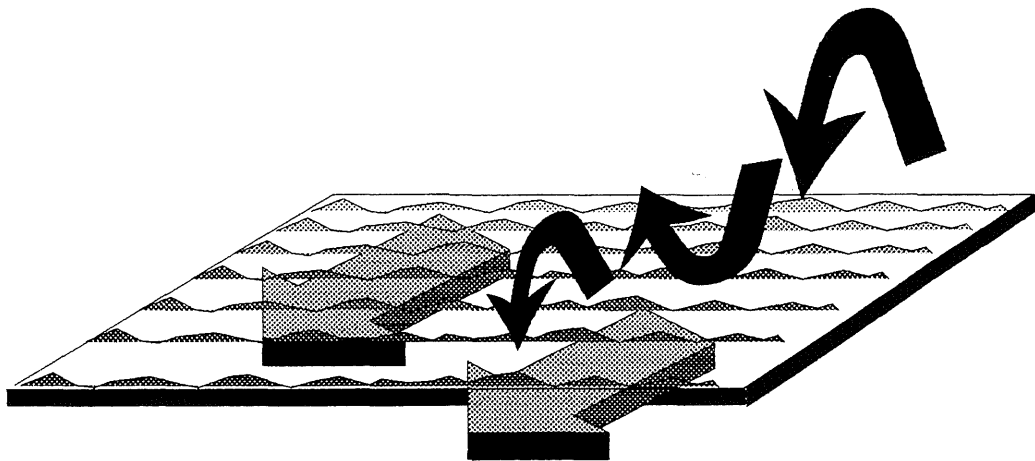


**KFKI - Forschungsvorhaben
515 - 3892 MTK 0540**

Oberwasserwirkung in Tideflüssen auf die Sedimentation



**Projektbearbeitung:
N. Greiser**

**Projektleitung:
H. Christiansen**

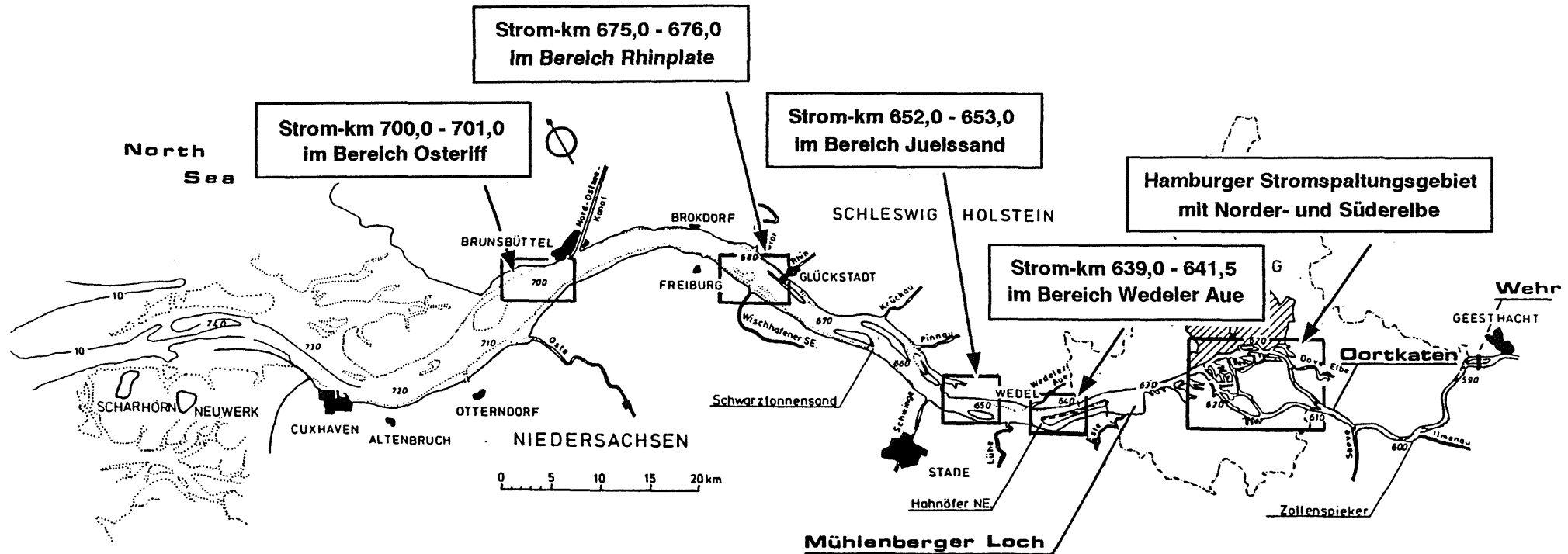
**in Zusammenarbeit mit:
Amt Strom- und Hafenbau Hamburg
Wasser- und Schiffsamt Hamburg**

Abschlußbericht Mai 1996

Danksagung:

Für die fachliche und freundschaftliche Unterstützung bei der Projektdurchführung danke ich insbesondere Herrn Dr. Hermann Christiansen. Frau Dr. Andrea Töppe danke ich darüber hinaus für ihre konstruktive, stets zu neuen Ideen und Überlegungen motivierende Kritik bei der Abfassung und Präsentation der Projektergebnisse. Die studentischen Mitarbeiter Frieder Hentzelt, Jörg Kaul und Oliver Borchardt unterstützten die Projektdurchführung mit großem Engagement und fachlichem Durchblick. Ebenso danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Reinhard Stadie für seine umfangreichen methodischen Vorarbeiten bei der Aufbereitung der Peildaten.

Karte der Tideelbe mit Lage der ausgewerteten Peilabschnitte



Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzfassung.....	1
2.	Ausführlicher Ergebnisbericht.....	8
2.1	Problembeschreibung und Anlaß.....	8
	- Variabilität der Natur verursacht hohe Kosten.....	8
	- Mangel an ortsbezogenen Daten verhindert Gegenmaßnahmen.....	8
	- Die Ingenieurpraxis erfordert quantitative Angaben.....	9
	- mögliche Wege zur Datengewinnung.....	10
2.2	Kenntnisstand zur Ablagerungsdynamik in der Tideelbe.....	11
	- Das Oberwasser, ein wichtiger Faktor.....	11
2.3	Das KFKI-Forschungsvorhaben "Oberwasserwirkung in Tideflüssen".....	13
	- Synoptische Betrachtungen sind notwendig.....	13
	- Peildaten als Basis für Ablagerungsprognosen.....	14
	- Der methodische Ansatz bestimmt die Aussage.....	15
2.4	Die Projektphase II: "Oberwasserwirkung auf die Sedimentation".....	17
2.4.1	Vorgehensweise.....	17
	- Erstes Objekt der Untersuchungen: Das Stromspaltungsgebiet der Elbe.....	17
	- Die Wahl geeigneter Auswahlkriterien.....	18
	- Das Problem überschlägiger Bilanzierungen.....	20
	- Das Problem der räumlichen Homogenität von Ablagerungsprozessen.....	23
2.4.2	Wirkfaktoren auf die Ablagerungsraten.....	26
	- Das Oberwasser - ein wichtiger, aber nicht der alleinige Wirkfaktor.....	26
	- Lokale Besonderheiten der Flußmorphologie - ein weiterer wichtiger Wirkfaktor ?...	30
	- Direkte und indirekte Oberwasserwirkung - eine Folge vorhandener Faktorenvernetzung	34

- Die Sohltiefe und ihre enge Beziehung zur Sedimentablagerungsgeschwindigkeit.....	38
- Die 'Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefe' - mehr als ein Theoriephänomen....	41
- Übertiefenbaggerungen - ein sinnvolles oder kontraproduktives Verfahren ?.....	46
- Übertiefen - 'Hydrodynamische schwarze Löcher' ?.....	50
 2. 4. 3 Schlußfolgerungen und Prognose.....	 53
- Das Oberwasser als gleichgewichtsbestimmender Faktor.....	53
- Was bedeuten die Arbeitsergebnisse für die Praxis ?.....	58
- Ablagerungsprognosen - auch ohne numerische Modelle machbar ?.....	62
- Erste Prognose-Versuche mit Peilplandaten.....	63

Anhang

1. Kurzfassung

Die hohen Kosten für das Baggern, das Umlagern von Sediment und vor allem für die Baggergutunterbringung auf Landdeponien stärken den Wunsch nach einer vorausschauenden Kalkulation des dafür notwendigen technischen und logistischen Aufwandes. Weitergehende Strategien zur dauerhaften Reduzierung der Unterhaltungskosten erfordern darüberhinaus Strombaumaßnahmen, mit denen dauerhaft eine substantielle Verminderung der Sedimentablagerungen in den Fahrrinnen und Hafenbecken erreicht werden kann.

Alle Maßnahmen zur Aufwandsminderung setzen jedoch die Quantifizierung der Beiträge derjenigen Wirkfaktoren voraus, die meßbar an der Sedimentation suspendierter Feststoffe und am Sedimenttransport beteiligt sind. Nur wenn die daraus resultierenden lokalen Erhöhungen und Verringerungen der Ablagerungsraten und Sohlthiefen bekannt sind, können mögliche finanzielle Einsparungen durch Baggerstrategieänderungen oder durch Strombaumaßnahmen prognostiziert werden.

Aus morphodynamischen Analysen, langjährigen Aufzeichnungen der in der Untereibe anfallenden Baggermengen und aus Berechnungen der Sedimentationsraten im Hamburger Hafen wird deutlich, daß dem Faktor 'Oberwasser' eine besondere Rolle als Steuergröße von Ablagerungsprozessen zugeschrieben werden muß. Wie genau diese Steuergröße in den Faktorenkomplex 'Sedimenttransport' eingreift und anhand welcher Parameter diese Wirkung am besten quantifiziert werden kann, ist Gegenstand des laufenden Forschungsvorhabens.

Ein wichtiger Aspekt der aktuellen Forschungsarbeit ist die Festlegung auf das anwendungspraktische Ziel, die routinemäßig bei den Wasser- und Schifffahrtsverwaltungen erhobenen Bagger-, Peil- und hydrografischen Meßdaten für Prognosen der Ablagerungsdynamik nutzbar zu machen. Es konnte dabei gezeigt werden, daß insbesondere Peilpläne so ausgewertet werden können, daß auch für die Baggerpraxis wichtige kurzfristige Ablagerungstrends quantifiziert werden können und damit auch prognostizierbar werden.

Das in diesem Bericht vorgestellte Analysenverfahren beinhaltet die Identifizierung der wichtigsten am Ablagerungsgeschehen beteiligten Faktoren und die

Quantifizierung der aus ihrer Wirkung resultierenden Ablagerungsraten- und Sohlflächenänderungen. Dabei wurde eine Prognosegenauigkeit "im Rahmen der Baggettoleranz" angestrebt und für zahlreiche Stromabschnitte auch erreicht.

Es wurde entschieden, zunächst die für die Norder- und Süderelbe vorhandenen Peilpläne auszuwerten, da diese Daten Abschnitte der Elbe repräsentieren, die eine große Varianz hydrografischer Randparameter aufweisen. Insbesondere war davon auszugehen, daß die im Titel des Forschungsvorhabens gesondert herausgestellte 'Oberwasserwirkung' am deutlichsten in den am weitesten stromauf gelegenen Flußabschnitten erkennbar sein mußte. Im Anschluß daran wurden die Sedimentationsverhältnisse in denjenigen Peilabschnitten der Unterelbe analysiert, die heute einen besonderen Unterhaltungsaufwand erfordern.

Insgesamt wurden 696 Peilungen von 250 m bis 500 m langen Abschnitten der Norder- und Süderelbe aus dem Zeitraum 1984 - 1992 für quantifizierende Betrachtungen herangezogen und 139 Peilungen von 500 m langen Abschnitten der Unterelbe aus den Bereichen Wedeler Au, Juelssand, Rhinplate und Osteriff. Die Auswertung erfolgte PC-gestützt mit handelsüblicher Software, bestehend aus den Komponenten:

- Digitales Geländemodell (*Golden Software* : "SURFER 4.0"),
- Tabellenkalkulation u. Grafik ("SURFER 4.0", *Microsoft*: "EXCEL")
- Statistische Berechnungen und Präsentationsgrafik (*Scilab*: "ST-STATISTIK für ATARI-PC, "XACT" für WINDOWS 3.1 und FALCON ATARI-PC)

Bei der Analyse des Ablagerungsgeschehens blieben die relativ kleinräumigen Sohlflächengradienten im Böschungsbereich des Flußquerschnitts unberücksichtigt. Die Untersuchungen wurden jeweils auf die Fahrrinne beschränkt. Die vom Amt Strom- und Hafenbau vorgegebenen Peilplanabschnitte und die selbst gewählten Abschnitte der Unterelbe wurden dazu in einzelne Teilflächen ('Makrofelder') der Breite 150 m bis 250 m und einer Länge von 250 m bis 500 m unterteilt.

Aus den für die Makrofelder in der Norder- und Süderelbe ermittelten Ablagerungsbilanzen konnten zunächst jedoch keine systematischen Beziehungen der Sohlflächenänderungen zur Oberwasserführung abgeleitet werden, weil, wie

nachgewiesen werden konnte, einige Makrofelder zu starke kleinräumige Inhomogenitäten im Ablagerungsgeschehen aufweisen.

Aus diesem Grund wurden alle weiteren Bilanzierungsrechnungen, auch in der Unterelbe, auf deutlich verkleinerte Feldgrößen ('Mikrofelder' mit den Ausmaßen 50 m x 50 m) bezogen.

Ein Vergleich der Ablagerungsraten dieser Mikrofelder untereinander zeigt, daß zur Aufklärung der Varianz im Ablagerungsgeschehen rechnerisch mindestens drei Faktoren notwendig sind.

Das Oberwasser unter Berücksichtigung der Tidedynamik (Faktor 1) ist nur einer dieser 3 Faktoren und hat einen Anteil an der Varianz von im Mittel 6 % bis 43%, wobei nur im Stromspaltungsgebiet signifikante Korrelationen zwischen den berechneten Ablagerungsraten und der mittleren Oberwasserführung in den betrachteten Peilintervallen vorhanden waren.

Weitere Korrelationsbetrachtungen zeigen, daß dagegen für fast alle Mikrofelder im Stromspaltungsgebiet und für alle Mikrofelder in der Unterelbe ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Sohltiefe und der Ablagerungsrate besteht. Die Sohltiefe (Faktor 2) hat damit im Stromspaltungsgebiet rechnerisch einen vergleichbaren quantitativen Einfluß auf das Ablagerungsgeschehen wie das Oberwasser mit Varianzanteilen von im Mittel 10% - 40%. In der Unterelbe ist dieser Faktor noch bedeutsamer. Sein Varianzanteil beträgt dort im Mittel 40% bis 80%.

Aus der räumlichen Lage einzelner Mikrofelder, die nur gering vom Oberwasser und von der Tiefenlage der Sohle beeinflusst werden folgt, daß deren Sohltiefe noch durch andere, lokale wirksame morphologische Faktoren bestimmt wird. Entsprechende lokale Sohliefengradienten können z.B. aus der strömungsmodifizierenden Wirkung von Bauwerken und aus Prall- und Gleithangeffekten (Flußmorphologie, Faktor 3) resultieren.

Aus diesen Erkenntnissen läßt sich folgender für die Bagger- und Strombaupraxis wichtiger Faktor ableiten:

Die "Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefe (HST)"

Sie beschreibt rechnerisch, bei welchem Sohliefenniveau theoretisch keine Netto-Ablagerung mehr stattfindet, die Flußsohle sich also im Ablagerungs-/Erosionsgleichgewicht befindet. Die HST wäre demnach dasjenige Sohliefenniveau, bei dem die Ablagerungsrate mathematisch "Null" ist. Dieses wäre dann zugleich der unterhaltungstechnisch günstigste Zustand der Flußsohle.

Folgt man dem 'HST-Konzept', dann müßten umgekehrt in Stromabschnitten, in denen zusätzlich Übertiefenbaggerungen ('Vorratsbaggerungen') vorgenommen werden, besonders hohe Ablagerungsraten auftreten.

Die Praxis zeigt, daß dies nicht generell der Fall ist. So sind gerade in der stark vertieften Unterelbe, unabhängig von dort vorhandenen Riffeltälern, an bestimmten Orten beständig singuläre Übertiefen vorhanden, die aufgrund der ermittelten mathematischen Beziehung zwischen Sohltiefe und Ablagerungsrate eigentlich nicht existieren dürften. In diesen Fällen ist jedoch zu beachten, daß eine Verfüllung dieser Übertiefen nur dann stattfinden kann, wenn auch zur Ablagerung befähigtes Material dorthin transportiert bzw. im Fluß verfügbar ist.

Zur Auflösung dieses vermeintlichen Widerspruchs zwischen den Ergebnissen dieser Arbeit - nämlich dem als wichtig erkannten Einfluß der Sohltiefe auf die Ablagerungsdynamik - und dem Vorhandensein von Übertiefen werden daher folgende Hypothesen herangezogen:

1. Feststoffe können nur dann mit der theoretisch geforderten Intensität abgelagert werden, wenn in ihrer Umgebung ausreichende Mengen 'transportablen' Materials zu Verfügung stehen. Ist die Materialzufuhr geringer, dann muß sich die Flußsohle zwangsläufig auf einem tieferen als dem theoretisch geforderten Niveau stabilisieren mit der Folge, daß sich ein neuer dynamischer Gleichgewichtszustand einstellt.
2. Auch beim Vorhandensein ausreichender Mengen mobiler Feststoffe können Übertiefen bestehen bleiben, wenn die Strömung so stark ist, daß die

Transporteigenschaften der Feststoffe deren Ablagerung 'physikalisch' unmöglich machen. Dies gilt besonders für feinkörnige Feststoffe mit geringen Sinkgeschwindigkeiten. Unter den hydrodynamischen Bedingungen in der Tideelbe bleibt ihnen, physikalisch betrachtet, nur die Möglichkeit in Suspension solange und soweit (oberwasserabhängig) stromauf- oder stromab zu wandern, bis sie z.B. in Hafenbecken gelangen, wo das Strömungsregime (endgültig) ihre Ablagerung zuläßt.

Unter Einbeziehung dieser Hypothesen lassen sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit die unten genannten Ursache-Wirkungszusammenhänge zum Sedimenttransportgeschehen in der Tideelbe ableiten. Sie machen deutlich, daß die Ablagerung von Sedimentmaterial vor allem das gemeinsame Ergebnis der Oberwasser- und der Sohliefen-Wirkung ist, wobei jedoch nur im Stromspaltungsgebiet eine unmittelbare Wirkung des Oberwassers auf die Ablagerungsraten signifikant nachgewiesen konnte:

1. Das Oberwasser hat die Rolle eines Modulators der Ablagerungsgeschwindigkeit, indem es die Verfügbarkeit des von der Flußsohle 'geforderten' Feststoffmaterials steuert;
2. Die Abweichung der momentan vorhandenen Sohliefentiefe von der Gleichgewichtstiefe bestimmt die maximal mögliche Ablagerungsgeschwindigkeit bei ausreichender Verfügbarkeit von Sedimentmaterial;
3. Die Gleichgewichtstiefe setzt die obere Grenze für das Ausmaß der gesamten Ablagerung.

Die tatsächlich vorhandene Ablagerungsgeschwindigkeit ist damit umso höher, je mehr transport- und ablagerungsfähige Feststoffe verfügbar sind ("Oberwassereffekt") und je stärker die durch Baggerungen aufrechterhaltene aktuelle Sohliefentiefe die Gleichgewichtstiefe unterschreitet ("HST-Effekt").

Die Bestimmung der Hydrodynamisch Stablen Gleichgewichtstiefe bietet deshalb auch einen theoretischen Ansatz, um die aus Peildaten gewonnenen quantitativen Ablagerungsdaten für Ablagerungsprognosen nutzbar zu machen.

Ein erster entsprechender 'Prognose-Test' für einen Flußabschnitt der Süderelbe mit besonders hohen Ablagerungsraten (bei hohem Oberwasser) hatte folgendes Ergebnis:

Die Aufgabe bestand darin, aus den bis 1992 analysierten Daten für einen Peilabschnitt, in dem häufig gebaggert werden muß, die nach der Periode hoher Oberwasserführung von November 1993 bis März 1994 eingetretenen Mindertiefen 'vorherzusagen'. Ausgewählt wurde das Peelfeld 203.V in der Süderelbe bei Stromkilometer 615.6. In diesem Bereich befindet sich auf einer Strecke von ca. 800 m ein Solltiefengradient von 4,4 m über 6,0 m bis 7,6 m unter KN.

Nach dem Durchgang von Oberwasserwellen im Zeitraum November 1993 bis Mai 1994 waren im betrachteten Elbabschnitt Aufhöhungen von im Mittel 2.0 m bis maximal 3.0 m eingetreten, prognostiziert wurden für die betrachteten Mikrofelder dagegen "nur" Niveaueufhöhungen von 1.0 bis 2.5 m. Bei diesem konkreten Anwendungsfall beruht die Unterschätzung darauf, daß die in die Berechnung eingehenden Ablagerungsraten aus den verfügbaren Peildaten nicht genau genug ermittelt werden konnten.

Andere Prognoserechnungen zeigen, daß über den HST-Effekt tatsächlich eher die in einem Flußabschnitt maximal möglichen Ablagerungsraten abschätzbar sind:

So ergibt sich z.B. durch die geplanten Vertiefungen in der Süderelbe für die Hafenerweiterung Altenwerder auf dieser Berechnungsgrundlage, je nach Ausbauvariante, ein Mehranfall von Baggergut in Höhe von 700.000 m³ bis 1.7 Mio m³. Eine differenzierte Betrachtung unter Einbeziehung der Kenntnisse über die tatsächlich dort im Fluß transportierten Sedimentmengen zeigt jedoch, daß die dort anfallenden Sedimentmengen deutlich geringer sein werden¹³.

Für die Unterelbe ergeben entsprechende Berechnungen, daß bei einer Vertiefung um 1 m mit einer maximalen Steigerung der Ablagerungsraten um 20 bis 30 dm/a zu rechnen ist.

¹³ CHRISTIANSEN H., GREISER N., TÖPPE A.; "Abschätzung der Sedimentation durch die geplanten Strombaumaßnahmen in Altenwerder". Bericht der Strombauabteilung (SB 11) vom 23.11.1995; 27 S.

Diese Beispiele zeigen, daß die primäre Nutzenanwendung der HST-Konzeptes in der Abschätzung von Worst-Case-Effekten besteht und daß für genaue Prognosen der Sedimentation immer auch Kenntnisse über die Strömungsgeschwindigkeiten und die Sedimentzusammensetzung (Korngrößenverteilung) am betrachteten Flußabschnitt verfügbar sein müssen.

Wie das zuerst genannte Rechenbeispiel zeigt, muß bei der Bewertung entsprechender Prognose-Egebnisse außerdem berücksichtigt werden, wie genau die Tiefenabhängigkeit der Ablagerungsraten bestimmbar war. Insofern ist davon auszugehen, daß für Flußabschnitte, in denen häufig gepeilt wird, auch die besten Ablagerungsprognosen erstellt werden können.

2. Ausführlicher Ergebnisbericht

2.1 Problembeschreibung und Anlaß

Variabilität der Natur verursacht hohe Kosten

Die Sedimentation von Feststoffen und die Sedimentumlagerungen an der Flußsohle unterliegen besonders in Tideflüssen starken zeitlichen und lokalen Intensitätsschwankungen. Als Folge dieser Variabilität wechselt die Menge und Zusammensetzung des Baggerguts (Schlick- und Sandanteile, Schadstoffgehalte) ständig, so daß die Wasser- und Schifffahrtsverwaltungen Probleme haben, ihren für die Sicherstellung der Schiffbarkeit zu leistenden Unterhaltungsaufwand vorausschauend zu kalkulieren.

Die hohen Kosten für das Baggern, das Umlagern von Sediment und vor allem für die Baggergutunterbringung auf Landdeponien stärken den Wunsch nach einer verlässlicheren Kalkulation des technischen und logistischen Aufwandes. Weitergehende Strategien zur dauerhaften Reduzierung der Unterhaltungskosten erfordern darüberhinaus ein Überdenken von Unterhaltungsmethoden oder auch Strombaumaßnahmen, mit denen dauerhaft eine substantielle Verminderung der Sedimentablagerungen in den Fahrrinnen und Hafenbecken erreicht werden kann.

Mangel an ortsbezogenen Daten verhindert Gegenmaßnahmen

Es müssen also die Fragen gestellt werden, warum die Einsatzorte und Einsatzzeiten für Baggararbeiten nicht bereits Wochen oder sogar Monate vor der Feststellung von Mindertiefen kalkuliert werden können und warum langfristig wirkende, die Ablagerungen reduzierende, wasserbauliche Maßnahmen wie z.B. der Einsatz von Strömungsumlenkwänden (WINTERWERP et al. 1994¹³⁾) bisher nur exemplarisch zur Anwendung kommen.

¹³⁾ WINTERWERP J. C., EYSINK W. D., VAN KRUININGEN F. E., CHRISTIANSEN H., KIRBY R., SMITH T. J. 1994; "The Current Deflecting Wall: a Device to Minimise Harbour Siltation" The Dock & Harbour Authority March/April 1994, S. 243 - 246

Eine Hauptursache für das Fehlen einer vorausschauenden kurz- und mittelfristigen Baggereinsatzplanung und für die noch unzureichende Realisierung möglicher 'Schlickfallminderungsstrategien' ist, daß zwar aus der wissenschaftlichen Grundlagenforschung bekannt ist, welche Faktoren prinzipiell an der Ablagerung von Sediment beteiligt sind, eine Umsetzung dieses Erkenntnis in die Ingenieurpraxis jedoch nur erfolgen kann, wenn für alle Bagger- und Klappstellen, die zum Zuständigkeitsbereich eines Wasser- und Schiffsamtes gehören, detaillierte ortsbezogene Daten zur Ablagerungsdynamik verfügbar sind.

So sind z.B. aus Baggerstatistiken ableitbare "mittlere" Ablagerungsraten für ein Hafenbecken oder einen mehrere Kilometer umfassenden Flußabschnitt nützliche Informationen zur überschlägigen Bilanzierung von Gesamtbaggermengen, für die Baggerpraxis ist aber die Detailkenntnis entscheidend, an welchen Stellen, zu welcher Zeit und mit wie großer Wahrscheinlichkeit welche Mindertiefen auftreten können und ganz allgemein, wie die Strategien zur Fahrwasserunterhaltung zu optimieren sind.

Die Ingenieurpraxis erfordert quantitative Angaben

Quantitative Angaben darüber, wie stark die Sedimentablagerung in einem bestimmten Flußabschnitt zeitlich variieren kann, haben z.B. auch eine große Bedeutung für die Abschätzung des effektiven Nutzens von Vorratsbaggerungen (Übertiefenbaggerungen). Diese Maßnahme wird häufig gerade an Ablagerungsbrennpunkten zur Risikominimierung durchgeführt, um für extreme hydrologische Situationen ein Reservevolumen zur Sicherung der Schiffbarkeit zu haben.

Eine wichtige Frage ist in diesem Zusammenhang wie diese Übertiefenbaggerungen dimensioniert sein müssen, damit ihre gewünschte Funktion möglichst lange erhalten bleibt.

Für die Prognose möglicher aufwandsmindernder Effekte von Baggerstrategieänderungen oder Strombaumaßnahmen sind deshalb Angaben wichtig, aus denen die quantitativen Beiträge der wichtigsten am Sedimenttransport und an den Ablagerungsprozessen beteiligten Faktoren erkennbar sind. Dies sind insbesondere Erhöhungen oder Verringerungen von Sedimentablagerungsraten, die z.B. aus den Betragsänderungen der Ebb- und Flutstromgeschwindigkeiten, Än-

derungen der Sedimentbeschaffenheit und der Oberwassermenge, aber auch aus der Art und Weise wie ein Amt die Unterhaltung des Fahrwassers durchführt, resultieren.

Mögliche Wege zur Datengewinnung

Physikalische Modellversuche sind zur Quantifizierung von Ablagerungsraten nur bedingt geeignet. Sie geben zwar die Hydrodynamik (Wasserstände, Strömungen) weitgehend realistisch wieder, die Feststofftransportvorgänge können aber im Modell, wie noch später ausgeführt wird, nicht naturgetreu nachgebildet werden.

Die Gewinnung entsprechender Daten aus der Natur erfordert dagegen zumeist kostenintensive Langzeitmeßprogramme, so daß auf deren Durchführung seitens der Wasser- und Schiffsverkehrsverwaltungen häufig verzichtet wird, zumal die Erfahrung zeigt, daß die ebenfalls eine lange Zeit beanspruchende Datenauswertung keine schnellen Antworten auf drängende Fragen liefern kann.

Dennoch sind in den vergangenen Jahren z.B. vom Amt Strom- und Hafenbau oder in dessen Auftrag umfangreiche Untersuchungsprogramme zum Feststofftransport im Hamburger Stromspaltungsgebiet¹⁾, der angrenzenden Unterelbe²⁾

¹⁾ Meßprogramm "Automatische Meßstation Oortkaten" im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Verhalten von Schlick und Schwebstoffen in Tideästuaren (s. CHRISTIANSEN H. 1985; "Das Forschungsvorhaben Schlick/Schwebstoffe in Ästuarien" Die Küste 42, 115-122)

ERNST A. 1995; "Hamburger Elbschlick - Untersuchungen zur Charakterisierung des anorganischen Phasenbestandes". Im Auftrag des Amtes Strom- und Hafenbau, April 1995; 50 S.

²⁾ Meßprogramm der "Automatischen Meßstation Nienstedten" und regelmäßige Querprofilmessungen bei Oortkaten und Nienstedten (s. CHRISTIANSEN H. 1987; "Neue Erkenntnisse über Schlickbildungs- und Sedimentationsprozesse im Hamburger Hafen"; Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 42, 279-293)

Forschungsvorhaben "Mühlenberger Loch" in Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg (s. NEHLS R., GREISER N., HARMS H. 1993; Abschlußbericht zum o.g. Forschungsvorhaben)

und weiter stromabliegenden Unterelbeabschnitten¹⁾ durchgeführt worden, wobei u.a. eine Quantifizierung lokaler Ablagerungsintensitäten für die Strombereiche der Elbe noch fehlt. Ohne diese Kenntnisse kann auf die natürlichen Schwankungen der Ablagerungsintensitäten wie bisher nur durch kurzfristiges Baggern zur Beseitigung dort vorhandener Mindertiefen reagiert werden und können bereits gedanklich vorgeplante ablagerungsmindernde Strombaumaßnahmen nicht anwendungsreif gemacht werden.

2.2 Kenntnisstand zur Ablagerungsdynamik in der Tideelbe

Das Oberwasser, ein wichtiger Faktor

Aus morphodynamischen Analysen, langjährigen Aufzeichnungen der in der Unterelbe anfallenden Baggermengen und aus Berechnungen der Sedimentationsraten im Hamburger Hafen konnten bereits erste Hinweise zur Identifizierung von Wirkfaktoren gewonnen werden (DAMMSCHNEIDER 1989²⁾, BERNHARD 1994³⁾, CHRISTIANSEN und HAAR 1991⁴⁾). Danach wird deutlich, daß z.B. Aufhöhungen und Niveauabsenkungen von Schlickflächen an die Zu- und Abnahme des Oberwassers gekoppelt sind und daß bei geringem Oberwasser regelmäßig besonders starke Sedimentablagerungen an den weiter stromaufgelegenen Unterelbebaggerstellen und im Hamburger Hafen auftreten.

Darüberhinaus gibt es statistische Untersuchungen, Parameterstudien und numerische Modellrechnungen zur Quantifizierung von Wirkungszusammenhängen

¹⁾HARMS H., NEHLS R. 1995; "Bestimmung der Sedimentherkunft im Hamburger Hafen aus stromabliegenden Elbabschnitten". Untersuchungen im Auftrag des Amtes Strom- und Hafenbau; Abschlußbericht Dezember 1995; 47 S.

²⁾ DAMMSCHNEIDER H.-J. 1989; "Die Höhenvariabilität einer Sedimentoberfläche - über den Einfluß hydrografischer Parameter auf morphologische Veränderungen in der Unterelbe"; Die Küste 50, S. 231 - 257

³⁾ BERNHARD M. 1994; mdl. Mitt.

⁴⁾ CHRISTIANSEN H. und HAAR S. 1991; "Sedimentationsverhältnisse in Hamburger Hafenbecken. Auswertungen der Peilungen von 1977 bis 1990"; Gewässerkundliche Studie 12, Amt Strom- und Hafenbau, 58 S.

zwischen hydrologischen Faktoren (z.B. MEYER und CROTOGINO 1990¹⁾; HINRICHSEN 1991²⁾; DANISH HYDRAULIC INSTITUTE 1983, 1985, 1986 u. 1988 ³⁾). Die vorhandenen Datenanalysen wurden jedoch noch nicht in ausreichendem Umfang mit Feststofftransportdaten verknüpft und sind deshalb noch keine ausreichende Grundlage zur Generierung umfassender Handlungskonzepte für eine Verminderung von Feststoffablagerungen. Es sind allerdings gerade im Hamburger Hafen zahlreiche Einzeluntersuchungen vorgenommen worden, um z. B. Ablagerungsbrennpunkte (Hafenbecken) zu detektieren, deren Ursachen einzugrenzen und Empfehlungen für Handlungsanweisungen zur Abhilfe auszuarbeiten. Dazu gehören u.a:

- umfangreiche Messungen von Strömung, Schwebstoffkonzentrationen und Ablagerungsraten,
- hydraulische Untersuchungen (Franzius-Institut, Leichtweiß-Institut, Delft Hydraulics),
- Ausarbeitung theoretischer Ansätze insbesondere über die Feststofftransportkinetik in Drehstromwalzen von Hafeneinfahrten (Delft Hydraulics, Ravensrodd Consultants Ltd. - Dr. Kirby),
- Dokumentation und Kontrolle der Wirkungsweise und -effektivität von Strömungsumlenkwänden (Natur- und Modellversuche; gutachterliche Studien)
- einzelne Rechenläufe mit numerischen Feststofftransportmodellen des DHI (s. DHI 1985 u. 1988 ³⁾ S. 12)

¹⁾ MEYER P. und CROTOGINO A. 1990; "Protokoll einer mittleren Tide"; Mitt. d. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord; Dez. 1990

²⁾ HINRICHSEN A. 1991; "Der Einfluß des Oberwassers auf die Tideparameter der Elbe"; Mitt. d. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord; 1991

³⁾ DHI 1983 "Hamburger Hafen: Wasserstände, Durchflußmengen, Geschwindigkeiten"

DHI 1985, "Hamburger Hafen: Tabellen der Hydrologie, Topographie und Sedimentbeförderung"

DHI 1986; "Hamburger Hafen: Zeit-Weg-Berechnungen"

DHI 1988; "Hamburger Hafen: Tabellen der Hydrologie, Topographie und Sedimentbeförderung" im Rahmen des KFKI-Projektes 'Oberwasserwirkung in Tideflüssen'

Die genannten Messungen im Hamburger Hafen und die zitierten Baggermengenbetrachtungen und Peildatenauswertungen geben ebenfalls deutliche Hinweise darauf, daß dem Faktor 'Oberwasser' eine besondere Rolle als Steuergröße von Ablagerungsprozessen zugeschrieben werden muß. Wie genau diese Steuergröße in den Faktorenkomplex 'Sedimenttransport' eingreift und anhand welcher Parameter diese Wirkung am besten quantifiziert werden kann, ist eine noch offene Forschungsfrage, zu deren Beantwortung dieser Bericht beitragen soll.

2. 3 Das KFKI-Forschungsvorhaben "Oberwasserwirkung in Tideflüssen"

Synoptische Betrachtungen sind notwendig

In der fachwissenschaftlichen Diskussion besteht Einigkeit darüber, daß zur detaillierten Aufklärung der "Oberwasserwirkung in Tideflüssen auf die Sedimentation" eine synoptische Betrachtung hydrologischer und sedimentologischer Daten erforderlich ist. Dazu sollte auch das bereits im Jahre 1987 begonnene KFKI-Forschungsvorhaben "Oberwasserwirkung in Tideflüssen" (Phase I) dienen, dessen wissenschaftliche Aufgabe zunächst darin bestand, die Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen potentiellen hydrodynamischen und hydrologischen Steuergrößen des Sedimenttransportes zu quantifizieren, um diese Erkenntnisse zur Kalibrierung numerischer Feststofftransportmodelle nutzbar zu machen.

Diesem Ansatz lag die Annahme zugrunde, daß mit Hilfe derartiger Kalibrierdaten durch Modellrechnungen bereits realistische Sedimentablagerungsprognosen erstellt werden können. Nach dem bisherigen Stand der Wissenschaft ist dies jedoch noch nicht möglich, u.a. deshalb, weil die naturgegebenen Zufälligkeiten des Abfluß- und Tidegeschehens wie die dafür verantwortlichen Wetterbedingungen nur kurzfristig vorhersehbar sind. Mit Modellrechnungen können somit nur für zuvor vereinbarte hydrologische Randbedingungen in einzelnen Flußabschnitten vergleichende Ablagerungstrend-Berechnungen durchgeführt werden. Die für praktische Fragestellungen vor Ort erforderliche hohe zeitliche und auch räumliche Präzision der Bestimmung von Ablagerungsraten und den daraus resultierenden Sohlflächenänderungen konnte jedoch bisher nach Kenntnis der Autoren nicht erreicht werden.

Die Gründe für die noch vorhandenen Differenzen zwischen Modellrechen- und Naturmeßdaten liegen darin, daß entweder die in die Modelle eingegebenen Datenmengen und -qualitäten¹⁾ nicht ausreichen oder die den Modellen eigene Art der Datenverknüpfung²⁾ bisher nicht geeignet ist, um mit den verfügbaren Modelltechniken (numerischen Interpolationsverfahren) eine auch für praktische Belange zufriedenstellende Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit der Natur zu erreichen.

Zur Verbesserung der dafür notwendigen Daten- und Erkenntnisgrundlage wurde deshalb in der anschließenden Projektphase (Phase II, "Oberwasserwirkung auf die Sedimentation", von 1991 - 1994) verstärkt auch dem eingangs erwähnten 'synoptischen Absatz' Rechnung getragen und mit einer primär auf Naturmeßdaten basierenden exemplarischen Identifizierung und Quantifizierung lokaler Ursache-Wirkungszusammenhänge im Sedimentationsgeschehen der Tideelbe begonnen.

Peildaten als Basis für Ablagerungsprognosen

Ein wichtiger Aspekt der aktuellen Forschungsarbeit war die Festlegung auf das anwendungspraktische Ziel, die routinemäßig erhobenen Bagger-, Peil- und

¹⁾ Bilanzierungsrechnungen sind notwendigerweise mit großen Fehlern behaftet, da Feststoffkonzentrationsangaben zumeist nur aus wenigen Einzelmessungen resultieren und deren Repräsentativität für vertikale und laterale Konzentrationsverteilungen im Flußquerschnitt deshalb nur 'zufällig' gegeben ist. Entsprechendes gilt für die Ermittlung möglicher Quellen, Senken und Transportwege der Feststoffe, weil zumeist Daten zur Sinkgeschwindigkeit und zur Erodierbarkeit der Feststoffe fehlen.

²⁾ z.B. gilt die allgemein in der Literatur angenommene Abhängigkeit der Partikel-sinkgeschwindigkeit von der Feststoffkonzentration für Elbeschwebstoffe nicht: s. BORNHOLDT J., PULS W., KÜHL H. 1992; "Die Flockenbildung von Elbeschwebstoff: Untersuchungen mit Fraktionen unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeit"; GKSS-Bericht 92/E/88, 86 S.

Weiterhin besteht für die Sedimente der Elbe mit einem hohen Anteil organischer Substanz (> 10 Gewichts-%) keine direkte Abhängigkeit ihrer Erodierbarkeit von der Korngrößenverteilung ihrer mineralischen Substanz: s. BORNHOLDT 1994; Ergebnisberichte über "Sedimentuntersuchungen in der Alten Süderelbe und im Mühlenberger Loch sowie Messungen der Schwebstoffsinkgeschwindigkeiten zur Kalibrierung von Sedimenttransportmodellen für den Bereich Alte Süderelbe/Mühlenberger Loch"; im Auftrag des Amtes Strom- und Hafenbau.

hydrografischen Meßdaten für Prognosen der Ablagerungsdynamik nutzbar zu machen.

Peilpläne bieten sich besonders deshalb als Ausgangspunkt für eine Analyse des Ablagerungsgeschehens an, weil sie das unmittelbare Ergebnis von Erosions- und Ablagerungsvorgängen dokumentieren, nämlich die daraus resultierenden lokalen Änderungen der Sohlthiefen. Mit welcher Genauigkeit sich aus "historischen" Peildaten die aktuellen Raum- und Zeitdimensionen des Sedimenttransportes, z.B. Sedimentationsraten, nachvollziehen bzw. berechnen lassen, war dabei eine wichtige Frage. Das anzuwendende Verfahren sollte jedenfalls in der Lage sein, gerade auch die für die Baggerpraxis wichtigen kurzfristigen Ablagerungstrends zu erfassen, wobei davon auszugehen ist, daß je mehr Peildaten (Peilpläne) zur Auswertung herangezogen werden können, umso genauer auch die berechneten Ablagerungsraten mit den realen übereinstimmen werden.

Die Hauptaufgabe der Analyse besteht somit darin, den Ursachen für den durch die Peilungen dokumentierten Summeneffekt 'Feststoffablagerung' soweit nachzugehen bis die für die wechselnden Ablagerungsintensitäten verantwortlichen Hauptfaktoren identifiziert sind.

Der methodische Ansatz bestimmt die Aussage

Im Rahmen des KFKI-Projektes "Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht" wurden bereits Peildaten zur Beschreibung und Quantifizierung morphodynamischer Prozesse ausgewertet (SIEFERT 1987^{1>}). Die Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen im (Schlick-) Sedimentationsgebiet Mühlenberger Loch bei Hamburg zeigen, daß mit dem dafür entwickelten morphologischen Analysenverfahren "MORAN"^{2>} eine Quantifizierung von

^{1>} SIEFERT W., 1987; "Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht, Grundlagen und erste Auswertungen"; Die Küste 45, S. 1 - 57

^{2>} Die Abkürzung "MORAN" ist ursprünglich das Kürzel für die 1978 im 'Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen' gegründete Projektgruppe "Morphologische Analysen Nordseeküste". In diesem Bericht wird MORAN als Synonym für das im gleichnamigen BMFT-Projekt (1980 -1985) entwickelte Analysenverfahren verwendet.

langfristigen, über Jahrzehnte ablaufenden, Ablagerungstrends möglich ist (SIEFERT 1984¹⁾, MARNITZ 1995²⁾).

Eine direkte Übernahme des MORAN-Verfahrens zur Analyse der für die Baggerpraxis wichtigen kurzfristigen Ablagerungstrends erscheint jedoch problematisch, weil das MORAN-Verfahren nicht zur Selektion von Wirkfaktoren konzipiert wurde sondern dafür, das Zusammenwirken aller am Sedimentationsgeschehen beteiligten Faktoren in einer historischen Betrachtung summarisch zu erfassen, um den daraus resultierenden mittleren Gleichgewichtszustand der Gewässersohle (Sohltiefenvarianz und Sedimentumsatz) zu definieren.

Das anzustrebende Prognoseverfahren für Kurzzeittrends im Ablagerungsgeschehen muß dagegen auch die Quantifizierung der Einzelbeiträge der Faktoren zum Ziel haben und zwar bezogen auf adäquate Ereigniszeiträume wie z.B. jahreszeitliche Abschnitte mit geringer, mittlerer und hoher Oberwasserführung sowie Oberwasserwellen, und es sollte als Resultat die Sedimentablagerungsänderungen im Rahmen der Baggertoleranz verlässlich quantifizieren können. Eine höhere Prognosegenauigkeit wäre dagegen ohne praktischen Nutzen.

¹⁾ SIEFERT W. 1984; "Hydrologische und morphologische Untersuchungen für das Mühlenberger Loch, die Außeneste und den Neßsand"; Hamb. Küstenforschung 43, 43 S.

²⁾ MARNITZ U. 1995; "Über den Einfluß baulicher Veränderungen in der Elbe auf die Morphologie im Gebiet Hahnhöfer Nebenelbe/Mühlenberger Loch"; Die Küste, Heft 57; S. 95 - 120.

2. 4 Die Projektphase II: "Oberwasserwirkung auf die Sedimentation"

2. 4. 1 Vorgehensweise

Erstes Objekt der Untersuchungen: Das Stromspaltungsgebiet der Elbe

Die Entscheidung die Analyse der Ablagerungsdynamik in Tideflüssen zunächst primär auf die Auswertung von Peilplänen der Elbe zu stützen, warf die Frage auf, in welchem Flußabschnitt sinnvollerweise damit zu beginnen sei. Aus der Amtszuständigkeit für die Elbe ergab sich bereits eine genau definierte Gebietseinteilung mit einzelnen in sich konsistenten Peildatensätzen. Es war damit jedoch nicht von vornherein sichergestellt, daß diese Daten eine ausreichend genaue Quantifizierung lokaler Sedimenttransportvorgänge ermöglichen, weil die Peilungen von den einzelnen Ämtern i.d.R. nicht aus wissenschaftlichem Interesse, sondern nach ihren jeweiligen unterschiedlichen praktischen Gesichtspunkten durchgeführt werden.

Da die Qualitätsfrage der Daten nicht vorab geklärt werden konnte, erschien es aus praktischen Erwägungen geboten, einen vom Umfang her 'überschaubaren' Datensatz auszuwerten und zweitens aus wissenschaftlicher Sicht, Peilpläne aus Flußabschnitten zu verwenden, in denen die Oberwasserwirkung besonders deutlich erkennbar sein müßte. Deshalb wurde entschieden, in einer ersten Arbeitsphase Peilpläne aus der Norder- und Süderelbe zu verwenden und danach gezielt die diejenigen Unterelbeabschnitte zu untersuchen, in denen die Schwerpunkte der Unterhaltungsbaggerei liegen. Aus den Bereichen Wedeler Au, Juelssand, Rhinplate und Osteriff ist wie auch für den Hamburger Hafen bereits bekannt, daß die jeweils dort anfallenden Baggermengen je nach der Oberwasserführung stark schwanken¹⁾.

Für das Stromspaltungsgebiet der Elbe ist besonders der oberwasserabhängige Transport suspendierter Feststoffe inzwischen gut bekannt. So konnte z.B. anhand der bakteriellen Besiedlungsmuster der Schwebstoffe, die a) aus der obo-

¹⁾ Im Rahmen der UVU zur Fahrrinnenanpassung der Unterelbe für die Containerschiffahrt werden z.Z. alle verfügbaren Daten in einzelnen Berichten und Gutachten zusammengestellt.

ren Tideelbe und b) aus der Unterelbe bei Hamburg in das Stromspaltungsgebiet mit dem Ebb- und Flutstrom transportiert werden, festgestellt werden, daß

- I. Bei niedriger Abflußrate ($< 400 \text{ m}^3/\text{s}$) ein Stromauftransport von mineralreichen 'Unterelbe-Schwebstoffen' bis zur Einfahrt 'Reiherstieg-Schleuse' (Stromkilometer 615) stattfindet;
- II. Bei mittlerer Abflußrate (um $700 \text{ m}^3/\text{s}$) die für die obere Tideelbe typischen an organischer Substanz reichen Schwebstoffe bei vollem Ebbstrom in der Unterelbe dominieren und daß
- III. Hochwasserereignisse ($> 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$) eine Angleichung der Feststoffkonzentrationen und der Feststoffzusammensetzung bewirken. Es sind dann, unabhängig von der Tidephase, im gesamten Stromspaltungsgebiet Schwebstoffe mit einem hohen Mineralkornanteil und einer hohen Bakteriendichte vorhanden.¹⁵⁾

Die Wahl geeigneter Auswahlkriterien

Von den beim Amt Strom- und Hafenbau zur Verfügung stehenden Peilplänen aus dem Stromspaltungsgebiet der Elbe (Peilzeitraum: 15.3.1984 bis 23.12.1992) wurden insgesamt 295 Pläne aus der Norderelbe und 401 Pläne aus der Süderelbe als 'auswertbar' selektiert (s. Tabelle 1 im Anhang). Aus der Unterelbe wurden entsprechend 139 Peilungen ausgewertet. Aufbauend auf den Ergebnissen für das Stromspaltungsgebiet, erfolgte die Auswertung dieser Peilpläne von Beginn an getrennt für Zeiträume überwiegend hoher und überwiegend niedriger Oberwasserführung (Peilzeiträume November bis Mai und Mai bis November).

Wichtige weitere Selektionskriterien waren:

- Möglichst geringe Zeitabstände zwischen zwei Peilplänen
- Ein genau bestimmbares Peildatum
- Vollständigkeit der Pläne (keine 'Aufzeichnungslücken')
- Zwischen den Peilintervallen sollten möglichst keine oder aber genau dokumentierte Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt worden sein.

¹⁵⁾ NEHLS R., GREISER N., HARMS H. 1993; "Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Mühlenberger Loch" Universität Hamburg - Institut für Allgemeine Botanik, Abt. Mikrobiologie; im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem Amt Strom- und Hafenbau und dem Amt für Umweltschutz, Gewässer- und Bodenschutz der Umweltbehörde Hamburg; September 1993; 53 S.)

Als wichtige Prämisse aller mathematischen Analysen wurde vereinbart, nur tatsächlich die in der Natur meßbaren Effekte zu quantifizieren und nicht, eine 'Vollständigkeit wissenschaftlicher Erkenntnis' in Form von Daten anzustreben, die zwar als 'mathematisches Konstrukt' existieren, deren Richtigkeit jedoch durch Messungen in der Natur nicht überprüft werden kann.

Eine derartige bei dem vorgegeben Zeitrahmen auch notwendige und zweckmäßige Vorgehensweise erforderte zunächst auch die Entwicklung einfach zu handhabender Verfahren für:

1. Die Transformation von Rohdaten (Baggermengenangaben, Tiefenangaben in Peilplänen, Tideparameter, Abflußdaten) in Datensätze, die mathematische Verknüpfungen miteinander zulassen;
2. Die Aufdeckung statistisch signifikanter Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen den aus den Rohdaten abgeleiteten Parametern (Ablagerungsraten, mittlere Oberwasserführung usw.) für Prognosezwecke;
3. Die übersichtliche grafische Dokumentation der Prognosedaten, aus der z.B. direkt erkennbar ist, an welcher Stelle im Fluß, bei welchen hydrologischen Randbedingungen, wie hohe Ablagerungsraten auftreten.

Zur Optimierung der Peilplanauswertung bot es sich an, diese EDV-gestützt durchzuführen. Dazu wurde auf einem PC ein 'Digitales Geländemodell' (*Golden Software* : "SURFER 4.0") installiert und getestet. Dabei zeigte sich, daß die Peildaten sehr gut durch das Modell wiedergegeben werden konnten, d.h. die Differenzbildung zwischen zwei Peilplänen war reproduzierbar und ist lediglich mit einem Fehler behaftet, der im Rahmen der Peilgenauigkeit (+/- 1 dm) liegt.

Die weitere Auswertung gemäß (2.) und (3.) erfolgte ebenfalls PC-gestützt mit handelsüblicher Software, bestehend aus den Komponenten:

- Tabellenkalkulation u. Grafik ("SURFER 4.0", "MS-EXCEL")
- Statistische Berechnungen und Präsentationsgrafik ("ST-STATISTIK" für ATARI - PC und "XACT" für WINDOWS 3.1 und FALCON-ATARI-PC der Firma SCILAB GmbH))

Das Problem überschlägiger Bilanzierungen

Eine entscheidende Voraussetzung zur Verwendung der Sohlflächenangaben in Peilplänen für Bilanzierungsrechnungen ist deren Umwandlung in numerische Daten. Die gewählte Methode "Digitalisieren von Hand" muß dabei folgende Aspekte berücksichtigen:

1. Der natürliche Verlauf des Flusses in einem Peilabschnitt ist i.d.R. gekrümmt; vom Programm können aber nur rechteckige Felder verarbeitet werden, da jeder Tiefenangabe genau definierte räumliche Koordinaten zugewiesen werden müssen.
2. Die Böschungsbereiche der künstlich vertieften Elbe zeichnen sich durch besonders steile Sohlflächengradienten aus. Die Eingabe der diese Bereiche kennzeichnenden Sohlflächen erfordert eine erheblich höhere Präzision als die Eingabe der relativ gleichförmigen Daten aus der Fahrrinne.

Deshalb wurde entschieden, eine quantitative Analyse des Ablagerungsgeschehens zunächst nur für die Fahrrinne durchzuführen und die Böschungsbereiche nicht in die Datenverarbeitung mit einzubeziehen, um Fehlberechnungen aufgrund unpräziser Dateneingaben zu vermeiden¹³. Die vorgegebenen Peilabschnitte wurden vor deren Bearbeitung in kleinere "rechteckige" Raumeinheiten unterteilt.

Je nach Flußkrümmung resultierten daraus im Hamburger Stromspaltungsgebiet (s. Abbildung 1) 5 bis 7 Teilflächen der Breite 150 m oder 200 m und der variablen Länge von 250 m bis 500 m - im folgenden Makrofelder genannt. In der Unterelbe wurde eine Makrofeldbreite von 250 m gewählt. Diese Felder wurden einzeln analysiert und später noch weiter in sogenannte Mikrofelder unterteilt.

¹³ Die Fehlerhaftigkeit der "Von-Hand-Eingabe" würde bei der Verwendung moderner HYDRO-CAD-Verfahren natürlich nicht auftreten, so daß damit auch die Analyse von Strombereichen mit sehr kleinräumigen Sohlflächengradienten verläßlich möglich wäre. Die anschließende Verwendung Digitaler Geländemodelle und von Software für Bilanzierungsrechnungen und für statistische Analysen setzt aber voraus, daß die HYDRO-CAD-Datenformate von den anderen Programmen 'gelesen' werden können.

In der Tabelle 1 sind Bilanzdaten zum Ablagerungsgeschehen beispielhaft für das Makrofeld III des Peilabschnittes 203 in der Süderelbe dargestellt (vergleiche Abbildung 2). Sie ergeben sich jeweils rechnerisch aus den Sohliefendifferenzen aufeinanderfolgender Peilungen, der Zeitspanne zwischen den Peilungen und den räumlichen Abmessungen der Felder.

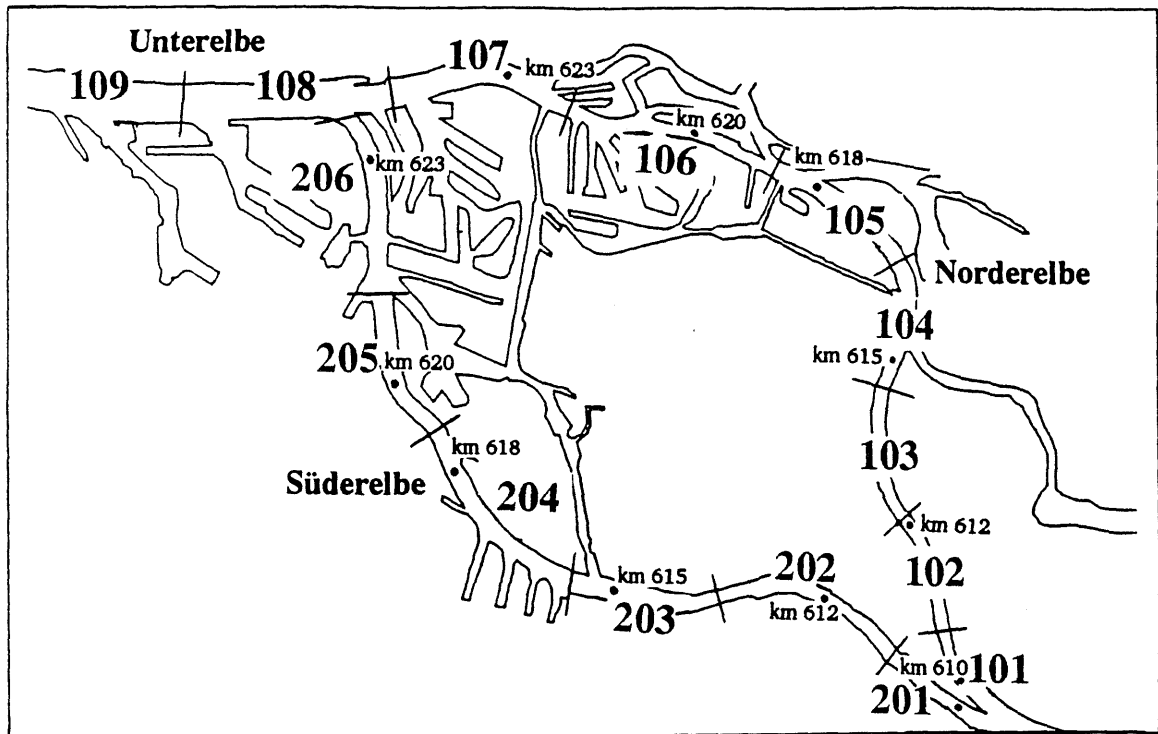


Abbildung 1:

Stromspaltungsgebiet der Elbe im Detail mit Angabe der Peilfeldnummern und der Stromkilometer. Jedes dieser Felder ist zusätzlich in 5 bis 7 Unterabschnitte (Makrofelder) eingeteilt, die einzeln analysiert wurden (s. Abb. 2).

Tabelle 1:

Bilanzdaten für das Makrofeld III des Peilabschnittes 203 in der Süderelbe als Beispiel für die Variabilität des Ablagerungsgeschehens in derartig großen Raumeinheiten, in diesem Fall der Ausmaße 150m x 450m. Zusätzlich ist die durchschnittliche Oberwasserführung im jeweiligen Peilintervall angegeben. Es wird erkennbar, daß die Ablagerungsraten keine systematische Beziehung zur Oberwasserführung aufweisen.

Überschlägige Bilanzierung des Peilfeldes: 203.III Fläche: 68.000 m² Stromkilometer: Süderelbe 614,5				
Peilintervall	Zeitraum	Oberwasser	auf-/abgetragene Sedimentmengen	Ablagerungs-/ Erosionsraten
	Tage	m ³ /s	m ³	dm/a
86.1 - 87.1	225	802	- 19.255	-1,29
87.1 - 89.1	743	926	25.183	1,46
89.1 - 90.2	382	485	860	0,10
90.2 - 90.3	134	348	963	0,15
90.3 - 91.2	425	437	6.673	0,82
91.2 - 92.2	340	513	- 11.162	-1,17
92.2 - 92.3	164	304	5.198	0,93

Werden diese Bilanzdaten, wie z.B. der Parameter "Ablagerungsrate", mit der durchschnittlichen Oberwasserführung des Flusses im dazugehörigen Peilintervall korreliert, so erhält man zunächst widersprüchliche Ergebnisse, die nach statistischen Gesichtspunkten als "zufällig zustandegekommen" bezeichnet werden müssen. Es ergeben sich nämlich sowohl hoch-signifikante positive und negative als auch nicht-signifikante Korrelationen. Dabei fällt die Tatsache ins Auge, daß sich die Korrelationsbeziehungen zwischen dem Oberwasser als angenommenen Wirkfaktor und der Sedimentationsrate als angenommenem "Reaktiven Faktor" mehrmals 'zufällig' genau an den willkürlich gewählten räumli-

chen Grenzen der Makrofelder umkehren (s. Tabelle 2 im Anhang)¹⁾. Da dort die Peilpläne für die Fahrrinnenbereiche keine auffälligen morphologischen Besonderheiten ausweisen, müssen diese Unterschiede andere Ursachen haben.

Das Problem der räumlichen Homogenität von Ablagerungsprozessen

Deshalb wurde postuliert, daß diese ersten Rechenergebnisse nicht den tatsächlichen Ablauf des Naturprozesses "Ablagerungsgeschehen" im Fluß wiedergeben, sondern primär auf der ungeeigneten Wahl bzw. Nicht-Vergleichbarkeit der betrachteten Raumeinheiten (Makrofelder) beruhen.

Um dies zu prüfen, wurde entschieden, die Bilanzierungsrechnungen und die mit diesen Daten durchgeführten Korrelationsbetrachtungen zur Oberwasserwirkung mit kleineren Raumeinheiten zu wiederholen. Die Tatsache, daß rechnerisch alle 5 m ein Datenpunkt, d.h. eine genau definierte Sohlflächenangabe, verfügbar ist, ermöglichte unter Berücksichtigung statistischer Gesichtspunkte die Reduzierung der Feldgrößen auf ein unteres Maß von 50 m x 50 m.²⁾ (Abbildung 2).

Im nächsten Schritt wurde geprüft, wie viele dieser "Mikrofelder" bezüglich ihrer Sedimentationsraten gleiche Trends in Beziehung auf die Oberwasserwirkung aufweisen.

¹⁾ Dabei gehen die Verfasser nicht von der Erwartung aus, daß im Längsprofil der betrachteten Elbabschnitte einheitliche Korrelationsbeziehungen zwischen der Sedimentationsrate und dem Oberwasser bestehen. Änderungen der Korrelationsfaktoren sollten aber graduell und in eine definierte Richtung erfolgen, also räumlich betrachtet nicht zufällig wechseln.

²⁾ Die Genauigkeit und Vertrauenswürdigkeit von Bilanzierungsrechnungen hängt stark von der Anzahl der Meßpunkte ab, deren Werte mathematisch interpoliert werden. In den 50 m x 50 m Mikrofeldern sind dies rechnerisch jeweils 100 Meßpunkte. Unter Einbeziehung der Streuung der pro Feld eingegebenen Einzelwerte (i.d.R. < 10%, im Einzelfall bis 20%) ist dies eine für statistisch signifikante Mittelwertberechnungen ausreichende Anzahl.

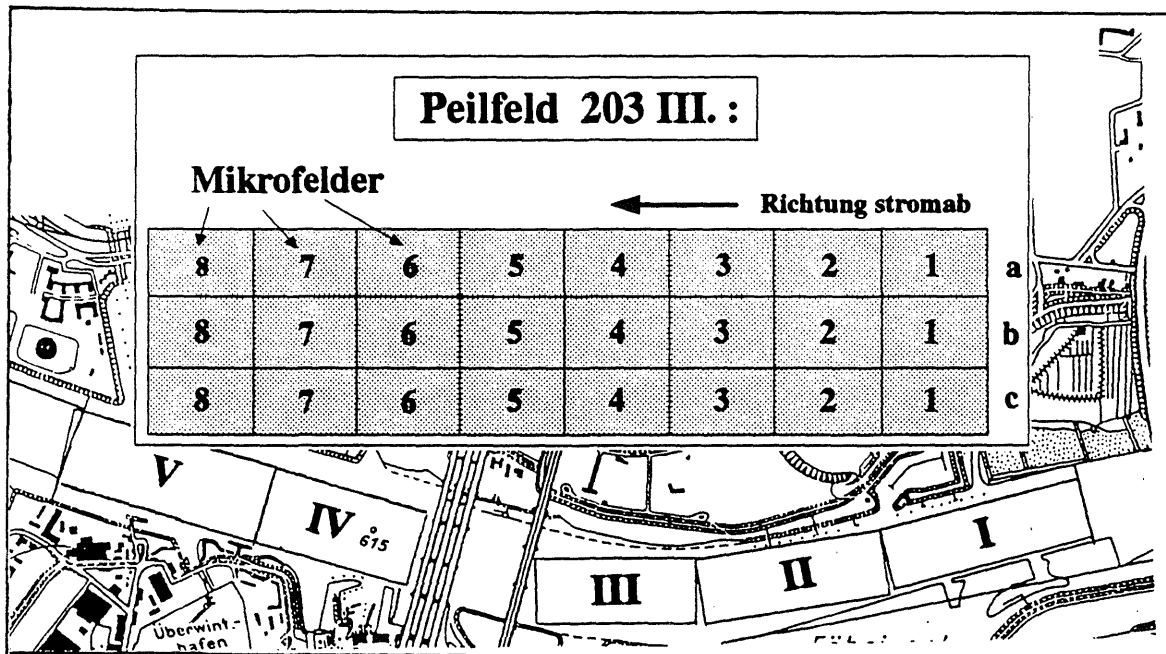


Abbildung 2:

Unterteilung des Peilabschnittes 203 in seine Makrofelder I - V und deren Subunterteilung in 50 m x 50 m große Mikrofelder am Beispiel des Makrofeldes III. Mit dem Buchstaben "a" wird jeweils in Stromabrichtung betrachtet der rechte, mit "b" der mittlere und mit "c" der linke Mikrofeldstreifen bezeichnet. Die Zahlen, in diesem Beispiel "1 - 8", bezeichnen in Stromabrichtung fortlaufend die zu diesen Streifen gehörenden einzelnen Mikrofelder (a-1, a-2, a-3, a-4; b-1, b-2,.....; c-1, c-2,..... usw.)

Aus den durchgeführten Interkorrelations-Analysen geht hervor, daß erhebliche lokale Unterschiede im Ablagerungsgeschehen vorhanden sind und die Makrofelder somit diesbezüglich keine homogenen Raumeinheiten darstellen (s. Tabelle 2). Deshalb erklärt sich, daß die Ursache-Wirkungsbetrachtungen auf der Basis Makrofeld-gemittelter Bilanzierungsdaten mit erheblichen Fehlern behaftet sein können, und es nach den vorliegenden Ergebnissen in der Norder- und Süderelbe auch sind.

Tabelle 2:

Interkorrelationen einzelner Mikrofelder bezüglich ihrer Ablagerungsraten am Beispiel des Peilabschnittes 206. I. Mit den Zeichen *, \$, # ist folgende Signifikanz (Irrtumswahrscheinlichkeit P) der Korrelationskoeffizienten angegeben: * : $P < 1\%$; \$: $1\% < P < 5\%$; # : $5\% < P < 10\%$

Mikrofelder-Korrelation innerhalb des a-Streifens										
Feld-Nr.	a-1	a-2	a-3	a-4	a-5	a-6	a-7	a-8	a-9	a-10
a-1		0.32	0.23	-0.05	-0.39	-0.31	0.01	-0.10	-0.32	\$ -0.70
a-2			* 0.96	* 0.85	# 0.56	-0.29	-0.20	-0.47	-0.47	-0.09
a-3				* 0.92	\$ 0.70	-0.10	-0.06	-0.30	-0.28	0.06
a-4					* 0.85	0.09	-0.04	-0.25	-0.19	0.14
a-5						0.30	0.03	0.01	0.08	0.44
a-6							\$ 0.75	* 0.85	* 0.83	0.50
a-7								* 0.78	* 0.90	0.45
a-8									* 0.87	0.47
a-9										\$ 0.64

Mikrofelder-Korrelation zwischen a- und b-Streifen										
Feld-Nr.	b-1	b-2	b-3	b-4	b-5	b-6	b-7	b-8	b-9	b-10
a-1	* 0.77	-0.07	0.26	-0.47	-0.49	-0.32	# 0.60	-0.03	0.40	-0.05
a-2	0.37	0.35	0.49	0.10	0.32	0.22	0.29	0.02	-0.23	-0.12
a-3	0.29	0.47	# 0.61	0.30	0.50	0.41	0.37	0.24	-0.20	0.07
a-4	0.02	0.48	\$ 0.66	0.52	\$ 0.67	0.47	0.29	0.37	-0.13	0.07
a-5	-0.37	0.43	# 0.57	# 0.59	* 0.94	\$ 0.71	0.11	0.48	-0.27	0.08
a-6	-0.53	0.08	0.15	# 0.58	0.47	0.32	0.19	* 0.86	0.42	# 0.62
a-7	-0.30	0.03	0.10	0.22	0.21	0.19	0.40	\$ 0.73	# 0.56	* 0.87
a-8	-0.32	0.10	-0.01	0.31	0.21	0.22	0.18	\$ 0.76	0.42	\$ 0.63
a-9	-0.54	0.00	-0.04	0.35	0.34	0.31	0.16	\$ 0.71	0.36	* 0.81
a-10	# -0.56	0.27	-0.23	0.51	# 0.55	0.47	-0.35	0.35	-0.38	0.50

Mikrofelder-Korrelation zwischen a- und c-Streifen										
Feld-Nr.	c-1	c-2	c-3	c-4	c-5	c-6	c-7	c-8	c-9	c-10
a-1	0.10	0.51	-0.03	-0.03	0.00	0.01	-0.54	-0.42	0.06	-0.23
a-2	0.37	0.14	0.32	0.31	0.04	0.30	0.29	0.28	0.29	-0.08
a-3	0.37	0.19	0.53	0.51	0.23	0.52	0.48	0.48	0.42	-0.02
a-4	0.15	-0.05	\$ 0.65	# 0.59	0.22	0.48	\$ 0.64	\$ 0.67	# 0.58	0.20
a-5	-0.03	-0.25	\$ 0.66	0.48	0.33	0.47	* 0.83	\$ 0.75	0.41	0.11
a-6	-0.46	0.12	0.48	0.53	\$ 0.67	0.48	0.31	0.51	0.49	\$ 0.67
a-7	-0.09	\$ 0.64	0.45	# 0.59	* 0.84	# 0.57	0.11	0.37	0.46	0.41
a-8	-0.33	0.35	0.28	0.35	* 0.77	0.45	0.09	0.23	0.16	0.39
a-9	-0.19	0.37	0.39	0.48	* 0.77	0.52	0.25	0.41	0.28	0.37
a-10	0.18	0.11	0.19	0.36	# 0.56	0.50	# 0.56	0.51	-0.05	0.23

2. 4. 2 Wirkfaktoren auf die Ablagerungsraten

Das Oberwasser - ein wichtiger, aber nicht der alleinige Wirkfaktor

Die vorherige Überlegung mündet in die Frage: Gibt es zusätzliche Wirkfaktoren, die eine identische Reaktion des Ablagerungsgeschehens in den Mikrofeldern auf Änderungen der Oberwasserführung verhindern?^{1>}

Eine Teilantwort auf diese Frage liefert die Aussage darüber, welcher Anteil der Variabilität der Sedimentationsraten maximal überhaupt dem Oberwasser zugeordnet werden kann. Aus den Korrelationskoeffizienten (R) für die signifikant vom Oberwasser beeinflussten Mikrofelder lassen sich direkt die maximal möglichen Varianzanteile ablesen^{2>}

In der Süderelbe können durchschnittlich 35 % bis 71 % der Varianz im Ablagerungsgeschehen durch den Einfluß des Oberwassers erklärt werden. Dabei dominiert im stromaufliegenden, nicht vertieften Bereich bei hohem Oberwasser Erosion (negative Korrelation), im vertieften Bereich von Stromkilometer 615 (Elbbrücken) bis 619 Ablagerung und mit Ausnahme des Ablagerungsbereiches 'Hafeneinfahrt Rethe' (Kilometer 621 - 622) wieder Erosion (s. Tabelle 3).

^{1>} Außerdem wurde geprüft, ob eine veränderte Parametrisierung der Oberwasserführung (Q) zu signifikanten Verbesserungen oder sogar Änderungen der Korrelationen führt. Getestet wurden z.B. die Parameter:

- a) durchschnittliche Oberwasserführung im Peilintervall
- b) Anzahl der Tage mit $Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ im Peilintervall,
- c) Anzahl der Tage mit steigendem Q im Peilintervall,
- d) durchschnittlicher Anstieg an den Tagen mit steigendem Q

Der Parameter b) ergab i.d.R. etwas bessere Korrelationen mit den Ablagerungsraten. Da diese Verbesserungen/Änderungen aber nicht substantiell waren, wurde bei allen weiteren Berechnungen der Parameter a) weiterhin verwendet.

^{2>} Gemäß der mathematischen Definition des Korrelationskoeffizienten R als 'Produkt-Moment-Korrelation' bedeutet der Wert $R = 1$, daß 100% der Varianz des einen Faktors durch die Varianz des anderen Faktors 'aufgeklärt' ist. Der jeweils bei anderen R-Werten aufgeklärte Varianzanteil (in %) ergibt sich rechnerisch jeweils aus: $R^2 \times 100$. Eine Verbesserung der Varianzaufklärung ließ sich mit den vorliegenden Daten auch dann nicht erreichen, wenn, wie ebenfalls getestet wurde, andere als lineare Funktionen zur Berechnung von R verwendet wurden.

Tabelle 3:

- (1) Zahlenmäßiger Anteil (%) derjenigen Mikrofelder in der Süderelbe, die eine statistisch signifikante Beziehung zwischen ihren Ablagerungsraten und der Oberwasserführung aufweisen.
- (2) Bandbreite der Werte für die Korrelationskoeffizienten der statistisch signifikanten positiven oder negativen Korrelationen.
- (3) Daraus abgeleitete prozentuale Anteile der Varianzaufklärung des Ablagerungsgeschehens durch den Einfluß des Oberwassers (Korrelation $r = 1$ bedeutet 100% Varianzaufklärung).

Stromkilometer	Peilfeld	(1)	(2)	(3)
		Anzahl sign. Kor. (%)	pos. / neg. Kor.-Koeff.	Varianzaufklärung (%)
610.5	202.I	keine	keine	0
610.9	202.II	10	(+) 0,68 - 0,79	46 - 62
611.3	202.III	21	(-) 0,67 - 0,69	45 - 48
611.6	202.IV	keine	keine	0
611.8	202.V	keine	keine	0
612.2	202.VI	keine	keine	0
612.5	202.VII	50	(-) 0,77 - 0,81	59 - 66
612.8	202.VIII	12	(-) 0,69	48
613.5	203.I	keine	keine	0
614.0	203.II	keine	keine	0
614.5	203.III	38	(-) 0,70 - 0,98	49 - 96
615.1	203.IV	34	(+) 0,63 - 0,84	40 - 71
615.6	203.V	38	(+) 0,52 - 0,68	27 - 46
616.0	204.I	80	(+) 0,77 - 0,86	59 - 73
616.4	204.II	93	(+) 0,57 - 0,84	32 - 71
616.9	204.III	92	(+) 0,55 - 0,88	30 - 77
617.3	204.IV	100	(+) 0,45 - 0,96	20 - 92
617.6	204.V	33	(+) 0,74 - 0,95	55 - 90
618.0	204.VI	80	(+) 0,47 - 0,92	22 - 85
618.5	204.VII	30	(+) 0,44 - 0,74	19 - 55
618.9	205.I	61	(-) 0,50 - 0,67	25 - 45
619.1	205.II	47	(-) 0,48 - 0,78	23 - 61
619.4	205.III	33	(-) 0,49 - 0,66	24 - 44
619.7	205.IV	53	(-) 0,56 - 0,85	31 - 72
620.0	205.V	73	(-) 0,48 - 0,76	23 - 58
620.2	205.VI	33	(-) 0,49 - 0,64	24 - 48
620.5	205.VII	10	(-) 0,53	28
620.9	205.VIII	24	(-) 0,49 - 0,57	24 - 32

Fortsetzung Tabelle 3:

Korrelationskoeffizienten und daraus abgeleitete prozentuale Anteile der Varianzaufklärung für das Peilfeld 206. In diesem Elbabschnitt dominiert bei hohem Oberwasser ebenfalls Erosion, es sind aber auch lokal abgegrenzte Bereiche vorhanden (z.B. Hafeneinfahrt Rethe), in denen auch dann erhöhte Ablagerungsraten meßbar sind.

Stromkilometer	Peilfeld	Anteil pos. Kor. (%)	Anteil neg. Kor. (%)	pos. Koeffizienten	neg. Koeffizienten	Varianzaufklärung (%)
621.5	206.I	27	47	0,56 - 0,84	0,58 - 0,79	31 - 71
622.0	206.II	7	10	0,61 - 0,63	0,57 - 0,76	32 - 58
622.5	206.III	10	40	0,56 - 0,70	0,56 - 0,85	31 - 72
622.9	206.IV	14	24	0,60 - 0,73	0,65 - 0,72	36 - 53
623.3	206.V	17	keine	0,59 - 0,65	keine	35 - 42
623.7	206.VI6	keine	keine	keine	keine	0

Für die Norderelbe liegen zu wenige Peilungen vor, um mit einer entsprechenden Mikrofeldanalyse statistisch signifikante Ergebnisse zu erhalten. Die geringe Anzahl von Peilungen in diesem Elbabschnitt und die Tatsache, daß dort nur selten gebaggert wird, deutet auf eine relativ große Stabilität des Sohliefenniveaus der Norderelbe zwischen Stromkilometer 610 und 620, auch bei wechselnden Oberwassersituationen, hin. Hier ist erst im weiter stromabliegenden Bereich (km 622 - 625) ein statistisch signifikanter Einfluß des Oberwassers nachweisbar, und zwar ein Trend zur Erosion bei steigendem bzw. hohem Oberwasser.

In der Unterelbe ergeben sich dagegen keine statistisch signifikanten Korrelationen der Ablagerungsraten zum Oberwasser.

Aus den Korrelationsbetrachtungen kann somit nur für die Norder- und Süderelbe abgeleitet werden, in welchen Abschnitten Änderungen der Oberwasserführung am ehesten meßbare Erhöhungen oder Verringerungen der Ablagerungsraten bewirken können und in welchen Abschnitten andere Faktoren gegenüber der Oberwasserwirkung dominieren (s. Tabelle 3).

Die Tatsache, daß eine Parametrisierung des Faktors Oberwasser als 'Anzahl der Tage mit Abflußwerten $> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ' die besten Korrelationen zur Ablagerungsrate aufwies, läßt vermuten, daß die Intensität der Oberwasserwirkung nicht schrittweise steigenden oder fallenden Abflußwerten folgt, sondern daß es Oberwasser-Bereiche im Sinne von 'Grenzwerten' gibt, in denen die Wirkung erst deutlich 'sichtbar' wird.

Dieser Effekt zeigt sich besonders deutlich in der Unterelbe, obwohl dort, wie bereits erwähnt, keine signifikante Korrelation zwischen der Oberwasserführung und den Ablagerungsraten besteht. Wie noch gezeigt werden wird, stabilisiert sich die Flußsohle, außer am Osteriff, bei hoher und bei niedriger Oberwasserführung auf unterschiedlichen Tiefenniveaus.

Im Stromspaltungsgebiet der Elbe verursacht nach den vorliegenden Ergebnissen auch erst eine über längere Zeit anhaltende Oberwasserführung von $> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ signifikante Änderungen aktueller Ablagerungsraten und umgekehrt stellen sich erst nach längeren Zeitperioden geringen Oberwassers ($< 700 \text{ m}^3/\text{s}$) vorherige Ablagerungstrends wieder ein.

Diese Überlegungen machen deutlich, daß das Ablagerungsgeschehen in der Elbe, wie andere Naturprozesse auch, kybernetischen Gesetzmäßigkeiten folgt und deshalb auch nach entsprechenden Gesichtspunkten analysiert werden muß.

Eine kybernetische Betrachtungsweise geht davon aus, daß der Ablagerungsdynamik ein multifaktorielles System zugrundeliegt, in dem die einzelnen Faktoren nicht isoliert nebeneinander oder zeitlich getrennt wirken, sondern über hierarchisch strukturierte Rückkopplungsbeziehungen definierte Rollen im Ursache-Wirkungsgefüge übernehmen.

Wichtig sind besonders Faktoren, die über Grenzwerte die einzelnen Rückkopplungsprozesse erst in Gang setzen. So entscheidet der Partikelfaktor 'Korngröße' z.B. darüber, unterhalb welcher Strömungsgeschwindigkeit überhaupt eine Ablagerung bestimmter Feststoff-Fraktionen möglich ist.

Folgt man den obigen grundsätzlichen Überlegungen über die Funktionsweise natürlicher kybernetischer Regelkreise, so muß eine Ursache-Wirkungsanalyse

immer mit der Identifizierung derartiger 'aktiver Faktoren' beginnen. Die vorgenommenen Varianzanalysen zeigen, daß das Oberwasser zwar ein wichtiger Faktor ist, daß dieser aber nicht überall direkt auf die Ablagerungsraten einwirkt. Rechnerisch beruhen daher auch in den Mikrofeldern, deren Ablagerungsraten signifikant mit dem Oberwasser korrelieren, immerhin noch bis zu 80% der Ablagerungsraten- und Sohliefenvariabilität auf der Wirkung anderer, bisher noch nicht genannter, Faktoren.

Bevor der Versuch unternommen werden kann, Ablagerungsprognosen auf der Basis von Oberwasserwerten zu erstellen, müssen also noch die folgenden Fragen beantwortet werden:

1. Wieviele Faktoren erklären die gesamte beobachtete Varianz im Ablagerungsgeschehen ?
2. Welche Faktoren sind dies ?

Loale Besonderheiten der Flußmorphologie - ein weiterer wichtiger Wirkfaktor ?

Zur Klärung der Frage (1.) wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt. Ein derartiges statisches Verfahren kann angewendet werden, um die zumeist sehr große Anzahl denkbarer Wirkfaktoren, die für die Variabilität vorhandener Meßdaten - z.B. Sedimentationsraten - verantwortlich sein könnten, auf möglichst wenige Hauptwirkungskomponenten (Faktorengruppen) zu reduzieren¹³. Im vorliegenden Anwendungsfall liefert eine derartige Hauptkomponentenanalyse Zahlenwerte darüber,

¹³ Die Reduktion vieler möglicher Einzelkomponenten, deren maximale Anzahl mathematisch gleich der Anzahl der zusammen betrachteten Mikrofelder (Ablagerungsraten) ist, auf wenige Hauptkomponenten, wird rein rechnerisch dadurch erreicht, daß die erste Hauptkomponente diejenige lineare Funktion (Regressionsgerade) ist, die den größtmöglichen Teil der gesamten Varianz erklärt, d.h. mit der betrachteten Variablen (Sedimentationsrate) am stärksten korreliert ist.

Aus der verbleibenden Variation wird entsprechend eine zweite, mit der ersten unkorrelierte Hauptkomponente gewonnen. Dieses Verfahren wird rechnerisch in dieser Form mit einer dritten, vierten usw. Komponente fortgeführt bis die gesamte Varianz "aufgeklärt" ist.

- wie viele Faktoren notwendig sind um den größten Anteil der vorhandenen Variabilität (z.B. 70, 80, 90% der Meßdaten-Varianz) der Ablagerungsraten in den unterschiedlichen Mikrofeldern zu erklären und
- welchen relativen Anteil diese (neuen) Hauptkomponenten an der Gesamtvarianz haben.

Die Hauptkomponentenanalyse liefert keine Aussage über die Art bzw. Eigenschaften der Wirkfaktoren, sondern lediglich über ihre relativen Anteile an der Gesamtvarianz der Meßdaten. Die erhaltenen Ergebnisse bekommen daher erst einen Sinn, wenn sie im nachhinein gedanklich interpretiert werden. Sie müssen also durch reale Wirkfaktoren bzw. -komplexe erklärbar sein.

Das Rechenergebnis zeigt, daß 85 - 97% der Sedimentationsraten-Varianz durch die Wirkung von insgesamt 3 Faktoren erklärt werden kann (s. Tabelle 4).

Tabelle 4:

Ergebnisse einer Hauptkomponentenanalyse zur Ermittlung der Faktorenanzahl, die zur Aufklärung der Varianz der Ablagerungsraten in den einzelnen Mikrofeldern erforderlich ist. Dargestellt ist das Ergebnis für eine repräsentative Auswahl von Peilfeldern im Längsprofil der Süderelbe. Die Ausführungen im Text werden deutlich machen, daß der Faktor I das Oberwasser, der Faktor II die Sohltiefe und der Faktor III lokale morphologische Besonderheiten repräsentiert. Die restlichen Faktoren IV und V lassen sich keinen genau definierten Naturgegebenheiten zuordnen.

alle Mikrofelder im	% der Varianz erklärt durch die Hauptkomponenten:				
Feld-Nr.	I	II	III	IV	V
201.I	38,7	35,2	15,2	7,6	2,6
201.III	80,0	12,6	4,3	1,6	0,9
202.III	35,1	27,5	23,0	7,6	4,9
202.VIII	50,7	26,3	11,4	7,9	3,4
203.III	49,1	21,7	18,6	5,6	3,4
203.V	51,3	26,6	9,1	3,8	2,2
204.III	72,1	11,0	8,5	3,2	1,5
204.VII	60,8	20,1	10,9	2,5	2,2
205.III	50,6	20,9	15,1	5,0	3,0
205.VIII	50,7	22,5	12,1	5,6	3,7
206.III	69,9	17,2	5,6	3,3	1,7
206.VI	64,5	24,3	5,5	3,5	1,1

Die Antwort auf Frage (1.) lautet also: Neben dem bereits als 'wichtig' identifizierten Faktor Oberwasser haben noch 2 weitere Faktoren einen meßbaren Einfluß auf das Ablagerungsgeschehen.

Geht man davon aus, daß die Intensität des Sedimenttransportes dann zunimmt, wenn die an der Flußsohle auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten größer werden und Sedimentablagerungen primär dort auftreten, wo geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorhanden sind, dann führen bereits morphologische Ungleichförmigkeiten im Längs- und Querprofil eines Flusses dazu, daß sich lokale Erosions- und Ablagerungsgebiete manifestieren. Daß dies auch für die Unterelbe gilt, zeigen insbesondere die Untersuchungen von DAMMSCHNEIDER (1985 und 1989)¹⁾.

Aus diesen Überlegung und Erkenntnissen folgt, daß einer der noch zu bestimmenden Wirkfaktoren lokale Änderungen der Flußquerschnittsmorphologie/-geometrie sein könnten.

Es wird postuliert, daß die Wirkung dieses 'Morphologie-Faktors' im Stromspaltungsgebiet deshalb besonders gut erkennbar ist, weil dort in Stromabrichtung eine stetige Verringerung der 'direkten Oberwasserwirkung' auf das Ablagerungsgeschehen vorhanden ist. Grundlage dieser Überlegung ist die Tatsache, daß in Stromabrichtung eine sukzessive Zunahme der Tidewassermenge erfolgt, weil von der in dieses Gebiet einströmenden Flutwassermenge (am Querschnitt Nienstedten bei Stromkilometer 631 ca. 5000 - 6000 m³/s) insgesamt 90% zum Füllen der Hafenbecken und Elbarne 'verbraucht' werden, also nur 10% davon die obere Tideelbe erreichen (CHRISTIANSEN et al. 1987 ²⁾).

¹⁾ DAMMSCHNEIDER H.-J. 1985; "Quantitative Morphodynamik im Sohlenregime der Unterelbe"; Die Küste, 42, S. 245 - 267 und

DAMMSCHNEIDER H.-J. 1989; "Die Höhenvariabilität einer Sedimentoberfläche - über den Einfluß hydrografischer Parameter auf morphologische Veränderungen in der Unterelbe"; Die Küste, 50, S. 231 - 257.

²⁾ CHRISTIANSEN H., LASSEN H. und SASSEN G. 1987; "Wasserflächen und Tidevolumen im Hamburger Hafen"; Gewässerkundliche Studie Nr. 8, Amt Strom- und Hafenbau.

Geht man weiterhin davon aus, daß die durch eine Erhöhung des Oberwassers auslösbare Verstärkung des stromabgerichteten Sedimenttransportes dort am stärksten sein muß, wo der Wasserdurchfluß in jedem Fall vom Oberwasser dominiert wird, so muß dieser Effekt dort geringer werden, wo sich im stark vertieften Bereich des Flusses die Tidewassermenge gegenüber der Oberwasserabflußmenge deutlich erhöht, mit der Folge, daß die Ablagerungsdynamik nicht überall in gleicher Stärke oder nur noch indirekt vom Oberwasser geprägt wird, wie es in der Unterelbe der Fall ist.

Deshalb können kleinräumige morphologische Ungleichförmigkeiten des Flußquerschnittes großräumige Trends im Transportgeschehen lokal überprägen. Dazu können z.B. Bereiche der Elbe gehören, in denen sich der Querschnitt stark erweitert, z.B. bei großen Hafenbeckeneinfahrten, wie in der Süderelbe im Abschnitt Rethe//Sandauhafen. Insbesondere dieser Teil des Flußlaufes wirkt immer dann als lokale Feststoffsенке, wenn hohes Oberwasser im stromaufliegenden Flußabschnitt Erosion bewirkt.

Ob dieser Morphologie-Faktor identisch mit der zweiten oder dritten Hauptkomponente aus Tabelle 4 ist, kann anhand der durchgeführten Hauptkomponentenanalyse nicht ausgesagt werden. Die in den Peilfeldern 206.I - 206.V entgegen dem großräumigen Trend (negative Korrelation) plötzlich auftretenden Mikrofelder mit positiver Korrelation (s. Tabelle 3) werden jedoch als Beleg für die Wirkung dieses Faktors angesehen, während der im vertieften Bereich der Süderelbe (ab Peilfeld 203.IV) festgestellte 'Umschwung' der Korrelationsbeziehung zwischen der Oberwasserführung und den Ablagerungsraten ein Indiz für den postulierten Gradienten der direkten Oberwasserwirkung im Stromspaltungsgebiet sein könnte.

Auf den folgenden Seiten wird jedoch noch anschaulich belegt werden, daß der Morphologie-Faktor das lokale Ablagerungsgeschehen erheblich modifizieren kann, so daß er nach Ansicht der Autoren als eine der drei festgestellten Hauptwirkungskomponenten eingestuft werden muß.

Für das Ablagerungsgeschehen in der Süderelbe wird aus den Ergebnissen der Mikrofeldanalyse somit bereits folgende wichtige Wirkung des Morphologie-Faktors deutlich:

- Der im Bereich der Hafeneinfahrten Rethe/Sandauhafen existierende Wendekreis für große Schiffe wirkt als lokale morphologische Feststoffsenke, und zwar unabhängig von der Oberwasserführung

und es können bezüglich des Faktors Oberwasser zwei zunächst widersprüchliche Effekte aufgezeigt werden:

1. Bei hohem Oberwasser erhöhen sich im davon stromaufliegenden Teil der Elbe die Ablagerungsraten,
2. im stromabliegenden Flußabschnitt verringern sie sich dagegen.

Die möglichen Ursachen dafür sollen im folgenden aufgezeigt werden.

Direkte und indirekte Oberwasserwirkung - eine Folge vorhandener Faktorenvernetzung

Die genannte scheinbar paradoxe Gegensätzlichkeit der Oberwasserwirkung kann nach Ansicht der Autoren auf die in Stromabrichtung zunehmende Wirkung eines vom Flutstrom verursachten und inzwischen in weiten Fachkreisen als Tatsache akzeptierten, stromaufgerichteten Sedimenttransportes in der Unterelbe zurückgeführt werden. Insofern stellen der Bereich 'Wendekreis Rethe/Sandauhafen', wie auch die daran anschließenden Hafenbecken, auch deshalb exponierte Sedimentablagerungsgebiete dar, weil sich in diesem Abschnitt der Elbe zwei Sedimenttransportströme treffen:

- 1) Ein stromabgerichteter Oberwasser-Transportstrom, dessen Intensität mit erhöhter Oberwasserführung ansteigt.
- 2) Ein stromaufgerichteter Flutstromtransport, dessen Intensität bei hohem Oberwasser verringert und bei geringem Oberwasser verstärkt wird (s.a.DHI 1988 ¹³⁾).

¹³⁾DHI 1988; "Hamburger Hafen: Tabellen der Hydrologie, Topographie und Sedimentbeförderung" im Rahmen des KFKI-Projektes 'Oberwasserwirkung in Tideflüssen'

Im ersten Fall wirkt das Oberwasser direkt (positive Korrelation), im zweiten Fall indirekt durch die Schwächung des eigentlichen transportauslösenden Faktors, den Flutstrom (deshalb negative Korrelation). Insofern erscheint es sinnvoll, für Tideflüsse den bisher isoliert betrachteten Faktor Oberwasser gedanklich mit dem Faktor Tidedynamik zu einem gemeinsamen Wirkungskomplex zu verbinden und diesen dann als erste der genannten Hauptwirkungskomponenten anzusehen.

Verlässliche Angaben über die Transportraten beider vom Oberwasser und der Tidedynamik gesteuerten 'Feststoffströme' können jedoch bisher nicht gemacht werden, weil eine nach statistischen Gesichtspunkten ausreichende Anzahl von Peilungen, getrennt für hohe und niedrige Abflußsituationen, fehlt und eine entsprechende Analyse für die Unterelbe aufgrund der zeitlichen Begrenzung für dieses Forschungsvorhaben nicht durchgeführt werden konnte.

Aus den vorhandenen Meßdaten können jedoch Angaben über den räumlichen Wirkungsbereich beider Transportströme im Stromspaltungsgebiet gemacht werden:

Nach den Korrelationsdaten aus Tabelle 3 erstreckt sich der Wirkungsbereich des stromabgerichteten Sedimenttransportes in der Süderelbe (bei hohem Oberwasser) von km 615 bis km 618 und der des stromaufgerichteten Sedimenttransportes (bei niedrigem Oberwasser) bis ca. km 620. Als 'Feststoffquelle' für den stromabgerichteten Transport ist der Bereich zwischen Stromkilometer 611 und 615 anzusehen, für den stromaufgerichteten Transport die Unterelbe.

Daran wird noch einmal deutlich, wie eng die Faktoren Oberwasser/Tide und Flußmorphologie in bezug auf ihre "Wirkung auf die Sedimentation" aneinander gekoppelt sind. Das Resultat ihrer Wirkung, Sohlflächenänderungen durch Erosion oder Sedimentablagerung, ist immer das Ergebnis ihres gemeinsamen Wirkens, wobei je nach Lokalität der eine oder andere Faktor in der Wirkungsintensität dominiert.

So wird im speziellen Fall der negativen Korrelation zum Oberwasser besonders deutlich, daß die Faktoren Oberwasser und Tide Teile eines auf das Ablagerungsgeschehen wirkenden gemeinsamen kybernetischen Regelkreises sind,

wobei der Faktor Flutstrom als 'Gegenspieler' (negative Rückkopplung) zum Oberwasser wirkt.

Dieser Zusammenhang wird besonders eindrucksvoll durch die Peilplanauswertungen für die Unterelbe bestätigt, aus denen hervorgeht, daß die Flußsohle in Zeiten hoher und niedriger Oberwasserführung sich auf unterschiedlichen Tiefenniveaus stabilisiert, bzw. sich in einen stetigen Wechsel zwischen zwei verschiedenen, rechnerisch eindeutig bestimmbar, Gleichgewichtszuständen befindet.

Nähere Ausführungen dazu folgen in den anschließenden Textabschnitten.

Eine wichtige Konsequenz dieser Überlegung ist, daß generalisierende Aussagen über die Oberwasserwirkung zwar möglich sind, deren Übertragbarkeit auf den 'Spezialfall', also den konkret betrachteten Flußabschnitt, in jedem Einzelfall geprüft werden muß.

Nach den bisherigen Ausführungen wird der Faktor 'Flußmorphologie' noch als die zweite wichtige Hauptwirkungskomponente gewichtet, eine Annahme, die - wie noch gezeigt werden wird -, nicht für jeden Flußabschnitt zutrifft.

Als Zwischenergebnis bleibt aber bestehen, daß die Wirkorte und die Wirkung (mehr Ablagerung oder mehr Erosion) der postulierten zweiten wichtigen Einflußgröße 'Flußmorphologie' aus den vorgenommenen Peilplanauswertungen im Stromspaltungsgebiet deutlich erkennbar ist, auch ohne deren genaue Einbindung in das Faktorengefüge zu kennen. So lassen sich z.B. durch die Mikrofelandanalyse auch andere kleinräumige lokale Besonderheiten im Ablagerungs geschehen detektieren, z.B. die strömungsmodifizierende Wirkung von Bauwerken (Abbildung 3) und die durch Prall- und Gleithangeffekte verursachten quergeordneten Sohliefengradienten (Abbildung 4).

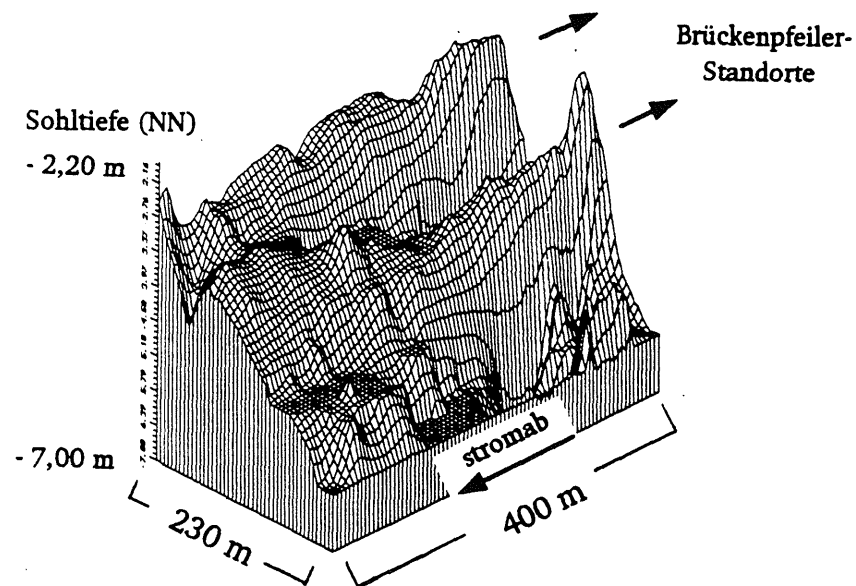


Abbildung 3:

Kleinräumige Sohliefengradienten, die durch bauwerksbedingte Inhomogenitäten der Strömungsgeschwindigkeiten entstanden sind. Dargestellt ist ein 400 m langer und 230 m breiter Ausschnitt der Süderelbe im Bereich der Brückenpfeiler der BAB-Überquerung bei Stromkilometer 615 (Peilfeld 203.IV).

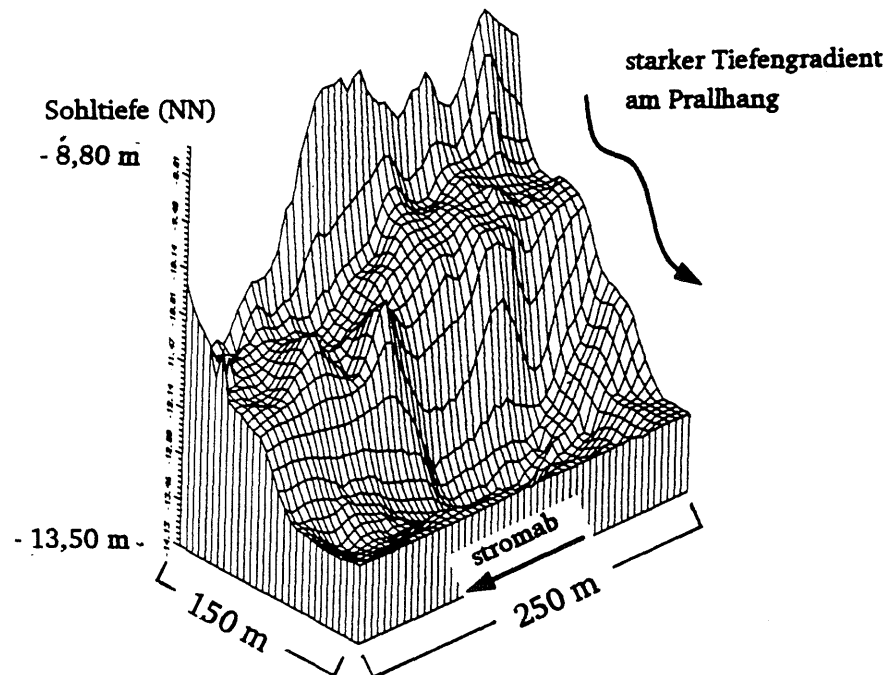


Abbildung 4:

Kleinräumige quergerichtete Sohliefengradienten der Süderelbe bei Stromkilometer 620, die durch die Inhomogenitäten der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Stromkrümmung entstanden sind (Prall- und Gleithangeffekt). Dargestellt ist das 250 m lange und 150 m breite Peilfeld 205.IV.

Die Sohltiefe und ihre enge Beziehung zur Sedimentablagerungsgeschwindigkeit

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf von Ablagerungsvorgängen, dann wird deutlich, daß diese

1. eine zeitliche Begrenzung haben und daß
2. deren Intensität mit der zunehmenden Niveauerhöhung der Gewässersohle sukzessive geringer wird (Abbildung 5).

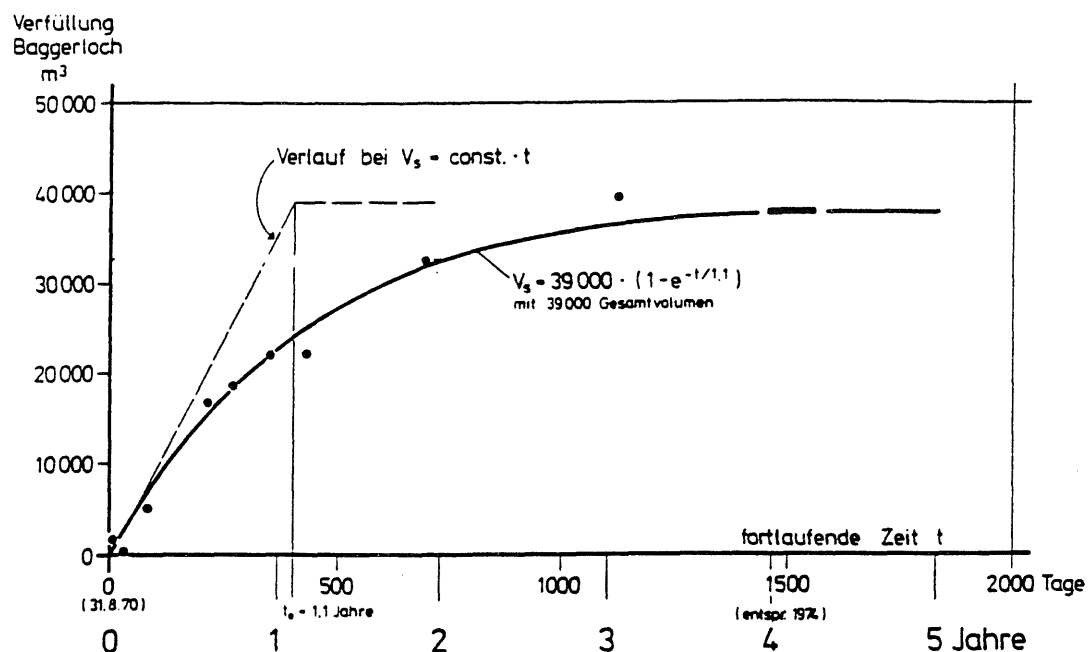


Abbildung 5:

Typischer Verlauf von Ablagerungsprozessen am Beispiel der sukzessiven Verfüllung eines Baggerlochs im Bereich der Elbemündung nördlich von Neuwerk.

Man erkennt deutlich, daß sich die Ablagerungsrate mit steigendem Verfüllungsgrad, also ansteigendem Sohlniveau, stetig verringert. Diese Beobachtung bedeutet umgekehrt, daß sich die Ablagerungsrate mit zunehmender Unterschreitung des von der Natur angestrebten 'Gleichgewichtsniveaus' überproportional (exponentiell) erhöht.

(Nach SIEFERT W. 1987; "Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht, Grundlagen und erste Auswertungen", Die Küste 45, S. 1 - 57)

Die Ablagerung von Feststoffen endet theoretisch dann, wenn die Sohle ein Tiefenniveau erreicht hat, bei dem sich die erodierenden und ablagerungsfördernden Kräfte im Gleichgewicht befinden ^{1>}.

Die aktuelle Ablagerungsrate ist also direkt an die vorhandene Sohltiefe gekoppelt und ist umso höher je weiter diese von ihrem Niveau im 'Sedimentations-/Erosionsgleichgewichtszustand' entfernt ist ^{2>}. Dieser Zusammenhang wird auch aus den Peildaten der Norder- und Süderelbe erkennbar: In fast allen Mikrofeldern (95%) korrelieren die Sohltiefe und Ablagerungsrate signifikant (s. Tabelle 3 im Anhang). In ca. 40% aller Mikrofelder der Norder- und Süderelbe ist die Sohltiefe dabei für Varianzanteile von 25% bis 80% des Ablagerungsgeschehens verantwortlich. Damit wirkt der Faktor Sohltiefe im Stromspaltungsgebiet der Elbe mindestens genau so stark wie das Oberwasser.

In der Unterelbe zeigen alle Mikrofelder hochsignifikante Korrelationen zwischen den Ablagerungsraten und ihren jeweiligen Sohliefenniveaus. Die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt, bis auf einzelne Ausnahmen, unterhalb von 0,001%. Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten und die daraus resultierenden Anteile des Faktors Sohltiefe an der Varianz des Ablagerungsgeschehens in den untersuchten Elbabschnitten der Unterelbe bei hohem und niedrigem Oberwasser.

Es wird deshalb postuliert, daß die Sohltiefe die noch ausstehende dritte Hauptkomponente darstellt, wobei ihr aufgrund der einzeln für diesen Faktor

^{1>} Aus den MORAN-Untersuchungen von SIEFERT ist bekannt, daß dieser aus einer mathematischen Funktion des allgemeinen Typs:

$$h(t) = h_{\max} (1 - e^{-t/t})$$

mit: $h_{\max}$ = Maximalwert der Sohltiefe; $h(t)$ = Änderung der Sohltiefe mit der Zeit t

ableitbare Gleichgewichtszustand durch einen ständigen Umsatz von Sedimentmaterial gekennzeichnet ist. "Umsatz" bedeutet: es treten zeitlich begrenzt sowohl Phasen erhöhter Ablagerung als auch Erosion auf, in deren Folge die Sohltiefe um einen mittleren Tiefenwert schwankt.

^{2>} Es wird noch gezeigt werden, daß dieser mathematische Zusammenhang zwischen der Ablagerungsrate und der Sohltiefe nicht in jedem Fall Gültigkeit haben kann.

berechneten Varianzanteile (s. Tabelle 3 im Anhang) vermutlich, nach der Hauptkomponente Oberwasser/Tide, im Stromspaltungsgebiet der Rang 2 und in der Unterelbe der Rang 1 zukommt. Der Faktor Flußmorphologie bekäme damit in der Faktorenhierarchie den Rang 3.

Tabelle 5:

Korrelationen zwischen den Ablagerungsraten in den Mikrofeldern der Unterelbe und ihren jeweiligen Sohliefenniveaus. Angegeben sind die Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten für die einzelnen Unterelbe-Abschnitte und die daraus resultierenden Anteile an der Varianzaufklärung im Ablagerungsgeschehen in den Peilzeiträumen mit hoher und niedriger Oberwasserführung (s. Erläuterungen S. 18).

Unterelbe-Abschnitt	Hohes Oberwasser		Niedriges Oberwasser	
	Korrelationskoeffizient	Varianzaufklärung	Korrelationskoeffizient	Varianzaufklärung
km 639-642 (Wedeler Au)	0.71	50 %	0.68	46 %
km 652.5-653.5 (Juelsssand)	0.80	64 %	0.45	20 %
km 675-676 (Rhinplate)	0.62	38 %	0.69	48 %
km 700-701 (Osteriff)	0.82	67 %	0.85	72 %

Da der aktuelle Wert der Sohltiefe zugleich das unmittelbare Resultat des Ablagerungsgeschehens ist, erscheint es sinnvoll, die empirisch gefundene Korrelationsbeziehung zwischen Sohltiefe und Ablagerungsrate für Ablagerungsprognosen zu nutzen. Wie dies geschehen könnte, soll auf den folgenden Seiten erläutert werden.

Die 'Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefe' - mehr als ein Theoriephänomen

Die Tatsache, daß für fast alle Mikrofelder der Norder- und Süderelbe ein signifikanter Zusammenhang zwischen der 2. Hauptwirkungskomponente 'Sohltiefe' und der Ablagerungsrate festgestellt wurde, führte zu der Überlegung, daß daraus abgeleitet werden kann, bei welchem Sohliefenniveau theoretisch keine Netto-Sedimentablagerung mehr stattfindet, die Flußsohle sich also im Ablagerungs-/Erosionsgleichgewicht befindet. Diese Sohltiefe ist derjenige Wert, bei dem die Sedimentationsrate mathematisch "Null" ist (s. Abbildung 6). Er bekommt im folgenden die Bezeichnung:

'Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefe (HST)'

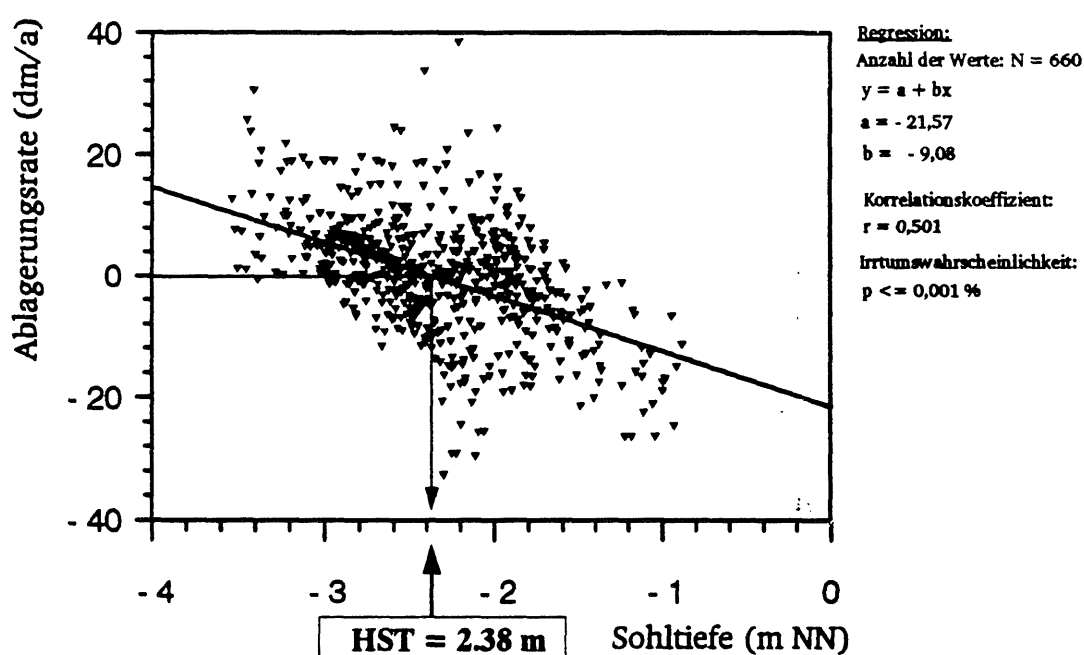


Abbildung 6 :

Grafische Ableitung der 'Hydrodynamisch Stabilen Gleichgewichtstiefe (HST)' aus der Korrelationsbeziehung zwischen der Sohltiefe und der Ablagerungsrate in den einzelnen Mikrofeldern der Peilabschnitte des Stromspaltungsgebietes der Elbe. Dargestellt ist als Beispiel die Regressionsgerade für das Mikrofeld a-1 im Peilabschnitt 203.IV der Süderelbe bei Stromkilometer 615. Die Berechnung und Darstellung der Kurve erfolgte mit dem Grafik-Programm "XACT" der Fa. SCILAB GmbH.

Aus Abbildung 7 wird erkennbar, daß eine hinreichend genaue Bestimmung der Gleichgewichtstiefe selbst dann möglich ist, wenn die Korrelation zwischen Sohltiefe und Ablagerungsrate in einem Mikrofeld nur schwach ist. Die HST-Werte aus Abbildung 6 und 7 unterscheiden sich in diesem Beispiel um 5,7 dm.

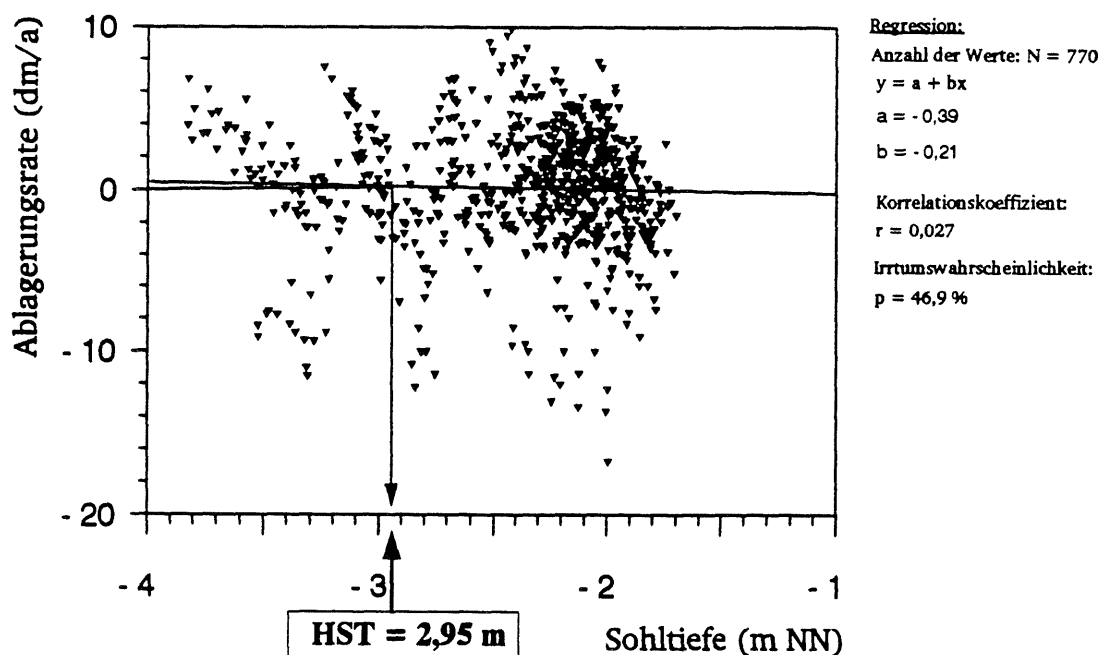


Abbildung 7:

Grafische Ableitung der 'Hydrodynamisch Stablen Gleichgewichtstiefe (HST)' aus der Korrelationsbeziehung zwischen der Sohltiefe und der Ablagerungsrate in einem Mikrofeld des Peilabschnittes 203.4 im Stromspaltungsgebiet der Elbe mit einer nur schwachen Korrelation zwischen beiden Parametern. Dargestellt ist als Beispiel die Regressionsgerade für das Mikrofeld a-3 im Peilabschnitt 203.4 der Süderelbe bei Stromkilometer 615.

Die Tabelle 6 gibt für jeden Flußkilometer der Norder- und der Süderelbe die so errechneten HST-Werte an und zwar in Stromabrichtung betrachtet separat für den rechten (a), den mittleren (b) und den linken (c) Teil der Fahrrinne. Zusätzlich sind die zur Aufrechterhaltung der Schiffbarkeit vorgesehenen Solltiefen angegeben.

Aus der Tabelle geht hervor, daß die HST-Werte im stromaufliegenden Teil der Norder- und Süderelbe tiefer liegen als die Solltiefen (- 3 m KN). Theoretisch bedeutet dies, daß dort die Sohle im Fahrrinnenbereich praktisch keinen Unterhaltungsaufwand erfordert. Nach Aussage der dafür zuständigen Abteilung im Amt Strom- und Hafenbau ist dies auch tatsächlich der Fall.

Leichte Unterschreitungen der Gleichgewichtstiefe treten dagegen in den Solltiefenbereichen von - 5 m KN bis - 11 m KN auf, deutliche Unterschreitungen im Solltiefenbereich -13,5 m KN. Als Konsequenz tritt dort ein erhöhter 'Ablagerungsdruck' von Sedimentmaterial auf und zwar, wie Abbildung 5 im Prinzip zeigt, mit zunehmender Unterschreitung der Gleichgewichtstiefe überproportional. Dieser Effekt läßt sich auch plastisch benennen als 'einen verstärkten Hunger der Flußsohle nach Sediment'.

Tabelle 6 :

Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefen (HST) in der Norder- und Süderelbe, errechnet aus der Korrelationsbeziehung zwischen der Sohltiefe und der Ablagerungsrate in den untersuchten Mikrofeldern des Stromspaltungsgebietes der Elbe. Die für die einzelnen Stromkilometer angegebenen Werte sind die übergreifenden Mittel aus einem 100 m stromab- und stromaufreichenden Abschnitt der Fahrrinne, also aus den HST-Werten von jeweils vier 50m x 50m großen Mikrofeldern in diesem Strombereich. Die Standardabweichung dieser Mittelwerte ist, bis auf einzelne Ausnahmen kleiner als 10%.

NORDER- ELBE	HST-Werte der Mikrofelder (m u. KN) ohne Oberwasser-Differenzierung			Solltiefe (m u. KN)	Abweichungen von der Solltiefe	
	a-Streifen	b-Streifen	c-Streifen		tiefer (m)	flacher (m)
609	4.2	3.6	-	3.0	bis 1.2	-
610	3.5	4.9	-	3.0	bis 1.9	-
611	4.2	4.4	-	3.0	bis 1.4	-
612	5.7	4.7	-	3.0	bis 2.7	-
613	4.2	5.3	-	3.0	bis 2.3	-
614	4.3	4.7	-	3.0	bis 1.7	-
615	4.2	4.2	4.1	3.0	bis 1.2	-
616	5.0	5.2	5.0	5.0	bis 0.2	-
617	5.8	6.1	5.9	6.0	bis 0.1	bis 0.2
618	6.4	7.0	6.9	6.0	bis 1.0	-
619	7.2	6.7	7.4	6.0 - 9.0	-	-
620	11.5	7.3	7.3	11.0	bis 0.5	bis 3.7
621	11.0	11.3	11.6	11.0	bis 0.6	-
622	10.5	11.0	11.2	11.0	bis 0.2	bis 0.5
623	12.0	11.6	10.9	11.0	bis 1.0	bis 0.1
624	10.4	11.0	11.5	11.0	bis 0.5	bis 0.6

Fortsetzung der Tabelle 6 :

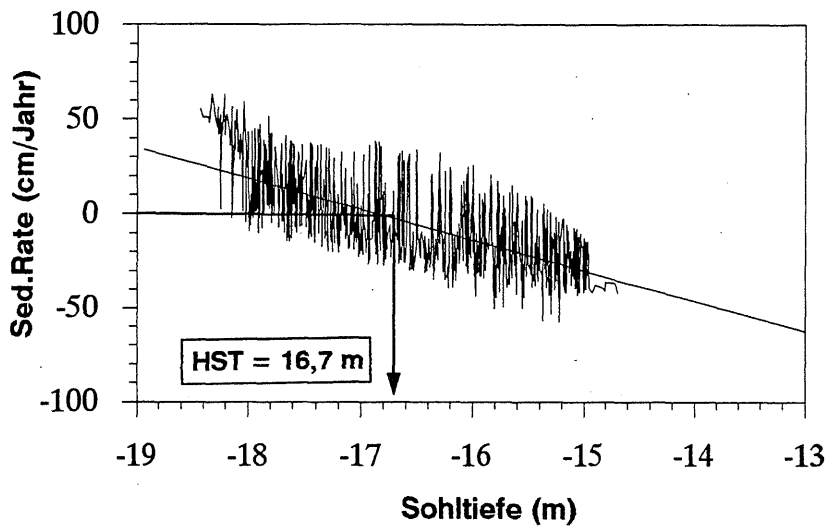
Daten für die Süderelbe. Die Zuordnung der einzelnen Peilfelder zu diesen Stromabschnitten kann den Tabellen 3.1 und 3.2 im Anhang entnommen werden.

SÜDER- ELBE	HST-Werte der Mikrofelder (m u. KN) ohne Oberwasser-Differenzierung			Solltiefe	Abweichungen von der Solltiefe	
Strom-km	a-Streifen	b-Streifen	c-Streifen	(m u. KN)	tiefer (m)	flacher (m)
609	3.9	3.8	3.6	3.0	bis 0.9	-
610	4.8	5.1	-	3.0	bis 2.1	-
611	4.9	5.4	-	3.0	bis 2.4	-
612	5.6	-	-	3.0	bis 2.6	-
613	6.1	5.7	5.2	3.0	bis 3.1	-
614	5.2	5.2	5.1	3.0	bis 2.2	-
615	2.5	3.6	3.6	5.0	-	bis 2.5
616	9.4	9.6	9.7	10.0	-	bis 0.6
617	10.7	11.4	11.3	10.6	bis 0.8	-
618	10.0	11.3	11.2	10.6	bis 0.7	-
619	10.7	11.2	10.6	12.8	-	bis 2.2
620	11.3	11.1	10.8	10.6	bis 0.7	-
621	12.0	11.8	14.5	13.5	bis 1.0	bis 1.5
622	13.9	14.4	11.7	13.5	bis 0.9	bis 1.8
623	14.1	13.9	12.6	13.5	bis 0.6	bis 0.9

In der Unterelbe sind die Gleichgewichtstiefen aufgrund des hohen Varianzanteils des Faktors Sohltiefe am Ablagerungsgeschehen besonders gut bestimmbar. Abbildung 8 zeigt dies exemplarisch für den Elbabschnitt Rhinplate, und zwar jeweils für hohes und für niedriges Oberwasser. Die aus diesen Regressionen ermittelten Gleichgewichtstiefen-Mittelwerte für die Unterelbe sind in der Tabelle 7 zusammengefaßt. Zusätzlich sind die HST-Niveauunterschiede für die Zeiträume hoher und niedriger Oberwasserführung angegeben.

Im folgenden wird jedoch noch gezeigt werden, daß der aus einer Unterschreitung von Gleichgewichtstiefen resultierende erhöhte 'Sediment-Hunger' nicht automatisch eine Erhöhung der Ablagerungsraten bewirken muß.

Hohes Oberwasser:



Lineare Regression (N = 770):

$$y = a + bx$$

$$a = -273,6$$

$$b = -16,2$$

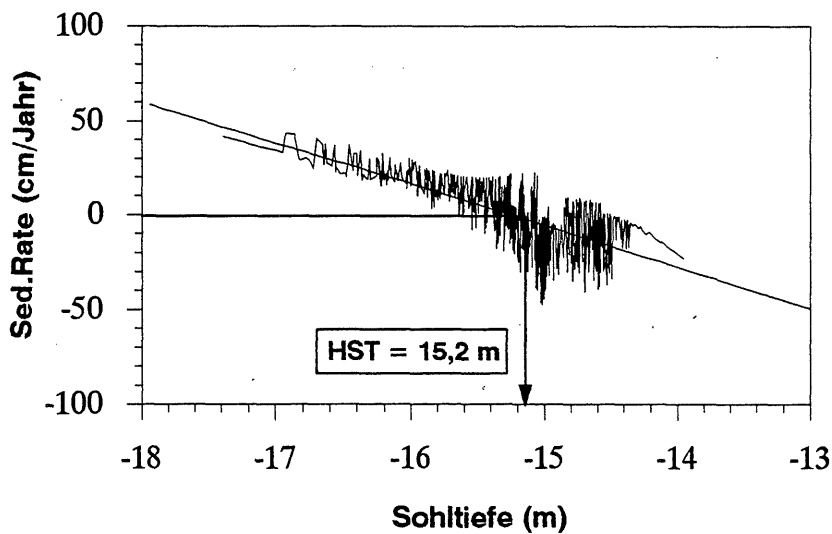
Korrelationskoeffizient:

$$r = 0,68$$

Irrtumswahrscheinlichkeit:

$$p < 0,001 \%$$

Niedriges Oberwasser:



Lineare Regression (N = 770):

$$y = a + bx$$

$$a = -334,1$$

$$b = -21,9$$

Korrelationskoeffizient:

$$r = 0,75$$

Irrtumswahrscheinlichkeit:

$$p < 0,001 \%$$

Abbildung 8:

Grafische Ableitung der 'Hydrodynamisch Stablen Gleichgewichtstiefe (HST)' aus der Korrelationsbeziehung zwischen der Sohlentiefe und der Ablagerungsrate in einem Mikrofeld des untersuchten Peilabschnittes der Rhinplate in der Unterelbe bei hohem und niedrigem Oberwasser.

Tabelle 7:

Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefen (HST) in den untersuchten Peilabschnitten der Unterelbe, errechnet aus der Korrelationsbeziehung zwischen der Sohltiefe und der Ablagerungsrate in den einzelnen Mikrofeldern. Es sind jeweils die Mittelwerte für die gesamten Peilabschnitte angegeben. Die Standardabweichung dieser Mittelwerte ist kleiner als 10%.

Unterelbe-Abschnitt	HST (m u. KN) bei hohem Oberwasser	HST (m u. KN) bei niedrigem Oberwasser	Differenz (m)	Solltiefe (m u. KN)
km 639-642 (Wedeler Au)	15.9	15.2	0.7	13.5
km 652.5-653.5 (Juelssand)	14.9	13.5	1.4	13.6
km 675-676 (Rhinplate)	15.6	14.4	1.2	13.6
km 700-701 (Osteriff)	13.8	13.8	0	13.7

Übertiefenbaggerungen – ein sinnvolles oder kontraproduktives Verfahren ?

Die theoretisch unstrittige mathematische Beziehung zwischen der Ablagerungsrate und Sohltiefe suggeriert, daß in Flußabschnitten mit künstlichen Übertiefen permanent besonders hohe Ablagerungsraten auftreten müßten. Wenn dies so ist, dann folgt daraus, daß Vorratsbaggerungen nur kurzfristig ein tiefes Fahrwasser gewährleisten und daß als Folge insgesamt die zu baggern- den Sedimentmengen überproportional steigen. Folgt man dieser Überlegung, dann wären Vorratsbaggerungen generell kontraproduktiv, weil sie nicht dazu beitragen können, den Unterhaltungsaufwand insgesamt, wie eigentlich beabsichtigt, zu senken.

Die Tatsache, daß Vorratsbaggerungen dennoch häufig praktiziert werden, läßt vermuten, daß die theoretisch zu erwartende schnelle Verlandung der 'produzierten' Übertiefen zumindest nicht in jedem Flußabschnitt zu beobachten ist. Weiterhin ist bekannt, daß gerade in der stark vertieften Unterelbe an bestimmten Lokalitäten permanent Übertiefen vorhanden sind, die, folgt man den Ergebnissen dieser Arbeit, eigentlich nicht existieren dürften.

Es stellt sich also die Frage, ob die festgestellte enge Kopplung der Ablagerungsintensität an die Sohltiefe nur ein mathematisches Konstrukt (z.B. eine Scheinkorrelation) ist oder nur unter bestimmten Randbedingungen gilt, die dann zumindest im Stromspaltungsgebiet der Elbe Gültigkeit haben.

Einen ersten Hinweis zur Beantwortung dieser Frage geben grundsätzliche Überlegungen zur Funktionsweise kybernetischer Regelkreise. So besteht der durch die Vielzahl der Faktorenwirkungen herbeigeführte Gleichgewichtszustand eines Systems nur solange, wie dessen Stabilität durch die Dominanz negativer feed-back-Effekte gewährleistet wird, und er endet dann, wenn vermehrt positive Rückkopplungen auftreten, die nicht mehr ausgeglichen werden können ¹².

Im vorliegenden Fall bedeutet dies: nur solange ausreichende Mengen 'transportablen' Sedimentmaterials in der Umgebung der Übertiefe vorhanden sind, kann der 'Sediment-Hunger' der Sohle auch gestillt, also Feststoffe abgelagert werden. Für den lokalen Ablagerungsprozeß ist es daher entscheidend, ob entsprechende Feststoffmengen durch Erosion aus Seitenräumen (Fluß) oder Leebereichen (Küste) 'verfügbar' gemacht oder verstärkt durch Oberwasserwellen von 'oben' oder bei niedrigem Oberwasser und Sturmfluten von 'unten' angeliefert werden können. Bleibt dagegen die Materialzufuhr aus, so muß sich die Flußsohle zwangsläufig auf einem tieferen Niveau stabilisieren, in dessen Folge das System einen neuen Gleichgewichtszustand erreicht.

¹² Unter negativem feed-back versteht man eine Rückkopplung zwischen zwei Faktoren, die dazu führt, daß die Wirkung des ersten Faktors Reaktionen des anderen Faktors auslöst, die eine Abschwächung der Wirkung des ersten Faktors verursachen. Ein typisches Beispiel ist die in Abbildung 5 dargestellte Kopplung der Ablagerungsrate an das Sohliefenniveau. Derartige Rückkopplungen sind unerlässlich zur Stabilisierung von Gleichgewichtszuständen in der Natur.

Positives feed-back zwischen zwei Faktoren bedeutet immer eine gegenseitige Wirkungsverstärkung. Sie ist die Ursache schneller dynamischer Zustandsänderungen, die entweder aufgrund der Kopplung an Regelkreise übergeordneter Hierarchie-Ebenen in einen neuen Gleichgewichtszustand münden oder aber die unwiederbringliche Zerstörung des System zur Folge haben.

Im Stromspaltungsgebiet wird dieser Effekt besonders im Peilfeld 203.IV im stromaufliegenden Ende der stärker vertieften Süderelbe bei Stromkilometer 615 deutlich. Die morphologischen Analysen zeigen, daß dort der Nachschub von Feststoffmaterial vor allem bei hohem Oberwasser erfolgt (Abbildung 9). Bei geringem Oberwasser reicht der stromabgerichtete Transport dagegen nicht aus, um die Sohle im vertieften Abschnitt auf dem HST-Niveau der stromaufliegenden Bereiche zu stabilisieren. Im Gegenteil, es erfolgt dort selbsttätig eine Vertiefung der Sohle durch rückschreitende Erosion (Abbildung 10). Dies bedeutet nichts anderes, als daß der Sedimentbedarf des vertieften Flußabschnittes stromauf 'weitergereicht' wird, wobei dessen Intensität sukzessive abnimmt, so daß letztlich eine stetige Angleichung der Flußsohle an die HST-Niveaus beider Stromabschnitte erfolgt.

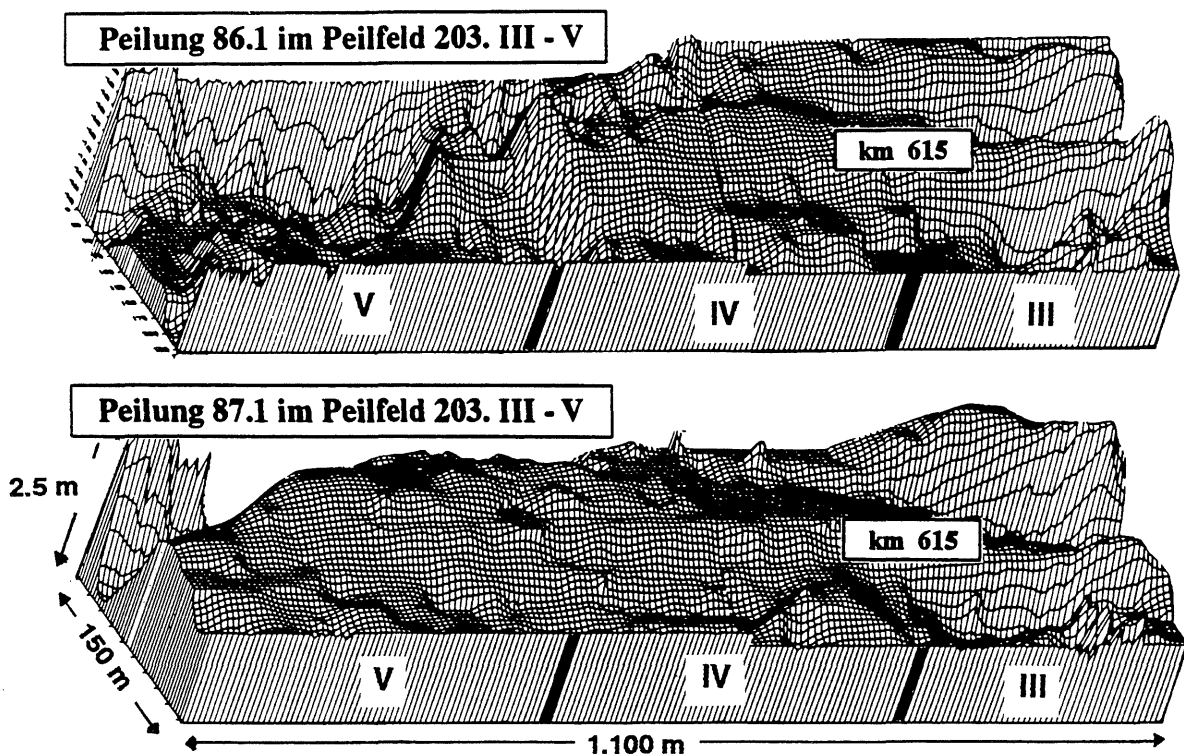
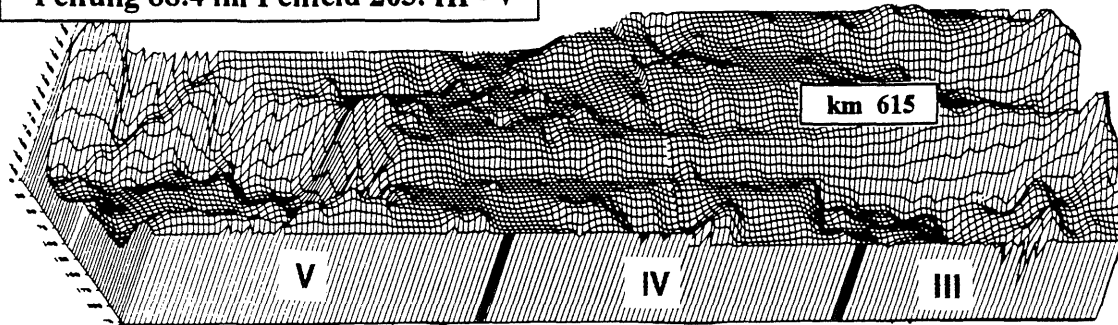


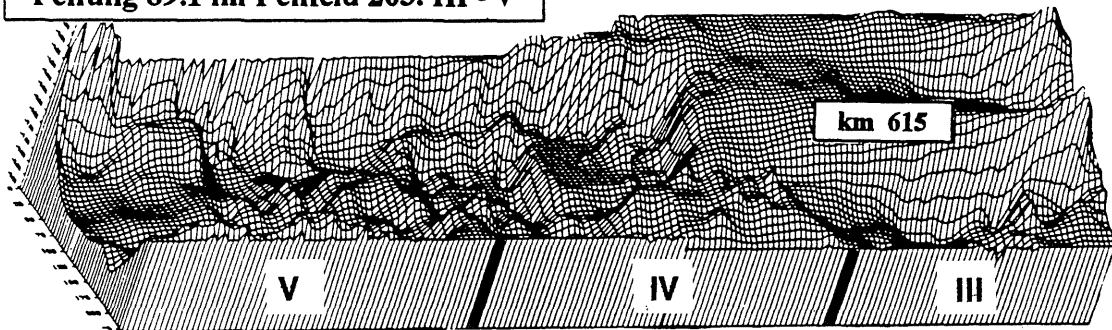
Abbildung 9:

Veränderungen der Flußsohle der Süderelbe im Übergang zum stärker vertieften Bereich bei Stromkilometer 615 nach dem Durchgang einer Oberwasserwelle. Der in Stromabrichtung erfolgte Sedimenteintrag ist deutlich erkennbar und hat zu einer Angleichung der Sohliefenniveaus in diesem Elbabschnitt geführt. Die Peilungen erfolgten im August 1986 und im März 1987.

Peilung 88.4 im Peilfeld 203. III - V



Peilung 89.1 im Peilfeld 203. III - V



Peilung 89.2 im Peilfeld 203. III - V

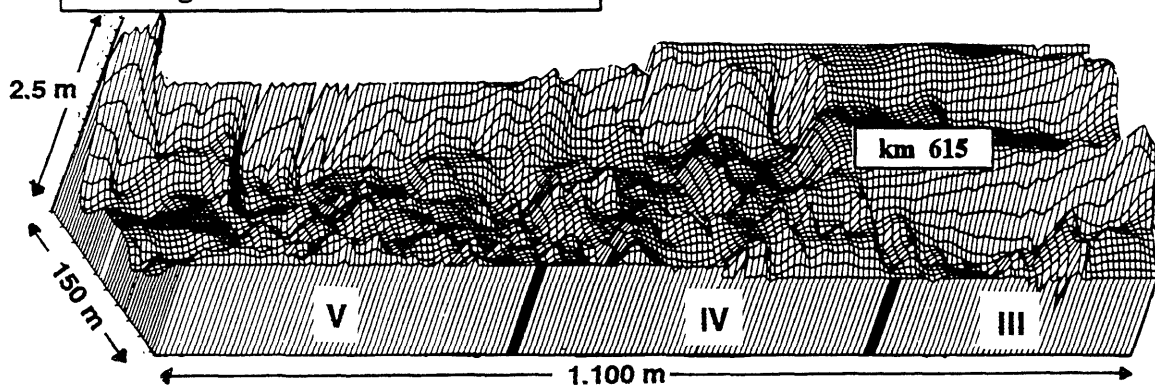


Abbildung 10 :

Veränderungen der Flußsohle der Süderelbe im Übergang zum stärker vertieften Bereich bei Stromkilometer 615 nach einer längeren Phase niedriger Oberwasserführung. Die in Stromaufrihtung fortschreitende Erosion ist deutlich erkennbar und bewirkt langfristig eine Angleichung der Sohliefenniveaus durch 'interne Sedimentumlagerungen' und zwar, bezogen auf den stromaufliegenden Bereich, auf einem tieferen Sohliefenniveau. Die Peilungen erfolgten im Oktober 1988, März 1989 und September 1989.

Dieser Vorgang erklärt, daß Übertiefen dann über längere Zeit existent sein können, wenn die 'externe Feststoffzufuhr' gering ist und zwar so gering, daß das HST-Niveau der Sohle nicht mit der eigentlich 'mathematisch geforderten' Geschwindigkeit wiederhergestellt werden kann. Insofern können Übertiefenbaggerungen durchaus sinnvoll sein, wenn sie zur richtigen Zeit, z.B. nach

Oberwasserwellen (z.B. im stromaufliegenden Bereich der Norder- und Süderelbe) und fernab von mobilisierbaren Sedimentdepots, vorgenommen werden.

Übertiefen - 'Hydrodynamische schwarze Löcher' ?

Offensichtlich ist aber in der Elbe, wie gerade auch die Unterelbebaggermengen zeigen, kein Mangel an transportfähigem Sedimentmaterial vorhanden ¹⁵. Es scheint aber so zu sein, daß die Feststoffe sich nur an bestimmten Lokalitäten tatsächlich ablagern können, z.B. an den von den WSA Hamburg und Cuxhaven ausgewiesenen Hauptbaggerstellen Einmündung Wedeler Au, Juelssand, Rhinplate und Oste-Riff. Weiterhin ist, wie schon erwähnt, davon auszugehen, daß in der Unterelbe zumindest zeitweise ein weitreichender Feststofftransport in Stromaufrichtung stattfindet, in dessen Folge - legt man die Baggermengen zugrunde - auch vorhandene Übertiefen verlanden müßten.

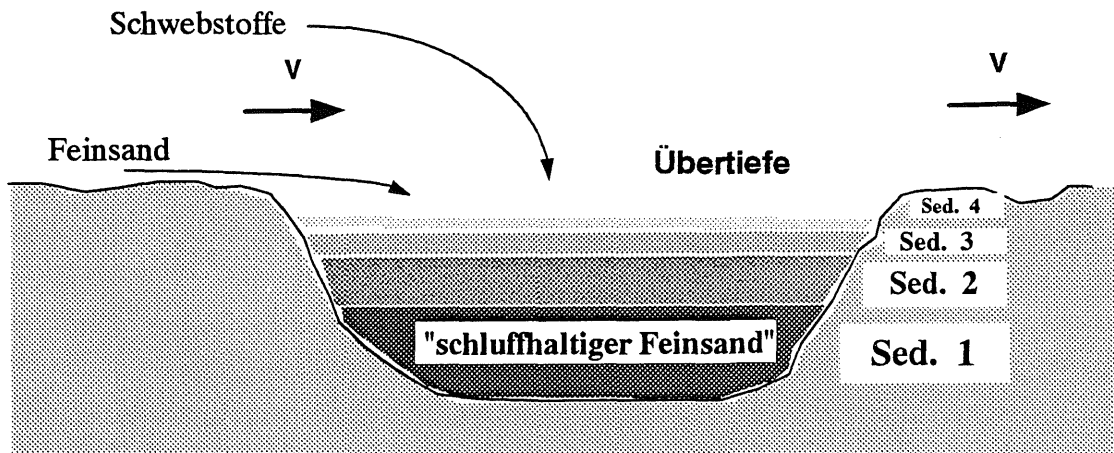
Bei dieser Überlegung muß bedacht werden, daß die Ablagerung von Feststoffen nicht nur vom 'Sedimentbedarf' der Sohle und von der verfügbaren Feststoffmenge abhängt, sondern auch von der Sinkgeschwindigkeit und Erodierbarkeit der Feststoffe. Ist die Sinkgeschwindigkeit gering, genügen bereits geringe Strömungsgeschwindigkeiten, um das Material in Schwebelage zu halten. Ist die Sinkgeschwindigkeit hoch, dann können nur vergleichsweise geringe Feststoffmengen verfrachtet werden. Diese prinzipielle Kopplung des Ablagerungsgeschehens an die Verfügbarkeit von zur Sedimentation bzw. Erosion befähigten Feststoffen (Sedimente und Schwebstoffe) ist in Abbildung 11 dargestellt.

Vermutlich sind die Strömungsgeschwindigkeiten in vielen Bereichen der Unterelbe so hoch und die Transporteigenschaften der Feststoffe so beschaffen, daß an vielen Lokalitäten keine dauerhafte Ablagerung von Sedimentmaterial möglich ist. Da offensichtlich andererseits die Strömungsgeschwindigkeiten zu gering sind, um zur Ablagerung befähigtes gröberes Material auf natürlichem Wege in die vorhandenen Übertiefen zu verfrachten, bleiben diese bestehen.

¹⁵ Die jährlichen Unterhaltungsbaggermengen betragen in der Unterelbe lt. Angabe des WSA Hamburg durchschnittlich 12,5 Mio m³ und im Hamburger Hafen (Hafenbereich und Elbe) werden jährlich ca. 3 Mio. m³ Schlick und Sand gebaggert.

Die vorhandenen feinkörnigeren Feststoffe haben demnach, physikalisch betrachtet, nur die Möglichkeit in Form hochkonzentrierter Feststoffsuspensionen solange und soweit (oberwasserabhängig) stromauf- und stromab zu wandern, bis sie in Bereiche gelangen, wo das Strömungsregime ihre Ablagerung zuläßt.

(a)



(b)

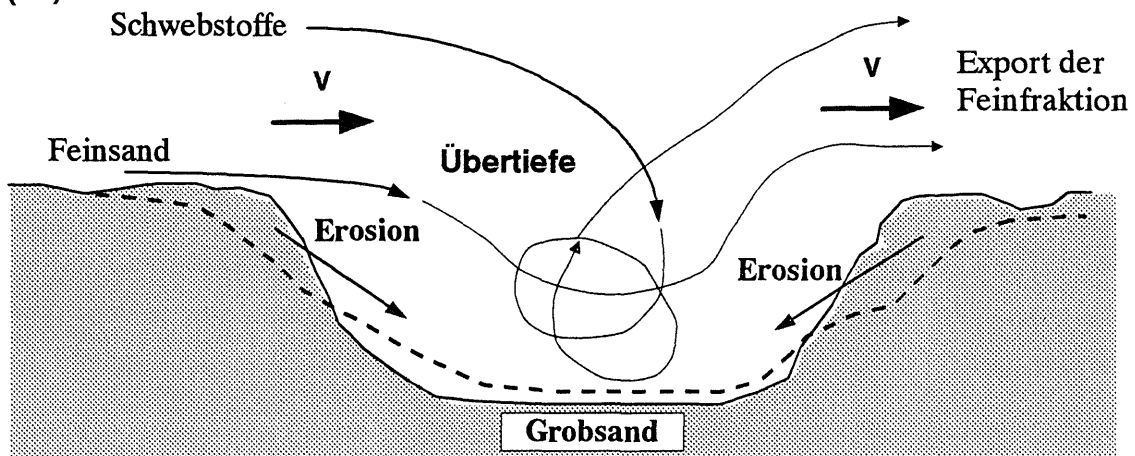


Abbildung 11:

Prinzipieller Zusammenhang zwischen der Materialverfügbarkeit (Sedimente und Schwebstoffe), dessen Transporteigenschaften (Erosions- und Sinkverhalten) und den Erosions- und Ablagerungsraten in Flußabschnitten mit unterschiedlichen hydrodynamischen Randbedingungen:

- (a) Geringe Strömungsgeschwindigkeiten
- (b) Starke Strömungen bzw. Turbulenzen

Daß derartige "vagabundierende schluffige Feinsande" tatsächlich in der Unterelbe existieren, belegen die ständigen Peilungen des WSA Hamburg (Bernhard, 1994 ¹³⁾). Diese Überlegungen machen deutlich, warum selbst regelmäßiges gezieltes Verklappen von Baggergut in Übertiefen nicht dazu führt, daß diese verlanden. Sie besitzen somit - aus baggerpraktischem Blickwinkel betrachtet - eine 'unbegrenzte Aufnahmekapazität'.

An den Baggerschwerpunkten der Unterelbe kann davon ausgegangen werden, daß kein Mangel an sedimentierbaren Feststoffen besteht (sonst müßte dort nicht so viel gebaggert werden). Damit würden Übertiefenbaggerungen dort den Sedimentationsprozeß nur beschleunigen.

Für den Hamburger Hafen kann davon ausgegangen werden, daß im stromaufliegenden Teil der Norder- und Süderelbe Übertiefen nur zu Zeiten niedrigen Oberwassers bestehen bleiben und im stromabliegenden Teil nur zu Zeiten hohen Oberwassers. Betrachtet man die gesamte Tideelbe, dann führen die hydraulischen Randbedingungen dazu, daß letztlich der Hamburger Hafen das finale Ablagerungsgebiet für einen großen Teil der stromab- und stromauftransportierten Feststoffe darstellt.

Insofern stehen die im Stromspaltungsgebiet geltenden Zusammenhänge nicht im Widerspruch zu anderslautenden Beobachtungen in der Unterelbe oder den praktischen Erfahrungen mit Vorratsbaggerungen an anderen Tideflüssen. Die beschriebenen Diskrepanzen geben nur Hinweise auf Randbedingungen, unter denen die in dieser Arbeit herausgefundenen Gesetzmäßigkeiten zum Ablagerungsgeschehen in der Elbe Gültigkeit haben und die dann auch möglicherweise auf andere, noch nicht untersuchte, Elbabschnitte und Flüsse übertragbar sind.

¹³⁾ Bernhard M. 1994; pers. Mitteilungen

2. 4. 3 Schlußfolgerungen und Prognose

Das Oberwasser als gleichgewichtsbestimmender Faktor

Wie bereits ausgeführt, steuert das Oberwasser maßgeblich die Feststoffzufuhr aus der oberen Tideelbe. Diese Wirkung ist nur möglich, wenn mit einer Erhöhung der Abflußmenge auch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten verbunden ist. Aus den langjährigen Messungen des Amtes Strom- und Hafenbau bei Bunthaus ('FLORA-Anlage') wird erkennbar, daß dies tatsächlich der Fall ist:

Bei hohen Abflüssen liegen dort die maximalen und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe deutlich höher als bei niedrigen Abflußwerten (s. Tabelle Nr. 4 im Anhang):

Bei Abflußwerten um $200 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen die entsprechenden Werte $0,89 \text{ m/s}$ (Maximum) und $0,74 \text{ m/s}$ (Mittelwert), bei Abflüssen $> 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ treten maximale Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu $1,69 \text{ m/s}$ auf und die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten liegen zumeist über 1 m/s . Außerdem tritt nach Berechnungen des DANISH HYDRAULIC INSTITUT bei Abflüssen $> 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ kein Flutstrom mehr auf, so daß dadurch der Stromabtransport von Sedimentmaterial zusätzlich verstärkt wird. Dieser Transporteffekt wird besonders am Parameter 'Stromweg' erkennbar, er erhöht sich dann um den Faktor 5 (s. Tabelle 4 im Anhang).

Die Erkenntnisse lassen den Schluß zu, daß sich in der Norder- und Süderelbe in Abhängigkeit vom Oberwasser unterschiedliche Gleichgewichtszustände der Flußsohle einstellen müßten. Exemplarische Berechnungen der HST-Werte getrennt für hohes und für niedriges Oberwasser für die Süderelbe bestätigen das postulierte Ergebnis:

Bei verringertem Nachschub von Sedimentmaterial, also bei niedrigem Oberwasser, liegen die HST-Werte im Hauptablagerungsgebiet (Peilabschnitt 204, s. Tabelle 3) fast ausschließlich tiefer als bei hohem Oberwasser (s. Tabelle 7). Im unterelbenahen Bereich des Stromspaltungsgebietes scheint es dagegen "umgekehrt" zu sein, wie das Beispiel des Peilfeldes 107 aus der Norderelbe zeigt (s. Tabelle 8).

Tabelle 7:

Vergleich der Hydrodynamisch Stablen Gleichgewichtstiefen (HST) in den Mikrofeldern des Peilfeldes 204 (Süderelbe), errechnet für Zeiträume hoher und niedriger Oberwasserführung. Angegeben sind jeweils Mittelwerte für die a-, b- und c-Streifen (die Standardabweichung ist bis auf einzelne Ausnahmen < 5%). In diesem Peilfeld zeigt sich vor allem im stromaufliegenden Teil eine deutliche Tendenz zur Anhebung des Sohlniveaus bei hohem Oberwasser.

Peilfeld	HST bei hohem Oberwasser (m u. KN)			HST bei niedrigem Oberwasser (m u. KN)		
	Mikrofeldstreifen			Mikrofeldstreifen		
Nr.	a	b	c	a	b	c
204.I	8,8	9,1	9,3	10,0	10,4	10,5
204.II	9,8	10,4	10,8	11,5	11,9	12,4
204.III	10,2	10,9	11,0	11,1	11,5	11,4
204.IV	9,4	10,2	10,6	10,1	10,6	10,7
204.V	9,8	11,9	11,8	10,9	11,9	11,6
204.VI	9,7	11,4	11,5	10,6	11,6	11,5
204.VII	10,9	11,3	10,4	10,8	11,2	10,4

Tabelle 8:

Vergleich der Hydrodynamisch Stablen Gleichgewichtstiefen (HST) in den Mikrofeldern des Peilfeldes 107 (Norderelbe), errechnet für Zeiträume hoher und niedriger Oberwasserführung. Angegeben sind jeweils Mittelwerte für die a-, b- und c-Streifen, (die Standardabweichung ist bis auf einzelne Ausnahmen < 5%; für einzelne Mikrofeldstreifen "-" ließen sich keine statistisch signifikanten HST-Werte ermitteln). In diesem Peilfeld zeigt sich durchgehend eine deutliche Tendenz zur Vertiefung der Sohle bei hohem Oberwasser.

Peilfeld	HST bei hohem Oberwasser (m u. KN)			HST bei niedrigem Oberwasser (m u. KN)		
	Mikrofeldstreifen			Mikrofeldstreifen		
Nr.	a	b	c	a	b	c
107.I	11,7	11,6	11,5	11,0	10,8	10,3
107.II	11,5	-	11,9	11,2	10,8	10,4
107.III	11,7	11,6	11,8	11,2	10,8	10,6
107.IV	11,8	11,7	11,9	-	10,8	10,6
107.V	12,2	12,0	12,0	-	-	10,6
107.VI	12,3	11,8	11,8	12,1	-	10,5
107.VII	12,4	11,8	10,0	12,0	-	10,0

Für den entsprechenden Peilabschnitt der Süderelbe (Feld 206) liegen leider keine separaten Werte für Phasen hoher und niedriger Oberwasserführung vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß auch dort die HST-Werte bei niedrigem Oberwasser höher sind, weil vermutlich, wie bereits ausgeführt, die Sohle bei hohen Abflußwerten auf einem tieferen Niveau stabilisiert wird und zwar durch die Abschwächung des stromaufgerichteten Transportes von Sedimentmaterial.

Die Unterschiede zwischen beiden HST-Niveaus betragen allerdings jeweils nur wenige dm, so daß im Stromspaltungsgebiet für alle weiteren Berechnungen eine (mittlere) Gleichgewichtstiefe zugrundegelegt werden kann.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, daß die Ablagerung von Sedimentmaterial im wesentlichen das gemeinsame Ergebnis der Oberwasser/Tide- und der 'HST-Wirkung' (Faktor Sohltiefe) ist. Diese beiden Faktoren erklären, wenn man sie den Hauptkomponenten I und II aus Tabelle 4 zuordnet, bis zu etwa 90% der Varianz des Ablagerungsgeschehens. Dabei übernimmt das Oberwasser die Rolle eines Modulators, indem es die Verfügbarkeit des von der Flußsohle 'geforderten' Feststoffmaterials steuert. Die Gleichgewichtstiefe setzt dagegen die obere Grenze für die Ablagerungsgeschwindigkeit. Diese ist umso höher, je stärker die durch Baggerungen aufrechterhaltene aktuelle Sohltiefe die Gleichgewichtstiefe unterschreitet.

Für das Stromspaltungsgebiet folgt daraus, daß nur bei der Überschreitung bestimmter Abflußwerte die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe so stark ansteigen, daß vorher lagestabile Feststoffe stromabtransportiert werden. Der Grenzwert dafür liegt etwa im Bereich von ca. $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der dadurch ausgelöste Transfer von Sohlmaterial kann sich jedoch nicht - oder nur bei über eine lange Zeit andauernden extrem hohen Abflüssen - bis zur Unterelbe fortsetzen, weil dort aufgrund der in Stromaufrichtung zunehmenden 'Verformung der Tidekurve' (steilerer und höherer Anstieg der Flutstromgeschwindigkeiten im Vergleich zum Ebbstrom) die Transportkraft des Flutstroms für Feststoffe mit hohen Sinkgeschwindigkeiten größer ist. Meßbare Stromabverlagerungen von Sedimentmaterial durch hohes Oberwasser dürften deshalb dort erst bei noch höheren Abflußwerten auftreten.

Für den Feststofftransport im Stromspaltungsgebiet folgt aus diesen Überlegungen, daß sich bei hohem Oberwasser im stromabliegenden Teil der Norder- und Süderelbe die Ablagerungsraten verringern. Die höchsten Ablagerungsraten treten deshalb dort bei geringem Oberwasser auf.

Andererseits reicht der Materialtransfer aus der Unterelbe nicht aus, um im stromaufliegenden Teil der Norder- und Süderelbe die 'Feststoffdefizite' auszugleichen, die dort bei niedrigen Abflüssen durch eine verringerte Feststoffzufuhr aus der oberen Tideelbe verursacht werden. Die durch Baggerungen aufrechterhaltenen Sohliefengradienten 'versuchen' sich deshalb durch interne Sedimentumlagerungen auszugleichen. Dies geschieht, wie Abbildung 10 verdeutlicht, durch rückschreitende Erosion.

Der bereits in der Süderelbe erkennbare Trend zur Manifestierung unterschiedlicher HST-Niveaus bei hohem und niedrigem Oberwasser setzt sich tatsächlich, wie aus Tabelle 7 ersichtlich, in der Unterelbe fort. Geringes Oberwasser verstärkt dort demnach die Sedimentation, hohes Oberwasser dagegen die Erosion, so daß die Sohle bei geringem Oberwasser bis zu 1,5 m höher liegt. Lediglich am Osteriff ist dieser Oberwasser/Tideeffekt nicht mehr nachweisbar.

Diese Ergebnisse bedeuten, daß in der Unterelbe ein ständiger Materialtransfer zwischen einzelnen Stromabschnitten stattfindet, wobei die untersuchten Hauptbaggerstellen (bis auf das Osteriff) bei niedrigem Oberwasser primär als Materialsenke wirken und bei hohem Oberwasser als Sedimentquelle. Die Streuung der Ablagerungsraten zeigt (s. Abbildung 8), daß diese durch den HST-Wert bestimmten Gleichgewichtszustände in Wirklichkeit einer großen Dynamik unterliegen, wobei sich Phasen erhöhter Sedimentation und Erosion abwechseln.

Diese ständigen Sedimentumlagerungen sind natürlich auch am Osteriff vorhanden, nur scheint die Transportdynamik dort so groß zu sein, daß Situationen hoher und niedriger Oberwasserführung keine über längere Zeit stabile mittlere Sohliefenniveaus herbeiführen. Insofern können diese auch nicht mit Hilfe statistischer Kriterien als unterschiedliche HST-Niveaus ausgewiesen werden.

In den anderen Unterelbeabschnitten scheinen dagegen oberwasserabhängige Sohlniveaus über längere Zeiträume zu bestehen, mit dem Resultat, daß dort bei geringem Oberwasser die größten Baggermengen anfallen.

In Tabelle 9 ist der bei niedrigem Oberwasser aus den unterschiedlichen HST-Niveaus resultierende mittlere Sedimentüberschuß für die untersuchten jeweils 1 km langen und 250 m breiten Peilabschnitte angegeben. Rechnet man mit einem Mittelwert von 125.000 m^3 mobilisierbarem Sedimentmaterial pro Flußkilometer, dann müßten zur Herstellung der berechneten HST-Niveaus im gesamten Unterelbeabschnitt von Wedel (km 640) bis zur Störmündung (km 680) in einem Zeitraum von 6 Monaten Netto jeweils 5 Mio m^3 Sediment stromauf (bei niedrigem Oberwasser) oder stromab (bei hohem Oberwasser) verlagert werden.

Dieser Wert darf nicht dem tatsächlichen Feststoffumsatz pro Zeiteinheit (Tage, Wochen oder Monate) verwechselt werden. Er gibt lediglich im Sinne einer Bilanz an, wieviel Sedimentmaterial in den ausgewerteten Peilzeiträumen verlagert werden müßte, um von dem einem zum anderen Systemzustand zu gelangen.

Um den tatsächlichen, z.B. täglichen Feststoffumsatz in einzelnen Elbabschnitten ermitteln zu können, müßten Peilungen ausgewertet werden, die wesentlich enger aufeinanderfolgen als diejenigen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens analysiert wurden. Dies müßte darüberhinaus eine wesentlich größere Anzahl sein, um genügend Einzelergebnisse für unterschiedliche Oberwassersituationen zu erhalten. Es ist jedoch mit Sicherheit keine Fehlspekulation, daß das Feststoffangebot in der Unterelbe wesentlich größer ist als im Hamburger Stromspaltungsgebiet und daß daher ein lokaler Sedimentbedarf der Flußsohle, z.B. nach einer Vertiefung, auch schneller befriedigt wird.

Tabelle 9:

Ablagerungsraten und daraus resultierende zusätzliche Sedimentmengen bei einem Wechsel von jahreszeitlichen Abschnitten mit hoher Oberwasserführung (Winter und Frühjahr) zu einer Phase, in der geringe Abflüsse überwiegen (Sommer und Herbst) in den untersuchten Peilabschnitten der Unterelbe.

Unterelbe-Abschnitt	Veränderung der Ablagerungsraten	Erhöhung der Sedimentmengen
km 639-642 (Wedeler Au)	+ 7 dm/a	87.500 m³
km 652.5-653.5 (Juelsssand)	+ 14 dm/a	175.000 m³
km 675-676 (Rhinplate)	+ 9 dm/a	112.500 m³
km 700-701 (Osteriff)	± 0 dm/a	± 0 m³

Was bedeuten die Arbeitsergebnisse für die Praxis ?

Geht man von dem Projektziel aus, Peildaten für Prognosen der Ablagerungsdynamik nutzbar machen zu wollen, dann sind mit der vorliegenden Arbeit bereits zwei wichtige 'Etappenziele' erreicht worden:

1. Mit Hilfe relativ einfacher statistischer Verfahren konnte gezeigt werden, welche Wirkfaktoren für derartige Prognosen zu berücksichtigen sind und welche Abhängigkeiten zwischen diesen Faktoren bestehen.

Als anfangs nicht erkannter zentraler Faktor des Wirkungsgefüges wurde die 'Aktuelle Sohltiefe' identifiziert. Deren Wirkung wird durch die gedankliche Einführung und mathematische Definition der 'Hydrodynamisch Stabilen Gleichgewichtstiefe (HST)' erkennbar und quantifizierbar.

2. Das skizzierte Ursache-Wirkungsgefüge erklärt, warum und unter welchen Bedingungen Änderungen im Ablagerungsgeschehen auftreten, und es liefert die Basis für erste quantitative Betrachtungen,

beispielsweise:

1. Deutliche Erhöhungen der Ablagerungsraten durch hohes Oberwasser sind großräumig in der Süderelbe nur im Bereich der Peilfelder 203.4 bis 204.7 (Stromkilometer 615 - 618) nachweisbar. Die stärksten Sedimentablagerungen treten somit im Bereich des stromaufliegenden Solltiefengradienten auf. Sie betragen dort zwischen 9 und 40 dm/a (s. Tabelle 10), weiter stromab dagegen maximal nur 2 bis 6 dm/a.

Zur Einschätzung dieser Werte sei darauf hingewiesen, daß aufgrund der unterschiedlichen Peilabstände für einen Datenvergleich alle peilintervallbezogenen Ablagerungsraten auf gleiche Zeiträume 'normiert' werden mußten. Es wurde dafür der Bemessungszeitraum 1 Jahr gewählt, weil die ausgewerteten Peilintervalle am häufigsten Zeiträume in dieser Größenordnung umfassen. Da die Ablagerungsprozesse, wie bereits mehrfach im Text erwähnt, zeitlich nicht linear verlaufen, ist davon auszugehen, daß die realen Ablagerungsraten kurzzeitig vielfach höher sind, die Ablagerung aber auch mit dem Erreichen der Gleichgewichtstiefe beendet ist.

Nach Einschätzung der Autoren hätte jedoch eine lineare Extrapolation der Ablagerungsraten kurzzeitiger Peilintervalle auf lange Zeiträume gravierendere Fehleinschätzungen der Ablagerungsdynamik zu Folge gehabt, so daß der Bemessungszeitraum "1 Jahr" beibehalten wurde.

Beim vorliegenden Stand der Datenauswertung muß deshalb noch offenbleiben, inwieweit die angegebenen Ablagerungsraten auf kürzere oder längere Zeiträume extrapoliert werden können. Zur Klärung dieser Frage müßten zukünftig exemplarisch Peilungen in möglichst kurzen Zeitabständen (z.B. wöchentlich) bei unterschiedlichen Oberwassersituationen durchgeführt oder entsprechende Datensätze ausgewertet werden.

2. Eine lokale Erhöhung der Ablagerungsraten bei niedrigem Oberwasser ist im stromabliegenden Teil des Stromspaltungsgebietes (km 622 - 624) feststellbar. Im Peilfeld 206 steigen die Ablagerungsraten im Vergleich zum Peilfeld 205 deutlich an (s. Tabelle 11). Dieser Trend setzt sich in der Unterelbe fort und ist lediglich nahe der Elbmündung nicht mehr nachweisbar.

3. Mit Hilfe der erarbeiteten Methode zur Ermittlung von HST-Werten kann die Wirkung möglicher Fahrwasservertiefungen in der Elbe auf die Ablagerungsintensität abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung der unter (1.) gemachten Anmerkungen über die Berechnung der in dieser Arbeit aufgeführten Ablagerungsraten, hätte z.B. eine angenommene Vertiefung des Köhlbrand um 1 m eine mittlere Erhöhung der Sedimentation um 8 dm/a zur Folge (s. Tabelle 12).
4. Anhand der HST-Werte kann weiterhin entsprechend abgeschätzt werden, in welchen Abschnitten des Stromspaltungsgebietes Vorratsbaggerungen eine sinnvolle Strategie zur Verringerung des Unterhaltungsaufwandes sein können, bzw. bis zu welchen Sohliefenniveaus hergestellte Übertiefen nur eine unbedeutende Erhöhung der Ablagerungsraten hervorrufen.

Tabelle 10:

Ablagerungsraten in der Süderelbe während einer Phase hoher Oberwasserführung im Februar bis Mai 1988. Für den Peilabschnitt 206 sind keine Peildaten für diese oder vergleichbare Oberwassersituationen vorhanden. Die Oberwasserführung ist auf der folgenden Seite dargestellt.

Ablagerungsraten nach einer Oberwasserwelle		
Strom-km	Peilfeld	Ablagerungsrate (dm/Jahr)
613.5	203.I	- 0.3
614.0	203.II	- 0.3
614.5	203.III	1.8
615.1	203.IV	9.4
615.6	203.V	13.9
616.0	204.I	8.7
616.4	204.II	40.7
616.9	204.III	17.5
617.3	204.IV	15.1
617.6	204.V	12.1
618.0	204.VI	13.9
618.5	204.VII	10.4
618.9	205.I	3.0
619.1	205.II	4.2
619.4	205.III	4.1
619.7	205.IV	5.6
620.0	205.V	3.3
620.2	205.VI	- 0.2
620.5	205.VII	0.3
620.9	205.VIII	2.0

* vergleiche auch
mit Tabelle 11

Tabelle 11:

Ablagerungsraten im stromabliegenden Abschnitt der Süderelbe während einer Phase niedriger Oberwasserführung im Mai bis September 1991. Zusätzlich ist die Oberwasserführung (Neu Darchau) in einer Grafik dargestellt.

Ablagerungsraten nach einer Phase niedrigen Oberwassers		
Stromkilometer	Peilfeld	Ablagerungsrate (dm/a)
618,9	205.I	1,8
619,1	205.II	0,8
619,4	205.III	0,1
619,7	205.IV	1,8
620,0	205.V	- 0,6
620,2	205.VI	2,0
620,5	205.VII	- 0,5
620,9	205.VIII	- 2,8
621,5	206.I	0,1
622,0	206.II	2,3
622,5	206.III	7,2
622,9	206.IV	4,2
623,3	206.V	0,7
623,7	206.VI	4,9

* vergleiche auch
mit Tabelle 10

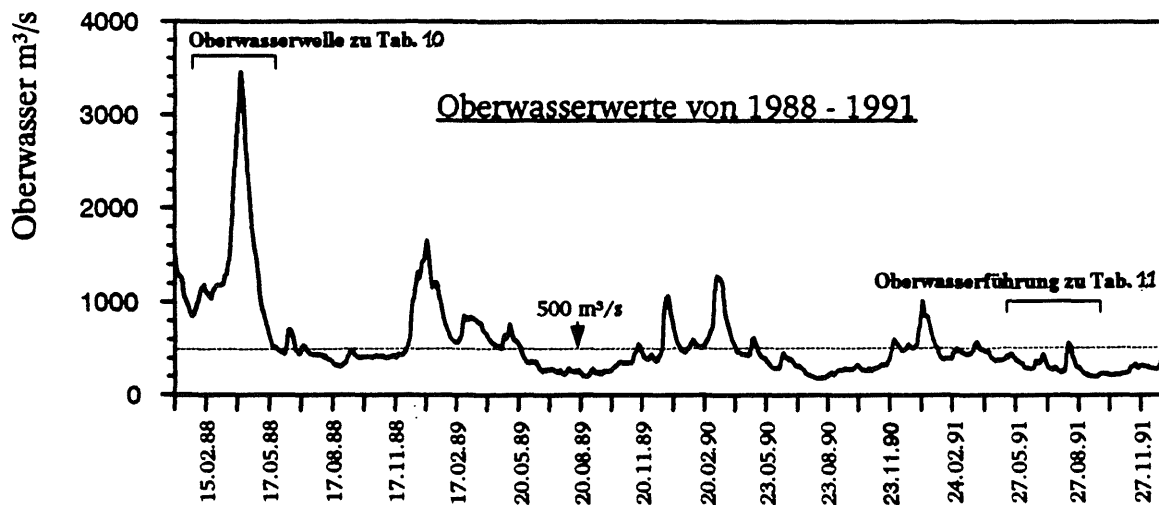


Tabelle 12:

Ablagerungsraten (in dm/a) in der Süderelbe im Peilabschnitt 206 für die Solltiefe 13,5 m (alle Tiefenangaben beziehen sich auf KN) und eine angenommene Tiefe der Sohle von 14,5 m in diesem Bereich. Die Werte wurden aus den 'HST-Regressionsgeraden' für die einzelnen Mikrofelder errechnet und dokumentieren die Tiefenabhängigkeit der Ablagerungsintensität. Legt man den als statistisch signifikant ermittelten und beispielhaft in den Abbildungen 6 und 7 dargestellten linearen Funktionsverlauf zugrunde, ergibt sich aus der Differenz beider Ablagerungsraten (für 13,5 m u. 14,5 m Sohlentiefe) der allein durch eine Vertiefung der Sohle um 1 m ausgelöste zusätzliche Sedimentbedarf der Flußsohle. Die realen Ablagerungsmengen werden jedoch durch die Gleichgewichtstiefe und die Verfügbarkeit sedimentierbarer Feststoffe begrenzt.

Peilfeld	Ablagerung bei 13,5 m			Ablagerung bei 14,5 m			Erhöhung der Ablagerung		
	Mikrofeld-Streifen			Mikrofeld-Streifen			Mikrofeld-Streifen		
Nr.	a	b	c	a	b	c	a	b	c
206.I	0,1	4,3	2,4	4,3	14,5	22,5	4,2	10,2	21,1
206.II	-	-	-	1,3	5,2	7,7	1,3	5,2	7,7
206.III	-	-	2,8	13,0	22,9	14,3	13,0	22,9	11,5
206.IV	-	-	8,2	4,3	15,4	12,4	4,3	15,4	4,2
206.V	-	-	6,0	0,8	3,9	9,3	0,8	3,9	3,3
206.VI	-	-	2,2	-	4,9	5,0	keine	4,9	2,8
							Mittelwert: 8,0 ± 7,0 dm/a		

Ablagerungsprognosen – auch ohne numerische Modelle machbar ?

Nach Ansicht vieler Fachkollegen sind Prognosen zum Ablagerungsgeschehen nur mit numerischen Feststofftransportmodellen möglich. Unbestritten ist, daß derartige Modelle, wenn sie die wichtigsten Ursache-Wirkungsbeziehungen (z.B. auch den Einfluß biologischer Prozesse) korrekt 'mathematisch umsetzen', das beste 'Werkzeug' zur zeitlichen und räumlichen Interpolation von Parameteränderungen und zur Veranschaulichung dynamischer Veränderungen, z.B. über Video-Animationen, sind.

Ein generelles Problem bleibt aber auch bei der Verwendung derartiger moderner Analysentechniken bestehen: die Realitätsnähe der Ergebnisse hängt davon ab, ob die Menge und Qualität verfügbarer Naturmeßdaten ausreicht, das Modell zu kalibrieren und mit Eingangsdaten zu versorgen. Das in Abbildung 1 im Anhang aufgeführte Schema veranschaulicht am Beispiel entsprechender numerischer Modelle des Danish Hydraulic Institute (DHI), für welche Parameter repräsentative Natur- oder Labormeßdaten vorhanden sein müßten, um Feststofftransportprozesse korrekt modellieren zu können.

Dem unvoreingenommenen Leser sollte dabei deutlich werden, daß unabhängig von aller Modellierkunst im konkreten Anwendungsfall zumeist viele Daten fehlen werden. Unter derartigen Bedingungen wäre natürlich nicht gesichert, ob die Genauigkeit von Modellrechenergebnissen tatsächlich größer ist als die Resultate von Datenanalysen, die mit vergleichsweise einfachen statistischen Methoden durchgeführt wurden.

Erste Prognose-Versuche mit Peilplandaten

Die folgenden Beispiele sollen zeigen, wie 'gut' oder wie 'schlecht' mit statistischen Methoden, unter Einbeziehung der bereits gewonnenen Erkenntnisse über wichtige Faktorenbeziehungen, Prognosen zum Ablagerungsgeschehen durchgeführt werden können.

In Tabelle 13 ist aufgeführt, welche Erhöhungen der mittleren Ablagerungsraten in den untersuchten Unterelbeabschnitten aus einer Unterschreitung der aktuellen Solltiefen um 1 m resultieren, und zwar getrennt für die Situationen hohes und niedriges Oberwasser. Wie die Berechnungen zeigen, ergeben sich unter der Voraussetzung, daß der zusätzliche Sedimentbedarf tatsächlich befriedigt werden kann, Erhöhungen der Ablagerungsraten von 2 bis 3 m pro Jahr. Das bedeutet, es müßte ca. zwei- bis dreimal pro Jahr gebaggert werden. Ein deutlich niedrigerer Prognosewert ergibt sich lediglich für den Abschnitt Juelssand zu Zeiten geringer Oberwasserführung.

Tabelle 13:

Veränderungen der Ablagerungsraten bei einer Vertiefung der Fahrrinne um 1m (bezogen auf die bestehenden Solltiefen) bei einem Wechsel von jahreszeitlichen Abschnitten mit hoher Oberwasserführung (Winter und Frühjahr) zu einer Phase, in der geringe Abflüsse überwiegen (Sommer und Herbst) in den untersuchten Peilabschnitten der Unterelbe. Die realen Ablagerungsmengen werden jedoch durch die Gleichgewichtstiefe und die Verfügbarkeit sedimentierbarer Feststoffe begrenzt.

Unterelbe-Abschnitt	Erhöhung der Ablagerungsraten bei hohem Oberwasser	Erhöhung der Ablagerungsraten bei niedrigem Oberwasser
km 639-642 (Wedeler Au)	+ 25.1 dm/a	+ 20.7 dm/a
km 652.5-653.5 (Juelsssand)	+ 28.0 dm/a	+3.4 dm/a
km 675-676 (Rhinplate)	+ 25.2 dm/a	+ 19.5 dm/a
km 700-701 (Osteriff)	+26.8 dm/a	+29.1 dm/a

In dem folgenden Beispiel soll der Versuch unternommen werden, für einen Peilabschnitt der Süderelbe, in dem häufig gebaggert werden muß, aus den bis 1992 verfügbaren Daten Mindertiefen vorherzusagen, die in den darauffolgenden Jahren nach einer Periode hoher Oberwasserführung von November 1993 bis März 1994 aufgetreten waren. Ausgewählt wurde das Peilfeld 203.V in der Süderelbe bei Stromkilometer 615.6. In diesem Bereich befindet sich auf einer Strecke von ca. 800 m ein Solltiefengradient von 4,4 m über 6,0 m bis 7,6 m unter KN.

Ausgangspunkt der Überlegungen zur Lösung der gestellten Prognoseaufgabe ist die Annahme, daß nur bei Oberwasserwerten $> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ der Sedimentbedarf dieses Feld befriedigt werden kann und daß die Ablagerung von Feststoffen dann beendet ist, wenn das für hohe Abflüsse geltende HST-Niveau dieses Flußabschnitts erreicht ist.

Bei der in diesem Prognosefall zu betrachtenden Abflußsituation, also bei hohem Oberwasser, liegt die hydrodynamisch stabile Gleichgewichtstiefe im Solltiefenbereich von 6,0 m bis 7,6 m unter KN offensichtlich deutlich höher als bei geringem Oberwasser. Im weiter stromaufliegenden erheblich flacheren Flußabschnitt (> km 615) unterscheiden sich die Gleichgewichtsniveaus der Sohle, wie die Abbildungen 9 und 10 zeigen, für hohes und geringes Oberwasser dagegen nicht. Das HST-Niveau liegt dort sogar um ca. 0,8 m tiefer als die Solltiefe von 4,4 m unter KN.

Dieses Rechenergebnis bestätigt die Erfahrungen der für die Baggerei zuständigen Abteilung im Amt Strom- und Hafenbau: Die Sohle erfordert dort tatsächlich nur wenig Unterhaltungsaufwand, ihr Tiefenniveau ist also relativ stabil.

Leider wurde der in Abbildung 9 dargestellte Gleichgewichtszustand für das Peilfeld 203.V bei hohem Oberwasser durch die zur Verfügung stehenden Peildaten nur exemplarisch erfaßt. Eine Abschätzung der durch hohes Oberwasser ausgelösten Sedimentation mußte deshalb anhand entsprechender Daten für den weiter stromaufliegenden, nur selten durch Baggerungen gestörten Peilabschnitt 203. II erfolgen. In bezug auf das Peilfeld 203.V wurde gedanklich davon ausgegangen, daß mit der Stromabverlagerung von Sediment bei hohem Oberwasser zugleich auch der zum Peilfeld 203.II gehörende Gleichgewichtszustand (HST-Niveau) in das Peilfeld 203.V stromabverlagert wird und diesem Feld während der Zeit hohen Oberwassers quasi 'aufgezwungen' wird.

Für die Berechnung der bei hohem Oberwasser im Peilfeld 203.V auftretenden Ablagerungsraten wurde deshalb davon ausgegangen, daß diese den Werten entsprechen, die sich ergeben würden, wenn die Flußsohle im Peilfeld 203 II ebenfalls auf das Solltiefenniveau des Peilfeldes 203.V (7,6 m unter KN) vertieft gewesen wäre. Eine derartige Vertiefung hätte bedeutet, daß das bestehende HST-Niveau im Peilfeld 203.II von im Mittel 5,2 m unter KN (s. Tabelle 14) um ca. 2,4 m unterschritten worden wäre.

Die Ablagerungsraten, die sich aus dieser Unterschreitung der Gleichgewichtstiefe ergeben, sind im rechten Teil der Tabelle 14 (Ablagerungsraten aus HST-Werten) angegeben: Sie betragen im Mittel 34 dm/a.

Die Berechnung wurde so durchgeführt, wie sie beispielhaft in Abbildung 6 für die einzelnen Mikrofelder erläutert wurde, also aus den für die einzelnen Mikrofelder ermittelten Korrelationsbeziehungen zwischen Sohltiefe und Ablagerungsrate.

Um aus diesen Ablagerungsraten die tatsächlich aufgetretenen Mindertiefen im Peilfeld 203.V ableiten zu können, muß noch folgendes bedacht werden:

Die Ablagerungsraten der Tabelle 14 sind auf ein ganzes Jahr bezogen. Der betrachtete Zeitraum der Oberwasserwelle beträgt aber nur ein halbes Jahr, weshalb die angegebenen Werte zu halbieren sind. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß die obere Grenze für die Sedimentation durch das HST-Niveau festgelegt ist, die Ablagerung also maximal den Differenzbetrag zwischen Solltiefe und HST-Niveau erreichen kann. Das wären in diesem Fall, wie oben erwähnt, 2,4 m.

Legt man die entsprechend 'halbierten' Ablagerungsraten zugrunde, dann hätte sich das Sohlniveau im Peilfeld 203. V um ca. 1.7 m erhöhen dürfen. Tatsächlich festgestellt wurden aber für diesen Zeitraum Erhöhungen von im Mittel 2 bis 3 m. Der in der Natur eingetretene Wert entspricht daher tatsächlich recht genau der berechneten Differenz zwischen Solltiefe und HST-Niveau von 2,4 m.

Die Gegenüberstellung des Prognosewertes von 1,7 m mit den tatsächlich gepeilten Mindertiefen von ca. 2 m - 3 m zeigt, daß mit Verfahren einer linearen Extrapolation der Ablagerungsraten aus den HST-Regressionsdiagrammen, die tatsächlichen Ablagerungsintensitäten um ca. 15 % - 44 % unterschätzt worden sind.

Tabelle 14 :

Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefen in den Mikrofeldern des Peilfeldes 203.2 der Süderelbe bei Stromkilometer 614 und die aus der Korrelation zu einer Sohltiefe von 7,6 m u. KN (entspricht der Solltiefe im Peilabschnitt 203.V) rechnerisch resultierenden Ablagerungsraten. Die tatsächlich mögliche Sedimentation wird durch die Gleichgewichtstiefe und die Materialverfügbarkeit begrenzt.

Peilfeld 203.II	HST-Werte in den Mikrofeldern (m)			Ablagerungsraten bei einer Sohltiefe von 7,6 m (dm/a)		
Mikrofeld-Nr.	a	b	c	a	b	c
1	5.7	5.6	5.4	36	30	27
2	5.7	5.6	5.3	36	39	25
3	5.4	5.6	5.2	29	30	26
4	5.4	5.4	5.2	24	35	29
5	5.1	5.3	5.1	17	22	30
6	5.0	5.1	5.0	24	44	41
7	5.0	5.1	5.0	35	27	32
8	5.0	5.0	5.0	26	42	48
9	4.9	5.0	5.0	20	47	40
10	4.9	5.0	5.0	41	50	37

Für die Unterschätzung der tatsächlich aufgetretenen Mindertiefen sind vor allem die beiden folgenden Faktoren verantwortlich:

1. Aus MORAN ist bekannt, daß die Ablagerungsprozesse in der Natur nicht linear verlaufen (s. Abb. 5). Die vorgenommene bloße Halbierung der Rechenwerte (Rückrechnung vom Ablagerungszeitraum 1 Jahr auf ein halbes Jahr) berücksichtigt deshalb nicht, daß im ersten Halbjahr der Anteil an der gesamten Sedimentation rein mathematisch betrachtet generell größer sein muß als im zweiten Halbjahr. Da nicht genügend Peildaten vorlagen, um den Sedimentationsverlauf im Peilfeld 203.V exakt zu rekonstruieren, konnte dieser 'Rechenfehler' aber im Nachhinein nicht korrigiert werden.
2. Die vorgenommene Normierung der Ablagerungsraten auf Dezimeter pro Jahr minimiert rechnerisch die vorhandenen Unterschiede der Ablagerungsraten bei hohem und niedrigem Oberwasser. Zur ihrer korrekten Erfassung hätten die Peilungen gezielt zu den entsprechenden Oberwassersituationen durchgeführt werden müssen.

Das vorgestellte Rechenergebnis darf deshalb nicht so interpretiert werden, daß mit Hilfe der gewählten Methode keine genaueren Prognosen möglich sind. Die Ungenauigkeit der Prognosewerte beruht im wesentlichen auf einer unzureichenden Datengrundlage, sie war deshalb in diesem Beispielfall nicht zu vermeiden.

In einem dritten Beispiel soll noch kurz auf die Ergebnisse einer ersten konkreten Nutzenanwendung des in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Prognoseinstrumentes 'HST-Analyse' eingegangen werden, nämlich die Abschätzung der Sedimentation durch die geplanten Strombaumaßnahmen für die Hafenerweiterung Altenwerder. Betroffen davon sind die Peilabschnitte 205 und 206 der Süderelbe¹³.

Für diesen Elbabschnitt wurden ebenfalls die aus den geplanten Vertiefungen resultierenden Unterschreitungen der HST ermittelt, und dann für jeweils 200 m lange Stromabschnitte die aus der den HST-Über-oder Unterschreitungen resultierenden Erosions- oder Ablagerungsraten anhand der entsprechenden Regressionsgeraden berechnet.

Für die anschließende Ermittlung der erodierten oder sedimentierten Sedimentmengen wurde davon ausgegangen, daß die errechneten Ablagerungsraten nur solange Bestand haben, bis das HST-Niveau erreicht ist. In Tabelle 15 sind die Sedimentmengen angegeben, die nach der HST-Analyse beim heutigen Zustand der Fahrrinne sedimentieren und die bei den beiden bisher erwogenen Ausbauvarianten zukünftig dort sedimentieren müßten.

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, daß diese Werte lediglich den aus der Gleichgewichtstiefenunterschreitung resultierenden maximalen Feststoffbedarf der Flußsohle angeben und somit eine Worst-Case-Abschätzung sind. Eine genaue Bilanzierung bzw. Prognose von Sedimentmengen ist, wie bereits mehrfach erwähnt, nur möglich, wenn zusätzlich die tatsächliche Verfügbarkeit an sedimentierbarem Material und die Strömungsverhältnisse im betroffenen Stromabschnitt bekannt sind.

¹³ CHRISTIANSEN H., GREISER N., TÖPPE A.; "Abschätzung der Sedimentation durch die geplanten Strombaumaßnahmen in Altenwerder". Bericht der Strombauabteilung (SB 11) vom 23.11.1995; 27 S.

Tabelle 15 :

Aus den Hydrodynamisch Stabile Gleichgewichtstiefen in den Peilfeldern 205 und 206 der Süderelbe ermittelte Ablagerungsmengen im heutigen Ausbauzustand und eine Prognose der zu erwartenden Sedimentmengen für zwei unterschiedliche Ausbauvarianten der Hafenerweiterung Altenwerder.

Peilabschnitt und heutige Solltiefe	Theoret. Ablagerungsmengen ("Hunger") (m³/Jahr)		
	heutiger Ausbauzustand	Ausbauzustand KN -13,5	Ausbauzustand KN -15,3
205 (KN -10,6)	28.500	652.250	1.140.000
206 (KN -13,5)	50.625	60.750	569.375
Summe:	79.125	713.000	1.709.375

Legt man die Baggerstatistik der Amtes Strom- und Hafenbau aus den Jahren 1985 bis 1994 zugrunde, dann haben sich in den Peilabschnitten 205 und 206 pro Jahr durchschnittlich 110.000 m³ Sand und Mischboden angelagert. Eine Gegenüberstellung dieser über 10 Jahre gemittelten Baggermengen mit dem theoretischen Sedimentbedarf von rd. 80.000 m³ ergibt eine recht gute Übereinstimmung, wenn man die große Streubreite der jährlichen Baggermengen berücksichtigt (s. Tabelle 5 im Anhang).

Bezieht man die vorhandenen Daten über die Sedimentbeschaffenheit und die Hydrodynamik in der Süderelbe in die weiteren Betrachtungen mit ein, dann ist davon auszugehen, daß die Prognosewerte für die beiden in Tabelle 15 genannten Ausbauvarianten in der Natur nicht erreicht werden. Nach Berechnungen des DHI, die beim Amt Strom- und Hafenbau als Tabellenwerk verfügbar sind, reicht das Sedimentangebot (die jeweils bei Ebbe und Flut stromab- bzw. stromauftransportierten Sedimentmengen) nicht aus, um den Sedimentbedarf der Flußsohle zu befriedigen. Die Elbe wird sich deshalb dort nach dem Ausbau voraussichtlich auf einem tieferen Sohlniveau stabilisieren.

Nach dem bisherigen Auswertungsstand können die aus den Peildaten des Stromspaltungsgebietes und aus der Unterelbe gewonnenen Erkenntnisse über das Ablagerungsgeschehen folgendermaßen für die Erstellung von Ablagerungsprognosen genutzt werden:

1. Aus den HST-Werten ist ablesbar, bei welchem Tiefenniveau die Sohle als stabil anzusehen ist. Je näher die Solltiefe am HST-Wert liegt, desto geringer ist das Risiko, daß dort Mindertiefen auftreten können. Umgekehrt läßt sich aus den Regressionsgeraden extrapolieren, welcher 'Ablagerungsdruck' (Sedimentbedarf) lokal durch eine weitere Vertiefung der Sohle erzeugt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, daß dieses lineare Extrapolationsverfahren nur in dem durch die Meßdaten abgesicherten Wertebereich verlässliche Prognosewerte liefert und daß die Ablagerung dann endet, wenn das HST-Niveau erreicht ist.

Mit dieser Einschränkung sind die Auswirkungen geplanter Strombaumaßnahmen (Sohlvertiefungen) auf das lokale Ablagerungsgeschehen i.S.v. Worst-Case-Abschätzungen quantifizierbar.

2. Aus den Korrelationsbeziehungen zwischen dem Oberwasser und den aus den Peildaten errechneten Ablagerungsraten wird erkennbar, in welchen Flußabschnitten bei hohem oder niedrigem Oberwasser verstärkt Sedimentmaterial befördert wird. Dabei bedeuten positive Korrelationskoeffizienten, daß dieser Transport in Stromabrichtung verläuft und durch hohes Oberwasser gefördert wird. Negative Korrelationskoeffizienten bedeuten dagegen, daß dort zusätzliches Sedimentmaterial vor allem bei niedrigem Oberwasser abgelagert wird, und dieses Material kann dann, bei gedanklicher Einbeziehung der Tidedynamik, nur von unterstrom stammen.

So konnte z.B. gezeigt werden, daß bei hohem Oberwasser nur im stromaufliegenden Teil der Süderelbe kurzzeitig mit einer Beschleunigung der Ablagerungsraten zu rechnen ist. Erhöhte Sedimentation tritt im unterelbenahen Abschnitt der Norder- und Süderelbe dagegen nur bei längerandauernder niedriger Oberwasserführung auf. Eine ausreichende Verfügbarkeit von Feststoffmaterial vorausgesetzt, liegen die Ablagerungsraten dort dann bis um den Faktor 5 höher als bei hohem Oberwasser.

Dieser Oberwassereffekt muß daher vor allem in der Unterelbe bei der Prognose möglicher Erhöhungen des Unterhaltungsaufwandes durch geplante Sohlvertiefungen mitberücksichtigt werden.

3. Aus der Überlegung, daß die mit den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren errechneten und prognostizierten Ablagerungsintensitäten in der Natur nur auftreten können, wenn ausreichende Mengen mobiler, ablagerungsfähiger Feststoffe im Fluß verfügbar sind, kann z.B. für die Unterelbe abgeleitet werden, daß dort, insbesondere auch zur Vermeidung zusätzlicher Sedimentation im Hamburger Hafen, Sedimentumlagerungen und das Eggen von Schlick bei geringem Oberwasser vermieden werden müssen, weil diese Maßnahmen eine Erhöhung des Angebotes an zur Ablagerung befähigter Feststoffen bewirken, daß sich unter diesen hydrologischen Bedingungen bevorzugt in den stromaufliegenden Sedimentationsgebieten (Baggerschwerpunkten) ablagert.

Der zur Verbesserung des vorgestellten Prognoseverfahrens notwendige nächste Schritt wäre die exakte Quantifizierung der durch eine bestimmte Oberwasser/Tidesituation ausgelösten Beschleunigungseffekte auf die aus den Gleichgewichts-/Solltiefenbeziehungen der einzelnen Elbabschnitte resultierenden Ablagerungsraten. Dies müßte insbesondere für die Unterelbe durch eine gezielte Auswertung weiterer Peildaten möglich sein, weil dort in sehr viel geringeren Zeitabständen und häufiger gepeilt wird als im Hamburger Stromspaltungsgebiet.

Tabellen und Abbildungen im ANHANG

Norderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
100 I	85.1-84.1	08/85-07/84	388
100 I	86.1-85.1	10/86-08/85	434
100 I	88.1-86.1	02/88-10/86	493
100 I	89.1-88.1	11/89-02/88	646
100 I	90.1-89.1	06/90-11/89	208
100 I	91.1-90.1	07/91-06/90	387
100 I	92.1-91.1	06/92-07/91	358
100 II	85.1-84.1	08/85-07/84	388
100 II	86.1-85.1	10/86-08/85	434
100 II	88.1-86.1	02/88-10/86	493
100 II	89.1-88.1	11/89-02/88	646
100 II	90.1-89.1	06/90-11/89	208
100 II	91.1-90.1	07/91-06/90	387
100 II	92.1-91.1	06/92-07/91	358
101 I	85.1-84.1	08/85-07/84	388
101 I	86.1-85.1	10/86-08/85	434
101 I	88.1-86.1	02/88-10/86	493
101 I	89.1-88.1	11/89-02/88	646
101 I	90.1-89.1	06/90-11/89	208
101 I	91.1-90.1	07/91-06/90	387
101 I	92.1-91.1	06/92-07/91	358
101 II	85.1-84.1	08/85-07/84	388
101 II	86.1-85.1	10/86-08/85	434
101 II	88.1-86.1	02/88-10/86	493
101 II	89.1-88.1	11/89-02/88	646
101 II	90.1-89.1	06/90-11/89	208
101 II	91.1-90.1	07/91-06/90	387
101 II	92.1-91.1	06/92-07/91	358
101 III	85.1-84.1	08/85-07/84	388
101 III	86.1-85.1	10/86-08/85	434
101 III	88.1-86.1	02/88-10/86	493
101 III	89.1-88.1	11/89-02/88	646
101 III	90.1-89.1	06/90-11/89	208
101 III	91.1-90.1	07/91-06/90	387
101 III	92.1-91.1	06/92-07/91	358
101 IV	85.1-84.1	08/85-07/84	388
101 IV	86.1-85.1	10/86-08/85	434
101 IV	88.1-86.1	02/88-10/86	493
101 IV	89.1-88.1	11/89-02/88	646
101 IV	90.1-89.1	06/90-11/89	208
101 IV	91.1-90.1	07/91-06/90	387
101 IV	92.1-91.1	06/92-07/91	358

Tabelle 1.1: (Fortsetzung)

Norderelbe

Peilabschnitt	Peilpläne	Peildatum	Peilintervall
(Nr./Feld)		(Monat/Jahr)	(Tage)
101 V	85.1-84.1	08/85-07/84	388
101 V	86.1-85.1	10/86-08/85	434
101 V	88.1-86.1	02/88-10/86	493
101 V	89.1-88.1	11/89-02/88	646
101 V	90.1-89.1	06/90-11/89	208
101 V	91.1-90.1	07/91-06/90	387
101 V	92.1-91.1	06/92-07/91	358
102 I	85.1-84.1	10/85-08/84	418
102 I	86.1-85.1	10/86-10/85	378
102 I	88.1-86.1	07/88-10/86	633
102 I	89.1-88.1	11/89-07/88	504
102 I	90.1-89.1	06/90-11/89	192
102 I	91.1-90.1	08/91-06/90	422
102 II	85.1-84.1	10/85-08/84	418
102 II	86.1-85.1	10/86-10/85	378
102 II	88.1-86.1	07/88-10/86	633
102 II	89.1-88.1	11/89-07/88	504
102 II	90.1-89.1	06/90-11/89	192
102 II	91.1-90.1	08/91-06/90	422
102 II	92.1-91.1	07/92-08/91	340
102 III	85.1-84.1	10/85-08/84	418
102 III	86.1-85.1	10/86-10/85	378
102 III	88.1-86.1	07/88-10/86	633
102 III	89.1-88.1	11/89-07/88	504
102 III	90.1-89.1	06/90-11/89	192
102 III	91.1-90.1	08/91-06/90	422
102 III	92.1-91.1	07/92-08/91	340
102 IV	85.1-84.1	10/85-08/84	418
102 IV	86.1-85.1	10/86-10/85	378
102 IV	88.1-86.1	07/88-10/86	633
102 IV	89.1-88.1	11/89-07/88	504
102 IV	90.1-89.1	06/90-11/89	192
102 IV	91.1-90.1	08/91-06/90	422
102 IV	92.1-91.1	07/92-08/91	340
102 V	85.1-84.1	10/85-08/84	418
102 V	86.1-85.1	10/86-10/85	378
102 V	88.1-86.1	07/88-10/86	633
102 V	89.1-88.1	11/89-07/88	504
102 V	90.1-89.1	06/90-11/89	192
102 V	91.1-90.1	08/91-06/90	422
102 V	92.1-91.1	07/92-08/91	340
102 VI	85.1-84.1	10/85-08/84	418
102 VI	86.1-85.1	10/86-10/85	378
102 VI	88.1-86.1	07/88-10/86	633
102 VI	89.1-88.1	11/89-07/88	504
102 VI	90.1-89.1	06/90-11/89	192
102 VI	91.1-90.1	08/91-06/90	422
102 VI	92.1-91.1	07/92-08/91	340

Tabelle 1.1: (Fortsetzung)

Norderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
103 I	88.1-86.1	07/88-10/86	631
103 I	90.1-88.1	07/90-07/88	717
103 II	86.1-85.1	10/86-10/85	390
103 II	88.1-86.1	07/88-10/86	631
103 II	90.1-88.1	07/90-07/88	717
103 II	91.1-90.1	08/91-07/90	396
103 II	92.1-91.1	07/92-08/91	345
103 III	86.1-85.1	10/86-10/85	390
103 III	88.1-86.1	07/88-10/86	631
103 III	90.1-88.1	07/90-07/88	717
103 III	91.1-90.1	08/91-07/90	396
103 III	92.1-91.1	07/92-08/91	345
103 IV	86.1-85.1	10/86-10/85	390
103 IV	88.1-86.1	07/88-10/86	631
103 IV	90.1-88.1	07/90-07/88	717
103 IV	91.1-90.1	08/91-07/90	396
103 IV	92.1-91.1	07/92-08/91	345
103 V	86.1-85.1	10/86-10/85	390
103 V	88.1-86.1	07/88-10/86	631
103 V	90.1-88.1	07/90-07/88	717
103 V	91.1-90.1	08/91-07/90	396
103 V	92.1-91.1	07/92-08/91	345
103 VI	86.1-85.1	10/86-10/85	390
103 VI	88.1-86.1	07/88-10/86	631
103 VI	90.1-88.1	07/90-07/88	717
103 VI	91.1-90.1	08/91-07/90	396
103 VI	92.1-91.1	07/92-08/91	345
103 VII	86.1-85.1	10/86-10/85	390
103 VII	88.1-86.1	07/88-10/86	631
103 VII	90.1-88.1	07/90-07/88	717
103 VII	91.1-90.1	08/91-07/90	396
103 VII	92.1-91.1	07/92-08/91	345
104 I	86.1-84.1	10/86-10/84	721
104 I	87.1-86.1	09/87-10/86	345
104 I	88.1-87.1	06/88-09/87	261
104 I	90.2-88.1	05/90-06/88	727
104 I	91.1-90.2	08/91-05/90	435
104 I	92.1-91.1	07/92-08/91	345
104 II	86.1-84.1	10/86-10/84	721
104 II	87.1-86.1	09/87-10/86	345
104 II	88.1-87.1	06/88-09/87	261
104 II	90.2-88.1	05/90-06/88	727
104 II	91.1-90.2	08/91-05/90	435
104 II	92.1-91.1	07/92-08/91	345

Tabelle 1.1: (Fortsetzung)

Norderelbe

Peilabschnitt	Peilpläne	Peildatum	Peilintervall
(Nr./Feld)		(Monat/Jahr)	(Tage)
104 III	86.1-84.1	10/86-10/84	721
104 III	87.1-86.1	09/87-10/86	345
104 III	88.1-87.1	06/88-09/87	261
104 III	90.2-88.1	05/90-06/88	727
104 III	91.1-90.2	08/91-05/90	435
104 III	92.1-91.1	07/92-08/91	345
104 IV	86.1-84.1	10/86-10/84	721
104 IV	87.1-86.1	09/87-10/86	345
104 IV	88.1-87.1	06/88-09/87	261
104 IV	90.2-88.1	05/90-06/88	727
104 IV	91.1-90.2	08/91-05/90	435
104 IV	92.1-91.1	07/92-08/91	345
104 V	87.1-84.1	09/87-10/84	1065
104 V	88.1-87.1	06/88-09/87	261
104 VI	86.1-84.1	10/86-10/84	721
104 VI	87.1-86.1	09/87-10/86	345
104 VI	88.1-87.1	06/88-09/87	261
104 VI	90.1-88.1	05/90-06/88	676
104 VI	91.1-90.1	08/91-05/90	486
104 VI	92.1-91.1	07/92-08/91	345
104 VII	85.1-84.1	10/86-10/84	721
104 VII	86.1-85.1	09/87-10/86	345
104 VII	88.1-86.1	06/88-09/87	261
104 VII	89.1-88.1	05/90-06/88	676
104 VII	91.1-90.1	08/91-05/90	486
104 VII	92.1-91.1	07/92-08/91	345
105 I	85.1-84.1	09/85-10/84	349
105 I	86.1-85.1	06/86-09/85	251
105 I	87.1-86.1	09/87-06/86	467
105 I	88.1-87.1	06/88-09/87	262
105 I	89.1-88.1	03/89-06/88	294
105 I	90.1-89.1	03/90-03/89	372
105 I	91.1-90.1	08/91-03/90	500
105 I	92.1-91.1	07/92-08/91	356
105 II	85.1-84.1	09/85-10/84	349
105 II	86.1-85.1	06/86-09/85	251
105 II	87.1-86.1	09/87-06/86	467
105 II	88.1-87.1	06/88-09/87	262
105 II	89.1-88.1	03/89-06/88	294
105 II	90.1-89.1	03/90-03/89	372
105 II	91.1-90.1	08/91-03/90	500
105 II	92.1-91.1	07/92-08/91	356

Tabelle 1.1: (Fortsetzung)

Norderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
105 III	85.1-84.1	09/85-10/84	349
105 III	86.1-85.1	06/86-09/85	251
105 III	87.1-86.1	09/87-06/86	467
105 III	88.1-87.1	06/88-09/87	262
105 III	89.1-88.1	03/89-06/88	294
105 III	90.1-89.1	03/90-03/89	372
105 III	91.1-90.1	08/91-03/90	500
105 III	92.1-91.1	07/92-08/91	356
105 IV	85.1-84.1	09/85-10/84	349
105 IV	86.1-85.1	06/86-09/85	251
105 IV	87.1-86.1	09/87-06/86	467
105 IV	88.1-87.1	06/88-09/87	262
105 IV	89.1-88.1	03/89-06/88	294
105 IV	90.1-89.1	03/90-03/89	372
105 IV	91.1-90.1	08/91-03/90	500
105 IV	92.1-91.1	07/92-08/91	356
105 V	85.1-84.1	09/85-10/84	349
105 V	86.1-85.1	06/86-09/85	251
105 V	87.1-86.1	09/87-06/86	467
105 V	88.1-87.1	06/88-09/87	262
105 V	89.1-88.1	03/89-06/88	294
105 V	90.1-89.1	03/90-03/89	372
105 V	91.1-90.1	08/91-03/90	500
105 V	92.1-91.1	07/92-08/91	356
105 VI	85.1-84.1	09/85-10/84	349
105 VI	86.1-85.1	06/86-09/85	251
105 VI	87.1-86.1	09/87-06/86	467
105 VI	88.1-87.1	06/88-09/87	262
105 VI	89.1-88.1	03/89-06/88	294
105 VI	90.1-89.1	03/90-03/89	372
105 VI	91.1-90.1	08/91-03/90	500
105 VI	92.1-91.1	07/92-08/91	356
105 VII	85.1-84.1	09/85-10/84	349
105 VII	86.1-85.1	06/86-09/85	251
105 VII	87.1-86.1	09/87-06/86	467
105 VII	88.1-87.1	06/88-09/87	262
105 VII	89.1-88.1	03/89-06/88	294
105 VII	90.1-89.1	03/90-03/89	372
105 VII	91.1-90.1	08/91-03/90	500
105 VII	92.1-91.1	07/92-08/91	356
106 I	85.1-84.1	07/85-04/84	470
106 I	86.1-85.1	03/86-07/85	237
106 I	87.1-86.1	01/87-03/86	284
106 I	88.1-87.1	04/88-01/87	475
106 I	91.1-88.1	07/91-04/88	1174
106 I	92.1-91.1	06/92-07/91	343

Tabelle 1.1: (Fortsetzung)

Norderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
106 II	85.1-84.1	07/85-04/84	470
106 II	86.1-85.1	03/86-07/85	237
106 II	87.1-86.1	01/87-03/86	284
106 II	88.1-87.1	04/88-01/87	475
106 II	91.1-88.1	07/91-04/88	1174
106 II	92.1-91.1	06/92-07/91	343
106 III	85.1-84.1	07/85-04/84	470
106 III	86.1-85.1	03/86-07/85	237
106 III	87.1-86.1	01/87-03/86	284
106 III	88.1-87.1	04/88-01/87	475
106 III	91.1-88.1	07/91-04/88	1174
106 III	92.1-91.1	06/92-07/91	343
106 IV	85.1-84.1	07/85-04/84	470
106 IV	86.1-85.1	03/86-07/85	237
106 IV	87.1-86.1	01/87-03/86	284
106 IV	88.1-87.1	04/88-01/87	475
106 IV	91.1-88.1	07/91-04/88	1174
106 IV	92.1-91.1	06/92-07/91	343
106 V	85.1-84.1	07/85-04/84	470
106 V	86.1-85.1	03/86-07/85	237
106 V	87.1-86.1	01/87-03/86	284
106 V	88.1-87.1	04/88-01/87	475
106 V	91.1-88.1	07/91-04/88	1174
106 V	92.1-91.1	06/92-07/91	343
106 VI	85.1-84.1	07/85-04/84	470
106 VI	86.1-85.1	03/86-07/85	237
106 VI	87.1-86.1	01/87-03/86	284
106 VI	88.1-87.1	04/88-01/87	475
106 VI	91.1-88.1	07/91-04/88	1174
106 VI	92.1-91.1	06/92-07/91	343
107 I	85.1-84.1	07/85-08/84	335
107 I	86.1-85.1	07/86-07/85	360
107 I	87.1-86.1	09/87-07/86	412
107 I	91.3-87.1	06/91-09/87	1396
107 I	91.4-91.3	10/91-06/91	97
107 I	92.2-91.4	06/92-10/91	260
107 II	85.1-84.1	07/85-08/84	335
107 II	86.1-85.1	07/86-07/85	360
107 II	87.1-86.1	09/87-07/86	412
107 II	91.3-87.1	06/91-09/87	1396
107 II	91.4-91.3	10/91-06/91	97
107 II	92.2-91.4	06/92-10/91	260
107 III	85.1-84.1	07/85-08/84	335
107 III	86.1-85.1	07/86-07/85	360
107 III	87.1-86.1	09/87-07/86	412
107 III	91.3-87.1	06/91-09/87	1396
107 III	91.4-91.3	10/91-06/91	97
107 III	92.2-91.4	06/92-10/91	260

Tabelle 1.1: (Fortsetzung)

Norderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
107 IV	85.1-84.1	07/85-08/84	335
107 IV	86.1-85.1	07/86-07/85	360
107 IV	87.1-86.1	09/87-07/86	412
107 IV	91.3-87.1	06/91-09/87	1396
107 IV	91.4-91.3	10/91-06/91	97
107 IV	92.2-91.4	06/92-10/91	260
107 V	85.1-84.1	07/85-08/84	335
107 V	86.1-85.1	07/86-07/85	360
107 V	87.1-86.1	09/87-07/86	412
107 V	91.3-87.1	06/91-09/87	1396
107 V	91.4-91.3	10/91-06/91	97
107 V	92.2-91.4	06/92-10/91	260
107 VI	85.1-84.1	07/85-08/84	335
107 VI	86.1-85.1	07/86-07/85	360
107 VI	87.1-86.1	09/87-07/86	412
107 VI	91.3-87.1	06/91-09/87	1396
107 VI	91.4-91.3	10/91-06/91	97
107 VI	92.2-91.4	06/92-10/91	260
107 VII	85.1-84.1	07/85-08/84	335
107 VII	86.1-85.1	07/86-07/85	360
107 VII	87.1-86.1	09/87-07/86	412
107 VII	88.1-87.1	01/88-09/87	150
107 VII	91.2-88.1	06/91-01/88	1228
107 VII	91.4-91.2	10/91-06/91	116
107 VII	92.1-91.4	04/92-10/91	206

Tabelle 1.2: Peilplanliste für die Süderelbe

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
201 I	85.1 - 84.1	08/85-07/84	388
201 I	86.1 - 85.1	10/86-08/85	434
201 I	88.1 - 86.1	02/88-10/86	493
201 I	89.1 - 88.1	11/89-02/88	646
201 I	90.1 - 89.1	06/90-11/89	208
201 I	91.1 - 90.1	07/91-06/90	387
201 I	92.1 - 91.1	06/92-07/91	358
201 II	85.1 - 84.1	08/85-07/84	388
201 II	86.1 - 85.1	10/86-08/85	434
201 II	88.1 - 86.1	02/88-10/86	493
201 II	89.1 - 88.1	11/89-02/88	646
201 II	90.1 - 89.1	06/90-11/89	208
201 II	91.1 - 90.1	07/91-06/90	387
201 II	92.1 - 91.1	06/92-07/91	358
201 III	85.1 - 84.1	08/85-07/84	388
201 III	86.1 - 85.1	10/86-08/85	434
201 III	88.1 - 86.1	02/88-10/86	493
201 III	89.1 - 88.1	11/89-02/88	646
201 III	90.1 - 89.1	06/90-11/89	208
201 III	91.1 - 90.1	07/91-06/90	387
201 III	92.1 - 91.1	06/92-07/91	358
201 IV	85.1 - 84.1	08/85-07/84	388
201 IV	86.1 - 85.1	10/86-08/85	434
201 IV	88.1 - 86.1	02/88-10/86	493
201 IV	89.1 - 88.1	11/89-02/88	646
201 IV	90.1 - 89.1	06/90-11/89	208
201 IV	91.1 - 90.1	07/91-06/90	387
201 IV	92.1 - 91.1	06/92-07/91	358
201 V	85.1 - 84.1	08/85-07/84	388
201 V	86.1 - 85.1	10/86-08/85	434
201 V	88.1 - 86.1	02/88-10/86	493
201 V	89.1 - 88.1	11/89-02/88	646
201 V	90.1 - 89.1	06/90-11/89	208
201 V	91.1 - 90.1	07/91-06/90	387
201 V	92.1 - 91.1	06/92-07/91	358
202 I	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 I	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 I	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 I	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 I	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 I	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 I	92.1 - 91.1	06/92-07/91	339

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
202 II	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 II	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 II	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 II	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 II	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 II	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 II	92.1 - 91.1	06/92-07/91	339
202 III	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 III	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 III	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 III	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 III	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 III	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 III	92.1 - 91.1	05/92-07/91	339
202 IV	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 IV	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 IV	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 IV	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 IV	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 IV	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 IV	92.1 - 91.1	06/92-07/91	339
202 V	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 V	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 V	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 V	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 V	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 V	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 V	92.1 - 91.1	06/92-07/91	339
202 VI	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 VI	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 VI	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 VI	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 VI	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 VI	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 VI	92.1 - 91.1	06/92-07/91	339
202 VII	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 VII	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 VII	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 VII	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 VII	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 VII	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 VII	92.1 - 91.1	06/92-07/91	339

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
202 VIII	85.1 - 84.1	09/85-09/84	385
202 VIII	86.1 - 85.1	08/86-09/85	321
202 VIII	88.1 - 86.1	07/88-08/86	718
202 VIII	89.2 - 88.1	11/89-07/88	483
202 VIII	90.1 - 89.2	08/90-11/89	274
202 VIII	91.1 - 90.1	07/91-08/90	343
202 VIII	92.1 - 91.1	06/92-07/91	339
203 I	89.1 - 86.1	03/89-08/86	967
203 I	90.2 - 89.1	04/90-03/89	382
203 I	90.3 - 90.2	08/90-04/90	134
203 I	91.2 - 90.3	07/91-08/90	425
203 I	92.2 - 91.2	07/92-07/91	340
203 I	92.3 - 92.2	12/92-07/92	164
203 II	89.1 - 86.1	03/89-08/86	967
203 II	90.2 - 89.1	04/90-03/89	382
203 II	90.3 - 90.2	08/90-04/90	134
203 II	91.2 - 90.3	07/91-08/90	425
203 II	92.2 - 91.2	07/92-07/91	340
203 II	92.3 - 92.2	12/92-07/92	164
203 III	87.1 - 86.1	03/87-08/86	225
203 III	89.1 - 87.1	03/89-03/87	743
203 III	90.2 - 89.1	04/90-03/89	382
203 III	90.3 - 90.2	08/90-04/90	134
203 III	91.2 - 90.3	07/91-08/90	425
203 III	92.2 - 91.2	07/92-07/91	340
203 III	92.3 - 92.2	12/92-07/92	164
203 IV	87.1 - 86.1	03/87-08/86	225
203 IV	88.1 - 87.1	02/88-03/87	337
203 IV	88.2 - 88.1	05/88-02/88	78
203 IV	88.4 - 88.2	10/88-05/88	174
203 IV	89.1 - 88.4	03/89-10/88	157
203 IV	89.2 - 89.1	09/89-03/89	166
203 IV	90.1 - 89.2	02/90-09/89	162
203 IV	90.3 - 90.1	08/90-02/90	189
203 IV	90.4 - 90.3	11/90-08/90	93
203 IV	91.1 - 90.4	06/91-11/90	214
203 IV	91.3 - 91.1	10/91-06/91	120
203 IV	92.2 - 91.3	07/92-10/91	257
203 IV	92.3 - 92.2	12/92-07/92	164

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
203 V	87.1 - 86.1	03/87-08/86	225
203 V	88.1 - 87.1	02/88-03/87	337
203 V	88.2 - 88.1	05/88-02/88	78
203 V	88.4 - 88.2	10/88-05/88	174
203 V	89.1 - 88.4	03/89-10/88	157
203 V	89.2 - 89.1	09/89-03/89	166
203 V	90.1 - 89.2	02/90-09/89	162
203 V	90.3 - 90.1	08/90-02/90	351
203 V	90.4 - 90.3	11/90-08/90	93
203 V	91.1 - 90.4	06/91-11/90	214
203 V	91.3 - 91.1	10/91-06/91	120
203 V	92.2 - 91.3	07/92-10/91	257
203 V	92.3 - 92.2	12/92-07/92	164
204 I	86.1 - 85.1	03/86-07/85	262
204 I	86.2 - 86.1	11/86-03/86	222
204 I	87.1 - 86.2	04/87-11/86	151
204 I	88.1 - 87.1	03/88-04/87	336
204 I	88.2 - 88.1	05/88-03/88	66
204 I	88.3 - 88.2	10/88-05/88	157
204 I	89.1 - 88.3	01/89-10/88	103
204 I	90.1 - 89.1	03/90-01/89	418
204 I	90.2 - 90.1	08/90-03/90	169
204 I	90.3 - 90.2	11/90-08/90	95
204 I	91.1 - 90.3	06/91-11/90	204
204 I	92.1 - 91.1	01/92-06/91	218
204 II	86.1 - 85.1	03/86-07/85	262
204 II	86.2 - 86.1	11/86-03/86	222
204 II	87.1 - 86.2	04/87-11/86	151
204 II	88.1 - 87.1	03/88-04/87	336
204 II	88.2 - 88.1	05/88-03/88	66
204 II	88.3 - 88.2	10/88-05/88	157
204 II	89.1 - 88.3	01/89-10/88	103
204 II	89.2 - 89.1	11/89-01/89	295
204 II	90.1 - 89.2	03/90-11/89	123
204 II	90.2 - 90.1	08/90-03/90	169
204 II	90.3 - 90.2	11/90-08/90	95
204 II	92.1 - 90.3	01/92-11/90	422
204 II	92.2 - 92.1	09/92-01/92	241
204 II	92.3 - 92.2	12/92-09/92	99

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
204 III	86.1 - 85.1	03/86-07/85	262
204 III	86.2 - 86.1	11/86-03/86	222
204 III	87.1 - 86.2	04/87-11/86	151
204 III	88.1 - 87.1	03/88-04/87	336
204 III	88.2 - 88.1	05/88-03/88	66
204 III	88.3 - 88.2	10/88-05/88	157
204 III	89.1 - 88.3	01/89-10/88	103
204 III	89.2 - 89.1	11/89-01/89	295
204 III	90.1 - 89.2	03/90-11/89	123
204 III	90.2 - 90.1	08/90-03/90	169
204 III	90.3 - 90.2	11/90-08/90	95
204 III	91.1 - 90.3	06/91-11/90	204
204 III	92.1- 91.1	01/92-06/91	218
204 III	92.2 - 92.1	09/92-01/92	241
204 III	92.3 - 92.2	12/92-09/92	99
204 IV	86.1 - 85.1	03/86-07/85	262
204 IV	86.2 - 86.1	11/86-03/86	222
204 IV	87.1 - 86.2	04/87-11/86	151
204 IV	88.1 - 87.1	03/88-04/87	336
204 IV	88.2 - 88.1	05/88-03/88	66
204 IV	88.3 - 88.2	10/88-05/88	157
204 IV	89.1 - 88.3	01/89-10/88	103
204 IV	89.2 - 89.1	11/89-01/89	295
204 IV	90.1 - 89.2	03/90-11/89	123
204 IV	90.2 - 90.1	08/90-03/90	169
204 IV	90.3 - 90.2	11/90-08/90	95
204 IV	91.1 - 90.3	06/91-11/90	204
204 IV	92.1- 91.1	01/92-06/91	218
204 IV	92.2 - 92.1	09/92-01/92	241
204 IV	92.3 - 92.2	12/92-09/92	99
204 V	86.1 - 85.1	03/86-07/85	262
204 V	86.2 - 86.1	11/86-03/86	222
204 V	87.1 - 86.2	04/87-11/86	151
204 V	88.1 - 87.1	03/88-04/87	336
204 V	88.2 - 88.1	05/88-03/88	66
204 V	88.3 - 88.2	10/88-05/88	157
204 V	89.1 - 88.3	01/89-10/88	103
204 V	89.2 - 89.1	11/89-01/89	295
204 V	90.1 - 89.2	03/90-11/89	123
204 V	90.2 - 90.1	08/90-03/90	169
204 V	90.3 - 90.2	11/90-08/90	95
204 V	91.1 - 90.3	06/91-11/90	204
204 V	92.1- 91.1	01/92-06/91	218
204 V	92.2 - 92.1	09/92-01/92	241
204 V	92.3 - 92.2	12/92-09/92	99

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
204 VI	86.1 - 85.1	03/86-07/85	262
204 VI	86.2 - 86.1	11/86-03/86	222
204 VI	87.1 - 86.2	04/87-11/86	151
204 VI	88.1 - 87.1	03/88-04/87	336
204 VI	88.2 - 88.1	05/88-03/88	66
204 VI	88.3 - 88.2	10/88-05/88	157
204 VI	89.1 - 88.3	01/89-10/88	103
204 VI	89.2 - 89.1	11/89-01/89	295
204 VI	90.1 - 89.2	03/90-11/89	123
204 VI	90.2 - 90.1	08/90-03/90	169
204 VI	90.3 - 90.2	11/90-08/90	95
204 VI	91.1 - 90.3	06/91-11/90	204
204 VI	92.1 - 91.1	01/92-06/91	218
204 VI	92.2 - 92.1	09/92-01/92	241
204 VI	92.3 - 92.2	12/92-09/92	99
204 VII	86.1 - 85.1	03/86-07/85	262
204 VII	86.2 - 86.1	11/86-03/86	222
204 VII	87.1 - 86.2	04/87-11/86	151
204 VII	88.1 - 87.1	03/88-04/87	336
204 VII	88.2 - 88.1	05/88-03/88	66
204 VII	88.3 - 88.2	10/88-05/88	157
204 VII	89.1 - 88.3	01/89-10/88	103
204 VII	89.2 - 89.1	11/89-01/89	295
204 VII	90.1 - 89.2	03/90-11/89	123
204 VII	90.2 - 90.1	08/90-03/90	169
204 VII	90.3 - 90.2	11/90-08/90	95
204 VII	91.1 - 90.3	06/91-11/90	204
204 VII	92.1 - 91.1	01/92-06/91	218
204 VII	92.2 - 92.1	09/92-01/92	241
204 VII	92.3 - 92.2	12/92-09/92	99
205 I	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 I	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 I	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 I	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 I	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 I	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 I	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 I	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 I	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 I	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 I	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 I	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 I	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
205 II	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 II	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 II	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 II	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 II	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 II	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 II	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 II	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 II	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 II	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 II	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 II	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 II	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112
205 III	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 III	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 III	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 III	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 III	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 III	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 III	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 III	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 III	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 III	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 III	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 III	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 III	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112
205 IV	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 IV	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 IV	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 IV	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 IV	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 IV	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 IV	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 IV	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 IV	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 IV	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 IV	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 IV	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 IV	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
205 V	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 V	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 V	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 V	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 V	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 V	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 V	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 V	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 V	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 V	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 V	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 V	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 V	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112
205 VI	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 VI	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 VI	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 VI	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 VI	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 VI	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 VI	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 VI	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 VI	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 VI	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 VI	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 VI	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 VI	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112
205 VII	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 VII	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 VII	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 VII	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 VII	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 VII	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 VII	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 VII	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 VII	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 VII	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 VII	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 VII	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 VII	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
205 VIII	86.2 - 86.1	11/86-04/86	226
205 VIII	87.1 - 86.2	03/87-11/86	122
205 VIII	88.1 - 87.1	03/88-03/87	348
205 VIII	88.2 - 88.1	10/88-03/88	225
205 VIII	89.1 - 88.2	01/89-10/88	98
205 VIII	89.2 - 89.1	11/89-01/89	280
205 VIII	90.1 - 89.2	03/90-11/89	135
205 VIII	90.2 - 90.1	09/90-03/90	170
205 VIII	90.3 - 90.2	11/90-09/90	86
205 VIII	91.1 - 90.3	06/91-11/90	194
205 VIII	91.2 - 91.1	10/91-06/91	143
205 VIII	92.1 - 91.2	06/92-10/91	213
205 VIII	92.2 - 92.1	09/92-06/92	112
206 I	90.2 - 90.1	05/90-01/90	111
206 I	90.3 - 90.2	08/90-05/90	76
206 I	90.4 - 90.3	09/90-08/90	49
206 I	90.5 - 90.4	11/90-09/90	52
206 I	91.1 - 90.5	01/91-11/90	77
206 I	91.2 - 91.1	05/91-01/91	118
206 I	91.3 - 91.2	09/91-05/91	108
206 I	92.1 - 91.3	05/92-91/3	243
206 I	92.2 - 92.1	09/92-05/92	117
206 I	92.4 - 92.2	12/92-09/92	250
206 II	90.2 - 90.1	05/90-01/90	111
206 II	90.3 - 90.2	08/90-05/90	76
206 II	90.4 - 90.3	09/90-08/90	49
206 II	90.5 - 90.4	11/90-09/90	52
206 II	91.1 - 90.5	01/91-11/90	77
206 II	91.2 - 91.1	05/91-01/91	118
206 II	91.3 - 91.2	09/91-05/91	108
206 II	92.1 - 91.3	05/92-91/3	243
206 II	92.2 - 92.1	09/92-05/92	117
206 II	92.4 - 92.2	12/92-09/92	250
206 III	90.2 - 90.1	05/90-01/90	111
206 III	90.3 - 90.2	08/90-05/90	76
206 III	90.4 - 90.3	09/90-08/90	49
206 III	90.5 - 90.4	11/90-09/90	52
206 III	91.1 - 90.5	01/91-11/90	77
206 III	91.2 - 91.1	05/91-01/91	118
206 III	91.3 - 91.2	09/91-05/91	108
206 III	92.1 - 91.3	05/92-91/3	243
206 III	92.2 - 92.1	09/92-05/92	117
206 III	92.4 - 92.2	12/92-09/92	250

Tabelle 1.2: (Fortsetzung)

Süderelbe

Peilabschnitt (Nr./Feld)	Peilplan	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
206 IV	90.2 - 90.1	05/90-01/90	111
206 IV	90.3 - 90.2	08/90-05/90	76
206 IV	90.4 - 90.3	09/90-08/90	49
206 IV	90.5 - 90.4	11/90-09/90	52
206 IV	91.1 - 90.5	01/91-11/90	77
206 IV	91.2 - 91.1	05/91-01/91	118
206 IV	91.3 - 91.2	09/91-05/91	108
206 IV	92.1 - 91.3	05/92-91/3	243
206 IV	92.2 - 92.1	09/92-05/92	117
206 IV	92.4 - 92.2	12/92-09/92	250
206 V	90.2 - 90.1	05/90-01/90	111
206 V	90.3 - 90.2	08/90-05/90	76
206 V	90.4 - 90.3	09/90-08/90	49
206 V	90.5 - 90.4	11/90-09/90	52
206 V	91.1 - 90.5	01/91-11/90	77
206 V	91.2 - 91.1	05/91-01/91	118
206 V	91.3 - 91.2	09/91-05/91	108
206 V	92.1 - 91.3	05/92-91/3	243
206 V	92.2 - 92.1	09/92-05/92	117
206 V	92.4 - 92.2	12/92-09/92	250
206 VI	90.2 - 90.1	05/90-01/90	111
206 VI	90.3 - 90.2	08/90-05/90	76
206 VI	90.4 - 90.3	09/90-08/90	49
206 VI	90.5 - 90.4	11/90-09/90	52
206 VI	91.1 - 90.5	01/91-11/90	77
206 VI	91.2 - 91.1	05/91-01/91	118
206 VI	91.3 - 91.2	09/91-05/91	108
206 VI	92.1 - 91.3	05/92-91/3	243
206 VI	92.2 - 92.1	09/92-05/92	117
206 VI	92.4 - 92.2	12/92-09/92	250

Tabelle 1.3: Peilplanliste für die Unterelbe

Unterelbe

Peilabschnitt (Nr./Kilometer)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
1 / km 639,0 - 639,5	85.1 - 85.2	05/85 - 11/85	142
1 / km 639,0 - 639,5	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	189
1 / km 639,0 - 639,5	86.1 - 86.2	05/86 - 11/86	186
1 / km 639,0 - 639,5	86.2 - 87.1	11/86 - 05/87	209
1 / km 639,0 - 639,5	87.1 - 87.2	05/87 - 11/87	154
1 / km 639,0 - 639,5	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	171
1 / km 639,0 - 639,5	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	199
1 / km 639,0 - 639,5	88.2 - 89.1	11/88 - 05/89	185
1 / km 639,0 - 639,5	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	183
1 / km 639,0 - 639,5	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	186
1 / km 639,0 - 639,5	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	162
1 / km 639,0 - 639,5	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	190
1 / km 639,0 - 639,5	91.1 - 91.2	05/91 - 12/91	190
1 / km 639,0 - 639,5	91.2 - 92.1	12/91 - 06/92	181
1 / km 639,0 - 639,5	92.1 - 92.2	06/92 - 11/92	178
1 / km 639,0 - 639,5	92.2 - 93.1	11/92 - 05/93	185
1 / km 639,0 - 639,5	93.1 - 93.2	05/93 - 12/93	188
1 / km 639,5 - 640,0	85.1 - 85.2	05/85 - 11/85	142
1 / km 639,5 - 640,0	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	189
1 / km 639,5 - 640,0	86.1 - 86.2	05/86 - 11/86	186
1 / km 639,5 - 640,0	86.2 - 87.1	11/86 - 05/87	209
1 / km 639,5 - 640,0	87.1 - 87.2	05/87 - 11/87	154
1 / km 639,5 - 640,0	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	171
1 / km 639,5 - 640,0	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	199
1 / km 639,5 - 640,0	88.2 - 89.1	11/88 - 05/89	185
1 / km 639,5 - 640,0	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	183
1 / km 639,5 - 640,0	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	186
1 / km 639,5 - 640,0	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	162
1 / km 639,5 - 640,0	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	190
1 / km 639,5 - 640,0	91.1 - 91.2	05/91 - 12/91	190
1 / km 639,5 - 640,0	91.2 - 92.1	12/91 - 06/92	181
1 / km 639,5 - 640,0	92.1 - 92.2	06/92 - 11/92	178
1 / km 639,5 - 640,0	92.2 - 93.1	11/92 - 05/93	185
1 / km 639,5 - 640,0	93.1 - 93.2	05/93 - 12/93	188

Tabelle 1.3: (Fortsetzung)

Untereibe

Peilabschnitt (Nr./Kilometer)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
1 / km 641,0 - 641,5	85.1 - 85.2	05/85 - 11/85	142
1 / km 641,0 - 641,5	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	189
1 / km 641,0 - 641,5	86.1 - 86.2	05/86 - 11/86	186
1 / km 641,0 - 641,5	86.2 - 87.1	11/86 - 05/87	209
1 / km 641,0 - 641,5	87.1 - 87.2	05/87 - 11/87	154
1 / km 641,0 - 641,5	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	171
1 / km 641,0 - 641,5	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	199
1 / km 641,0 - 641,5	88.2 - 89.1	11/88 - 05/89	185
1 / km 641,0 - 641,5	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	183
1 / km 641,0 - 641,5	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	186
1 / km 641,0 - 641,5	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	162
1 / km 641,0 - 641,5	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	190
1 / km 641,0 - 641,5	91.1 - 91.2	05/91 - 12/91	190
1 / km 641,0 - 641,5	91.2 - 92.1	12/91 - 06/92	181
1 / km 641,0 - 641,5	92.1 - 92.2	06/92 - 11/92	178
1 / km 641,0 - 641,5	92.2 - 93.1	11/92 - 05/93	185
1 / km 641,0 - 641,5	93.1 - 93.2	05/93 - 12/93	188
1 / km 641,5 - 642,0	85.1 - 85.2	05/85 - 11/85	142
1 / km 641,5 - 642,0	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	189
1 / km 641,5 - 642,0	86.1 - 86.2	05/86 - 11/86	186
1 / km 641,5 - 642,0	86.2 - 87.1	11/86 - 05/87	209
1 / km 641,5 - 642,0	87.1 - 87.2	05/87 - 11/87	154
1 / km 641,5 - 642,0	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	171
1 / km 641,5 - 642,0	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	199
1 / km 641,5 - 642,0	88.2 - 89.1	11/88 - 05/89	185
1 / km 641,5 - 642,0	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	183
1 / km 641,5 - 642,0	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	186
1 / km 641,5 - 642,0	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	162
1 / km 641,5 - 642,0	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	190
1 / km 641,5 - 642,0	91.1 - 91.2	05/91 - 12/91	190
1 / km 641,5 - 642,0	91.2 - 92.1	12/91 - 06/92	181
1 / km 641,5 - 642,0	92.1 - 92.2	06/92 - 11/92	178
1 / km 641,5 - 642,0	92.2 - 93.1	11/92 - 05/93	185
1 / km 641,5 - 642,0	93.1 - 93.2	05/93 - 12/93	188

Tabelle 1.3: (Fortsetzung)

Untereibe

Peilabschnitt (Nr./Kilometer)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
3 / km 652,5 - 653,0	84.2 - 85.1	11/84 - 06/85	222
3 / km 652,5 - 653,0	85.1 - 85.2	06/85 - 11/85	134
3 / km 652,5 - 653,0	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	202
3 / km 652,5 - 653,0	86.1 - 86.2	05/86 - 12/86	190
3 / km 652,5 - 653,0	86.2 - 87.1	12/86 - 06/87	193
3 / km 652,5 - 653,0	87.1 - 87.2	06/87 - 11/87	162
3 / km 652,5 - 653,0	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	177
3 / km 652,5 - 653,0	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	173
3 / km 652,5 - 653,0	88.2 - 89.1	11/88 - 05/89	202
3 / km 652,5 - 653,0	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	191
3 / km 652,5 - 653,0	89.2 - 90.1	12/89 - 06/90	182
3 / km 652,5 - 653,0	90.1 - 90.2	06/90 - 11/90	166
3 / km 652,5 - 653,0	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	176
3 / km 653,0 - 653,5	84.2 - 85.1	11/84 - 06/85	222
3 / km 653,0 - 653,5	85.1 - 85.2	06/85 - 11/85	134
3 / km 653,0 - 653,5	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	202
3 / km 653,0 - 653,5	86.1 - 86.2	05/86 - 12/86	190
3 / km 653,0 - 653,5	86.2 - 87.1	12/86 - 06/87	193
3 / km 653,0 - 653,5	87.1 - 87.2	06/87 - 11/87	162
3 / km 653,0 - 653,5	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	177
3 / km 653,0 - 653,5	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	173
3 / km 653,0 - 653,5	88.2 - 89.1	11/88 - 05/89	202
3 / km 653,0 - 653,5	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	191
3 / km 653,0 - 653,5	89.2 - 90.1	12/89 - 06/90	182
3 / km 653,0 - 653,5	90.1 - 90.2	06/90 - 11/90	166
3 / km 653,0 - 653,5	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	176
7 / km 675,0 - 675,5	85.1 - 85.2	05/85 - 11/85	169
7 / km 675,0 - 675,5	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	172
7 / km 675,0 - 675,5	86.1 - 86.2	05/86 - 10/86	177
7 / km 675,0 - 675,5	86.2 - 87.1	10/86 - 05/87	207
7 / km 675,0 - 675,5	87.1 - 87.2	05/87 - 11/87	170
7 / km 675,0 - 675,5	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	190
7 / km 675,0 - 675,5	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	175
7 / km 675,0 - 675,5	88.2 - 89.1	11/88 - 06/89	196
7 / km 675,0 - 675,5	89.1 - 89.2	06/89 - 12/89	202
7 / km 675,0 - 675,5	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	169
7 / km 675,0 - 675,5	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	183
7 / km 675,0 - 675,5	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	182
7 / km 675,0 - 675,5	91.1 - 91.2	05/91 - 11/91	162
7 / km 675,0 - 675,5	91.2 - 92.1	11/91 - 05/92	200
7 / km 675,0 - 675,5	92.1 - 92.2	05/92 - 11/92	185

Tabelle 1.3: (Fortsetzung)

Unternelbe

Peilabschnitt (Nr./Kilometer)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
7 / km 675,5 - 676,0	85.1 - 85.2	05/85 - 11/85	169
7 / km 675,5 - 676,0	85.2 - 86.1	11/85 - 05/86	172
7 / km 675,5 - 676,0	86.1 - 86.2	05/86 - 10/86	177
7 / km 675,5 - 676,0	86.2 - 87.1	10/86 - 05/87	207
7 / km 675,5 - 676,0	87.1 - 87.2	05/87 - 11/87	170
7 / km 675,5 - 676,0	87.2 - 88.1	11/87 - 05/88	190
7 / km 675,5 - 676,0	88.1 - 88.2	05/88 - 11/88	175
7 / km 675,5 - 676,0	88.2 - 89.1	11/88 - 06/89	196
7 / km 675,5 - 676,0	89.1 - 89.2	06/89 - 12/89	202
7 / km 675,5 - 676,0	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	169
7 / km 675,5 - 676,0	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	183
7 / km 675,5 - 676,0	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	182
7 / km 675,5 - 676,0	91.1 - 91.2	05/91 - 11/91	162
7 / km 675,5 - 676,0	91.2 - 92.1	11/91 - 05/92	200
7 / km 675,5 - 676,0	92.1 - 92.2	05/92 - 11/92	185
9 / km 700,0 - 700,5	85.1 - 85.2	04/85 - 11/85	210
9 / km 700,0 - 700,5	85.2 - 86.1	11/85 - 04/86	145
9 / km 700,0 - 700,5	86.1 - 86.2	04/86 - 11/86	212
9 / km 700,0 - 700,5	86.2 - 87.1	11/86 - 03/87	113
9 / km 700,0 - 700,5	87.1 - 87.2	03/87 - 10/87	210
9 / km 700,0 - 700,5	87.2 - 88.1	10/87 - 04/88	204
9 / km 700,0 - 700,5	88.1 - 88.2	04/88 - 10/88	178
9 / km 700,0 - 700,5	88.2 - 89.1	10/88 - 05/89	196
9 / km 700,0 - 700,5	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	208
9 / km 700,0 - 700,5	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	165
9 / km 700,0 - 700,5	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	185
9 / km 700,0 - 700,5	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	187
9 / km 700,0 - 700,5	91.1 - 91.2	05/91 - 11/91	192
9 / km 700,0 - 700,5	91.2 - 92.1	11/91 - 05/92	164
9 / km 700,0 - 700,5	92.1 - 92.2	05/92 - 11/92	192
9 / km 700,0 - 700,5	92.2 - 93.1	11/92 - 05/93	173
9 / km 700,0 - 700,5	93.1 - 93.2	05/93 - 11/93	182
9 / km 700,0 - 700,5	93.2 - 94.1	11/93 - 05/94	190
9 / km 700,0 - 700,5	94.1 - 94.2	05/94 - 11/94	181

Tabelle 1.3: (Fortsetzung)

Untereibe

Peilabschnitt (Nr./Kilometer)	Peilpläne	Peildatum (Monat/Jahr)	Peilintervall (Tage)
9 / km 700,5 - 701,0	85.1 - 85.2	04/85 - 11/85	210
9 / km 700,5 - 701,0	85.2 - 86.1	11/85 - 04/86	145
9 / km 700,5 - 701,0	86.1 - 86.2	04/86 - 11/86	212
9 / km 700,5 - 701,0	86.2 - 87.1	11/86 - 03/87	113
9 / km 700,5 - 701,0	87.1 - 87.2	03/87 - 10/87	210
9 / km 700,5 - 701,0	87.2 - 88.1	10/87 - 04/88	204
9 / km 700,5 - 701,0	88.1 - 88.2	04/88 - 10/88	178
9 / km 700,5 - 701,0	88.2 - 89.1	10/88 - 05/89	196
9 / km 700,5 - 701,0	89.1 - 89.2	05/89 - 12/89	208
9 / km 700,5 - 701,0	89.2 - 90.1	12/89 - 05/90	165
9 / km 700,5 - 701,0	90.1 - 90.2	05/90 - 11/90	185
9 / km 700,5 - 701,0	90.2 - 91.1	11/90 - 05/91	187
9 / km 700,5 - 701,0	91.1 - 91.2	05/91 - 11/91	192
9 / km 700,5 - 701,0	91.2 - 92.1	11/91 - 05/92	164
9 / km 700,5 - 701,0	92.1 - 92.2	05/92 - 11/92	192
9 / km 700,5 - 701,0	92.2 - 93.1	11/92 - 05/93	173
9 / km 700,5 - 701,0	93.1 - 93.2	05/93 - 11/93	182
9 / km 700,5 - 701,0	93.2 - 94.1	11/93 - 05/94	190
9 / km 700,5 - 701,0	94.1 - 94.2	05/94 - 11/94	181

Tabelle 2.1: Korrelationen zwischen Oberwasser und Sedimentationsrate in der Norderelbe

Norderelbe

Peilplan	Stromkilom.	Korr.-Koeff.	Peilplan	Stromkilom.	Korr.-Koeff.
100 I	607,80	-0,28	101 I	608,70	0,18
100 II	608,20	-0,62	101 II	609,10	-0,03
			101 III	609,40	0,19
			101 IV	609,70	0,18
			101 V	610,00	0,29
102 I	610,30	0,10	103 I	612,20	nur 2 Peilungen
102 II	610,80	-0,45	103 II	612,60	0,07
102 III	611,10	-0,12	103 III	612,80	0,03
102 IV	611,40	-0,44	103 IV	613,20	0,17
102 V	611,70	-0,49	103 V	613,60	0,17
102 VI	611,90	-0,23	103 VI	613,80	0,23
			103 VII	614,00	0,14
104 I	614,30	0,22	105 I	616,60	0,55
104 II	614,60	0,26	105 II	616,90	0,75
104 III	614,90	0,38	105 III	617,20	0,61
104 IV	615,20	0,70	105 IV	617,40	0,53
104 V	615,50	nur 2 Peilungen	105 V	617,80	0,43
104 VI	615,90	0,59	105 VI	618,30	0,34
104 VII	616,20	0,24	105 VII	618,70	0,24
106 I	619,50	0,73	107 I	622,40	-0,89
106 II	620,00	0,69	107 II	622,80	0,16
106 III	620,40	-0,23	107 III	623,10	0,37
106 IV	621,00	0,03	107 IV	623,40	-0,93
106 V	621,40	0,59	107 V	623,70	-0,88
106 VI	621,90	0,59	107 VI	624,10	-0,84
			107 VII	624,60	-0,03

Tabelle 2.2: Korrelationen zwischen Oberwasser und Sedimentationsrate in der Süderelbe

Süderelbe

Peilplan	Stromkilom.	Korr.-Koeff.	Peilplan	Stromkilom.	Korr.-Koeff.
201 I	608,50	0,41	202 I	610,50	0,03
201 II	609,00	-0,15	202 II	610,90	0,11
201 III	609,40	0,18	202 III	611,30	-0,65
201 IV	609,80	0	202 IV	611,60	-0,01
201 V	610,30	0,14	202 V	611,80	0,60
			202 VI	612,20	-0,50
			202 VII	612,50	-0,47
			202 VIII	612,80	0,19
203 I	613,50	0,03	204 I	616,00	0,45
203 II	614,00	0,09	204 II	616,40	0,80
203 III	614,50	-0,95	204 III	616,90	0,79
203 IV	615,10	0,77	204 IV	617,30	0,85
203 V	615,60	0,26	204 V	617,60	0,79
			204 VI	618,00	0,82
			204 VII	618,50	0,46
205 I	618,90	-0,51	206 I	612,50	0,51
205 II	619,10	-0,38	206 II	622,00	-0,04
205 III	619,40	-0,01	206 III	622,50	-0,53
205 IV	619,70	0,08	206 IV	622,90	-0,55
205 V	620,00	0,34	206 V	623,30	0,21
205 VI	620,20	0,35	206 VI	623,70	0,34
205 VII	620,50	0,29			
205 VIII	620,90	0,56			

Tabelle 3.1: Korrelation zwischen Sedimentationsrate und Tiefe für
die Mikrofelder der Nordereibe

Peilplan	Stromkilometer	Korr.-Koeffizient		
		a - Streifen	b - Streifen	c - Streifen
100 I	607,80			
100 II	608,20			
101 I	608,70	0,27 - 0,61	0,47 - 0,74	0,47 - 0,74
101 II	609,10	0,60 - 0,76	0,51 - 0,80	-
101 III	609,40	0,44 - 0,74	0,28 - 0,53	-
101 IV	609,70	0,46 - 0,59	0,43 - 0,62	-
101 V	610,00	0,32 - 0,59	0,32 - 0,38	-
102 I	610,30	0,23 - 0,82	0,39 - 0,66	-
102 II	610,80	0,53 - 0,84	0,49 - 0,65	-
102 III	611,10	0,43 - 0,62	0,61 - 0,74	-
102 IV	611,40	0,38 - 0,63	0,35 - 0,57	-
102 V	611,70	0,33 - 0,51	0,34 - 0,43	-
102 VI	611,90	0,31 - 0,47	0,31 - 0,42	-
103 I	612,20	0,17 - 0,87	0,02 - 0,69	-
103 II	612,60	0,28 - 0,64	0,38 - 0,58	-
103 III	612,80	0,19 - 0,29	0,06 - 0,30	-
103 IV	613,20	0,14 - 0,72	0,44 - 0,74	-
103 V	613,60	0,32 - 0,57	0,36 - 0,60	-
103 VI	613,80	0,42 - 0,66	0,34 - 0,53	-
103 VII	614,00	0,58 - 0,77	0,45 - 0,80	-
104 I	614,30	0,34 - 0,54	0,42 - 0,67	-
104 II	614,60	0,61 - 0,80	0,59 - 0,71	-
104 III	614,90	0,57 - 0,68	0,57 - 0,70	0,65 - 0,73
104 IV	615,20	0,42 - 0,68	0,43 - 0,72	0,44 - 0,70
104 V	615,50	0,23 - 0,92	0,22 - 0,72	0,01 - 0,40
104 VI	615,90	0,47 - 0,89	0,49 - 0,90	0,47 - 0,84
104 VII	616,20	0,57 - 0,84	0,70 - 0,86	0,49 - 0,80
105 I	616,60	0,63 - 0,87	0,45 - 0,89	0,47 - 0,69
105 II	616,90	0,51 - 0,77	0,48 - 0,63	0,26 - 0,41
105 III	617,20	0,61 - 0,85	0,36 - 0,68	0,22 - 0,35
105 IV	617,40	0,55 - 0,67	0,30 - 0,61	0,39 - 0,52
105 V	617,80	0,61 - 0,77	0,53 - 0,70	0,26 - 0,75
105 VI	618,30	0,14 - 0,57	0,21 - 0,77	0,39 - 0,75
105 VII	618,70	0,35 - 0,64	0,38 - 0,70	0,61 - 0,74
106 I	619,50	0,24 - 0,54	0,13 - 0,46	0,25 - 0,62
106 II	620,00	0,21 - 0,47	0,06 - 0,43	0,20 - 0,54
106 III	620,40	0,24 - 0,50	0,00 - 0,31	0,23 - 0,45
106 IV	621,00	0,05 - 0,70	0,58 - 0,90	0,55 - 0,90
106 V	621,40	0,00 - 0,73	0,05 - 0,78	0,06 - 0,81
106 VI	621,90	0,00 - 0,32	0,02 - 0,36	0,02 - 0,48
107 I	622,40	0,12 - 0,53	0,21 - 0,55	0,01 - 0,45
107 II	622,80	0,26 - 0,60	0,01 - 0,29	*
107 III	623,10	0,21 - 0,55	0,20 - 0,58	0,16 - 0,42
107 IV	623,40	0,32 - 0,56	0,18 - 0,38	0,16 - 0,49
107 V	623,70	0,44 - 0,55	0,19 - 0,39	0,12 - 0,43
107 VI	624,10	0,07 - 0,53	0,06 - 0,29	0,09 - 0,42
107 VII	624,60	0,26 - 0,56	0,32 - 0,59	0,43 - 0,81

Tabelle 3.2: Korrelation zwischen Sedimentationsrate und Tiefe für die Mikrofelder der Süderelbe

Peilplan	Stromkilometer	Korr.-Koeffizient		
		a - Streifen	b - Streifen	c - Streifen
201 I	608,50	0,54 - 0,78	0,52 - 0,79	0,42 - 0,66
201 II	609,00	0,36 - 0,70	0,45 - 0,75	0,48 - 0,72
201 III	609,40	0,40 - 0,65	0,39 - 0,84	-
201 IV	609,80	0,28 - 0,49	0,24 - 0,55	-
201 V	610,30	0,61 - 0,80	0,56 - 0,73	-
202 I	610,50	0,46 - 0,73	0,45 - 0,62	-
202 II	610,90	0,29 - 0,77	0,40 - 0,72	-
202 III	611,30	0,41 - 0,78	0,39 - 0,72	-
202 IV	611,60	0,41 - 0,57	0,46 - 0,64	-
202 V	611,80	0,31 - 0,56	-	-
202 VI	612,20	0,40 - 0,59	-	-
202 VII	612,50	0,38 - 0,51	-	-
202 VIII	612,80	0,29 - 0,52	-	-
203 I	613,50	0,13 - 0,68	0,30 - 0,57	0,31 - 0,53
203 II	614,00	0,34 - 0,76	0,45 - 0,82	0,42 - 0,71
203 III	614,50	0,06 - 0,45	0,21 - 0,58	0,30 - 0,64
203 IV	615,10	0,00 - 0,97	0,25 - 0,91	0,11 - 0,65
203 V	615,60	0,01 - 0,70	2 HST	0,02 - 0,60
204 I	616,00	0,17 - 0,71	0,27 - 0,89	0,38 - 0,72
204 II	616,40	0,07 - 0,83	0,22 - 0,87	0,21 - 0,82
204 III	616,90	0,06 - 0,68	0,23 - 0,84	0,25 - 0,78
204 IV	617,30	0,09 - 0,34	0,12 - 0,77	0,18 - 0,69
204 V	617,60	0,06 - 0,27	0,15 - 0,59	0,14 - 0,45
204 VI	618,00	0,00 - 0,03	0,12 - 0,81	0,12 - 0,46
204 VII	618,50	0,15 - 0,74	0,19 - 0,74	0,22 - 0,61
205 I	618,90	0,08 - 0,50	0,26 - 0,78	0,13 - 0,49
205 II	619,10	0,06 - 0,58	0,36 - 0,59	0,28 - 0,61
205 III	619,40	0,20 - 0,48	0,22 - 0,67	0,15 - 0,68
205 IV	619,70	0,00 - 0,85	0,04 - 0,42	0,18 - 0,50
205 V	620,00	0,01 - 0,35	0,15 - 0,50	0,19 - 0,66
205 VI	620,20	0,00 - 0,29	0,32 - 0,63	0,21 - 0,54
205 VII	620,50	0,01 - 0,22	0,34 - 0,59	-
205 VIII	620,90	0,01 - 0,51	0,01 - 0,62	-
206 I	621,50	0,00 - 0,35	0,07 - 0,45	0,15 - 0,70
206 II	622,00	0,08 - 0,43	0,25 - 0,83	0,28 - 0,77
206 III	622,50	0,39 - 0,62	0,12 - 0,69	0,19 - 0,40
206 IV	622,90	0,27 - 0,58	0,08 - 0,65	0,14 - 0,20
206 V	623,30	0,29 - 0,58	0,11 - 0,58	0,08 - 0,20
206 VI	623,70	0,30 - 0,59	0,26 - 0,37	0,01 - 0,23

Tabelle 4.1: Maximale und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten an der FLORA-Meßstelle des Amtes Strom- und Hafenbau in der Süderelbe bei geringem Oberwasser (181 m³/s bis 242 m³/s) während der Ebbephase.

Meßdatum	Durchfluß	V-Max	V-Mittel	Ebbe-Dauer	Stromweg
	m ³ /s	m/s	m/s	Std	km
01.08.1990	202	0,86	0,73	7,5	19,7
02.08.1990	198	0,89	0,72	7,5	19,4
03.08.1990	195	0,89	0,72	7,4	19,2
04.08.1990	193	0,86	0,74	7,3	19,4
05.08.1990	188	0,87	0,73	7,1	18,7
06.08.1990	184	0,89	0,73	7	18,4
07.08.1990	184	0,86	0,74	7,3	19,4
08.08.1990	184	0,89	0,74	7,1	18,9
09.08.1990	181	0,87	0,75	7,3	19,7
10.08.1990	183	0,89	0,76	7,2	19,7
11.08.1990	186	0,89	0,76	7,4	20,2
12.08.1990	184	0,87	0,75	7,2	19,4
13.08.1990	183	0,89	0,77	7,3	20,2
14.08.1990	188	0,89	0,76	7,2	20,2
15.08.1990	193	0,87	0,76	7,4	20,2
16.08.1990	191	0,83	0,69	7,3	18,1
17.08.1990	195	0,79	0,69	7,5	18,6
18.08.1990	196	0,81	0,72	7,6	19,7
19.08.1990	191	0,83	0,72	7,5	19,4
20.08.1990	195	0,84	0,69	7,3	18,1
21.08.1990	198	1,01	0,73	7,4	19,4
22.08.1990	207	0,93	0,81	7,7	22,5
23.08.1990	214	1,08	0,81	7,4	21,6
24.08.1990	216	0,96	0,84	7,5	22,7
25.08.1990	224	0,95	0,76	7,3	20
26.08.1990	224	0,94	0,76	7,8	20
27.08.1990	235	0,95	0,80	7,4	21,3
28.08.1990	242	0,96	0,76	7,3	20,2
29.08.1990	242	0,91	0,73	7,4	19,4
30.08.1990	239	0,83	0,69	7,3	18,1
31.08.1990	242	0,85	0,69	7,8	19,4
Mittelwerte:	202	0,89	0,74	7,4	19,7 +/-1,1 (6%)

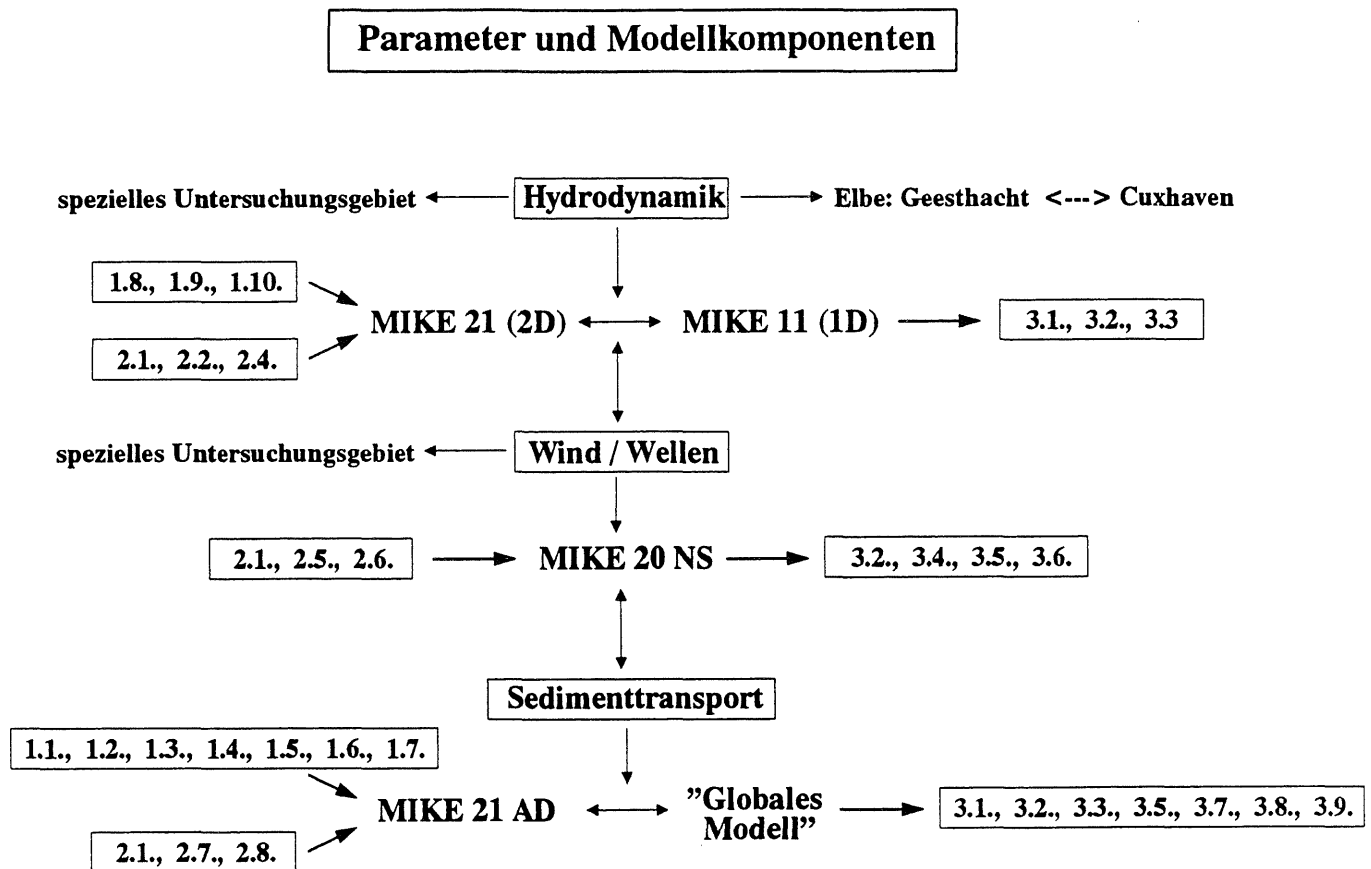
Tabelle 4.2: Maximale und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten an der FLORA-Meßstelle des Amtes Strom- und Hafenbau in der Süderelbe bei hohem Oberwasser (1600 m³/s bis 3460 m³/s) während der Ebbephase.

Meßdatum	Durchfluß	V-Max	V-Mittel	Ebbe-Dauer	Stromweg
	m ³ /s	m/s	m/s	Std	km
23.03.1988	1710	1,35	0,93	24	80,4
24.03.1988	1830	1,32	0,94	24	81,2
25.03.1988	1990	1,32	0,95	24	82,1
26.03.1988	2140	1,38	1,01	24	87,3
27.03.1988	2260	1,39	1,12	24	96,8
28.03.1988	2370	1,45	1,18	24	102
29.03.1988	2480	1,49	1,18	24	102
30.03.1988	2580	1,50	1,18	24	102
31.03.1988	2710	1,52	1,18	24	102
01.04.1988	2870	1,54	1,19	24	102,8
02.04.1988	3060	1,56	1,24	24	107,1
03.04.1988	3200	1,57	1,27	24	109,7
04.04.1988	3360	1,62	1,32	24	114,1
05.04.1988	3460	1,63	1,35	24	116,6
06.04.1988	3440	1,69	1,37	24	118,4
07.04.1988	3320	1,69	1,36	24	117,5
08.04.1988	3230	1,69	1,31	24	113,2
09.04.1988	3150	1,69	1,29	24	111,5
10.04.1988	3050	1,63	1,24	24	107,1
11.04.1988	2920	keine	Angaben	24	-
12.04.1988	2780	keine	Angaben	24	-
13.04.1988	2650	keine	Angaben	24	-
14.04.1988	2550	1,56	1,24	24	107,1
15.04.1988	2470	1,56	1,19	24	102,8
16.04.1988	2390	1,56	1,14	24	98,5
17.04.1988	2310	1,58	1,12	24	96,8
18.04.1988	2210	1,50	1,09	24	94,2
19.04.1988	2150	1,50	1,09	24	94,2
20.04.1988	2010	1,50	1,02	24	88,1
21.04.1988	1910	1,43	0,99	24	85,5
22.04.1988	1810	1,41	0,96	24	82,9
23.04.1988	1730	1,44	1,01	24	87,3
24.04.1988	1660	1,48	0,99	24	85,5
25.04.1988	1600	1,51	0,97	24	83,8
Mittelwerte:	2511	1,52	1,14	24	98,6 +/- 2,1(6%)

Tabelle 5: Gesamtbaggermengen von 1985 bis 1994 (10 Jahre) in den Peilabschnitten 203 bis 206

Jahr	Peilabschnitt	Ortsbezeichnung	Profilmaß (m³)	Bodenart*	Mitt. Baggermengen über 10 Jahre (m³/Jahr)
1988	203.3 - 203.5	Süderelbe unterh. Harb. Elbbrücken	20.060	Sand	2.006
1986	203.3	Süderelbe unterh. Elbbr.-Seehfn 1	162.444	Sand	135.911
1987	203.3	Süderelbe unterh. Elbbr.-Seehfn 1	73.090	Sand	
1988	203.3	Süderelbe unterh. Elbbr.-Seehfn 1	503.523	Sand	
1989	203.3	Süderelbe unterh. Elbbr.-Seehfn 1	253.751	Sand	
1990	203.3	Süderelbe unterh. Elbbr.-Seehfn 1	25.161	Sand	
1993	203.3	Süderelbe unterh. Elbbr.-Seehfn 1	25.829	Sand	
1994	203.3	Süderelbe unterh. Elbbr.-Seehfn 1	315.309	Sand	
1987	204	Süderelbe (Seehafen 1/Kattwykbrücke)	206.899	Sand	37.022
1988	204	Süderelbe (Seehafen 1/Kattwykbrücke)	8.627	Mischboden	
1989	204	Süderelbe (Seehafen 1/Kattwykbrücke)	83.351	Sand	
1991	204	Süderelbe (Seehafen 1/Kattwykbrücke)	702	Mischboden	
1991	204	Süderelbe (Seehafen 1/Kattwykbrücke)	63.244	Sand	
1994	204	Süderelbe (Seehafen 1/Kattwykbrücke)	7.403	Sand	
1994	204.2	HEW-Moorburg/Liegeplatz	9.140	Mischboden	1.046
1994	204.2	HEW-Moorburg/Liegeplatz	1.324	Sand	
1986	205	Süderelbe Kattwykbrücke /Krusenbusch	233	Mischboden	11.158
1987	205	Süderelbe Kattwykbrücke /Krusenbusch	17.455	Sand	
1988	205	Süderelbe Kattwykbrücke /Krusenbusch	92.361	Sand	
1992	205	Süderelbe Kattwykbrücke /Krusenbusch	1.529	Mischboden	
1987	205	Süderelbe Fa. Nordholz Liegeplatz	667	Mischboden	90
1994	205	Süderelbe Fa. Nordholz Liegeplatz	231	Mischboden	
1987	206	Köhlbrand Krusenbusch bis Elbe	135.150	Sand	45.691
1988	206	Köhlbrand Krusenbusch bis Elbe	16.320	Sand	
1989	206	Köhlbrand Krusenbusch bis Elbe	104.890	Sand	
1991	206	Köhlbrand Krusenbusch bis Elbe	191.231	Sand	
1992	206	Köhlbrand Krusenbusch bis Elbe	8.600	Sand	
1994	206	Köhlbrand Krusenbusch bis Elbe	719	Mischboden	
1985	206	Köhlbrand Westseite	41.574	Sand	53.398
1986	206	Köhlbrand Westseite	21.335	Sand	
1988	206	Köhlbrand Westseite	203.431	Sand	
1989	206	Köhlbrand Westseite	67.150	Sand	
1992	206	Köhlbrand Westseite	62.018	Mischboden	
1994	206	Köhlbrand Westseite	4.874	Mischboden	
1994	206	Köhlbrand Westseite	133.596	Sand	

Abbildung 1: Kalibrierungs- (eichungs-), Eingabe- und Ausgabeparameter wichtiger zur Modellierung des Feststofftransportes notwendiger Modellkomponenten des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE;
(Modellkomponenten: MIKE 11, MIKE 21, MIKE 20 NS, MIKE 21 AD)



1. Eichungs-Parameter:

- 1.1. Erosionsrate
- 1.2. Sinkgeschwindigkeit
- 1.3. Feststoffdichte (Sed.)
- 1.4. Krit. Schubspannung
(Erosion u. Deposition)
- 1.5. Krit. Sohlschubspannung
- 1.6. Konsolidierungsrate
- 1.7. Flockung
- 1.8. Widerstandszahl 'M'
(Manning-Faktor)
- 1.9. Wasserstandsänderung
- 1.10. Strömungsgeschw. u. -richtung

2. Eingabe-Parameter:

- 2.1. Topografie
- 2.2. Wasserstände
- 2.3. Bodenreibung
- 2.4. Turbulenter Austausch
- 2.5. Windfeld
(Geschwindigkeit u. Richtung)
- 2.6. Wellenhöhe, -richtung u. -periode
- 2.7. Feststoffkonzentration
- 2.8. Sedimentzusammensetzung
(Korngrößenverteilung)

2. Ausgabe-Parameter:

- 3.1. Wasserstände
- 3.2. Strömungsfeld
- 3.3. Wassermengen
- 3.4. signifikante Wellenhöhe,
-richtung u. -periode
- 3.5. Wellenreibungskoeff.
- 3.6. Strömungsreibungskoeff.
- 3.7. Feststoffkonzentrations-
verteilung
- 3.8. lokale Erosion u. Deposition
- 3.9. Feststofftransportbilanz