

# Der Unterelbe-„Salzkeil“ – Eine morphodynamische Bewertung

Von HANS-JOACHIM DAMMSCHNEIDER

## Zusammenfassung

Anhand der integrierenden Bewertung umfangreicher hydrographischer Meßreihen kann festgestellt werden, daß für den morphodynamisch kritischen Unterelbeabschnitt vor der Insel Rhinplatte (hier: intensive Unterhaltungsbaggerungen) der Parameter Salzgehalt eine sehr bedeutende Rolle spielt. In dieser Hinsicht systemsteuernd wirkt in erster Linie das Oberwasser der Elbe, welches bei Unterschreiten der „kritischen“ Grenze von  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  sowohl das Vordringen eines bodennahen Dichtestroms (incl. eines damit verbundenen bodennahen Materialtransports) auslöst, als auch vor allem eine (wasserbaulich negative) Veränderung der Gesamt-Morphodynamik durch tendenzielle Absenkung des Parameters „Wasserstand“, Verringerung der „Ebbdauerüberschüsse“ und Verlangsamung der „Strömungsgeschwindigkeiten“ bewirkt.

Durch einen im Längsprofil der Unterelbe relativ zu großen Hauptelbe-Querschnitt entsteht auf diese Weise ein episodisches, d. h. zeitlich begrenztes Ansteigen der Sedimentationsraten, die aller Wahrscheinlichkeit nach besonders durch die tendenzielle Verschiebung des Flutstromanteils zu Lasten des Ebbstromanteils erhöht werden: Ein bodennaher Materialtransport kann unter diesen Umständen, unterstützt vom Dichtestrom, ein relatives „Mehr“ an Feinstsediment aus dem Bereich des Krautsander Watts/der Brammerbank bis auf Höhe Krautsand/Rhinplatte-Süd führen.

## Summary

*The evaluation of numerous hydrographic time series show that salinity plays an important role in the morphological development and the associated need for intensive dredging of the "critical" outer Elbe section before Rhinplatte Island. The river flow rate is a primary factor affecting the salinity intrusion. When this is less than  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , both a near bottom density current and its associated material transport as well as a general change in the total morphodynamics occur. The latter includes a reduction in water level, velocities and ebb tide duration.*

*An episodic i. e. time limited increase in the sedimentation rate occurs due to the relatively large main cross section in this Elbe reach. This sedimentation is probably attributable to the increase in the flood tide duration relative to that of the ebb tide. A near bottom material transport can be enhanced by density currents, and thus transfer relatively more fine sediment from the Krautsand inter-tidal zone and the Brammerbank to the Upper Krautsand/Rhinplatte.*

## Inhalt

1. Untersuchungsgebiet und Problemansprache . . . . .	30
2. Datenaufnahme und Bewertungsstrategie . . . . .	35
3. Zeitliche und räumliche Veränderlichkeit des Chloridgehaltes im Unterelbebereich zwischen Brammerbank und Schwarztonnensand . . . . .	37
3.1 Station 1 bei km 678,2 (Brammerbank) . . . . .	37
3.2 Station 2 bei km 675,5 (Krautsander Watt) . . . . .	39
3.3 Station 3 bei km 672,4 (Rhinplatte-Süd) . . . . .	40
3.4 Station 4 bei km 669,5 (Schwarztonnensand) . . . . .	40
3.5 Der Chloridgehalt im Längsprofil . . . . .	42
4. Salzgehalt und Oberwasser . . . . .	44
5. Schwebstoffgehalt und Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	46
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	49



## 1. Untersuchungsgebiet und Problemanalyse

Es ist bekannt, daß in Abhängigkeit von der Oberwasserführung der Elbe eine Verschiebung der ästuarinen Brackwasserzone eintritt. Nach langjähriger Erfahrung befindet sich der obere Grenzbereich chloridreicheren (Boden-)Wassers im Mittel zwischen Elb-km 690 (Holterwettern) und Elb-km 675 (Bereich Glückstadt, siehe Abb. 1).

Es ist jedoch auch bekannt, daß bei sehr geringen Oberwasserabflüssen ( $\leq 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ein nachweisbarer „Salzkeil“ bis in den Bereich Schwarztunnensand (km 665) vorstoßen kann.

Da sowohl der Hauptelbebereich des o. a. Kerngebietes (Insel Rhinplatte/Krautsand) als auch der Rand- bzw. Flachwasserbereich im Großraum der Brammerbank/des Krautsander Wattes in Hinblick auf die natürlichen Materialumlagerungen intensiv beobachtet werden muß (Grund: umfangreiche Sedimentbewegungen; s. DAMMSCHNEIDER, 1988), sollte dem aperiodischen Vorstoßen eines chloridreichen Wasserkörpers aus morphodynamischer Sicht verstärkte Beachtung geschenkt werden. (\*)

Dies ist so zu verstehen, daß in ästuarinen Mischungszonen ein potentiell materialfällender/-ausflockender Prozeß stattfinden kann, der zu hohen Sedimentationsraten führt. Besonders augenfällig wird dies beispielsweise im Bereich des Schleusenvorhafens bei Brunsbüttel (NOK).

Aber auch im Strom der Elbe können solche Verkopplungen von Systemeinflüssen zu wasserbaulich negativen Vorgängen führen. Bisher ist allerdings kein unmittelbarer Nachweis für die morphodynamische Wirksamkeit veränderlicher Salzeinflüsse, beispielsweise im Bereich der bekannten Baggerstelle „Rhinplatte“ (Elb-Kilometer 671–676), geführt worden.

Zwar liegen Dauermessungen der Leitfähigkeit aus dem Strombereich bei Bielenberg (Meßstation der NWK, km 667.5) oder bei Krautsand (WSA Hamburg, km 672.4) vor, jedoch handelt es sich hierbei um nur bedingt bewertbare Ganglinien aus Wasseroberflächen-Beprobungen.

Die eigentliche Problemzone, nämlich die sogenannte „Baggerstelle Rhinplatte“, befindet sich jedoch im Tiefwasser – es ist geradezu das Hauptmerkmal der hier stattfindenden Sedimentationen, daß diese als Massenproblem (!) nur im Fahrrinnenbereich zu beobachten sind (s. DAMMSCHNEIDER, 1989).

Hochauflösende Messungen von Systemzusammenhängen waren bisher einzig im Wattenbereich der Insel Rhinplatte möglich (s. Abb. 2). Die Ergebnisse zeigen (nach DAMMSCHNEIDER, 1989), daß zwar sehr wohl ein Bezug zwischen Oberwasser, Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentniveauveränderungen vorhanden ist, jedoch ergibt sich keine signifikante Korrelation zum Auftreten von Mindertiefen im Fahrrinnensektor.

Der charakteristische Typus des Fahrrinneneintriebs vor der Insel Rhinplatte ist gekennzeichnet durch einen

schlagartigen, aperiodischen und massenhaften

Anfall von sogenanntem „fluid mud“, der sich in Form eines „inluvialen Schwemmfächers“ flächenhaft ausbreitet.

Fluid-mud kann als ein Material angesprochen werden, dessen Zusammensetzung zu über 60 % aus Ton und Schluff (Fraktionen  $< 0,063 \text{ mm}$ ) besteht. Es weist eine sehr hohe

(\*) Das Untersuchungsprogramm „Salzkeil“ wurde vom Verfasser in seiner Tätigkeit als Leiter des gewässerkundlichen Büros des WSA Hamburg initiiert. Bei dem Vorhaben handelt es sich sowohl um ein WSA-seitiges Meßprogramm als auch ein Forschungsunternehmen, das der Verfasser im Rahmen eines Lehrauftrages mit Unterstützung der Universität Hamburg (Prof. Dr. G. Borchert) durchführte.

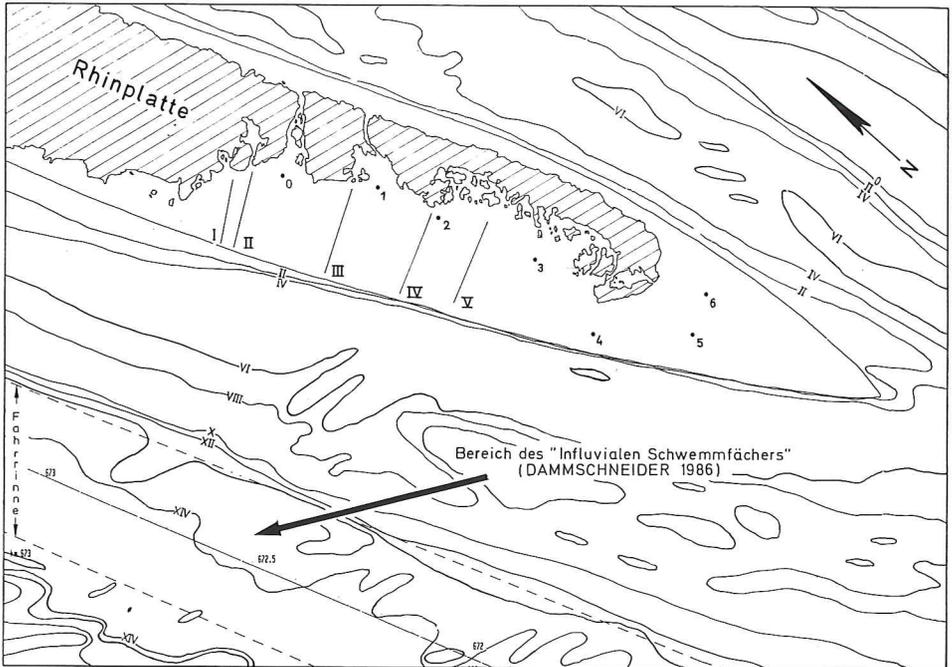


Abb. 2: Bereich des Fahrgrinnen-Eintriebs vor der Insel Rhinplatte (Unterelbe). Lage der Schlick-Meßstellenverteilung im Bereich der Insel-Watten (aus DAMMSCHNEIDER, 1989)

Wassersättigung auf und ist damit außerordentlich mobil: Bei vor Ort durchgeführten Sedimentansprachen rinnt das Material im wahrsten Sinne des Wortes „durch die Finger“. Der Anteil organischer Substanz ist (hier) meist überraschend gering und überschreitet so gut wie nie 5 % des Trockengewichtes.

Wie erwähnt, geht das Auftreten von Mindertiefen nach bisherigen Untersuchungen in nahezu allen Fällen einher mit dem „Einfließen“ von fluid-mud.

Der nautische Nachweis der Mindertiefen ist in vielen Fällen mit Problemen verbunden, da fluid-mud mit einer Dichte zwischen 1,2 und 1,4 Gamma nicht in jedem Fall durch Echolotungen reproduzierbar aufgenommen werden kann. Häufig ist die Mindertiefe nur als sogenannter „doppelter Horizont“ (DAMMSCHNEIDER, 1986) im Echoschrieb erkennbar. Dabei dürfte dieser obere fluid-mud-Horizont in vielen Fällen noch schiffbar sein (ASTER und MEYER, 1990), was jedoch aus Sicherheitsgründen (nautische Tiefe) im Bereich der Unterelbe nicht praktiziert werden kann.

Unbekannt ist die Herkunft bzw. die Entstehung des fluid-mud. Kartenauswertungen, Analysen der Eintrieb-Sukzessionen, Verteilungsstatistiken der Baggereinsatzhäufigkeiten (s. DAMMSCHNEIDER, 1986) und flächenhafte Materialbeprobungen (BAEHR, 1990; s. Abb. 3) deuten einen Materialtransport aus den oberstromig der Rhinplatte gelegenen Bereichen vor Bielenberg an.

Gezielte Messungen der Strömungsbedingungen bzw. der Variabilität der Sohlenveränderungen zeigen bisher allerdings keine Hinweise auf die äußeren Entstehungs- und Bewegungsbedingungen von fluid-mud bzw. dem Fahrgrinneneintrieb allgemein. Zwar sind beispielsweise gerade im Bereich vor der Insel Rhinplatte (km 672) bereits in Strömungsmeß-

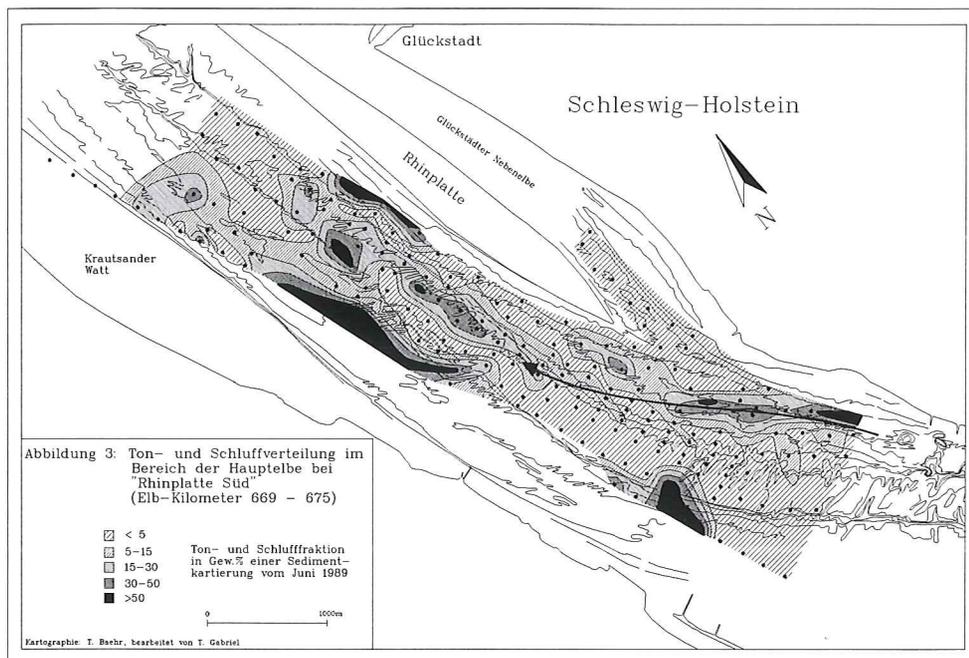


Abb. 3: Sedimentverteilung im Bereich der Insel Rhinplatte. Darstellung der Ton- und Schlufffraktion < 0,063 mm (in Gewicht-%) aus der Tiefwasser-Rasterbeprobung vom Juni 1989 (aus T. BAHR, 1990)

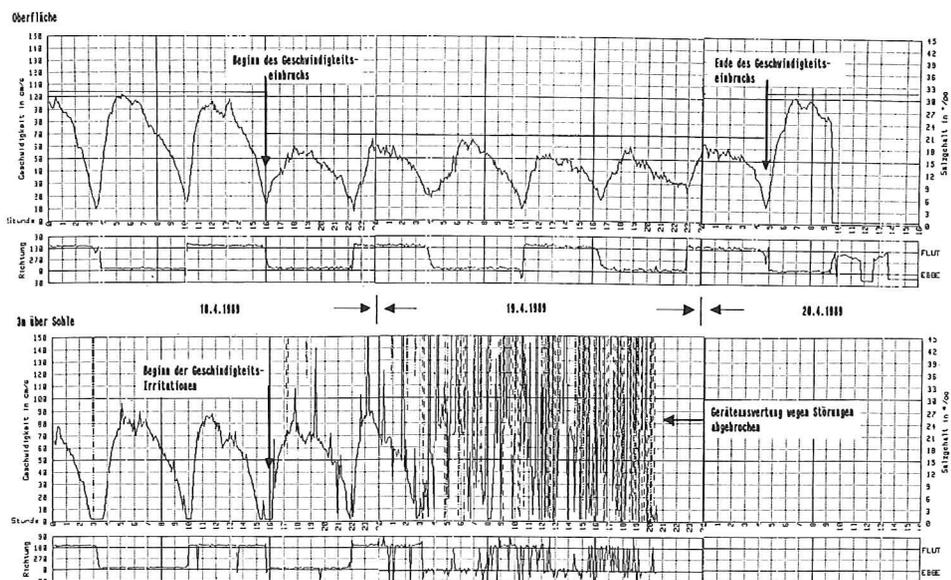


Abb. 4: Strömungs-Dauermessung bei Elb-Kilometer 672,5, nördlicher Tonnenstrich, Oberflächen- und „3 m über der Sohle“-Messung (Aufzeichnung des WSA Hamburg)

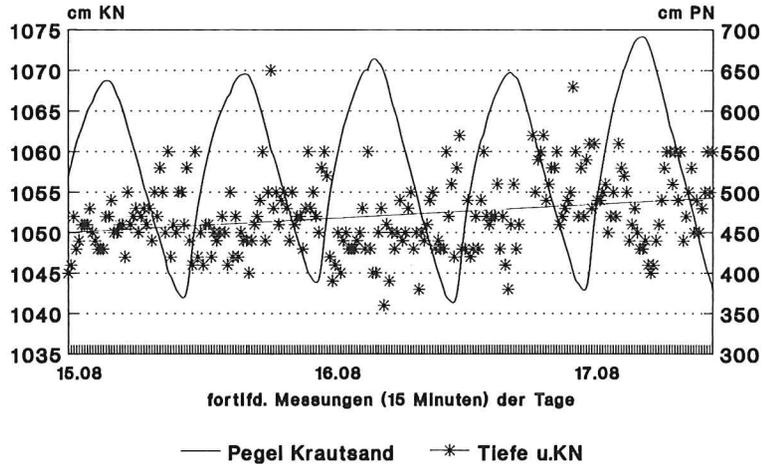


Abb. 5: Sohlenniveau-Dauermessung bei Unterelbe-km 672, Tiefwasserbereich nahe der nördlichen Fahrinnenkante (Ausschnitt der Meßreihe vom 14. bis 25. 8. 1989)

reihen überraschende Geschwindigkeitseinbrüche aufgetreten, deren Ursache durchaus mit dem Transport von fluid-mud („zähes Wasser“) gesehen werden könnten (s. Abb. 4), kontinuierliche Materialbeprobungen und im festen Zeitraster von 15 Minuten (!) an gleicher Stelle durchgeführte Sohlenhöhenkontrollen über eine volle Woche von einem fest stationierten Ponton aus erwiesen sich dann (zeitraumbedingt?) aber als ergebnislos – ein Eintrieb/fluid-mud-Transport fand während der bisher einmaligen Beobachtungsreihe (14. 8.–25. 8. 1989, s. Abb. 5) nicht statt. (\*)

Hier bestehen (naturbedingt) Defizite im Wissensstand. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Wirkung des bei geringem Oberwasser stromauf bis in diesen Raum vorstoßenden bodennahen „Salz“-Wassers, dessen Existenz und Veränderlichkeit ebenfalls bereits anhand der Dauermessung vor der Insel Rhinplatte (14. 8.–25. 8. 1989) gezeigt werden kann (s. Abb. 6).

Der in Abhängigkeit von der Oberwasserführung mit dem Flutstrom als „Salzkeil“ von See her auftretende Vorstoß chloridreichen Bodenwassers besitzt mit größter Wahrscheinlichkeit einen (wenn auch nicht exakt definierten) Einfluß auf die Entstehung von fluid-mud.

Dies kann indirekt allein daraus geschlossen werden, daß das Auftreten von Mindertiefen bzw. die Notwendigkeit zu Fahrwasserbaggerungen in enger Kopplung zur Intensität der Oberwasserführung steht:

Die Wahrscheinlichkeit des Fahrwassereintriebs vor der Insel Rhinplatte steigt dann extrem an, wenn der Oberwasserabfluß die Marke von  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  unterschreitet (s. Abb. 7).

(\*) Anmerkung zur Sohlenniveau-Dauermessung vor der Insel Rhinplatte, Abb. 5: Das Sohlenniveau schwankt in einer Größenordnung von rd.  $\pm 10 \text{ cm}$  um den Wert von  $10,5 \text{ m}$  unter KN. Es besteht zwischen dem 15. 8. 1989 und dem 18. 8. 1989 ein gewisser Trend zur Sohlabsenkung (statistisch ca.  $5 \text{ cm}$ ), jedoch ist der Einfluß der halbtägigen Wasserstandsveränderlichkeit deutlicher erkennbar – bezogen auf KN treten „große“ Wassertiefen eher bei Tide-Niedrigwasser, „kleine“ Wassertiefen eher bei Tide-Hochwasser auf. Es könnte sich hierbei auch um den unfreiwillig dokumentierten Effekt eines Wasserspiegelgefälles zwischen Pegel und Meßstelle handeln. Eine absolute Verifizierung der Wirkung der Tide(-strömung) auf das Sohlenniveau ist deshalb z. Zt. noch offen.

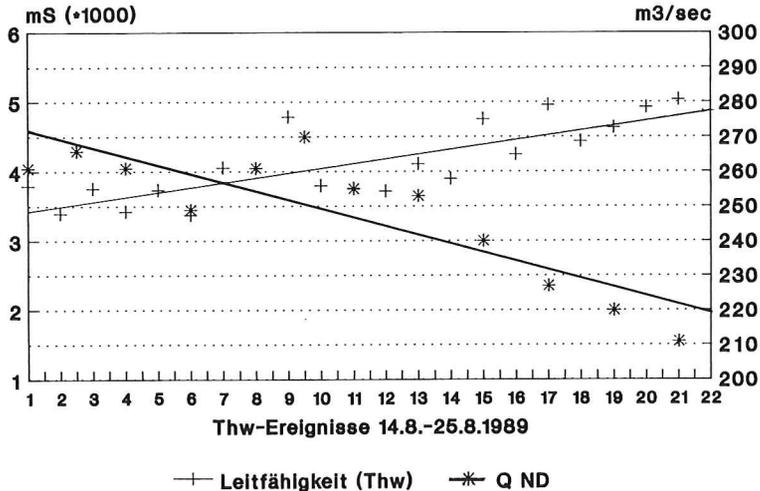


Abb. 6: Leitfähigkeits-Dauermessung bei Unterelbe-km 672. Darstellung des Verhältnisses „Leitfähigkeit“ zu „Oberwasser“ (Meßreihe vom 14. 8. bis 25. 8. 1989, Datenaufnahme fortlaufend jeweils bei Thw)

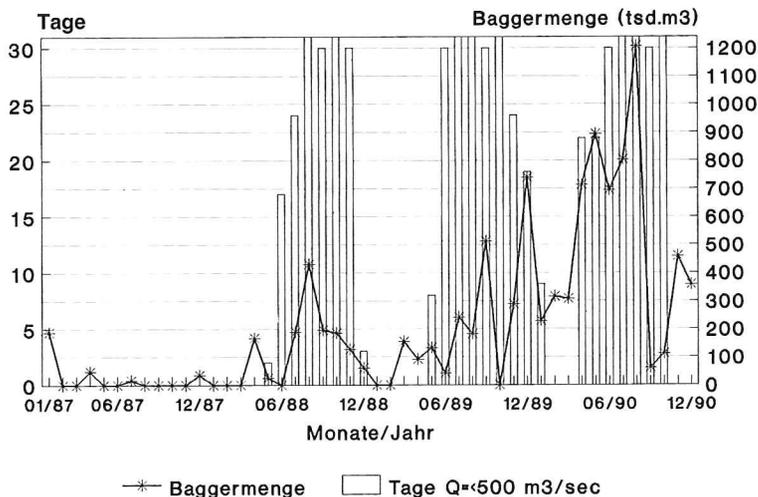


Abb. 7: Oberwasserveränderungen der Elbe und Baggermengen-Entwicklung im Bereich „Rhinplatte“ zwischen Januar 1987 und Dezember 1990 (nach Unterlagen des WSA Hamburg)

Nun ist es im Grunde jedem Fachmann klar, daß nicht „das“ Oberwasser zu Mindertiefen führt. Vielmehr trägt eine Verminderung der Oberwasserführung über eine Kette von Systemabhängigkeiten tendenziell bei zu

- a) einem Absinken der Tidehochwasserstände,
- b) Verminderung der Ebbdauerüberschüsse,
- c) Verringerung der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und
- d) einem Vorstoßen des Salzwasserkeils stromauf.

Die Punkte a) bis c) sind (nach DAMMSCHNEIDER, 1989) im Bereich der Inselwatten auf der Rhinplatte nachweislich sedimentologisch wirksam. D.h., der Einfluß der Parameter „Tidehochwasserstand“, „Ebbdauer“ und „mittlere Strömungsgeschwindigkeit“ läßt sich mittelbar in der Veränderung der Sedimentniveaus der Inselwatten ablesen.

Die Wirksamkeit der Salzgehaltsschwankungen hinsichtlich einer Schlickbildung oder Sediment-„Massen“-Veränderung läßt sich allerdings bisher nicht direkt belegen – hier besteht eine Lücke, die zu füllen ist.

## 2. Datenaufnahme und Bewertungsstrategie

Für den Untersuchungsraum wurde eine Meßstrategie aufgestellt, die die Bewertung aller erforderlichen Parameter nicht nur in ihrer räumlichen Verteilung erlaubt, sondern auch die Wertvariabilität in zeitlicher Entwicklung aufdeckt.

Dazu wurden nach entsprechenden Vorbereitungen folgende (schwimmende) Meßstationen definiert und letztlich am 22. 5. 1990 bzw. 7. 8. 1990 ganztägig positioniert:

- a) Meßfahrzeug 1 bei km 678,2, südlicher Tonnenstrich
- b) Meßfahrzeug 2 bei km 675,5, südlicher Tonnenstrich
- c) Meßfahrzeug 3 bei km 672,4, südlicher Tonnenstrich
- d) Meßfahrzeug 4 bei km 669,5, südlicher Tonnenstrich
- e) Meßfahrzeug 5 im Längsprofil strommittig zwischen km 684,5 und km 655; mit dem Kenterpunkt „Flut auf Ebbe“ stromauf fahrend
- f) Strommeßkette 8 bei km 674,2, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät
- g) Strommeßkette 7 bei km 673,6, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät
- h) Strommeßkette 6 bei km 673,0, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät
- i) Strommeßkette 5 bei km 672,1, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät
- j) Strommeßkette 4 bei km 671,2, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät
- k) Strommeßkette 3 bei km 670,5, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät

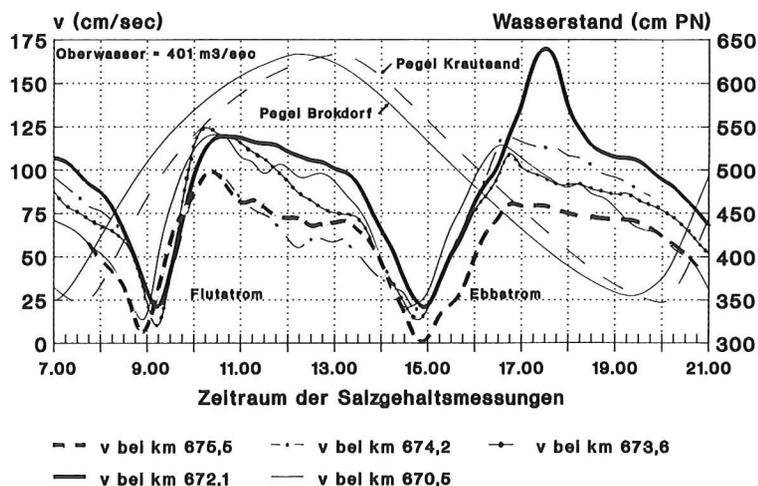


Abb. 8: Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse am 22. 5. 1990 im Meßgebiet zwischen Elb-Kilometer 675,5 und 670,5

- l) Strommeßkette 2 bei km 669,7, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät  
 m) Strommeßkette 1 bei km 668,5, nördlicher Tonnenstrich, Sohlen- und Oberflächengerät

Zwei der vier verankerten Meßstationen und ein gesondertes flexibles Beprobungsfahrzeug stellte das WSA Hamburg (MS Twielenfleth; MS Brammer; MS Libelle), ebenso wie die Strömungsmeßgeräte (Aanderaa RCM4) vom WSA Hamburg eingesetzt wurden. Unterstützt wurde das Vorhaben vom Forschungszentrum Geesthacht (GKSS) durch die Bereitstellung des Meßpontons „ODAS“ und vom Amt für Strom- und Hafengebäude Hamburg durch Einsatz des Meßschiffes „Nige Wark“. Studenten des Instituts für Geographie der Universität Hamburg beteiligten sich im Rahmen eines Projektpraktikums aktiv an den Naturmessungen und sorgten für die umfangreichen Laborauswertungen. Allen Institutionen, Mitarbeitern und Studenten sei an dieser Stelle sehr herzlich für ihr Engagement gedankt.

Je Meßstation wurden folgende Parameter über die gesamte Tide des 22. 5. 1990 aufgenommen:

I. Chloridgehalt und Leitfähigkeit, fortlaufend alle 15 Minuten an Sohle und Oberfläche; insgesamt wurden 482 Wasserproben auf ihren Chloridgehalt analysiert

II. Schwebstoffgehalt an der Sohle (Position 2 fortlaufend, Position 1 und 3 zweimalig)

Die Messungen begannen am 22. 5. 1990 um 7 Uhr und endeten um 21:30 Uhr des Tages. Damit konnte tatsächlich eine volle Tide zusammenhängend aufgenommen werden (s. Abb. 8).

Die ersten Messungen erfassen die Bedingungen zum Ende des morgendlichen Ebbsstroms. Kenterpunkt der Strömung trat an Position 2 um 9:00 Uhr ein. Die Flutphase wurde ohne Unterbrechung beprobt; Kenterpunkt Flut auf Ebbe war an Station 2 um 14:45 Uhr. Die nachmittägliche bzw. abendliche Kenterung von Ebbe auf Flut wurde um 21:40 Uhr aufgenommen (Station 2).

Während der Meßkampagne traten zwar an der Station 4 (km 669,5) zweimalig Störungen der Sohlenwasserbeprobung auf, jedoch war dies, wie sich zeigen läßt, ohne Einfluß auf die Bewertungsmöglichkeit der Datenreihen.

Alle Strömungsmeßgeräte wurden bereits am Morgen des 18. 5. 1990 ausgelegt. Bis auf das Sohlengerät der Station 3 (km 672,4), das am 21. 5. wegen technischer Störungen unbewertbar wurde, und der Station 1 (km 668,5), die während der Meßperiode ausfiel, konnten im 1-Minuten-Takt präzise Stromgeschwindigkeiten den Salzgehaltmessungen zur Seite gestellt werden.

Damit ist das Ziel der Meßkampagnen meßtechnisch klar umrissen: Es sollten umfassend zeitaufgelöste Raumdaten zur Systeminterpretation bereitgestellt werden.

Dies gelingt aus logistischen Gründen bisher meist nur für die Dauer von maximal einer Tide. Darüber hinaus variieren jedoch die Naturdaten in mittelfristiger Sicht (Tage/Wochen) in einem durch Einzelmesskampagnen nicht absolut abzudeckenden Rahmen. Durch die Kombination von Einzelmessungen mit teils zusätzlich vorhandenen (älteren) Dauermessungen wird erreicht, daß die tendenzielle Raumdynamik dennoch relativ präzise erfaßt werden kann – was im ersten Ansatz zur wasserbaulichen Beurteilung hinreichend genügt.

### 3. Zeitliche und räumliche Veränderlichkeit des Chloridgehaltes im Unterelbbebereich zwischen Brammerbank und Schwarztonnensand

#### 3.1 Station 1 bei km 678,2 (Brammerbank)

Die Station Nr. 1 wurde bei Elb-Kilometer 678,2 eingerichtet (s. Abb. 1), mithin also in einem Stromabschnitt, an dem in jedem Fall die stromauf vorstoßende „Zunge“ des chloridreicheren Flutwasserkörpers nachweisbar sein sollte. Tatsächlich wurde vom Verfasser bereits im Jahr 1988 zweimalig an dieser Stelle eine volle Tide beprobt, so daß grundsätzliche Ganglinienstrukturen bekannt sind.

Darüber hinaus besteht 1800 m stromab dieses Punktes seit über 10 Jahren ein mehrfach auf Chloridgehalte geprüftes Meß-Querprofil. So kann behauptet werden, daß die nachfolgend geschilderten Chlorid-Ganglinien hinreichend repräsentativ sind, um einer Raumbewertung zu dienen.

Zunächst fällt auf, daß bis 13 Uhr im laufenden Flutstrom bei steigendem Salzgehalt eine sehr starke Parallelität der Oberflächen- und Sohlen-Chloridwerte zu beobachten ist (s. Abb. 9). Hieraus darf geschlossen werden, daß an dieser Meßstelle eine sehr gute turbulente Durchmischung der gesamten Wassersäule stattfindet.

Die Absolutheit der Strömungsgeschwindigkeiten spielt für die Bewertung der Raumprozesse allerdings eine vergleichsweise untergeordnete Rolle, während das nach Thw einsetzende Unterschreiten eines ganz bestimmten Wasserstandes, nämlich von 610 cm PN (Pegel Brokdorf),

- einen starken Anstieg der Chloridwerte, verbunden mit einer
  - erheblichen „Unruhe“ der Chloridwerte
- mit sich bringt.

Ursache ist das Wiederauftauchen der Brammerbank. Denn ab 13:30 Uhr wird bei noch laufendem, aber ausklingendem Flutstrom (Wasserstand Brokdorf = 610 cm PN = - 10 cm

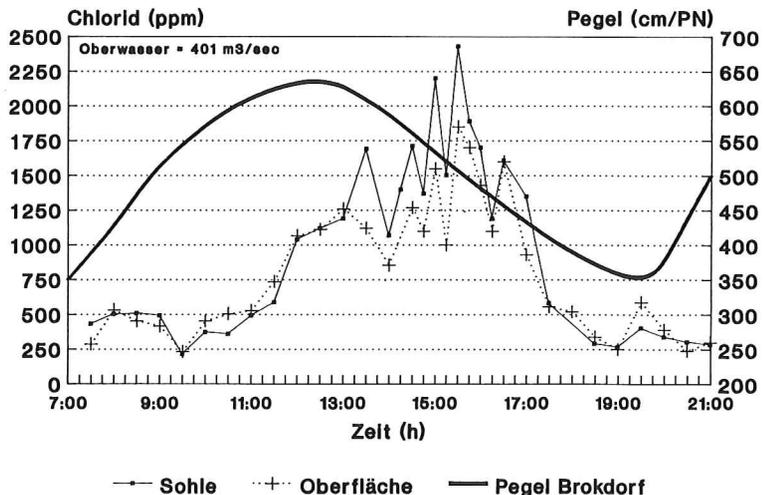


Abb. 9: Chloridgehalt am 22. 5. 1990 bei Elb-Kilometer 678,2 (Station 1), südlicher Tonnens-trich, Probenentnahme an Sohle und Oberfläche (Wasserstand: Pegel Brokdorf)

KN = Beginn des Trockenfallens der Brammerbank-Außenkante/-sände) eine plötzliche Querschnittseinengung verursacht. In Folge wird weiterhin die Meßstelle von der flächenhaften Überströmung der Brammerbank abgeschnitten.

Es darf angenommen werden, daß während dieser Zeit in zunehmendem Maße mit einer coriolisbedingten Rechtsablenkung des Stromes, welche chloridreiches Bodenwasser pulsierend an der abtauchenden Brammerbank vorbeischiebt, jene zu verzeichnenden „unruhigen“ Spitzenwerte im Salzgehalt verursacht werden.

Daß eine coriolisbedingte Rechtsablenkung des Chloridtransportes tatsächlich existiert, ist beispielsweise allein daran ablesbar, daß am Meßtag (22. 5. 1990) der sohlennahe Chloridgehalt in der tiefen Fahrrinne ( $> 13,5$  m KN) bei Kenterpunkt einen deutlich geringeren Wert aufweist (1400 ppm gegenüber 2430 ppm, s. Abb. 17) als auf der hier angesprochenen und im flacheren Bereich (!) befindlichen Station 1 (9,5 m KN). Dies deutet ohne Frage auf eine sehr starke Rechtskomponente des Chloridvorstoßes bzw. ein Einfließen von Bodenwasser hohen Chloridgehaltes aus dem Bereich der Freiburg-Bank – was zwangsläufig auch zu hohen Chloridwerten binnenseitig der Brammerbank führen muß (s. dazu Abschnitt 3.2 und 3.5).

Stützend für die These einer Rechtsablenkung kann eine Messung vom 10. 8. 1988 angeführt werden, die als Querprofilaufnahme des Chloridgehaltes bei km 679,8 stattfand (s. Abb. 11).

Hier ist zu erkennen, daß die Meßlotrechte ‚A‘, gelegen im unterstromigen Bereich der südlichen (binnenseitigen) Umströmung der Brammerbank, im Beginn des Flutstroms bis auf einen Zeitraum von 1,5 Stunden **höhere** Chloridwerte aufweist, als die in Strommitte auf gleicher Linie (Außenkante der Brammerbank) befindliche Station ‚B‘ bzw. gar der Nordbereich der Hauptelbe (Station ‚C‘).

Hier deutet sich demnach tendenziell an, daß im Zuge der starken Rechtsablenkung des Flutstroms (Coriolis-bedingt) sehr viel chloridhaltiges Wasser in eine Umströmung der Brammerbank gelenkt wird.

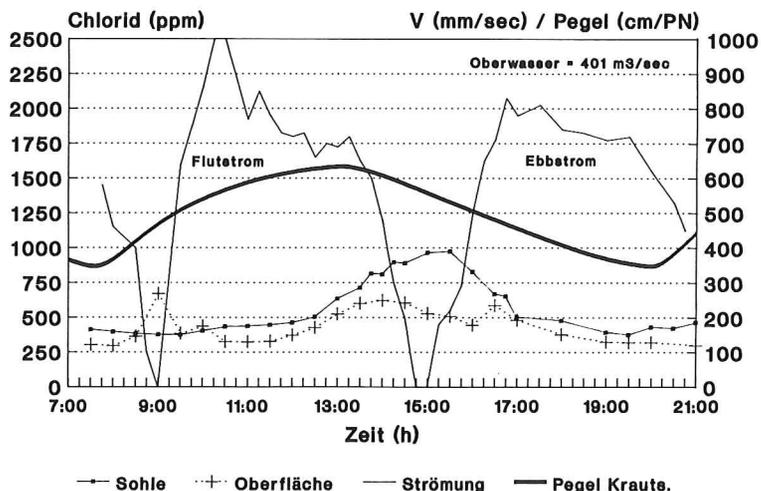


Abb. 10: Chloridgehalt am 22. 5. 1990 bei Elb-Kilometer 675,5 (Station 2), südlicher Tonnenstrich, Probenentnahme an Sohle und Oberfläche (Strömung = Sohlenmessung/Wasserstand: Pegel Krautsand)

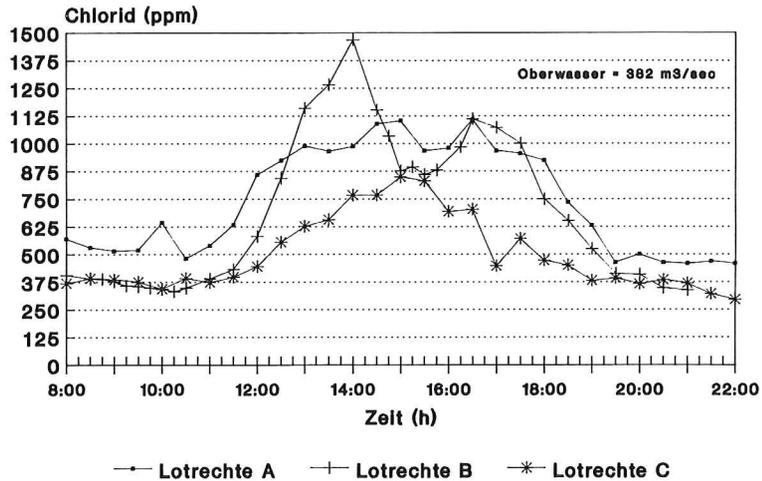


Abb. 11: Chloridgehalt am 10. 8. 1988 bei Elb-Kilometer 679,8, Querprofilaufnahme „Sohle“ und „Oberfläche“ in den Lotrechten ‚A‘ (Südbereich: binnenseitige Einströmung zur Brammerbank), ‚B‘ (Mitte: Außenkante Brammerbank) und ‚C‘ (Nordbereich: Hollerwettern)

### 3.2 Station 2 bei km 675,5 (Krautsander Watt)

Von Station 1 zu Station 2 reduziert sich der Kenterpunkt-Chloridgehalt auf einer Distanz von nur 2700 m um nahezu 60 %. Vorgreifend auf Abschnitt 3.5 handelt es sich hier um jenen Stromabschnitt, der den größten Längsprofil-Gradienten aufweist. Das bedeutet auch, daß die Station 2 hinter der eigentlichen „harten“ Chlorid-Front liegt und dadurch im Vergleich zur 2700 m stromab gelegenen Station 1 einen harmonischen, das heißt ungestörten Ganglinienverlauf, besitzt (s. Abb. 10).

Auch wird an dieser Station deutlich, daß der Salzgehalt eher eine Funktion der zeitlichen Entwicklung der von See angelieferten Tidemasse ist, als der absoluten Strömungsgeschwindigkeit. Ein besonderer Anstieg des Salzgehaltes wird deshalb auch erst ab rd. 13:00 Uhr erreicht, während zu dieser Zeit die Flutstromgeschwindigkeiten bereits stark abzusinken beginnen.

Interessant ist der Vergleich des Chloridgehaltes zwischen dieser Position 2 (südlicher Tonnenstrich, Wassertiefe rd. 10 m KN) und einem Meßpunkt im gleichen Kilometer in Mitte der Fahrrinne (Wassertiefe 13,5 m KN), beprobt während des Kenterpunktes Flut auf Ebbe (Maximalwert, s. Längsprofil in Abb. 16).

Während im „flacheren“ Bereich der Position 2 nur ein Wert von 976 ppm erreicht wird, liegt dieser im Tiefwasser bei nahezu dem doppelten Betrag (1896 ppm). Dies erscheint auf den ersten Blick insofern „logisch“, als dichteres chloridreiches Bodenwasser sich in den tiefsten Bereichen des Profils sammelt, steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen aus Station 1 (Abschnitt 3.1).

Denn wie beschrieben, zeigt im Tiefwasser-Längsprofil die stromab benachbarte Station 1 auf Höhe km 678,2 bzw. sogar bei km 681,5 (Hollerwettern, s. Abb. 16) bei Kenterpunkt deutlich niedrigere Werte!

Diese scheinbar atypische Verteilung kann eigentlich nur so gedeutet werden, daß im Zuge der Umströmung der Brammerbank salzreiches Wasser bei km 682 (Freiburg) konzen-

triert aus der Hauptelbe „abgeleitet“ wird und auf diese Weise bei der „Wiedereinleitung“ in die Hauptelbe bei km 677 hier zu ungewöhnlich hohen Chloridgehalten im Tiefwasser führt (s. „Rechtsablenkung“ in Abschnitt 3.1 und Abb.17, zur Theorie eines „sichelartigen“ Chloridvorstoßes).

### 3.3 Station 3 bei km 672,4 (Rhinplatte-Süd)

Bei Elb-Kilometer 672,4 (Station 3) ist gegenüber der unterstromigen Station 2 bei km 675,5, d. h. auf nur 3100 m Distanz, der Chloridgehalt im Maximum wiederum stark reduziert worden (rd. 50 %). Die Verlaufskurve ist nach Abbildung 12 ähnlich der bei Station 2, allerdings wird das Chlorid-Maximum rd. 45 Minuten früher erreicht!

Ohne daß im einzelnen dafür eine detaillierte Erklärung geliefert werden kann, steht zu vermuten, daß auch hier der binnenseitig der Brammerbank bzw. des Krautsander Watts „voreilende“ relativ erhöhte Chloridgehalt aus der Umströmung (Rechtsablenkung) die Ursache sein dürfte. Bekannt ist nämlich, daß die Wurzelzone des Krautsander Watts bei Strom-Kilometer 675 eine Überströmungsrinne aufweist, über die mit dem Flutstrom aus dem Bereich „Einmündung Wischhafener Süderelbe“ sehr viel Feinmaterial in Richtung Hauptelbe „geschüttet“ wird (s. DAMMSCHNEIDER, 1988) – der Bezug zur Überführung von chloridreichem „Umströmungswasser“ in die Hauptelbe (unterstromig der Meßstelle) ist gedanklich naheliegend.

### 3.4 Station 4 bei km 669,5 (Schwarztonnensand)

Im Stromabschnitt zwischen km 672,4 (Station 3) und km 669,5 (Station 4) fällt die Spitze des Chloridgehaltes um vergleichsweise geringe 30 % ab – die Salzungge dünn stromauf offensichtlich langsamer aus.

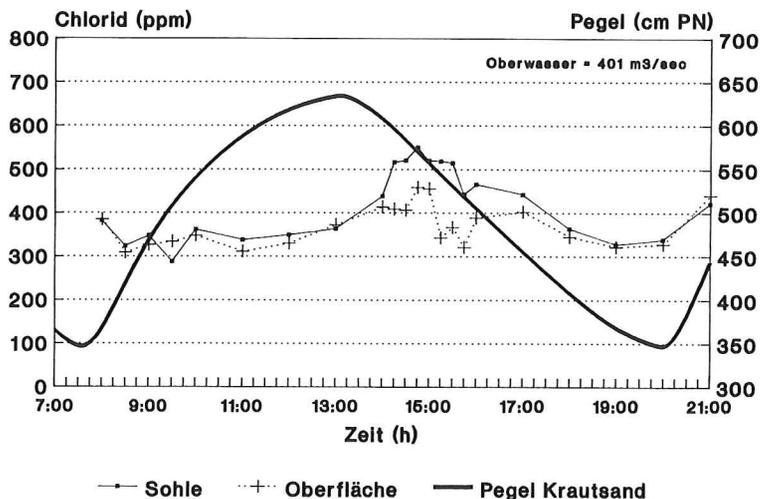


Abb. 12: Chloridgehalt am 22. 5. 1990 bei Elb-Kilometer 672,4 (Station 3), südlicher Tonnenstrich, Probenentnahme an Sohle und Oberfläche (Wasserstand: Pegel Krautsand)

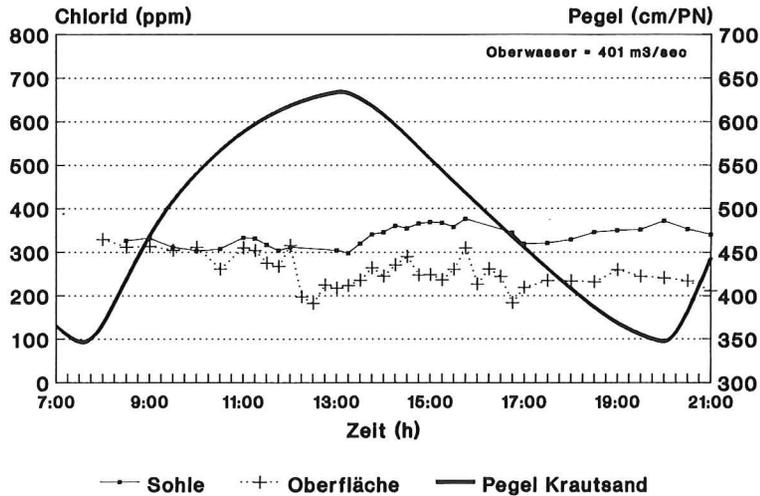


Abb. 13: Chloridgehalt am 22. 5. 1990 bei Elb-Kilometer 669,5 (Station 4), südlicher Tonnenstrich, Probenentnahme an Sohle und Oberfläche (Wasserstand: Pegel Krautsand)

Nach Abb. 13 ist evident, daß in der ersten Hälfte der Flutphase eine gute Durchmischung der Wassersäule zu beobachten ist. Erkennlich wird dies an den sehr geringen Salzgehaltsunterschieden zwischen Sohle und Oberfläche.

Ab 12 Uhr nehmen die Unterschiede zwischen Sohle und Oberfläche jedoch stark zu – eine Deutung ist problematisch, da dies Phänomen auch über Ebbstrom anhält.

Auffällig sind die im Laufe des Ebbstroms (zwischen 17 Uhr und 20 Uhr) ansteigenden Sohlen-Chloridwerte. Diese Beobachtung kann bereits bei der unterstromig gelegenen Station 3 gemacht werden. Es muß vermutet werden, daß ein (unbekannter) Einleiter oberstromig der Meßstelle der Elbe „Salze“ zuführt, die mit dem Ebbstrom mundungswarts transportiert werden.

### 3.5 Der Chloridgehalt im Längsprofil

Die vier Meßstationen waren am 22. 5. 1990 jeweils rd. 3000 m im Längsprofil aufeinanderfolgend angeordnet.

Wie Abbildung 14 zeigt, tritt der größte Sprung des stromauf abnehmenden Chloridgehaltes zwischen km 678,2 (Station 1) und km 675,5 (Station 2) in Erscheinung. Hier liegt im wesentlichen die „Frontlinie“ des ästuarinen Salzkeils der Unterelbe.

Auch die Abb. 15 belegt dies sehr deutlich: Über die Strecke dünnt der Chloridgehalt aus. Während von 13:30 Uhr auf 15:30 Uhr (dann: in zeitlicher Nähe zum Kenterpunkt) bei km 678,2 (Position 1) noch eine signifikante Steigerung des Salzgehaltes zu verzeichnen ist, verändert sich bei km 672,4 (Position 3) der Wert nur noch relativ geringfügig. Die Position 4 (km 669,5) stellt bei der Messung vom 22. 5. 1990 nahezu die Spitze der Salzunge dar, die nur noch im letzten Flutast die Meßstelle tangiert.

Das in Abb. 16 dargestellte Chlorid-Längsprofil scheint die bereits angedeutete Hypothese einer die Brammerbank umströmenden „Salzsichel“ zu bestätigen.

Dargestellt wird hier ein zusätzlich zu den regulären vier Meßstationen aufgemessenes

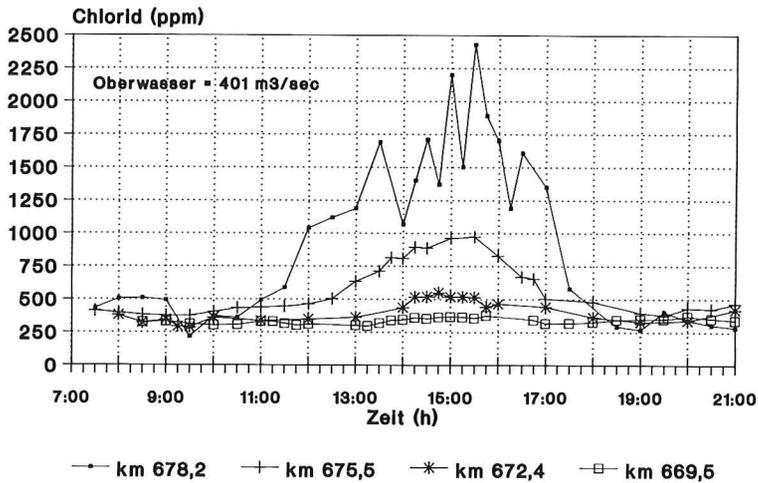


Abb. 14: Chloridgehalt der Unterelbe am 22. 5. 1990 bei den Meßstationen ,1' (km 678,2), ,2' (675,5), ,3' (km 672,4) und ,4' (km 669,5)

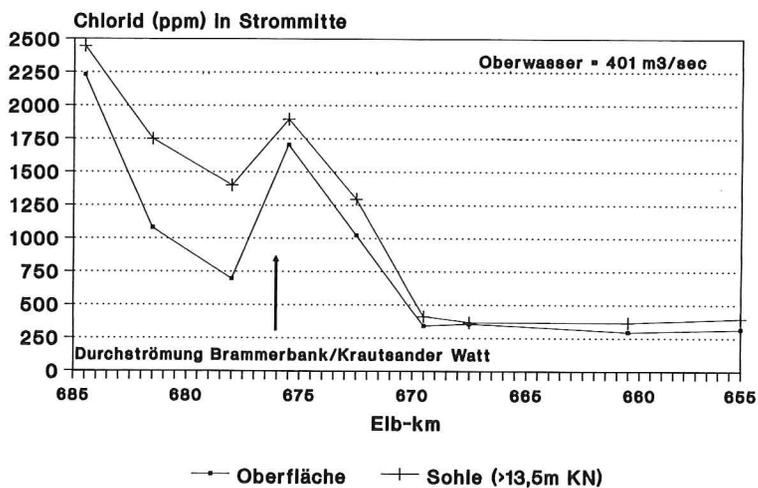


Abb. 15: „Salzkeil“-Darstellung im Unterelbebereich zwischen Kilometer 678,2 und 669,5 für die Messung am 22. 5. 1990

dynamisches Längsprofil (Beprobung vom stromauf den Kenterpunkt begleitenden Meßfahrzeug MS Libelle). Der Chloridgehalt wurde an neun Längsprofil-Punkten jeweils

- bei Kenterpunkt des Stromes
- in Strommitte
- an der Sohle bzw. Oberfläche aufgenommen.

Es zeigt das bereits in Abschnitt 3.2 kommentierte Ergebnis, daß ziemlich genau auf Höhe der Durchströmung zwischen Brammerbank und Krautsander Watt, und damit im Bereich des „Wiedereintritts“ der südlichen Umströmung der Brammerbank, ein gestörtes Chlorid-Längsprofil zu beobachten ist – mit großer Wahrscheinlichkeit eine Folge des

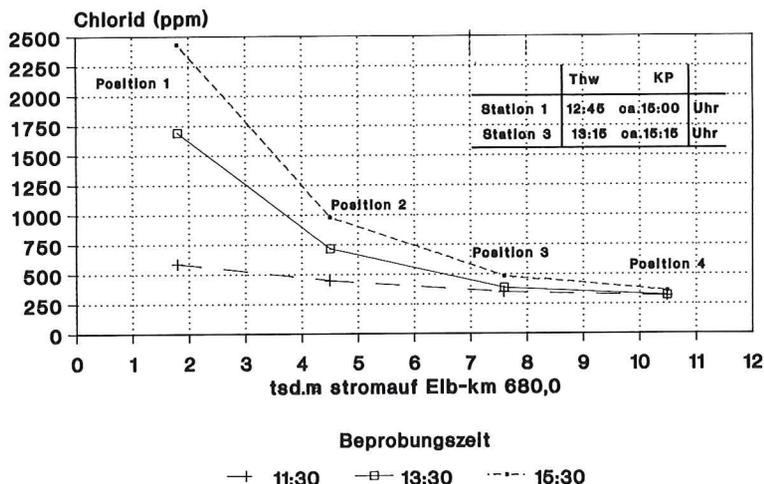


Abb. 16: Chlorid-Längsprofil vom 22. 5. 1990, beprobt je angegebenem Standort bei Kenterpunkt Flut auf Ebbe in Strommitte

coriolisbedingt erfolgenden und sichelartig verlaufenden Vorstoßes chloridreicheren Flutstrom-Wassers aus dem Bereich der „Ableitung“ bei Elb-Kilometer 682 (Freiburg).

Zur Verdeutlichung dieser Vorstellung dient die Abb. 17. Sie zeigt gemäß der tatsächlich bei Kenterpunkt gemessenen Chloridverteilungen die vermutlichen Transportwege des Chlorids in Form einer Isohalinen-Skizze.

Ohne Frage wäre es in einem nächsten Schritt wichtig zu erfahren, in welcher Form tatsächlich binnenseitig der Brammerbank bzw. des Krautsander Watts die Chloridverteilung abläuft. Hierzu ist jedoch ein verhältnismäßig großer Meßaufwand notwendig, da zusätzlich zur Datenaufnahme im Bereich der Hauptelbe parallele Referenzstationen in den Seitenbereichen betrieben werden müssen.

#### 4. Salzgehalt und Oberwasser

Nach Auswertung der in den letzten 10 Jahren regelmäßig zu unterschiedlichen Oberwasserbedingungen durchgeführten Salzgehalts-Querprofilmessungen (über jeweils eine volle Tide an 3 Meßlotrechten, jeweils Sohle und Oberfläche, bei Elb-km 679,8) kann festgestellt werden, daß bei rd. 500 m<sup>3</sup>/s Oberwasserführung eine „kritische“ Grenzmarke zur Erhöhung des Salzgehaltes im Untersuchungsgebiet besteht:

Nach Abb. 18 zeigt sich, daß bei Unterschreiten von 500 m<sup>3</sup>/s Oberwasserführung die Wahrscheinlichkeit bzw. Intensität eines stromauf vorstoßenden Salzkeils außerordentlich erhöht ist.

Der Wert von 500 m<sup>3</sup>/s Oberwasser ist ein sehr interessantes Ergebnis hinsichtlich der bereits zu Beginn erwähnten Tatsache, daß nämlich genau ab Unterschreitung dieser Grenzmarke die Wahrscheinlichkeit zum Auftreten von Baggern vor der Insel Rhinplatte drastisch ansteigt (s. Abb. 7)!

Es kann nun spekuliert werden, ob nicht tatsächlich eine Beziehung zwischen der Oberwasserführung und dem Einsetzen von Mindertiefen vor Rhinplatte besteht.

Allerdings scheint der Mechanismus dieser Wechselbeziehung weniger über den reinen

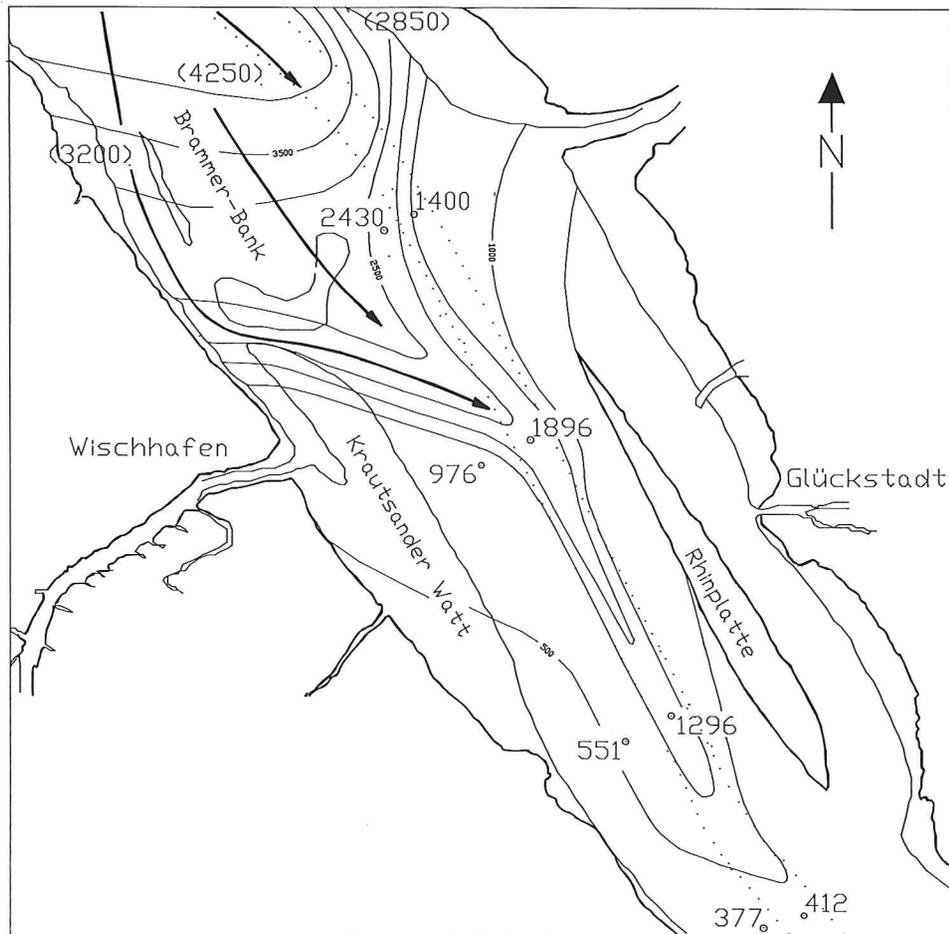


Abb. 17: Isohalinen-Skizze nach Chlorid-Verteilung vom 22. 5. 1990 (je Meßstelle Darstellung der Chlorid-Werte in ppm bei Kenterpunkt);  $\rightarrow$  = Chlorid-Transportbahnen;  $- -$  = Isohalinen (Äquidistanz 500 ppm)

Salzgehalt, d. h. die Ausfällung von Schwebstoff aus dem Wasserkörper, zu funktionieren, als vielmehr über die Veränderung des Stromauftransportes von Sediment mittels eines vergleichsweise erheblich verstärkten Flutstroms.

Zur Erläuterung sei auf die Ergebnisse aus DAMMSCHNEIDER (1989) verwiesen. Danach ist folgende „Kausal“-Abhängigkeit für die Unterelbe erkennbar:

1. Mit Abnahme des Oberwassers ist eine Abnahme des Ebbdauerüberschusses verbunden.
2. Mit Abnahme des Ebbdauerüberschusses/mit Abnahme des Oberwassers kann im Untersuchungsgebiet eine negative Abweichung der Thw vom Mthw beobachtet werden.
3. Mit Absenkung des Ebbdauerüberschusses/des Oberwasserabflusses/der Thw nehmen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet „Baggerstelle Rhinplatte“ signifikant ab.
4. Mit einem Absinken der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten wird die Sedimentationszeit, d. h. die Zeit des Unterschreitens der Grenzschleppkraft, zwingenderweise größer.

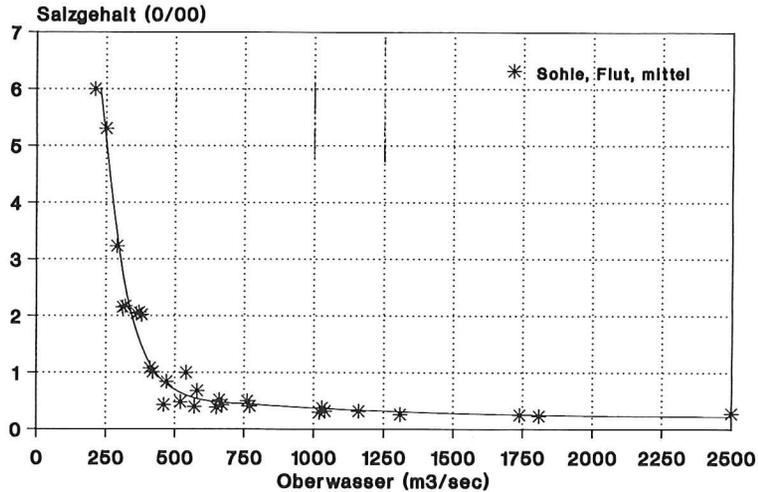


Abb. 18: Der Chloridgehalt der Unterelbe bei km 680 in Abhängigkeit vom Oberwasser. Dargestellt: 28 Messungen des Zeitraumes 1979 bis 1989, jeweils Mittelwerte einer Flutphase (nach Unterlagen des WSA Hamburg)

5. Mit Unterschreiten von  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  Oberwasserführung dringt in sehr starkem Maße salzhaltiges (Boden-)wasser in den Bereich der Baggerstelle Rhinplatte vor.
  6. Mit dem (ab  $< 500 \text{ m}^3/\text{s}$  Oberwasser verstärkten) bodennahen Salzwasserkeil ist ein verstärkter stromaufwärts gerichteter Dichte- bzw. Materialtransport verbunden.
- Die Punkte 1–6 ergeben nun unter Berücksichtigung des im Bereich der Baggerstelle Rhinplatte relativ zu großen morphologischen Querschnitts (s. Abb. 19) bei Unterschreiten des Oberwasser-Abflußwertes von  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  eine deutlich erhöhte Wahrscheinlichkeit zur Sedimentation von natürlichem, im Längstransport befindlichen Umlagerungsmaterial.

Mit anderen Worten: Aufgrund der vorstehenden Abhängigkeiten zwischen Oberwasser, Wasserstand, Strömung und Morphologie treten naturbedingt Verhältnisse ein, die in erheblichem Umfang Material in den Tiefwasserbereich (in die Fahrrinne) vor der Insel Rhinplatte eintreiben bzw. zur Sedimentation kommen lassen.

### 5. Schwebstoffgehalt und Strömungsgeschwindigkeit

Schwebstoffproben konnten in regelmäßigen Abständen bei Station 2 (km 675,5) gesammelt werden: Hier war auf der „MS Nige Wark“ eine Zentrifuge zur Extrahierung von Schwebstoffen aus 200 l Sohlenwasserproben verfügbar. Demgegenüber wurden auf Station 1 (km 678,2) allein zu zwei Zeitpunkten Sohlenwasserproben gezogen und zentrifugiert, andererseits aber eine halbtidenübergreifende Sammel-Probe mit einem neuartigen Schwebstoffsammler (s. Abb. 20) entnommen.

Dabei zeigte sich, daß die Station 1 eine außerordentliche Konzentration des Schwebstofftransportes auf dem Ebbstrom besitzt: Absolut wurden während der Ebbphase 777,4 g Material gesammelt, während der Flutphase jedoch nur 44,6 g!

Es darf angenommen werden, daß dies ein indirekter Hinweis auf die tideweise stark differierenden Verläufe der Haupttransportbahnen darstellt.

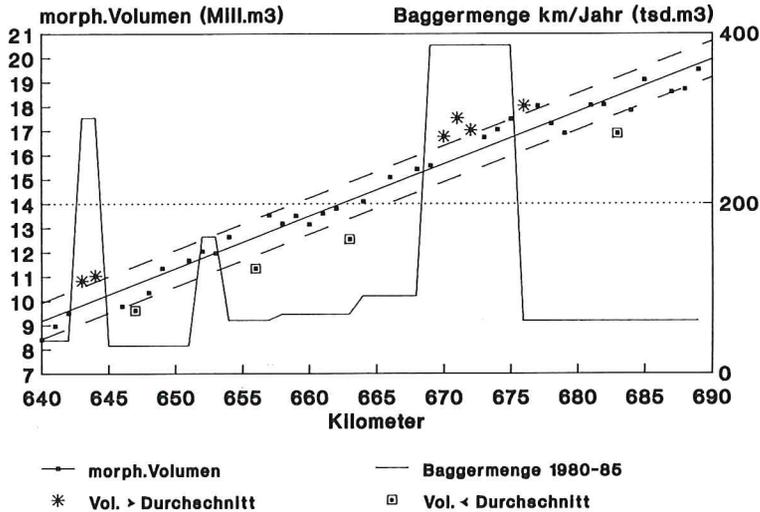


Abb. 19: Morphologisches Volumen und Baggermengen im Bereich des WSA Hamburg (Volumenangaben nach DAMMSCHNEIDER, 1983)

Demgegenüber fällt im Liegebereich der bei km 675,5 stationierten „MS Nige Wark“ die sehr enge Beziehung zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstoffgehalt im Flutast auf (s. Abb. 21).

Im Vergleich dazu weist der Ebbast (absolut) erheblich geringere Schwebstoffwerte auf, und auch die Veränderlichkeit ist eher eine zeitliche („Akkumulation“/Anstieg über die Zeit), als eine von der (Ebb-)Strömungsgeschwindigkeit geprägte.

Das deutet in Zusammenschau mit den Ergebnissen der Station 1 (km 678,2) sowie den Analysen der räumlichen Chloridverteilung (Abschnitt 3.1–3.5) an, daß die flächenhafte Verteilung des Stofftransportes wie folgt aussehen könnte:

Mit dem Flutstrom und einer starken Rechtsablenkung wird sehr viel Feinmaterial aus dem Längstransport hinter die Brammerbank gezogen. Aufgrund des zum Hauptstrom hin weitestgehend geschlossenen Sandes der Brammerbank wird dieser konzentrierte „Stoff“-Transport (Schweb/Chlorid) erst auf Höhe des km 677, d. h. in der derzeitigen Durchströmung zwischen Brammerbank und Krautsander Watt, in die Hauptelbe „zurück“-entlassen.

Demgegenüber findet bei Ebbstrom eine Konzentration des Materialtransports im Hauptelbe-Längsprofil statt (im Grunde ebenfalls mit einer Rechtsablenkung, nun jedoch zum Nordufer bzw. Strommitte), die weniger Material zum Südufer bzw. dem Krautsander Watt (Meß-Station 2) verfrachtet, als vielmehr mit einem gedachten Stromfaden zur Außenkante/Hauptelbeseite der Brammerbank.

Diese Deutung befindet sich in voller Übereinstimmung mit Beobachtungen des Verfassers (DAMMSCHNEIDER, 1988) zum Ebb-Materialtransport entlang der Außenkante des Krautsander Watts bzw. dem Flut-Transport binnenseitig der Brammerbank in Richtung Wischhafener Süderelbe/Überströmung des Krautsander Watts im Bereich der Wurzelzone bei Kilometer 675.

Hinsichtlich der episodischen Mobilisierung von fluid-mud kann ein exemplarisches Längsprofil von vier im Bereich der „Baggerstelle Rhinplatte“ aufeinanderfolgender Strömungsmeßstationen einen neuen Einblick in das Naturgeschehen liefern.

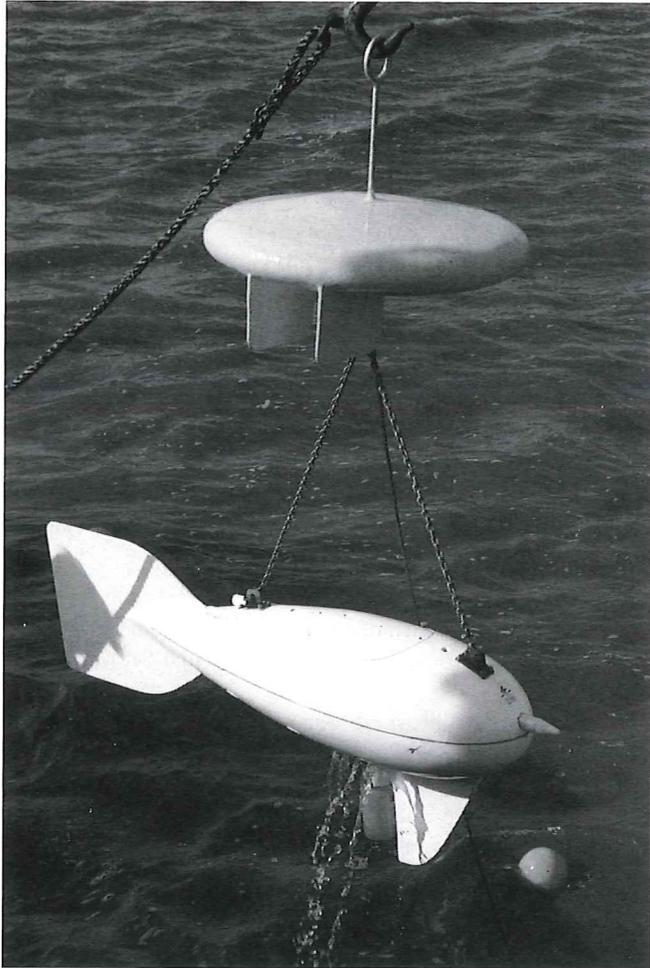


Abb. 20: Schwebstoffsammler; Prototyp der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Entwurf: H. Düber/ WSA HH und L. Reinemann/BfG)

Wie die Abb. 22 anhand der (hier morphodynamisch typisierenden)  $V_{\max}$ -Geschwindigkeiten zeigt, wird mit laufendem Ebbstrom oberstromig der Baggerstelle Rhinplatte ein bemerkenswert stark ausgeprägter Geschwindigkeitsgipfel ausgebildet. Allerdings, und das liefert vermutlich einen wesentlichen Grund für das aperiodisch/schlagartige Auftreten von eintreibendem fluid-mud, nicht immer!

Vergleichsmessungen belegen nämlich, daß an dieser Meßstelle im Normalfall Ebb-Tiden mit einem etwas reduzierten  $V_{\max}$ -Gipfel dominieren. Wenn jedoch, wie am 22. 5. 1990 geschehen, innerhalb kurzer Zeit eine Geschwindigkeitszunahme des Ebbstroms auf bis zu 172 cm/s (= + 74 % in 60 Minuten) einsetzt, muß zwangsläufig eine sehr starke Turbulenzwirkung den Wasserkörper durchdringen. In diesem Zuge kann grundsätzlich sehr viel Material in Bewegung gebracht werden.

Dies allein wäre nicht unbedingt außergewöhnlich. Im Zusammenhang mit dem im Bereich der Kilometer 671 bis 675 übergroßen Querschnitt, quantifiziert durch das soge-

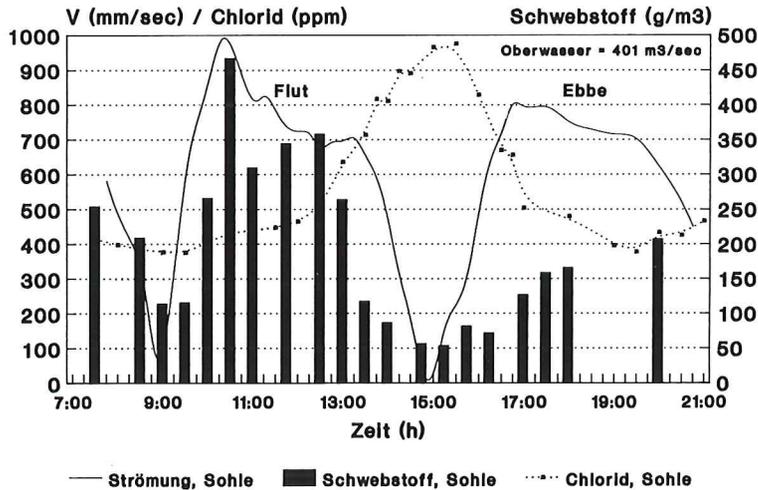


Abb. 21: Schwebstoffgehalt, Chlorid und Strömung an der Sohle bei Elb-Kilometer 675,5 (Station 2, südlicher Tonnenstrich) am 22. 5. 1990

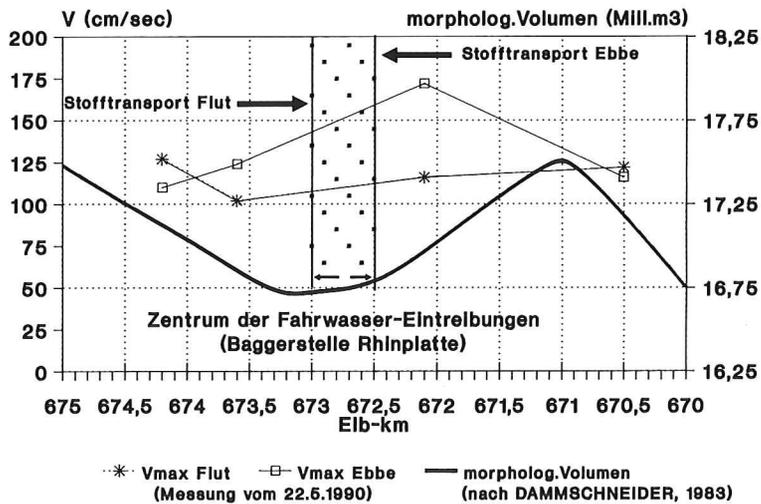


Abb. 22: Strömung und morphologisches Volumen zwischen Elb-Kilometer 670 und 675 (Baggerstelle Rhinplatte). Strömung gemessen am 22. 5. 1990

nannte „morphologische Volumen“ (DAMMSCHNEIDER, 1983), tritt jedoch der Fall ein, daß ober- oder unterstromig der Rhinplatte mobilisiertes Material genau im Fahrwassersektor vor der Insel Rhinplatte in ein tendenzielles Sedimentationsmilieu gerät:

Die Stromgeschwindigkeiten sind in diesem Bereich bei Flut- wie Ebbstrom geringer als ober- bzw. unterstromig.

Die geschilderten Systemzusammenhänge führen damit zu einer morphologischen Inhomogenität, die im Fazit große wasserbauliche Probleme verursacht. Lösungsmöglichkeiten sollen an dieser Stelle nicht aufgezeigt werden, wären jedoch unter Beachtung des übergeordneten Wechselspiels der Systemparameter denkbar.

## 6. Schriftenverzeichnis

- ASTER, D. und MEYER, E.: Verbesserte Bestimmung der nautischen Tiefe im Emdener Fahrwasser. HANSA, Nr. 23–24, 1990.
- BAEHR, T.: Morphodynamik im Elbeästuar – Akkumulation von Feinmaterial in der Fahrrinne auf der Grundlage einer flächenhaften Sedimentkartierung. Unveröffentl. Diplom-Arbeit, Hamburg, 1990.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Gutachten über Modellversuche Rhinplatte im Elbemodell mit fester Sohle. Unveröffentl. Gutachten, BAW, Hamburg, 1990.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Inluviale Schwemmfächer – Über die lokalen Folgen natürlicher Materialumlagerungen im Bereich der Unterelbe. Die Küste, H. 43, 1986.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Flächenhafte Materialanalyse und Sohlformeninterpretation – Grundlagen zur Bestimmung der gerichteten Morphodynamik im Elbeästuar. Unveröffentlichte Untersuchung, Hamburg, 1986.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Luftbildkartierung von Schwimmerbahnen – Eine Methode zur iterativen Aufnahme von flächenhaften Strömungsverteilungen und ihr Vergleich zur punktuellen In-Situ-Meßwertgewinnung. Die Küste, H. 47, 1988.
- KIRBY, R. und PARKER, W. R.: Seabed density measurements related to echo sounder records. Dock and Harbour Auth., Nr. 54, 1974.
- KIRBY, R. und PARKER, W. R.: The behaviour of cohesive sediment in the Inner Bristol Channel and Severn Estuary in relation to construction of the Severn Barrage. Report 117 of Inst. of Oceanogr., Taunton, 1981.
- LUCHT, F.: Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Bd. 6, 1953.
- NÖTHLICH, I.: Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Strömung und Schwebstoffgehalt in der Unterelbe. Aus der hydrobiologischen Abteilung des zoologischen Staatsinstituts und zoologischen Museums, Hamburg, 1967.
- PIANC: Underkeel clearance for large ships in maritime fairways with hard bottom. Bulletin Nr. 51, 1985.
- POSTMA, H. und KALLE, K.: Die Entstehung von Trübungszonen im Unterlauf von Flüssen, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe. Deutsche Hydrogr. Zeitschrift 8, 1955.
- ROHDE, H.: Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstofftransport in einem Tidefluß. Die Küste, H. 25, 1974.