa gleich große Abschnitte der Unterelbe, die jeweils einen charakteristischen Wechsel von Kolk und Bank aufweisen. An ihrem jeweiligen Kamm besitzen diese Abschnitte einen regelrechten Profilsprung, in dessen Anschluß es zu einem vergleichsweise moderaten Sohlenanstieg kommt. Die „Absturz“-Höhe beträgt in allen Fällen ca. 3 m der gemittelten Tiefen. Die Kammhöhen, d. h. die Abschnitte geringster mittlerer Tiefe unter NN, sinken dabei stromauf leicht von 6,9 m (km 678) über 7,3 m (km 659) auf 7,4 m (km 641) ab.

Mit Blick auf die abnehmende Steigung der gemittelten Tiefen ergibt sich ein Trend zur stromauf reduzierten Sohlenneigung.

Die sich herauskristallisierenden, deutlich getrennten Sohlenabschnitte

1. km 689–km 675
2. km 674–km 657
3. km 656–km 640

müssen jeweils als Bank, in diesem Fall als „Super“-Bank aufgefaßt werden. Ihr flacher Anstieg verläuft stromauf und bricht mit einem Steilhang ab. Die Amplitude nimmt stromauf von rd. 6,5 m auf rd. 2,5 m ab, die Wellenlänge beträgt durchgehend rd. 16 km.

Die gedanklich wie labormäßig von Physikern und Wasserbauingenieuren entwickelten Theorien zwischen Schubspannung, Fließgeschwindigkeit und Sohlenform müssen bei den in dieser Untersuchung gewonnenen neuen Erkenntnissen über enorm große Wellenlängen von Strombänken allerdings versagen. Aber auch ohne direkte physikalische Definition wird im Überblick klar, daß es sich nur um eine allgemeine Gesetzmäßigkeit handeln kann: Von Kleinstrippeln bis zu „Super“-Bänken besteht ein kontinuierlicher Übergang, der alle Dimensionen von Sand-Wellenbildungen in der Unterelbe miteinander verbindet.

Bislang mit größerer Genauigkeit untersucht sind allerdings nur jene Formen, die bis zur Gruppe der „Riesenrippeln“ gehören. Darüber hinausgehende Untersuchungen in Richtung von Groß- und Größtformen der Wellenbildung sind für Tideästuarien unbekannt. Wie erwähnt, sind ausschließlich qualitative Aussagen zu unmittelbar wahrnehmbaren, d. h. über KN aufragenden Sandbänken zu finden (z. B. SCHULZ, 1954).

Es stellt sich nunmehr die Frage nach den Ursachen, die zu diesem charakteristischen Sohlenbild geführt haben. Dabei drängt sich die z. Zt. nicht zu verifizierende Vermutung auf, daß die zu beobachtenden Schwingungsfolgen jeweils übergeordneten „inneren“ Impulsen zugezählt werden können. Die Lage der „Super“-Bänke beispielsweise scheint nach Abb. 6 auch in historischer Zeit ähnlich existiert zu haben, was darauf hinweist, daß diese Form einem langfristig weitgehend unverändert gebliebenen Einfluß zuzuschreiben sein muß.

Welcher Art eine endgültige Deutung sein wird, muß momentan noch offen bleiben.

Registriert werden kann formal nur ein sicherlich rein physisch bedingter Prozeß, der als Ausschwingen der Kolk-Bank-Abfolge bezeichnet werden soll. Die Frequenz nimmt dabei stromauf von 4 km Länge Kolk und 3 km Länge Bank (km 689 – km 675) auf 1,5 km Länge Kolk und 2 km Länge Bank (km 656 – km 640) kontinuierlich ab.

Ebenfalls sinkt die Amplitude von 4 m Höhe der Bänke (km 689 – km 675) auf 1 m Höhe (km 656 – km 640) ab.

Die Abb. 6 gibt jedoch auch einen Hinweis auf wasserbauliche Beeinflussung der sohlenmorphologischen Großformen: Die rezente Kammhöhe der „Super“-Bänke sinkt stromauf ab, während sie vor Beginn der allgemeinen Stromregulierung stromauf ansteigt. Es kann nach Prüfung der vorhandenen Unterlagen davon ausgegangen werden, daß diese historisch bekannten Untiefen im Streckenverlauf der Unterelbe mit zunehmender Sollwasser-

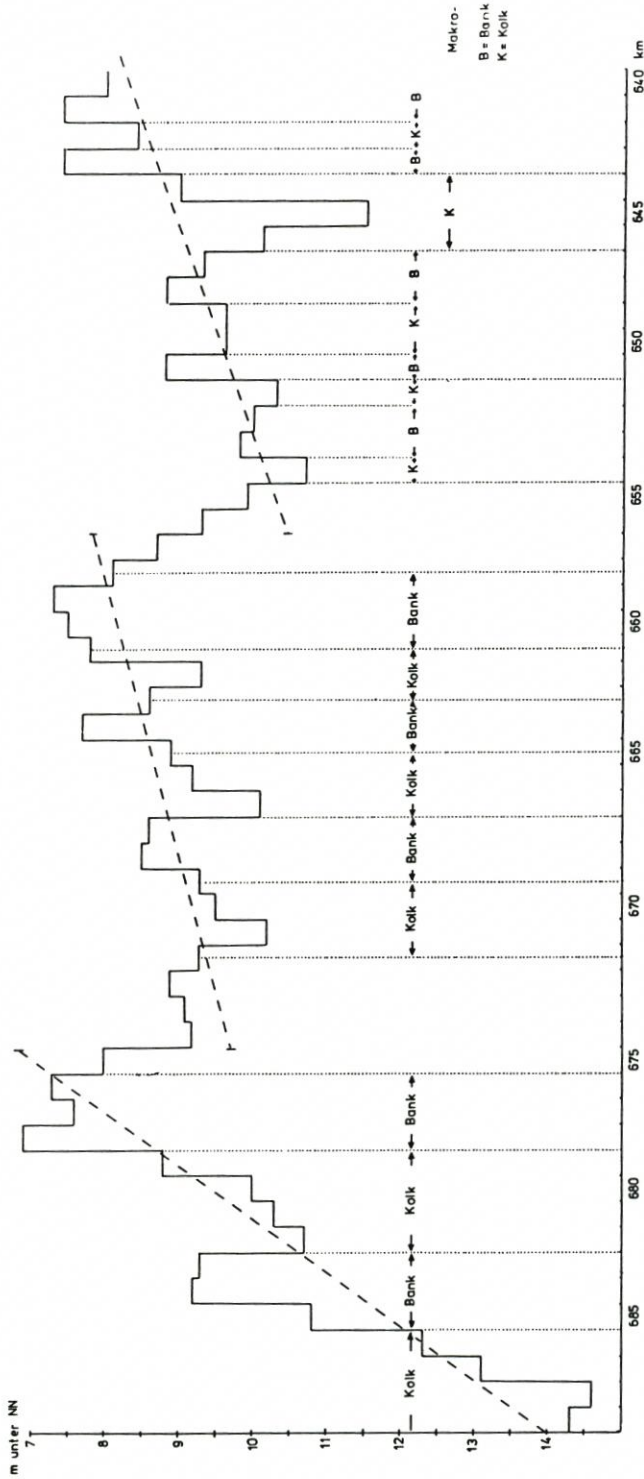


Abb. 4. Digitales Längsprofil der mittleren Tiefen unter NN, km 689 - 640 (km-Querschnitte, Peiljahr 1979)

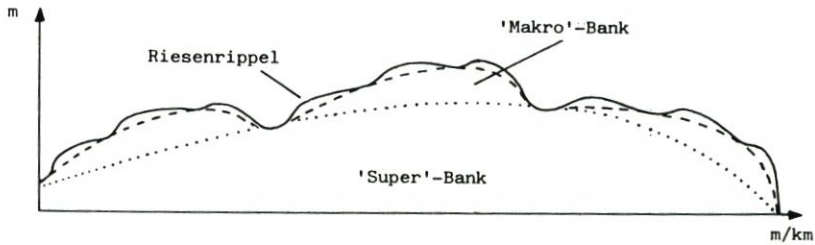


Abb. 5. Dimension von Sandwellen in der Unterelbe (schematisch)

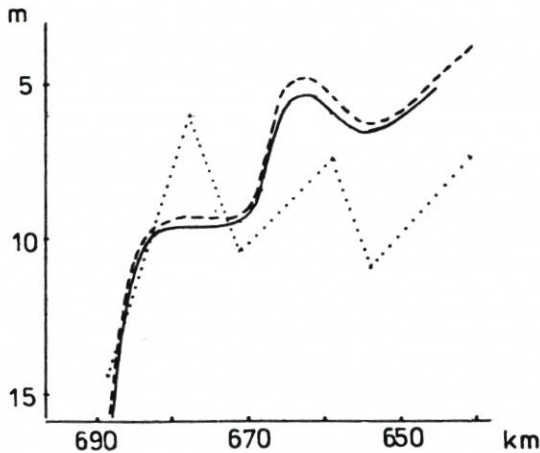


Abb. 6. Fahrwassertiefe der Unterelbe nach --- SÖRENSEN (1695), — BEAUTEMPES-BEAUPRÉ (1812), ···· mittlere Tiefe unter NN schematisch nach Abb. 4

Tab. 1. Mittlere Höhe und Länge der Kolke und Bänke nach Interpretation des digitalen Längsprofils der km-Querschnitte der Unterelbe km 689 – km 640

	mittlere Länge Kolk in km	mittlere Länge Bank in km	mittlere Höhe Bank in m	Länge des Abschnitts in km
km 689 – km 675	4	3	4	14
km 675 – km 657	3 – 2,5	2,5	2	18
km 656 – km 640	1,5	2	1 – 1,5	16

tiefe tendenziell abgebaggert worden sind. Dennoch darf die Wirksamkeit des Baggerbetriebes nicht überschätzt werden: Trotz gewaltiger Massenbewegungen und Stromkorrekturen in Form von Fahrrinnenbegradigungen bzw. Kurvenausbauten bleibt eine eigenständige, weitgehend unbeeinflussbare Morphodynamik erhalten. Die beispielhaft für den Jahrgang 1979 dargestellten gemittelten Tiefen mit ihrer charakteristischen Abfolge sind in allen untersuchten Jahren (1972, 1974, 1977) im wesentlichen genauso vorhanden. Die Lage der Kolke und Bänke ist praktisch festgeschrieben; eine Veränderung der relativen Abfolge kann nicht erkannt werden.

Die Wirkung des Baggerbetriebes, zumal auf die Fahrrinne beschränkt, kann nur als ausgleichend auf krasse Untiefen bezeichnet werden.

3.2 Materialverlagerung als Schwingungsphänomen

Es ist jedoch ein Trugschluß zu glauben, der Baggereingriff und das im Großformenbild sich darstellende Beharrungsvermögen der Kolk-Bank-Abfolge auf gleichbleibender Position seien Ursache bzw. Indiz für eine geringfügige Morphodynamik. Ganz im Gegenteil wird die statische Position der Großformen trotz laufender Unterhaltungsbaggerungen *überlagert* von gerichteten Tendenzen einer Bewegung relativer Erosions- und Akkumulationszonen, d. h., dieses über Zeit und Raum ablaufende Phänomen *überwandert* die sichtbaren Kolk- wie Bankbereiche gleichermaßen regelmäßig. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen, wie man sich diesen Vorgang vorzustellen hat: Eine Akkumulationszone, beispielsweise 1972–1974 noch im Kilometer 679 gelegen, erweitert sich 1974–1977 stromauf bis zum Kilometer 678 und verschiebt sich 1977–1979 auf Kilometer 676, wobei in Kilometer 679 bereits wieder Erosion eingesetzt hat. 1972–1974 wie auch in den folgenden Zeiträumen befindet sich jeweils im stromaufwärts anschließenden Kilometerabschnitt einer Erosionszone ein Akkumulationszentrum. Die Vermutung liegt nahe, daß es sich bei letzteren um die Auffanggebiete der stromab (benachbart) erodierten Materialmengen handeln könnte. Der in diesen Abbildungen besonders deutlich erkennbare Ablauf ist dabei offenbar vollkommen unabhängig von der

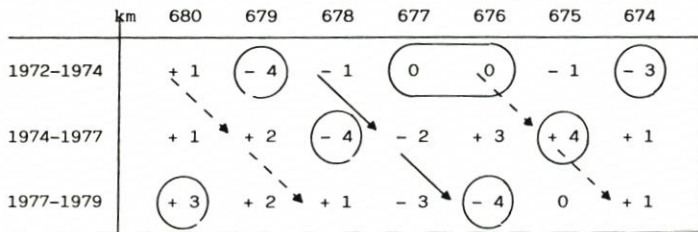


Abb. 7. Verlagerung der Schwerpunkte mittlerer Tiefenänderung unter KN. ○ = relatives Maximum (Angaben in dm)

Großform „Kolk“ oder „Bank“. Beide werden unterschiedslos sowohl von Erosions- wie Akkumulationszentren überwandert.

Besonders hervorgehoben werden soll noch einmal: Dadurch werden Kolke wie Bänke in ihrer Lage und Abfolge *nicht* verändert, außer vergleichsweise geringfügig in ihrer momentanen Höhe bzw. Tiefe zu Kartennull bzw. NN.

Zur Verdeutlichung der Hypothese vom „stromaufwärts gerichteten Verlagerungstrend erosiver und akkumulativer Sohlenbereiche“ soll weiterhin der Elbabschnitt km 687 bis km 680 in differenzierter Darstellung vorgestellt werden: Im Strombereich L der Kilometer 687–680, d. h. im linksseitig an das Fahrwasser anschließenden Sohlenregime, verlagert sich nach Abb. 9 vom Zeitraum 1972/1974 bis zum Zeitraum 1977/1979 jeweils das Maximum von Tiefenzunahme unter KN wie auch das Maximum der Tiefenabnahme unter KN stromauf. Von Kilometer 687 mit + 2,3 % Zunahme der mittleren Tiefe als relativem Maximum im Zeitraum 1972–1974 bewegt sich diese Sequenz über + 13,3 % bei Kilometer 686 bis zu + 8,8 % Zunahme der mittleren Tiefe als relativem Maximum im Kilometer 685 des Zeitraums 1977–1979. Gleichartig ist das Bild für die maximale Tiefenabnahme unter KN. Diese Bedingungen gelten ebenso auch für den Strombereich R. Für den Fahrwasserabschnitt F sind aufgrund der ständigen Unterhaltungsbaggerungen die Zonen der Tiefenabnahme verständlicherweise so gut wie kaum oder undeutlich ausgebildet.

Von Bedeutung ist, daß nach Abb. 10 die Verlagerungsgeschwindigkeit im Fahrwasserbereich (also dem Bereich größter Strömungsgeschwindigkeiten) am schnellsten verläuft, wäh-

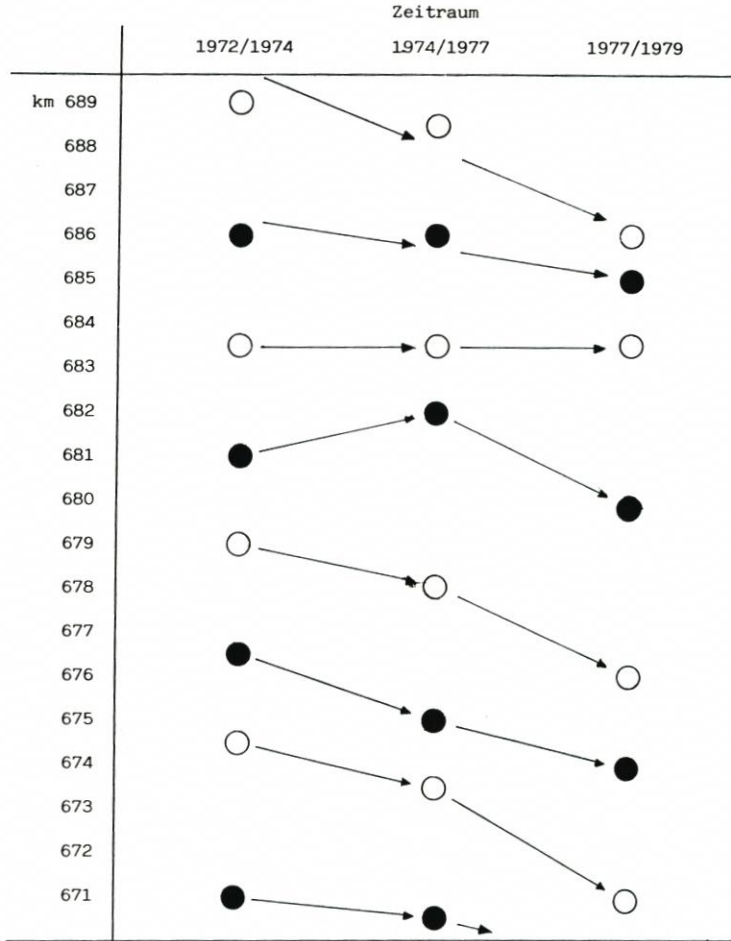


Abb. 8. Verlagerung der Schwerpunkte mittlerer Tiefenänderung unter Kartennull (km-Querschnitte). ● = relative Maxima Zunahme der mittleren Tiefen u. KN, ○ = relative Maxima Abnahme der mittleren Tiefen u. KN

rend die Uferregionen geringere Raten aufweisen. Für den Gesamtuntersuchungsraum ist eine mittlere Fortschrittsgeschwindigkeit von

1,1 km pro Jahr im Fahrwasser und
0,6 km pro Jahr in den Ufersohlenbereichen

festzustellen.

Damit schreiten die großräumigen Bewegungsvorgänge der Kilometer 689 bis 640 im Fahrwasser rd. doppelt so schnell voran wie in den Uferbereichen. Damit wird aber gleichzeitig offenkundig, daß auch bei herabgesetzten Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich links und rechts der Fahrrinne beachtliche Materialumlagerungen stattfinden müssen.

Die durchaus naheliegende Spekulation über eine Nivellierung der Fahrwasser-sole durch Baggerungen gilt nicht: Relative Unterschiede der Erosionsvorgänge bleiben ebenso wie in den Ufersohlenregionen sichtbar. Die offenbar in Pulsationsform ablaufenden

Bereich und Zeitraum

km	L			F			R		
	74/77			74/77			74/77		
	72/74	77/79	77/79	72/74	77/79	72/74	77/79	72/74	77/79
687	+2,3	+1,1	+1,1	+0,7	+3,3	+2,6	+7,7	-0,9	+17,1
686	± 0	+13,3	-5,3	+0,7	+3,4	+0,7	+30,3	+4,0	-1,0
685	-5,8	+4,6	+8,8	+2,0	+3,9	-2,5	+11,0	+5,5	-3,1
684	-10,5	-2,0	-4,0	± 0	+3,3	-1,3	+2,6	+3,8	± 0
683	-3,2	-8,2	-3,6	+0,7	+8,3	-11,5	-3,9	+6,8	-1,3
682	-1,4	+2,8	-1,4	± 0	+10,2	+4,9	-1,4	+5,7	+4,1
681	+4,4	± 0	-4,2	+4,8	+7,8	+4,8	+5,2	-2,6	+8,0
680	± 0	+1,7	+1,7	+0,7	+2,6	+7,7	-2,4	-1,2	-1,2

Abb. 9. Veränderungen der mittleren Tiefen unter KN in %. ⊙ relatives Zentrum der Akkumulation, ⊕ relatives Zentrum der Erosion

Bewegungsvorgänge sind selbst von Vertiefungs-baggerungen des Zeitraums 1974–1977 kaum beeinflusst. Ihre Rhythmik bleibt erhalten und wird vermutlich auch durch wesentlich verstärkte Baggerleistungen in der Dynamik nicht zu stoppen sein.

Nun ist es eine logische Konsequenz, daß mit Verlagerung der zunächst rein beschreibend „Erosions“- bzw. „Akkumulationszentren“ genannten Prozessfelder auch ein Materialtransport verbunden sein muß. Wie zuvor bereits angedeutet, könnte es dabei im Sinne der Abb. 11 zu einer Bewegung von Material stromauf kommen: Stromab gelegene Erosionszonen verlieren Substanz an stromauf befindliche Akkumulationszonen. Da die geschilderten Vorgänge kontinuierlich fortschreiten, muß es nach einer definierten Zeitspanne dazu führen, daß zuvor in einem Akkumulationszentrum abgesetztes Material von einer nach-eilenden Erosionszone eingeholt und erneut in Bewegung gebracht wird.

Generell ist für alle Dimensionen von Riffeln, Rippeln oder Bänken bekannt, daß der Hauptmaterialtransport in Richtung ihres flachen Anstiegs erfolgt. Es ist damit sehr wahrscheinlich, daß beide in dieser Untersuchung für die Unterelbe näher bekannt gewordenen Großformen von Bänken als flutstromorientiert zu gelten haben: flacher Luvhanganstieg mit steilem, stromauf abbrechendem Leehang. Die Verlagerung von Erosions- und Akkumulationszentren stromauf stimmt mit diesem Bild überein. Ein krasser Gegensatz ergibt sich allerdings zu der Gruppe der „Riesenrippeln“: Sie sind mehrfach von NASNER, 1974, VOLLMERS und WOLF, 1969, u. a. eindeutig als sich stromab bewegende Gebilde identifiziert worden. Ihre Form unterstützt dies ebenso (Leehang stromab). Für diese zunächst miteinander unvereinbar erscheinenden Fakten kann zur Zeit keine eindeutige Erklärung gegeben werden, denn die Widersprüche deuten an, daß es offensichtlich einige unbekannte Größen gibt, die ein klares Bild der Morphodynamik verhindern. Zur Sinnfindung seien die für die Unterelbe bekannten und gesicherten Tatsachen kurz aufgeführt:

1. Materialtransport stromauf durch Geschiebebewegung (MUNDSCHENK, 1979)
2. Materialtransport durch a) Suspensions- und b) Geschiebetransport, wobei a) überwiegend ebstrom- und b) flutstrom wirksam ist (LUCHT, 1953)

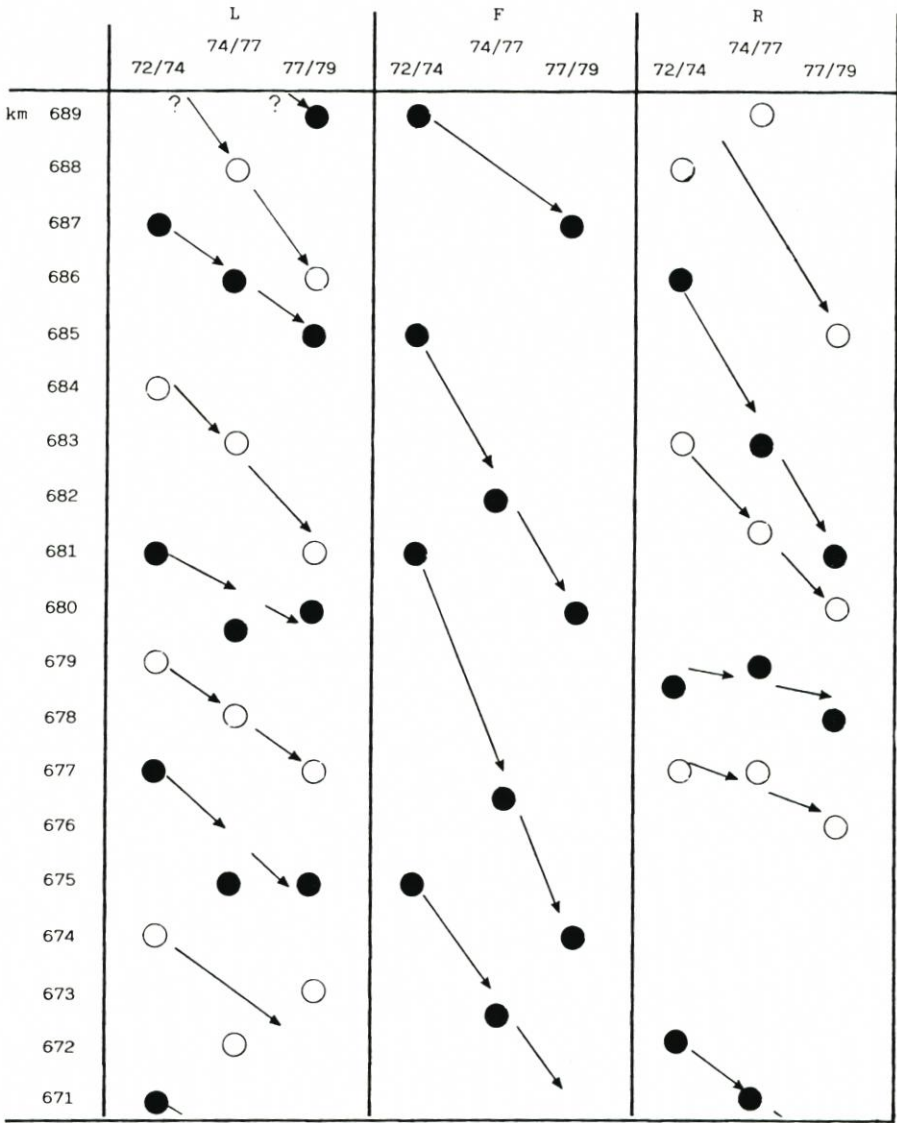


Abb. 10. Zeit-Weg-Diagramm für die Verlagerung relativer Zentren mittlerer Tiefenänderung unter KN

● = Tiefenzunahme
○ = Tiefenabnahme

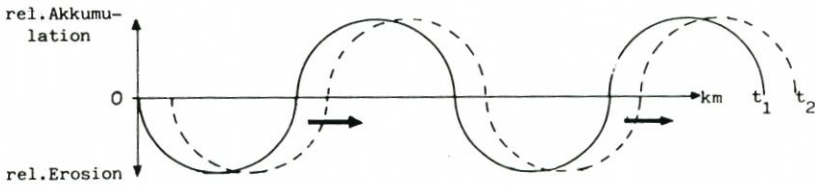


Abb. 11. Schematisierte Darstellung des Materialtransports durch stromaufwärts wandernde Erosions- und Akkumulationszentren. --- Erosionszone, — Akkumulationszone (jeweils zum Zeitpunkt t_1 und t_2)

3.3 Fahrwasserbaggerungen und ihre Wirkung auf die angrenzenden Flachwasserbereiche

Von Interesse ist nunmehr, wie sich eine mögliche Materialumlagerung im flächenhaften Querprofil verteilt. Dazu werden Änderungstrends im morphologischen Volumen über die Zeit je Längsprofilreihe (siehe Abb. 1) aufgetragen. Tab. 2 gibt die Ergebnisse für den Bereich der Kilometer 689 (St. Margarethen) bis 671 (Rhinplatte Süd) wieder. Man erkennt zwei Dinge besonders deutlich:

1. In Abhängigkeit von der Baggermenge (Tab. 3) nimmt der prozentuale Anteil an Erosion im Fahrwasser zu bzw. ab.
2. Nur im Zeitraum 1974-1977 ist bei sehr hoher Baggermenge und damit „Erosion“ im Fahrwasser auch Materialverlust (Erosion) in allen Ufersohlenregionen zu beobachten. Ausgehend von der Stärke des Baggereingriffs in F, scheint von dort also eine Wirkung auf den morphologischen Verhaltenstrend der Ufersohlenregionen auszugehen.

Im stromauf anschließenden Streckenabschnitt Kilometer 673-659 (Bielenberg-Grauerort) ist dies zuvor noch sehr klare Bild differenzierter zu sehen (siehe Tab. 4 und 5):

1. Es kommt wiederum die Wirkung des über die Zeit unterschiedlich starken Baggereingriffs zum Ausdruck. Im Zeitraum 1972-1974 ist auch in F bei geringen Entnahmemengen eher Akkumulation als Erosion zu erkennen, während sowohl 1974-1977 als auch 1977-1979 bei hohen Baggermengen klar „Erosion“, d. h. Zunahme im morphologischen Volumen, auftritt.
2. Die Ufersohlenregionen zeigen bei einem großen Anteil der Volumenzunahme in F (durch Baggerungen) nur in den unmittelbar links und rechts an diesen Bereich anschließenden Längsprofilzonen Erosion, keineswegs jedoch über den Gesamtstreckenquerschnitt.

Tab. 2. Anteil der Längsprofilfelder km 689 - km 671 am Trend der Veränderung der mittleren Tiefen unter KN in %. E = Erosion (Werte in % pro Bereich und Zeitraum), A = Akkumulation (Werte in % pro Bereich und Zeitraum), N = neutral bzw. ohne Veränderung (Werte in % pro Bereich und Zeitraum), ○ = relatives Maximum je Längsprofilbereich und Zeitraum

Zeitraum	Längsprofilbereich							Verhalten
	L ₃	L ₂	L ₁	F	R ₁	R ₂	R ₃	
1972-1974	19	31	21	58	26	33	10	E
	50	53	68	21	53	44	50	A
	31	16	11	21	21	23	40	N
1974-1977	47	84	47	89	68	55	60	E
	29	10	42	11	32	5	10	A
	24	6	11	--	--	40	30	N
1977-1979	11	39	21	63	42	28	40	E
	50	42	53	37	47	61	60	A
	39	19	26	--	11	11	--	N

Tab. 3. Baggermengen in „F“ km 689 – km 674 im Zeitraum 1972 bis 1979 (Angaben nach Auswertung von Unterlagen des WSA Hamburg)

Zeitraum	Kilometer	Baggermengen in m ³	
		Einzelabschnitte	Gesamt
1972-1974	689-684	190.386	674.295
	683-679	156.201	
	678-674	327.708	
1974-1977	689-684	1.080.819	4.787.194
	683-679	1.194.976	
	678-674	2.511.399	
1977-1979	689-684	538.426	1.541.890
	683-679	186.700	
	678-674	816.764	

Tab. 4. Anteil der Längsprofilfelder km 673 – km 659 am Trend der Veränderung der mittleren Tiefen unter KN in %. E = Erosion (Werte in % pro Bereich und Zeitraum), A = Akkumulation (Werte in % pro Bereich und Zeitraum), N = neutral bzw. ohne Veränderung (Werte in % pro Bereich und Zeitraum), ○ = relatives Maximum je Längsprofilbereich und Zeitraum

Zeitraum	Längsprofilbereich										Verhalten
	L ₅ -L ₄	L ₃	L ₂	L ₁	F	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄ -R ₅		
1972-1974	20	20	24	36	24	59	13	12	23	E	
	27	30	53	58	41	35	73	44	47	A	
	53	50	33	6	35	6	14	44	30	N	
1974-1977	--	11	53	47	88	88	33	44	29	E	
	33	45	12	35	--	6	40	22	47	A	
	67	44	35	18	12	6	27	34	24	N	
1977-1979	20	30	35	71	82	29	27	33	29	E	
	--	20	42	12	6	59	46	44	18	A	
	80	50	23	17	12	12	27	23	53	N	

Tab. 5. Baggermengen zwischen 1972 und 1979 (Werte in m³) (Nach Auswertung von Unterlagen des WSA Hamburg)

	Zeitraum			
	1972-1974	1974-1977	1977-1979	
km 673 – 669	412.402	3.245.642	2.064.024	
km 668 – 664	183.672	1.590.575	760.680	
km 663 – 659	304.100	555.366	1.267.873	
	900.174	5.391.583	4.092.577	km 673 – 659

3. Materialtransport stromauf durch Verlagerung von Erosions- und Akkumulationszentren (nach Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung)
4. bei hohem Oberwasser verminderte Baggermengen, was auf (geminderte) Materialbewegung mit dem Flutstrom schließen läßt (ROHDE, 1967)
5. rezente Foraminiferenfunde im Hamburger Hafen, d.h. mit dem Flutstrom von See transportiertes Gut (NÖTHLICH, 1967)
6. Materialtransport stromab in Form von Riesenrippeln (NASNER, 1974/1975/1977; VOLLMERS und WOLF, 1969).

Der letzte Punkt (6) ist, wie erwähnt, schwer mit den übrigen in Einklang zu bringen.

Zusammenfassend läßt sich jedoch sagen, daß ein Materialtransport in der Unterelbe in zwei voneinander zu unterscheidenden Transportrichtungen und -arten ablaufen könnte:

1. Eine pulsationsartige Materialbewegung findet in Form von relativ langsam (0,6-1,1 km pro Jahr) stromaufwärts wandernden Erosions- und Akkumulationszonen statt. Elbmündungsseitig zugeführtes Material würde somit abwechselnd akkumuliert und erodiert. Auf diese Weise geschähe eine Verlagerung stromauf schubweise bzw. phasenhaft: Ein idealisierter Materialkörper, welcher der Unterelbe zugeleitet würde, müßte sich nach Ablagerung innerhalb einer Akkumulationszone dort solange aufhalten, bis eine stromaufwärts wandernde Erosionszone ihn erfassen und erneut seinen Transport in ein stromauf gelegenes Akkumulationszentrum verursachen würde. Sichtbar wird dieser Vorgang in der Form bzw. Orientierung von langfristige gebildeten, offensichtlich kaum beweglichen „Makro“- und „Super“-Bänken, deren Leehang stromauf gerichtet ist. Die stromaufwärts wandernden Erosions- und Akkumulationszonen zeigen dabei ein Nacheinander, das eine regelhafte Ordnung ergibt. Daraus lassen sich Ansätze für morphologische Prognosen ableiten.
2. In Form wandernder Riesenrippel-Körper findet ein Sandtransport stromabwärts statt, wobei dort die Materialbewegung offenbar direkt vom Ebbstrom abhängig ist (es sei dazu auf die Arbeiten von DILLO [1960], FÜHRBÖTER [1967] und NASNER [1974] verwiesen). Dies ergibt sich auch aus der Geschwindigkeit dieser Körper, die nach VOLLMERS und WOLF (1969) mit zunehmender Oberwasserführung ansteigt.

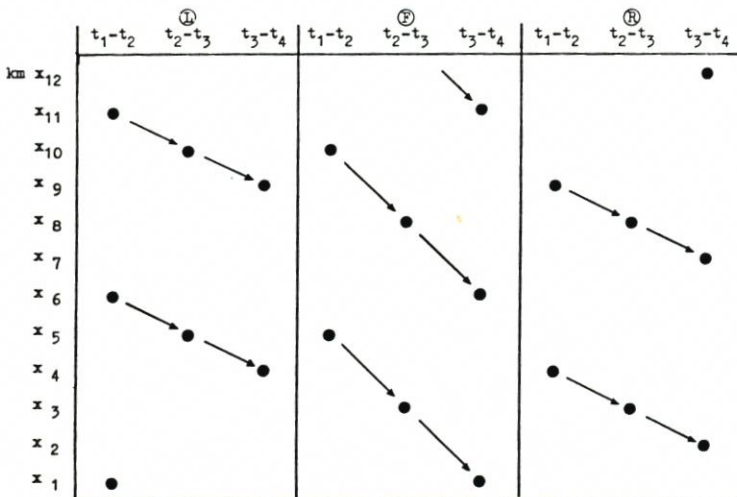


Abb. 12. Zeit-Weg-Diagramm für die Verlagerung relativer Zentren mittlerer Tiefenänderung unter Kartennull. Erstellt nach fiktiven Werten. ● = Tiefenzunahme

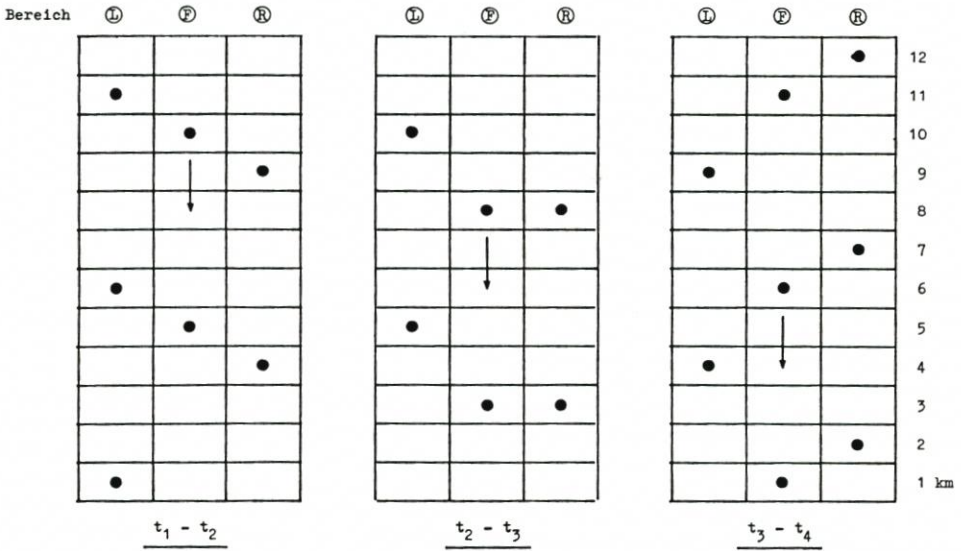


Abb. 13. Schematisierte Darstellung von stromaufwärts gerichteten Verlagerungstendenzen der Haupterosionszentren (●) im Unterelbebereich

Eine weitere Aufbereitung der dargestellten Erkenntnisse und Hypothesen wäre von sehr hoher praktischer Bedeutung: Bei einer Möglichkeit der Vorhersage der natürlichen Verlagerung von Erosions- und Akkumulationsneigungen können durch wasserbauliche Maßnahmen kurz- wie langfristiger Art entsprechend den Erfordernissen vorgebeugt und ungünstige Entwicklungen u. U. vermieden werden. So ist es z. B. außerordentlich nützlich zu wissen, an welchen Stellen Verklappungen ohne Gefährdung der Solltiefen vorgenommen werden oder Sandentnahmen sinnvoll natürliche Tendenzen unterstützen können.

Eine morphodynamische Prognose ist aber nur bei genauem Verständnis der Verlagerungsmechanismen erosiver bzw. akkumulativer Zentren möglich. Zu einer Teillösung des übergeordneten Problems sollen die Abbildungen 12 und 13 dienen:

Eine fiktive Darstellung von Erosionszentren mit der Frequenz 5 km in L, F und R gibt die Grundwerte für eine schematische Darstellung der Grundprinzipien von stromaufwärts gerichteten Verlagerungsbewegungen an. Die Geschwindigkeit ist dabei im Fahrwasser F doppelt so hoch angesetzt wie in den Uferbereichen.

Es ergibt sich ein Gesamtbild, das die Ergebnisse der faktischen Untersuchung recht genau wiedergibt:

a) Die relative Lage der Erosionszentren zueinander ist über die Zeit nicht gleichmäßig, sondern durch die doppelt so große Verlagerungsgeschwindigkeit der Erosionsmaxima von F zu R und L gegeneinander verschoben.

b) Die relativen Maxima aus R und L bleiben über die Zeit praktisch immer in versetzter Position zueinander, da ihre Verlagerungsgeschwindigkeit stromauf annähernd gleich ist. Dies alles geschieht vermutlich im Zusammenhang mit dem Flutstrom. Nochmals soll aber auf die in Kontrapunktion stehende Wanderung der Riesenrippeln, und mit ihnen von Material, stromab hingewiesen werden. Diese Bewegung ist unmittelbar nachzuweisen (durch Tracer- und Luminophorenuntersuchungen), was für die aktuelle Verlagerung von Material durch Erosions- und Akkumulationszentren noch aussteht.

Tab. 6. Anteil der Längsprofilfelder des linken Strombereichs km 673 – km 659 am Veränderungstrend der mittleren Tiefen unter KN in % während des Zeitraums 1977–1979 (Ausschnitt aus der Tab. 4)

	L ₅ -L ₄	L ₃	L ₂	L ₁	F
Zunahme	20	30	35	71	82
Abnahme	--	20	42	12	6
± 0	80	50	23	17	12

3. Am Beispiel des herausgegriffenen Zeitraums 1977–1979 (siehe Tab. 6) kommt im linken Ufersohlenbereich sehr typisch ein ebenso bei anderen Streckenabschnitten und Auswertzeiten auftretendes Phänomen zum Ausdruck:

- Je weiter man sich vom Fahrwasser in Richtung Uferlinie bewegt, desto schwächer wird der Erosionsanteil.
- Je weiter der Abstand vom Fahrwasser ist, desto stärker wird der Anteil an neutralem, unverändert gleichbleibendem Sohlenverhalten.
- Akkumulation tritt überwiegend auf halbem Wege zwischen Fahrwasser und Uferlinie in Erscheinung.

Die Gliederung findet man im Prinzip in allen Zeiträumen und auch in den stromauf gelegenen Streckenabschnitten; der Vorgang wird nur durch die Stärke der Volumenänderung bzw. den Baggerumfang in F variiert.

Bei zusammengefaßter Betrachtung des Gesamtzeitraums 1972–1979 und der Gesamtstrecke zwischen St. Margarethen und Schaulau (Tab. 7) kommt dies noch einmal exemplarisch zum Ausdruck:

Mit zunehmender Entfernung von der Strommitte (F)

- sinkt der Anteil der von Erosion betroffenen Sohlenbereiche stark ab,
- steigt die Neigung zu „neutralem“, d. h. gleichbleibendem Verhalten bemerkenswert an,
- ist die Akkumulation mit einem relativen Maximum auf halber Strecke zwischen Fahrwasserrand und Uferlinie vertreten.

Tab. 7. Anteil der Längsprofilfelder km 689 – km 640 am Trend der Veränderung der mittleren Tiefen unter KN in % während des Gesamt-Untersuchungszeitraums 1972–1979 (Legende siehe Tab. 4)

Zeitraum	Längsprofilbereich							Verhalten
	L ₅ -L ₃	L ₂	L ₁	F	R ₁	R ₂	R ₃ -R ₆	
1972–1979	22	40	49	76	53	30	29	E
	38	37	39	14	36	45	36	A
	40	23	12	10	11	25	35	N

Es stellt sich nun zwangsläufig die Frage nach den dabei umgesetzten Materialmengen. Dank der sehr differenzierten quantitativen Sohlenanalyse sowie den bekannten Massenangaben aus Baggerungen und Verklappungen ist es möglich, etwas über die Materialbilanz sowohl regional als auch für den Gesamtbereich auszusagen.

Tab. 8 macht deutlich, daß in der Tat auch die unmittelbar links und rechts der Fahrrinne umgesetzten Materialmengen Erosion belegen, während darüber hinaus Richtung Uferlinie

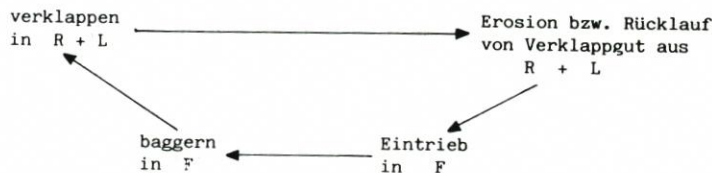
akkumuliert wird bzw. an der Uferlinie selbst nur noch sehr geringe Materialquantitäten bewegt werden. In F differiert die tatsächliche Zunahme des morphologischen Volumens (27,8 Mill. m³) allerdings von der Baggermenge (33,0 Mill. m³). Daraus ergibt sich ein Materialeintrieb in F (5,2 Mill. m³), welcher sicherlich zum Teil aus dem erodierten Gut der Längsprofilbereiche R₁ bzw. L₁ stammen dürfte. Die insgesamt links und rechts der Fahrrinne zu registrierende Erosion (9,2 Mill. m³) wird jedoch durch die ufernahen Akkumulationsmengen (9,8 Mill. m³) mehr als ausgeglichen. Diese „Akkumulationsmengen“ resultieren rechnerisch zu 100 % aus den Verklappmengen:

$$\begin{array}{r} 13,9 \text{ Mill. m}^3 \text{ Verklappmenge} \\ - 9,8 \text{ Mill. m}^3 \text{ Akkumulation} \\ \hline = 4,1 \text{ Mill. m}^3 \text{ Erosion bzw. Rücklauf von Verklappgut} \end{array}$$

Da in den Ufersohlenregionen mehr verklappt als akkumuliert worden ist, heißt dies:

1. Die natürliche Erosion bzw. der Materialaustrieb des Untersuchungsgebietes (8,1 Mill. m³) muß aus dem gesamten Querschnitt stammen.
2. Es findet ein Materialkreislauf im Unterelbequerschnitt statt: Vermutlich wird durch Baggerungen (speziell Vertiefungsbaggerungen) ein Materialverlust der Fahrrienschultern ausgelöst. Dies führt dazu, daß das aufzunehmende Baggergut aber auch zu einem gewissen Prozentsatz aus eben jenem randlich erodierten Material besteht.

Von den Gesamtbaggermengen wird beinahe die Hälfte (42 % nach Tab. 9) ufernah verklappt. Dort herrscht jedoch eine natürliche Erosion, die das Material zu 30 % (4,1 Mill. m³) wieder wegführt, im Endeffekt vermutlich über die fahwassernahen Bereiche zurück in die Fahrrinne (siehe dazu DAMMSCHNEIDER, 1983). Rechnerisch kommen also 13,3 Mill. m³ erodierten Materials aus den Bereichen seitlich der Fahrrinne. 8,1 Mill. m³ werden allerdings nur aus dem Untersuchungsgebiet abgeführt (= Gesamtmaterialaustrieb), d. h., daß eine gewisse Materialmenge sich im internen Materialkreislauf befinden muß, der wie folgt aufgebaut ist:



Die Quantität des Materialumlaufs ist allerdings nur indirekt zu bestimmen: Minimal beträgt diese Menge 5,2 Mill. m³, unter der Annahme, daß die 8,1 Mill. m³ Gesamtmaterialaustrieb ausschließlich aus den Uferbereichen L + R erfolgen, und maximal 13,3 Mill. m³, wenn die 8,1 Mill. m³ Materialgesamtaustrieb der Unterelbe ausschließlich aus dem Fahrwasser erfolgen würden (siehe Tab. 9).

Für die Tab. 9 wird mit einem angenommenen Wert von 5,4 Mill. m³ Materialaustrieb aus L + R (= 2/3 des Gesamtmaterialaustriebs) und 2,7 Mill. m³ Materialaustrieb auf F (= 1/3 des Gesamtmaterialaustriebs) gearbeitet. Daraus ergibt sich in diesem Beispiel eine Rücklaufmenge von 7,9 Mill. m³, die als Materialeintrieb wieder in die Fahrrinne gelangt.

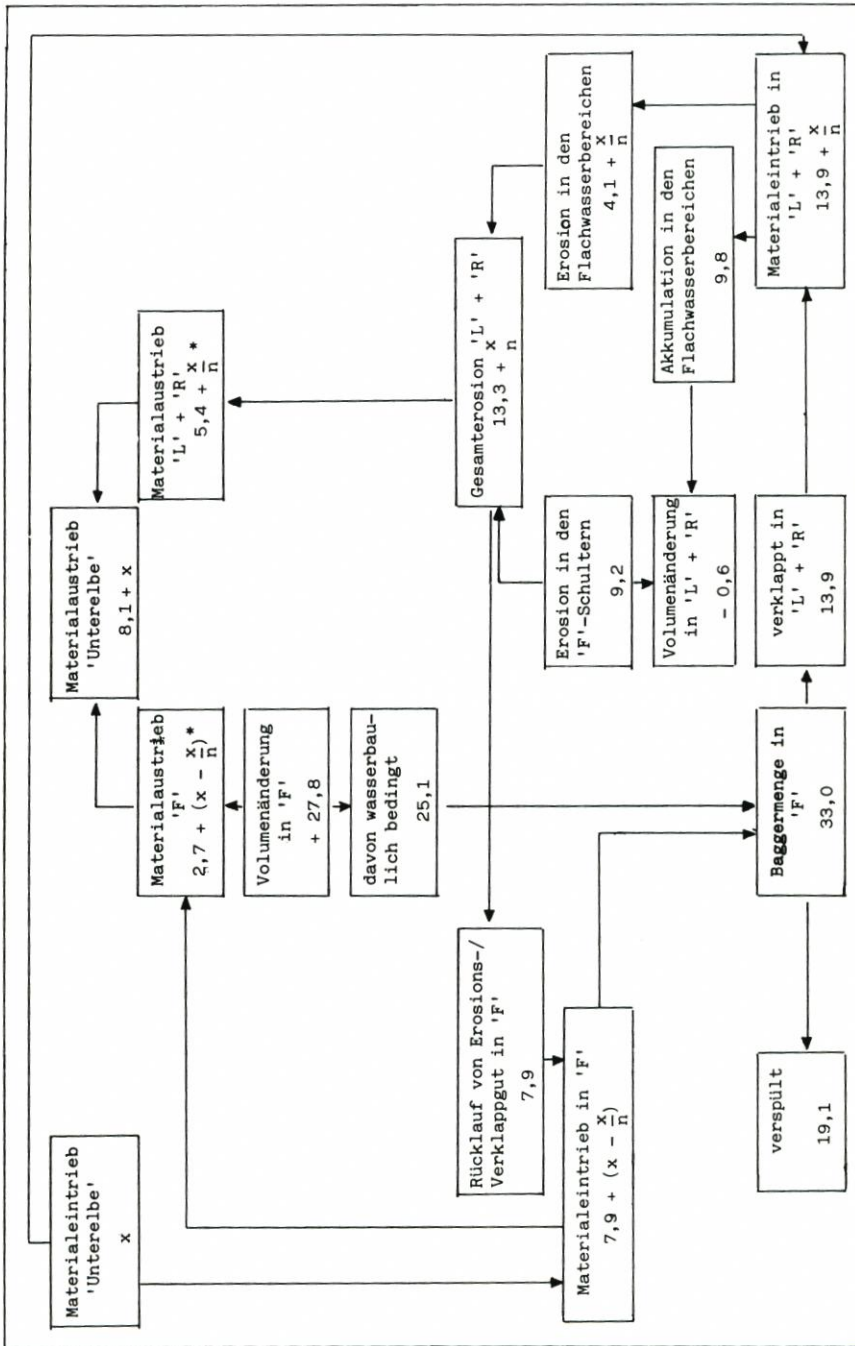
Das würde bedeuten, daß in F von 27,8 Mill. m³ tatsächlicher Volumenzunahme zwischen 1972 und 1979 25,1 Mill. m³ auf Baggerungen beruhen. Die Differenz von 7,9 Mill. m³ (in diesem Beispiel!) zur tatsächlichen Gesamtbaggermenge (33,0 Mill. m³) besteht aus der Rücklaufmenge der Uferbereiche.

Allgemein muß der Massenlängstransport stromab als mengenmäßig wesentlich größer

		Bereich											
		L 5	L 4	L 3	L 2	L 1	F	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
km 689													
bis													
640													
	Gesamtstrecke km 689 - km 640												
	(= je Längsprofil = Erosion / - = Akkumulation)	- 0,1	- 3,2	- 2,3	+ 2,4	+ 2,8	+ 27,8	+ 4,0	- 2,2	- 1,0	- 0,6	- 0,3	- 0,1
	je Bereich		- 0,4				+ 27,8			- 0,2			
- gebaggert			-----				- 33,0			-----			
+ verklappt			6,0				-----			7,9			
= Materialbilanz													
(- = Eintrieb + = Austrieb)			+ 5,6				- 5,2			+ 7,7			
Gesamt							+ 8,1						

(Angaben in 10⁶ Kubikmetern nach Auswertung der Tiefenkarten der Untereinbe und Unterlagen des WSA Hamburg)

Tab. 8. Materialbilanz „Untereinbe“ im Zeitraum 1972-1979



Tab. 9. Materialkreislauf in der Untereibe km 689 - km 640 im Zeitraum 1972-1979. * angenommene Verteilung des Gesamtmaterialeintrags: 1/3 „F“, 2/3 „R“ + „L“. 1 % Fehlermarge in „F“ = 2,9, in „R“ + „L“ = 4,1 (Werte und Angaben in 10⁶ m³ nach Tab. 8)

als der stromauf verlaufende aufgefaßt werden, da er sowohl in der Lage ist, 8,1 Mill. m³ aus dem Untersuchungsgebiet herauszutransportieren, als auch von der Materialbewegung stromauf (siehe Abschnitt 3.2) in der Endbilanz (!) nichts im Untersuchungsgebiet beläßt. Wohl aber bleibt qualitativ Nordsee-Material in der Unterelbe: Rezente Foraminiferen im Hamburger Hafen wurden von RIEMANN (1967), Seesandanteile in der Unterelbe von SIMON (1954) nachgewiesen. Es ist anzunehmen, daß das Verhältnis zwischen „seeseitigem Sandeintrieb“ und „Materialaustrieb in die Nordsee bzw. Außenelbe“ keinen festen Rahmen bildet. So kann in Jahren hoher Oberwasserführung ein besonders großer Materialaustrieb nach See, in Jahren sehr geringer Oberwasserführung (= starker Flutstrom) ein besonders großer Materialeintrieb von See erwartet werden. Insbesondere wird sich dies in den Unterhaltungsbaggermenen niederschlagen, wie ROHDE (1974) in der Tat auch für die Interdependenz „Oberwasserführung – Flutstrom – Unterhaltungsbaggermenge“ nachweisen kann.

4. Fazit

Aus den Fakten der quantitativen Kartenauswertung und Volumenberechnung der Bagger- und Verklappangaben für die Unterelbe km 689 bis km 640 (St. Margarethen-Schulau) im Zeitraum 1972–1979 ergibt sich im Zusammenhang mit bekannten Ergebnissen der hydrologisch-morphologischen Unterelbeforschung folgendes Gesamtbild:

Zwei Materialtransportrichtungen sorgen für Sandbewegung mit insgesamt negativer Bilanz. Richtung 1 führt tendenziell durch stromauf verlagernde Erosions- und Akkumulationszonen phasenhaft Material aus der Nordsee bzw. der Außenelbe in das Untersuchungsgebiet hinein.

Fest steht, daß die dabei bewegte Masse geringer als die Transportrate stromab sein muß, da, wie erwähnt, die Bilanz negativ ist und in die Oberelbe keine nennenswerten Sandmengen abgegeben worden sein können. Die stromab verlaufende Materialtransportrichtung 2 könnte nach Stand der Indizien u. a. durch die Wanderung der Riesenrippeln bedingt sein. Diese Bewegungsform ist die einzig unmittelbar wahrnehmbare, während der stromauf stattfindende Transport in seinem Mechanismus unklar bleibt. Nachweisbar ist er nur durch die tendenzielle Verlagerung von lokalen Erosions- bzw. Akkumulationsschwerpunkten, sichtbar in der Veränderung der gemittelten Tiefen unter KN.

Weiterhin kann eine im digitalen Längsriß erkennbare Kolk-Bank-Abfolge ermittelt werden. Deren Schwingungsamplitude und -frequenz nimmt stromauf sukzessive ab. Es könnte sich dabei um einen Prozeß des „Ausschwingens“ handeln, verursacht bzw. bedingt durch abnehmenden Einfluß der Tidewassermenge (DAMMSCHNEIDER, 1983) bei zunehmendem Oberwassereinfluß im Übergangsbereich „Tidebereich“–„Binnenfluß“. Die Form der „Makro“-Sohlenbänke ist deutlich stromauf orientiert, jedoch genau wie die sie überwandernden Erosions- und Akkumulationszonen nur im Kartenbild der gemittelten Tiefen nachweisbar. Im unmittelbar wahrnehmbaren morphologischen Quer- wie Längsprofil sind nur lokale Über- bzw. Mindertiefen, über KN aufragende Sände und Riesenrippeln vertreten. Auch wird dort nicht deutlich, daß ein Materialquertransport in der Unterelbe quantitativ nachweisbar existiert: Durch Baggerung, speziell Vertiefungsbaggerungen, wird Material in den Fahrriemensschultern gravitativ-denudativ erodiert (s. DAMMSCHNEIDER, 1983). Da ein großer Anteil der Baggerungen (42 %) seitlich (ufernah) wieder verklappt wird, überdeckt er dort den offenbar ebenfalls vorhandenen Erosionstrend. Damit zeigt sich ein interner Materialkreislauf. Aus den Zahlenwerten der Tab. 9 ergibt sich ein Anteil der in das Fahrwasser eintreibenden „Seiten“-Materialmengen von mindestens 5,2 Mill. m³ und maximal 13,3 Mill. m³; d. h., daß

mindestens 15 % (maximal 40 %) der Baggermengen aus seitlich eintreibendem Material bestehen und maximal 85 % (mindestens 60 %) zur reinen Fahrwasservertiefung führen. Da diverse Fakten auch auf einen seeseitigen Sandeintrieb hinweisen (SIMON, 1953; RIEMANN, 1964), s. auch Abschnitt 3.2, dieser jedoch nicht quantifiziert werden kann, ist er im Ausschlußprinzip nur wie folgt zu charakterisieren:

1. Er ist wesentlich geringer als der Ebbtransport, der eine meßbare Materialbewegung von 8,1 Mill. m³ aus dem Untersuchungsgebiet herausführt.
2. Da der Flutstromtransport durch seine stromaufwärts wandernden Erosions- und Akkumulationszentren zu identifizieren, aber nicht direkt quantifizierbar ist, bedeutet dies, daß die vom Flutstrom transportierte Menge vom Ebbstrom „umgekehrt“ wird. Dadurch verbleiben zwar Qualitäten des Seematerials in der Unterelbe, jedoch keine meßbaren Quantitäten.

Insgesamt belegt die vorliegende Untersuchung, daß mittels quantitativ-flächenhafter Kartenauswertung Ergebnisse erzielt werden können, die weit über das erreichbare Maß der Querschnittsuntersuchungen hinauswirken. Mit Hilfe der vorgestellten Methode und unter Berücksichtigung wasserbaulicher (anthropogener) Eingriffe gibt es in Zukunft in Tideflüssen die Möglichkeit, zu folgenden Arbeitsergebnissen zu kommen:

1. Erfassung quantitativer Änderungen des Wasserkörpers unter KN (siehe dazu DAMMSCHNEIDER, 1983). Daraus ergeben sich
2. die Aufzeichnung von Änderungen der Sohlentiefe in flächenhafter Verteilung und
3. die Kalkulation von Akkumulations- und Erosionsmengen. Bei Wiederholung über mehrere Jahre lassen sich daraus
4. Tendenzen einer stetigen Änderung und Periodizitäten in der Verlagerung von Akkumulations- und Erosionsbereichen ableiten sowie
5. eine Bilanzierung des Materialumsatzes unter Berücksichtigung lokaler morphologischer Bedingungen vornehmen.

Die aufgeführten Punkte zeigen: Wo bislang nur tendenzielle Vermutungen hinsichtlich der Materialbewegung existieren, lassen sich zukünftig quantitativ-flächenhafte Änderungen im Sohlenregime und damit Materialbilanzen dokumentieren.

5. Schriftenverzeichnis

- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Morphodynamik, Materialbilanz und Tidewassermenge in der Unterelbe. Berliner geographische Studien, H. 12, 1983.
- DILLO, H.-G.: Sandwanderung in Tideflüssen. Mitt. des Franzius-Inst., Hannover, H. 17, 1960.
- FÜHRBÖTER, A.: Zur Mechanik der Strömungsriffeln. Mitt. des Franzius-Inst., Hannover, H. 29, 1967.
- LUCHT, F.: Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe. DHZ, Bd. 6, 1953.
- MUNDSCHENK, H.: Zur Quantifizierung von Sedimentbewegungen im Bereich alternierender Tideströmungen. DGM, Nr. 5, 1979.
- NASNER, H.: Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. Mitt. des Franzius-Inst., Hannover, H. 40, 1974.
- NASNER, H.: Zur Frage der Baggerung von Riffeln in Tideflüssen. Naßbaggerberichte, H. 4, 1975.
- NASNER, H.: Transportmechanismus in Tideriffeln. Die Küste, H. 31, 1977.
- NÖTHLICH, I.: Untersuchungen über den Schlickhaushalt in der Unterelbe mit besonderer Berücksichtigung der biologischen Komponenten. Mitt. der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg, Nr. 17, 1967.
- RIEMANN, F.: Bericht über mikrofaunistische Untersuchungen in der Elbe. Hamburg, 1964 (unveröffentlicht).

- ROHDE, H.: Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstofftransport in einem Tidefluß. Die Küste, H. 25, 1974.
- SCHULZ, H.: Sedimentation und Erosion im Elbästuar der Gegenwart. Mitt. des Geolog. Staatsinst., Hamburg, H. 23, 1954.
- SIMON, W. G.: Ergebnisse petrographischer Untersuchungen an Sedimenten der Unterelbe. Mitt. des Geolog. Staatsinst., Hamburg, H. 23, 1954.
- VOLLMERS, H. u. WOLF, G.: Untersuchungen von Sohlenumbildungen im Bereich der Unterelbe. Die Wasserwirtschaft, H. 10, 1969.